



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MARCO ANTÔNIO DOS ANJOS

**RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA DO AÇO ABNT 4340 COM APLICAÇÃO DE AR
COMPRIMIDO REFRIGERADO NA LIMPEZA DA SUPERFÍCIE DE CORTE DO
REBOLO**

**BAURU - SP
2019**

MARCO ANTÔNIO DOS ANJOS

**RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA DO AÇO ABNT 4340 COM APLICAÇÃO DE AR
COMPRIMIDO REFRIGERADO NA LIMPEZA DA SUPERFÍCIE DE CORTE DO
REBOLO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Estadual Paulista "Júlio Mesquita Filho", Câmpus de Bauru, para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi

Coorientador: Prof. Dr. Luiz Eduardo de Angelo Sanchez.

**BAURU - SP
2019**

Anjos, Marco Antônio.

Retificação cilíndrica do aço ABNT 4340 com aplicação de ar comprimido refrigerado na limpeza da superfície de corte do rebolo / Marco Antônio dos Anjos, 2019
108 f.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi
Coorientador: Prof. Dr. Luiz Eduardo de Ângelo Sanchez

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2019

1. Retificação cilíndrica externa. 2. Mínima Quantidade de Lubrificante - (MQL). 3. Rebolo convencional. 4. Limpeza na zona de corte do rebolo. 5. Aço ABNT 4340. Ar comprimido a baixa temperatura. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Bauru. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE MARCO ANTONIO DOS ANJOS, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 20 dias do mês de setembro do ano de 2019, às 09:00 horas, no(a) Anfiteatro da Diretoria Técnica de Informática 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. LUIZ DARE NETO do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. ALESSANDRO ROGER RODRIGUES do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade de São Paulo - USP / São Carlos, Prof. Dr. RODRIGO EDUARDO CATAI do(a) Departamento de Engenharia Civil / Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPr, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da TESE DE DOUTORADO de MARCO ANTONIO DOS ANJOS, intitulada **RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA DO AÇO ABNT 4340 COM APLICAÇÃO DE AR COMPRIMIDO REFRIGERADO NA LIMPEZA DA SUPERFÍCIE DE CORTE DO REBOLO**. 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. LUIZ DARE NETO

Prof. Dr. ALESSANDRO ROGER RODRIGUES

Prof. Dr. RODRIGO EDUARDO CATAI

DEDICATÓRIA

À minha família com todo meu amor e gratidão,
aos professores pelo direcionamento e
compreensão e a todos que contribuíram para
realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

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 Sônia Euzébio Alves, pela compreensão e apoio incondicional em todas as horas.

Aos meus filhos Robert Willian dos Anjos e Dyanni Cristina dos Anjos que são a razão da minha luta e dedicação em tudo que faço.

Aos meus pais José dos Anjos (in memoriam) e Ana Maria Souza dos Anjos pelos ensinamentos.

Ao meu estimado orientador Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi, pela compreensão, paciência, excelente orientação 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.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Luiz Eduardo de Angelo Sanchez pelo importante apoio, pelas relevantes informações prestadas, pelo incentivo e por ter acreditado na minha dedicação para realizar esta pesquisa.

Agradeço ao técnico de Laboratório Dr. Hamilton José de Mello pela excelente contribuição para este trabalho.

Ao aluno de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia de Bauru, Engenheiro MSc. José Claudio Lopes por todo empenho e dedicação para realização desta pesquisa.

Ao aluno de graduação da Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB), André Bueno Tavares pelo grande apoio e desempenho.

À Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista – UNESP, câmpus de Bauru pela excelência no ensino superior e pela disponibilização dos recursos e dos Laboratórios de Usinagem por Abrasão (LUA) e de Materiais (LABMAT), para a realização desta pesquisa.

Ao programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e à Coordenação do Curso, pela importante oportunidade que me foi concedida.

A todos os professores que passaram em minha vida pelo conhecimento transmitido.

A todos os amigos e familiares que me apoiaram de forma direta e indireta para a realização deste trabalho.

*“O próprio Senhor irá à sua frente e estará com
você; ele nunca o deixará, nunca o abandonará.
Não tenha medo! Não se desanime!”*

(Deuteronômio 31:8)

RESUMO

Na indústria metal-mecânica, por ser considerado uma etapa final e de acabamento, o processo de retificação contém valor agregado alto ao produto final. Neste processo a utilização de fluidos de corte é um dos fatores responsáveis na obtenção da qualidade final do processo, porém a eles são atribuídos fatores de risco à saúde e ao meio ambiente. Diante do contexto, diversos setores da indústria, pesquisa e educação, são mobilizados a buscar novas alternativas que possam reduzir custos e que sejam menos prejudiciais ao meio ambiente e uma das alternativas já em estudo é a técnica de mínima quantidade de lubrificante (MQL), que é caracterizada pela eficiência do processo em se aplicar uma quantidade menor de fluido de corte, se comparada com o método de lubrificação convencional. Porém, na aplicação de MQL é importante que seja observado a pouca eficiência quanto a limpeza da superfície de corte do rebolo, acarretando na obstrução dos poros do rebolo e prejudicando as arestas cortantes. Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo analisar o comportamento da técnica de MQL associada à limpeza do rebolo, integrada ao sistema de ar a baixa temperatura aplicado à zona de corte, de forma a preservar os parâmetros como: lubrificação e limpeza da zona de corte com jato de ar comprimido a baixa temperatura. Neste trabalho foram realizados estudos resultantes da retificação cilíndrica do aço ABNT 4340, e utilizando o rebolo convencional de óxido de alumínio branco sob a aplicação de diferentes condições de lubrificação, onde o método convencional pode ser comparado à técnica de MQL associada a limpeza refrigerada a -10°C e -5°C . Os resultados obtidos foram caracterizados por meio dos ensaios de rugosidade, dos desvios de circularidade, do desgaste diametral do rebolo, da potência consumida, da emissão acústica, da análise metalográfica, da microscopia óptica, da microdureza e da análise da influência da lubrificação. Ambos os métodos de lubrificação utilizados apresentaram resultados satisfatórios às tolerâncias exigidas para rugosidade e circularidade para o processo de retificação. As condições testadas utilizando MQL associado à limpeza refrigerada da superfície do rebolo apresentaram resultados semelhantes às condições de lubrificação convencional e em alguns casos os resultados apresentaram desempenho superior à condição convencional, o que indica a importância de se usar sistemas auxiliares ao método de MQL.

Palavras-chaves: Retificação cilíndrica externa, Mínima quantidade de lubrificante (MQL), Rebolo convencional, Aço ABNT 4340, Limpeza da zona de corte, Ar comprimido a baixa temperatura.

ABSTRACT

In the metalworking industry, for being the grinding process is considered a final stage and finishing, the grinding process has high added value to the final product, in this process the use of cutting fluids is one of the factors responsible for obtaining the final quality of the process, however they are attributed risk factors to health and the environment. In this context, several sectors of industry, research and education are mobilized to seek new alternatives that can reduce costs and that are less harmful to the environment and one of the alternatives already under study is the technique of minimum quantity lubricant (MQL), which is characterized by the efficiency of the process in applying a smaller amount of cutting fluid as compared to the conventional flood coolant method. However, in the application of the MQL it is important to observe the low efficiency of the cleaning of the cutting surface of the grinding wheel, resulting in clogging of the grinding wheel pores, damaging the sharp edges. Thereupon, the present study addresses the behavior of the MQL technique associated to the cleaning of the grinding wheel, integrated to the cold air system applied to the cutting zone, in order to preserve the parameters such as: flood coolant and cleaning of the cutting zone with air jet compressed at low temperature. In this thesis, studies were carried out resulting from the grinding of ABNT 4340 steel and using the conventional white aluminum oxide grinding wheel under the application of different lubrication and cooling conditions, where the conventional method can be compared to the MQL technique associated to cleaning at cold -10°C and -15°C . The results obtained were characterized by roughness tests, circularity deviation, diametrical wear grinding wheel, metallographic analysis, optical microscopy, microhardness and analysis of the influence of the flood coolant. Both the flood coolant methods used presented satisfactory results to the tolerances required for roughness and circularity for the grinding process. The conditions tested using MQL associated with the cooled surface cleaning of the grinding wheel presented similar results to the conventional flood coolant conditions and in some cases the performance was superior performance to the conventional condition, which indicates the importance of using auxiliary systems to the MQL method.

Keywords: External cylindrical grinding, Minimum quantity of lubricant (MQL), Conventional grinding wheel, Steel ABNT 4340, Cleaning the grinding zone, compressed air at low temperature

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Retificação cilíndrica externa de mergulho.	23
Figura 2.2. Processo de formação do cavaco.....	23
Figura 2.3. Representação da cinemática na retificação.....	24
Figura 2.4. Operação de retificação cilíndrica externa de mergulho.....	26
Figura 2.5. Representação do ciclo de uma retificação cilíndrica de mergulho.....	27
Figura 2.6. Componentes que estabelecem as forças na retificação.....	28
Figura 2.7. Grandezas físicas de retificação cilíndrica externa de mergulho.....	31
Figura 2.8. Estrutura e composição de um rebolo.	37
Figura 2.9. Exemplo de especificação de rebolo convencional.....	38
Figura 2.10. Mecanismos de desgaste do rebolo.	44
Figura 2.11. Imagem de um dressador conglomerado.....	45
Figura 2.12. Representação da utilização de fluido de corte em abundância.....	46
Figura 2.13. "Borra" composta de óleo e cavaco.	52
Figura 2.14. Efeitos do jato de ar comprimido. (a) Retificação sem limpeza do rebolo. (b) Retificação com limpeza	53
Figura 2.15. Tubo de vórtice.	54
Figura 2.16. Esquema de distribuição da temperatura na câmara do tubo de vórtice.	55
Figura 2.17. Peça com desvios de circularidade.....	58
Figura 3.1. Retificadora Sulmecânica.....	62
Figura 3.2. Configuração dos Equipamentos – Aquisição de dados.	63
Figura 3.3. Sistema de ar comprimido para o MQL.....	65
Figura 3.4. Bocal de Limpeza – a) Posicionador, b) Desenho técnico.....	66
Figura 3.5. Sistema de fixação e posicionamento do bocal de limpeza.	66
Figura 3.6. Fixação do bocal de limpeza na retificadora a 30° em relação a sua base de fixação.	67
Figura 3.7. Matriz dos ensaios realizados.....	70
Figura 3.8. Esquema para medição da microdureza conforme ASTM E384.	72
Figura 3.9. Rugosímetro utilizado nas medições de rugosidade das amostras.....	73
Figura 3.10. Impressão do desgaste do rebolo no corpo de prova.....	74
Figura 3.11. Esquema ilustrativo do processo de impressão do perfil do rebolo.	75
Figura 3.12. Instrumento utilizado na medição de desgaste diametral do rebolo através da altura dos degraus do corpo de prova.	75

Figura 3.13. Esquema da medição do desgaste do rebolo.	76
Figura 3.14. Potência elétrica versus tensão elétrica do módulo.	78
Figura 4.1. Rugosidade média aritmética por condição de lubrificação.	81
Figura 4.2. Valores de desvios de circularidade.	83
Figura 4.3. Desgaste diametral do rebolo.	85
Figura 4.4. Gráfico gerado pelo software MatLab	87
Figura 4.5. Potência por condição de lubrificação.	87
Figura 4.6. Resultados de emissão acústica.	89
Figura 4.7. Emissão Acústica por condições de lubrificação.	89
Figura 4.8. Micrografia do aço ABNT 4340 após retificação com as técnicas: a) convencional, b) MQL c) MQL com limpeza, d) MQL com limpeza à temperatura de 0° C, e) MQL com limpeza à temperatura de -5° C, f) MQL com limpeza à temperatura de -10° C, g) MQL com limpeza à temperatura de -15° C.....	91
Figura 4.9. Resultados de microdureza por distância da superfície usinada.	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Medida de dureza para rebolos.	39
Tabela 2.2. Classificação da estrutura de um rebolo.	39
Tabela 2.3. Características dos principais tipos de fluidos de corte utilizados nas indústrias..	48
Tabela 3.1. Condições e parâmetros utilizados em todos os ensaios de retificação.....	69
Tabela 3.2. Valores obtidos para calibração.....	77
Tabela 3.3. Configurações do módulo de EA.....	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

a	profundidade de retificação	[μm]
a_d	profundidade de dressagem	[μm]
b	largura de retificação	[mm]
CNC	Comando Numérico Computadorizado	
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente	
d_e	diâmetro equivalente	[mm]
d_s	diâmetro do rebolo	[mm]
d_w	diâmetro da peça de trabalho	[mm]
EA	emissão acústica	[V]
F_n	força normal de corte	[N]
F_t	força tangencial de corte	[N]
G	relação G	
h_{eq}	espessura equivalente de corte	[mm]
h_{max}	espessura teórica máxima do cavaco	[mm]
H	medida de resistência mecânica do material	
HRc	dureza Rockwell C	[HRc]
HV	dureza Vickers	[HV]
l_c	comprimento de contato	[μm]
MQL	Mínima Quantidade de Lubrificante	
n_s	rotação do rebolo	[rpm]
n_w	rotação da peça	[rpm]
P	potência de corte na retificação	[W]
P_w	potência elétrica consumida	[W]
Q_w	taxa de remoção volumétrica	[mm ³ /s]
Q'_w	taxa específica de remoção volumétrica	[mm ² /s]
R_a	rugosidade média aritmética	[μm]
RMS	valor médio quadrático (<i>root mean square</i>)	[V]
t	tempo de retificação	[s]
t_s	tempo de centelhamento (<i>spark-out</i>)	[s]
U_c	energia específica de corte	[J/mm ³]
V	Volts (tensão elétrica)	[V]
V_f	velocidade de avanço do rebolo ou mergulho	[mm/min]

v_s	velocidade de corte	[m/s]
V_w	velocidade tangencial da peça de trabalho	[m/s]
Z_s	volume de rebolo gasto	[mm ³]
Z_w	volume de material removido	[mm ³]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1 Objetivo geral.....	18
1.2 Objetivos específicos.....	18
1.3 Motivação para a realização deste trabalho.....	20
2. REVISÃO DA LITERATURA	22
2.1 Processo de retificação	22
2.1.1 Cinemáticas da refrigeração	24
2.1.2 Danos térmicos na superfície retificada.....	25
2.2 Retificação cilíndrica externa de mergulho	26
2.2.1 Ciclo de retificação cilíndrica externa	26
2.2.3 Força tangencial de corte	28
2.2.4 Potência de retificação.....	29
2.3 Parâmetros do processo de retificação	30
2.3.1 Profundidade de retificação (a).....	31
2.3.2 Comprimento de contato (l_c).....	32
2.3.3 Relação G	32
2.3.4 Espessura equivalente de corte (h_{eq}).....	33
2.3.5 Velocidade de corte (v_s)	34
2.3.6 Velocidade da peça (V_w)	35
2.3.7 Velocidade de mergulho (V_f)	35
2.3.8 Taxa de Remoção de Material (Q_w)	35
2.4 Rebolo convencional.....	36
2.4.1 Caracterização do rebolo convencional.....	37
2.4.2 Dureza do rebolo	38
2.4.3 Estrutura do rebolo	39
2.4.4 Abrasivos.....	40
2.4.4.1 Óxido de alumínio (Al_2O_3).....	41
2.4.5 Ligantes	41
2.5 Dressagem de rebolo convencional com ponta única	42
2.5.1 Desgaste do rebolo e a importância da dressagem	43
2.5.1.1 Dressagem com dressador conglomerado	44
2.6 Fluido de corte	45

2.6.1 Problemas na utilização do fluido de corte.....	46
2.6.2 Tipos de fluido de corte	48
2.6.3 Manutenção e descarte do fluido de corte	48
2.7 Técnica de Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL)	49
2.7.1 Problemas na utilização de MQL	51
2.8 Sistema auxiliar para limpeza do rebolo	52
2.9 Tubo de vórtice	53
2.10 Aço ABNT 4340 temperado e revenido	56
2.11 Variáveis de saída do processo de retificação cilíndrica	56
2.11.1 Rugosidade	56
2.11.2 Desvios de circularidade.....	57
2.11.3 Desgaste diametral do rebolo	59
2.11.4 Emissão Acústica – EA	59
2.11.5 Análise da microestrutura – Microscopia Óptica	60
2.11.6 Microdureza.....	60
3. MATERIAL E MÉTODOS	62
3.1 Equipamentos e materiais utilizados.	62
3.1.1 Equipamentos para Monitoramento e Análise.....	63
3.1.2 Rebolo.....	63
3.1.3 Sistema de refrigeração convencional	64
3.1.4 Sistema de lubrificação - mínima quantidade de lubrificação – MQL.....	64
3.1.5 Sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo.....	65
3.1.6 Sistema de refrigeração do ar comprimido de limpeza e ar frio.....	67
3.2 Parâmetros e condições para os ensaios	68
3.3. Caracterização do corpo de prova após o processo de retificação.....	71
3.3.1 Preparação das amostras para análise de metalografia e microdureza	71
3.3.1.1 Microscopia óptica	71
3.3.2 Medição da microdureza	72
3.3.3 Medição da Rugosidade	73
3.3.4 Medição da Circularidade.....	73
3.3.5 Determinação do desgaste do rebolo.	74
3.3.6 Análise de potência de retificação e emissão acústica	76
3.3.6.1 Análise de potência elétrica.....	77
3.3.6.2 Análise da emissão acústica	78

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	80
4.1 Rugosidade	80
4.2 Circularidade	82
4.3 Desgaste diametral do rebolo	84
4.4 Potência elétrica consumida	86
4.5 Emissão acústica	88
4.6 Microscopia óptica.....	90
4.7 Microdureza	93
5. CONCLUSÕES.....	95
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	97
REFERÊNCIAS	98

1. INTRODUÇÃO

A competitividade das empresas está associada à busca contínua de melhorias em seus processos de fabricação objetivando uma redução de custos e o aumento da produtividade. A retificação é um dos processos de usinagem que agregam valor ao produto final. O processo de retificação é caracterizado por ser um dos mais antigos criados pela humanidade e ainda configura-se como um procedimento moderno para a produção de componentes mecânicos. Segundo Nguyen e Butler (2005), a retificação é um processo final com baixa remoção de material. Suas principais diferenças em relação às outras formas 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., 1996). Este processo de usinagem é empregado na indústria metal-mecânica de precisão, porém, caracteriza-se como uma usinagem mais complexa, pois envolve uma gama de parâmetros e variáveis de saída que podem influenciar drasticamente o processo (ALVES et al., 2010).

A retificação pode ser caracterizada como um processo de usinagem com alta intensidade energética, ou seja, uma grande quantidade de energia é requerida por unidade de material removido em comparação aos outros processos, e conseqüentemente há uma geração de calor excessiva na zona de corte (ALAGUMURTHI et al. 2007). Dessa forma a temperatura deve ser monitorada e mantida em níveis aceitáveis. Caso isso não ocorra, 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 (AGUIAR et al., 2007).

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, pois os elementos químicos que os contêm causam problemas ambientais graves como a poluição, contaminação da água e do solo, problemas de saúde para os operadores (LAWAL et al., 2012). 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 (NGUYEN e ZHANG, 2003).

Portanto, 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 tecnicamente e economicamente coerentes (SOKOVIC e MIJANOVIC, 2001).

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. Este método se enquadra bem nas mais diversas operações de usinagem, possibilitando uma menor quantidade de fluido, máquinas mais limpas e um ambiente de trabalho menos nocivo ao operador (WALKER, 2013).

Ainda segundo Walker (2013), a criação de novas técnicas de lubrificação é primordial para que se possa atender novas exigências que são criadas a cada dia, respeitando-se o conceito de sustentabilidade. Portanto, é imprescindível que novas formas de lubrificação sejam desenvolvidas vislumbrando a otimização dos meios de produção com alta eficiência e qualidade, como também um baixo impacto ambiental associado a essa técnica.

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo estudar o comportamento da técnica de MQL associada à limpeza da superfície de corte do rebolo, integrada ao sistema de ar frio aplicado à zona de corte, de forma a preservar os parâmetros como: lubrificação e limpeza da zona de corte com jato de ar comprimido a baixa temperatura, utilizando um rebolo de óxido de alumínio branco.

1.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é estudar o comportamento da técnica de MQL associada à limpeza da superfície de corte do rebolo, integrada ao sistema de ar frio aplicado à zona de corte, de forma a preservar os parâmetros como: lubrificação e limpeza da zona de corte com jato de ar comprimido a baixa temperatura, utilizando um rebolo de óxido de alumínio branco.

1.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

1. Analisar os efeitos dos parâmetros de corte sobre as características da integridade da superfície (rugosidade R_a , desgaste diametral da ferramenta, circularidade, potência elétrica consumida, emissão acústica, dureza superficial).
2. Analisar os efeitos das características da integridade sobre a superfície retificada (microscopia óptica)
3. Influência da utilização de diferentes métodos de lubrificação (convencional e MQL).

4. Influência da utilização de limpeza do rebolo associado ao método de lubrificarrefrigeração MQL.

5. Influência da utilização de limpeza do rebolo associado ao método de lubrificarrefrigeração MQL, utilizando ar refrigerado nas temperaturas de 0° C, -5° C, -10° C e -15° C.

1.3. Motivação para a realização deste trabalho

A indústria metal-mecânica está em constante avanço tecnológico, e alinhado aos avanços está também a busca constante por tecnologias sustentáveis e que não agredam o meio ambiente. No processo de retificação, a demanda no uso de fluidos é bastante alta, e estes têm uma participação negativa no que tange aos danos ambientais e ao operador.

Segundo Malkin e Guo (2008), na retificação há uma demanda expressiva por resfriamento da zona de corte que deve ser levado em consideração devido as altas temperaturas geradas que se não refrigeradas causam danos à peça produzida, como queima superficial, mudanças microestruturais, aparecimento de tensões residuais, erros de forma e deterioração da qualidade final da peça produzida. A aplicação mais usual de fluido refrigerante no processo de retificação é de forma abundante, elevando as possibilidades de danos ao meio ambiente e causando mal ao operador.

A técnica de lubrificarrefrigeração por MQL tem como característica a mínima aplicação de fluido de corte, o que reduz os efeitos prejudiciais da refrigeração convencional, no entanto, a aplicação do fluido neste processo não é suficiente para desobstruir os poros do rebolo e prejudicando as arestas cortantes (BIANCHI et al., 2012).

Nesse sentido, a importância deste estudo está na comparação de diferentes técnicas de limpeza na superfície de corte do rebolo, variando a temperatura do ar comprimido aplicado para limpeza do rebolo. Dessa forma, buscar uma nova alternativa de lubrificarrefrigeração associada à utilização de ar comprimido refrigerado no processo de retificação a partir de dados concretos obtidos experimentalmente, apontando meios práticos para que possam ser aplicadas nas indústrias, propondo uma melhoria no processo de retificação externa de mergulho do aço ABNT 4340 com a aplicação da técnica de MQL, tornando-a uma alternativa interessante e exequível em relação à técnica convencional de lubrificarrefrigeração.

Nenhum trabalho científico foi encontrado na literatura específica que apresente um estudo de retificação cilíndrica de mergulho do aço ABNT 4340 com a utilização da técnica de MQL associada a um sistema de limpeza da superfície de corte com ar comprimido refrigerado.

Considerando que o empastamento do rebolo, que é o entupimento das porosidades do rebolo durante o processo de retificação, é prejudicial ao processo, as técnicas de limpeza da superfície de corte do rebolo se tornam grandes desafios e objetivos do processo de retificação (TAWAKOLI et al., 2010).

A análise do desempenho da técnica de aplicação de MQL com ar comprimido refrigerado para limpeza foi em função dos parâmetros da rugosidade, dos desvios de circularidade, do desgaste diametral do rebolo, da análise metalográfica em conjunto com a microscopia óptica e a microdureza.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo serão apresentados os temas fundamentais estudados e relacionados a esse trabalho que tem como principais tópicos de estudo o processo de retificação cilíndrica externa de mergulho do aço ABNT 4340 temperado e revenido, com o rebolo convencional de óxido de alumínio, dos fluidos de corte com aplicação da mínima quantidade de lubrificante (MQL), com a utilização de jatos de ar comprimido na limpeza da superfície de corte do rebolo no processo de retificação, tubo de vórtice, sistema de aplicação de MQL e das variáveis de saída que serão os dados referenciais para a caracterização superficial que dão credibilidade a este estudo em suas diferentes condições do processo de retificação.

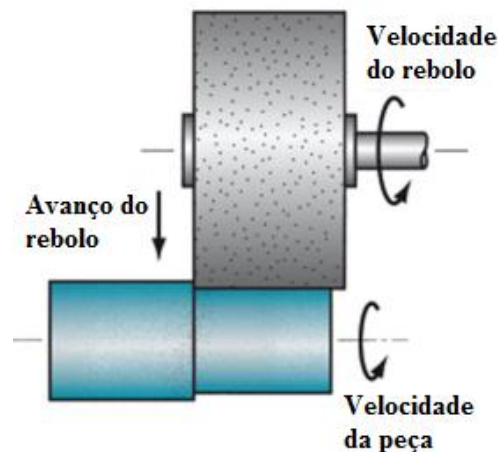
2.1. Processo de retificação

A retificação resume-se a um processo de acabamento no qual a qualidade é fundamental e eventuais erros podem inviabilizar a operação devido ao seu custo elevado, uma vez que é normalmente a etapa final de um processo de fabricação. Para se evitar erros nessa operação, os parâmetros de retificação devem ser bem definidos (ANDERSON et al., 2008). Este processo pode chegar a custar aproximadamente 20-25% dos gastos totais de fabricação, segundo (WINTER et al., 2015).

A usinagem por abrasão é caracterizada como um processo no qual a superfície de corte é distribuída e orientada aleatoriamente. Com isso, o processo de retificação emprega como elemento de corte na usinagem, grãos duros, e que, portanto, alteram a textura e geometria da superfície das peças usinadas (MARINESCU et al., 2013). Os abrasivos utilizados nesse processo de usinagem têm arestas de corte irregulares, diferentemente das ferramentas utilizadas no torneamento ou fresamento (ANDERSON et al., 2008 e REN et al., 2009).

Segundo Marinescu et al. (2007), na retificação há seis elementos primordiais: a retificadora, a ferramenta abrasiva (rebolo), a peça, o fluido de corte, a atmosfera e os resíduos gerados (detritos do material que está sendo usinado associado ao fluido de corte e pedaços de grãos abrasivos e ligante), os quais podem ser observados na Figura 2.1. Ainda assim há a necessidade de um dressador, o qual possibilita que a ferramenta abrasiva possa manter seus grãos abrasivos afiados.

