



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Campus Bauru



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

SAULO AGUIAR SAES

**Análise do desempenho de diferentes fluidos de corte aplicados na
técnica de MQL na retificação cilíndrica de mergulho do aço AISI 4340
com rebolo de CBN**

**Bauru, SP
2019**

Análise do desempenho de diferentes fluidos de corte aplicados na técnica de MQL na retificação cilíndrica de mergulho do aço AISI 4340 com rebolo de CBN

SAULO AGUIAR SAES

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

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi

Bauru – SP
2019

Saes, Saulo Aguiar.

Análise de desempenho de diferentes fluidos de corte aplicados na técnica de MQL na retificação cilíndrica de mergulho do aço AISI 4340 com rebolo de CBN. / Saulo Aguiar Saes, 2019. 83 f.

Orientador: Eduardo Carlos Bianchi

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2019.

1. Retificação cilíndrica. 2. Mínima quantidade de lubrificante (MQL). 3. Rebolo CBN. 4. Aço AISI 4340. 5. Fluido de corte. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

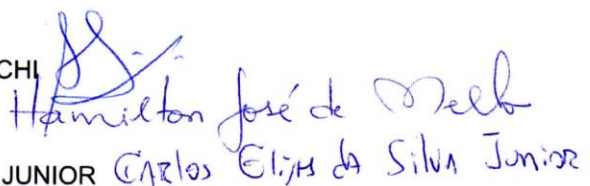
ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE SAULO AGUIAR SAES, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 26 dias do mês de julho do ano de 2019, às 14:00 horas, no(a) Anfiteatro da Seção Técnica de Pós-graduação da FEB, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Dr. HAMILTON JOSÉ DE MELLO do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. CARLOS ELIAS DA SILVA JUNIOR do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de SAULO AGUIAR SAES, intitulada **ANÁLISE DO DESEMPENHO DE DIFERENTES FLUIDOS DE CORTE APLICADOS NA TÉCNICA DE MQL NA RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA DE MERGULHO DO AÇO AISI 4340 COM REBOLO DE CBN**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI

Dr. HAMILTON JOSÉ DE MELLO

Prof. Dr. CARLOS ELIAS DA SILVA JUNIOR



Dedico esta conquista ao meus pais Olívio Carlos Saes e Carmelita de Aguiar Saes, minha esposa Priscilla Alves Saes e minha filha Manuela Alves Saes.

AGRADEÇO

Agradeço a Deus por todas as bênçãos que me proporcionou ao longo de toda minha vida, e por me guiar dando força, saúde e disposição para que eu pudesse concluir este trabalho.

À minha amada esposa Priscilla Alves Saes, pela compreensão e apoio incondicional em todas as horas.

A minha filha Manuela Alves Saes que é a razão da minha luta e dedicação em tudo que faço.

Aos meus pais Olívio Carlos Saes e Carmelita de Aguiar Saes pelos ensinamentos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi, pelo auxílio, ajuda e confiança, desde o início deste trabalho. Expresso minha total gratidão e apreço não somente aos conhecimentos compartilhados, mas também pelo profissionalismo e exemplo de ser humano.

Às Empresas Saint Gobain (Norton) pela doação dos rebolos e apoio fornecido ao grupo de pesquisa, ITW pela doação dos fluidos de corte MQL e à Quimatic Tapmatic pela doação do fluido de corte ME-1.

Ao Senai Londrina pela ajuda nos recursos disponibilizados e por acreditar e se preocupar com a qualificação de seus professores.

À Universidade Estadual Paulista, UNESP, campus de Bauru, pelos recursos disponibilizados, por acreditar e se preocupar com a educação dos alunos; e pela oportunidade que me foi dada.

Aos Professores da Faculdade Engenharia de Bauru, obrigado pelo auxílio e pelo empenho na concretização deste trabalho.

Aos servidores da Faculdade Engenharia de Bauru, obrigado por todo o suporte que me foi dado.

Aos alunos da Faculdade de Engenharia de Bauru, especialmente Bruno Kenta Sato (aluno de iniciação científica) e José Claudio Lopes (aluno de pós-graduação) pelo grande apoio e empenho durante a realização dos experimentos.

A todos que de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho.

“Há homens que lutam um dia e são bons, há outros que lutam um ano e são melhores, há os que lutam muitos anos e são muito bons, mas há os que lutam toda a vida e estes são imprescindíveis”. **(Bertolt Brecht)**

RESUMO

Com o desenvolvimento da indústria metal-mecânica e a crescente demanda por formas mais ecológicas de utilização e manutenção dos recursos naturais, tem-se a meta de utilizar e gerar menos resíduos que sejam nocivos ao meio-ambiente, bem como aos seres humanos. Isso se aplica aos processos de usinagem, nos quais se procuram por fontes alternativas de lubrificação, as quais reduzam os malefícios gerados ao ecossistema. Seguindo essa vertente tem-se a técnica de mínima quantidade de lubrificação - MQL, a qual preza por uma maior eficiência do processo ao utilizar menos fluido se comparada com o uso de líquidos refrigerantes em abundância. Porém, a utilização de MQL demanda certos cuidados no que se refere à limpeza da zona de corte, e às trocas de calor do sistema ferramenta-peça. Portanto, o presente trabalho analisou o comportamento da técnica de MQL associada à limpeza, onde foram utilizados três tipos de fluidos: Rocol Biocut 9000 fluido próprio para a aplicação na técnica de MQL, Quimatic Tapmatic ME-2: fluido sintético, normalmente utilizado na refrigeração convencional, mas que tende a ter resultados bons na utilização em MQL e um terceiro fluido VCI Aqua 180: fluido com propriedades anticorrosivas e com inibidor de empastamento. Todos os fluidos foram diluídos nas proporções 1:5 ou seja uma parte de óleo e cinco partes de água (83% de diluição em água), 1:10 ou seja uma parte de óleo e dez partes de água (90,90% de diluição em água) além do óleo puro. Dessa forma, foram analisadas variáveis de saída do processo, sendo a rugosidade, desvios de circularidade, relação G (volume de material removido/ volume de rebolo desgastado), microdureza, microscopia óptica da superfície da peça, potência elétrica consumida, emissão acústica e vibração. Os resultados dos estudos demonstraram que, a adição de água contribuiu positivamente para os valores de rugosidade em todos os fluidos de corte testados. Além disso, observou-se que a técnica de MQL aliada com o sistema de limpeza com ar comprimido da superfície de corte do rebolo, obteve resultados compatíveis com a rugosidade provida pela refrigeração convencional, de modo geral todos os parâmetros analisados proporcionaram um desempenho superior com adição de água, pelo maior efeito refrigerante promovido pela técnica.

Palavras-chave: *Retificação cilíndrica externa, mínima quantidade de lubrificante (MQL), aço AISI 4340, rebolo de CBN.*

ABSTRACT

With the development of the metal-mechanic industry and the growing demand for more ecological ways of using and maintaining natural resources, the goal is to use and generate less waste that is harmful to the environment as well as to humans. This applies to machining processes in which alternative sources of lubrication are sought, which reduce the damage to the ecosystem. Following this strand is the technique of minimum amount of lubrication - MQL, which values a greater efficiency of the process when using less fluid when compared with the use of abundant soft liquids. However, the use of MQL requires certain care regarding the cleaning of the cutting zone, and the heat exchanges of the tool-part system. Therefore, the present work analyzed the behavior of the MQL technique associated to cleaning, where three types of fluids were used: Rocol Biocut 9000 suitable for the application in the MQL technique, Quimatic Tapmatic ME-2: synthetic fluid, normally used in refrigeration conventional but which tends to have good results in the use in MQL and a third VCI Aqua 180 fluid: fluid with anticorrosive properties and with impasto inhibitor. All the fluids were diluted 1: 5 in either one part oil and five parts water (83% dilution in water), 1:10 or one part oil and ten parts water (90.90% dilution in water) plus pure oil. In this way, process output variables were analyzed, such as roughness, circularity deviation, G ratio (volume of removed material / volume of worn grinding wheel), microhardness, optical microscopy of the workpiece surface, electric power consumed, acoustic emission and vibration . The results of the studies showed that the addition of water contributed positively to the roughness values in all the cutting fluids tested. Furthermore, it was observed that the MQL technique combined with the grinding surface compressed air cleaning system, obtained results compatible with the roughness provided by conventional cooling, in general all the parameters analyzed provided a superior performance with addition of water, due to the greater cooling effect promoted by the technique.

Keywords: External cylindrical grinding, minimum quantity of lubricant (MQL), AISI 4340 steel, CBN grinding wheel.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Operação da retificação cilíndrica externa de mergulho (MALKIN 1989, adaptado).	31
Figura 3.1. Desenho técnico, fora de escala, do corpo de prova.	35
Figura 3.2. Bocal de Limpeza – a) Posicionador.....	36
Figura 3.3. Desenho técnico do bocal de limpeza.	37
Figura 3.4. Sistema de fixação e posicionamento do bocal de limpeza.	37
Figura 3.5. Fixação do bocal de limpeza na retificadora a 30°.	37
Figura 3.6. Unidade de controle do aplicador de fluido pela técnica MQL.	38
Figura 3.7. Desenho técnico do bocal utilizado na técnica de aplicação do MQL.	39
Figura 3.8. Sistema de ar comprimido para o MQL.....	39
Figura 3.9. Rugosímetro utilizado nas medições de rugosidade das amostras.....	40
Figura 3.10. Medidor de circularidade marca Taylor Hobson, modelo Talyrond 31C.	41
Figura 3.11. Detalhe da máquina de aferição do desvio de circularidade.	42
Figura 3.12. Método para avaliação de desgaste do rebolo: a) operação de impressão do rebolo na peça. b) peça após a impressão.	43
Figura 3.13. Esquema ilustrativo do processo: a) impressão do perfil do rebolo na peça. b) representação da área desgastada no rebolo.	43
Figura 3.14. Instrumento utilizado na medição de desgaste diametral do rebolo.	44
Figura 3.15. Representação da medição do desgaste.....	44
Figura 3.16. Representação do corte da amostra do corpo de prova e retirada de material para as análises metalográficas e determinação de microdureza.....	45
Figura 3.17. Amostra após o embutimento do corpo de prova em resina baquelite.	46
Figura 3.18. Lixadeira manual.....	46
Figura 3.19. Politriz Metalográfica marca STRUERS.	47
Figura 3.20. Microscópio Óptico utilizado na captação das imagens metalográficas.....	47
Figura 3.21. Microdurômetro utilizado na aferição da microdureza.....	48
Figura 3.22. Peça após a realização da medição de microdureza.....	49
Figura 3.23. Esquema para monitoramento e análise dos sinais.	50
Figura 3.24. Sensores para captação dos sinais.	50
Figura 3.25. Diagrama dos ensaios definitivos com fluido Rocol Biocut 9000.....	55
Figura 3.26. Diagrama dos ensaios definitivos com fluido Quimatic Tapmatic ME-2.....	56
Figura 3.27. Diagrama dos ensaios definitivos com fluido VCI Aqua 180.....	56

Figura 3.28. Planejamento dos ensaios.....	57
Figura 4.1. Rugosidade Média (Ra) para cada condição de lubrificação avaliada.....	58
Figura 4.2. Comportamento do parâmetro rugosidade na variação da porcentagem de água. .	59
Figura 4.3. Desvios de circularidade para cada condição de lubrificação avaliada.	61
Figura 4.4. Potência elétrica consumida para cada condição de lubrificação avaliada. ..	62
Figura 4.5. Emissão acústica para cada condição de lubrificação avaliada.	63
Figura 4.6. Vibração para cada condição de lubrificação avaliada.	64
Figura 4.7. Média dos desgastes diametrais do rebolo para cada condição analisada.	66
Figura 4.8. Microestrutura da amostra retificada utilizando a refrigeração convencional (1000x).....	67
Figura 4.9. Microestrutura da peça retificada utilizando a técnica de MQL com Biocut 9000 puro sem limpeza (1000x).	68
Figura 4.10. Microestrutura da peça retificada utilizando a técnica de MQL com ME-2 puro sem limpeza (de 1000x).....	68
Figura 4.11. Microestrutura da peça retificada utilizando a técnica de MQL com Aqua 180 diluído em 83% de água sem limpeza (1000x).....	68
Figura 4.12. Microdureza das peças retificadas utilizando a técnica de MQL com o fluido Biocut 9000.	69
Figura 4.13. Microdureza das peças retificadas utilizando a técnica de MQL com o fluido ME-2.	70
Figura 4.14. Microdureza das peças retificadas utilizando a técnica de MQL com o fluido Aqua 180.	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Composição química do aço AISI 4340	26
Tabela 4.1. Coeficientes angulares das retas de resposta da rugosidade em função da porcentagem de água.	59

LISTA DE ABREVIATURAS

AISI - American Iron and Steel Institute
AL₂O₃ - Óxido de Alumínio
CAD - Computer Aided Design
CBN – Nitreto de Boro Cúbico
C₂H₆O - Álcool Etílico Absoluto PA
CNC – Comando Numérico Computadorizado
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
EA – Emissão Acústica
EPI – Equipamento de Proteção Individual
H – Dureza
HNO₃ - Ácido Nítrico
HRc – Dureza Rockwell
HV – Dureza Vickers
MQL – Mínima Quantidade de Lubrificação

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Profundidade de retificação	(μm)
ad	Profundidade de dressagem	(μm)
ap	Profundidade de corte	(μm)
b	Largura de retificação	(mm)
de	Diâmetro equivalente	(mm)
ds	Diâmetro da ferramenta de corte – rebolo	(mm)
dw	Diâmetro da peça de trabalho	(mm)
heq	Espessura equivalente de corte	(μm)
hmax	Espessura teórica máxima do cavaco	(μm)
Fn	Força normal de corte	(N)
Ft	Força tangencial de corte	(N)
lc	Arco ou comprimento de contato	(μm)
ns	Velocidade ou rotação do rebolo	(RPM)
nw	Velocidade ou rotação da peça	(RPM)
Pw	Potência consumida	(W)
Qw	Taxa de remoção volumétrica	(mm^3/min)
Q'w	Taxa específica de remoção volumétrica	($\text{mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$)
Ra	Rugosidade média aritmética	(μm)
G	Relação G	(Z_w/Z_s)
t	Tempo de retificação	(s)
ts	Tempo de centelhamento (<i>spark-out</i>)	(s)
V	Tensão elétrica	(V)
Vf	Velocidade de avanço do rebolo ou velocidade de mergulho	(mm/min)
Vs	Velocidade de corte	(m/s)
Vw	Velocidade tangencial da peça de trabalho	(m/s)
Zs	Volume de rebolo gasto	(mm^3)
Zw	Volume de material removido	(mm^3)
δ	Deflexões do sistema	[$^\circ$]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 Motivação	17
1.2 Objetivo	18
1.3 Estrutura	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Fluido de Corte	19
2.1.1 Problemas na utilização do fluido de corte.....	20
2.1.2 Técnica da mínima quantidade de lubrificação (MQL).....	21
2.1.2.1 Determinando parâmetros da técnica MQL com modelos numéricos	22
2.2 Sistema Auxiliar para Limpeza do Rebolo.....	23
2.3 Rebolo de Nitreto Cúbico de Boro	23
2.4 Parâmetros do Processo de Retificação Cilíndrica Externa de Mergulho	24
2.5 Aço AISI 4340 Temperado e Revenido	26
2.6 Variáveis de Saída do Processo de Retificação Cilíndrica de Mergulho	27
2.6.1 Rugosidade	27
2.6.2 Desvios de circularidade.....	28
2.6.3 Desgaste diametral do rebolo – relação G.....	28
2.6.4 Microdureza.....	29
2.6.5 Microscopia Óptica	30
2.6.6 Força tangencial de corte.....	30
2.6.7 Emissão acústica (EA).....	32
2.6.7.1 Monitoramento na retificação utilizando emissão acústica.....	32
3. MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1 Equipamentos e Materiais Utilizados	34
3.1.1 Rebolo e dressagem.....	34
3.1.2 Corpos de prova.....	35
3.1.3 Fluidos de corte utilizados.....	35

3.1.4 Sistema de limpeza	36
3.1.5 Sistema MQL.....	38
3.1.6 Sistema de refrigeração convencional	40
3.2 Parâmetros de Saída Analisados	40
3.2.1 Rugosidade	40
3.2.2 Circularidade	41
3.2.3 Desgaste Diametral do rebolo	42
3.2.4 Microscopia óptica	45
3.2.5 Microdureza.....	48
3.2.6 Emissão Acústica.....	49
3.2.7 Potência elétrica consumida	50
3.2.8 Vibração	51
3.3 Análise dos Parâmetros do Processo.....	51
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	58
4.1 Rugosidade	58
4.2 Desvios de Circularidade	60
4.3 Potência Elétrica Consumida	62
4.4 Emissão Acústica	63
4.5 Vibração	64
4.6 Desgaste Diametral do Rebolo.....	65
4.7 Microscopia e Microdureza	66
5. CONCLUSÕES.....	72
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	73
REFERÊNCIAS.....	74

1. INTRODUÇÃO

A retificação é considerada um processo de usinagem por abrasão por possuir em seu sistema um rebolo constituído de grãos abrasivos, ligante e poros, o qual rotaciona à altas velocidades usualmente acima de 30 m/s (em relação ao torneamento e fresamento) e cuja finalidade é gerar alta precisão dimensional e geométrica, associada a um excelente acabamento superficial na peça retificada (ANJOS, 2015). Suas principais diferenças em relação aos outros processos de usinagem são: a maior área de contato entre o rebolo e a peça, assim como o excessivo atrito entre os grãos abrasivos e a superfície da peça (BRINKSMEIER et al., 1999).

Porém, a retificação é um dos processos de usinagem mais complexos, pois envolve uma gama de parâmetros e variáveis que podem influenciar drasticamente no processo (ALVES et al., 2008).

Durante a retificação, grande parte da energia é transformada em calor, aumentando a temperatura na zona de corte. Caso essa temperatura não seja mantida em níveis aceitáveis, podem ocorrer tensões residuais na peça comprometendo a superfície e integridade estrutural da mesma. Para adequar a dissipação de calor gerada, faz-se necessária a utilização de fluidos 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 (ANJOS et al., 2016).

Embora o uso de fluido de corte seja necessário para aumentar a produtividade e a vida útil do rebolo, evitando danos às peças usinadas, sua utilização deve ser tratada com cuidado. Os elementos químicos que os contém são nocivos à natureza e, portanto, podem gerar problemas à saúde dos operadores e danos ao meio ambiente. Na lubrificação refrigeração convencional (uso de óleo em abundância) há também a necessidade de manutenção do reservatório de fluido, filtragem e descarte, o que encarece demasiadamente o processo (BIANCHI et al., 2018).

No entanto, há uma procura por uma fonte alternativa de lubrificação que mantenha ou melhore o acabamento e qualidade desse processo de usinagem, cause menos impactos ao meio ambiente e seja economicamente mais viável. O modelo que emergiu e recebeu evidência em relação ao método tradicional foi a mínima quantidade de lubrificação (MQL), a qual usa a mistura de ar comprimido e óleo aplicados à zona de corte. Ele se adequa bem nas mais diversas operações de usinagem, possibilitando uma menor quantidade de fluido (inferior a 240 ml/h), máquinas mais limpas e um ambiente de trabalho menos nocivo ao operador (WALKER, 2013).

A partir dessa dificuldade, foram realizados ensaios no laboratório, nos quais se desenvolveu um sistema de limpeza do rebolo durante o processo, por meio do uso de um bocal de ar comprimido (OLIVEIRA et al., 2012), o que torna próspero o estudo do uso da técnica MQL na operação de retificação, e abre caminhos para o estudo de aplicações de fluidos biodegradáveis pelo meio desta técnica em conjunto com o sistema de limpeza do rebolo. Com isso, o volume de fluido empregado pela técnica convencional, que emprega vazões entre 5.000 e 360.000 ml/min é drasticamente reduzido para 4 ml/min, assim, seu uso é uma escolha bem vista em termos ambientais e qualitativos em relação à técnica convencional.

1.1 Motivação

O avanço progressivo dos processos de fabricação, em particular a usinagem por abrasão, vem causando o desenvolvimento de novas pesquisas com efeitos positivos para que se tenha um processo de fabricação mais limpo, com a redução de resíduos e o atendimento pleno às legislações ambientais e a saúde humana. O estudo da refrigeração convencional versus a implantação da técnica da mínima quantidade de fluido, acompanha essa tendência e contribui para desenvolvimento do processo, pois o método utiliza uma pequena quantidade de fluido de corte, assim diminui os riscos de poluição, pois a quantidade é tão pequena que não sobra fluido para ser descartado.

É importante encontrar as potencialidades desse método que ainda precisam ser aprimoradas, para produzir peças com a mesma qualidade obtida com o uso dos fluidos de corte em abundância nos processos de retificação.

Diante dessa necessidade, o presente estudo busca através da comparação do sistema convencional de lubrificação em abundância, com a técnica de mínima quantidade de lubrificante (MQL) sem e com sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo de CBN por diferentes fluidos de lubrificação melhores resultados para o processo de retificação, diminuindo a alta geração de resíduos e obtendo resultados similares ou melhores que os apresentados pela técnica convencional que utiliza fluido em abundância.

Dessa maneira, o sistema de lubrificação MQL busca o desenvolvimento do processo de retificação e a partir de dados concretos obtidos experimentalmente, aponta novas alternativas práticas que possam ser aplicadas nas indústrias, tornando o método conveniente e possível em comparação à técnica convencional de lubrificação.

1.2 Objetivo

Este trabalho teve por objetivo analisar de forma comparativa os resultados obtidos na retificação cilíndrica de mergulho do aço AISI 4340 temperado e revenido, utilizando um rebolo de CBN por meio de diferentes métodos de lubrificação. Os métodos utilizados foram convencional com fluido em abundância utilizando o Quimatic Tapmatic ME-1 (semi Sintético) e o método MQL com fluidos: Quimatic Tapmatic ME-2 (Sintético), ITW Biocut 9000 (próprio para MQL), e VCI Aqua 180 (com partícula anticorrosiva e inibidor de empastamento), todos na proporção de 1:5 uma parte de óleo para cinco de água (83,00% de diluição em água), 1:10 uma parte de óleo para dez de água (90,90% de diluição em água) além do óleo puro, utilizando sistema com e sem limpeza da superfície de corte do rebolo. As variáveis de saída analisadas foram: rugosidade média aritmética (Ra), desvio de circularidade, relação G (volume de material removido/volume de rebolo desgastado), microdureza, microscopia óptica da superfície da peça, potência elétrica consumida de corte, emissão acústica e vibração.

1.3 Estrutura

Esta dissertação está estruturada da seguinte forma: no Capítulo 1 é apresentado a introdução do trabalho e o objetivo proposto. O Capítulo 2 contempla uma breve revisão bibliográfica para embasar esta pesquisa e fundamentar as análises críticas defendidas, abordando os seguintes tópicos: fluidos de corte, mínima quantidade de lubrificante (MQL), utilização de jatos de ar comprimido na limpeza do rebolo no processo de retificação, rebolo superabrasivo de Nitreto de Boro Cúbico e parâmetros no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho do aço AISI 4340 temperado e revenido. No Capítulo 3 são apresentados os materiais e equipamentos utilizados, bem como a metodologia empregada. No Capítulo 4 são apresentados os resultados e discussões, enquanto que no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões gerais observadas neste trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo 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, rebolo superabrasivo de Nitreto de Boro Cúbico (CBN) e parâmetros no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho do aço AISI 4340 temperado e revenido.

2.1 Fluido de Corte

Segundo Runge (1989), fluido de corte é definido como qualquer fluido para corte empregado na usinagem dos materiais. Esse fluido é parte integrante no processo de fabricação de peças através da remoção de cavaco, no sistema que compreende a máquina, as ferramentas de corte, as peças em produção e o fluido.

Em um processo de usinagem, se desenvolve uma grande quantidade de calor devido ao atrito ferramenta-peça e cavaco-ferramenta. Os fluidos de corte contribuem, refrigerando, lubrificando e limpando, peças e ferramentas, além da zona de corte. Ao fazê-lo, desempenham um importante papel, colaborando para uma maior vida da ferramenta associada a uma maior qualidade da peça (DINIZ et al., 2008), além de possibilitarem uma velocidade de corte mais econômica e como um todo, contribuirão para a eficiência do sistema de produção (SOKOVÍČ et al., 2001).

Os fluidos de corte associados ao processo de retificação, possibilitam um menor valor de rugosidade superficial e conseqüentemente um acabamento final de melhor qualidade. Além de uma maior vida útil do rebolo pelo distanciamento entre os períodos de dressagem do rebolo, os fluidos de corte ainda geram ações anticorrosivas à peça e à máquina-ferramenta e, portanto, garantindo maior vida útil das máquinas (STANFORD; LISTER, 2002).

Na usinagem em geral e especificamente na retificação todos os parâmetros utilizados influenciam na qualidade da peça acabada, desgaste do rebolo e conseqüentemente na produtividade do processo (BRINKSMEIER et al., 1999).

Bienkowski (1993), definiu quatro categorias de fluidos de corte, baseadas em suas composições: sintéticos, semissintéticos, óleos emulsionáveis (sintéticos ou minerais) e óleos minerais.

Minke (1999), em seu projeto confrontou os óleos solúveis, integrais e à base de água para distintas circunstâncias de usinagem. Os fluidos à base de água entregam maior efeito refrigerante, contudo originam aumento das forças de corte.

As quantidades de arestas de corte dos grãos abrasivos geram pequenos cavacos que acarretaram a uma ampla quantidade de atrito e, portanto, conduzem calor à peça, sendo o fluido de corte o principal meio para controlar esse aumento de temperatura e assim evitar alterações da integridade superficial da peça e, simultaneamente reduzir o desgaste do rebolo (KIRSCH, 2017).

Pelo fato dos fluidos conterem pequenas quantidades de materiais, como partículas do rebolo e cavacos, há a necessidade de serem regularmente trocados e descartados, para que se mantenha um nível consistente de produção. Desse modo, Jiang et al. (2013), argumentaram que o descarte dos fluidos de corte deve obedecer às regras de proteção ambiental.

2.1.1 Problemas na utilização do fluido de corte

A maior dificuldade encontrada nos processos de usinagem, em particular da retificação, está relacionada com o uso de fluidos de corte e sua manutenção. Isso se deve aos grandes prejuízos que essas substâncias geram à saúde das pessoas e ao meio ambiente (BARTZ, 1998).

Portanto, apesar dos benefícios tecnológicos que os fluidos de corte causam, atualmente vêm sendo questionados os efeitos contrários que eles acarretam (DHAR; KAMRUZZAMAN; AHMED, 2006).

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 (GANIER, 1993).

Segundo Bartz (2001), fluidos de corte contém substâncias tóxicas tais como: nitroaminas, formaldeídos, substâncias orgânicas contendo parafinas cloradas e bifenis

policlorados, 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 (HOWES et al., 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; MIJANOVIC, 2001).

Analisando esses aspectos, Sluhan (1994), relatou 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.

2.1.2 Técnica da mínima quantidade de lubrificação (MQL)

A Mínima Quantidade de Lubrificação 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.

A mínima quantidade de lubrificante (MQL) é definida como um sistema que emprega pequena quantidade de óleo, ou seja, menores ou igual a 200 ml/h misturada com ar comprimido e direcionada à região de corte, evitando as inundações de óleo observadas na refrigeração convencional (OBIKAWA; KAMATA; SHINOZUKA, 2006).

Um amplo desafio do método de MQL está em garantir a eficiência em marcos da refrigeração, sendo arriscada sua aplicação em casos em que se precisa alta refrigeração (BRINKSMEIER; HEINZEL; WITTMANN, 1999). Por outro lado, a técnica promove uma lubrificação eficiente, redução da energia de retificação e da energia específica confrontado com processos utilizando fluidos de corte (óleos solúveis) em abundância em situações não muito rigorosas de usinagem (HAFENBRAEDL; MALKIN, 2001).

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 lubrificação 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 (2012), algumas das vantagens do MQL se dão pelo fato de que após a usinagem, o ambiente de trabalho, aparas e rebolos 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.

Silva (2013), concretizou um trabalho de retificação com aço AISI 4340 e rebolo de óxido de alumínio (Al_2O_3), e aplicaram a técnica de MQL alterando as vazões de ar e óleo e aprontaram que o uso da técnica de MQL não ocasionou danos térmicos às peças e proporcionou, em algumas condições, resultados de rugosidade (R_a) e desgaste do rebolo melhores que os da técnica convencional e da retificação a seco.

2.1.2.1 Determinando parâmetros da técnica MQL com modelos numéricos

A técnica de MQL tem como fundamento o processo de atomização, o qual consiste na transformação de líquidos em pequenas gotículas. Isso ocorre quando a velocidade relativa do gás deforma os ligamentos que formam a superfície do líquido e quando a força de cisalhamento supera a tensão superficial, esses ligamentos se rompem criando as minúsculas gotículas. Na técnica de MQL esse processo pode ocorrer de duas maneiras: internamente ou externamente ao bocal. Sendo que, quando externamente, é necessário maior vazão de ar e maiores pressões, no entanto as chances de ocorrer um fluxo reverso são bem menores (GUPTA et al., 2018).

Utilizando os softwares CFD Ansis Workbench Fluent 15 e Solidworks os autores criaram um modelo CAD e simularam a atomização do MQL, por meio da simulação os autores puderam estimar parâmetros como diâmetro da gota e velocidade do jato.

Para verificar o modelo computacional os autores utilizaram um equipamento baseado na difração de laser para medir as gotículas geradas pelo processo de atomização. Observou-se que o modelo computacional apresentou uma pequena divergência com os dados experimentais, no entanto, as mesmas tendências foram observadas nos dois casos. Conforme a pressão do ar aumenta menores são as gotículas e conforme a vazão de fluido aumenta maiores são as gotículas. De acordo com Gupta (2018), gotículas maiores e com alta pressão tem facilidade em penetrar a barreira de ar e lubrificar o processo eficientemente.

O autor realizou simulação computacional verificando a capacidade de refrigeração da técnica de MQL. Para isso definiu-se que a peça possuiria o fluxo de calor similar ao monitorado durante a retificação a seco. Após o modelamento do fluxo de calor na peça, foi aplicado o spray de MQL sobre ela em diferentes condições de vazão de fluido e pressão. As perdas de calor por radiação foram desprezadas e com isso obteve-se a capacidade de refrigeração de cada condição da técnica.

2.2 Sistema Auxiliar para Limpeza do Rebolo

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 et al., 1996). Uma solução para esse problema segundo Guermandi et al. (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 conseqüentemente dos cavacos aderidos aos poros do rebolo.

Lee et al. (2002), em suas tarefas com retificação de canais em peças de carboneto de tungstênio (M50), usaram um jato de ar comprimido como opção para prevenir o acontecimento do empastamento do rebolo, pois, segundo os autores, o ar acerta o rebolo e retira boa parte das impurezas que colaram no rebolo, sendo que quanto menor a pressão do ar, menor seu efeito de limpeza. Concluíram ainda que é plausível diminuir o desgaste do rebolo e conseguir maior qualidade de forma geométrica e superficial, ou seja, melhores valores de rugosidade com o emprego de jatos de ar comprimido para a limpeza do rebolo de corte.

2.3 Rebolo de Nitreto Cúbico de Boro

Dentre os abrasivos convencionais desenvolvidos para atender às variadas exigências das operações de retificação, pode-se destacar o desenvolvimento do rebolo superabrasivo de nitreto de boro cúbico (CBN) está diretamente ligada à síntese do diamante artificial. O CBN tem a mesma estrutura cristalina que o diamante, mas no lugar de átomos de carbono existem átomos de nitrogênio e de boro (LINKE, 2016).

Bertalan (1997), afirmou que o CBN é um material sintético obtido através da transformação alotrópica do nitreto de boro hexagonal, mediante elevadas pressões e temperaturas.

A dureza do CBN na temperatura ambiente é aproximadamente 4500 kg/mm², valor que aproximadamente se encontra na metade da dureza do diamante e no dobro da dureza dos abrasivos convencionais (MARINESCU et al., 2007). O CBN juntamente com o diamante têm

sido designados como superabrasivos, sendo, comparativamente aos convencionais, mais duros, mais resistentes ao desgaste e possuem uma maior vida útil quando utilizados de maneira adequada (KOPAC et al., 2006).

De acordo com Cai et al. (2004), rebolos de CBN possuem custo de aquisição substancialmente mais elevado do que os rebolos convencionais, porém a justificativa para utilizá-los está não apenas nos benefícios de uma melhor qualidade da peça e exatidão dimensional, mas também nos menores custos do processo devido ao seu potencial de alcançar altas velocidades de corte, maiores intervalos de redressagem e elevadas taxas de remoção de material, o que deve mais do que compensar o custo inicial mais elevado do rebolo e o maior tempo necessário de dressagem. Um problema é que o empastamento do rebolo, sobretudo de materiais dúcteis, cria a necessidade de uma profundidade de dressagem relativamente grande e de dressagens mais frequentes para poder manter limpa a superfície do rebolo. Portanto, é importante que se evite o empastamento do rebolo para que se possa aumentar o seu intervalo de tempo de redressagem.

Malkin; Guo (2008), afirmaram que o CBN ainda pode ser melhor que o diamante em alguns casos visto que uma importante vantagem do CBN é sua estabilidade térmica. No vácuo, ambos apresentam estabilidade para temperaturas maiores que 1400°C, porém, quando usados na atmosfera normal, apenas o CBN se mantém estável a temperaturas de aproximadamente 1400°C. Já o diamante tem seu limite por volta de 800°C.

2.4 Parâmetros do Processo de Retificação Cilíndrica Externa de Mergulho

Na retificação, são adotados alguns parâmetros com a finalidade de facilitar a compreensão de alguns fenômenos do processo. A seguir serão apresentados esses parâmetros para o processo de retificação cilíndrica externa de mergulho.

Segundo Malkin (1989), na retificação, a taxa de remoção do material (Q_w) é um parâmetro determinado entre a profundidade de corte (a), a velocidade relativa entre a peça e o rebolo (V_w) e a largura de retificação (b). Assim, Demirci et al. (2007), utilizaram em seu trabalho a equação (1):

$$Q_w = a \cdot V_w \cdot b = \pi \cdot d_w \cdot V_f \cdot b \quad (1)$$

Onde:

Qw = taxa de remoção de material (mm^3/min);

dw = diâmetro da peça (mm);

a = profundidade de corte (μm);

Vw = velocidade tangencial da peça de trabalho (m/s)

b = largura de retificação (mm);

Vf = velocidade de avanço (mergulho) (mm/min);

π = constante matemática.

Dividindo a taxa de remoção (Qw) pela largura de retificação (b) pode-se obter a taxa específica de remoção ($Q'w$), representada pela equação (2), possibilitando a análise de produtividade do processo de retificação (KRUEGER et al., 2000).

$$Q'w = a.Vw = \pi.dw.Vf \quad (2)$$

Onde:

$Q'w$ = taxa específica de remoção de material (mm^2/min).

Segundo Shaw (1996), a espessura da camada de material removida pelo rebolo com a velocidade periférica do mesmo é denominada espessura equivalente de corte (heq). Segundo Heinzl; Bleil (2007), esse parâmetro na retificação cilíndrica pode ser denotado como a razão entre a taxa de remoção específica do material ($Q'w$) e a velocidade de corte (Vs), conforme a equação (3):

$$heq = \frac{Q'w}{Vs} = \frac{\pi.dw.Vf}{60.1000.Vs} \quad (3)$$

Onde:

heq = espessura equivalente de corte (μm);

Vs = velocidade de corte do rebolo (m/s).

Assim como afirma Malkin (1989), além da força de corte, a espessura equivalente de corte está diretamente relacionada ao comportamento do processo de retificação o qual envolve variáveis tais como rugosidade e topografia do rebolo. Segundo Marinescu et al. (2004), para

que também sejam consideradas as características do rebolo como o espaçamento entre seus grãos, é possível calcular a espessura teórica máxima do cavaco $hmax$, a qual é apresentada na equação (4):

$$hmax = 2L \frac{V_w}{V_s} \sqrt{\frac{a}{D_s}} \quad (4)$$

Onde:

$hmax$ = espessura teórica máxima do cavaco (μm);

L = espaçamento médio entre grãos abrasivos (μm);

D_s = diâmetro do rebolo (mm).

Segundo Guo; Chand (1998), para se obter superfícies de melhor acabamento, minimizando os danos da retificação, deve-se diminuir o valor de $hmax$. Porém, como consequência, haverá uma diminuição de produtividade já que as taxas de remoção de material serão reduzidas.

2.5 Aço AISI 4340 Temperado e Revenido

O aço AISI 4340 é um aço de elevadas resistência mecânica e a fadiga, alta tenacidade, além de uma alta temperabilidade. É utilizado na confecção de dispositivos e peças sujeitas a cargas elevadas e periódicas, como engrenagens, virabrequins e elementos para diversas aplicações industriais (CAMARGO et al., 2009). A tabela 2.1 apresenta sua composição química.

Tabela 2.1 Composição química do aço AISI 4340

AISI	C	Fe	Si	Ni	Cr	S	Mn	Mo	P
4340	0,38%	96%	0,2%	1,3%	0,8%	0,04%	0,7%	0,25%	0,035%

Fonte: Adaptado de FAVORIT Aços Especiais, 2016.

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 500 °C seguido por um resfriamento controlado. Dessa forma, a dureza do material alcança entre 52-56 HRC (GROSSMAN, 1972).

2.6 Variáveis de Saída do Processo de Retificação Cilíndrica de Mergulho

Nesse tópico serão apresentadas as principais variáveis de saída que foram objeto de estudos deste referido trabalho. Cada qual foi analisado de forma a entender o comportamento e alteração do mesmo, ao ponto de poder fazer uma análise quantitativa dos melhores valores encontrados para utilização de diferentes técnicas.

2.6.1 Rugosidade

Rugosidade é uma importante variável de saída, pois um dos objetivos da retificação é melhorar a qualidade superficial da peça (WINTER et al., 2014).

A rugosidade superficial é definida por micro irregularidades geométricas na superfície do material usinado, ou seja, distorções da forma ideal que essa superfície deveria ter. A rugosidade consiste em marcas provenientes do perfil da ferramenta combinado à outras irregularidades, podendo ser variáveis dependendo do tipo de material e ferramenta de corte (CARPINETTI, 2000).

Segundo Malkin (1989), a geração de rugosidade na retificação ocorre devido à riscos feitos pelos grãos abrasivos, ao material da peça que adere ao rebolo e não é liberado pelo fluido de corte e posteriormente é impregnado na peça, ou ainda, por partículas abrasivas que se fragmentam durante o corte e se aderem à peça. Pode-se citar também o desgaste do rebolo, assim como a vibração do sistema, os quais auxiliam na formação de rugosidade na peça.

O perfilômetro é o equipamento mais utilizada para medição de rugosidade no setor industrial, onde se utiliza um apalpador que necessita estar em contato com a superfície a ser medida, o que acaba arranhando a superfície da amostra e reduz a eficiência da medição. A dimensão do raio da ponta e da frequência de amostragem do instrumento qualifica a precisão da medição (LU et al., 2018).

O parâmetro mais utilizado para a mensuração dos valores de rugosidade é a média aritmética (R_a). Representa a média aritmética dos valores absolutos de picos e vales das micro irregularidades da superfície, dentro de um percurso de medição (KAJORNCHAIYAKUL, 2000).

Conforme Puerto (2013), o método de retificação é recomendado principalmente para operações de acabamento em materiais que passaram por tratamento térmico a fim de se obter baixas rugosidades superficiais (R_a 0,1 μm a 1,6 μm) e estreitas tolerâncias.

2.6.2 Desvios de circularidade

O desvio de circularidade é definido como qualquer diferença entre a peça usinada e a projetada, com tolerâncias especificadas (JEDRZEJEWSKI; MODRZYCKY, 1997).

Dessa forma, segundo Holesovsky; Hrala (2004), a precisão de uma peça trabalhada na retificação é determinada pela precisão do equipamento de produção, magnitude de desgaste do rebolo, vibrações do conjunto máquina/peça/rebolo/sistema, taxa de remoção do material e energia específica.

Portanto, quanto maior o calor desenvolvido na zona de corte, maior será a dilatação e as deformações térmicas que a peça estará submetida e conseqüentemente ocorrerá um aumento nos desvios geométricos, especialmente nos desvios de circularidade (HADAD et al., 2012).

Segundo Ayub et al. (2014), no processo de retificação o produto final sempre haverá defeitos e nunca será realmente circular uma vez que múltiplos parâmetros interferem na manufatura. Em relação ao processo de retificação, os desvios de circularidade são possíveis de ocorrer devido ao desgaste do rebolo, lubrificação inadequada, defeitos nos componentes da máquina, vibrações, desalinhamento dos mandris. A deflexão elástica do conjunto ferramenta-peça, além do contorno irregular do rebolo e retirada irregular do material pode ser responsável por erros geométricos. Porém a aplicação de um tempo de spark-out e um processo de dressagem adequado pode impedir o perfil irregular do rebolo (LOPES et al., 2018).

2.6.3 Desgaste diametral do rebolo – relação G

De acordo com Bianchi et al. (2018), o desgaste diametral do rebolo é a somatória do atrito entre a peça e rebolo, onde o grão abrasivo, fratura do ligante e fratura do grão, deve-se às solicitações de esforços e/ou pela degradação da temperatura que o ligante é submetido, visto que o calor provocado na interface de corte deve ser muito bem controlado, o aumento demasiadamente da temperatura gera danos térmicos à peça e um método deficiente de remoção de material pode acelerar os desgastes no rebolo.

Há três formas de desgaste do rebolo durante a retificação: pelo atrito entre o grão abrasivo e a peça, fratura do grão e fratura do ligante. Isso decorre das solicitações mecânicas a que o rebolo é submetido, assim como a deterioração térmica do próprio ligante (LIAO et al., 2000).

Para se medir a eficiência de um rebolo, utiliza-se a relação “G”, a qual é a razão entre o volume de material removido e o volume de rebolo gasto, assim a equação (5) exemplifica seus valores:

$$G = \frac{Zw}{Zs} = \frac{a.Vw.t}{\pi.Ds.\delta} \quad (5)$$

Onde:

G = eficiência do rebolo relação “ G ”;

Zw = volume do material removido (mm^3);

Zs = volume de rebolo gasto (mm^3);

t = tempo de retificação (s);

δ = desgaste radial do rebolo.

Segundo Marinescu et al. (2004), rebolos que apresentam relação “ G ” alta produzem mais e desgastam-se menos, ou seja, são mais eficientes.

2.6.4 Microdureza

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).

Segundo Xun (2015), o endurecimento da superfície é um indicador importante da integridade superficial e tem uma influência positiva na resistência a corrosão e ao desgaste.

Segundo Malkin (1989), os aços são retificados após o tratamento térmico. Com isso, a queima superficial pode ocasionar uma retempera, 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.

O processo de retificação gera um calor excessivo na área de corte, aumentando assim a temperatura da peça durante a remoção de material. Com o aumento da temperatura e um brusco resfriamento da região aquecida devido o fluido de lubrificação, há uma deformação permanente na superfície e sub superfície da peça, alterando o aspecto de microdureza (KUMAR et al., 2011).

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 maior análise da integridade superficial.

2.6.5 Microscopia Óptica

A técnica da microscopia óptica é de fundamental relevância para a análise da estrutura do material da peça, pois possibilita o estudo das superfícies, permitindo uma visão geral de danos, desgaste e falhas, bem como danos térmicos. Esta análise do material é feita após este ter passado pelo processo de retificação. De tal modo, é possível avaliar as características mecânicas e térmicas que a peça sofreu durante o processo de retificação, e então, verificar sua integridade superficial (MARINESCU et al., 2015).

A microscopia das peças é um método imprescindível para verificar se houve a queima do material do decorrer do processo de retificação. A queima do material altera as propriedades metalúrgicas da peça, devido à altas temperaturas na região de corte (WANG et al., 2018).

Conforme Ren et al. (2016), a condição microestrutural das superfícies retificadas é o principal fator que influencia na formação e propagação de trincas na superfície da peça.

2.6.6 Força tangencial de corte

Para Liu et al. (2005), com o monitoramento das forças de retificação torna-se possível manter a topografia do rebolo adequada à operação, prevenindo a redução da taxa de remoção de material, além de diminuir o desgaste do rebolo.

Segundo Bianchi (1999), a força de corte na retificação é importante pois influencia em inúmeros fatores como: qualidade geométrica, dimensional e superficial da peça, a vida útil do rebolo (desgaste volumétrico) e finalmente o tempo de usinagem. Geralmente essa força é decomposta em três componentes: normal (F_n), tangencial (F_t) e uma componente ao longo da direção de avanço longitudinal, a qual não tem muita significância. Os valores médios da força tangencial têm fundamental importância já que determinam a potência necessária para a máquina retificadora assim como suas necessidades estruturais.