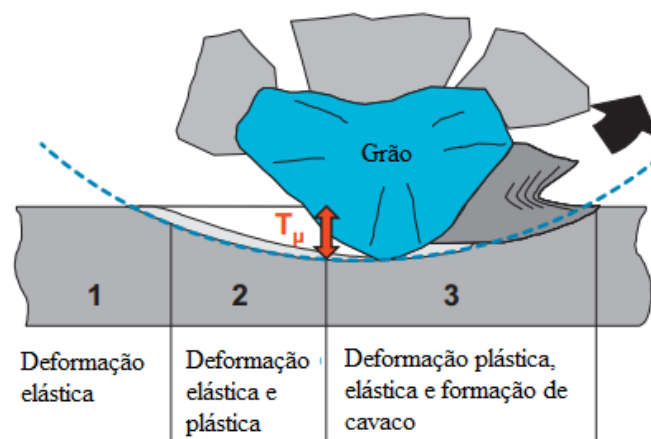
Figura 2.1. Retificação cilíndrica externa de mergulho.



Fonte: Adaptado de GROOVER (2015).

Complementando a ilustração do esquema de retificação, é importante que seja apresentada a ação mais detalhada do grão abrasivo na formação do cavaco. Dessa forma, segundo Klocke (2009), esse processo pode ser dividido em três etapas como pode ser observado na Figura 2.2. Inicialmente ocorre o contato entre o grão abrasivo e a peça, resultando em uma deformação elástica do material. Ao decorrer desse contato, o material chega ao final de seu regime elástico e então começa a se deformar plasticamente (segunda etapa). Porém, após atingir uma profundidade T_μ que a terceira fase tem início, a qual caracteriza-se pela formação do cavaco. A profundidade T_μ depende principalmente do material que está sendo retificado, dos parâmetros de retificação, assim como a forma dos grãos adotados (RASIM et al., 2015).

Figura 2.2. Processo de formação do cavaco.



Fonte: Adaptado de Klocke (2009).

Malkin e Guo (2008), afirmam que a remoção do material ocorre como em outros processos de usinagem, pela formação do cavaco. Essa remoção provém, segundo Sinha et al. (2016), da combinação entre fricção, deformação e cisalhamento do material.

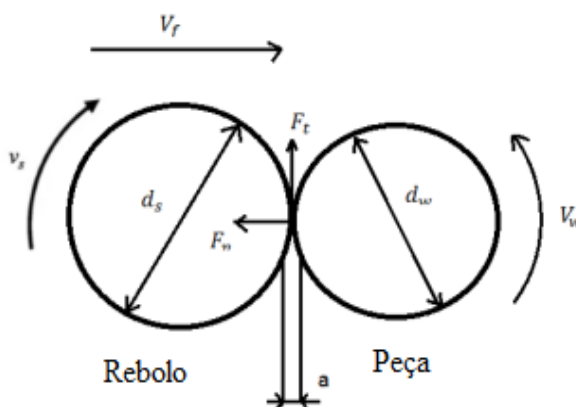
Por mais que seja amplamente utilizada na indústria, a retificação é um processo dinâmico e complexo, colaborando para que seja uma área de difícil entendimento, diferentemente dos processos de usinagem com arestas de corte definidas. Fatores que variam desde o número de arestas de corte sem geometria definida até altas temperaturas de corte e forças de corte contribuem para que o aprimoramento desse processo seja de difícil realização (RASIM, 2015).

Essa forma de usinagem faz-se presente na manufatura de peças que necessitam de excelente qualidade, isto é, nas quais há a necessidade de exatidão dimensional assim como um acabamento superficial adequado (SINHA et al., 2016).

2.1.1. Cinemáticas da retificação

O entendimento da cinemática do processo de retificação é de fundamental importância na retificação (ANDERSON et al., 2008). Por meio da Figura 2.3 são apresentadas de forma didática as variáveis presentes no processo de retificação cilíndrica de mergulho. Encontram-se na ilustração, o rebolo com diâmetro d_s o qual rotaciona com uma velocidade tangencial v_s enquanto a peça de diâmetro d_w rotaciona com uma velocidade tangencial V_w . A ferramenta abrasiva se desloca na direção e sentido da peça com uma velocidade de avanço V_f até a profundidade a . Provenientes dessa interação encontram-se a força tangencial F_t e a força normal F_n .

Figura 2.3. Representação da cinemática na retificação.



Fonte: Anderson et al. (2008).

Existem duas maneiras distintas de se realizar a retificação, as quais se resumem em corte discordante e concordante. Na primeira o rebolo e a peça rotacionam em sentidos opostos. Dessa forma, o grão abrasivo penetra na máxima profundidade de corte imediatamente depois do contato com a peça e vai reduzindo a profundidade gradualmente enquanto há contato. Já na segunda maneira, ambos os elementos rotacionam em sentidos iguais e, portanto, o grão abrasivo vai aumentando sua penetração constante durante o contato. Segundo Rowe (2014), na retificação com o corte discordante as forças geralmente são menores e, conseqüentemente, há uma melhora na qualidade superficial da peça e um menor desgaste do rebolo.

2.1.2. Danos térmicos na superfície retificada

O processo de retificação requer um alto gasto de energia para remover material. Inicialmente, boa parte dessa energia é dissipada na interface de contato rebolo-peça na forma de calor. Isso conduz à geração de altas temperaturas que conseqüentemente podem gerar inúmeros danos térmicos à peça como: queima, transformação de fase da estrutura, alteração da dureza superficial, tensão residual superficial desfavorável (tração), assim como trincas na peça e na ferramenta abrasiva, diminuindo a resistência à fadiga (MALKIN e GUO, 2007).

Dependendo das condições de corte, cerca de 85% de todo o calor gerado no processo de retificação pode ser direcionado para a peça (KLOCKE, 2009).

Devido à grande quantidade de calor transferida para a peça, existe a possibilidade de ocorrer vários danos de origem térmica na superfície e subsuperfície (MALKIN, 2008).

Além disso, a expansão térmica não controlada e a contração da peça durante a retificação contribuem para erros dimensionais e de forma, os quais geralmente são de circularidades (SILVA et al., 2007).

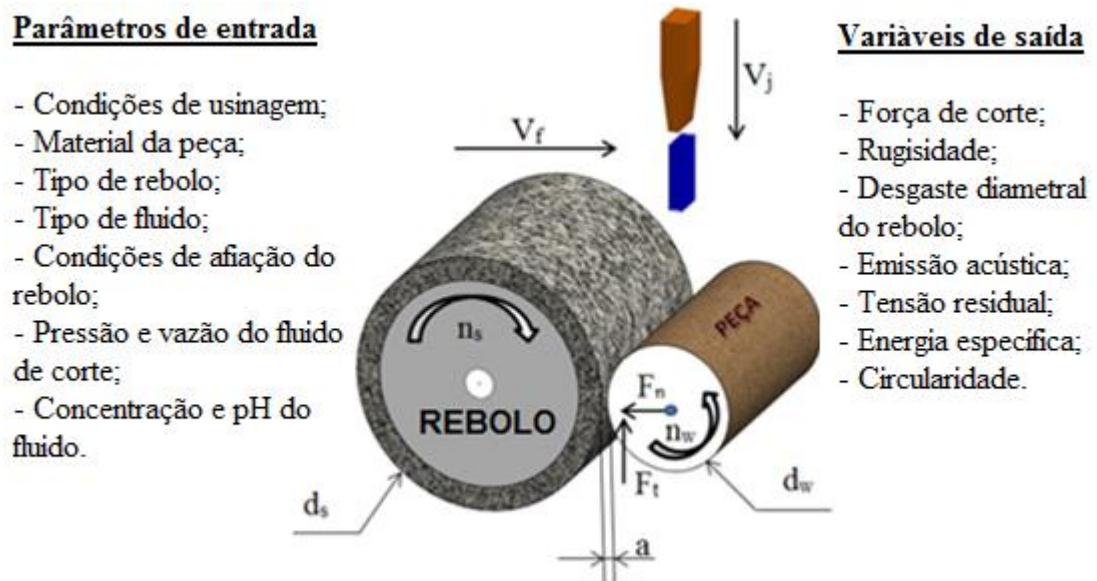
A lubrificação efetiva na região de corte entre a peça e o rebolo, depende efetivamente do alcance do fluido de corte na região de contato, a aplicação de grandes volumes não é garantia de que o fluido está atuando efetivamente na região de corte (WEBSTER, 1995).

Para Rowe (2014) no processo de retificação a superfície usinada do material esquentado e resfria muito rapidamente e apenas uma fina camada é afetada. No caso de aços endurecidos chega a aquecer acima da temperatura de transformação causando a austenização na superfície. Essa transformação também pode ocorrer abaixo da temperatura de transformação, devido a deformação mecânica.

2.2. Retificação cilíndrica externa de mergulho

A Figura 2.4 é a representação da retificação cilíndrica externa de mergulho, juntamente com os parâmetros de entrada e as variáveis de saída.

Figura 2.4. Operação de retificação cilíndrica externa de mergulho.



Fonte: Adaptado de Malkin (1989).

Onde:

- n_s é a rotação do rebole (rpm);
- d_s é o diâmetro externo do rebole (mm);
- d_w é o diâmetro da peça (mm);
- a é a profundidade de corte (μm);
- n_w é a rotação da peça (rpm);
- V_f é a velocidade de avanço do rebole ou velocidade de mergulho (mm/min).
- V_j é a velocidade do jato do fluido (m/s).

2.2.1. Ciclo de retificação cilíndrica externa

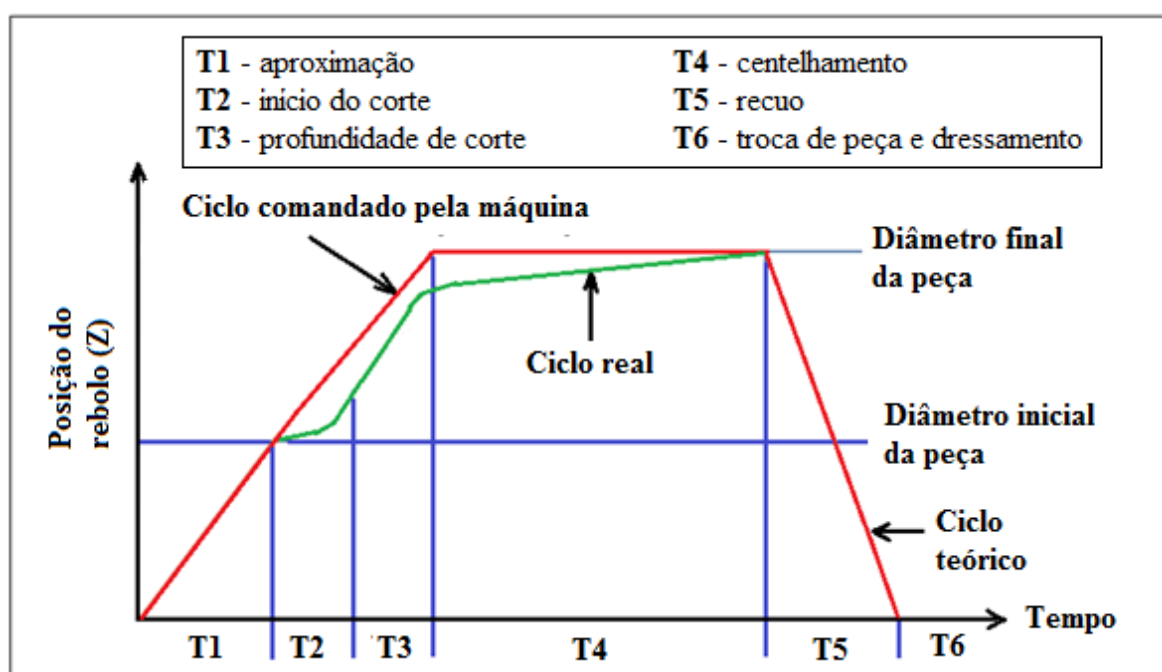
A retificação externa de mergulho refere-se ao processo de retificar uma superfície externa em torno de um eixo de rotação com a peça presa entre centros (MARINESCU et al., 2007).

Nesse processo de usinagem com o avanço do rebole sobre a peça, há a ocorrência de

deformações elásticas em vários componentes devido à falta de rigidez da ferramenta, da peça e da máquina. Isso resulta em uma diferença entre o avanço real e o programado. Para que haja uma compensação dessas deformações reversíveis há um período chamado *spark-out*, no qual não há avanço e que, portanto, permite que o avanço real se aproxime do teórico (HASSUI e DINIZ, 2003).

A Figura 2.5 apresenta o ciclo de retificação e o detalhamento de cada intervalo segundo Soares e Oliveira (2002).

Figura 2.5. Representação do ciclo de uma retificação cilíndrica de mergulho.



Fonte: Adaptado de SOARES e OLIVEIRA (2002).

T1: período de deslocamento da ferramenta em relação à peça, sem remoção de material;

T2: é o momento em que há o contato entre o rebolo e a peça, causando deformações elásticas em ambos e também na máquina. É possível observar aumentos momentâneos da potência consumida pelo motor da máquina e também dos índices de emissão acústica;

T3: profundidade total de corte estabelecida para um ciclo de retificação é atingida;

T4: corresponde ao período de centelhamento (*spark out*), em que não há avanço do rebolo, permitindo, desta forma, eliminar as deformações adquiridas durante o período.

T5: afastamento do rebolo, permitindo a retirada da peça usinada e a colocação de outra peça a ser trabalhada;

T6: realização da operação da dressagem, a qual é composta pelo movimento do rebolo

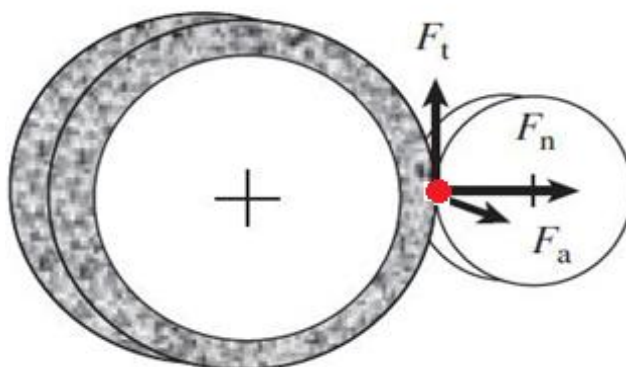
até o dressador, pela dressagem propriamente dita e pelo retorno do rebolo até a posição de trabalho.

2.2.3. Força tangencial de corte

A força tangencial de corte, responsável pela remoção do cavaco, tem sua participação em parâmetros de retificação como: desgaste do rebolo, desempenho dinâmico da retificadora, precisão geométrica e a qualidade superficial das peças (TANG et al., 2009).

A força tangencial faz parte de um somatório de forças atuantes durante o processo de retificação. Segundo Liu et al. (2005), o monitoramento dessas forças auxilia na prevenção da redução da taxa de remoção do material, além de contribuir para um menor desgaste do rebolo. Isto ocorre, pois ao longo do desgaste do rebolo há um aumento na área de contato do grão com a superfície da peça, por conseguinte, aumenta-se os esforços de corte e diminui-se a capacidade de remoção do rebolo além de prejudicar sua qualidade superficial durante a operação (LACHANCE et al., 2004). Sendo assim, o monitoramento das forças de retificação representado na Figura 2.6, possibilita que se interprete o melhor momento para que o rebolo seja condicionado para a operação.

Figura 2.6. Componentes que estabelecem as forças na retificação.



Fonte: ROWE (2014).

De acordo com Tawakoli et al. (2007), as forças de corte no processo de retificação são provenientes de três fatores:

- O atrito entre o grão abrasivo, peça, cavaco e ligante.
- A deformação que causa a formação do cavaco.
- A pressão hidrostática entre a peça e o rebolo, e também o impacto do lubrificante com

a peça e o rebolo.

Segundo Marinescu et al. (2004), a força normal atua perpendicularmente à superfície do rebolo e depende da dureza do grão abrasivo e do material a ser usinado. A força tangencial de corte em um grão abrasivo é expressa pela equação 1:

$$F_t = b \times h_{max} \times k_s + \mu \times b^2 \times \pi \times \frac{k_n}{4} \quad (1)$$

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

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

μ = coeficiente de atrito entre grão e peça;

K_n (N/mm²) = tensão de escoamento do material;

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

Segundo Bianchi et al. (1996), com velocidades de cortes maiores, diminui-se a força de corte, uma vez que os grãos abrasivos entram em contato com a peça mais vezes para remover o mesmo volume de material, em consequência a rugosidade, nível de emissão acústica e forças de corte normal e tangencial aumentam.

2.2.4. Potência de retificação

A potência na retificação está relacionada aos componentes de força tangencial (F_t) e normal (F_n) (Malkin, 2008), as quais estão expressas na relação matemática da equação 2:

$$P = F_t(V_s \pm V_w) \quad (2)$$

Onde: P (W) = potência de corte na retificação;

F_t (N) = força tangencial de corte;

V_s (m/s) = velocidade de corte;

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

O sinal de adição deve ser utilizado apenas quando a velocidade de corte (V_s) for oposta a velocidade da peça (V_w), caso contrário, utiliza-se o sinal de subtração devido ao mesmo

sentido de rotação dos elementos citados anteriormente.

Como normalmente a velocidade da peça é muito menor que a velocidade de corte, tem-se que:

$$P = F_t V_s \quad (3)$$

2.3. Parâmetros do processo de retificação

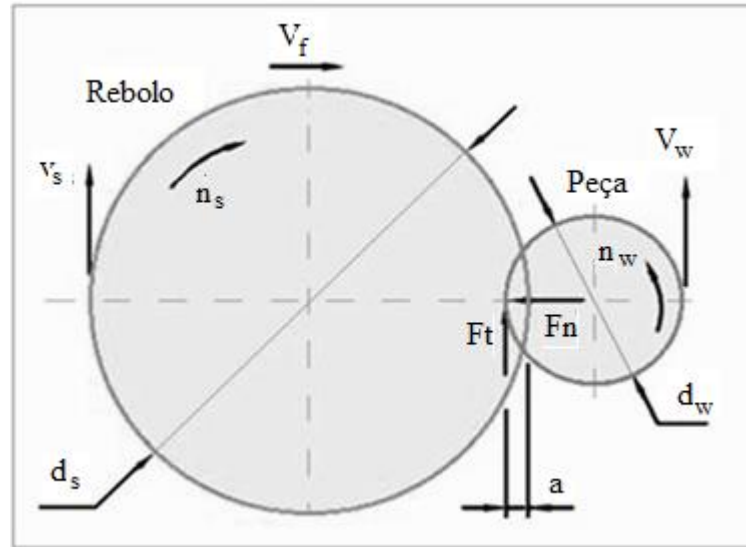
Os parâmetros que serão apresentados na sequência são de grande importância para o entendimento do processo de retificação cilíndrica externa de mergulho. Dessa forma, além de facilitar a comparação de grandezas entre os processos com geometrias diferentes, também melhora a compreensão de alguns fenômenos no processo de retificação (FERRARI, 2015).

Winter et al. (2015), citam um exemplo: para se atingir uma boa qualidade superficial é necessária uma baixa profundidade de corte, no entanto ao fazê-lo ocorre o aumento do tempo do processo, com isso aumenta-se o custo e os impactos ambientais além de aumentar a demanda por energia. Assim, deve-se ajustar os parâmetros para uma usinagem correta.

As principais grandezas físicas do processo de retificação estão representadas na Figura 2.7. Dessa forma, os parâmetros envolvidos no processo e que serão brevemente discutidos na sequência, onde:

- a - profundidade de corte (μm);
- d_s - diâmetro externo do rebolo (mm);
- d_w - diâmetro da peça (mm);
- F_n - força normal de corte (N);
- F_t - força tangencial de corte (N);
- V_f - velocidade de mergulho (avanço) do rebolo (mm/min);
- v_s - velocidade de corte ou periférica do rebolo (m/s);
- V_w - velocidade periférica da peça (m/s);
- n_s - rotação do rebolo (rpm);
- n_w - rotação da peça (rpm).

Figura 2.7. Grandezas físicas de retificação cilíndrica externa de mergulho.



Fonte: Adaptado de MALKIN (1989).

2.3.1. Profundidade de retificação (a)

Segundo Marinescu et al. (2007), a profundidade de corte é a penetração do rebolo na peça, a qual será a medida da espessura de material removido por revolução. Essa grandeza é medida perpendicularmente à direção de avanço da peça ou rebolo.

De acordo com Malkin (1989), (a) é denominada a profundidade que o rebolo entra na peça, estando a certa velocidade (v_f) durante uma revolução (volta) completa da peça. A profundidade de corte (a) é expressa matematicamente pela equação 4:

$$a = \frac{\pi \cdot d_w \cdot V_f}{V_w} \quad (4)$$

Onde: V_f (mm/min);

V_w (mm/min).

Segundo Diniz et al. (2008) a profundidade de corte (a) está amplamente relacionada com o parâmetro da espessura equivalente de corte (h_{eq}), que será detalhado adiante, sendo que (a) é proporcional a (h_{eq}). Dessa forma, quando há aumento da profundidade (a), ocorre aumento da espessura (h_{eq}), isso acarreta num desgaste maior do rebolo, aumento da rugosidade e dos esforços de corte.

2.3.2. Comprimento de contato (l_c)

O comprimento de corte é definido de acordo com Marinescu et al. (2007) como sendo a extensão de contato entre o rebolo e a peça e pode ser calculado pela equação 5:

$$l_c = (a \cdot de)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

onde: l_c = comprimento de contato (mm);

a = profundidade de retificação (mm);

de = diâmetro equivalente (mm).

Ainda segundo Marinescu et al. (2004) o comprimento de corte real pode ser muito maior que o comprimento de corte calculado pela equação. Trata-se de uma boa aproximação quando a operação de retificação possui grande profundidade de corte.

Uma vez que a equação 1 não considera as deformações ocorridas no processo, Malkin e Guo (2008), chamam esse parâmetro encontrado de comprimento de corte estático.

De acordo com Anderson et al. (2008), a retirada de material e a geração de calor ocorrem ao longo do comprimento de contato.

2.3.3. Relação G

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 6 exemplifica seus valores:

$$G = \frac{Z_w}{Z_s} = \frac{a \cdot V_w \cdot t}{\pi \cdot d_s \cdot \delta} \quad (6)$$

Onde: Z_w (mm³) = volume do material removido.

Z_s (mm³) = volume de rebolo gasto.

t (s) = tempo de retificação.

δ (mm) = 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.

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

Para Marinescu et al. (2004), a espessura de corte equivalente (h_{eq}) é um parâmetro amplamente utilizado devido à sua simplicidade e refere-se a uma medida de profundidade de penetração da ferramenta.

Segundo Heinzl e 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 (V_s), conforme a equação 7.

$$h_{eq} = \frac{Q'_w}{v_s} = \frac{\pi \cdot d_w \cdot V_f}{60 \times 1000 \times v_s} \quad (7)$$

(a)
(b)

A primeira parte da equação (a) é utilizado para retificação plana e a segunda parte (b) na retificação cilíndrica de mergulho, onde:

- h_{eq} (mm) = espessura equivalente de corte;
- Q'_w (mm³/s) = taxa específica de remoção volumétrica.

Embora a espessura equivalente de corte não envolva o espaçamento dos grãos na superfície do rebolo, é um fator imprescindível já que determina a espessura com que os cavacos emergem da retificação (MARINESCU et al., 2007).

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 (h_{max}), a qual é apresentada na equação 8.

$$h_{max} = 2L \frac{v_w}{v_s} \sqrt{\frac{a}{ds}} \quad (8)$$

Onde, L (μm) = espaçamento médio entre grãos abrasivos;
 d_s (mm) = diâmetro externo do rebolo.

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

2.3.5. Velocidade de corte (v_s)

De acordo com Winter (2014), a velocidade de corte ou velocidade periférica do rebolo é representada pelo deslocamento de um ponto da superfície de corte do rebolo em um determinado espaço de tempo. Este parâmetro é de fundamental importância no processo de retificação na medida em que determina a vida útil do rebolo, implicando na alteração do acabamento superficial das peças, assim como a capacidade de remoção dos grãos abrasivos.

Este parâmetro é determinado em pés por minuto ou em metros por segundo (m/s) (MARINESCU et al., 2007).

Segundo Graf (2004), a velocidade de corte em m/s pode ser expressa pela equação 9:

$$v_s = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60 \cdot 100} \quad (9)$$

Onde: n_s (rpm) = rotação do rebolo;

d_s (mm) = diâmetro externo do rebolo.

Com o desenvolvimento de novas retificadoras e rebolos modernos, tem-se aumentado cada vez mais a velocidade de corte. Dessa forma, mantendo-se todos os outros parâmetros constantes e aumentando-se a velocidade de corte, consequentemente diminui-se a espessura do cavaco não deformado, e ao fazê-lo obtém-se algumas vantagens como: redução das forças de retificação, menores taxas de desgaste do rebolo e menores valores de rugosidade (JACKSON et al, 2001).

2.3.6. Velocidade da peça (V_w)

Na retificação cilíndrica externa a velocidade da peça é sua velocidade periférica. Segundo Graf (2004), a velocidade da peça V_w pode ser definida pela equação 10:

$$V_w = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_w}{60 \cdot 100} \quad (10)$$

Onde: d_w (mm) = diâmetro da peça;

n_w (rpm) = rotação da peça.

De acordo com Graf (2004), o aumento da velocidade da peça promoverá uma elevação na taxa de remoção de material, gerando cavacos mais espessos e, portanto, transferindo uma carga superior sobre cada grão abrasivo do rebolo.

2.3.7. Velocidade de mergulho (V_f)

A velocidade de mergulho ou velocidade de avanço determina a taxa de remoção volumétrica do material. Quando maior for a velocidade de avanço, maior serão as forças de corte, emissão acústica, menores tempos de usinagem, ganho na produtividade e maiores danos no material processado (GUERMANDI et al., 2009).

No início do processo de retificação (desbaste) utilizam-se velocidades de avanço relativamente altas (entre 0,4 a 2mm/min) e, portanto, remove-se aproximadamente 95% do material da peça. Após esta etapa, o avanço deve ser reduzido para cerca de 0,1 a 0,3 mm/min para que a peça tenha o material restante removido e possa apresentar medidas finais adequadas (BALDO, 1994).

2.3.8. Taxa de Remoção de Material (Q_w)

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. (2008), utiliza em seu trabalho a expressão:

$$Q_w = a \cdot V_w \cdot b = \pi \cdot d_w \cdot V_f \cdot b \quad (11)$$

Onde: V_f (mm/min) = velocidade de avanço do rebolo (mergulho);

d_w (mm) = diâmetro da peça.

Dividindo a taxa de remoção (Q_w) pela largura de retificação (b) pode-se obter a taxa específica de remoção (Q'_w), representada pela equação 12, possibilitando a análise de produtividade do processo de retificação (KRUEGER et al., 2000).

$$Q'_w = a \cdot V_w = \pi \cdot d_w \cdot V_f \quad (12)$$

Segundo Ferrari (2015), a taxa de remoção do material (Q_w) ocorre quando cada grão abrasivo do rebolo penetra na peça e remove o material que está em sua trajetória.

Esse tipo de variável tem considerável importância nas forças de corte, deflexões e consumo de energia. Aumentar a largura de contato acarreta em um acréscimo direto nas forças e potências de retificação.