Para Li et al. (2002), a força na retificação representa uma importante variável na análise do processo. A força pode ser decomposta, conforme a Figura 2.1 em três componentes: normal (F_n), tangencial (F_t) e uma componente que não apresenta significância, pois está aplicada ao longo da direção de avanço longitudinal.

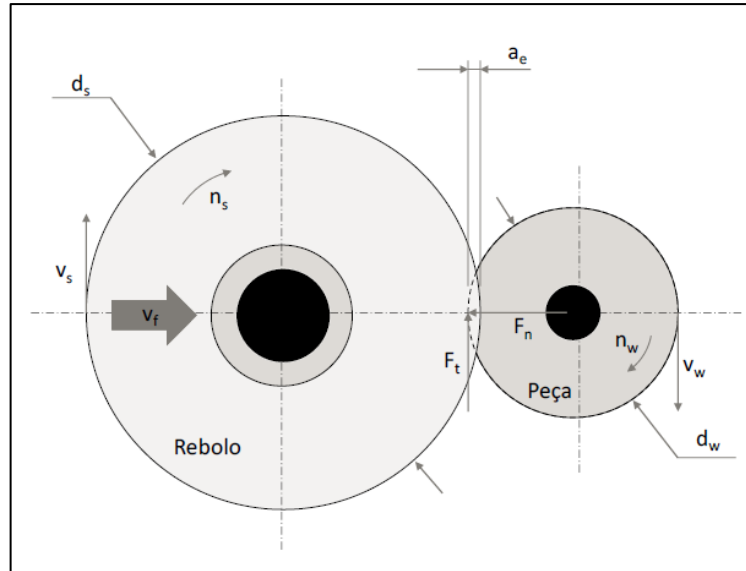


Figura 2.1 - Operação da retificação cilíndrica externa de mergulho (MALKIN 1989, adaptado).

Onde:

v_s = velocidade de corte (m/s);

v_w = velocidade tangencial da peça (m/s);

d_s = diâmetro do rebolo (mm);

d_w = diâmetro externo da peça (mm);

a_e = profundidade de corte (mm);

n_w = rotação da peça (RPM);

n_s = rotação do rebolo (RPM);

v_f = velocidade de mergulho (mm/min);

F_t = força tangencial de corte (N);

F_n = força normal de corte (N).

Marinescu et al. (2004), definiram matematicamente, a relação da força tangencial de corte, a qual cada grão abrasivo está submetido durante o processo de retificação cilíndrica externa de mergulho com as grandezas físicas da retificação conforme equação (6).

$$F_t = b \times h_{max} \times k_s + \mu \times b^2 \times \pi \times \frac{Kn}{4} \quad (6)$$

Onde:

b = largura média no topo dos grãos abrasivos (mm);

k_s = pressão específica de corte (N/mm²);

μ = coeficiente de atrito entre grão e peça;

K_n = tensão de escoamento do material (N/mm^2);

$h_{m\acute{a}x}$ = espessura teórica máxima do cavaco (mm).

2.6.7 Emissão acústica (EA)

Emissão acústica (EA) é uma ferramenta comumente usada para monitorar eventos que ocorrem durante vários processos de fabricação, incluindo o processo de retificação. As condições de usinagem empregadas durante o processo influenciam diretamente nas condições geométricas do corte, podendo de tal modo conseguir valores de alta frequência (SUTOWSKI; ŚWIECIK, 2018).

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. A emissão acústica (AE) é empregada na técnica de retificação para melhor concepção de fenômenos como atrito, formação de cavaco, quebra do ligante/grão e fase de transição termomecânica (BABEL et al., 2013).

A emissão acústica, na maioria dos casos, está ligada à interação dos grãos abrasivos e a superfície do material. Dessa forma, Wang et al. (2001), afirmaram que esta variável está intimamente ligada com as condições superficiais do rebolo 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 (WEBSTER et al., 1996).

Distintos são os objetivos e perspectivas para o emprego deste tipo de sistema de monitoramento para a usinagem de retificação. Lopes et al. (2017), por exemplo, analisaram o monitoramento do processo de dressagem de rebolos, a fim de achar soluções e distinguir o período e as condições de dressagem corretas, pelo meio de sinais de emissão acústica.

2.6.7.1 Monitoramento na retificação utilizando emissão acústica

O monitoramento na retificação em tempo real é de suma importância para prevenção de falhas e o momento em que o rebolo deve ser substituído ou afiado. Para a retificação o monitoramento se torna difícil devido ao grande número de arestas de corte e suas geometrias variadas. Assim, muitas vezes a dressagem do rebolo é realizada de forma inadequada,

precocemente ou tardiamente. Assim, para decidir quando o rebolo está suficientemente afiado para realizar a retificação ou não, são utilizados sensores para monitoramento das vibrações, das emissões acústicas, da corrente elétrica do motor, das forças de corte, etc.

A emissão acústica é um dos sinais que pode ser utilizada no monitoramento do processo de retificação. Esses sinais são gerados durante distorções na rede cristalina, transformações de fases, atrito entre ferramenta e peça, formação e propagação de trincas e deformações da peça pela aplicação de cargas (ARUN et al., 2018).

Outra forma potencial para o monitoramento da usinagem na retificação é a queima. Nesse sentido, Yang et al. (2014), em sua pesquisa utilizaram os sinais de emissão acústica e de vibração para identificar a queima, tornando-se como uma fonte potencial de monitoramento no processo de retificação.

De acordo com Dornfeld (2001) e Arun et al. (2018), o sinal de emissão acústica é um dos mais sensíveis para os parâmetros críticos em processos de precisão. Dessa forma, o sinal EA é adequado para monitorar o processo de retificação. Isso porque, diferentemente de acelerômetros, os sensores de emissão acústica são capazes de não perderem a sensibilidade mesmo em altas frequências. Além disso, os ruídos captados pela EA são facilmente filtrados por apresentarem baixa frequência, enquanto os sinais são de alta frequência.

Arun et al. (2018), baseado nos benefícios da utilização da emissão acústica para monitorar o processo de retificação, utilizaram a EA para criar um algoritmo que determinasse o estado em que a ferramenta se encontra. Para isso, durante o processo as ondas elásticas geradas eram captadas por um sensor piezolétrico que convertia energia mecânica em sinais elétricos, por meio de algoritmos. Os autores realizaram comparação entre diferentes métodos desenvolvidos, entre os testados a menor eficiência no monitoramento da ferramenta foi de 80,56% enquanto a maior foi de 97,22%. Esse estudo demonstrou que a utilização do sinal de emissão acústica no monitoramento no processo é viável e apresenta resultados promissores. O interessante é monitorar o processo em tempo real e sem interrupções, dessa forma, otimiza-se o tempo de produção e evita paradas desnecessárias.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os equipamentos e materiais que foram necessários à realização desse projeto, assim como os procedimentos adotados. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA) do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – FEB/UNESP, campus de Bauru – SP.

A lubrificação nos métodos convencional e no sistema MQL composto por três vazões, foram avaliadas através dos parâmetros de rugosidade, desvios de circularidade, desgaste diametral do rebolo, microscopia óptica, microdureza, vibração, potência e emissão acústica.

3.1 Equipamentos e Materiais Utilizados

A seguir são apresentadas as máquinas e equipamentos utilizados neste trabalho, além dos procedimentos referentes às etapas para realização da pesquisa. Os ensaios foram realizados em uma máquina retificadora cilíndrica fabricada pela empresa Sulmecânica, modelo RUAP515H equipada com comando numérico computadorizado CNC da marca FAGOR para o acionamento do eixo “X”.

3.1.1 Rebolo e dressagem

Nos ensaios foi utilizado um rebolo de CBN com ligante vitrificado do tipo SBN151 Q12 VR2, fornecido pela empresa Nikon Ferramentas de Corte Ltda pertencente ao grupo Saint-Gobain. As dimensões do rebolo são: diâmetro externo de 350 mm, diâmetro interno de 127 mm, uma largura de 15 mm e uma camada de CBN de 5 mm. A calibração da rotação do rebolo foi feita utilizando-se um tacômetro digital da marca LUTRON, modelo DT-2235B. Deste modo, utilizou-se velocidade de corte constante e igual a 30 m/s (1800 m/min) acionado por intermédio de um inversor de frequência da marca WEG, modelo CFW 08.

As operações de dressagem do rebolo foram conservadas constantes para todos os experimentos. O método foi realizado com um dressador multigranular, tipo conglomerado, fabricado pela empresa Master Diamond. Trata-se de um dressador cuja ponta é composta por diamantes em uma matriz metálica. As dimensões do dressador são: 15 mm x 8 mm x 10 mm. As condições de dressagem foram: velocidade de corte (v_s) igual 30 m/s (1800 m/min), velocidade de dressagem (v_d) igual 100 mm/min, profundidade de dressagem por passada (ad) igual a 2 μ m e profundidade de dressagem total igual 120 μ m no diâmetro do rebolo.

3.1.2 Corpos de prova

Para a realização dos ensaios de retificação, foram utilizados 51 corpos de prova constituídos de aço AISI 4340, temperado e revenido, em formato cilíndrico, com 54 mm de diâmetro externo, 30 mm de diâmetro interno e 4 mm de espessura, com dureza média de $54 \text{ HRC} \pm 2 \text{ HRC}$ conforme Figura 3.1. O material é utilizado por fabricantes para produzir eixos, hastes e virabrequins, componentes que normalmente passam pelo processo de retificação.

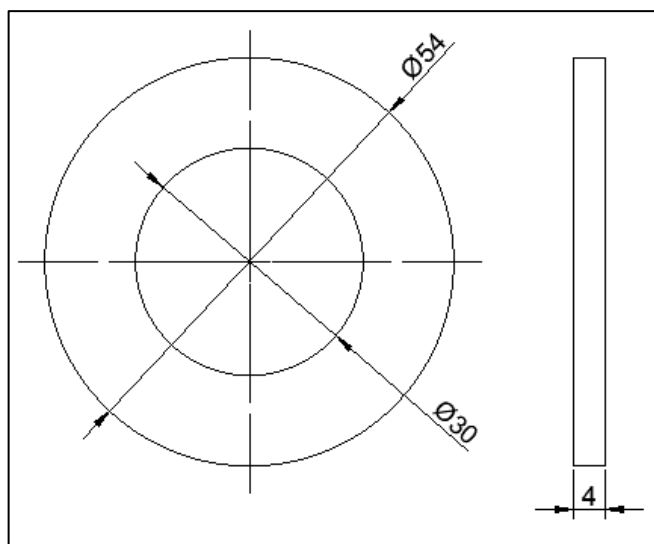


Figura 3.1. Desenho técnico, fora de escala, do corpo de prova.

Outro corpo de prova foi utilizado para realizar a impressão do rebolo, e assim medir o desgaste do mesmo. O material desse outro corpo de prova foi o aço ABNT 1020. Esse material foi escolhido por ser dúctil, e com isso a impressão do rebolo é facilitada.

3.1.3 Fluidos de corte utilizados

Para os ensaios sob lubrificação convencional, foi utilizado o fluido de corte semissintético ME-1, da marca Quimatic Tapmatic Brasil Ltda que foi diluído em uma proporção de 3% em água, para aplicações em retificação, cuja vazão utilizada para os ensaios foi de 17 l/min e pressão de 0,2 Pa. Para os ensaios com MQL foram utilizados três fluidos:

- ITW Chemical Products - Rocol Biocut 9000: fluido próprio para a aplicação na técnica de MQL;
- Quimatic Tapmatic ME-2: fluido sintético, normalmente utilizado na refrigeração convencional;

- VCI Aqua 180: fluido com propriedades anticorrosivas e com inibidor de empastamento.

Os três fluidos de corte utilizados no ensaio com a técnica de MQL foram diluídos em água nas seguintes proporções 1:5 ou seja, uma parte de óleo e cinco partes de água (83% de diluição em água), 1:10 ou seja, uma parte de óleo e dez partes de água (90,90% de diluição em água) além do óleo puro. A vazão do fluido de corte usada no experimento foram 100 ml/h, e a pressão do ar comprimido foi de $6,5 \times 10^5$ Pa. O equipamento utilizado foi o accu-lube ITW 79053D, fabricado pela ITW Chemical Products Ltda.

3.1.4 Sistema de limpeza

Para o sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo foi utilizado um compressor da marca Schulz Compressores, modelo MSV 40, com capacidade de deslocamento teórico (vazão) 1132 l/min. O mesmo é constituído de reguladores de vazão e pressão e o bocal de limpeza, de forma a atuar em paralelo e independente do sistema de MQL, com os controles de ajustes de forma a não interferir nos parâmetros. O ângulo de incidência de 30° do jato de ar comprimido em relação ao raio do rebolo foi a condição que obteve maior eficiência na limpeza do rebolo (OLIVEIRA et al., 2012). A posição do bocal foi definida após o ponto de usinagem, com ângulo de incidência adotado de 30° em relação ao raio do rebolo. Com isso, foi utilizado uma pressão constante de $7,0 \times 10^5$ Pa e vazão do ar no sistema de limpeza $30 \text{ m}^3/\text{h}$. Os detalhes do bocal, tais como, o formato, suas dimensões, a fixação e o posicionamento, são apresentados nas Figuras 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5 respectivamente.

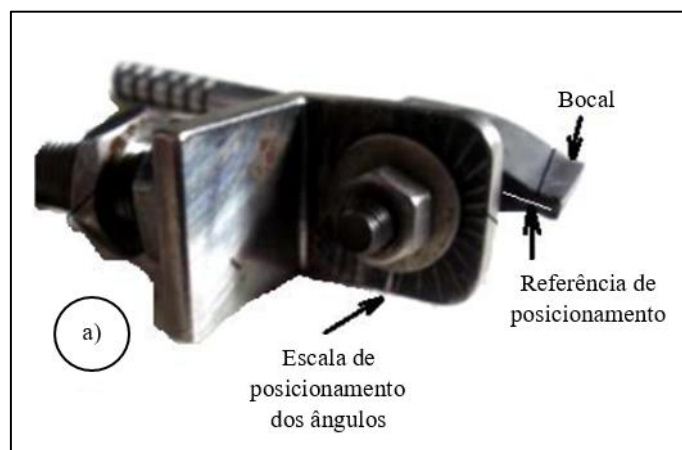


Figura 3.2. Bocal de Limpeza – a) Posicionador

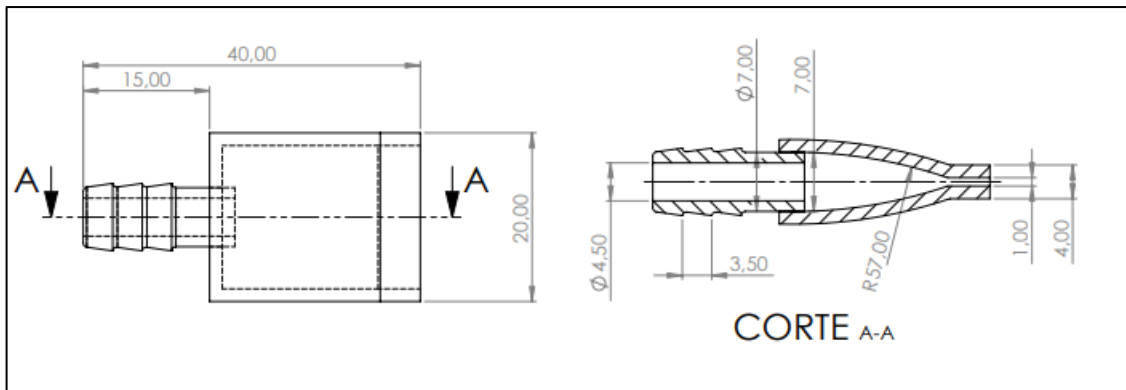


Figura 3.3. Desenho técnico do bocal de limpeza.

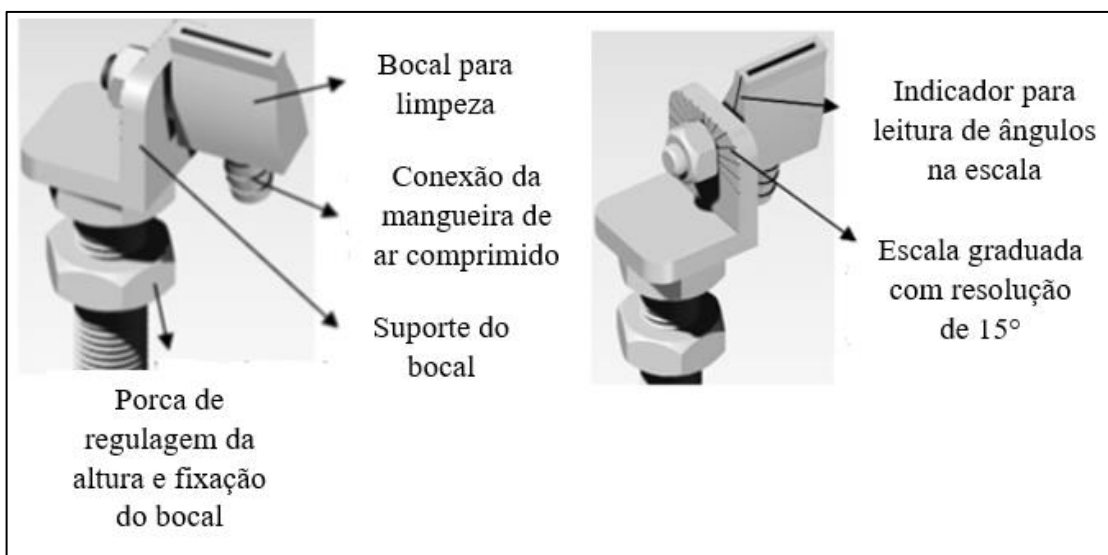


Figura 3.4. Sistema de fixação e posicionamento do bocal de limpeza.

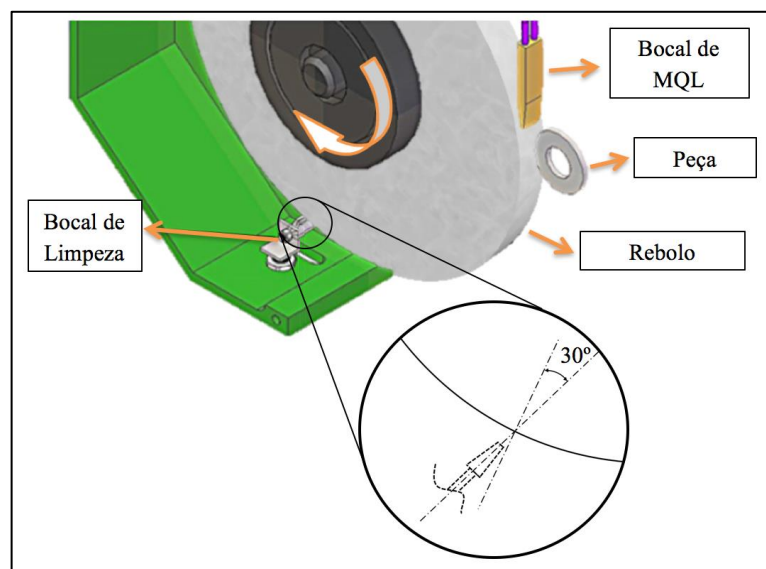


Figura 3.5. Fixação do bocal de limpeza na retificadora a 30°.

3.1.5 Sistema MQL

O sistema MQL é composto por um compressor da marca Schulz Compressores, modelo MSV 30, com capacidade de deslocamento teórico (vazão) de 850 l/min, possuindo regulador de pressão, medidor de vazão de ar, dosador (equipamento de MQL) e bocal projetado para a utilização de MQL na retificação. O equipamento de mínima quantidade de lubrificante é da marca ITW Chemical Products, modelo Accu-Lube 79053D, permite a regulagem do volume de lubrificante/ar separadamente, por meio de um registro tipo agulha, atomizando-o em um fluxo de ar à pressão constante de $6,5 \times 10^5$ Pa, aproximadamente, como apresentado na Figura 3.6.

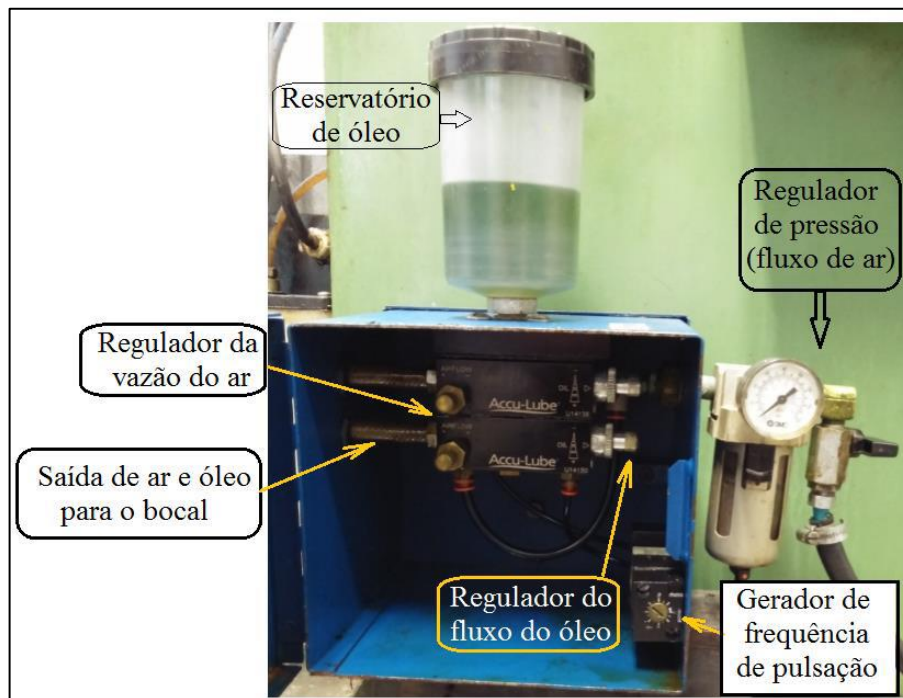


Figura 3.6. Unidade de controle do aplicador de fluido pela técnica MQL.

Na Figura 3.7 encontra-se o desenho técnico do bocal desenvolvido para aplicação e direcionamento do fluido de corte pela técnica MQL no processo de retificação.