Segundo Rowe (2014) é possível apresentação de equações que representem Q_w e Q'_w , onde pode-se aplicar a equação (13) para Q_w e a equação (14) para Q'_w .

$$Q_w = b_w \cdot a \cdot v_w \quad (13)$$

$$Q'_w = a \cdot v_w \quad (14)$$

Onde: b_w (mm) = largura de retificação;

V_w (m/s) = velocidade da peça;

a (µm) = profundidade de retificação.

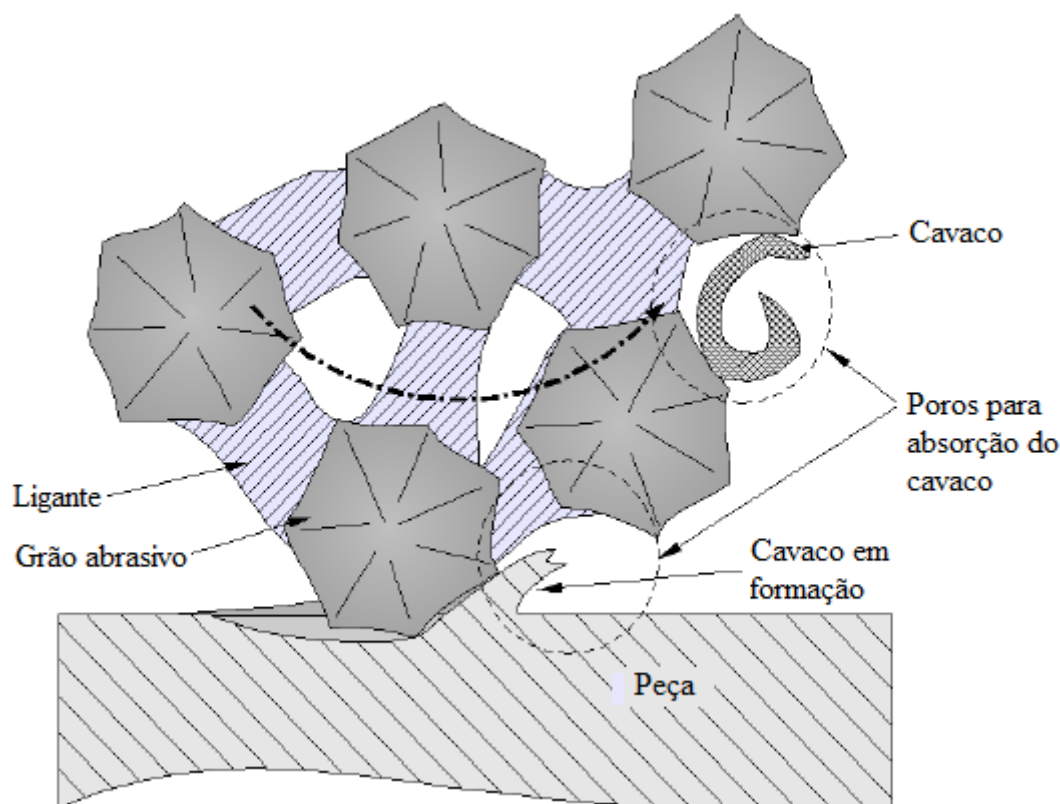
Segundo Rowe (2014), a taxa específica de remoção do material influencia diretamente no estresse causado nos grãos abrasivos, em sua taxa de desgaste e em todos os aspectos de seu comportamento, incluindo as altas temperaturas e os danos térmicos.

2.4. Rebolo convencional

O rebolo é uma ferramenta abrasiva de revolução empregada no processo de retificação. É caracterizado pela associação entre grãos abrasivos e uma matriz ligante formando um corpo

abrasivo e sua porosidade é responsável pela absorção dos cavacos, como representado na Figura 2.8. Esses grãos apresentam arestas de corte de geometria indefinida e são responsáveis pela remoção de material. São constituintes dessa ferramenta: grãos abrasivos, aglomerante e poros. Dessa forma, seu desempenho está relacionado ao tipo e ao tamanho do grão abrasivo, as propriedades abrasivas do material ligante assim como a porosidade dessa associação (MALKIN, 1989).

Figura 2.8. Estrutura e composição de um rebolo.



Fonte: MALKIN (1989).

Pelo fato de os rebolos convencionais apresentarem custo inferior aos superabrasivos, isso torna o seu uso acessível em indústrias de diversos portes. Outro fator relevante é a utilização desse tipo de rebolo associado à técnica de mínima quantidade de lubrificante que se faz muito importante na indústria metal-mecânica moderna de acordo com o tamanho dos grãos e o grau de dureza.

2.4.1. Caracterização do rebolo convencional

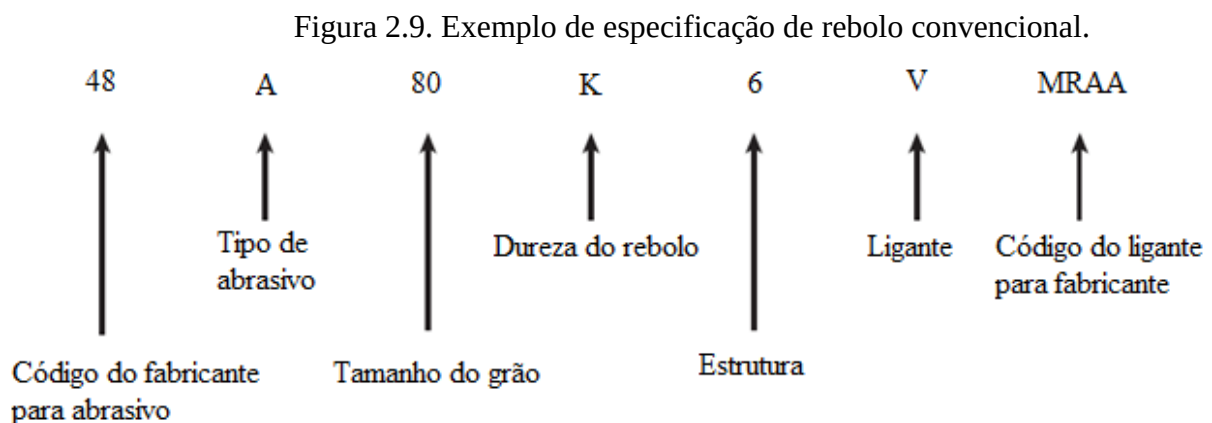
O rebolo se assemelha a um disco constituído de núcleo, ligantes e grãos abrasivos

(BIANCHI et al., 2011). Esses grãos abrasivos são arestas cortantes com geometria indefinida que removem o material de maneira simultânea e uma de suas características mais importantes é que eles sejam mais duros que o material a ser retificado (MALKIN, 1989).

Os rebolos possuem uma notação padronizada de classificação. Pode-se citar os critérios como:

- Tipo de abrasivo
- Tamanho de grão
- Grau de dureza
- Número da estrutura
- Tipo de ligante

Na Figura 2.9 pode-se encontrar um exemplo de aplicação desses critérios.



Fonte: Adaptado de ROWE (2014).

2.4.2. Dureza do rebolo

A dureza do rebolo pode ser definida, de acordo com Malkin e Guo (2008), como a capacidade deste de resistir ao desprendimento de grãos abrasivos, ou seja, a habilidade do ligante de reter esses grãos. Dessa forma, os mesmos autores defendem que quanto maior a dureza da ferramenta abrasiva, menor será o desprendimento de grãos.

A escala de dureza é definida por meio de letras pela norma DIN 69100, a qual é apresentada na Tabela 2.1:

Tabela 2.1. Medida de dureza para rebolos.

Extra macio	Macio	Médio	Duro	Extra duro	Extremamente duro
E F G	H I J K	L M N O	P Q R S	T U V W	X Y Z

Fonte: TSCHÄTSCH (2009).

O principal parâmetro que determina a dureza de um rebolo é a quantidade de ligante (SALMON, 1992). Isso se justifica pelo fato de que maiores quantidades de ligante reduzem o número e tamanho dos poros, aumentando a interação entre ligante e grão abrasivo (superfície de contato) e, portanto, dificultando que os grãos abrasivos se desprendam da estrutura.

A dureza do material ligante é desenvolvida e ajustada com o intuito de colaborar para o desprendimento de grãos abrasivos que tenham perdido suas arestas de corte. Dessa forma, o rebolo regula seu próprio formato, colaborando ainda para que os intervalos entre dressagens sejam mais longos (ROWE, 2014).

2.4.3. Estrutura do rebolo

A estrutura de um rebolo é definida pela densidade de grãos e porosidade. Uma porosidade baixa será resultado de grãos muito finos associados a uma quantia grande de ligante sob elevada pressão. Já uma porosidade elevada resultará de grãos mais grossos e, portanto, uma estrutura mais aberta. Segundo Salmon (1992), há a possibilidade de induzir a porosidade no rebolo, a qual provém de elementos voláteis aplicados em uma etapa específica da fabricação, chamada de estágio verde, antes do forno.

Na Tabela 2.2 são expressas as medidas de classificação da estrutura de um rebolo.

Tabela 2.2. Classificação da estrutura de um rebolo.

Muito denso	Denso	Médio	Aberta	Muito aberta
1, 2	3, 4	5, 6, 7, 8	9, 10, 11	12, 13, 14

Fonte: Adaptado de TSCHÄTSCH (2009).

De acordo com Rowe (2014), rebolos com estrutura aberta possibilitam uma retificação com alta taxa de remoção já que grandes quantidades de cavaco poderão ser acomodadas entre

os poros. Além disso, este tipo de estrutura auxilia o transporte de fluido para a interface de contato entre a ferramenta abrasiva e a peça.

2.4.4. Abrasivos

Os abrasivos normalmente são provenientes de materiais naturais ou sintéticos. Eles são utilizados na confecção de ferramentas de corte caracterizadas por apresentarem alta dureza, arestas de corte, boa habilidade de corte e, por fim, não possuem uma geometria definida. Seu grau de afiação é expresso em termos de raio de aresta e do ângulo do vértice. Ainda assim, sua habilidade de corte depende de fatores como a estrutura do grão e sua friabilidade (MARINESCU et al., 2013).

Esses abrasivos podem ser naturais ou sintéticos e necessitam de uma dureza superior à do material que irá usinar (MALKIN e GUO, 2008).

A dureza é a propriedade mais importante do abrasivo. Sendo assim, um bom abrasivo deve manter sua dureza em altas temperaturas, não reagir quimicamente e não se difundir facilmente no material da peça. Pode-se citar também que suas propriedades térmicas são de fundamental importância na resistência ao desgaste e nas altas temperaturas de usinagem.

Segundo Rowe (2014), quanto mais puro for o abrasivo, maior será sua condutividade térmica, a qual já é elevada.

De acordo com Klocke (2009), são características necessárias aos abrasivos:

- Alto grau de dureza e resistência mecânica para facilitar a formação do cavaco e manter as arestas de corte afiadas por um período considerável.
- Alto grau de resistência à temperatura, para que o abrasivo consiga resistir às altas temperaturas da retificação e suas mudanças.
- Resistência química para evitar que os grãos fiquem sujeitos a reações químicas em altas temperaturas e pressões com o ar, fluido de corte e material da peça.

Segundo Marinescu et al. (2007), os abrasivos são divididos em dois grupos: abrasivos convencionais baseados no carbetto de silício (SiC) e no óxido de alumínio (Al_2O_3) além de superabrasivos baseados no diamante e no nitreto cúbico de boro (CBN).

Essa diferenciação baseia-se na variação de dureza entre os materiais resultando em uma considerável diferença no desgaste do rebolo e nas estratégias de retificação. Além disso, um

rebolo feito de superabrasivo é de 10 a 100 vezes mais caro que o abrasivo convencional (MARINESCU et al., 2007).

2.4.4.1. Óxido de alumínio (Al_2O_3)

Dentre os abrasivos convencionais desenvolvidos para atender às variadas exigências das operações de retificação, pode-se destacar o rebolo de óxido de alumínio (Al_2O_3) por sua grande utilização e importância nas indústrias, pois, apesar de apresentar a menor dureza dentre todos os abrasivos, possui a vantagem de ser relativamente resistente ao impacto, podendo ser empregado na retificação de materiais ferrosos (HASSUI, 2002).

Segundo Shaw (1996), o óxido de alumínio é o mais duro dos óxidos, sendo possível encontrá-lo no mercado em diversas formas e tamanhos. O primeiro óxido de alumínio sintético foi coproduzido pelo processo de eletro fusão da bauxita no ano de 1.900, por Charles Jacobs, funcionário da empresa Ampere Electro-Chemical.

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

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

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

A alumina branca utilizada neste estudo é a que apresenta maior dureza e friabilidade da família, assim são utilizadas para retificação de precisão com rebolos vitrificados (MARINESCU et al., 2007). Segundo Rowe (2014), a alumina branca é a que apresenta maior pureza.

2.4.5. Ligantes

Os ligantes promovem a fixação e manutenção dos grãos abrasivos em um rebolo. Esses ligantes devem: resistir às forças de retificação, às elevadas temperaturas, às forças centrífugas oriundas de elevados níveis de rotação da ferramenta abrasiva e aos ataques químicos

provocados pelos fluidos de corte. Ainda assim, asseguram a rigidez do rebolo e a organização das partículas abrasivas (MALKIN, 1989).

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

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

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

Segundo Malkin e Guo (2008) a maioria dos rebolos constituídos de abrasivos convencionais são confeccionados com ligante vitrificado ou resinoide. Para a maioria dos rebolos constituídos de superabrasivos o ligante utilizado é resinoide ou metálico, também o ligante vitrificado é amplamente utilizado para rebolos de CBN.

Segundo Jackson e Mills (2000) a escolha do aglomerante deve ser feita considerando-se o tipo e tamanho do rebolo, as condições de trabalho, a vida do rebolo e ainda a relação custo/benefício de produção. As velocidades de corte em que o rebolo deve operar são determinadas de acordo com o tipo do aglomerante, dependendo da resistência mecânica do mesmo. Além disso, os grãos abrasivos e os aglomerantes devem possuir coeficientes de dilatação térmica análogos. Isso é necessário para que não ocorra a formação de tensões internas durante o trabalho a elevadas temperaturas (MALKIN, 1989).

2.5. Dressagem de rebolo convencional com ponta única

A dressagem pode ser definida como uma operação de afiação da superfície de corte de um rebolo (JACKSON et al., 2007).

Este processo é considerado como o principal fator de influência no que diz respeito ao desempenho da retificação. Através desse processo é possível produzir a topografia do rebolo. Isso afeta diretamente nas forças atuantes nesse processo, qualidade da superfície da peça e no desgaste do rebolo (DANESHI, 2014).

A dressagem tem como objetivos principais:

- Manter a agressividade do rebolo, eliminando os grãos abrasivos gastos e os cavacos de material incrustados entre os grãos;
- Manter as formas geométricas (perfis) do rebolo e produzir peças dentro das dimensões e rugosidades adequadas.

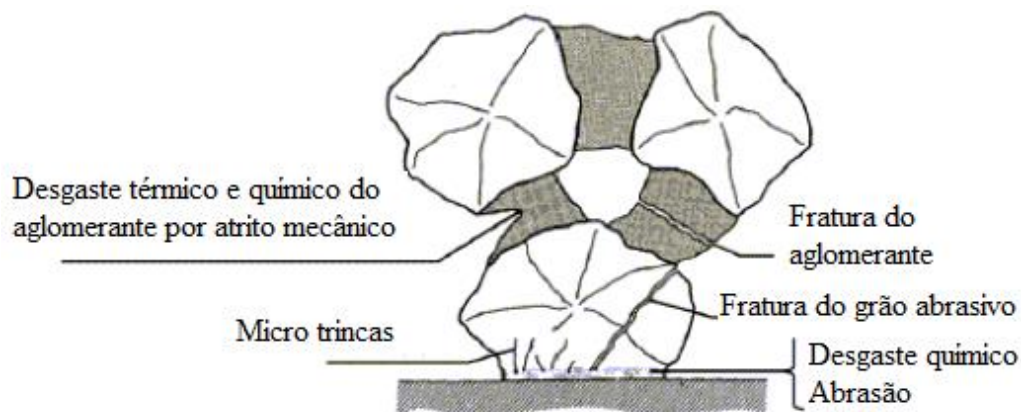
Porém, o ideal seria que as partículas abrasivas presentes na superfície dessa ferramenta de corte se auto afiassem quando desgastadas. Entretanto, ocorre o desprendimento dos grãos ou sua fratura, expondo novas partículas com novas arestas de corte. Dessa forma, as características e funcionalidades do rebolo devem ser ajustadas por meio de dressagens programadas (JACKSON et al., 2007). Ainda segundo o mesmo autor, o desgaste da ferramenta abrasiva se deve à usinagem em si e ao processo de dressagem, os quais consomem respectivamente 10% e 90% de seu volume.

2.5.4. Desgaste do rebolo e a importância da dressagem

Existem quatro mecanismos distintos de desgaste do rebolo: desgaste abrasivo (geração de áreas planas e alisadas as quais aumentam a área de contato entre grão e peça), fratura das pontes ligantes, fratura dos grãos devido a impactos ou variação térmica e fratura entre o grão abrasivo e ponte ligante. As causas podem variar dependendo dos parâmetros de retificação adotados, tipo de peça ou fluido de corte utilizado (JACKSON e MILLS, 2000).

De acordo com Tawakoli et al. (2007), as causas do desgaste do abrasivo podem ocorrer por ataque químico de componentes do fluido refrigerante, por danos térmicos na retificação ou por desgaste por atrito, ocasionando a fratura do grão ou a quebra do ligante. Na Figura 2.10, a qual se encontra abaixo, pode-se observar os mecanismos citados.

Figura 2.10. Mecanismos de desgaste do rebolo.



Fonte: Adaptado de KONIG e TAWAKOLI et al. (2007).

Para Hassui e Diniz (2003), os esforços de corte são heterogêneos, provocando desgaste desigual na superfície do rebolo (podem ser provocados também pela direção aleatória dos grãos abrasivos). Além disso, aparece a necessidade de retirar os cavacos presos nas porosidades do rebolo, além de gerar novas arestas de corte. Os grãos abrasivos desgastados elevam os esforços de corte, provocando aumento da temperatura na zona de corte, danificando termicamente a peça e o rebolo. Em algumas ferramentas abrasivas ocorre auto afiação, que é a exposição de novas arestas de corte (fratura ou retirada de grão abrasivo ou ligante) apenas com o aumento dos esforços de corte da retificação. Caso isso não ocorra, é necessário realizar a dressagem.

2.5.4.1. Dressagem com dressador conglomerado

Os métodos de dressagem se subdividem em mecânica, a laser e eletrolítica. O primeiro é o mais comum nas indústrias, ela utiliza um diamante de ponta única. Entretanto, as desvantagens encontradas são: desgaste do diamante, perda no tempo de operação e aumento de custo por parada do processo para o condicionamento do rebolo (HARIMKAR et al., 2006).

Uma aplicação da dressagem mecânica diz respeito a rebolos com ligante vitrificado e resinóide. Já ferramentas abrasivas com ligantes metálicos são dressadas pelo método eletrolítico (XIE et al., 2004).

Os dressadores do tipo conglomerados ilustrado na Figura 2.11, possuem várias pontas diamantadas, as quais, atuam simultaneamente na superfície do rebolo, causando desgaste de forma regular nas pontas diamantadas que ficam em contato com o rebolo.

Figura 2.11. Imagem de um dressador conglomerado.



Fonte: Catálogo Empresa Acre Continental. 2019.

O uso de dressadores conglomerados em condições de elevadas forças, podem incidir o macro lascamento do diamante, caso isso ocorra, a consequência do dressamento oscilará muito. O importante é que desse modo são instituídos novos gumes afiados, alterando-se os parâmetros de dressamento, os resultados podem ser de boa qualidade. Por outro lado, a repetição do processo é baixa (GRAF, 2008).

Uma das desvantagens da utilização do dressador conglomerado é que apresenta uma má repetibilidade, é importante que o rebolo tenha contato com vários diamantes, quando um diamante é arrancado da matriz, o contato com o rebolo é alterado e consequentemente o resultado do acabamento sofrerá alteração (GRAF, 2008).

2.6. Fluido de corte

Segundo Runge (1990), 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). Os fluidos de corte além de possibilitarem uma

velocidade de corte mais econômica e como um todo, contribuem para a eficiência do sistema de produção (SOKOVÍČ et al., 2001).

Na Figura 2.12 está representada a técnica de lubrificação convencional.

Figura 2.12. Representação da utilização de fluido de corte em abundância.



Fonte: ALVES (2010).

Segundo Malkin (1989), os fluidos de corte são utilizados com o intuito de otimizar a usinagem por meio do aumento da ação lubrificante e refrigerante na região de corte. Sua eficiência depende de fatores como: velocidade, vazão e direção de aplicação.

O fluido de corte, associado ao processo de retificação possibilita um menor valor de rugosidade e consequentemente um acabamento final de melhor qualidade. Além de uma maior vida útil do rebolo pelo distanciamento entre os períodos de dressagem do rebolo. Sua aplicação deve ser monitorada ao máximo já que lubrificação e refrigeração deficientes colaboram para o aumento do número de afiações, desgastando o rebolo excessivamente.

Segundo Barczak et al. (2010), ainda que seja contestada sua utilização devido aos fatores humanos e ambientais a técnica de lubrificação convencional, a qual caracteriza-se pela utilização de excessiva quantidade de fluido à baixa velocidade aplicadas na zona de corte, é a mais utilizada no meio industrial.

2.6.4. Problemas na utilização do fluido de corte

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 líquido refrigerante. De acordo com o CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente, a quantidade permitida de água nos diferentes tipos de óleo, no art. 34 da resolução 357/06 de 17 de março de 2005 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 de 13 de maio de 2011, que estabeleceu que nenhuma quantidade de óleo poderia estar contida na água.

Nos processos de usinagem os fluidos de corte representam parcela significativa dos custos totais, podendo atingir até 20% desse total, considerando a aquisição dos produtos, custos com manuseio dos mesmos e à destinação dos resíduos resultantes do processo, de forma a atender as exigentes legislações ambientais (KLOCKE e EISENBLÄTTER, 1997; SREEJITH e NGOI, 2000; TASDELEN et al., 2008). Os fluidos de corte representam sérios riscos ao meio ambiente e à saúde dos trabalhadores. O descuido na destinação dos fluidos incorre na poluição do ar, da água e do solo. O manuseio prolongado dos operadores de máquinas com fluidos de corte pode causar doenças respiratórias, da pele e do sistema digestivo (SOKOVIK e MIJANOVIC, 2001; SU et al., 2006; THOMÉ et al., 2007). O consumo mundial de fluidos de corte para usinagem é estimado em 1,25 bilhão de litros por ano (MARKSBERRYA e JAWAHIR, 2008). Diante desses dados é possível verificar um grande apelo na redução de custos, bem como, de problemas ambientais e de saúde, onde há a necessidade de desenvolvimento para estabelecer novas estratégias de redução da utilização de fluidos de corte.

Segundo Bartz (2001), fluidos de corte contém substâncias tóxicas tais como: nitros aminas, formaldeídos, substâncias orgânicas contendo parafinas cloradas e bifenis poli clorados, substâncias orgânicas contendo fósforo, as quais foram caracterizadas como substâncias nocivas para a saúde e meio ambiente. 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 (SOKOVIC e MIJANOVIC, 2001). Analisando esses aspectos, Sluhan (1994) relata que muitos desses refrigerantes tornam-se propícios ao crescimento de bactérias e fungos e, portanto, tem-se o risco de inalação dessas partículas com o efeito nocivo para a saúde do trabalhador. Irritações das vias respiratórias (pneumonia, fibrose pulmonar e asma) são alguns dos principais efeitos causados. O operador pode apresentar outras doenças, devido ao contato de partes do corpo expostas ao fluido de usinagem.

Devido à crescente demanda por preservar cada vez mais o meio ambiente e colaborar para que o trabalhador se situe em um ambiente de trabalho mais digno, a indústria tem buscado novas técnicas de lubrificação-refrigeração. Dessa forma, o novo paradigma da produção sustentável

inclui o critério social, meio ambiente e econômico (PUSAVEC et al., 2014; SANCHEZ et al., 2010).

2.6.5. Tipos de fluido de corte

Os fluidos de corte estão comercialmente disponíveis em diferentes propriedades tendo em vista a necessidade de satisfazerem as exigências de diferentes tipos de usinagem (MARINESCU et al., 2004). Esses fluidos são divididos em três grupos:

- Imiscível em água (óleos integrais)
- Miscível em água (a base de água)
- Gases (ar, dióxido de carbono e gases inertes).

Já em relação aos óleos de corte, segundo Irani et al. (2005), estes apresentam quatro subdivisões conforme apresentado na Tabela 2.3, as quais baseiam-se em suas composições. Sendo estas: sintético, semissintéticos, óleos emulsionáveis e óleos minerais.

Tabela 2.3. Características dos principais tipos de fluidos de corte utilizados nas indústrias.

	Sintético	Semissintético	Óleo emulsionável	Óleo Mineral
Calor removido	Excelente	Ótimo	Bom	Ruim
Lubrificação	Ruim	Bom	Ótimo	Excelente
Manutenção	Ótimo	Bom	Ruim	Excelente
Filtrabilidade	Excelente	Ótimo	Bom	Ruim
Danos ao meio ambiente	Excelente	Ótimo	Bom	Ruim
Custo	Excelente	Ótimo	Bom	Ruim

Fonte: Adaptado de WEBSTER (1995).

2.6.6. Manutenção e descarte do fluido de corte

Segundo Sokovic e Mijanovic (2001), o descarte dos fluidos de corte pode ser feito

dentro da indústria, ou terceirizado para empresas de eliminação de fluidos. Dependendo do procedimento realizado, pode ocorrer algum tipo de poluição ao meio ambiente. A contaminação do solo, água e ar é decorrente, principalmente, de vazamentos, perdas, emissões, água da lavagem de reservatórios e da própria disposição dos fluidos de corte.

Após entrar em uso, os fluidos de corte começam a acumular pequenos pedaços do rebolo e cavaco, além de iniciar a proliferação de microrganismos, devido à grande quantidade de compostos orgânicos em sua composição. Assim, há mudança na composição química que altera as propriedades iniciais do fluido, o que gera aumento do desgaste da ferramenta e a produção de peças defeituosas. Logo, a troca ou reciclagem dos fluidos após um tempo, se faz necessária e o descarte deve ser feito corretamente uma vez que existem substâncias no fluido de corte que são nocivas ao meio ambiente (OLIVEIRA et al., 2012).

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

A reciclagem pode ser uma boa alternativa para um fluido de corte, pois os resíduos poluentes são separados e retirados do fluido, e então, o fluido pode voltar a ser utilizado juntamente com um fluido limpo. Isso reduz a frequência de descarte, impactando diretamente nos custos do processo (SILLIMAN, 1992).