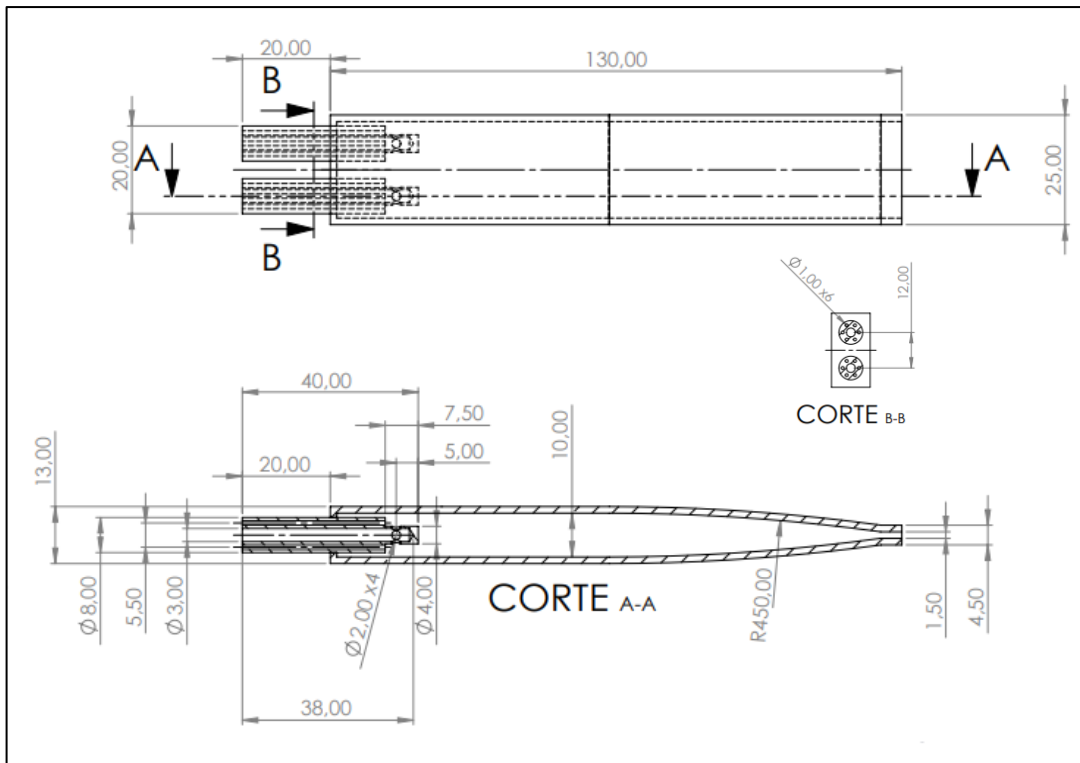


Figura 3.7. Desenho técnico do bocal utilizado na técnica de aplicação do MQL.

Para fornecer ao sistema as velocidades requeridas, são indispensáveis um medidor de vazão e um regulador de pressão com filtro que são conectados à rede de ar comprimido informando a leitura direta da vazão em m^3/h , conforme Figura 3.8.

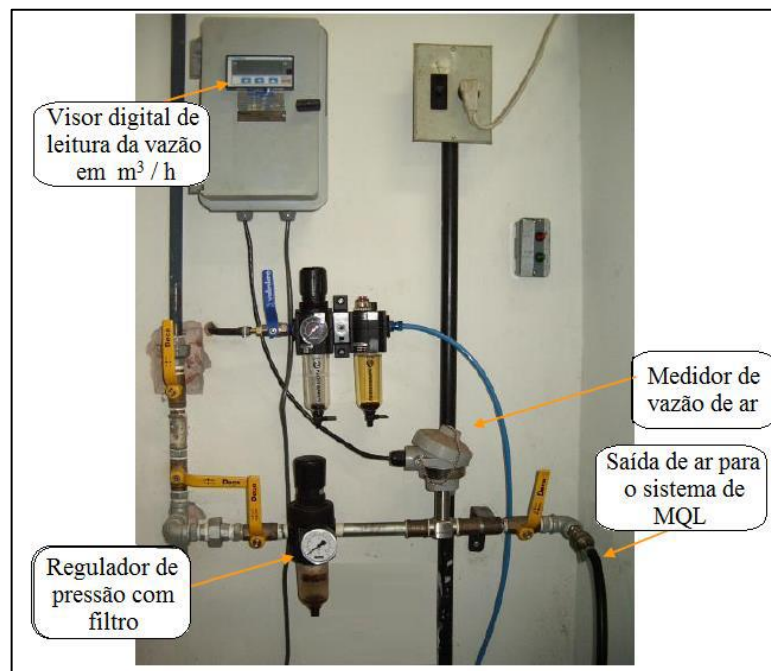


Figura 3.8. Sistema de ar comprimido para o MQL

3.1.6 Sistema de refrigeração convencional

O sistema de refrigeração convencional é caracterizado pela aplicação do fluido de corte à baixa pressão e com alta vazão. É composto por um tanque para armazenar o fluido, uma bomba de sucção, mangueiras, dois bicos difusores, cada qual com 6,3 mm de diâmetro para a saída do fluido, cuja vazão utilizada para os ensaios foi de 17 l/min e pressão de 0,2 Pa.

O controle da vazão de fluido foi realizado através de um sistema de medição de vazão inserido após a bomba centrífuga responsável por injetar fluido de corte. Neste sistema, o controle de vazão foi acertado através de válvulas de esfera posicionadas na entrada do medidor de vazão e antes do bico de saída do fluido de corte. O valor da vazão foi aferido e mostrado no display do aparelho medidor de vazão da marca Contech, modelo SVTG DMY-2030.

O fluido de corte utilizado foi o óleo solúvel semissintético ME-I, fabricado pela empresa Quimatic Tapmatic do Brasil Ltda., em sua composição química existem aditivos como anticorrosivos, biocidas, fungicidas, alcalinizantes, antiespumantes, tensocitivos não iônicos, alcanolomidas, entre outros, que foi diluído em uma proporção de 3%, para aplicações em retificação conforme recomendações do fabricante. Tais variáveis foram mantidas constantes ao longo do processo.

3.2 Parâmetros de Saída Analisados

3.2.1 Rugosidade

A medição da rugosidade média aritmética (R_a) foi realizada perpendicularmente às marcas da retificação, com o auxílio de um rugosímetro da marca Taylor Hobson modelo Surtronic3+. Para tal, adotou-se comprimento de medição (cut-off) igual a 0,25 mm e percurso total (ln) igual a 1,25 mm, onde para cada peça foram realizadas 6 medições equidistantes 60° uma da outra e feito a média aritmética, conforme Figura 3.9.

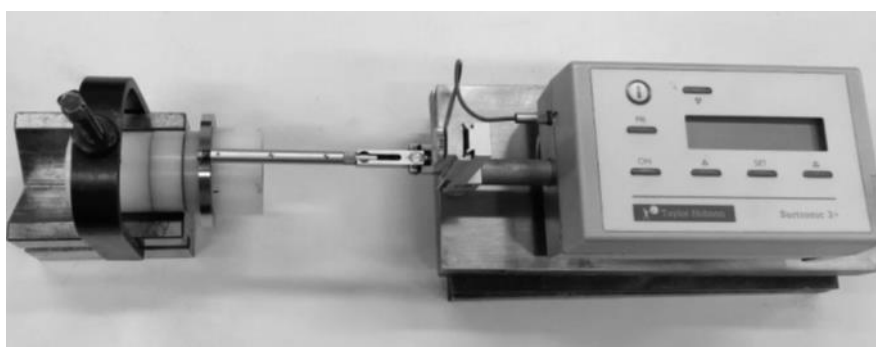


Figura 3.9. Rugosímetro utilizado nas medições de rugosidade das amostras.

3.2.2 Circularidade

A medição dos desvios de circularidade constitui no caso a peça não está perfeitamente circular, assim foi utilizado um medidor de circularidade modelo Talyrond 31C marca Taylor Hobson. O mecanismo de aferição resume-se à uma ponta do braço encontrar-se com um apalpador, o qual possui uma ponta de rubi, elemento que efetua o contato com a peça para a obtenção dos desvios, podendo assim especificar a tolerância geométrica e de forma da peça. Na Figura 3.10 são apresentados os detalhes da etapa de medição, onde detalha o apalpador no qual efetua o contato com a peça para obtenção das medidas de circularidade sobre uma placa de castanhas onde a peça é fixada.



Figura 3.10. Medidor de circularidade marca Taylor Hobson, modelo Talyrond 31C.

Antes de cada medição foi preciso centralizar a peça deslocando-se a placa de precisão com seis castanhas por meio de dois botões de ajuste fino linear. A Figura 3.11 explicita cada parte da máquina utilizada para aferir a circularidade.

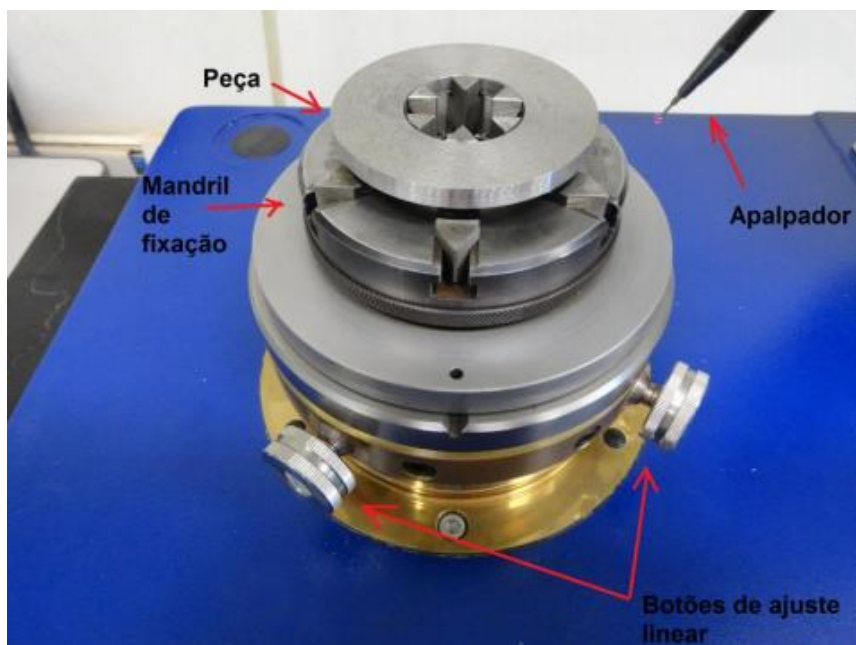


Figura 3.11. Detalhe da máquina de aferição do desvio de circularidade.

Para cada ensaio realizado foram feitas três medições, onde ao término de cada medida, a peça era deslocada a um giro de 120° e reiniciava-se a medição. Os resultados referentes aos desvios de circularidade correspondem à média aritmética das leituras realizadas em cada peça.

3.2.3 Desgaste Diametral do rebolo

Para a medição do desgaste do rebolo utilizado, foi impresso o perfil do rebolo desgastado em um corpo cilíndrico de dimensões 90 x 30 mm, confeccionado em aço ABNT 1020 destinado a esse fim. Tal corpo foi retificado e com a remoção de um volume fixo de material. Os desníveis entre as regiões gastas e não gastas do rebolo foram repassados ao corpo retificado. O instrumento utilizado para a medição do desgaste do rebolo foi o programa de projeção e medição de perfil Taylor Hobson TalyMap, contido no rugosímetro Surtronic3+ digital. Foi utilizado um apalpador com 2 μm de raio com um cut-off (l_r) de 0,025 mm e comprimento de amostragem (l_c) de 1,25 mm. Dessa forma foi possível definir a relação G (relação entre o volume de material removido com o volume do rebolo gasto).

Nas Figuras 3.12 e 3.13 são apresentados o processo para a impressão do perfil do rebolo na peça e o esquema para avaliação do volume do material desgastado do rebolo, respectivamente.

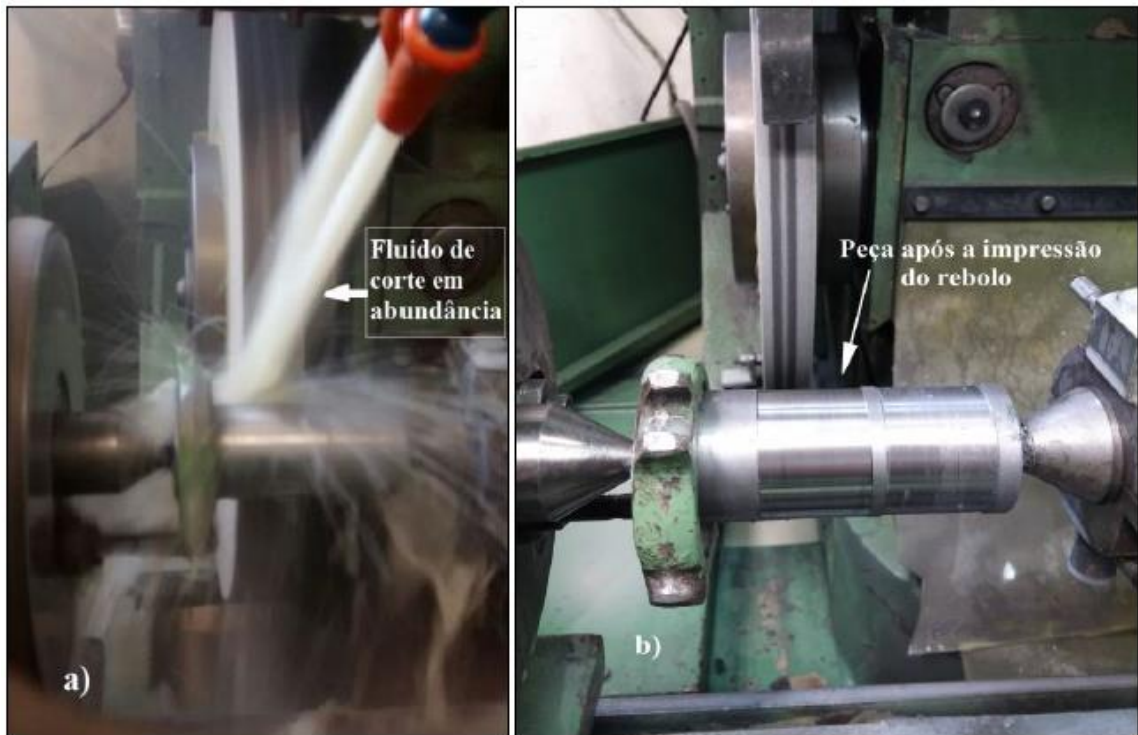


Figura 3.12. Método para avaliação de desgaste do rebolo: a) operação de impressão do rebolo na peça. b) peça após a impressão.

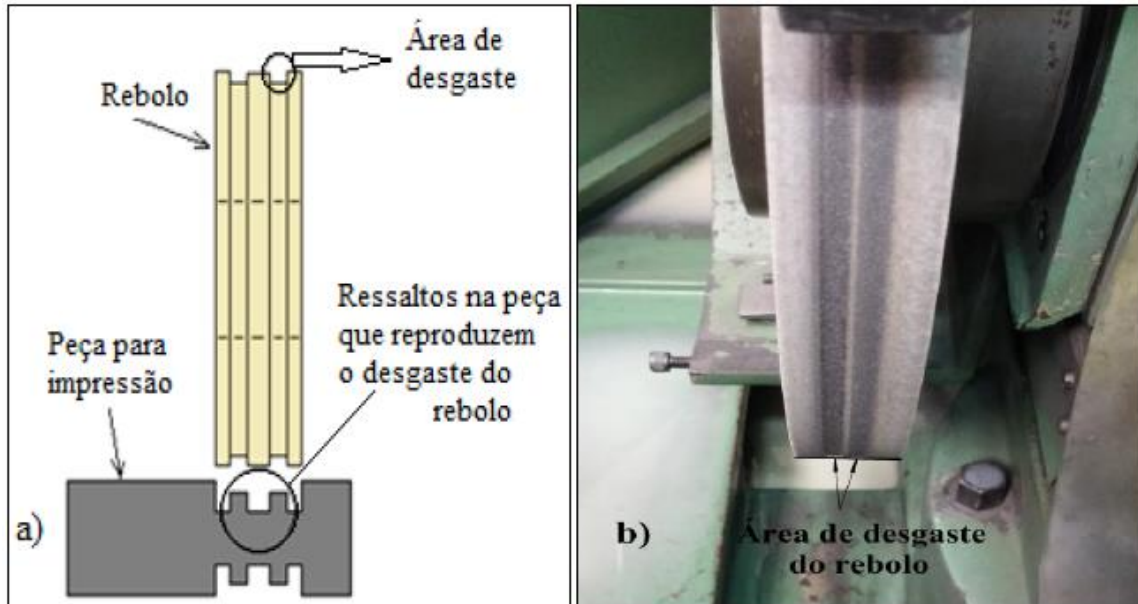


Figura 3.13. Esquema ilustrativo do processo: a) impressão do perfil do rebolo na peça. b) representação da área desgastada no rebolo.

O material cilíndrico de impressão do desgaste do rebolo foi posto em um bloco em V a fim de medir o deslocamento do raio da amostra, com isso determina-se uma linha referencial

entre as duas extremidades e se avalia a diferença entre a marca inicial de referência sem desgaste com a parte mais baixa no sentido radial (área que reproduziu o desgaste do rebolo), conforme mostrado na Figura 3.14.

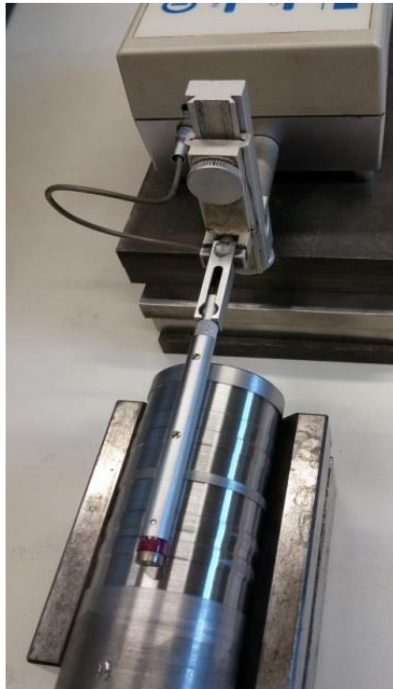


Figura 3.14. Instrumento utilizado na medição de desgaste diametral do rebolo.

A rugosidade foi medida de forma a selecionar uma parte desgastada e de uma parte não gasta, assim para calcular o desgaste do rebolo foi medida a diferença entre os dois níveis observados, conforme é mostrado na Figura 3.15. Nota-se que o desgaste medido é no raio, para achar o desgaste diametral é preciso multiplicar o desgaste radial por dois.

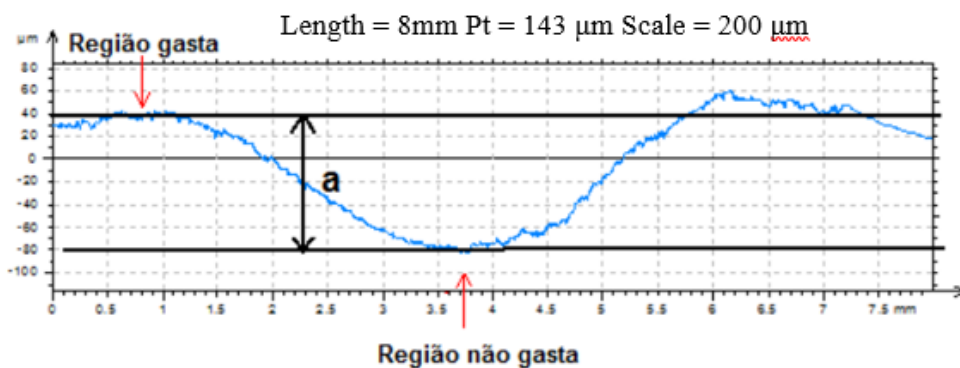


Figura 3.15. Representação da medição do desgaste.

3.2.4 Microscopia óptica

Para realizar as análises metalográficas as amostras foram preparadas de acordo com os seguintes procedimentos que foram feitos no Laboratório de Materiais da Unesp de Bauru: corte da peça e seu respectivo embutimento. Posteriormente as amostras foram lixadas utilizando lixas na seguinte sequência: 80, 120, 220, 320, 400, 500 e 600, e polimento com alumina de granulometria 1 μm . Após, as amostras foram atacadas quimicamente utilizando um reagente químico de HNO_3 (Ácido nítrico) e $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ (Etanol), com o auxílio de um microscópio Olympus BX51M, pertencente ao Laboratório de Anelasticidade e Biomateriais da Faculdade de Ciências da Unesp de Bauru, foram realizadas as micrografias ópticas com uma ampliação de 1000x, suficiente para detectar possíveis alterações na microestrutura da amostra.

A análise metalográfica dos corpos de prova foram realizadas após os ensaios e escolheu-se uma das peças de cada condição de retificação. Estes corpos de prova foram cortados em uma cortadora metalográfica conforme ilustrado na Figura 3.16.



Figura 3.16. Representação do corte da amostra do corpo de prova e retirada de material para as análises metalográficas e determinação de microdureza.

O corte das peças selecionadas foram feitos com baixa velocidade e com o uso de fluido de corte em abundância, para evitar prejuízos térmicos aos corpos de prova. Após a concretização do corte, foi feito o embutimento das amostras cortadas em baquelite, conforme ilustrado na Figura 3.17.

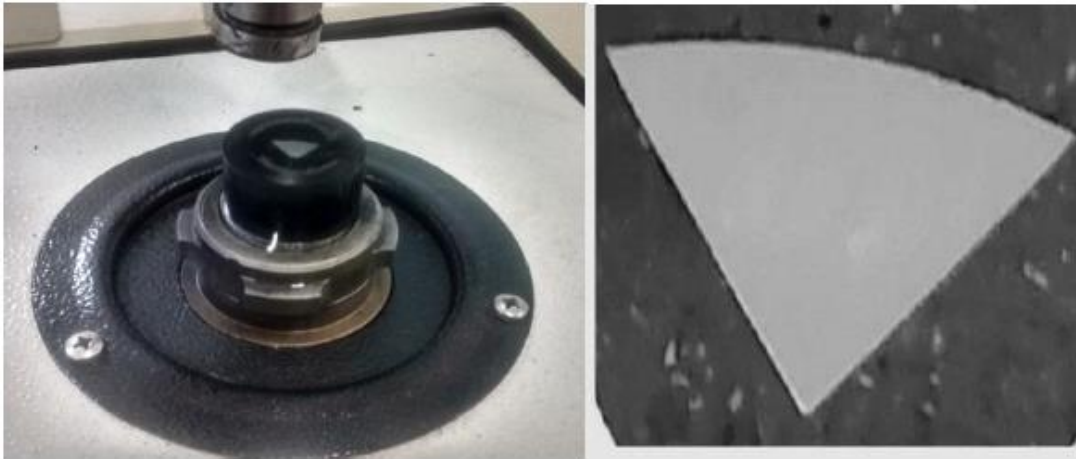


Figura 3.17. Amostra após o embutimento do corpo de prova em resina baquelite.

Na sequência, foi realizado o lixamento das amostras embutidas em baquelite, com a ajuda de uma lixadeira manual passando a peça pela conjunto de lixas de alumina de granulometria mesh na sequência dos seguintes tamanhos: 80, 120, 220, 320, 400, 500 e 600, conforme apresentado na Figura 3.18.



Figura 3.18. Lixadeira manual

Após o lixamento, foi realizado o polimento por meio de máquina politriz metalográfica modelo AP 2, marca STRUERS, com a rotação do prato em 500 rpm, com a utilização de alumina de granulometria 1 μm , como mostrada na Figura 3.19.

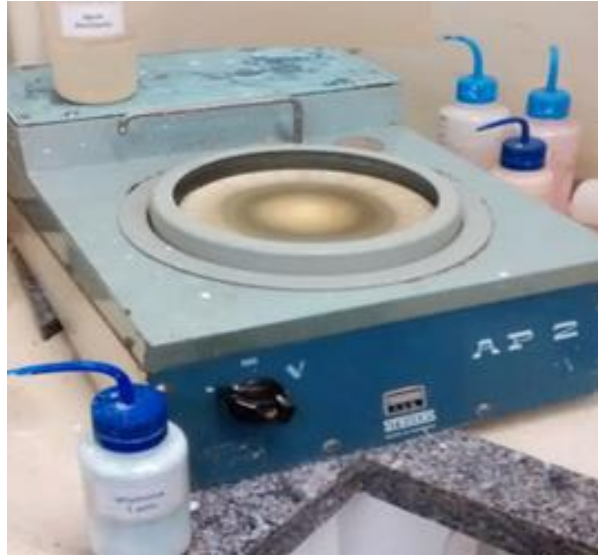


Figura 3.19. Politriz Metalográfica marca STRUERS.

Após o procedimento de polimento, as amostras passaram por um processo de ataque químico com Nital 2% por aproximadamente 10 segundos e lavadas com água destilada e álcool etílico anidro P.A., para a revelação da microestrutura. O ataque permitiu melhor visualização da microestrutura do material por meio da micrografia, realizada no microscópio óptico da marca OLYMPUS®, modelo BX 51M, conforme Figura 3.20, o equipamento dotado de câmera e software para captura das imagens.

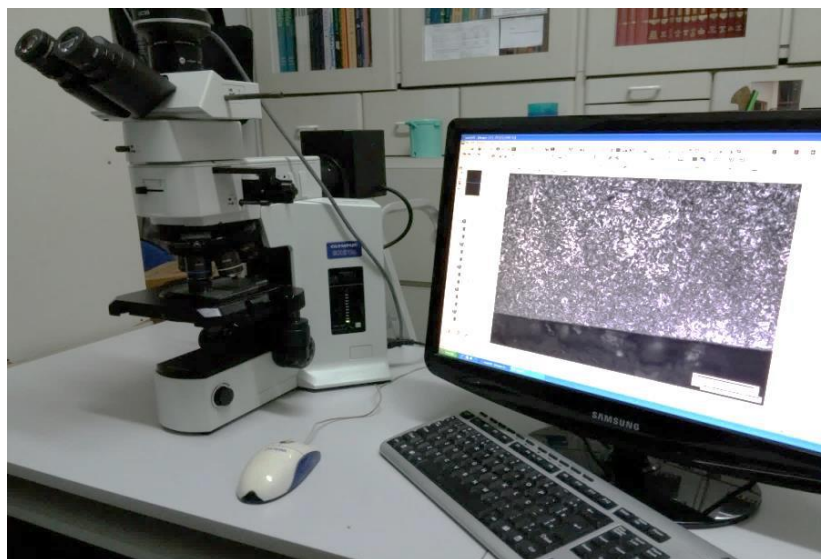


Figura 3.20. Microscópio Óptico utilizado na captação das imagens metalográficas.

O ensaio tem como finalidade observar a superfície que foi retificada e suas possíveis alterações microestruturais mediante as condições de usinagem propostas.

3.2.5 Microdureza

Com o intuito de avaliar se houve endurecimento superficial na peça retificada, foi realizada a medição de microdureza na peça. Para esse fim foi utilizado um microdurômetro da marca Mitutoyo, MicroWizhard versão 1.04 conforme Figura 3.21.



Figura 3.21. Microdurômetro utilizado na aferição da microdureza.

Para a aferição da microdureza a amostra foi fixada no equipamento, o foco foi ajustado, os micrômetros foram zerados quando o eixo das abscissas estava na interface peça-baquelite e o eixo das ordenadas estava próximo ao centro da peça. Foram feitas 9 medições em cada peça, o micrômetro das ordenadas era posicionado nas posições 60, 120 e 180 μm , enquanto o micrômetro das abscissas nas posições 0, 60 e 120 μm . Com isso obteve-se três medições para cada 60 μm avançados na superfície retificada para o interior da peça, para depois calcular a média das três medições a fim de impedir considerar apenas a dureza em um ponto restrito. Após as nove indentações a peça ficava de acordo com a Figura 3.22.

O equipamento foi ajustado para sobrepor uma carga de 0,3 kgf a qual proporcionou diagonais de quase 30 μm , ficando esta medida dentro da norma ASTM E92-17 (medição da microdureza superficial) e a escala empregada na análise foi a Vickers, sendo fornecida também a escala Rockwell C pela máquina. Os espaços de tempo para a concretização das medições foram de 4 segundos para a aplicação da carga, 10 segundos de carga aplicada e 4 segundos

para a retirada da mesma. Todos os procedimentos para medir a dureza dos materiais foram feitos no Laboratório de Materiais da Unesp de Bauru.

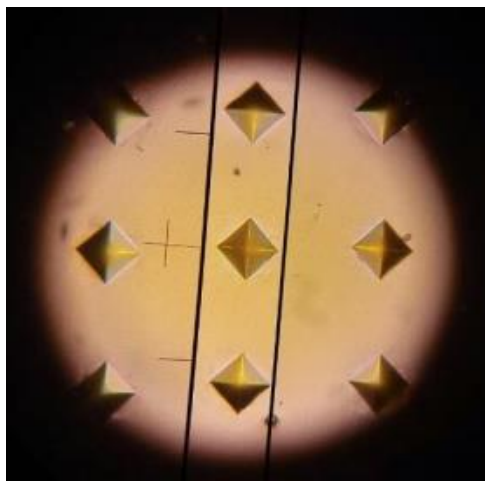


Figura 3.22. Peça após a realização da medição de microdureza.

3.2.6 Emissão Acústica

A medição da emissão acústica foi efetivada com o uso de um sistema de monitoramento modelo DM42, marca Sensis e um sensor fixo do aparelho foi colocado na mesa da retificadora, com a intenção de detectar as prováveis mudanças deste sinal e sua relação com as seguintes variáveis de saída. Estes equipamentos são capazes de monitorar em tempo real o sinal de emissão acústica por meio do seu valor quadrático médio - RMS (Root Mean Square).

A captação do sinal empregou um sensor de EA para capturar as mudanças das tensões de deformação derivadas da retificação e as transmitir em sequência para o módulo de EA, que as transforma em tensões elétricas. O módulo envia o sinal destas tensões elétricas até a placa de aquisição de dados instalada no notebook de maneira direta, sem a necessidade de qualquer manipulação de dados.

Durante os ensaios de retificação, emprega-se os seguintes parâmetros: ganho de sinal = 5; redução de ruído = 0; filtro passa alta frequência de corte = 10 K e constante de tempo = 1 ms.

O sistema de monitoramento de aquisição de emissão acústica (DM42) e de potência média foram interligados a um bloco de conectores BNC, modelo BNC 2110, que, por sua vez, foi conectado a uma placa de aquisição de dados, conforme Figuras 3.23, esquemas de monitoramento e análise de sinais e 3.24 sensores para captação dos sinais.

3.2.7 Potência elétrica consumida

O sinal de potência elétrica foi obtido através da corrente elétrica consumida pelo motor de acionamento do eixo árvore do rebolo. O motor de acionamento é da marca WEG, modelo CFW 08, possui uma saída de 10 V, pelo meio da qual pode-se conseguir a leitura dos valores de tensão e corrente elétrica consumida durante o processo de retificação.

Para monitorar o consumo da tensão e corrente elétrica consumida, foi utilizado um módulo eletrônico Curvopower 3 disponível no laboratório projetado e construído em parceria com o Laboratório de Aquisição de Dados e Processamento de Sinais – LADAPS da Faculdade de Engenharia UNESP – Bauru. O módulo eletrônico Curvopower 3 foi empregado para conversão dos valores de corrente elétrica e tensão (provenientes do motor) em sinais de tensões compatíveis para serem enviados a uma placa de aquisição de dados e gerenciados através de programa de aquisição de dados, que foi desenvolvido, utilizando-se a placa de aquisição de dados A/D e o software LabView 7.1, ambos da National Instruments, conforme Figuras 3.23 esquema de monitoramento e análise de sinais e 3.24 sensores para captação dos sinais.

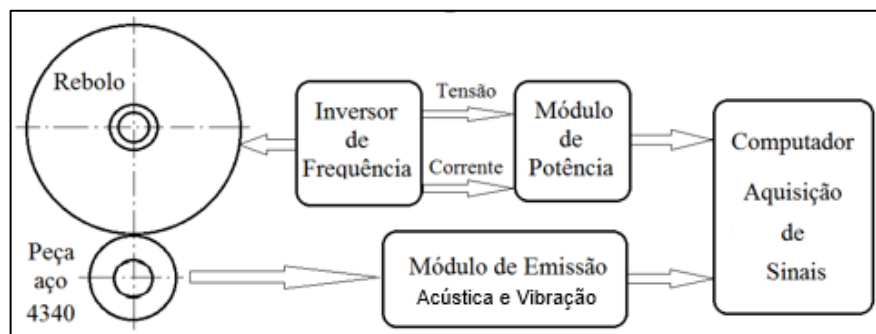


Figura 3.23. Esquema para monitoramento e análise dos sinais.

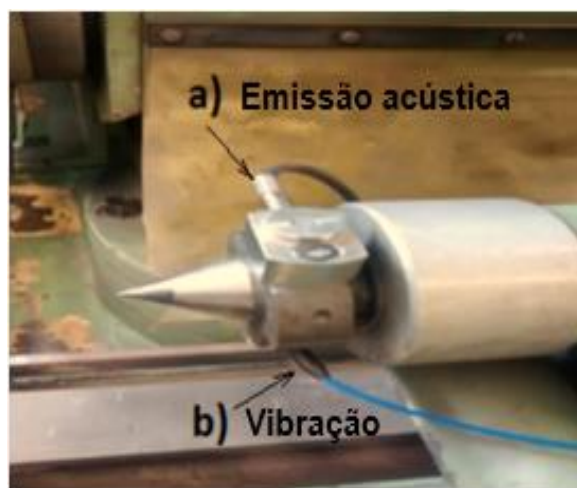


Figura 3.24. Sensores para captação dos sinais.

Os resultados foram tratados com o auxílio do software MATLAB R2015a da MathWorks, pelo meio do qual pode-se transformar o sinal adquirido em volts para watt conforme equação (7), extrair o valor máximo de potência consumida em cada ciclo e fazer uma média dos valores para cada experimento.

$$P_w = 360 \times V + 3,5(\text{Watts}) \quad (7)$$

Onde:

P_w – Potência consumida (Watts);

V – Tensão lida no terminal BNC do módulo (Volts).

3.2.8 Vibração

A vibração é um parâmetro importante para se monitorar, pois ela limita a produtividade e a qualidade superficial das peças. Assim os valores de vibração do processo foram mensurados para melhor avaliar os processos de lubrificação e refrigeração.

O sinal de vibração está diretamente ligado com a perda de precisão nas tolerâncias da peça, é responsável por produzir ondulações na superfície do material retificado.

Durante a prática dos ensaios, as medições das vibrações foram realizadas por meio da utilização de um sensor de vibração no cabeçote móvel da máquina, próximo ao contraponto, a fim de captar possíveis variações de sinal.

Os dados coletados referentes à vibração foram posteriormente transmitidos em sequência para o módulo de vibração, que os transforma em grandeza elétrica, que é monitorado pelo software de aquisição de dados, os resultados foram estruturados em gráficos de colunas.

3.3 Análise dos Parâmetros do Processo

Ensaio preliminares foram realizados objetivando melhores condições de usinagem, a serem usadas nos ensaios definitivos, e conseqüentemente, maior eficiência no trabalho. Salienta-se que para alguns parâmetros, os valores utilizados não são os ideais, porém são os valores máximos alcançados na retificadora empregada.

Para analisar as variáveis de saída foram realizados dois ensaios no contorno do rebolo antes da dressagem, após a impressão no corpo de prova para a análise do desgaste diametral do rebolo. Após a impressão no corpo de prova o rebolo foi dressado. Os parâmetros de entrada que foram mantidos constantes em todos os ensaios definitivos foram:

- Processo de retificação cilíndrica externa de mergulho;
- Rebolo CBN;
- Avanço Radial (v_f) ou velocidade de mergulho 0,50 mm/min ($8,33 \times 10^{-6}$ m/s);
- Taxa de alimentação radial para impressão do rebolo de 0,25 mm/min;
- Velocidade de corte (v_s) de 30 m/s (1800 m/min);
- Rotação da peça (n_w) de 204 RPM ($v_w = 0,58$ m/s);
- Tempo de centelhamento para ciclos de retificação (t_s) 1,78 s;
- Tempo de centelhamento no final do ensaio 3,56 s;
- Largura de retificação (b) de 4 mm;
- Profundidade de corte (a): 0,1 mm;
- Dressador conglomerado de diamantes 15 mm x 8 mm x 10 mm;
- Vazão do fluido de corte na refrigeração convencional de 17 l/min ($2,83 \times 10^{-4}$ m³ /s);
- Vazão do fluido de corte no MQL de 100 ml/h ($2,7 \times 10^{-8}$ m³ /s);
- Pressão do ar no MQL de 6,5 bar ($6,5 \times 10^5$ Pa);
- Pressão do sistema de limpeza: 7,0 bar ($7,0 \times 10^5$ Pa);
- Pressão média do fluido de corte convencional 0,2 Pa;
- Profundidade de dressagem (a_d) de 120 μ m – 60 passes avançando o dressador 2 μ m a cada passada sobre o rebolo:
 - Velocidade de dressagem (v_d) de 100 mm/min ($1,66 \times 10^{-3}$ m/s);
 - Material dos corpos de prova aço AISI 4340 temperado 54 ± 2 HRC;
 - Quantidade de peças para os ensaios 51 peças;
 - Condições de lubrificação: convencional (abundante) e MQL;
 - Fluido de corte para técnica convencional Quimatic ME-1 concentração 3%;
 - Fluido de corte para MQL - Biocut 9000 - Quimatic ME-2 - Aqua 180;
 - Ângulo de incidência do bocal de limpeza – 30°.

O trabalho consistiu em 51 ensaios, considerando a aplicação de 09 condições de lubrificação MQL, com limpeza e sem limpeza da superfície de corte do rebolo e velocidade de avanço de 50 mm/min como demonstrado nas Figuras diagrama dos ensaios 3.25, 3.26 e 3.27. Para cada situação de ensaios foram utilizados 3 corpos de prova nas condições de lubrificação, dos quais são:

- Convencional condição adotada como referência para análise das variáveis de saída por ser a mais amplamente empregada;

- MQL sem sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo;
- MQL com sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo.

Quando foi usado o sistema MQL juntamente com o sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo, foi fixado o ângulo de incidência de 30° do jato de limpeza em relação ao raio do rebolo. Oliveira et al. (2011), em seu trabalho, ao limpar a superfície de corte do rebolo com jato secundário de ar comprimido verificaram que o ângulo de incidência de 30° em relação ao raio do rebolo obteve os melhores resultados. As condições analisadas no presente trabalho foram:

- MQL utilizando o fluido Biocut 9000 sem o sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo com óleo puro, ou seja, sem adição de água representado por A1, A2 e A3;
- MQL utilizando o fluido Biocut 9000 com o sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo posicionado a 30° em relação ao raio do rebolo com óleo puro, ou seja, sem adição de água representado por B1, B2 e B3;
- MQL com 83,00% de diluição em água utilizando o fluido Biocut 9000 sem o sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo com óleo e diluição de água representado por A4, A5 e A6;
- MQL com 83,00% de diluição em água utilizando o fluido Biocut 9000 com o sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo posicionado a 30° em relação ao raio do rebolo com óleo e diluição de água representado por B4, B5 e B6;
- MQL com 90,90% de diluição em água utilizando o fluido Biocut 9000 sem o sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo com óleo e diluição de água representado por A7, A8 e A9;
- MQL com 90,90% de diluição em água utilizando o fluido Biocut 9000 com o sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo posicionado a 30° em relação ao raio do rebolo com óleo e diluição de água representado por B7, B8 e B9;
- MQL utilizando o fluido Quimatic ME-2 sem o sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo com óleo puro, ou seja, sem adição de água representado por A10, A11 e A12;
- MQL utilizando o fluido Quimatic ME-2 com o sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo posicionado a 30° em relação ao raio do rebolo com óleo puro, ou seja, sem adição de água representado por B10, B11 e B12;

- MQL com 83,00% de diluição em água utilizando o fluido Quimatic ME-2 sem o sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo com óleo e diluição de água representado por A13, A14 e A15;
- MQL com 83,00% de diluição em água utilizando o fluido Quimatic ME-2 com o sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo posicionado a 30° em relação ao raio do rebolo com óleo e diluição de água representado por B13, B14 e B15;
- MQL com 90,90% de diluição em água utilizando o fluido Quimatic ME-2 sem o sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo com óleo e diluição de água representado por A16, A17 e A18;
- MQL com 90,90% de diluição em água utilizando o fluido Quimatic ME-2 com o sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo posicionado a 30° em relação ao raio do rebolo com óleo e diluição de água representado por B16, B17 e B18;
- MQL utilizando o fluido - Aqua 180 sem o sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo com óleo puro, ou seja, sem adição de água – ensaio não realizado, pois não foi possível atomizar o fluido nessas condições;
- MQL utilizando o fluido – Aqua 180 com o sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo posicionado a 30° em relação ao raio do rebolo com óleo puro, ou seja, sem adição de água - ensaio não realizado, pois não foi possível atomizar o fluido nessas condições;
- MQL com 83,00% de diluição em água utilizando o fluido Aqua 180 sem o sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo com óleo e diluição de água representado por A19, A20 e A21;
- MQL com 83,00% de diluição em água utilizando o fluido Aqua 180 com o sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo posicionado a 30° em relação ao raio do rebolo com óleo e diluição de água representado por B19, B20 e B21;
- MQL com 90,90% de diluição em água utilizando o fluido Aqua 180 sem o sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo com óleo e diluição de água representado por A22, A23 e A24;
- MQL com 90,90% de diluição em água utilizando o fluido Aqua 180 com o sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo posicionado a 30° em relação ao raio do rebolo com óleo e diluição de água representado por B22, B23 e B24;

Conforme as Figuras 3.25, 3.26 e 3.27 os diagramas dos ensaios definitivos, onde A são os ensaios sem limpeza e B são os ensaios com limpeza de ar comprimido da superfície de corte do rebolo na utilização do MQL com os três tipos de fluidos (Rocol Biocut 9000, Quimatic Tapmatic ME-2 e VCI Aqua 180) e refrigeração convencional E.

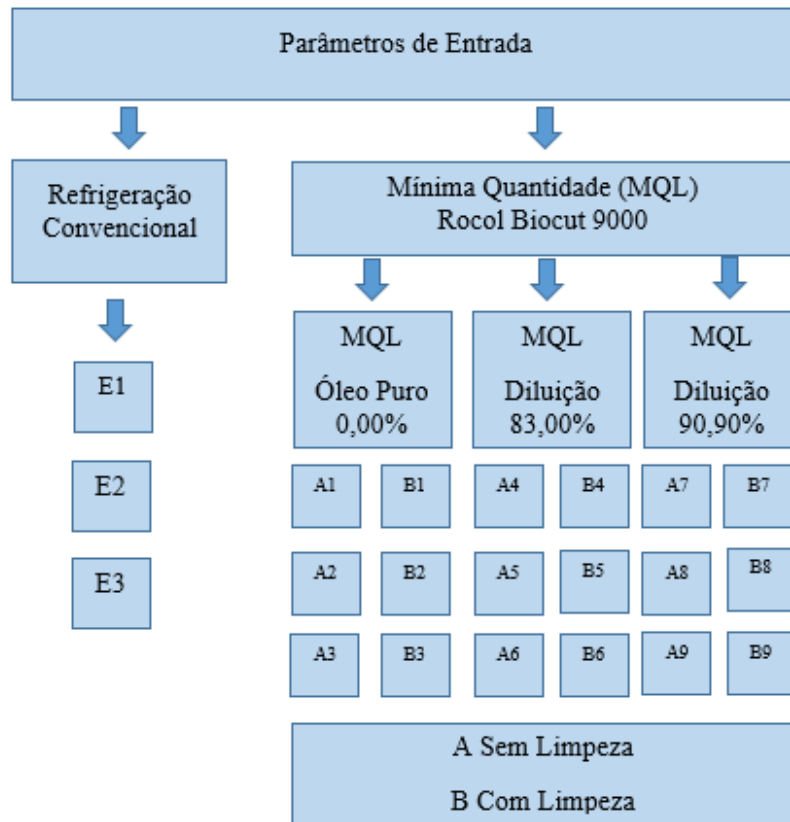


Figura 3.25. Diagrama dos ensaios definitivos com fluido Rocol Biocut 9000.