O descarte do fluido de corte é caro principalmente pelo fato que os fluidos de corte não são biodegradáveis em sua maioria, o que gera custos com tratamentos para descarte (SHOKRANI et al., 2012).

Novas técnicas de aplicação vem sendo estudadas a fim de que se reduza consideravelmente a utilização em abundância dos fluidos de corte, uma das técnicas que está sendo bastante pesquisada e aprimorada é a técnica de mínima quantidade de lubrificação.

2.7. Técnica de Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL)

Devido à impactos ambientais e danos à saúde humana, a busca por novas técnicas de lubrificação vem se intensificando cada vez mais. A utilização da técnica de mínima quantidade de lubrificação (MQL) é uma aplicação de fluido onde a aspersão de gotículas de óleo lubrificante é arrastada por um jato de ar comprimido e aplicadas na região de contato da peça e da ferramenta, com isso reduz-se a quantidade de fluido de corte convencional. Segundo Dudzinsk et al. (2004), considera que essa a técnica de MQL não é satisfatória devida a geração

excessiva de calor.

Tawakoli et al. (2009), afirmam que a técnica de Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL) destaca-se atualmente como uma tendência dentre os métodos de lubrificação empregados nos processos de usinagem em geral. Esta técnica é responsável por trazer benefícios para as indústrias aumentando sua competitividade no mercado, além de satisfazê-las em aspectos ecológicos e econômicos, dispensando toda a insalubridade e onerosidade envolvida com o descarte de fluidos convencionais.

Ela caracteriza-se por utilizar uma pequena quantidade de fluido associado ao ar comprimido e direcionados à zona de corte com o intuito de diminuir o atrito entre a ferramenta de corte e a peça (WALKER, 2013). A quantidade “mínima” varia dependendo da circunstância. Segundo a norma Alemã DIN 69090-1 são 50 ml/hora de lubrificante e em casos excepcionais 150 ml/hora.

A aplicação de 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, diferentemente do modelo convencional, no qual procedimentos específicos devem ser tomados para que o fluido alcance esse mesmo espaço (OBIKAWA et al., 2009).

Heisel et al. (1998), afirmam que a técnica de MQL atua como elo de ligação entre os métodos de lubrificação convencionais e a usinagem a seco. Estudos envolvendo a usinagem a seco mostram que a ausência de lubrificante torna-se inviável quando se leva em conta a vida da ferramenta, os esforços da máquina e a qualidade superficial da peça retificada. A técnica de MQL caracteriza-se na maioria dos casos como uma solução interessante a este problema, pois, combina a utilização de ar comprimido, responsável pela refrigeração, misturado a uma pequena quantidade de óleo, que lubrifica a interface de contato peça-ferramenta.

A redução dos custos ao se utilizar a técnica de MQL se deve a fatores como a redução do volume de fluido utilizado, assim como a não necessidade de compra e manutenção de um reservatório para o fluido. Ao utilizar uma pequena quantidade de fluido, essa técnica facilita o processo produtivo na maneira em que não há necessidade de um sistema de limpeza das peças que seguirão a linha de montagem, nem do cavaco que poderá ser reutilizado mais facilmente (WALKER, 2013). Ainda segundo o mesmo autor, durante a retificação, como a peça a qual está sendo trabalhada não está totalmente coberta por fluido, o monitoramento visual se faz possível.

Segundo Belentani et al. (2014), a técnica de MQL apresenta mais eficiente do que a técnica convencional no direcionamento de lubrificante na zona de retificação, devido à técnica de MQL proporcionar melhor direcionamento do jato de fluido na zona de corte, por trabalhar com pressões e velocidades do ar e do fluido mais altas, comparadas à técnica convencional, promove melhor lubrificação.

2.7.4. Problemas na utilização de MQL

Ao se adotar a técnica de MQL para o sistema de lubrificação deve-se levar em conta a necessidade de implantação de um sistema de compressores capazes de pressurizar o ar e outros equipamentos tais como coifas e exaustores (responsáveis pela sucção dos poluentes) (KLOCKE et al., 2000).

Ainda assim, segundo Diniz et al. (2013), a técnica de mínima quantidade de lubrificante apresenta desvantagens como:

- Consumo: O fluido associado ao ar comprimido é aplicado à zona de corte na forma de uma névoa. Nesse processo perde-se todo o fluido utilizado pois não há retorno para essa névoa. Ainda que esse sistema de lubrificação utilize baixos níveis de vazão, por exemplo 10ml/h, em 8h/dia durante três meses de 22 dias de trabalho, serão pulverizados aproximadamente 5 litros de refrigerante. Fazendo uma comparação com um fluido sintético, o qual é utilizado normalmente em concentrações de 3 a 5% na retificação e considerando suas perdas e uma vida útil maior do que 6 meses, pode-se concluir que o consumo desse produto será inferior ao que foi pulverizado.
- Emissão acústica: A pulverização no sistema de MQL utiliza uma linha de ar comprimido durante toda a usinagem. Essas linhas de ar geralmente produzem ruídos superiores aos permitidos para a audição humana (80 dB) e dessa forma, além de afetar negativamente a saúde humana, o ruído prejudica o ambiente de comunicação entre os funcionários.
- Poluição ambiental: A utilização da técnica de mínima quantidade de lubrificação exige que a máquina seja totalmente vedada e também apresente um sistema de exaustão adequado e que possua controle de partículas. Isso se deve ao fato da pulverização permitir que muitas partículas de óleo estejam em suspensão no ambiente local.

Com o intuito de reduzir o número de partículas oleosas em suspensão no ar atmosférico ao se utilizar o sistema de MQL, recomenda-se o uso de óleos de viscosidade elevada e que possuam aditivos antinévoa. Além disso, os óleos utilizados devem ser "ambientalmente corretos", isto é, isentos de solventes e de compostos que contenham flúor, e também devem possuir a capacidade de remoção de calor (HEISEL et al., 1998). Para atender às exigências citadas tem sido empregado, cada vez mais, quantidades de óleos de origem vegetal.

2.8. 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). Essa borra pode ser observada na Figura 2.13.

Figura 2.13. "Borra" composta de óleo e cavaco.



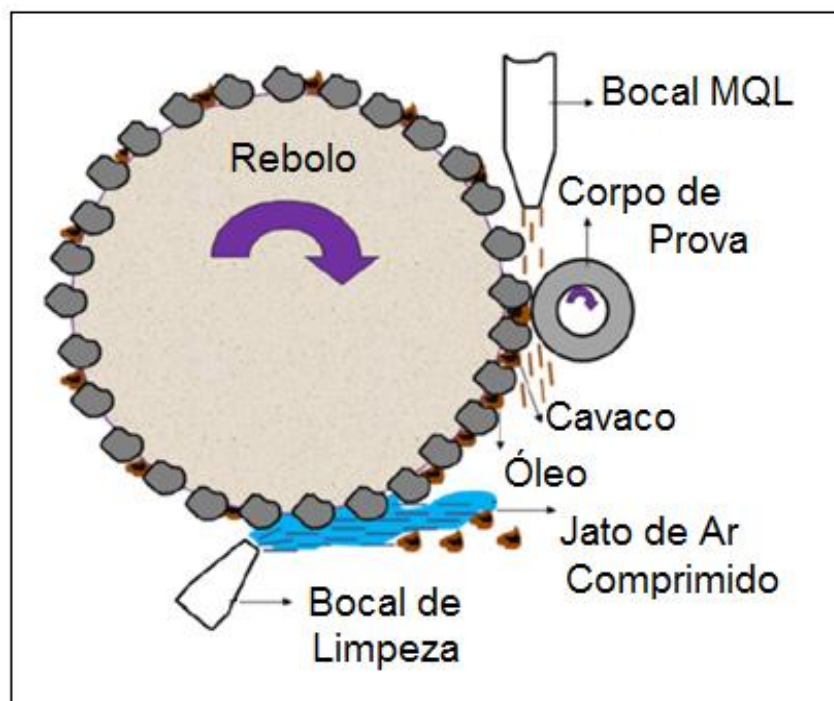
Fonte: Adaptado de OLIVEIRA et al. (2012).

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

consequentemente dos cavacos aderidos aos poros do rebolo.

Os efeitos da limpeza citada podem ser observados a partir da representação na Figura 2.14.

Figura 2.14. Efeitos do jato de ar comprimido.



Fonte: Adaptado de OLIVEIRA et al. (2012).

Segundo o mesmo autor é possível um aumento na profundidade de corte em função da diminuição do desgaste do rebolo. Dessa forma, obtém-se melhores qualidades de forma e superfície, ou seja, melhores valores de rugosidade com a utilização da técnica descrita.

2.9. Tubo de vórtice

Os primeiros registros de existência de um dispositivo capaz de gerar fluxos distintos de ar frio e ar quente, através do processo de troca de energia em escoamentos rotativos, datam de 1933 pelo cientista francês Georges Ranque.

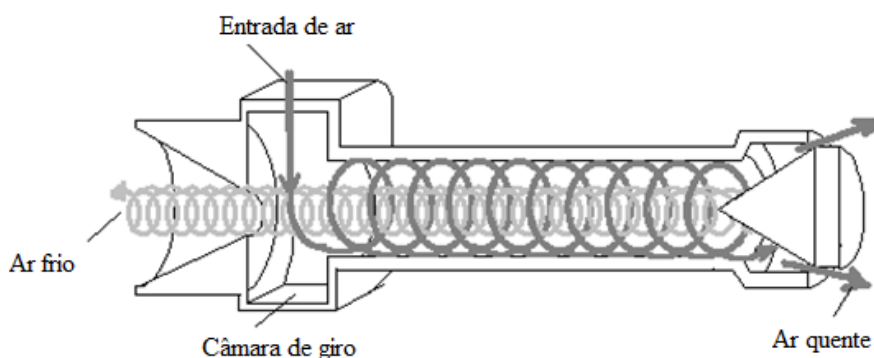
Os tubos de vórtice, também denominados tubos de Ranque-Hilsch, são dispositivos mecânicos, sem partes móveis, que possibilitam a divisão de um fluxo principal de fluido em dois fluxos secundários de vazões e temperaturas distintas (COCKERILL, 1998).

A separação de energia exibida pelo tubo de vórtice pode ser explicada principalmente

por uma transferência de trabalho causada por um torque produzido por cisalhamento viscoso atuando sobre uma superfície de controle rotativa que separa a região de fluxo a frio e a região de fluxo quente (ALJUWAYHEL et al, 2005).

Fisicamente, tal dispositivo consiste em um tubo cilíndrico dotado de uma entrada de fluido, posicionada de forma que o fluxo adentre-se ao dispositivo radialmente, tangenciando a face interna do tubo, conforme representado na Figura 2.15. Os fluxos secundários de fluido saem do tubo de vórtices em direções axiais e sentidos opostos ou coincidentes, dependendo do tipo de construção utilizada (COCKERILL, 1998).

Figura 2.15. Tubo de vórtice.

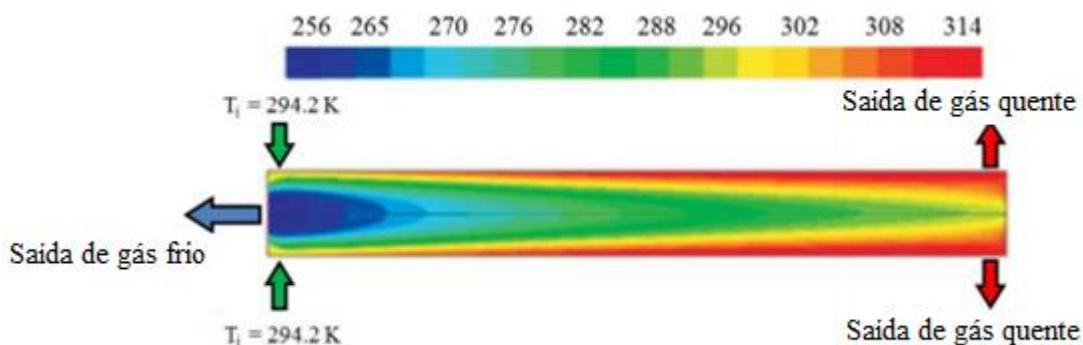


Fonte: adaptado de GAO et al. (2005).

O fluxo de ar quente escoar pela periferia do tubo e o fluxo de ar frio pelo centro. No final da câmara há uma válvula cônica dotada de um orifício que permite a saída apenas do gás que escoar na parte periférica da câmara (gás quente), fazendo com que as espirais de gás frio sejam bloqueadas pela válvula e empurradas para a direção oposta, onde há um orifício bem ao centro, então, através deste orifício o gás frio é escoado (LIU e CHOU, 2007).

Na figura 2.16 é apresentado o esquema de distribuição da temperatura na parte interna do tubo de vórtice.

Figura 2.16. Esquema de distribuição da temperatura na câmara do tubo de vórtice.



Fonte: POURARIA et al. (2016).

Os tubos de vórtice têm sido usados em muitas aplicações para resfriamento e fins de aquecimento. Embora sua eficiência seja baixa em comparação com condicionamento de ar tradicional, sua capacidade de fornecer resfriamento a baixo custo é única. Não tem partes móveis, não precisa de nada mais que ar comprimido, que está disponível em qualquer oficina, e entrega um resfriamento controlável para a ferramenta e peça de trabalho. Isso ajuda a estender a vida útil da ferramenta, assim, reduzir os tempos de troca de ferramenta e a perda de produtividade (ALSAYYED, 2012).

Existem muitas aplicações de tubos de vórtice, tais como: refrigeração eletrônica controles, operações de usinagem de resfriamento, ajuste de hot melts, resfriamento peças soldadas, amostras de gás refrigerando, refrigerar de componente eletrônico, selos térmicos refrigerando e câmara ambiental refrigerando (THOMAS, 1987). O vórtice tubo é investigado extensivamente na literatura. Um dos trabalhos recentes de Hamdan (2011), que avaliaram o efeito de diferentes parâmetros, relataram que há várias possibilidades para atingir a capacidade máxima de resfriamento e que, conforme a pressão de entrada aumenta, a capacidade de refrigeração aumenta.

Segundo Im et al. (2011), os tubos de vórtice são utilizados em muitos campos industriais como peças para máquinas de refrigeração devido aos seus muitos benefícios intrínsecos. Embora o uso desses tipos de tubos tenha se tornado comum, as características de separação de energia associadas a esses tubos ainda precisam ser vigorosamente pesquisadas.

Su et al. (2007), fizeram estudos comparativos utilizando vários fluidos refrigerantes e concluíram que a adição de ar refrigerado resulta em uma redução drástica do desgaste da ferramenta e rugosidade da superfície.

2.10. Aço ABNT 4340 temperado e revenido

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

Segundo Souza et al. (2003), esse aço apresenta alta resistência e embora tenha sido desenvolvido para aplicação em estruturas de grande porte, não gera aumento de peso das construções, quando comparado a outros aços de menor resistência mecânica.

Além disso, o aço ABNT 4340 é o que apresenta maior temperabilidade dentre os aços utilizados em construção mecânica. Sua usinabilidade e soldabilidade são baixas, porém apresenta boa forjabilidade (SOUZA et al., 2003).

Assim como informa a empresa Schmolz Bickenbach, o tratamento térmico deste aço é feito normalmente entre 830 – 850 °C, seguido por um resfriamento em óleo. Um revenimento total pode ser feito à 240 °C seguido por um resfriamento controlado. Dessa forma, a dureza do material alcança entre 52-56 HRC.

2.11. Variáveis de saída do processo de retificação cilíndrica

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

2.11.4. Rugosidade

A rugosidade 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 às 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. Podemos citar também o desgaste do rebolo, assim como a vibração do sistema, os quais auxiliam na formação de rugosidade na peça.

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

Para Puerto et al. (2013), os principais fatores relacionados a rugosidade de uma superfície usinada são os parâmetros de dressagem, as condições de usinagem, as forças e a energia que envolvem o processo e o desgaste diametral do rebolo. Segundo Weck et al. (2001), com a utilização lubrificador-refrigerantes é possível reduzir as forças e a energia que envolvem o processo afim de resultar em uma menor rugosidade na superfície do material. Complementando, o tipo de dressagem e o tempo de centelhamento também podem ser um adicional para melhorar a qualidade superficial, uma vez que podem influenciar na fragmentação dos cavacos (RAMESH e HUANG, 2003).

O tamanho dos grãos abrasivos e sua forma mantém uma relação direta com a redução da rugosidade, uma vez que quanto mais arestas de corte estiverem em contato com a superfície da peça, a rugosidade obtida será menor (BIGERELLE et al., 2008).

2.11.5. Desvios de circularidade

Os desvios de circularidade são definidos como qualquer diferença entre a peça usinada e a projetada, com tolerâncias especificadas (JEDRZEJEWSKI e MODRZYCKY, 1997).

Segundo Agostinho (1997), a circularidade é dada pelos desvios macro geométrico, onde uma análise entre uma forma circular ideal e a forma real da peça após a usinagem é comparada possibilitando ver o erro entre as duas geometrias.

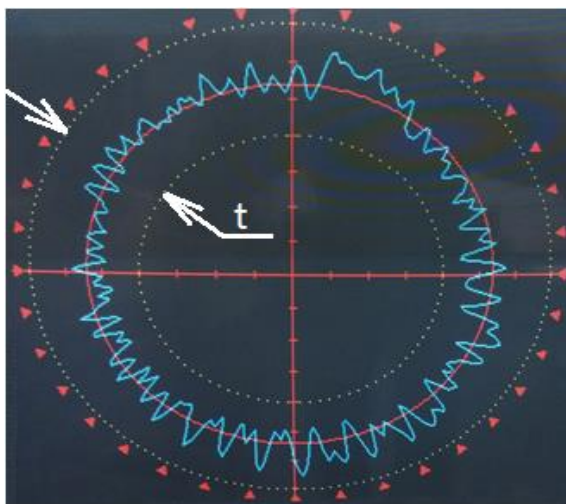
O campo de tolerância é definido por duas circunferências de mesmo centro e raios diferentes, onde, o centro das duas circunferências está posicionado no eixo da peça (ALVES, 2005).

Dessa forma, segundo Holesovsky e 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/ferramenta/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 a que a peça estará submetida e

consequentemente ocorrerá um aumento nos desvios geométricos, especialmente nos desvios de circularidade (DE METER e HOCKENBERGER, 1997).

De acordo com Ayubi et al. (2014), o produto final fabricado nunca será verdadeiramente circular, uma vez que existem imperfeições no seu processo de manufatura. No que se relaciona ao processo de fabricação, os erros de circularidade são possíveis de ocorrer pelas seguintes causas: desgaste da ferramenta, lubrificação inadequada, ação incorreta de corte, defeitos nos componentes da máquina, vibrações, desalinhamento dos mandris. A Figura 2.17 ilustra o perfil dos desvios de circularidade de uma peça modelo, o qual apresenta os desvios dentro das duas circunferências interna e externa representada pelo mesmo centro com raios diferentes.

Figura 2.17. Peça com desvios de circularidade.



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

O exemplo da peça modelo apresenta desvios de circularidade ocasionado pelo processo de retificação que tem relação direta com as condições deste processo, outras variáveis como solicitações mecânicas e danos térmicos, além da pressão e vazão de fluido de corte (SILVA et al., 2007).

Para Ayubi et al. (2014), o resultado final de fabricação de um produto nunca terá uma circularidade perfeita, já que imperfeições existem no processo de manufatura. Os erros de circularidade podem ocorrer de diversas formas dentro do processo de fabricação devido a desgaste de ferramenta, lubrificação inadequada, ação incorreta de corte, defeitos em componentes da máquina, vibrações, desalinhamento dos mandris, entre outros.

2.11.6. Desgaste diametral do 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, é apresentada na equação 6.

Segundo Marinescu et al. (2004), rebolos que apresentam relação “G” alta produzem mais e desgastam-se menos, ou seja, são mais eficientes, dessa forma, essa relação apresenta uma conotação econômica, estando relacionada com o custo do rebolo em muitas operações.

O desgaste do rebolo durante a retificação tem consequência nos seguintes aspectos do processo: erro no tamanho final da peça e na profundidade de corte, aumento das forças características do processo, aumento ou decréscimo da rugosidade, mudança no número de arestas de corte efetivas do rebolo, influência de dressagem do rebolo ocasionando perdas na superfície da ferramenta abrasiva, desgaste da ferramenta de dressagem, tempo gasto desnecessariamente, dentre outras (MARINESCU et al., 2013)

2.11.7. Emissão Acústica – EA

Segundo Malkin (2008), a Emissão Acústica (EA) é definida como uma onda elástica transiente gerada por uma rápida dissipação de energia de uma fonte localizada no material, quando submetido a um estado de tensão.

Na maioria dos casos, a emissão acústica está ligada à interação dos grãos abrasivos e a superfície do material. Dessa forma, Wang et al. (2001), afirma que esta variável está intimamente ligada com as condições superficiais da ferramenta abrasiva e da peça que está sendo usinada.

A emissão acústica tornou-se uma excelente fonte de monitoramento pois a grande maioria dos materiais emitem sons a 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 (WANG et al., 2001).

Na retificação, a emissão acústica é a energia resultante da interação entre o grão abrasivo e a peça, assim podendo também representar a variação de tensão que se propaga por

meio da estrutura do material (KARPUSCHEWISKI et al., 2001). A emissão acústica (AE) tem sua finalidade no processo de retificação para fins de compreensão de fenômenos como atrito, formação de cavaco, quebra do ligante/grão e fase de transição termomecânica (BABEL et al., 2013).

Segundo Martins et al. (2014), a emissão acústica é um método indireto comumente utilizado devido ao fato de não necessitar interromper o processo de usinagem para a aquisição de seus sinais, sendo também empregado no monitoramento do desgaste do rebolo.

A utilização de sensores vem crescendo nas últimas décadas na aquisição de sinais. Nos diversos processos de usinagem, o monitoramento da emissão acústica vem se tornando comum, e uma grande variedade de sensores vem acompanhando esse com o propósito de monitoramento em diversas aplicações na indústria. Esses sensores reúnem características importantes tais como: baixo custo, fácil montagem, resistência a influências externas, e ainda capazes de monitorar peças em rotação (MARINESCU et al., 2006).

2.11.8. Análise da microestrutura – Microscopia Óptica

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

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

2.11.9. 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).

Os principais efeitos causados pelos danos térmicos são a baixa qualidade superficial e a produtividade. O alto calor gerado na zona de corte durante o processo de retificação promove

o aumento drástico da temperatura, que podem alterar a superfície da peça usinada e ocorrer o aparecimento de trincas, queimas e amolecimento superficial (MALKIN e GUO, 2007).

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.

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.

No processo de retificação a geração de calor na zona de contato entre o rebolo e a peça, eleva a temperatura da peça durante a retirada de material. Essa alta temperatura seguida por um resfriamento rápido provocado pelo fluido de corte induz a deformação plástica na superfície e sub superfície da peça, alterando a característica da microdureza do material (KUMAR et al., 2011).

3. MATERIAL E MÉTODOS

Nesta seção serão apresentados os equipamentos e materiais que foram utilizados na 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, câmpus de Bauru - SP.

3.1. Equipamentos e materiais utilizados.

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”, representada na Figura 3.1. Foram utilizados dois programas CNC; um para a usinagem dos corpos de prova e outro para a impressão do rebolo desgastado.

Figura 3.1. Retificadora Sulmecânica.

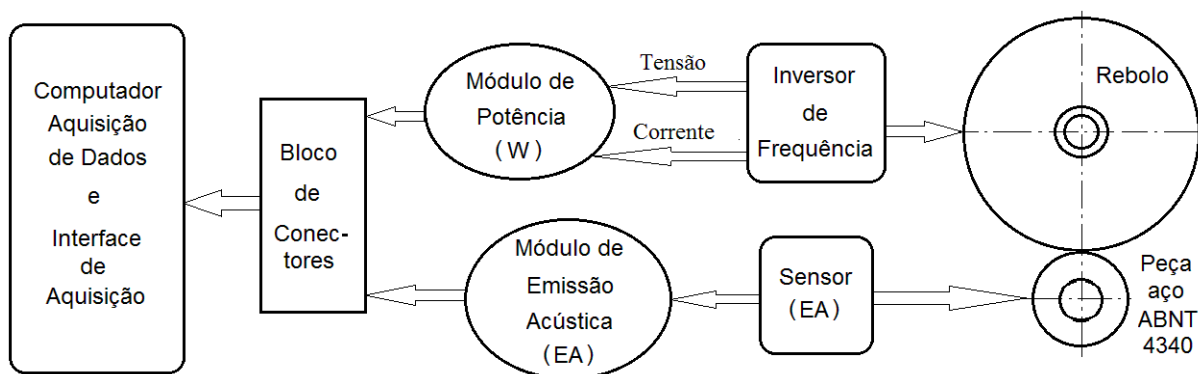


Painel de controle
numérico
computadorizado (CNC)

3.1.1 Equipamentos para monitoramento e análise

Para o monitoramento do processo de retificação, foi utilizado um sistema para aquisição de dados em tempo real, que consiste em um microcomputador equipado com uma placa de aquisição de dados gerenciada por uma aplicação desenvolvida na plataforma do LabView®, versão 7.1, fabricante National Instruments®. A placa de aquisição coleta instantaneamente os sinais de tensão elétrica (V) do motor, o qual rotaciona o rebolo através de um inversor de frequência, os quais são posteriormente tratados pela aplicação do LabView®. Ainda foi utilizado um modulador (ou circuito condicionador) de sinais para que não cheguem saturados ou atenuados na referida placa. A Figura 3.2 mostra esquematicamente o banco de ensaios para a aquisição dos dados.

Figura 3.2. Configuração dos Equipamentos – Aquisição de dados.



Os sensores utilizados para aquisição de dados de emissão acústica, foram devidamente posicionados no cabeçote móvel sobre a mesa da máquina retificadora próximo ao contraponto e em sua extremidade com a peça, melhorando a aquisição das informações acústicas ocorridas durante o processo. Os sensores do tipo piezelétrico de alta sensibilidade da marca SENSIS® foram ligados a um módulo de processamento de EA, modelo DM42 do fabricante SENSIS® que possui duas opções de aquisição de sinal puro ou RMS. Dados estes foram convertidos mediante a utilização de uma placa de dados A/D e LabView® 7.1.

3.1.2 Rebolo

Para o processo de retificação o rebolo utilizado foi um rebolo com abrasivo convencional de óxido de alumínio branco, indicado para a retificação de aços endurecidos,

fabricado pela empresa NORTON®, com 355,6 *mm* de diâmetro externo, 127 mm de diâmetro interno, 25,4 mm de largura. A nomenclatura específica do rebolo é: 38 AA 150 L 6 V, rotação máxima 1.775 rpm, estrutura 6, ligante vitrificado, dureza média, tamanho de grão de 150 *mesh*.