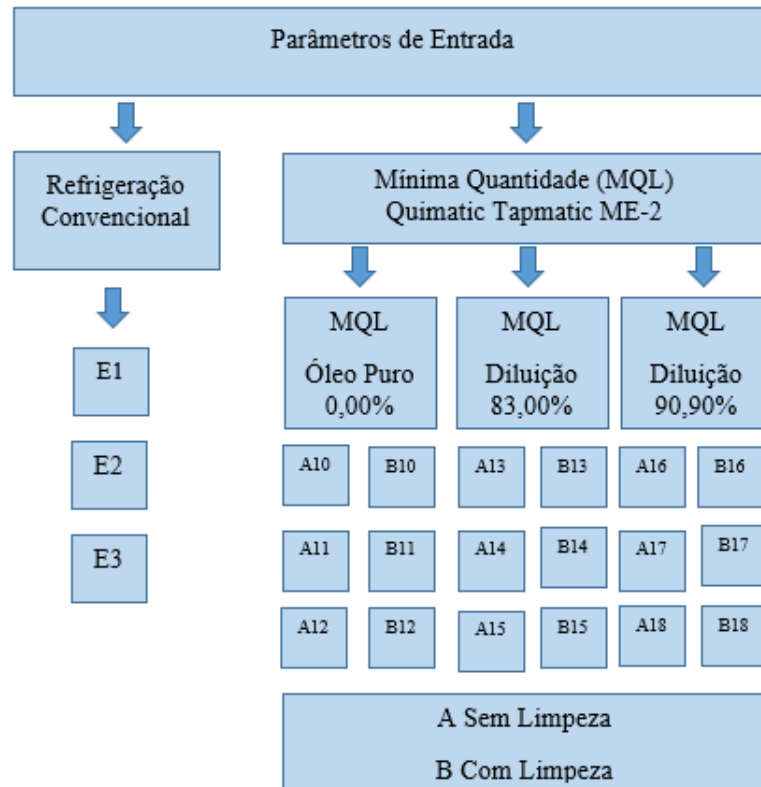


Figura 3.26. Diagrama dos ensaios definitivos com fluido Quimatic Tapmatic ME-2.

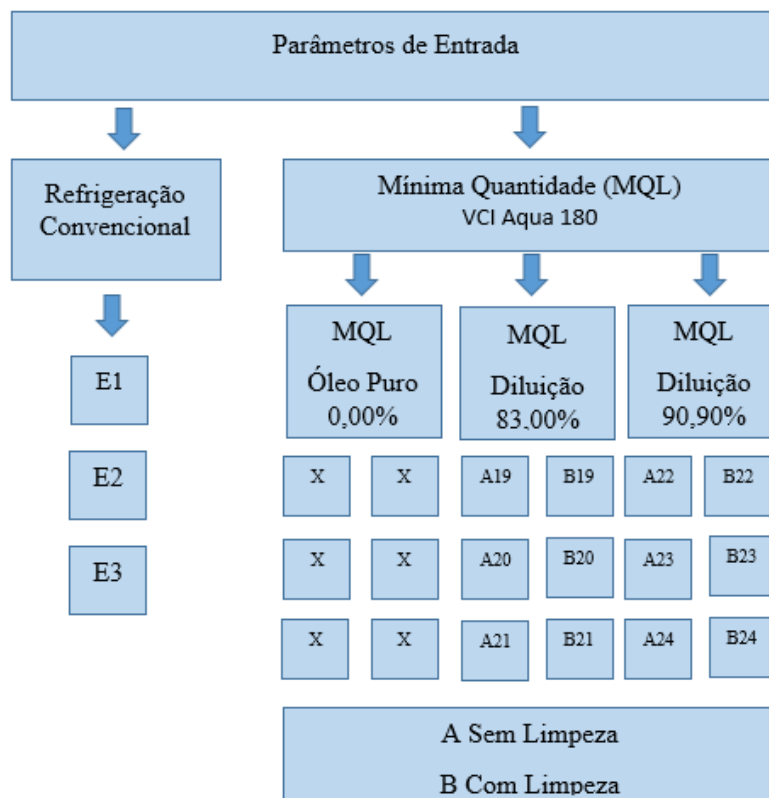


Figura 3.27. Diagrama dos ensaios definitivos com fluido VCI Aqua 180.

O procedimento seguido para a execução de cada ensaio está ilustrado no fluxograma apresentado na Figura 3.28.

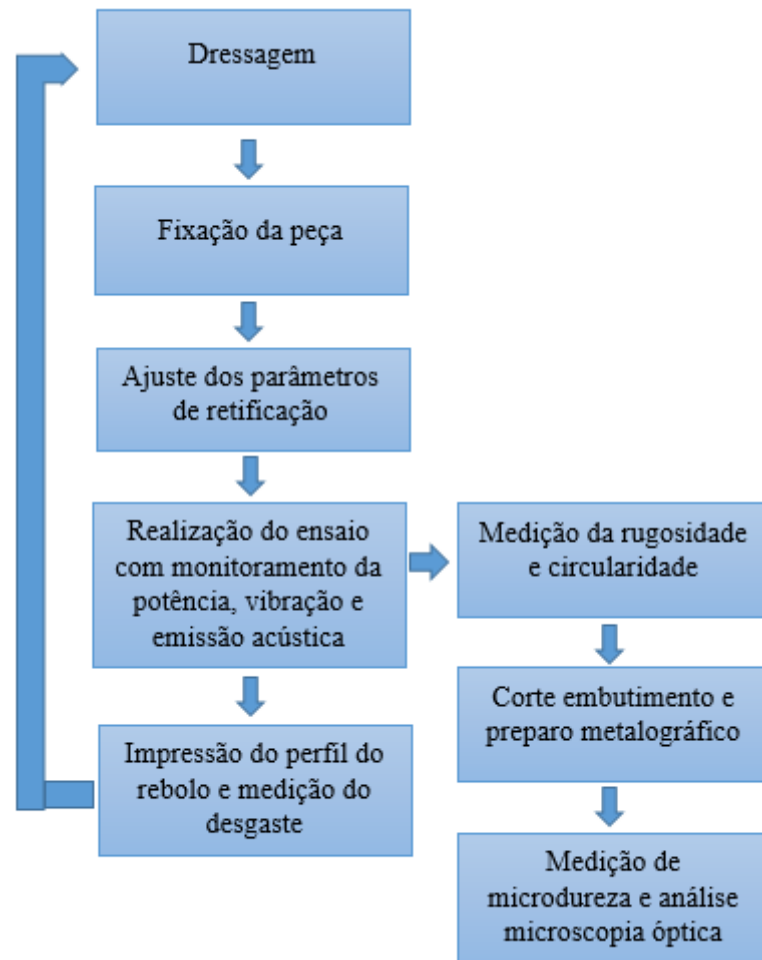


Figura 3.28. Planejamento dos ensaios

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados referentes as suas variáveis de saída que são rugosidade (Ra), desvios de circularidade, relação G (volume de material removido/ volume de rebolo desgastado), microdureza, microscopia óptica da superfície da peça, potência elétrica consumida, vibração e emissão acústica, os quais foram apresentados em forma de gráficos com os seus respectivos valores médios e desvios-padrão para cada condição analisada.

4.1 Rugosidade

A Figura 4.1 mostra os resultados de Rugosidade Média para cada condição de lubrificação avaliada, onde os resultados apresentados em colunas são referentes às condições com aplicação de MQL e a linha horizontal amarela representa a condição de comparação que é a, aplicação de fluido de corte em abundância.

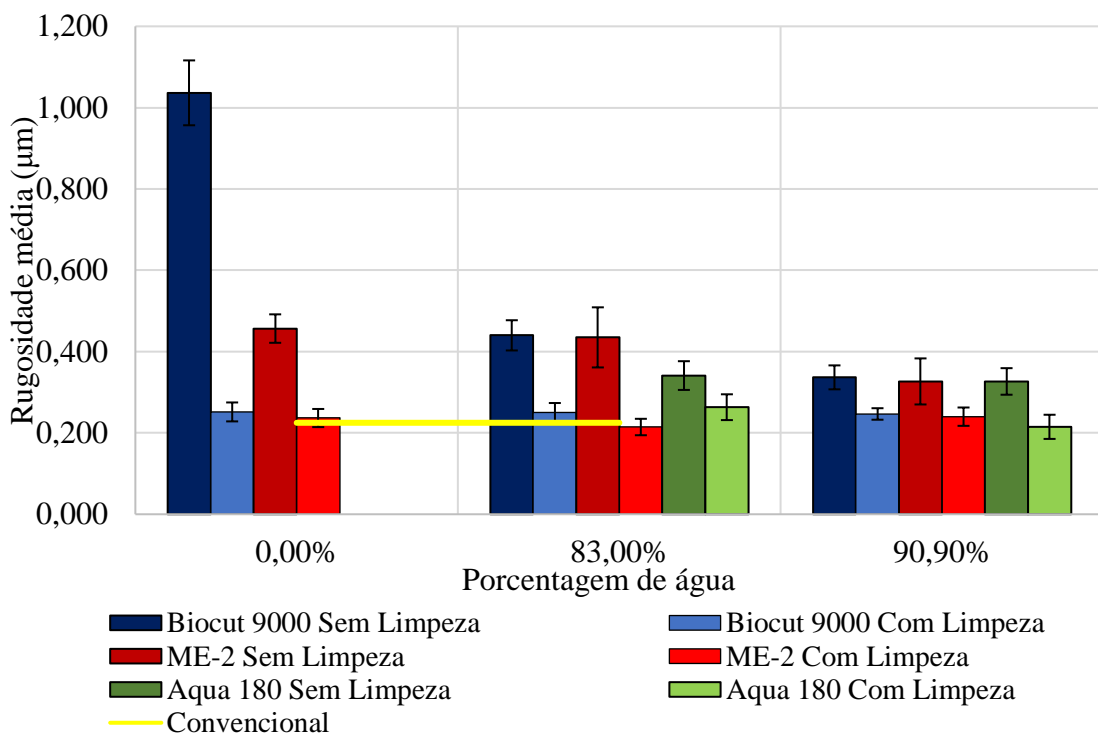


Figura 4.1. Rugosidade Média (Ra) para cada condição de lubrificação avaliada.

A diluição em água do óleo sintético durante a aplicação da técnica de MQL surtiu efeito positivo na rugosidade superficial da peça (Figura 4.1), observa-se que as menores rugosidades

(menores irregularidades na superfície da peça) foram obtidas na maior porcentagem de água (90,9%).

Constatou-se que a taxa de redução da rugosidade em função do aumento da quantidade de água no fluido de corte variou de acordo com o fluido testado. A Tabela 4.1 exibe o impacto da adição de água na rugosidade apresentando o coeficiente angular das retas, apresentadas pela Figura 4.2, que ligam as porcentagens avaliadas.

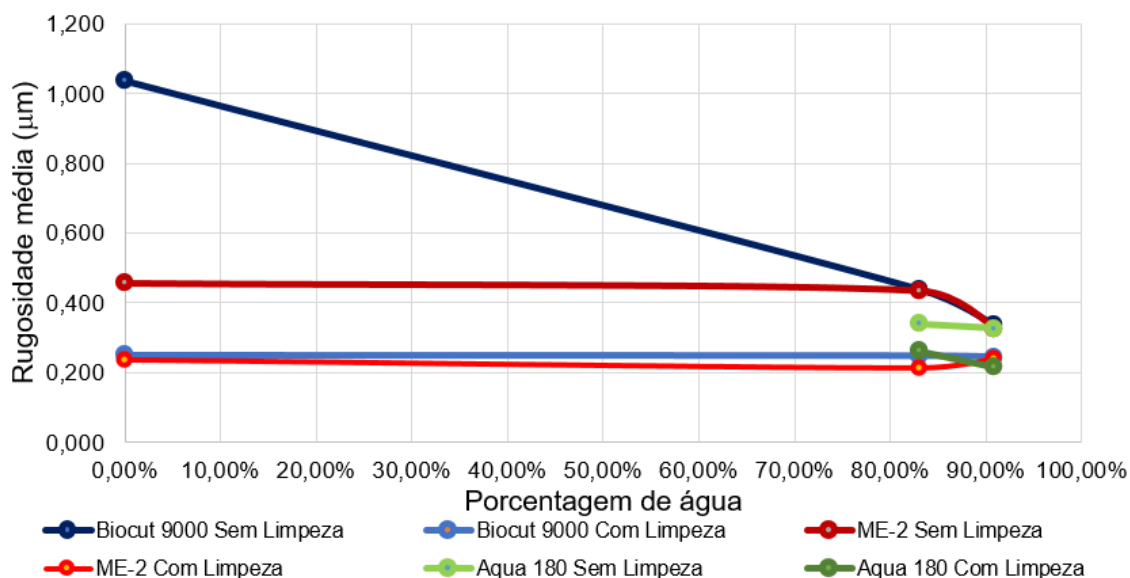


Figura 4.2. Comportamento do parâmetro rugosidade na variação da porcentagem de água.

Tabela 4.1. Coeficientes angulares das retas de resposta da rugosidade em função da porcentagem de água.

Fluido	Coeficiente angular da reta que liga	
	0% para 83%	83% para 90,9%
Biocut sem limpeza	0,7186	1,3080
Biocut Com Limpeza	0,0020	0,0422
ME-2 Sem Limpeza	0,0261	1,3713
ME-2 Com Limpeza	0,0267	0,3222
Aqua 180 Sem Limpeza	-	0,1828
Aqua 180 Com Limpeza	-	0,6118

Observa-se que o fluido Biocut 9000 apresentou resposta acentuada na primeira variação da porcentagem de água em comparação ao fluido ME-2. Já no segundo acréscimo de água observou-se uma melhor resposta da rugosidade com a variação de água em relação à

primeira adição nos dois fluidos, esse resultado foi inesperado, pois era esperado que em maiores porcentagens de água a taxa de redução da rugosidade fosse menor.

Dois parâmetros se alteram e melhoram o desempenho da técnica de MQL com a adição de água, a viscosidade e a capacidade de refrigeração do fluido. O processo de atomização tende a ocorrer com maior eficiência com fluidos de menores viscosidades, isso porque a tensão entre as moléculas do fluido é menor e menores serão os esforços necessários para quebrá-las. Uma vez que a água possui viscosidade menor que o óleo sintético, ao ter sua proporção aumentada, a viscosidade do fluido de corte se reduz, melhorando o processo de atomização, com isso, por mais que adicionar água reduza a capacidade de lubrificação do fluido de corte, o efeito lubrificante da técnica de MQL pode aumentar devido a maior eficiência do processo de atomização e penetração do fluido de corte na interface peça-rebolo.

A adição de água impacta na capacidade de refrigeração do MQL positivamente. As gotículas de água ao penetrarem na zona de corte absorvem grande quantidade de energia térmica, elevando substancialmente sua temperatura. Após atingir seu ponto de ebulição, a água absorve quantidade considerável de calor para evaporar, dissipando a energia térmica consumida durante o processo.

Com essas modificações a adição de água aumentou os efeitos refrigerantes e lubrificantes do MQL.

De acordo com Khandke et al. (2018), a rugosidade superficial é beneficiada por maiores efeitos lubrificantes e refrigerantes aplicados na interface ferramenta-peça.

Pelos resultados observa-se que as rugosidades obtidas com a utilização do sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo foram menores do que não foram utilizadas esse sistema.

Demonstrando a eficiência do sistema adotado em expelir os cavacos que entopem o rebolo e prejudicam a sua capacidade de corte. Khandke et al. (2018), afirmaram que o fenômeno de empastamento afeta a interação dos grãos em trabalho com a peça prejudicando a remoção de material e piorando a rugosidade superficial.

4.2 Desvios de Circularidade

A Figura 4.3, apresenta a média dos desvios de circularidade para cada condição da técnica de MQL, bem como os desvios padrões entre as amostras. A linha horizontal representa a média dos desvios de circularidade para comparação das novas tecnologias a condição de comparação, ou seja, aplicação de fluido em abundância.

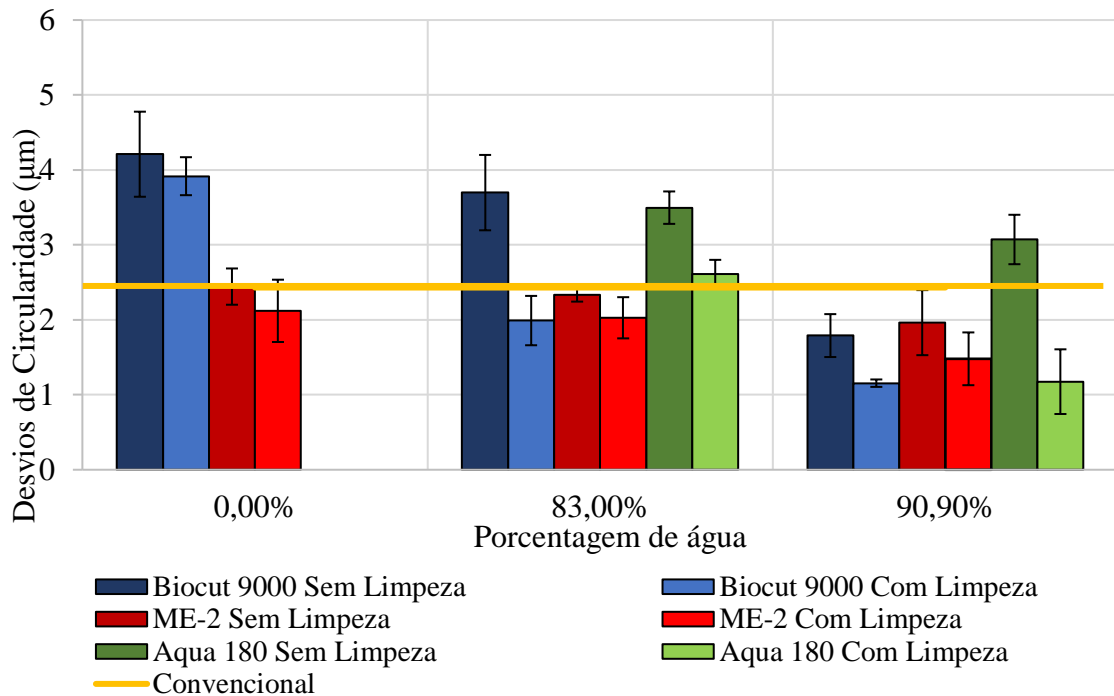


Figura 4.3. Desvios de circularidade para cada condição de lubrificação avaliada.

O desvio de circularidade apresentou uma resposta similar com a rugosidade a adição de água, melhores resultados em maiores proporções de água. Além do que, com a utilização do sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo os desvios de circularidade foram significativamente menores em relação a não utilização desse sistema. No entanto, comparando os resultados de rugosidade (Figura 4.1) com os resultados de desvios de circularidade (Figura 4.3), observou-se que com a utilização do sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo os resultados de rugosidade não apresentaram uma variação significativa com a variação da porcentagem de água, já nos resultados de circularidade essa variação foi visível em todos os fluidos. Notou-se que a rugosidade superficial é fortemente influenciada pelas condições de interação entre os grãos abrasivos e a superfície da peça, dessa forma evitar que o empastamento ocorra, utilizando o sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo, é primordial para atingir melhores resultados. Já o parâmetro desvio de circularidade é principalmente afetado pela temperatura do processo, dessa forma, adotando uma condição de lubrificação com maior efeito refrigerante evita-se que distorções térmicas ocorram e minimizam-se os desvios geométricos.

Todas as condições que utilizaram o sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo apresentaram menores desvios de circularidade em relação a não utilização do sistema de limpeza. Isso porque o empastamento da superfície do rebolo prejudica a interação dos grãos

com a peça, diminuindo a eficiência de corte do rebolo. Com isso, mais energia é consumida para realizar a remoção do material e a geração de calor aumenta.

Observa-se que ao adotar uma porcentagem de água de 90,9% os desvios de circularidade foram inferiores à média dos desvios de circularidade obtidos com a utilização da aplicação em abundância de fluido de corte, com exceção do fluido Aqua 180. Dessa forma, os resultados de desvios de circularidade apresentaram o potencial de que a adição de água nos fluidos de corte na técnica de MQL tem o alcance de resultados satisfatórios com o mínimo impacto ao meio ambiente.

4.3 Potência Elétrica Consumida

A potência elétrica consumida é utilizada para avaliar os esforços inerentes do sistema. No entanto, esses esforços variam de acordo com uma série de fatores: parâmetros de entrada, condições da ferramenta, material usinado e a condição de lubrificação adotada.

Visto que essa pesquisa busca definir o conjunto de parâmetros de entrada entre os avaliados para a técnica de MQL é interessante analisar a energia consumida pelo processo durante a remoção de material. Dessa forma, a Figura 4.4 representa a média da potência de corte consumida para cada condição de lubrificação e seus respectivos desvios-padrão.

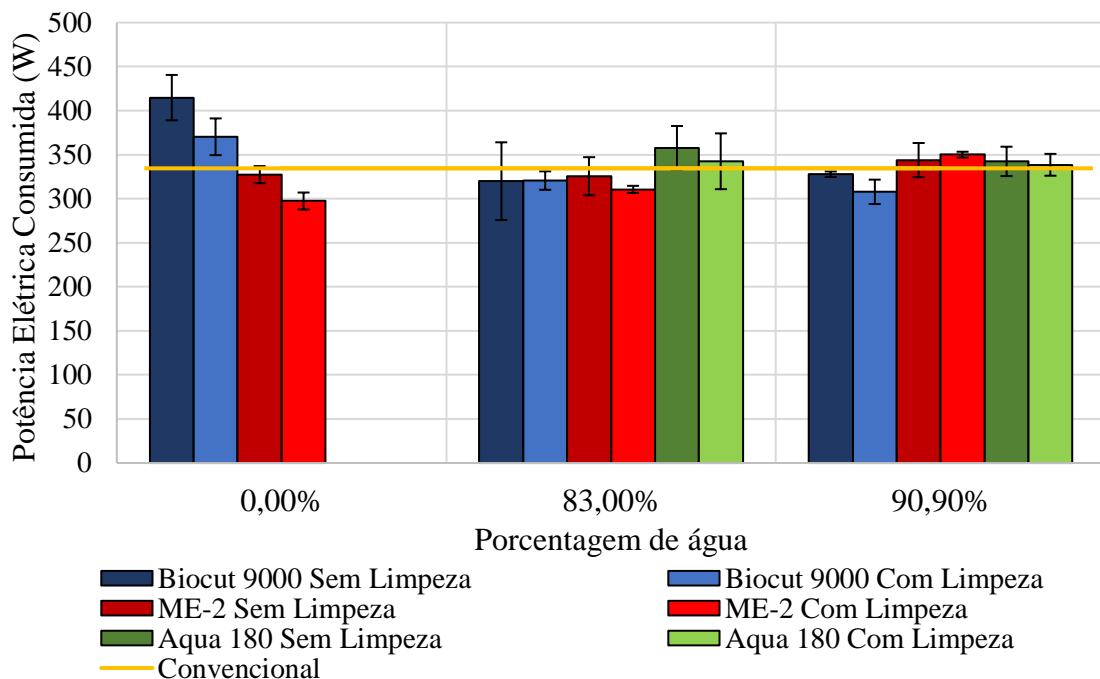


Figura 4.4. Potência elétrica consumida para cada condição de lubrificação avaliada.

Observou-se que o comportamento do fluido ME-2 foi diferente do comportamento dos fluidos Biocut 9000 e Aqua 180, apresentando um aumento da potência com a adição de água, já os demais fluidos apresentaram uma redução na potência de corte com a adição de água. Dessa forma, nota-se que as diferentes composições dos óleos sintéticos influenciam no comportamento que o fluido teve quando submetido a variação na condição de uso. Assim duas hipóteses são levantadas para explicar os dois comportamentos apresentados:

- A redução da potência elétrica consumida com a adição de água pode ser explicada pela maior lubrificação do processo obtida graças à maior eficiência da técnica de MQL. Com a adição de água a viscosidade do fluido a ser atomizado é reduzida, com as tensões superficiais mais baixas, fazendo com que a atomização ocorra com maior eficiência, o aerossol atinja a zona de corte e a lubrificação ocorra com maior eficiência.

- Por outro lado, a adição de água reduz a porcentagem de óleo sintético na calda, com isso a lubrificação que pode ser provida pelo fluido de corte acaba reduzida.

4.4 Emissão Acústica

A Figura 4.5 demonstra os valores da média aritmética do sinal de emissão acústica para cada condição analisada bem como os seus respectivos desvios- padrão.

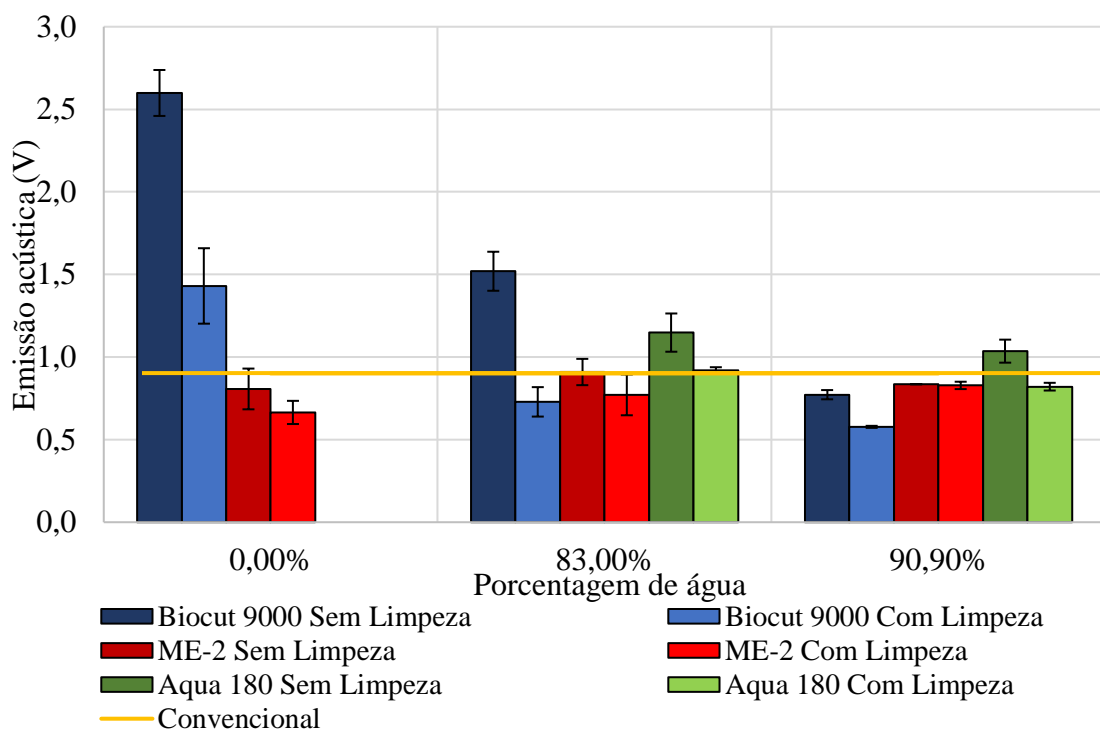


Figura 4.5. Emissão acústica para cada condição de lubrificação avaliada.

Avaliando o comportamento dos sinais de emissão acústica para o fluido Biocut 9000 observou-se uma redução desse sinal de acordo com a adição de água. Para o fluido ME-2 a emissão acústica se manteve estável com a adição de água. Já para o fluido Aqua 180 houve uma pequena redução no sinal com a adição de água. A adição de água tem demonstrado reduzir a severidade do mecanismo de corte por trás da retificação, uma vez que a geração do sinal de emissão acústica é devido ao atrito, deformações plásticas e elásticas, cisalhamento dos planos cristalinos e remoção do cavaco (Oliveira et al., 2012).

Nota-se pela Figura 4.5 que a utilização do sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo contribuiu positivamente na redução do sinal de emissão acústica. Observa-se que com a utilização desse sistema todas as médias de EA ficaram abaixo ou muito próximo da média de EA obtida com a utilização do sistema convencional de lubrificação. De acordo com Oliveira (2012) com a impregnação de material metálico na superfície de corte do rebolo (empastamento) a eficiência de corte da ferramenta é reduzida, passando a ocorrer mais atrito e deformação plástica durante o processo.

4.5 Vibração

A Figura 4.6 representa a média da vibração do sistema durante a retificação para cada condição de lubrificação avaliada.

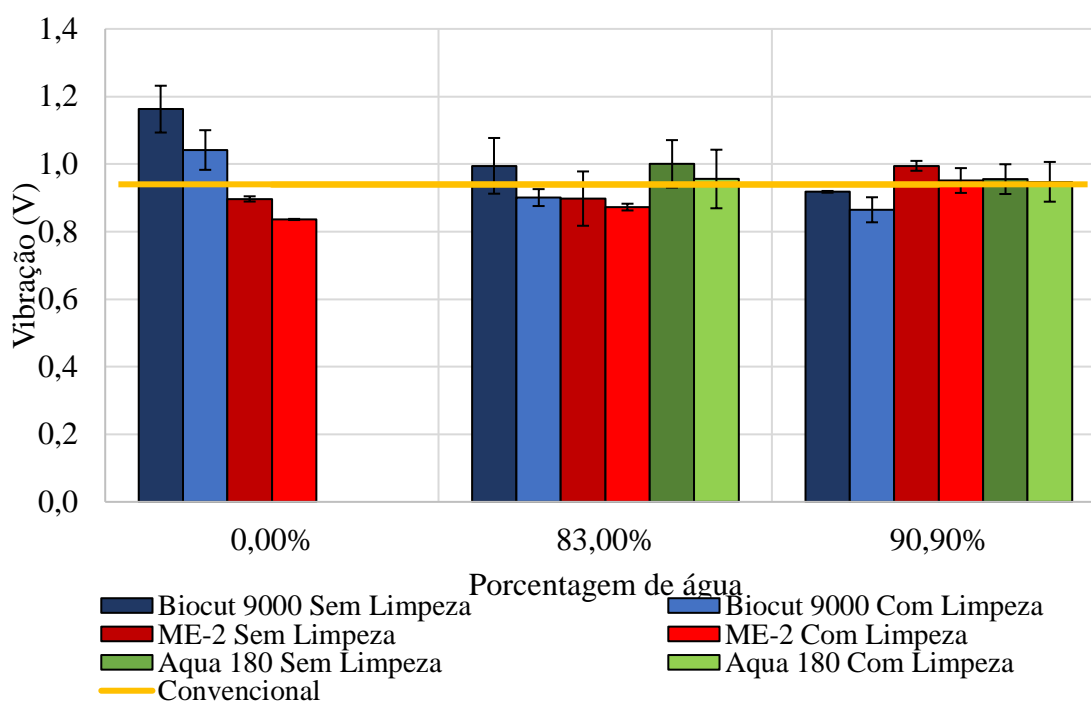


Figura 4.6. Vibração para cada condição de lubrificação avaliada.

A condição que apresentou maior vibração foi a utilização do fluido Biocut 9000 puro sem o sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo. Essa vibração mais elevada comparada com as outras condições pode ser explicada pela ocorrência do fenômeno de empastamento com uma intensidade maior, elevando os esforços de corte e com isso aumentando a vibração do sistema. Nota-se que nessa condição foram obtidos os piores parâmetros de saída da peça conforme Figura 4.1 e Figura 4.3, que de acordo com Rowe (2014), a vibração causa ondulações na superfície e perda de precisão geométrica.

A adição de água nos fluidos Biocut 9000 e Aqua 180 reduziu a vibração do sistema nos processos de retificação com esses fluidos, já no fluido ME-2 a adição de água tendeu a aumentar a vibração do sistema. Essa divergência do comportamento dos fluidos é interessante, pois demonstra que diferentes mecanismos de respostas podem surgir com uma alteração de parâmetro. No caso dos fluidos que tiveram a vibração menor em maiores porcentagens de água se deu pelo maior efeito refrigerante na interface peça e rebolo, uma vez que com o acréscimo de água o fluido de corte atinge com mais eficiência a interface peça-rebolo devido sua melhor nebulização.

A adoção do sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo utilizando ar comprimido demonstrou reduzir a vibração do sistema com seu uso. A expulsão do cavaco com a utilização desse método aumenta a eficiência do corte e a remoção do material se torna menos severa e menores são os esforços que fazem com que o sistema vibre.

4.6 Desgaste Diametral do Rebolo

A Figura 4.7 representa os desgastes diametrais médios do rebolo utilizado após a retificação em cada condição de lubrificação e os seus respectivos desvios-padrão.

Observa-se que o comportamento do desgaste diametral do rebolo, resultante da utilização da mínima quantidade de lubrificante na retificação foi compatível com o comportamento do desgaste obtido utilizando a refrigeração convencional. Em maiores proporções de água e com a utilização do sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo com ar comprimido o desgaste diametral obtido com a técnica de MQL foi 79% menor que o desgaste obtido com a refrigeração convencional, demonstrando a viabilidade de se utilizar uma metodologia com baixo impacto ambiental e com maior eficiência que a atualmente utilizada, pelo menor desgaste da ferramenta, reduzindo os custos de ferramental e aumentando o intervalo entre as dressagens do rebolo.

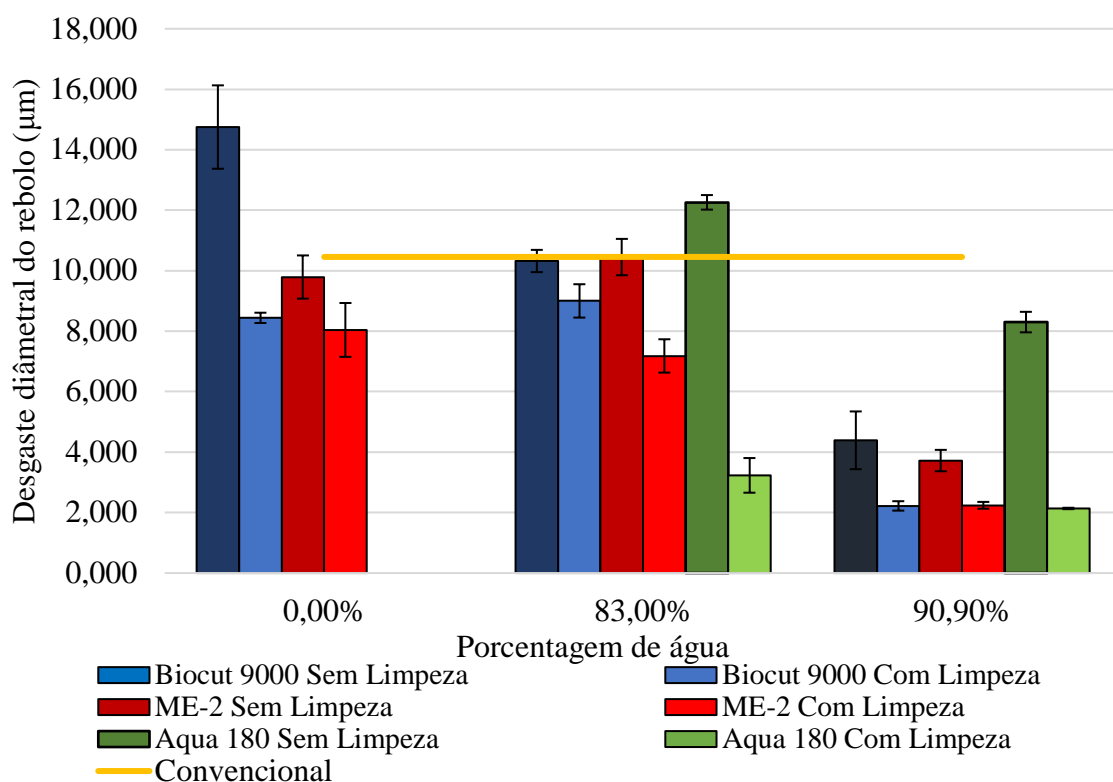


Figura 4.7. Média dos desgastes diametrais do rebolo para cada condição analisada.

O baixo desgaste do rebolo é atribuído à maior permanência dos grãos presos no rebolo, sendo predominante a micro fratura dos grãos (Nadolny et al., 2015), isso porque ao penetrar com maior eficiência na zona de corte pela alta pressão de injeção as gotículas do MQL são capazes de gerar maior lubrificação do processo, reduzindo os esforços envolvidos na remoção do material. A adição de água aumentou o efeito refrigerante do MQL pela sua evaporação, com isso as temperaturas reduzidas amenizaram a perda de dureza do grão abrasivo durante o processo.

O fenômeno de empastamento causa aumento dos esforços de corte devido a redução da capacidade de corte do rebolo (OLIVEIRA et al., 2012). Assim, esse parâmetro é outra indicação de que a utilização do sistema de limpeza com ar comprimido é um método eficiente na amenização do fenômeno intrínseco de empastamento na retificação.

4.7 Microscopia e Microdureza

A integridade microestrutural do material é um dos principais limitadores do processo de retificação. Isso porque, a retificação ocorre após os tratamentos térmicos, corrigindo possíveis distorções que ocorram nestes, dessa forma, a microestrutura da peça no início da

retificação deve ser a mesma ao final. Sabendo que altas temperaturas ocorrem nesse processo, deve-se aplicar métodos de refrigeração adequados para evitar mudanças na microestrutura.

Como parâmetro de validação, foram realizadas a micrografia e microdureza das peças retificadas utilizando a nova técnica de MQL com adição de água testada no estudo, com o intuito de verificar possíveis danos térmicos que tenham ocorrido durante o processo.

A Figura 4.8 apresenta a microestrutura de uma peça retificada utilizando a refrigeração convencional (ampliação de 1000x).

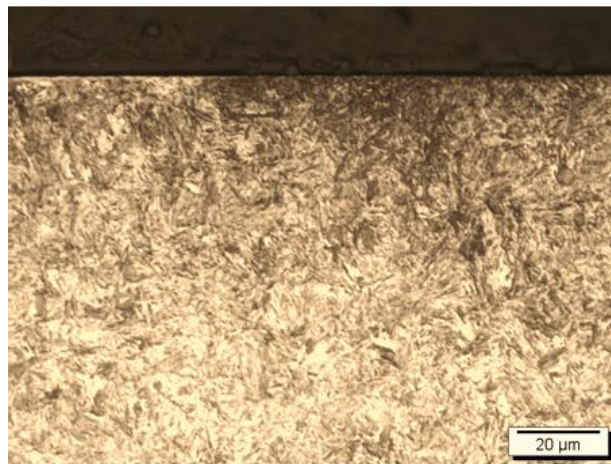


Figura 4.8. Microestrutura da amostra retificada utilizando a refrigeração convencional (1000x).

Na Figura 4.8 verifica-se que a microestrutura presente nessa amostra é martensita e não observa-se sinais de danos térmicos que possam ter ocorrido durante o processo. Na interseção entre o metal e a baquelite encontra-se a superfície retificada, próximo a essa interseção poderia ter ocorrido uma retêmpera, evidenciada pela formação de uma camada branca na micrografia, isso não ocorreu.

Sem danos térmicos evidenciados na microestrutura apresentada na Figura 4.8 observou-se que os parâmetros de entrada do processo de retificação foram adequados para a realização do processo sem ocorrência de danos térmicos.

As Figuras 4.9, 4.10 e 4.11 exibem a microestrutura das peças retificadas utilizando a técnica de MQL como método de lubrificação-refrigeração nas condições mais severas utilizadas para os ensaios.

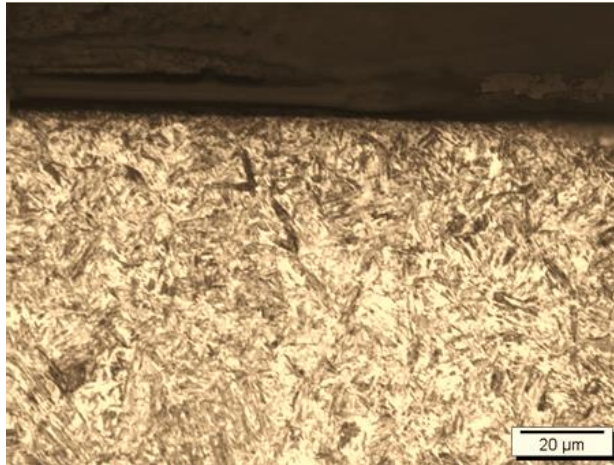


Figura 4.9. Microestrutura da peça retificada utilizando a técnica de MQL com Biocut 9000 puro sem limpeza (1000x).

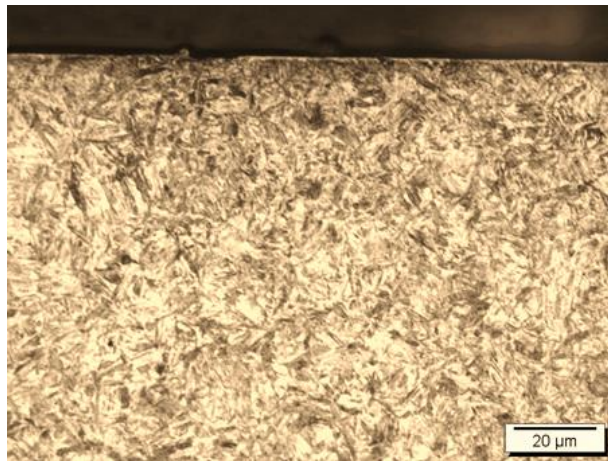


Figura 4.10. Microestrutura da peça retificada utilizando a técnica de MQL com ME-2 puro sem limpeza (de 1000x).



Figura 4.11. Microestrutura da peça retificada utilizando a técnica de MQL com Aqua 180 diluído em 83% de água sem limpeza (1000x).

As Figuras de 4.9 a 4.11 demonstram na análise de micrografia martensita como microestrutura, similarmente à microestrutura exibida pela Figura 4.8. Nas regiões próximas, as superfícies retificadas não foram observados possíveis danos térmicos, indicando que todos os métodos de lubrificação analisados foram suficientes para evitar temperaturas que causassem danos térmicos.

Complementarmente a microdureza é realizada em três diferentes distâncias da superfície retificada (60, 120 e 180 μm) para verificar possíveis variações de dureza causadas por eventuais danos térmicos. Dessa forma, essas duas análises comprovam se houve ou não danos térmicos nas peças. Analisando a Figura 4.12 pode-se observar os resultados de microdureza das peças retificadas com MQL utilizando o fluido Biocut 9000.

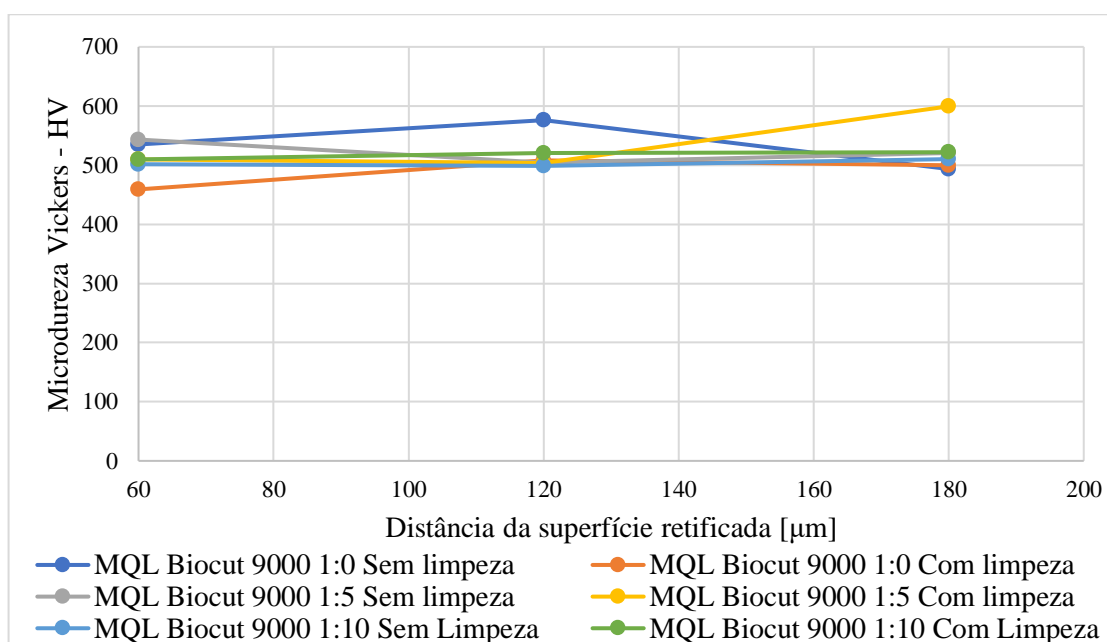


Figura 4.12. Microdureza das peças retificadas utilizando a técnica de MQL com o fluido Biocut 9000.