3.1.3 Sistema de refrigeração convencional

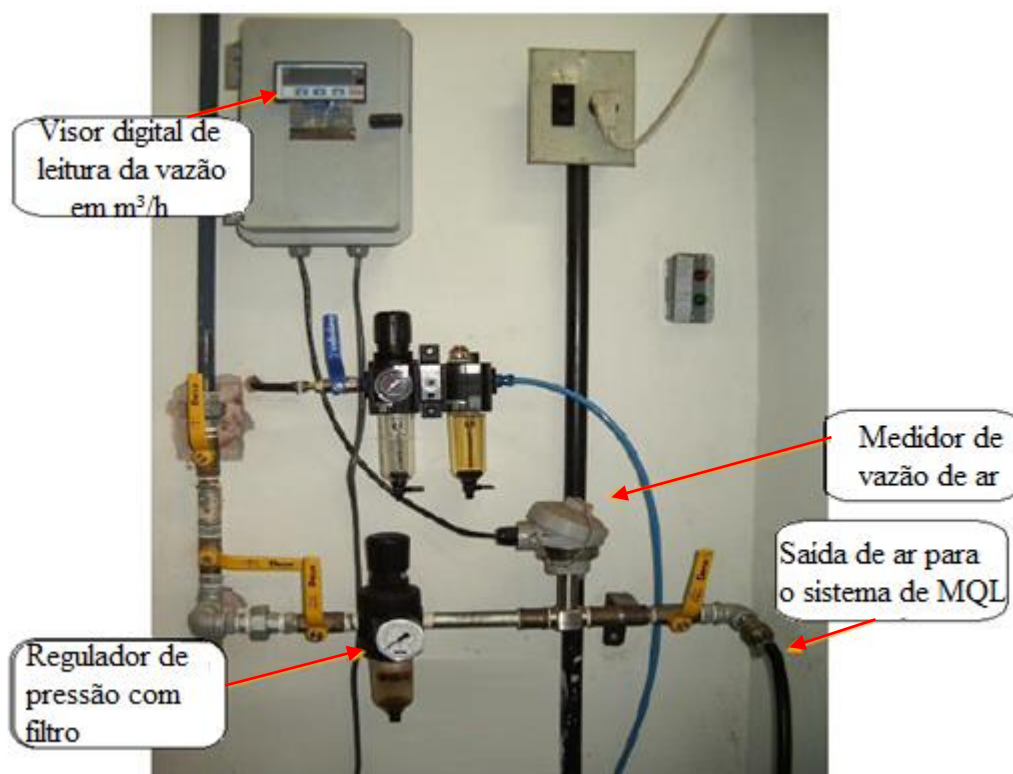
O sistema de refrigeração convencional utilizado no presente trabalho é similar aos utilizados pela maioria das empresas do setor metal mecânico que utilizam os processos de usinagem por abrasão. Trata-se de um reservatório de fluido, uma bomba de sucção, mangueiras de condução de fluido e bocal aplicador. O fluido de corte utilizado foi uma emulsão em água com 3 % de óleo solúvel semissintético QUIMATIC ME-1, a pressão do fluido de corte convencional: $2,9 \times 10^5$ Pa e a vazão do fluido de corte convencional: 17 l/min - $2,83 \times 10^{-4}$ m³/s. Este fluido já é composto de uma fórmula concentrada de agentes emulsionantes e de lubrificação, com aditivos anticorrosivos, bactericidas e antiespumantes, que garantem o melhor balanceamento em refrigeração e lubrificação para os óleos solúveis com ele formulados, nas operações de corte de metais.

3.1.4 Sistema de lubrificação - mínima quantidade de lubrificação – MQL

No sistema de lubrificação MQL o fluxo de ar foi regulado à pressão constante de 0,7 MPa, sendo que o volume de ar e óleo foi regulado de forma separada por meio de um registro tipo agulha com vazão de 150 ml/h conforme definido para esta Tese. O fluido de corte utilizado foi o Biocut 9000 do fabricante ITW Chemical Products Ltda que possui base vegetal biodegradável além de conter antioxidantes como aditivos para um melhor desempenho no processo.

A medição da vazão de ar comprimido e o controle de velocidade requerida foram feitas com a utilização de um medidor de vazão e um regulador de pressão com filtro, os quais são mostrados na Figura 3.3. O medidor de vazão foi conectado a uma rede de ar comprimido, fornecendo a leitura direta da vazão em m³/h.

Figura 3.3. Sistema de ar comprimido para o MQL



3.1.5 Sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo

O sistema de limpeza do rebolo foi utilizado de forma a atuar em paralelo ao sistema de MQL, contudo, o controle e ajuste são feitos de forma independente utilizando-se compressores distintos com a finalidade de não intervir nos parâmetros. Ambos possuem uma mesma fonte de alimentação que se origina da rede de ar comprimido. O ângulo de incidência de 30° do jato de ar comprimido foi a condição que obteve maior eficiência na limpeza do rebolo (OLIVEIRA et al., 2012), assim, a posição do bocal foi definida após o ponto de usinagem, com ângulo de incidência adotado de 30°. Os detalhes do bocal como o formato, suas dimensões, a fixação e o posicionamento, são apresentados nas Figuras 3.4, 3.5 e 3.6, respectivamente.

Figura 3.4. Bocal de Limpeza – a) Posicionador, b) Desenho técnico.

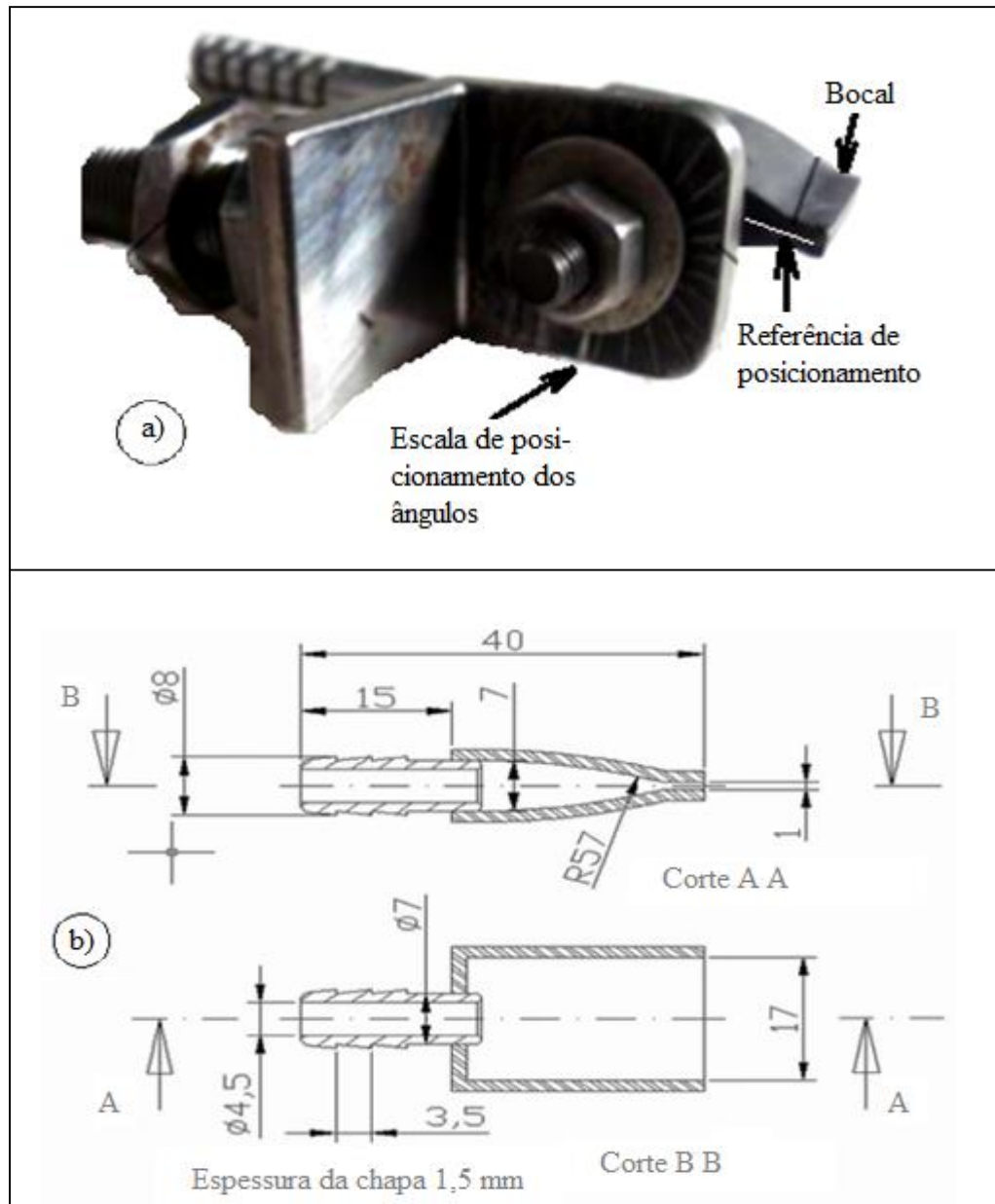


Figura 3.5. Sistema de fixação e posicionamento do bocal de limpeza.

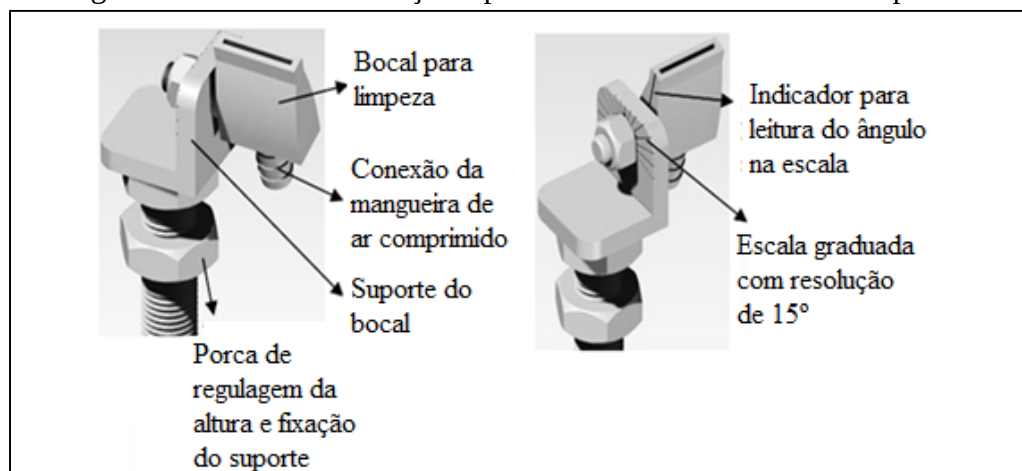
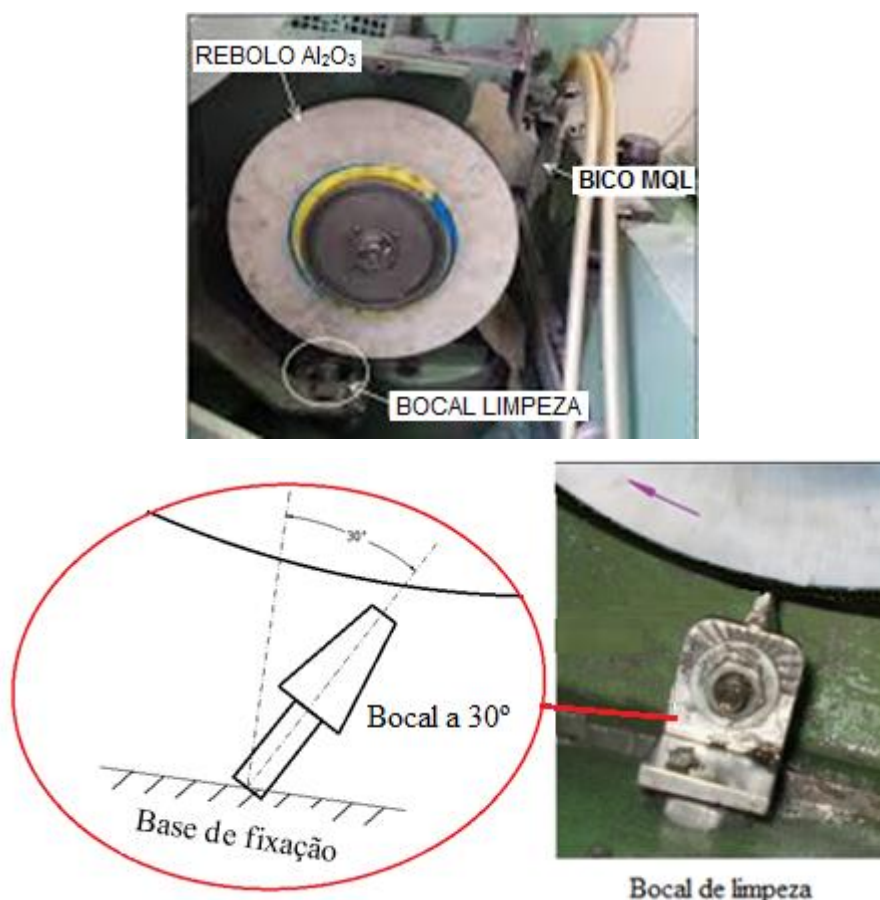


Figura 3.6. Fixação do bocal de limpeza na retificadora a 30° em relação a sua base de fixação.



3.1.6 Sistema de refrigeração do ar comprimido de limpeza e ar frio

A partir dos ensaios preliminares pode-se observar que o equipamento tubo de vórtice dispunha da capacidade de se obter valores de temperatura do ar de saída do sistema de limpeza de até -18°C , porém, isso não era mantido ao decorrer dos ensaios. Após testes variados com o equipamento concluiu-se que a menor temperatura confiável para os ensaios seria -15°C . Dessa forma, utilizou-se essa temperatura como a última condição de ensaio e, portanto, as outras temperaturas utilizadas foram -10°C , -5°C , 0°C e ambiente. Vale salientar que o sistema de limpeza com ar frio foi ajustado a cada teste para que as vazões e pressões fossem mantidas constantes, já que o intuito da pesquisa é analisar os diferentes resultados de usinagem ao se diminuir a temperatura da limpeza somente. Outro desafio encontrado foi a retirada da umidade do ar utilizado para alimentar o tubo de vórtice. Como o sistema atua em temperaturas

extremamente baixas, a água presente no ar comprimido poderia congelar a saída do bocal, alterando a direção do jato de ar da limpeza e, dessa forma influenciando em um parâmetro que deveria ser mantido inalterado. Portanto, utilizou-se um secador de ar comprimido acoplado ao sistema de alimentação, o qual desenvolveu papel indispensável ao funcionamento do vórtice. Na realização dos experimentos com o sistema de limpeza com ar frio, foi definida uma pressão constante de 0,5 bar aproximadamente.

O tubo de vórtice utilizado é da marca Emuge Franken, e apresenta característica com capacidade de abaixar a temperatura do ar para até -46°C . A fim de retirar a umidade contida no ar comprimido, este passou por um secador de ar da marca Metalplan modelo TITAN-A 40 PLUS, isso porque as temperaturas de trabalho foram mais baixas do que a temperatura de fusão da água.

3.2. Parâmetros e condições para os ensaios

Nesta seção, serão apresentados os parâmetros que foram definidos durante os ensaios preliminares com o objetivo de atingir resultados satisfatórios no processo de retificação, e que se mantiveram constantes no decorrer dos ensaios definitivos. A seguir, são apresentados estes parâmetros:

A Tabela 3.1 expõe os parâmetros e os respectivos valores que apresentaram as melhores condições durante a usinagem.

Tabela 3.1. Condições e parâmetros utilizados em todos os ensaios de retificação.

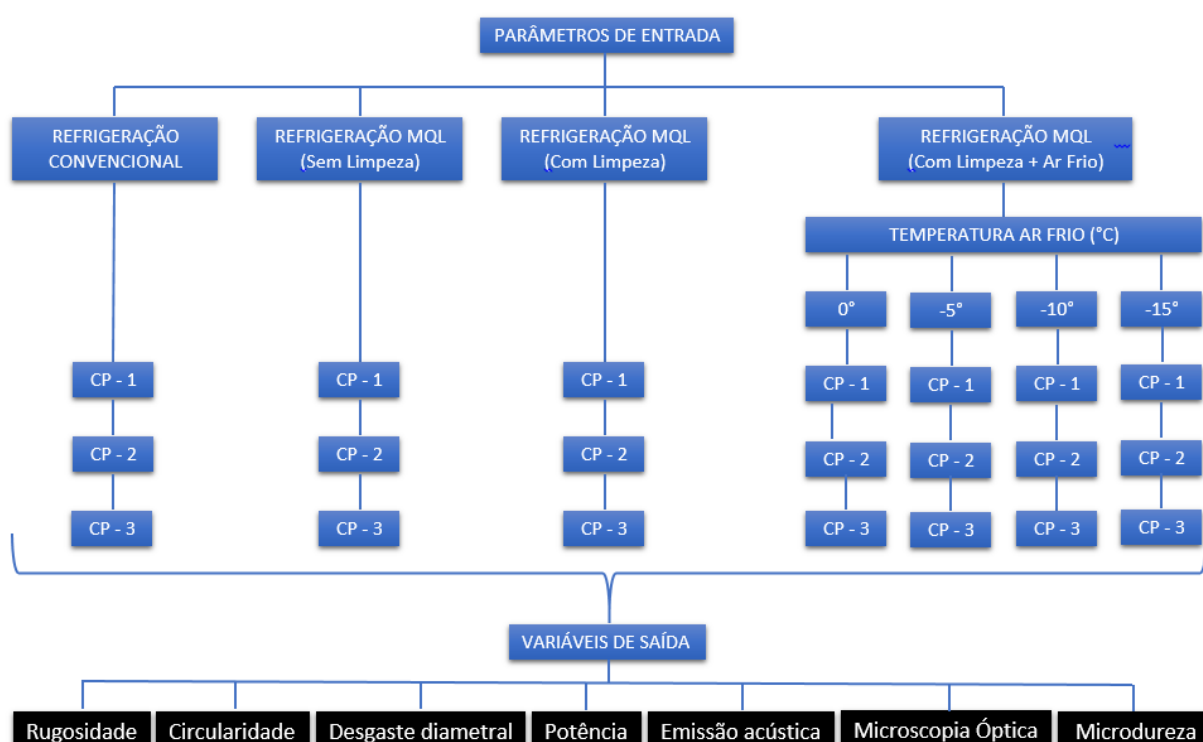
Descrição	Parâmetro
- Processo de retificação	Cilindrica Externa de Mergulho
- Rebolo	Óxido de alumínio branco
- Avanço Radial (v_f)	0,5 mm/min
- Velocidade do rebolo (v_s)	30 m/s
- Rotação da peça (ω_w)	163 rpm
- Rotação do rebolo (n_s)	1775 rpm
- Penetração do rebolo na peça (a)	0,1 mm
- Largura de retificação (b)	4,5 mm
- Dressador	Conglomerado de diamante – dimensões de 15 mm x 8 mm x 10 mm
- Profundidade de dressagem (a_d)	252 μ m – 63 passes de 4 μ m cada, em um único sentido.
- Velocidade de dressagem (v_d)	740 mm/min
- Material do corpo de prova	Aço ABNT 4340 (Temperado e revenido) (54 ± 2) HRC $\approx$ (697 ± 23) HV, é composto de aproximadamente 0,38% de C (carbono), 96% Fe (ferro), 0,2% Si (silício), 1,3% Ni (níquel), 0,8% Cr (cromo), 0,04% S (enxofre), 0,7% Mn (manganês), 0,25% Mo (molibdênio) e 0,035% P (fósforo)
- Dimensões do corpo de prova	58 mm de diâmetro externo, 29,3 mm de diâmetro interno e 4,5 mm de espessura
- Quantidade de peças para os ensaios	21 peças
- Tempo de Spark out (t_s)	3,68 s
- Fluido de corte para a técnica convencional (Quimatic ME-1)	Óleo semissintético, base solúvel mineral à concentração 2,5 %
- Fluido de corte para a técnica MQL (Accu-Lube LB 1000)	Integral 100 % vegetal, biodegradável
- Vazão do fluido de corte convencional	17 l/min
- Vazão de saída do fluido no bocal de MQL	150 ml/h
- Pressão média do fluido de corte convencional	1,3 bar
- Pressão média do ar comprimido no MQL	0,7 bar

Para os parâmetros variáveis no processo, foram utilizadas as seguintes condições de usinagem: retificação com refrigeração convencional, retificação com sistema de lubrificar-refrigeração MQL sem sistema de limpeza do rebolo, retificação com MQL com limpeza à temperatura ambiente, assim como a última situação descrita, porém com temperatura da saída

da limpeza à 0°C, -5°C, -10°C e -15°C. A Figura 3.7 representa o fluxograma de execução dos ensaios.

Ao total foram realizados 21 ensaios. Sendo que a cada 4 ensaios foram utilizados métodos diferentes. Tais métodos são decorrentes da utilização do fluido de corte convencional, MQL, MQL associado ao sistema auxiliar para limpeza, MQL associado ao sistema auxiliar para limpeza com ar frio utilizando 4 diferentes temperaturas. Cada uma das 7 condições, havia um ensaio e duas repetições totalizando 21 ensaios.

Figura 3.7. Matriz dos ensaios realizados.



A programação CNC da retificadora foi definida para que o processo de retificação se repetisse 21 vezes, de modo que pudesse ser mensurado o desgaste diametral do rebolo, pois com menor quantidade de material removido o sistema de medição não afere com total confiabilidade estatística. Além disso, pode-se atribuir analogamente que o fato de haver 21 repetições, a situação é correspondente à realização de 21 peças, e dessa forma, se a última peça (analisada) está em um padrão aceitável, logo todas as peças anteriormente usinadas também estariam em excelentes condições.

3.3. Caracterização do corpo de prova após o processo de retificação

Após o processo de retificação, as amostras foram submetidas às análises de: rugosidade, desvios de circularidade, avaliação do desgaste diametral do rebolo, análise da microestrutura através da metalografia e microscopia óptica e avaliação da microdureza.

A seguir serão apresentados os detalhes desta etapa.

3.3.1 Preparação das amostras para análise de metalografia e microdureza

Após a realização de todos os ensaios, uma de três peças (para cada condição) foi escolhida para a análise metalográfica e de microdureza. Ambos os ensaios de microscopia óptica e de microdureza, foram realizadas no Laboratório de Materiais da Faculdade de Engenharia de Bauru. Para análise da superfície, o corpo de prova foi cortado numa máquina de corte metalográfica.

Com o objetivo de não causar danos térmicos aos corpos de prova, o processo de corte destas peças foi efetuado vagarosamente e com fluido refrigerante. Após a realização do corte, foi realizado o embutimento das amostras em baquelite. Logo em seguida, foi efetuado o lixamento da amostra embutida em baquelite, com o auxílio de uma lixadeira manual, assim a peça passou pela seguinte sequência de lixas: número 80, 120, 220, 320, 400, 500, 600, 1000, 1200 e 1500. Posteriormente, o polimento foi realizado por meio de máquina politriz metalográfica com a utilização de alumina de granulometria 1 μm .

Em relação ao ataque químico, as amostras foram atacadas quimicamente com Nital 1%, uma solução de ácido nítrico (1%v) e álcool etílico P.A. para análise. O ataque possibilitou a análise microestrutural do material por meio da micrografia, realizada através do microscópio óptico.

3.3.1.1 Microscopia óptica

Com o objetivo de observar se houve ou não alterações microestruturais no material dos corpos de prova mediante as diferentes condições, a técnica de microscopia óptica foi realizada. Para tal, foi utilizado o microscópio óptico, dotado de câmera e software para captura das imagens das amostras, com resolução de 500x. Também é importante apresentar que o microscópio era dotado de software para o ajuste de foco, assim dando maior qualidade à

imagem capturada. Dessa forma, com a realização da metalografia das peças retificadas sob diferentes condições, pôde-se observar a ocorrência de possíveis fenômenos, tais como: danos térmicos, retêmpera e região de perda de dureza.

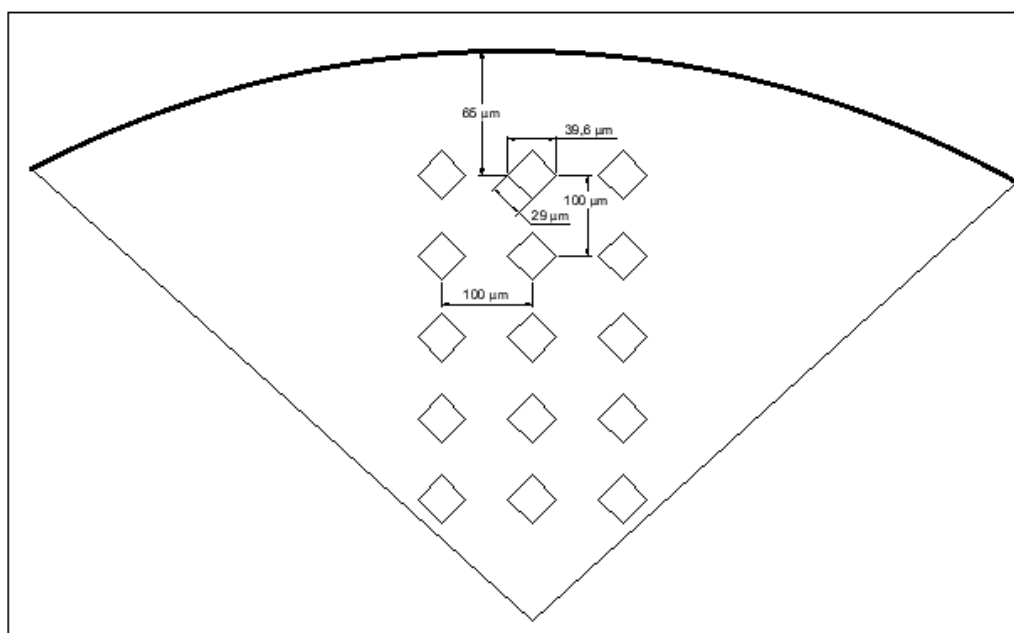
3.3.2 Medição da microdureza

Para a realização do ensaio de microdureza, o equipamento utilizado foi o Microdurômetro Vickers, marca Mitutoyo modelo H-200. Quanto à escala utilizada, a análise de microdureza foi realizada na escala Vickers.

De acordo com a norma ASTM E140, o valor da carga adequada para a análise e medição da indentação realizada na amostra, acontece no momento em que atinge uma impressão no formato de losango regular, cujas diagonais possam ser medidas. A carga solicitada para este projeto foi de 200 g, onde se obtém melhor visualização da indentação e uma maior quantidade de amostras dentro da região possivelmente afetada termicamente no corpo de prova.

Para cada peça analisada, realizaram-se três linhas de indentação, onde cada série contempla cinco medições de microdureza. As indentações foram realizadas a partir da superfície retificada em direção ao centro. A referência das dimensões padrão para realização da indentação é fundamentada na norma ASTM E384, onde o posicionamento das impressões é o valor da maior diagonal multiplicada por dois e meio, conforme ilustrado na Figura 3.8.

Figura 3.8. Esquema para medição da microdureza conforme ASTM E384.