Observa-se nos valores de microdureza apresentados na Figura 4.12 que não houve variações na microdureza da peça analisada. Isso comprova a conclusão da micrografia que não houve danos térmicos nas peças retificadas utilizando o fluido Biocut 9000 na técnica de MQL. A Figura 4.13 apresenta os resultados de microdureza das peças retificadas com o fluido ME-2 aplicado pela técnica de MQL.

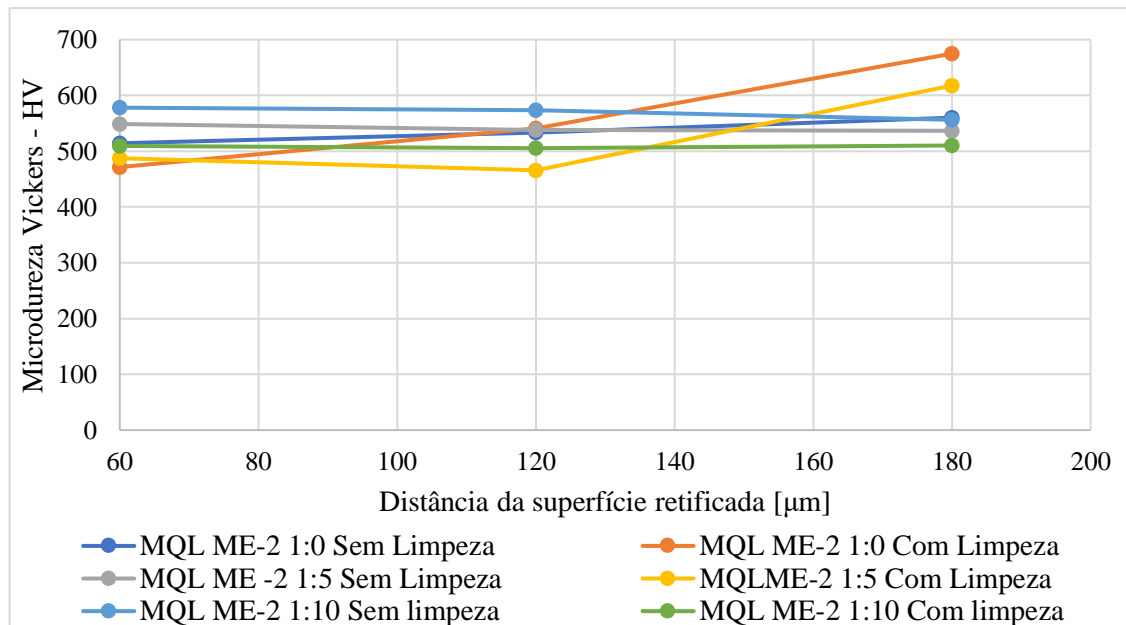


Figura 4.13. Microdureza das peças retificadas utilizando a técnica de MQL com o fluido ME-2.

Os valores de microdureza apresentados pela Figura 4.13 não variaram de forma significativa. Assim como nos resultados da Figura 4.12, esses valores complementaram a análise de micrografia e indicam que não houveram mudanças microestruturais nas peças retificadas aplicando ME-2 pela técnica de MQL.

A Figura 4.14 exibe os valores de microdureza das peças retificadas aplicando o fluido Aqua 180 pela técnica de MQL.

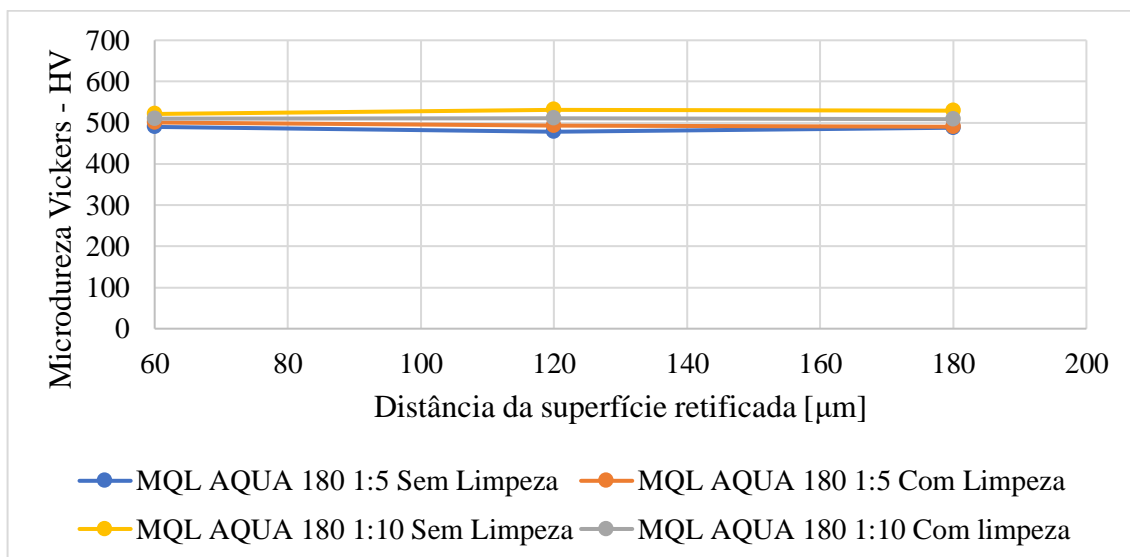


Figura 4.14. Microdureza das peças retificadas utilizando a técnica de MQL com o fluido Aqua 180.

Observa-se na Figura 4.14 que a variação na microdureza das peças analisadas é mínima, dessa forma, a análise de microdureza indica que não houve amolecimento ou endurecimento do material durante o processo de retificação.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos conclui-se que:

- A adição de água contribuiu para diminuir os valores de rugosidade em todos os fluidos de corte. Além disso, observou-se que a técnica de MQL aliada com o sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo com ar comprimido obteve resultados compatíveis com a rugosidade promovida pela refrigeração convencional.
- Os valores dos desvios de circularidade diminuíram consideravelmente com a adição de água, pelo maior efeito refrigerante provido pela técnica de MQL, apresentando melhores resultados do que a refrigeração convencional nessa variável.
- A potência elétrica consumida e a vibração foram levemente menores e influenciadas pela adição de água e pelo sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo. Nesses sinais observou-se que o fluido ME-2 apresentou comportamento inverso dos outros dois fluidos.
- A adição de água reduziu a EA emitida durante o corte a ponto de a mesma ser inferior à EA emitida durante o corte refrigerado pelo método convencional.
- O desgaste diametral do rebolo diminuiu consideravelmente com a adição de água sendo que na maior diluição de óleo em água (1:10) analisada obteve-se um desgaste 79% menor do que o desgaste utilizando o método convencional.
- Não foram encontrados indícios de danos térmicos pelas análises de micrografia e microdureza, dessa forma conclui-se que as condições analisadas apresentaram refrigeração suficiente para evitar temperaturas excessivas.
- Em todas as análises foi observado que cada fluido respondeu de forma diferente quando se adicionou água.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

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

- Aprofundamento do estudo de sistema com MQL com jato de ar comprimido para a remoção de detritos na superfície de corte do rebolo, na retificação de material AISI 4340, visando minimizar a rugosidade, circularidade, desgaste diametral do rebolo, microdureza, microscopia óptica, potência elétrica consumida, emissão acústica e vibração.
- Utilizar diluições de água entre as relações de 1:0, 1:5 e 1:10 no óleo solúvel para testar a eficiência da técnica MQL;
- Análise as variáveis de saída para identificar com antecedência possíveis danos térmicos na superfície do material retificado e o melhor momento para dressagem do rebolo;
- Utilização de maiores velocidades de rotação do rebolo a fim de verificar se haverá melhorias nas variáveis de saída analisadas.

REFERÊNCIAS

- ALVES, M. C. S.; BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R. Influência da velocidade de avanço do rebolo nos danos de aços endurecidos retificados. **Revista Matéria**, v. 13, n. 4, p. 636 – 642, 2008.
- ALVES, M. C de S.; BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R de.; “Influence of lubrication-cooling on the surface quality of metal grinding”, **Revista Escola de Minas**, v. 64, n. 5, p. 507-512, 2011.
- ALVES, Manoel Cleber de Sampaio. **Influência dos métodos de lubri-refrigeração na retificação do aço ABNT 4340 usando rebolo de CBN**. 2007. 155 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências de Bauru, Bauru, SP. 2007.
- ANJOS, M. A. dos. **Estudo experimental do uso de rebolos convencionais na usinagem do aço VP-50 utilizado na retificação cilíndrica, por meio de diferentes métodos de lubrificação**. 2015. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - Unesp. Faculdade de Engenharia de Bauru, Bauru, SP. 2015.
- ANJOS, M. A. dos; BIANCHI, E. C.; MELLO, H. J. de.; AGUIAR, P. R. de.; ESTAMBASSE, E. C.; HILDBRANDT, R. A. **Estudo experimental do uso de rebolos convencionais na usinagem do aço VP-50 utilizado na retificação cilíndrica, por meio de diferentes métodos de lubrificação**. *Revista Matéria*. ISSN 1517-7076 artigo 11689, p. 169-184, 2016.
- ARUN, A., RAMESHKUMAR, K., UNNIKRISHNAN, D., SUMESH, A. “Tool condition monitoring of cylindrical grinding process using acoustic emission sensor”, **Materials today: Proceeding**, v. 5, p. 11888-11899, 2018.
- ASTM E92-17, Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- AYUB, Muhammad Azmi; MOHAMED, Azmi B.; ESA, Abdul Halim. In-line inspection of roundness using machine vision. **Procedia Technology**, v. 15, p. 807-816, 2014.

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

BARTZ, W. J. Lubricants and the environment. **Tribology International**, v. 31, n. 1–3, p. 35–47, 1998.

BARTZ, W.J. “Ecological and environmental aspects of cutting fluids”. Lubrication Engineering; 57,3; **Journal of the Society of Tribologists and Lubrication Engineers; ProQuest Science Journals** p.13, 2001.

BERTALAN, C. **Retificação com rebolos de nitreto de boro cúbico (CBN) máquinas-ferramentas convencionais**. Florianópolis, 1997. 209 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 1997.

BIANCHI, C. E., SILVA, E. J., LOVATO, M. C., FERNANDES, O. C., VALARELLI, I. D. “Características e tendências do processo de retificação. **Revista Máquinas & Metais**, Aranda Editora, Ano XXXV, n° 399, Abril, 1999, p. 238-249, 1999.

BIANCHI, Eduardo Carlos. Plunge cylindrical grinding with the minimum quantity lubrication coolant technique assisted with wheel cleaning system. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 95, n. 5-8, p. 2907-2916, 2018.

BIENKOWSKI, K. Coolants and Lubricants: The Truth. **Manufacturing Engineering (USA)**, v. 110, n. 3, p. 90–92, 1993.

BRINKSMEIER, E., HEINZEL, C., WITTMANN, M., “**Friction, Cooling and Lubrication in Grinding**”, Elsevier, Bremen, Germany, 1999.

BRINKSMEIER, E., BROCKHOFF, T. **Utilization of grinding heat as a new heat treatment process**. CIRP Annals – Manufacturing Technology v. 45, p. 280-287, 1996.

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

CAMARGO, J. A. A.; FERNANDES, U. B.; DINIZ, A. E.; BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R.; CANARIM, R. C. Analysis of the Influence of Sparkout. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. XXXI, p. 47-51, 2009.

CARPINETTI, L. C. R., GONÇALVES FILHO, E. V., PORTO, A. J. V., JASINEVIVIUS, C. R. G., **Rugosidade – Conceitos e princípios de medição**. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

CARPINETTI, L. C. R. “**Planejamento e análise de experimentos.**” EESC-USP, São Carlos - SP, p.205, 2000.

CATAI, Rodrigo Eduardo. **Otimização das condições de refrigeração / lubrificação no processo de retificação cilíndrica de mergulho**. 2004. 178 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2004.

CHEN, X., ROWE, W. B., McCORMACK, D. F.; **Analysis of the transitional temperature for tensile residual stress in grinding**, Journal of Materials Processing Technology 107 p. 216-221, 2000.

COCKERILL, T. **Fluid Mechanics and Thermodynamics of a Ranque-Hilsch Vortex Tubes**. 1998. 294p. Dissertação (Mestrado), Universidade de Cambridge, 1998.

CONAMA. RESOLUÇÃO No. 357, DE 17 DE MARÇO DE 2005. Publicada no DOU nº 053, de 18/03/2005, p. 58-63.

CONAMA. RESOLUÇÃO No 430, DE 13 DE MAIO DE 2011. Publicada no DOU nº 92, de 16/05/2011, p. 89.

DE METER, E. C.; HOCKENBERGER, M. J. The application of tool path compensation for the reduction of clamping induced geometric errors. **International journal of production research**, v. 35, n. 12, p. 3415–3432, 1997.

DEMIRCI, I., MEZGHANI, S., MANSORI, N. E. **On Material Removal Regimes for the Shaping of Glass Edges: Force Analysis, Surface Topography and Damage Mechanisms**. Springer Science-Business Media, LLC 2007.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. Artiliber Editora Ltda., Campinas, SP, Brasil, 6ª Edição, p.165-170, 2008.

DHAR, N. R.; KAMRUZZAMAN, M.; AHMED, M. Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 172, n. 2, p. 299–304, 2006.

DORNFELD, D. **Principles of sensors in manufacturing. Sensors applications**. USA. p 6-23, 2001.

FAVORIT AÇOS ESPECIAIS. 2016. Disponível em: <http://www.favorit.com.br/produtos/acos-construcao-mecanica/aco-sae-4340>>. Acesso em 18 out. 2018.

FUSSE, R. Y.; BIANCHI, E. C.; FRANÇA, T.V.; CATAI, R. E.; SILVA, L. R. e AGUIAR, P.R. Erros geométricos na retificação do aço SAE HVN-3. **Revista Máquinas & Metais**, Aranda Editora, ano 40, nº464, p. 150-163, 2004.

FUSSE, Ronaldo Yoshinobu. **Estudo comparativo entre a lubri-refrigeração convencional e a MQL no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho**. 2005. P. 103. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, 2005.

GANIER, Michel. Reciclar, eliminar e valorizar fluídos e resíduos de corte. **Revista Máquinas e Metais**. São Paulo, p.26-29, 1993.

GROSSMAN, M. A., BAIN, E. C. **Princípios de tratamento térmico**. MADRID: Editorial Blume, p. 279, 1972.

GUERMANDI, G.L., OLIVEIRA, J.D., BIANCHI, C.E., AGUIAR, R.P.; Alternativa tecnológica para diminuir a abundância de fluidos de corte na retificação cilíndrica externa de mergulho de aços endurecidos, GEPROS. **Gestão da Produção, Operações e Sistemas** – Ano 5, nº 4, p. 127-137, 2010.

GUO, C.; CHAND, R. H.; “A ceramic machining primer”. *Ceramic Industry*, 4, p.7178, 1998.

GUPTA, A., SWAMI, P., BALAN, A. S. S., KUPPAN, P., OYYARAVELU, R. “Numerical modeling and heat transfer analysis of minimum quantity of lubrication grinding Inconel 751, **Materials today: Proceedings**, v. 5, p. 3358-3366, 2018.

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

HAFENBRAEDL, D.; MALKIN, S. Technology environmentally correct for intern cylindrical grinding. **Machines and Metals Magazine**, v. 426, p. 40–55, 2001.

HASSUI, A. **Estudo da vibração durante o corte e centelhamento na retificação cilíndrica de mergulho**. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, 2002.

HEINZEL. C.; BLEIL, N. The Use of the Size Effect in Grinding for Work-hardening. CIRP Annals – **Manufacturing Technology**, v. 56, p. 327-330, 2007.

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

HOWES, T.D., TÖNSHOFF, H.K., HEUER, W. “**Environmental aspects of grinding fluids**”. Annals of CIRP Vol. 40/2/1991. Documento obtido por meio do Programa de Comutação Bibliográfica COMUT, 1991.

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

JIANG, J.L.; GE, P.Q.; BI, W. B.; ZHANG, L; WANG, D. X.; ZHANG, Y. **2D/3D ground surface topography modeling considering dressing and wear effects in grinding process**, **Int. J. Mach. Tools Manuf.** 74: p. 29-40, 2013.

KAJORNCHAIYAKUL, J.; Abrasive machining of ceramics: **assesment of nearsurface characteristics in high speed grinding**. 2000. 208 f. Tese (Doutorado) – University of Connecticut, Estados Unidos, 2000.

KHANDKE, S. P., SURVE, A., PATIL, D., BALAN, A. S. S., KUPPAN, P., OYYARAVELU, R. “Grindability studies on monel under different cooling environments”, **Materials today: Proceedings**, v. 5, p. 12559-12569, 2018.

KIRSCH, B. The impact of contact zone flow rate and bulk cooling on the cooling efficiency in grinding applying different nozzle designs and grinding wheel textures. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 18, p. 179-187, 2017.

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

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

KUMAR, S.; YADAV, M.; AGRAWAL, P.; KHAN, M. Z.; VASHISTA, M. **Assesment of Microhardness Profile in Grinding Using Barkhausen Noise Technique at Various Analysis Parameters**. *ISRN Materials Science*, v. 2011, Article ID 525078, p. 5, 2011.

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

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

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

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

LIU, C. H.; ADRIAN CHEN, C.; CHEN, C. A.; YIN-TIEN WANG. “Grinding force control in an automatic surface finishing system”. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 170, p.367-373, 2005.

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

LOPES, José C. et al. Application of minimum quantity lubrication with addition of water in the grinding of alumina. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, p. 1-9, 2018.

LU, Enhui et al. Designing indices to measure surface roughness based on the color distribution statistical matrix (CDSM). **Tribology International**, v. 122, p. 96-107, 2018.

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

MALKIN, S. Grinding Technology: **Theory and Applications of Machining with Abrasives**, 1a edição, Chichester, Ellis Horwood Limited, 1989.

MARINESCU, I., ROWE, W., DIMITROV, B., INASAKI, I.; **Tribology of abrasive machining processes, United States**. William Andrew, Inc. 2004.

MARINESCU, I. D.; HITCHINER, M.; UHLMANN, E.; ROWE, W.B.; INASAKI, I. “**Handbook of Machining with Grinding Wheels**”, 2007.

MARINESCU, I. D.; ROWE, B.; LING, Y.; WOBKER, H. G. Abrasive Processes. In: **Handbook of Ceramics Grinding and Polishing**. Second Edi ed. [s.l.] Elsevier Inc., p. 67–132, 2015.

MINKE, E. **Contribution to the role of coolants on grinding process and work results**. In: 3rd International Machining & Grinding Conference, October 4–7, Cincinnati, Ohio, p. 13-32, 1999.

NADOLNY, K. “Wear phenomena of grinding wheels with sol-gel alumina abrasive grains and glass- ceramic vitrified bond during internal cylindrical traverse grinding of 100Cr6 steel”, **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 77, p. 83-98, 2015.

NOVASKI, O.; DÖRR, J. **Usinagem sem refrigeração**. Revista Máquinas e Metais. São Paulo, p.18-27, 1999.

OBIKAWA, T.; KAMATA, Y.; SHINOZUKA, J. High-speed grooving with applying MQL. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 46, n. 14, p. 1854–1861, 2006.

OBIKAWA, T., TAKEMURA, Y., AKIYAMA, Y., SHINOZUKA, J., SASAHARA, H.; Microscopic phase-dependent residual stresses in the machined surface layer of two-phase alloy, **Journal of Materials Processing Technology**, 2009.

OLIVEIRA, Danilo de Jesus. **Aprimoramento da técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL) no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho de aços endurecidos**. 2011. 97 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências, 2011.

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

PUERTO, P., FERNÁNDEZ, R., MADARIAGA, J., ARANA, J., GALLEGO, I. **Evolution of surface roughness in grinding and its relationship with the dressing parameters and the radial wear**. *Procedia Engineering*, 63: p. 174-182, 2013.

REN, Shubin et al. Effects of sintering process on microstructure and properties of flake graphite-diamond/copper composites. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 31, n. 10, p. 1377-1383, 2016.

ROWE, W. B., **Principles of Modern Grinding Technology**. Elsevier. Second edition p. 480, 2014.

RUNGE, Peter R. F.; DUARTE, Gilson N. **Lubrificantes nas indústrias**. 1. ed. São Paulo: triboconcept, 1989.

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

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

SHAW, M. C.. **Principles of abrasives processing**. Oxford Science on Advanced Manufacturing, New York, USA, 1996, 574 p.

SLUHAN, C.A. “**Selecting the right cutting and grinding fluids, Tooling and Production**” 60 (2) 7, 1994.

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

STANFORD, M.; Lister, P.M. **The future role of metalworking fluids in metal cutting operations**. Industrial Lubrication and Tribology, Vol. 54 Iss: 1, p.11-19, 2002.

SUTOWSKI, Paweł; ŚWIĘCIK, Robert. The estimation of machining results and efficiency of the abrasive electro-discharge grinding process of Ti6Al4V titanium alloy using the high-frequency acoustic emission and force signals. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 94, n. 1-4, p. 1263-1282, 2018.

WALKER, T. “**The MQL Handbook – A guide to machining with Minimum Quantity Lubrication**”, Copyright © Unist, Inc. v1.0.3, 2013.

WANG, Z., WILLET,P., DEAGUIAR, P.R., WEBSTER, J.; **Neural network detection of grinding burn from acoustic Emission, International Journal of Machine Tools & Manufacture** 41, p. 283–309, 2001.

WANG, Y.; LI, C.; ZHANG, Y.; YANG, M.; LI, B.; JIA, D.; HOU, Y.; MAO, C. **Experimental evaluation of the lubrication properties of the wheel/workpiece interface in mql grinding using different types of vegetable oils**. [s.l.] Elsevier Ltd, 2016.

WEBSTER J, DONG, W. and LINDSAY, R. "**Raw Acoustic Emission Signal Analysis of Grinding Process**", Annals of the CIRP, v. 45/1, 1996.

WINTER, M., HERRMANN, C. **Eco-Efficiency of Alternative and Conventional Cutting Fluids in External Cylindrical Grinding**. Procedia CIPR 15, p. 68-73, 2014.

XUN, L., SHUANG, M., FANJUN, M. “Surface integrity of GH4169 affected by cantilever finish grinding and the application in aero-engine blades”, **Chinese Journal of Aeronautics** 28(5): p. 1539–1545, 2015.

YANG, Z., YU, Z., XIE, C., HUANG, Y. “Application of Hilbert–Huang Transform to acoustic emission signal for burn feature extraction in surface grinding process”, **Measurement** 47, p. 14–21, 2014.