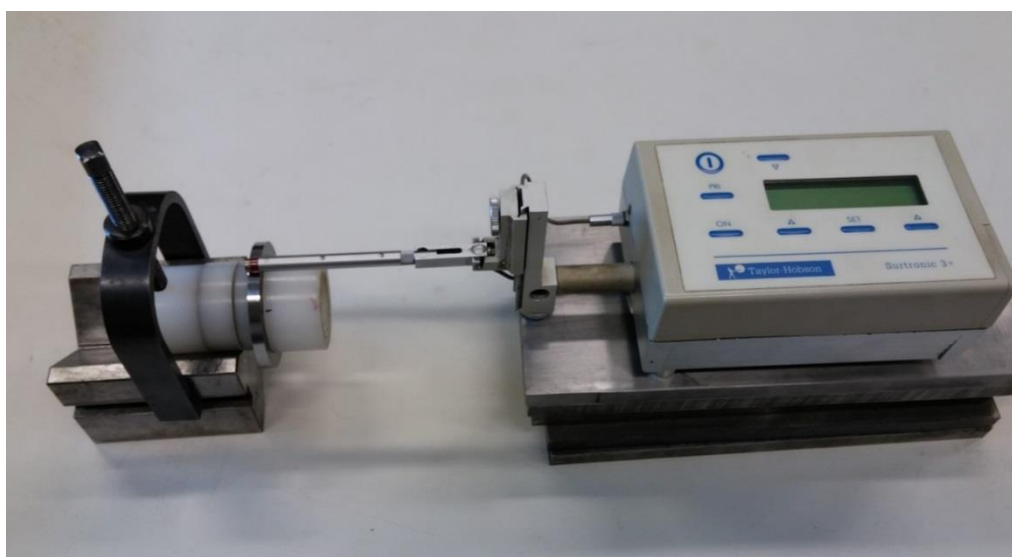


Deve-se ressaltar que as medições em diferentes profundidades permitem identificar o comportamento estrutural, verificando assim se ocorreu queima superficial, perda de dureza ou ainda regiões afetadas termicamente.

3.3.3. Medição da Rugosidade

A realização das medições da rugosidade média dos corpos de prova (R_a) foi feita através de um rugosímetro modelo Surtronic3+, da marca Taylor Hobson, mostrado pela Figura 3.9.

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



Com a medição sendo efetuada na direção perpendicular à superfície de retificação, o rugosímetro foi ajustado para realizar a medição com um comprimento de medição (cut-off) igual a 0,25 mm e percurso total (l_n) igual a 1,25 mm. Dessa forma, foram realizadas três medições em cada corpo de prova, sendo uma realizada a cada 120°.

3.3.4. Medição da Circularidade

Os valores de desvios de circularidade foram obtidos através da utilização de um medidor de circularidade, modelo Talyrond 31C, marca Taylor Hobson, onde um apalpador com uma ponta de rubi, efetua o contato com a peça para a obtenção dos desvios de

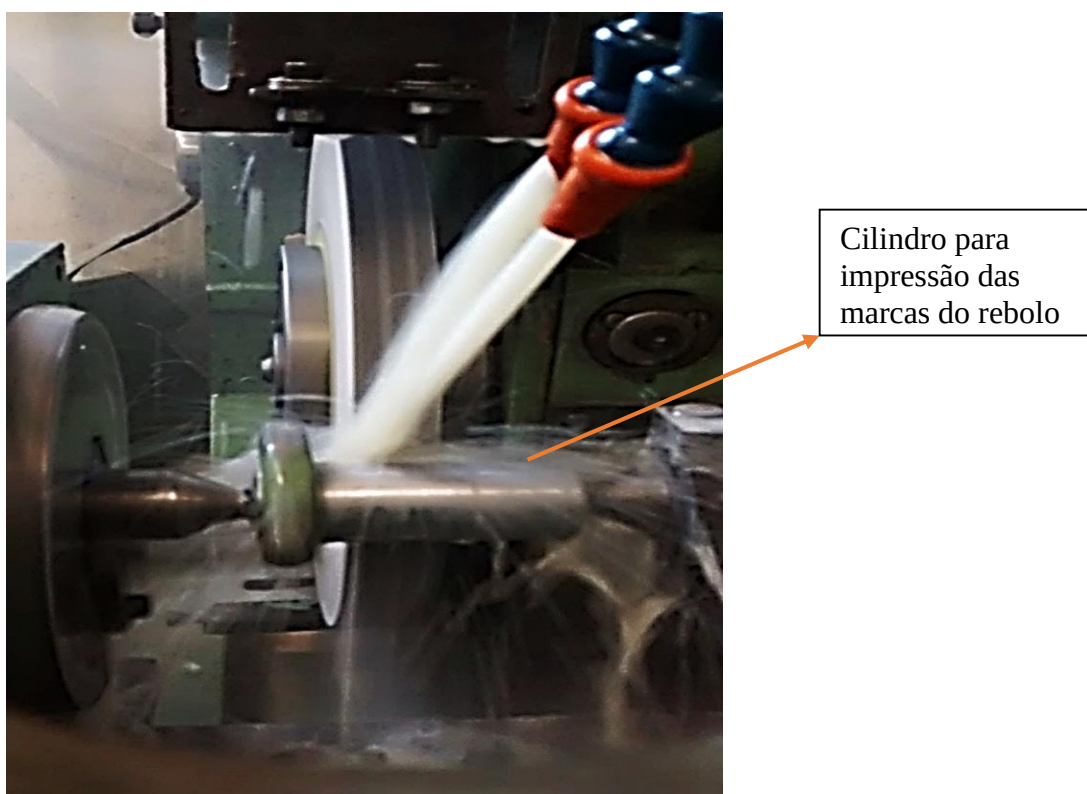
circularidade. O circularímetro tem alimentação por meio de um sistema de ar comprimido, o que garante que os movimentos sejam extremamente precisos.

Em relação aos resultados referentes aos desvios ou erros de circularidade, estes representam as médias aritméticas dos três ensaios com as mesmas condições de usinagem, sendo que para corpo de prova foram realizadas 3 medições (uma a cada 120°).

3.3.5. Determinação do desgaste do rebolo.

Para cada dois corpos de prova do ensaio (ABNT 4340), foi realizada uma impressão do desgaste (marcação do degrau criado no rebolo) em outro corpo de prova de (aço ABNT 1020), conforme a Figura 3.10 apresenta. Isso foi possível uma vez que não houve utilização da largura total do rebolo (bs) de 25,4 mm, pois a largura utilizada na retificação (largura do corpo de prova) foi de 8 mm, ou seja, dois ensaios por dressagem do rebolo.

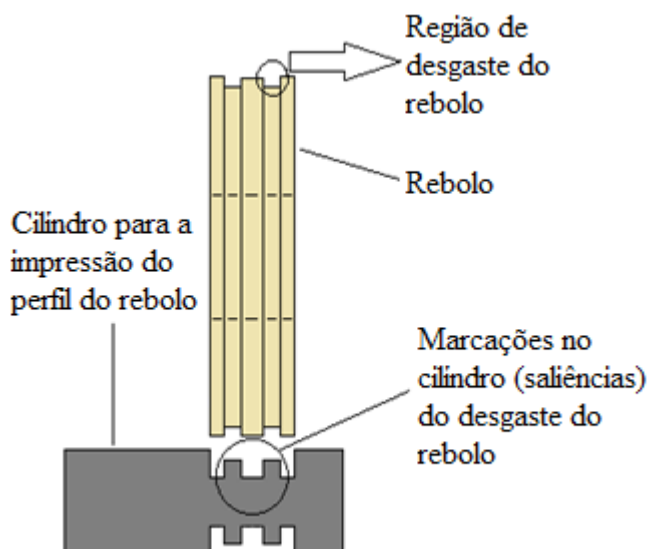
Figura 3.10. Impressão do desgaste do rebolo no corpo de prova



Dessa forma, o desgaste diametral do rebolo foi realizado por meio do método de impressão do perfil do rebolo desgastado em um corpo devidamente preparado para o

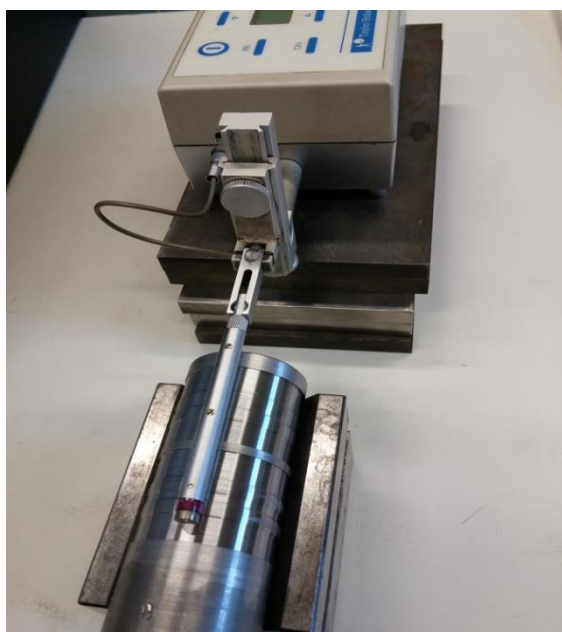
determinado fim, no qual os desníveis existentes entre as regiões desgastadas e não desgastadas do rebolo foram repassados ao corpo retificado, de acordo com a Figura 3.11.

Figura 3.11. Esquema ilustrativo do processo de impressão do perfil do rebolo.



O instrumento utilizado na medição do desgaste do rebolo foi também o rugosímetro Surtronic3+, da marca Taylor Hobson. O cilindro de impressão do desgaste do rebolo era suportado por um prisma em V. A Figura 3.12 ilustra o instrumento.

Figura 3.12. Instrumento utilizado na medição de desgaste diametral do rebolo através da altura dos degraus do corpo de prova.

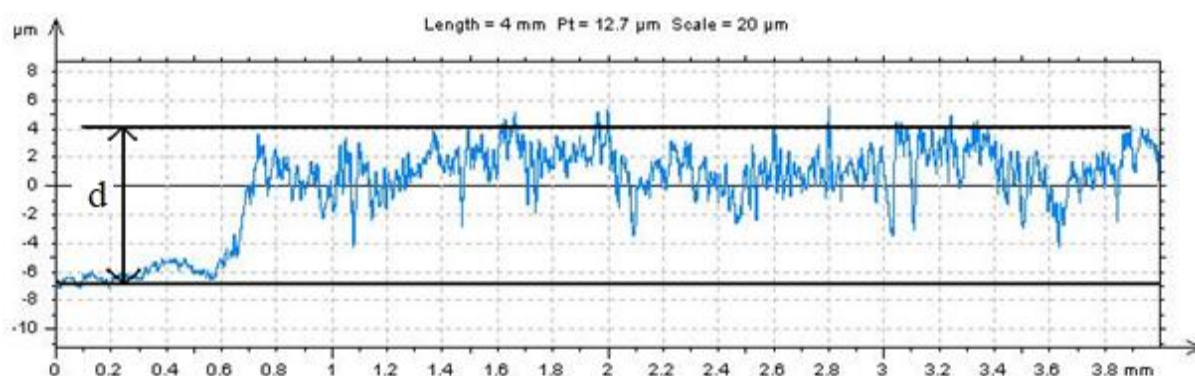


Após as medições do perfil do desgaste do cilindro, obteve-se a média do desgaste do rebolo, dessa forma, foi possível verificar o desgaste radial do rebolo e, conseqüentemente, o desgaste diametral.

Para cada marca apresentada no cilindro de impressão, foram realizadas medições de desgaste para três diferentes pontos, ou seja, um distante a 120° do outro. Após as medições do desgaste para os três pontos do mesmo ensaio, a média e os desvios padrão do desgaste do rebolo foram extraídos para o determinado ensaio.

Dessa forma, com o perfil obtido no programa de medição, foi possível verificar o desgaste radial do rebolo e, por conseguinte, o desgaste diametral, através da leitura da dimensão “d” na Figura 3.13.

Figura 3.13. Esquema da medição do desgaste do rebolo.



3.3.6. Análise de potência de retificação e emissão acústica

Processamento dos sinais consiste no tratamento dos sinais analógicos, por exemplo, amplificação, filtragem, conversão de analógico para digital, processamento do sinal digital.

Além da medição, um sistema de aquisição de dados deve garantir a confiabilidade dos dados coletados, assegurando que o desempenho das medições seja próximo aos dados em análise. Para tanto, além dos sensores e transdutores, um sistema de aquisição de dados deve possuir elementos que realize a análise e autentiquem os dados coletados. As variáveis propostas para este estudo como potência consumida e emissão acústica, serão decompostas pela placa de aquisição de dados A/D e o LabView® 7.1.

3.3.6.1. Análise de potência elétrica

A potência elétrica do motor expressa em watts teve seus valores obtidos através da Equação (15) e sua calibração está disposta na Tabela 3.2 e na Figura 3.14.

$$P_w = 360.V + 3,5 [Watts] \quad (15)$$

Onde: P_w = Potência Elétrica Consumida (Watts)

V = Tensão lida no terminal BNC do módulo (Volts)

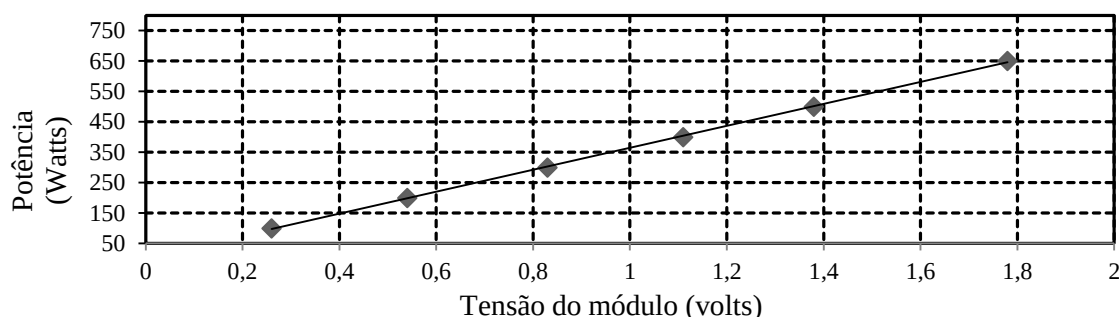
Os dados de potência alcançados foram apresentados em volts, conversão desta unidade por meio de uma equação que foi obtida através de um módulo Curvopower3, confeccionado no próprio laboratório de aquisição de dados e processamento de sinais – LADAPS – FE - Unesp, que funciona com um sensor de corrente de efeito Hall e um sensor de tensão (piezelétrico), cujos sinais são multiplicados por um circuito integrado e filtrado, obtendo-se um sinal analógico correspondente à potência de entrada no motor. Esse módulo foi utilizado para transformar os valores de corrente elétrica e tensão provenientes do motor, tornando assim os sinais de tensão compatíveis para serem enviados a uma placa de aquisição de dados, seguidos processados pelo software. Existem duas possibilidades para monitoramento, uma delas é pela corrente elétrica do motor e a outra é pelo produto entre a tensão e o sinal da corrente, o qual resultará na potência elétrica consumida pelo motor. (NAKAI et al., 2015).

Tabela 3.2. Valores obtidos para calibração.

P_w (W)	Tensão (V) – (Terminal BNC do módulo)
100	0,26
200	0,54
300	0,83
400	1,11
500	1,38
650	1,78

Com os valores da Tabela 3.2, construiu-se o gráfico da potência em função da tensão de saída do módulo como demonstra a Figura 3.14.

Figura 3.14. Potência elétrica versus tensão elétrica do módulo.



A potência elétrica consumida faz relação com as forças empregadas durante o processo de retificação. Segundo Sun et al. (2015), a dimensão das forças de retificação está relacionada com os parâmetros de retificação e com a propriedade do material. O desempenho significativo da retificação como a velocidade linear do rebolo, a velocidade da peça e a profundidade de retificação influenciam significativamente na potência consumida pela máquina.

3.3.6.2. Análise da emissão acústica

Os módulos de aquisição de emissão acústica (DM42) e de potência média foram ligados a um bloco de conectores BNC, modelo BNC 2110, que, por sua vez, foi conectado a uma placa de aquisição. O cabo do módulo foi conectado na placa de aquisição, cuja escolha foi em função dos objetivos de se obter o sinal RMS de EA como entrada para os modelos neurais juntamente com o sinal de potência de corte. Dependendo da posição do sensor de emissão acústica, que neste caso é do tipo passivo, o sinal coletado pelo módulo pode entrar em saturação, ou seja, acima de um determinado valor não é possível mais realizar a leitura do valor real do sinal. Para que isto não ocorra, o módulo possui uma configuração do ganho de entrada, ajustando-o para que o sinal não sature em uma determinada posição do sensor. Neste caso, o melhor valor para o ganho de entrada foi de 10 vezes.

A unidade de tratamento calcula o valor RMS do sinal em Volts e o envia para a placa A/D. Os parâmetros foram constantes para a unidade de tratamento de sinais durante todos os ensaios, a Tabela 3.3 demonstra as configurações estabelecidas.

Tabela 3.3. Configurações do módulo de EA.

Tipo de Sensor	Passivo
Sinal de Saída	RMS
Ganho de Sinal	1
Redutor de Ruído	10
Ganho de Entrada	10
Constante de Tempo	1 ms

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nessa seção serão apresentados os resultados e a discussão dos parâmetros de saída resultantes da retificação cilíndrica do aço ABNT 4340 utilizando o rebolo de Óxido de Alumínio variando as condições de lubrificação, assim como a temperatura do sistema de limpeza com ar comprimido. Portanto, os parâmetros finais analisados para que sejam feitas conclusões acerca dos mesmos são: rugosidade média, desvios de circularidade, desgaste diametral do rebolo, potência, emissão acústica, microscopia e microdureza.

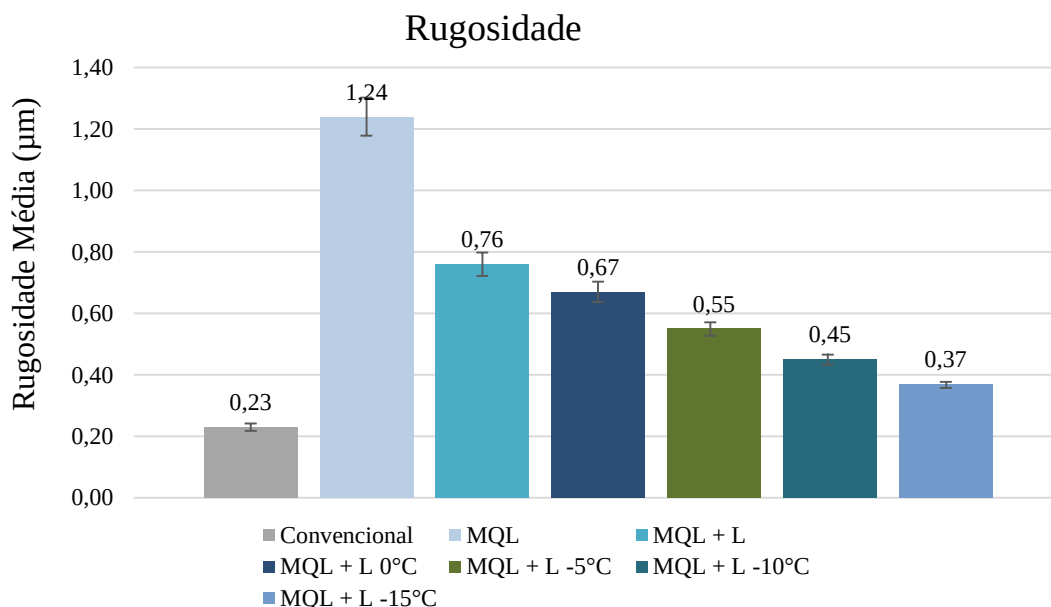
4.1. Rugosidade

Segundo Malkin (1989), a geração de rugosidade na retificação ocorre devido aos 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.

Para se analisar o processo de retificação um dos parâmetros fundamentais a serem avaliados é a rugosidade superficial da peça. De acordo com Silva et al. (2013), a rugosidade influencia diretamente a resistência de um componente mecânico ao ser submetido a ciclos de fadiga. Entre os fatores que influenciam a rugosidade estão: o coeficiente de atrito, tipo de abrasivo, lubrificação, condutividade térmica, resistência mecânica da peça, entre outros. Segundo Rowe (2014), o processo de retificação é utilizado para se obter tolerâncias restritas, especificadas em micrômetros e dessa forma, a rugosidade está diretamente relacionada às especificações do abrasivo, à qualidade da retificadora e ao avanço empregado. Observa-se que todos os parâmetros que os autores associam à rugosidade foram mantidos constantes durante os ensaios, exceto os métodos de lubrificação. Dessa forma, os diferentes resultados são influenciados apenas por esse parâmetro.

A Figura 4.1 associa a média das rugosidades a cada condição de lubrificação, assim como as diferentes temperaturas utilizadas no sistema de limpeza. Foram realizados três ensaios para cada condição e para cada corpo de prova foram obtidos três valores de rugosidade, o resultado apresentado é a média aritmética de todas as medições para as condições estudadas.

Figura 4.1. Rugosidade média aritmética por condição de lubrificação/refrigeração.



Algumas condições encontram-se abreviadas. Sendo elas “MQL + L” significando técnica de lubrificação/refrigeração MQL associada a limpeza da superfície de corte do rebolo com ar comprimido à temperatura ambiente, “MQL + L 0°C” significando técnica de lubrificação/refrigeração MQL associada a limpeza da superfície de corte do rebolo com ar comprimido à temperatura de 0°C e assim, sucessivamente.

Segundo Puerto et al. (2013), a retificação, processo de usinagem por abrasão, é recomendada para operações de acabamento em materiais de alta dureza e cujo objetivo caracteriza-se por gerar baixa rugosidade na peça concebida (R_a 0,1µm até 2,0µm). Segundo a Norma ABNT NBR 8404 (1984), essa tolerância está compreendida entre as classes N3 (R_a 0,1 µm) e N7 (R_a 1,6 µm). Considerando os valores apresentados e analisando a Figura 4.1, pode-se notar que para todas as diferentes condições de lubrificação/refrigeração e as variações na temperatura da limpeza, os valores de rugosidade obtidos nos ensaios se enquadram dentro dos padrões de qualidade exigidos pelo processo descrito.

Analisando a figura 4.1 pode-se constatar que o método convencional de lubrificação/refrigeração apresenta o menor valor de rugosidade média. Isso pode ser explicado segundo Silva et al. (2013), o qual defende que os valores de rugosidade diminuem devido a melhor eficiência na lubrificação e refrigeração dos abrasivos na interface entre peça e rebolo.

Após isso tem-se os métodos otimizados de lubrificação/refrigeração. Sendo eles: MQL sem limpeza, MQL com limpeza a temperatura ambiente, MQL com limpeza a 0 °C , MQL com limpeza a -5 °C, MQL com limpeza a -10 °C e MQL com limpeza a -15 °C. Dentre as condições

citadas anteriormente, a primeira apresenta uma rugosidade média de 1,24 μm , sendo o pior valor de rugosidade devido à ocorrência do fenômeno de empastamento dos poros do rebolo. Segundo Oliveira et al. (2012), a utilização da técnica de MQL na retificação não remove totalmente os cavacos produzidos, esses ficam alojados nos poros do rebolo. Os cavacos empastados no rebolo causam deformações elásticas e plásticas na peça, assim com o aumento do atrito entre a peça e ferramenta, o que causa o aumento da potência de corte e da rugosidade.

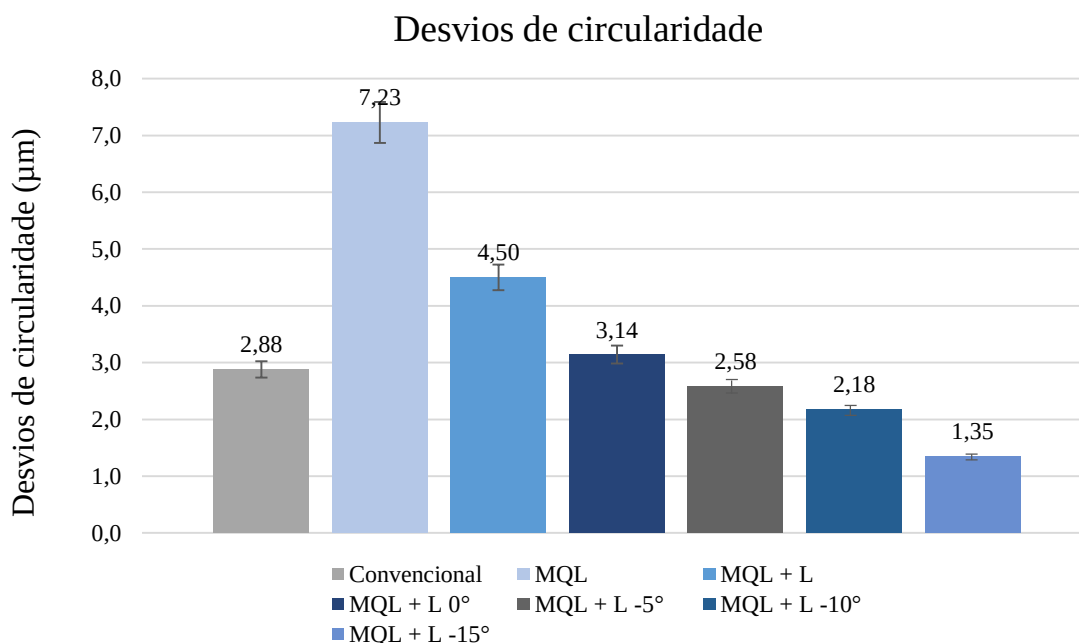
Sendo assim, utilizou-se um sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo com o intuito de diminuir a ocorrência do fenômeno descrito anteriormente. Dessa forma, os valores de rugosidade obtidos com a utilização desse sistema foram melhores se comparados aos valores da condição de MQL sem limpeza. Ruzzi et al. (2016), afirmam que a não utilização do sistema de limpeza colabora para o entupimento dos poros do rebolo, e consequentemente, pioram-se os resultados de rugosidade superficial da peça. Utilizando-se de ar comprimido do sistema de limpeza possibilita a remoção do empastamento (cavacos + óleo MQL), colaborando para que a ferramenta de corte tenha sua vida útil prolongada.

De acordo com o objetivo dessa pesquisa, a análise dos efeitos da diminuição da temperatura do ar comprimido do sistema de limpeza revelou que as trocas de calor entre o ar frio da limpeza e o rebolo influenciaram positivamente o processo de usinagem, uma vez que o rebolo pode diminuir sua temperatura de operação e consequentemente conduzir uma menor quantidade de calor à zona de corte e à peça, possibilitando uma melhor dissipação térmica na usinagem. Ainda assim, ao se utilizar a refrigeração do ar comprimido da limpeza observou-se que menores temperaturas de trabalho geraram menores valores de rugosidade.

4.2. Circularidade

A Figura 4.2 apresenta os valores de desvios de circularidade para as condições de lubrificação estudadas.

Figura 4.2. Valores de desvios de circularidade.



A partir da Figura 4.2 pode-se observar que a condição de lubrificação convencional apresenta um baixo valor de desvios de circularidade se comparada a situação de lubrificação MQL sem limpeza. Isso ocorre, pois, o fluido refrigerante utilizado apresenta grande quantidade de água em sua composição, cerca de 95%. Dessa forma, segundo Yoshimura et al. (2005), a adição de água no fluido utilizado melhora significativamente a dissipação de energia térmica, que é provida pela evaporação da água durante o processo de usinagem. Já a técnica de MQL, não apresenta boa refrigeração pois conta apenas com ar comprimido para dissipar o calor gerado no processo, dessa forma observou-se pelos resultados de circularidade e rugosidade que a técnica de MQL sem limpeza não possui um bom efeito refrigerante. Segundo Silva et al. (2013), a precisão do processo piora conforme a temperatura do mesmo aumenta (dilatação da peça), assim erros geométricos tendem a ocorrer quando o método de lubrificação não apresenta boa refrigeração. Porém, ao se adicionar o sistema de limpeza ao método de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL), os desvios de circularidade diminuíram consideravelmente, demonstrando que o método de limpeza com ar comprimido influencia significativamente a melhora dos resultados de rugosidade e circularidade. A barreira de ar provida pelo bocal de limpeza atua expulsando a borra (mistura de cavaco e óleo) da porosidade do rebolo, aumentando a capacidade de corte do rebolo, diminuindo as forças de corte e, portanto, o atrito gerado na formação do cavaco, permitindo uma melhor penetração de fluido de corte e possibilitando uma melhor remoção de cavacos

produzidos durante o processo (OLIVEIRA et al., 2012). Apesar do ar não ser um bom condutor térmico, devido à alta incidência de ar frio sobre a superfície de corte do rebolo, acaba dissipando uma quantidade de calor por convecção, melhorando o controle de temperatura do processo e dessa forma contribuindo para melhora da rugosidade e circularidade.

Semelhante ao que Ruzzi et al. (2016), obteve em sua pesquisa, a utilização do sistema de limpeza da superfície de corte apresentou resultados extremamente positivos no que diz respeito a rugosidade e desvios de circularidade das peças concebidas. Ainda segundo os mesmos autores, isso se deve a minimização do atrito, gerando menos calor na zona de corte e, consequentemente, reduzindo as distorções térmicas na peça.

Por fim, ao se diminuir a temperatura do ar comprimido da limpeza através de um tubo de vórtice, como ocorreu nesta pesquisa, os desvios de circularidade reduzem significativamente em relação ao valor obtido para limpeza da superfície de corte à temperatura ambiente. Nas condições em que o ar comprimido é injetado na superfície de corte do rebolo a -5°C , -10°C e -15°C , os valores dos desvios de circularidade foram menores do que os obtidos pelo método convencional. Isso mostra a importância de se diminuir a temperatura do ar comprimido da limpeza e, consequentemente, diminuir a temperatura de trabalho do rebolo. A dissipação de calor na ferramenta de corte abrasiva proveniente dessa metodologia, associada a limpeza do rebolo, são fundamentais para que haja menos dilatações térmicas da peça e, portanto, menores distorções de forma da superfície usinada.

4.3. Desgaste diametral do rebolo

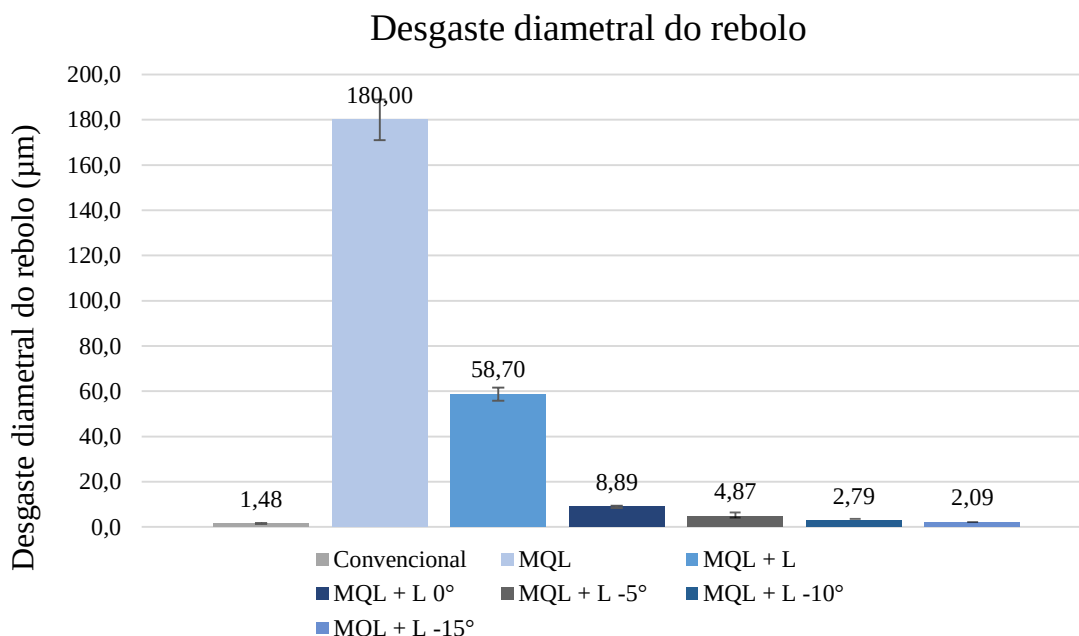
Segundo Wang et al. (2016), o desgaste da ferramenta abrasiva ocorre principalmente pelo atrito entre os grãos abrasivos e a peça.

Dessa forma, segundo Silva et al. (2005), lubrificantes são utilizados para diminuir o atrito na zona de corte e possibilitar um maior tempo de aderência entre os grãos abrasivos e o ligante. Isso previne eficientemente o desprendimento dos grãos abrasivos colaborando para a diminuição do desgaste do rebolo.

Sendo assim, é de fundamental importância a análise do desgaste do rebolo na busca por melhorias nos métodos de lubrificação. Isso se deve ao fato de que em uma produção seriada quanto menores forem as interrupções para afiação de ferramentas de corte, mais eficiente será o processo. Além disso, a redução do diâmetro do rebolo gera uma perda de precisão no processo.

A Figura 4.3 representa as médias dos desgastes diametrais do rebolo em suas respectivas condições de lubrificação.

Figura 4.3. Desgaste diametral do rebolo.



A partir da Figura 4.3 pode-se observar que através da condição de lubrificação convencional obteve-se o menor valor de desgaste diametral do rebolo. Já a segunda condição apresenta o maior valor de desgaste diametral do rebolo. Segundo Rowe (2014), o desgaste do rebolo tende a ser mais acentuado quando a técnica de MQL é utilizada na retificação. Em todas as condições em que a técnica de MQL foi adotada, os desgastes do rebolo foram maiores que os da refrigeração convencional, como pode ser observado na Figura 4.4. Isso ocorre segundo Oliveira et al. (2012), ao fenômeno de empastamento, o qual aumenta a energia específica do processo e o atrito entre ferramenta e peça, resultando em um desgaste mais acentuado. O cavaco alojado na porosidade da superfície de corte do rebolo, prejudica a capacidade de corte da ferramenta, tornando o processo mais intenso, o que provoca um aumento da temperatura de usinagem e de solicitação mecânica da ferramenta. Visto que com a utilização da técnica de MQL o fenômeno de empastamento é agravado, o desgaste do rebolo ao utilizá-la é agravado.

Visando uma diminuição do desgaste da ferramenta abrasiva, utiliza-se o sistema de limpeza com ar comprimido. Nessa condição o desgaste é amenizado em comparação à condição em que o sistema não é adotado. O ar comprimido proveniente do sistema de limpeza apresentou eficiência na remoção de grande parte dos cavacos alojados na superfície de corte

do rebolo, com isso o desgaste do rebolo foi reduzido. Esse resultado pode ser confirmado pelo trabalho de Ruzzi et al. (2016), no qual o autor ainda cita que a diferença entre os valores de desgaste diametral do rebolo com e sem a utilização do sistema de limpeza foi maior do que para a rugosidade da superfície e desvios de circularidade. Em outras palavras, a limpeza da superfície de corte do rebolo é ainda mais significativa para reduzir o desgaste da ferramenta abrasiva do que para reduzir a rugosidade e circularidade, resultado este semelhante ao que se obteve para o presente trabalho.

Sendo assim, as condições de lubrificação associadas a limpeza fria da superfície de corte do rebolo apresentaram a mesma lógica dos demais resultados discutidos anteriormente como rugosidade e circularidade, nos quais a utilização do sistema de limpeza impacta positivamente no processo, ocorrendo uma melhora ainda mais significativa quando se refrigera o ar comprimido da limpeza como pode ser notado nas 4 condições de aplicação do ar a baixa temperatura na limpeza. Sendo assim, foram obtidos valores muito próximos aos do método de lubrificação convencional ao utilizar a técnica de lubrificação MQL associado a limpeza com ar frio da superfície de corte do rebolo a -10°C e -15°C .

De acordo com Silva et al. (2012), o desgaste do rebolo ocorre devido ao atrito entre o rebolo e a peça. Com isso uma eficiente lubrificação da zona de corte reduz o desgaste do rebolo, por diminuir as forças de corte. Para Malkin (1989) apud Belentani (2014), o desgaste do rebolo além de ser ocasionado pela solicitação mecânica é também influenciado pela temperatura do processo, assim para diminuí-lo não é necessário apenas que o fluido lubrifique a zona de contato como também dissipe o calor gerado no processo.

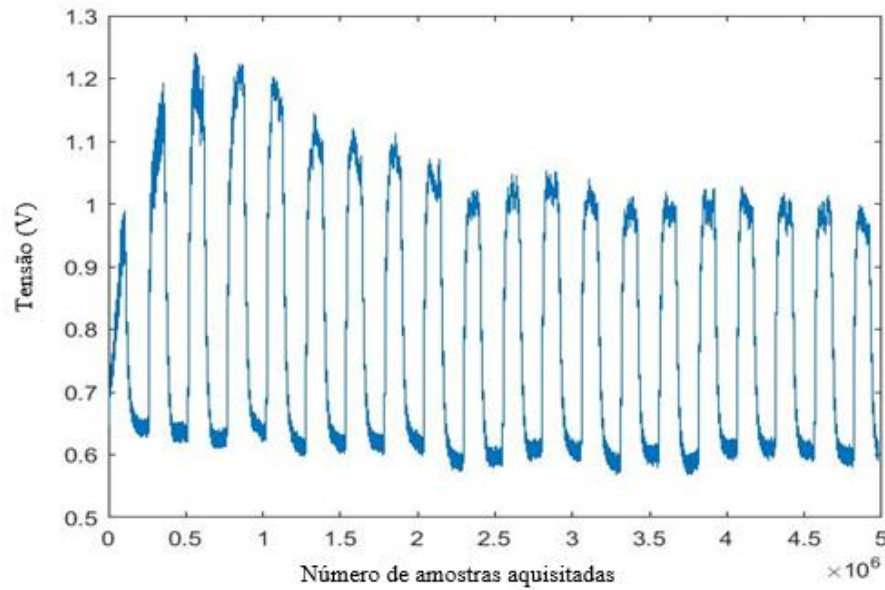
Portanto, a refrigeração do ar comprimido da limpeza é de fundamental importância, uma vez que auxilia nas trocas de calor entre o ar frio e o rebolo, possibilitando que o processo de usinagem gere menos calor e consequentemente desgaste em menor intensidade os grãos do rebolo.

4.4. Potência elétrica consumida

No que diz respeito a análise da potência de corte, emissão acústica e vibração na usinagem, utilizou-se um equipamento de aquisição de dados para captar os sinais dos sensores e processá-los conforme descrito no tópico 3.1.1. Cada ensaio teve os respectivos sinais captados a partir dos quais pode-se gerar gráficos utilizando o *software* MatLAB®

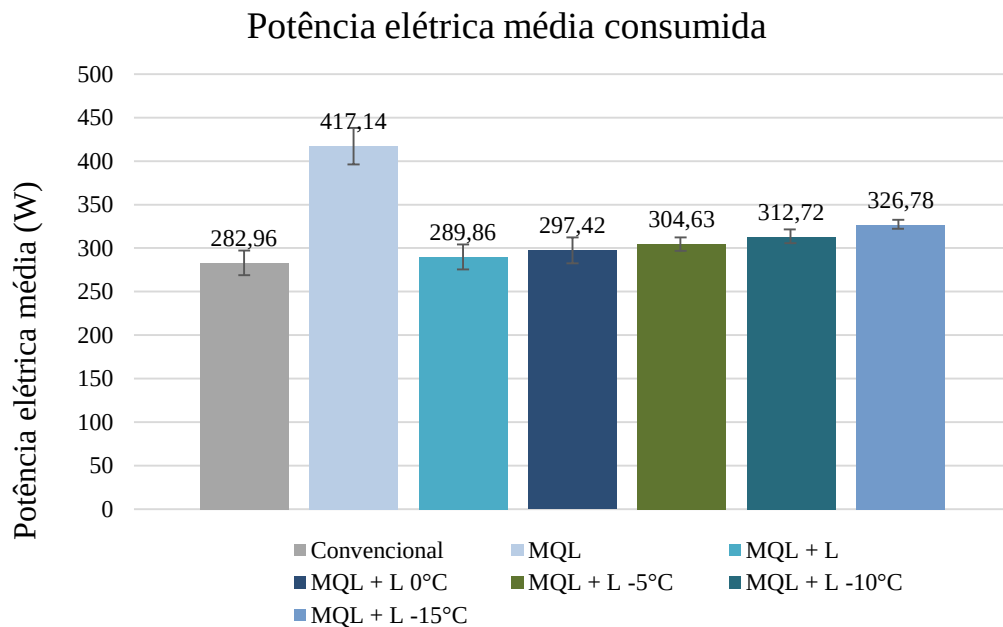
A Figura 4.4 apresenta um exemplo de gráfico gerado.

Figura 4.4. Gráfico gerado pelo software MatLab



Pode-se notar a oscilação da potência consumida durante o ensaio. Esses picos e vales são uma consequência do spark-out definido no processo. A média aritmética das potências para cada condição de usinagem é apresentada na Figura 4.5.

Figura 4.5. Potência por condição de lubrificação.



De acordo com a Figura 4.5 é possível constatar que a condição de lubrificação com menor potência consumida foi a convencional, porém, em relação aos processos com limpeza do rebolo a variação é mínima.

Entre os valores apresentados na Figura 4.5, a condição em que é empregada a técnica de MQL associada a limpeza da superfície de corte do rebolo apresentou valores praticamente iguais à condição de lubrificação convencional. Isso se deve segundo Marinescu et al. (2007), à capacidade do óleo no sistema de MQL em penetrar a barreira de ar comprimido que gira em torno do rebolo, com isso as gotículas de fluido criam uma fina camada que lubrifica eficientemente o processo. Essa eficiente lubrificação associada ao sistema de limpeza resulta em baixas potências de retificação.

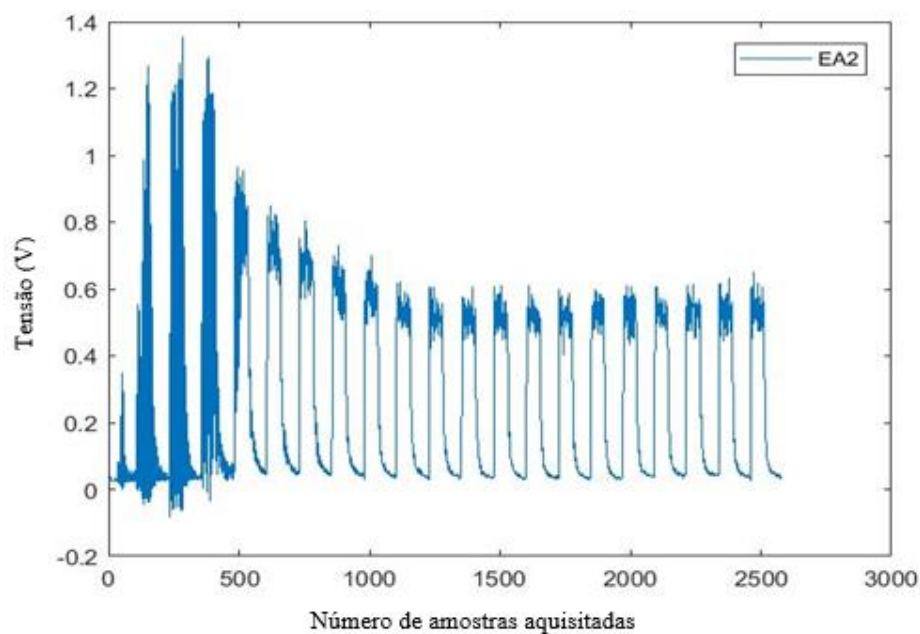
Como citado anteriormente Oliveira et al. (2012), afirmam que conforme aumenta o número de cavacos alojados nos poros do rebolo aumenta-se o atrito no processo e com isso a potência consumida eleva-se. Isso explica os maiores valores de potência consumida quando se aplicava a técnica de MQL em vez da refrigeração convencional. Apesar da técnica de MQL apresentar eficiência em penetrar na zona de contato e lubrificá-la, não remove totalmente os cavacos e com isso ocorre o entupimento do rebolo.

Segundo Belentani et al. (2014), os esforços de corte são maiores quando as temperaturas em que o processo de usinagem ocorre são inferiores. De acordo com o autor, isso se deve ao não amolecimento do material, o que provoca um aumento da potência consumida pela máquina para realizar a operação de usinagem. Pode-se associar tal fundamentação ao aumento da potência consumida pela máquina ao utilizar as condições de lubrificação associadas à limpeza da superfície de corte do rebolo com ar comprimido refrigerado. Nessas condições, a temperatura na usinagem é amenizada pelas trocas de calor entre o ar comprimido e o rebolo e consequentemente, o amolecimento do material usinado ocorre em menor proporção.

4.5. Emissão acústica

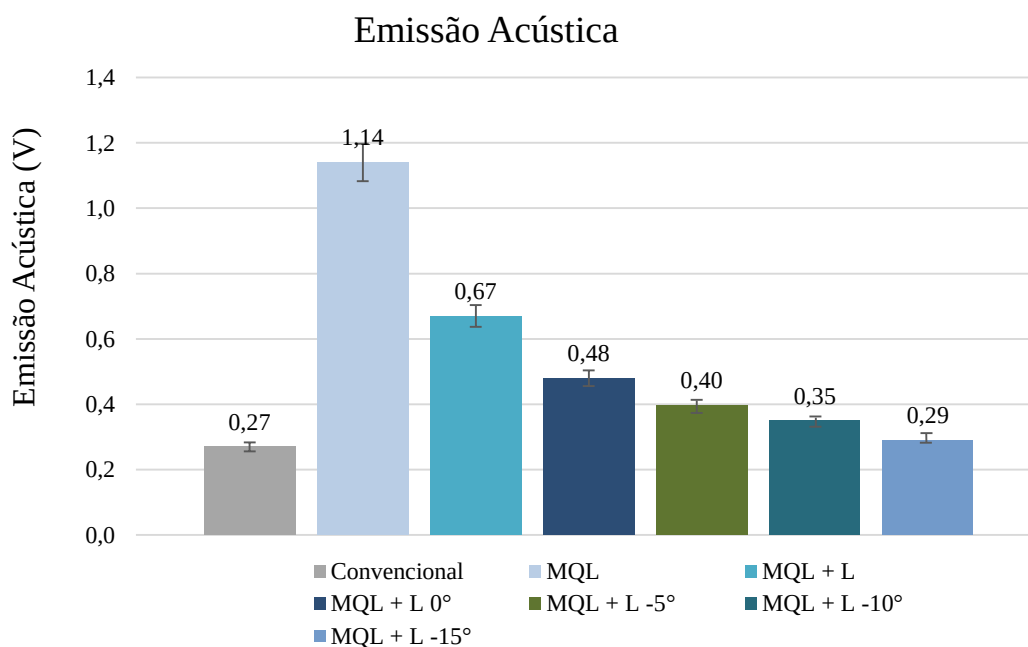
Segundo Oliveira et al. (2012), a emissão acústica é proveniente de fenômenos que ocorrem no processo de retificação. Sendo eles: atrito, deformações plásticas e elásticas, cisalhamento na formação de cavaco. Ela é comumente utilizada para análise do processo de retificação devido ao fato de não interferir no mesmo para que ocorra a captação de seus sinais. A Figura 4.6 apresenta os resultados de emissão acústica.

Figura 4.6. Resultados de emissão acústica.



A Figura 4.7 apresenta a média aritmética dos valores de emissão acústica para cada uma das condições estudadas.

Figura 4.7. Emissão Acústica por condições de lubrificação.



Analisando-se a Figura 4.7, é evidente o fato da emissão acústica atingir valores mais altos com a utilização de MQL como condição de lubrificação em relação a convencional.

Isso se deve ao fenômeno de empastamento, o qual entope os poros do rebolo e consequentemente diminui a capacidade de corte da ferramenta, colaborando para que haja apenas atrito entre a peça e o rebolo, sem que haja geração de cavaco.

Em relação as condições em que a limpeza refrigerada da superfície de corte do rebolo foi empregada, foram obtidos valores de emissão acústica próximos aos da condição de lubrirrefrigeração convencional. Isso se deve à remoção das impurezas e cavacos aderidos ao rebolo assim como a diminuição da temperatura de usinagem. Ainda assim, o fluido de corte do sistema de MQL é capaz de penetrar precisamente na zona de corte, possibilitando uma lubrificação extremamente eficiente, a qual favorece no sentido em que diminui os esforços de corte da operação de usinagem. Tais fatores colaboram para que a ferramenta de corte mantenha sua afiação e, portanto, opere em condições mais favoráveis, minimizando a emissão de ruídos.

4.6. Microscopia óptica

Rowe (2014), afirma que a integridade superficial de um componente mecânico é importantíssima. Segundo o autor, uma superfície que sofreu endurecimento superficial pode trincar, assim como uma superfície dútil pode desgastar mais. Dessa forma, o autor conclui que analisar a microestrutura da amostra após o ensaio é de fundamental relevância com o intuito de detectar se o método de lubrirrefrigeração estudado possui a capacidade de refrigerar eficientemente o processo, evitando mudanças micro estruturais na peça.

Portanto, foi realizada a microscopia óptica para todas as condições de lubrirrefrigeração estudadas. Optou-se pelo corpo de prova que apresentou os menores desvios padrão dos valores de circularidade e rugosidade, em relação à média aritmética das três peças de uma dada condição.

Na Figura 4.8 estão apresentadas as microscopias ópticas. Em todas essas imagens, é possível observar a microestrutura do aço ABNT 4340 temperado e revenido. Nota-se uma parte mais clara na figura determinada pela martensita e uma mais escura, pelo baquelite. Para o processo de usinagem estudado (retificação), a ocorrência de qualquer dano térmico na superfície usinada seria visível na fronteira entre o aço e o baquelite, já que essa é a área mais externa do corpo de prova e consequentemente a interface na qual houve a maior transferência de calor.

Figura 4.8. Micrografia do aço ABNT 4340 após retificação com as técnicas: a) convencional, b) MQL c) MQL com limpeza, d) MQL com limpeza à temperatura de 0° C, e) MQL com limpeza à temperatura de 5° C, f) MQL com limpeza à temperatura de 10° C, g) MQL com limpeza à temperatura de 15° C.



A Figura 4.8 (a) representa a microestrutura da amostra retificada com o método de lubrificação convencional. Através dela pode-se assegurar que os parâmetros do processo não são severos o suficiente para causar danos a microestrutura da peça na condição de refrigeração convencional, que no caso é a condição mais eficiente de refrigeração, uma vez que a microestrutura observada na Figura 4.8 (a) é a martensita, condizente com microestrutura do material utilizado, o aço ABNT 4340 temperado e revenido. Para a formação da martensita o aço é aquecido acima da temperatura eutetóide (712°C) e em seguida é resfriado até a temperatura ambiente. Posteriormente ele é submetido ao revenimento para o alívio de tensões (CALLISTER, 2007).

As demais figuras apresentadas são as imagens das microestruturas das amostras retificadas com o método de lubrificação MQL sem limpeza, MQL com limpeza a temperatura ambiente, MQL com limpeza refrigerada a 0°C , MQL com limpeza refrigerada a -5°C , MQL com limpeza refrigerada a -10°C e MQL com limpeza refrigerada a -15°C , respectivamente. Comparando essas microestruturas com a microestrutura apresentada na retificação com método convencional observou-se que não houve alterações significativas na microestrutura da superfície ou da sub superfície retificadas devido a variações nas condições de refrigeração e lubrificação.

De acordo com Silva et al. (2013), como não houve mudanças micro estruturais, a quantidade de calor e de deformação plástica aplicadas na peça durante o processo de retificação não foram suficientes para produzir alterações micro estruturais na superfície da mesma.

Segundo Oliveira et al. (2012), quando a temperatura do processo ultrapassa a temperatura de austenitização e em seguida ocorre um rápido resfriamento, ocorre a tempera na superfície do material. Essa pequena camada temperada é vista apenas com o auxílio de um microscópio. Após análise das Figuras 4.8 de (b) a (g), é possível salientar que os métodos de lubrificação testados são extremamente eficientes na refrigeração e lubrificação do processo a fim de evitar danos térmicos a microestrutura do material, ressaltando que não foi observado a retempera superficial (camada branca).

De acordo com Klocke (2009), este fato apresenta-se com significativa relevância para as indústrias, uma vez que a não ocorrência de danos térmicos na peça garante a manutenção de pontos como: qualidade micro estrutural, propriedades mecânicas de projeto e eficácia do processo de usinagem. Ademais, evitam-se perdas de origem econômicas pelo fato de que a retificação é um processo de fabricação de caráter final no ciclo produtivo, significando elevado valor agregado ao componente mecânico nesse estágio de fabricação.

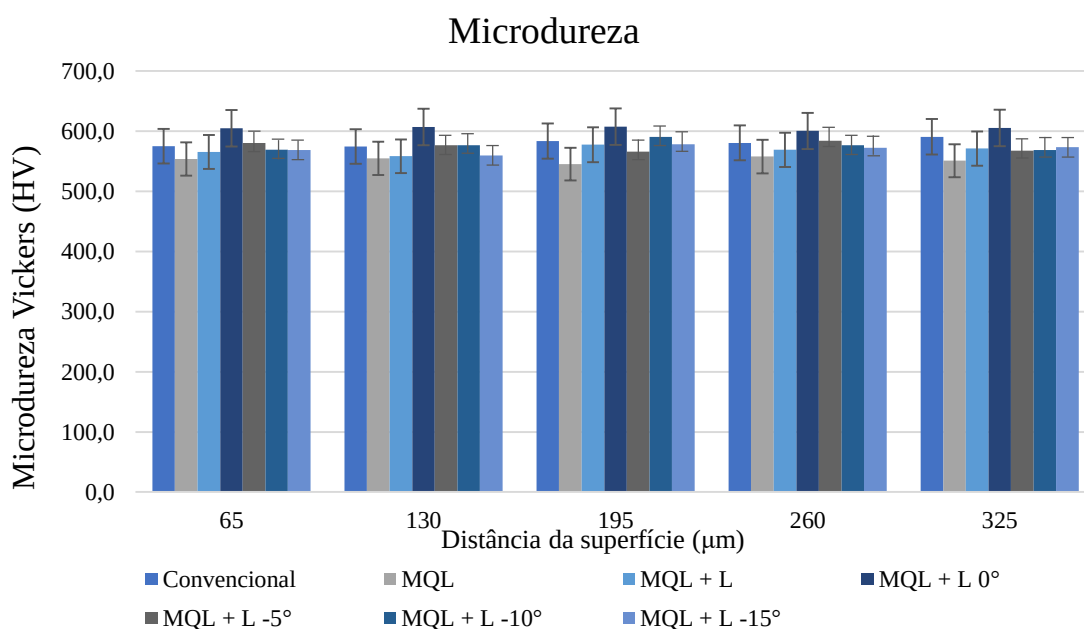
4.7. Microdureza

De acordo com Silva et al. (2013), a análise de microdureza correlaciona-se às imagens das microestruturas das peças, portanto, ela complementa a microscopia óptica, uma vez que identifica possíveis danos térmicos de forma quantitativa, ou seja, verifica a existência de zonas com dureza alterada na superfície retificada.

Na Figura 4.9, são apresentados os resultados da avaliação da microdureza das amostras retificadas. Essa análise foi realizada conforme a norma ASTM E 384-11, onde foram estabelecidos cinco pontos de medições após a superfície retificada, iniciando-se com a profundidade de 65 μm até 325 μm . Repetiu-se o procedimento 3 vezes para cada peça, e a dureza Vickers foi calculada a partir da média dos valores das duas diagonais criadas na peça pelo indentador.

A média aritmética dos valores de microdureza obtidos a partir das três linhas de indentação para as diferentes distâncias da superfície usinada para cada condição de lubrificação-refrigeração analisada.

Figura 4.9. Resultados de microdureza por distância da superfície usinada.



Analisando a Figura 4.9 nota-se que não houve endurecimento superficial nas amostras, isto é, a microdureza não sofreu alterações significativas ao decorrer da análise da superfície retificada para o interior da peça.

Devido a sensibilidade do equipamento de microdureza Vickers, há variações de microdureza entre as peças. Variações essas desprezíveis, uma vez que um contorno de grão pode aumentar o valor de medição, assim como variações em processos anteriores como têmpera e revenimento podem interferir nos resultados obtidos.

Portanto, diante da insuficiência de variações de microdureza para uma mesma amostra conforme a medição avança da superfície para o interior da peça, comprova-se a ausência de mudanças microestruturais nos corpos de prova analisados.

5. CONCLUSÕES

Por meio dos resultados obtidos de retificação do aço ABNT 4340 sob a aplicação de sete diferentes condições de lubrificação, com a utilização de rebolo convencional de óxido de alumínio branco, pode-se concluir que:

Todas as condições de lubrificação apresentaram resultados satisfatórios no que diz respeito às tolerâncias exigidas para rugosidade e circularidade para a operação de retificação. As condições de lubrificação convencional e MQL associada a limpeza refrigerada a -10°C e -15°C apresentaram resultados extremamente semelhantes, mostrando a fundamental importância de se utilizar sistemas auxiliares ao método de MQL. É possível observar que a medida que a temperatura do ar de limpeza é diminuída, os resultados apresentam uma melhora na rugosidade, possivelmente devido a preservação da estrutura do grão abrasivo pela redução da geração de alta temperatura no ponto de contato entre o rebolo e a peça.

Para os resultados de desvio de circularidade, segue o mesmo padrão da rugosidade, onde, reduzindo a geração de calor no ponto de contato entre a peça e o rebolo verifica-se uma melhor circularidade nos resultados.

No tocante ao desgaste do rebolo, a técnica de MQL com limpeza associada com ar comprimido à baixa temperatura, apresentou valores próximos ao da lubrificação convencional, caracterizando uma redução no atrito e consequentemente a redução do esforço de retificação na região de corte. É possível constatar essa redução, analisando os resultados de potência elétrica consumida, onde a semelhança do consumo de potência elétrica da máquina no processo de retificação também se mantém semelhante às técnicas de lubrificação convencional e de MQL com limpeza associada com ar comprimido à baixa temperatura.

Para as aquisições de emissão acústica, os resultados obtidos para os parâmetros de saída seguiram a mesma tendência daqueles apresentados pela rugosidade, circularidade e desgaste diametral do rebolo. Dessa forma, conforme se diminui a temperatura do ar comprimido da limpeza, menor é a emissão acústica adquirida no processo de retificação.

No que se refere a microscopia óptica e microdureza Vickers, foi possível concluir que todas as condições de lubrificação garantiram a eficiência da refrigeração e lubrificação, uma vez que não houve qualquer tipo de queima ou danos térmicos as peças, preservando a dureza do material após o tratamento térmico.

Por fim, conclui-se que as condições testadas utilizando o método de MQL associado a limpeza refrigerada da superfície do rebolo apresentaram valores das variáveis de saída

semelhantes à condição de lubrificação convencional e em alguns casos apresentaram desempenho superior a tal condição.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- 1- Análise de custos da implantação do sistema com fluido de limpeza a baixa temperatura.
- 2- Implantar o tubo de vórtice para baixar a temperatura de limpeza no sistema de MQL em uma linha de produção.
- 3- Realizar testes com outros tipos de rebolo.
- 4- Realizar testes com outros parâmetros de avanço.
- 5- Realizar testes com outros tipos de materiais do corpo de prova.
- 6- Utilizar outras técnicas de análise como difração de raio x, MEV, força atômica entre outros.

REFERÊNCIAS

- AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. S.; LIRANI, J. **Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análise de Dimensões**. 5a. ed. Edgard Blucher Ltda, 1997.
- AGUIAR, P. R.; CATAI, R. E.; BIANCHI, E. C.; FREITAS, R. **Studies on the cooling minimum quantity and conventional cooling at hardened steels in grinding process**. Journal of Brazilian Society of Mechanic Science & Engineering. Vol.29, No.2, pp. 136-141, 2007.
- ALJUWAYHEL NF, NELLIS GF, KLEIN SA. **Parametric and Internal Study of the Vortex Tube Using a CFD Model**. Int J Refrig 28(3):442–450, 2005.
- ALAGUMURTHI, N., PALANIRADJA, K., SOUNDARARAJAN, V. **Heat generation and heat transfer in cylindrical grinding process - a numerical study**, Int J Adv Manuf Technol (2007) 34:474–482.
- ALSAYYED, BASEL & HAMDAN, MOHAMMAD & ALDAJAH, SAUD. **Vortex Tube Impact on Cooling Milling Machining**. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE). 3. 10.1115/IMECE2012-89885. 2012.
- ALVES, M.C.S. **Análise da influência da velocidade de mergulho na retificação de aços endurecidos utilizando refrigeração otimizada**. 2005. 167 f. Tese de Mestrado em Engenharia Industrial – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista.
- ALVES, Manoel Cléber de Sampaio; BIANCHI, Eduardo Carlos; DE AGUIAR, Paulo Roberto. **Influência das técnicas de mínima quantidade de lubrificante, refrigeração otimizada e refrigeração convencional na qualidade de peças produzidas com aços endurecidos no processo de retificação**. Ingeniare. Rev. chil. ing., Arica , v. 18, n. 2, p. 228-234, agosto 2010 .
- ANDERSON, D., WARKENTIN, A., BAUER, R. **Experimental validation of numerical thermal models for dry grinding**. Journal of materials processing technology, 204, p. 269-278. 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 6158: **Sistema de tolerâncias e ajustes**. Rio de Janeiro, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 6405: **Rugosidade das Superfícies**. Rio de Janeiro, 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 8404: **Indicação do estado de superfícies em desenhos técnicos**. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR ISO 2768-2: **Tolerâncias gerais. Parte 2: Tolerâncias geométricas para elementos sem indicação de tolerância individual**. Rio de Janeiro, 2001.

ASTM E140-07. **Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness.** ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.

ASTM E384-11. **Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials.** ASTM International, West Conshohocken, PA.

AYUBI, M.A., MOHAMED, A.B., ESA, A.H. **In-line inspection of roundness using machine vision.** Procedia Technology 15: 808-817. 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.

BALDO, Édimo Dudas. **Redução do ciclo de retificação cilíndrica de mergulho com auxílio da emissão acústica.** 1994, 86 f., Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.

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

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 pg.13, Mar 2001

BELENTANI, R. M., FUNES, H. J., CANARIN, R. C., DINIZ, A. E., HASSUI, A., AGUIAR, P. R., BIANCHI, E. C. **Utilization of Minimum Quantity Lubrication (MQL) with water in CBN grinding of steel,** Materials Research, Vol. 17, pp. 88-96, 2014.

BIANCHI, E. C.; DIAS, A. C. P.; BORTOLOTO, R. G.; JÚNIOR, C. E. S.; SANCHEZ, L. E. A.; JÚNIOR, M. V. **A otimização da agressividade de rebolos pelas condições de usinagem e dressagem.** Revista Máquinas e Metais, nº 364, p. 70-83, 1996.

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

BIANCHI, E. C., DINIZ, A. E., PEREIRA, M. G., SILVA NETO, J. F. DA, AGUIAR, P. R. DE; GUERMANDI, L. G. **Limpeza da superfície de corte de rebolos por um sistema de ar comprimido na retificação cilíndrica externa de mergulho de materiais cerâmicos refrigerados com a técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL).** Cerâmica, São Paulo , v. 58, n. 346, p. 270-274, 2012.

BIGERELLE, M.;HAGEGE, B.;EL MANSORI,M. **Mechanical modeling of micro-scale abrasion in superfinish belt grinding.** Tribology International, Vol. 41, p. 992-1001, 2008.

BRASIL. Ministério de Estado dos Transportes. **Portaria MT nº 204/1997, de 20/05/1997, publicada em 26/05/1997.** Aprova as Instruções Complementares aos Regulamentos dos

Transportes Rodoviários e Ferroviários de Produtos Perigosos(as Instruções foram publicadas, na sua íntegra, no Suplemento ao Diário Oficial da União de n.º 98, de 26.05.1997).

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

CALLISTER, W. D., **Ciência e engenharia de materiais**, 7º ed., LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 2007.

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.

Catálogo da empresa ACRE CONTINENTAL, Disponível em: < Catálogo da empresa ELEMENT SIX, Disponível em: < http://www.e6.com/wps/wcm/connect/e6_content_en/home/materials+and+products/materials+and+products >. Acesso em 15 de agosto de 2014. >. Acesso em 04 de fevereiro de 2019.

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

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

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA, RESOLUÇÃO No 357, de 17 de março de 2005. Publicada no DOU nº 053, de 18 março de 2005, págs. 58-63.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA, RESOLUÇÃO Nº 430/2011 – “Dispõe sobre condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA.” - Data da legislação: 13 de maio de 2011 – Publicação DOU nº 92, de 16 de maio 2011, pág. 89

CONSTITUIÇÃO FEDERAL, Art. 225 (1988).

DANESHI, A.; JANDAGHI, N.; TAWAKOLI, T. **Effect of Dressing on Internal Cylindrical Grinding**. CIRP - International Conference on High Performance Cutting, 37 - 41, 2014.

DEMIRCI, I.; MEZGHANI, S.; MANSORI, N. E. **On Material Removal Regimes for the Shaping of Glass Edges: Force Analysis, Surface Topography and Damage Mechanisms**. Springer Science-Business Media, LLC, 2008.

DE METER, E. C.; HOCKENBERGER, M. J. **The application of tool path compensation for the reduction of clampinginduced geometric errors**. International Journal of Production Research, v. 35, n. 12, p. 3415–3432, 1997.

DIN 69100 SCHLEIFKORPER AUS GEBUNDENEM SCHLEIFMITTEL, 1988.

DIN 69090-1:2011-12, MMS-Bearbeitungstechnologie - Teil 1: Begriffe und, **MQL processing technology** - Part 1: Terms and definitions, 2011-2012

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

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 8º ed. São Paulo. Editora Artliber, 2013.

DUDZINSKI, D., DEVILLEZ, A., MOUFKI, A., LARROUQUÈRE, D., ZERROUKI, V., VIGNEAU, J. **A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy**. International Journal of Machine Tools & Manufacture 44, 439–456, 2004.

FERRARI, C. **Análise comparativa dos métodos MQL, MQL/ÁGUA e convencional na retificação cilíndrica do aço ABNT 52100, com rebolo de óxido de alumínio**. Dissertação de Mestrado – UNESP, Bauru, 2015.

GAO, C.M., BOSSCHAART K.J., ZEEGERS J.C.H., DE WAELE A.T.A.M., **Experimental study on a simple Ranque-Hilsch vortex tube**. Cryogenics Vol 45(3), 173p., 2005.

GRAF, W. **Diamant-Abrichtwerkzeuge**. Informativo da WST, 2008, p. 2-32.

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

GROOVER, Mikel P. **Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes and Systems**. Editora John Wiley & Sons, 4º Edição, 2015.

GUO, C; CHAND, R.H. **Application adaptive ceramic machining**. Abrasives Magazine, p. 8-16, 1998.

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, Out-Dez/2010, p. 127-137.

GUERMANDI, L. G., PEREIRA, M. G., BIANCHI, E. C., AGUIAR, P. R. **A velocidade de Avanço do Rebolo e Suas Consequências na Retificação Cilíndrica Externa de Mergulho de Aços Endurecidos**. Congresso de Iniciação Científica, UNESP, São José do Rio Preto, 2009.

HAMDAN, M. O., A. ALAWAR, E. ELNAJJAR, W. SIDDIQUE, **Experimental Analysis on Vortex Tube Energy Separation Performance**, Journal of Heat and Mass Transfer, DOI 10.1007/s00231-011-0824-6, 2011, 47, pp. 1637–1642

HARIMKAR, S. P.; SAMANT, A. N.; KHANGAR, A. A.; DAHOTRE, N. B. **Prediction of Solidification Microstructures During Laser Dressing of Alumina - Based Grinding Wheel Material**. Journal Physics - 39, p. 1642 - 1649, 2006.

HASSUI, A.; Estudo da vibração durante o corte e centelhamento na retificação cilíndrica de mergulho. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, 172p, 2002.

HASSUI, A., DINIZ, A. E. **Correlating surface roughness and vibration on plunge cylindrical grinding of steel**, International Journal of Machine Tools & Manufacture 43 (2003) 855–862.

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.

HEISEL, U.; LUTZ, D.; WASSMER, R.; WALTER, U. **The Minimum Quantity Lubricant technique and its application in the cutting process**. Machines and Metals Magazine, nº 386, p. 22-38, 1998.

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

IM, S. Y; YU, S. S. Effects of geometric parameters on the separated air flow temperature of a vortex tube for design optimization. Journal Energy 37 (2012) 154-160, 2011.

IRANI, R. A.; BAUER R. J.; WARKENTIN, A. **A review of cutting fluid application in the grinding process**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 45, nº 45, p. 1696-1705, 2005.

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

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

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

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

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

KARPUSCHEWISKI, B. **Sensor for physicalproperties**. In: TÖNSHOFF. H.K.; INASAKI, I. Sensors in Manufacturing vol.1. Wiley-VCH. Cap. 3. p. 123-142, 2001.

KLOCKE, F.; BECK, T.; EISENBLATTER, G.; FRITSCH, R.; LUNG, D.; POHLS, M. **Applications of minimal quantity lubrication (MQL) in cutting and grinding**. In: Proceeding of the 12th International Colloquium Industrial and Automotive Lubrification, Technische Akademie, Esslingen, p. 11-13, 2000.

KLOCKE, F. Manufacturing Processes 2 – **Grinding, Honing, Lapping**. Springer, p. 17-45, 2009.

KLOCKE, F.; EISENBLÄTTER, G. **Dry Cutting**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 2, 1997, pg. 519-526.

KRAR, S. F. **Grinding technology**. Delmar Publishers Inc., Second Edition, USA, 1994, p. 165-319, ISBN 0-8273-6390-7.

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. **Assessment of Microhardness Profile in Grinding Using Barkhausen Noise Technique at Various Analysis Parameters**. ISRN Materials Science, vol. 2011, Article ID 525078, 5 pages., 2011.

LACHANCE S, BAUER R, WARKENTIN A. **Application of region growing method to evaluate the surface condition of grinding wheels**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 44(7-8): 823–829, 2004.

LAWAL, Sunday Albert; CHOUDHURY, Imtiaz Ahmed; NUKMAN, Yusoff. **A critical assessment of lubrication techniques in machining processes: a case for minimum quantity lubrication using vegetable oil-based lubricant**. In: JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, 2012, 12p. Editora: Elsevier.

LIAO, T.W.; ZHANG, Z.M.; MOUNT C.R. **A case based reasoning system for identifying failure mechanisms**. Engineering Applications of Artificial Intelligence. (2000).

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

LIU, J.; CHOU, Y. K. **On temperatures and tool wear in machining hypereutectic Al–Si alloys with vortex-tube cooling**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 47, n. 3, p. 635-645, 2007.

MALKIN, S. **Grinding Mechanisms e Grinding Temperatures and Thermal Damage**. In: MALKIN, S. **Grinding Technology: theory and applications of machining with abrasives**. 1.ed. Chichester, Ellis Horwood Limited, 1989.

MALKIN, S. **Grinding Mechanisms e Grinding Temperatures and Thermal Damage**, In: MALKIN, S. **Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives**, 2ª ed., 2008. Chichester: Ellis Horwood Limited.

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

MALKIN, S., GUO. C. **Grinding technology: theory and applications of machining with abrasives**. New York: Industrial Press, p. 372, 2008.

MARINESCU, I. D.; ROWE, W.B.; DIMITROV, B.; INASAKI, I. **Tribology of abrasive machining processes**. 2^aed. Norwich, William Andrew Inc. (2013).

MARINESCU, I. D. et al., **Handbook of Machining with Grinding Wheels**. 1a Ed. ed. [S.l.]: CRC Press. (2007).

MARINESCU, I.; TONSHOFF, H.K.; INASAKI, I. **Deformation and fracture of ceramics materials**. In: Handbook of Ceramic Grinding and Polishing, New Jersey: William Andrew Publishing/Noyes, cap. 2. (2007).

MARINESCU, I. D.; HITCHINER, M.; UHLMANN, E.; INASAKI, I. **Handbook of machining with grinding wheels**. CRC. (2006).

MARINESCU, I. D.; ROWE, W.B.; DIMITROV, B.; INASAKI, I. **Tribology of abrasive machining processes**, 1^a ed. Norwich: William Andrew Publishing, 751 p. (2004)

MARKSBERRYA, P.W.; JAWAHIR, I.S. **A comprehensive tool-wear/tool-life performance model in the evaluation of NDM (near dry machining) for sustainable manufacturing**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, n. 48, 2008, pg. 878-886.

MARTINS, Cesar H. R. et al., **Tool Condition Monitoring of Single-Point Dresser Using Acoustic Emission and Neural Networks Models**. Ieee Transactions On Instrumentation And Measurement. Piscataway: Ieee-inst Electrical Electronics Engineers Inc, v. 63, n. 3, p. 667-679, 2014.

NAKAI, M. E., Aguiar, P. R., Junior, H. G., Bianchi, E. C., Spatti, D. H., & D'Addona, D. M. **Evaluation of neural models applied to the estimation of tool wear in the grinding of advanced ceramics**. Expert Systems with Applications, 42(20), 7026-7035. doi:10.1016/j.eswa.2015.05.008. (2015)

NGUYEN, T., ZHANG, L. C. **An assessment of the applicability of cold air and oil mist in surface grinding**. Journal of Materials Processing Technology, v. 140, p. 224-230, 2003.

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

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, 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.

Políticas de Educação Ambiental conforme a Lei 9.795 de 27/04/1999 e Decreto nº 4.281 de 25/06/2002.

POURARIA, H.; KIA, S. M.; PARK, W. G.; MEHDIZADEH, B. **Modeling the cooling performance of vortex tube using a genetic algorithm-based artificial neural network.** Thermal Science, v. 20, n. 1, p. 53-65, 2016.

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: 174-182, 2013.

PUSAVEC, F.; DESHPANDE, A.; YANG, S.; M'SAOUBI, R.; KOPAC, J.; DILLON, O. W. (Jr.); JAWAHIR, I. S. **Sustainable machining of high temperature Nickel alloy e Inconel 718: part 1 e predictive performance models.** Journal of Cleaner Production 81, p.257, 2014.

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

RASIM, M., MATTFELD, P., KLOCKE, F. **Improving minimum quantity lubrication in CBN grinding using compressed air wheel cleaning.** Journal of Materials Processing Technology 226, p. 60-68, 2015.

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

ROWE W. B. **Principles of Modern Grinding Technology.** Elsevier, Second Edition. (2014)

RUNGE, P. R. F.; DUARTE, G. N. **Lubrificantes nas indústrias – Produção, manutenção e controle Triboconcept,** Edições Técnicas, p. 71-171, 1990.

RUZZI, R. de S.; BELENTANI, R. de M.; DE MELLO, H. J.; CANARIM, R. C.; D'ADDONA, D. M.; DINIZ, A. E.; DE AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. **MQL with water in cylindrical plunge grinding of hardened steels using CBN wheels, with and without wheel cleaning by compressed air.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, p. 1–10, 2016.

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

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

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

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

SILLIMAN, J. D. (Ed.). **Cutting and grinding fluids: selection and application.** Dearborn – Michigan, SME, 2 ed., p. 119-135, 1992.

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

SILVA, LR., BIANCHI, E.C., CATAI, R.E., et al. **Study on the behavior of the minimum quantity lubricante – MQL technique under diferente lubricating and cooling conditions when griding ABNT 4340 steel.** J Braz Soc Mech Sci Eng 27:192–199, 2005.

SILVA, L. R., CORRÊA, E. C. S., BRANDÃO, J. R., ÁLIVA, R. F. **Environmentally friendly manufacturing: behavior analysis of minimum quantity of lubricant – MQL in grinding process.** Journal of Cleaner Production doi: 10.1016/j.jclepro.2013.01.033, 2013.

SILVA LR, CORRÊA ECS, BRANDÃO JR, DE ÁVILA RF. **Environmentally friendly manufacturing: behavior analysis of minimum quantity of lubricant - MQL in grinding process.** Journal of Cleaner Production, 2013.

SILVA NETO, J.F. **Estudo experimental da remoção, por jato de ar comprimido, de detritos na superfície de corte de rebolo diamantado durante a retificação da alumina refrigerada pela técnica MQL.** Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista. (2012)

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

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

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

SOARES, D. D. e OLIVEIRA, J. F. G. **Diagnóstico de processos de retificação pela análise de sinais.** Revista Máquina & Metais, nº 436, p.140-157, 2002.

SOKOVIC, M.; MIJANOVIC, K. **Ecological aspects of the cutting fluids and its influence on quantifiable parameters of the cutting processes.** Journal of Materials Processing Technology, v. 109, nº 1-2, p. 181-189, 2001.

SOUZA, R. C., NASCIMENTO, M. P., VOORWALD, H. J. C., PIGATIN, W. L. **The effect of WC– 17 Co thermal spray coating by HVOF and hard chromium electroplating on the fatigue life and abrasive wear resistance of AISI 4340 high strength steel.** Corrosion reviews, v. 21. n.1, p.75- 96, 2003.

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

SU, Y.; HE, N.; LI, L.; LI, X.L. **An experimental investigation of effects of cooling/lubrication conditions on tool wear in high-speed end milling of Ti-6Al-4V.** Wear, n. 261, 2006, pg. 760-76.

SU Y, HE N, LI L, IQBAL A, XIAO MH, XU S, QIU BG. **Refrigerated cooling air cutting of difficult-to-cut materials**, in: International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 47, Issue 6, May 2007, pp. 927-933.

SUN, L., Yang, S., Yang, L., Zhao, P., Wu, P., & Jiang, Z. **A new model of grinding forces prediction for machining brittle and hard materials**. Procedia CIRP, 27, 192-197. doi:10.1016/j.procir.2015.04.065, 2015.

TANG, J.; DU, J.; CHEN. Y. **Modeling and experimental study of grinding forces in surface grinding**. Journal of Materials Processing Technology. Vol.209, pp. 2847- 2854, 2009.

TASDELEN, B.; WIKBLUM, T.; EKERED, S. **Studies on minimum quantity lubrication (MQL) and air cooling at drilling**. Journal of Materials Processing Technology, n. 200, 2008, pg. 339-346.

THOMAS J. BRUNO. **Laboratory Applications of the Vortex Tube**. J. Chem. Educ., 1987, 64 (11), pp. 987.

THOMÉ, R.; BIANCHI, E.C.; ARRUDA, O.S.; AGUIAR, P.R. **Doenças causadas por microbactérias: uma revisão de trabalhos**. Revista Máquinas e Metais, n. 492, 2007, pg. 96-109.

TAWAKOLI, T., WESTKAMPER, E., RABIEY, M., RASIFARD, A. **Influence of the type of coolant lubricant in grinding with CBN tools**, International Journal of Machine Tools & Manufacture 47 (2007) 734–739.

TAWAKOLI, T.; HADAD, M. J.; SADEGHI, M.H. **Investigation on minimum quantity lubricant-MQL grinding of 100Cr6 hardened steel using different abrasive and coolant-lubricant types**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 50, nº 8, p. 698-708, 2010.

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

WALKER, T. **The MQL Handbook**. Unist, Inc. V1.0.3. (2013).

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

WANG, Z.; WILLETT, P.; AGUIAR, P. R.; WEBSTER, J. **Neural network detection grinding burn from acoustic emission**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 41, p. 283-309, 2001.

WEBSTER, J.; CUI, C.; MINDEK JR., R. B. **Grinding Fluid Application System Design**. Annals of the CIRP, v. 44, nº 1, p. 333-338, 1995.

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

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

WINTER, M.; HERRMANN, C. **Eco-Efficiency of alternative and conventional cutting fluids in external cylindrical grinding**. 21st CIRP Conference on Life Cycle Engineering. Procedia CIRP 15. Pages 68-73. 2015.

YOSHIMURA, H., ITOIGAWA, F., NAKAMURA, T., NIWA, K. **“Development of nozzle system for oil-on-water droplet metalworking fluid and its application on practical production line”**. JSME International Journal, vol. 48, n. 4, pp. 723-729, 2005.

XIE, X.Z., CHEN, G.Y., Li, L.J. **Dressing of resin-bonded superabrasive grinding wheels by means of acousto-optic Q-switched pulsed Nd:YAG laser**. Optics & Laser Technology 36 (2004) 409 – 419.