



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

RODOLFO ALEXANDRE HILDEBRANDT

**RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA DO AÇO ABNT 4340 COM APLICAÇÃO DO FLUIDO DE
CORTE PELA TÉCNICA DE MQL COM SISTEMA DE LIMPEZA DA SUPERFÍCIE DE
CORTE DO REBOLO**

**Bauru
2016**

RODOLFO ALEXANDRE HILDEBRANDT

**RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA DO AÇO ABNT 4340 COM APLICAÇÃO DO FLUIDO DE CORTE PELA
TÉCNICA DE MQL COM SISTEMA DE LIMPEZA DA SUPERFÍCIE DE CORTE DO REBOLO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”, Campus de Bauru, como requisito à obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi

Bauru - SP

2016

Hildebrandt, Rodolfo Alexandre.

Retificação cilíndrica do aço ABNT 4340 com aplicação do fluido de corte pela técnica de MQL com sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo / Rodolfo Alexandre Hildebrandt, 2016
109 f.

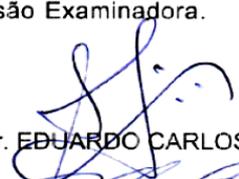
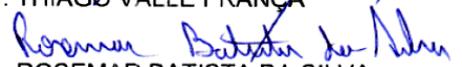
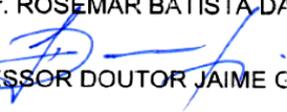
Orientador: Eduardo Carlos Bianchi

Tese (Doutorado)- Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2016

1. Retificação. 2. Fluido de corte. 3. Mínima Quantidade de Lubrificante - (MQL). 4. Empastamento. 5. Rebolo. 6. Aço ABNT 4340. 7. Integridade da Superfície. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Bauru. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE RODOLFO ALEXANDRE HILDEBRANDT, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA.

Aos 25 dias do mês de novembro do ano de 2016, às 09:00 horas, no(a) Anfiteatro da Diretoria Técnica de Informática/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, Prof. Dr. LUIZ EDUARDO DE ANGELO SANCHEZ do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. THIAGO VALLE FRANÇA do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. ROSEMAR BATISTA DA SILVA do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, PROFESSOR DOUTOR JAIME GILBERTO DUDUCH do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS-USP, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da TESE DE DOUTORADO de RODOLFO ALEXANDRE HILDEBRANDT, intitulada **CONTROLE DA LUBRI-REFRIGERAÇÃO NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA COM ÊNFASE NA REDUÇÃO DO FLUÍDO DE CORTE - MQL E 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
Prof. Dr. LUIZ EDUARDO DE ANGELO SANCHEZ
Prof. Dr. THIAGO VALLE FRANÇA
Prof. Dr. ROSEMAR BATISTA DA SILVA
PROFESSOR DOUTOR JAIME GILBERTO DUDUCH

PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

A COMISSÃO EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DO ALUNO:
RODOLFO ALEXANDRE HILDEBRANDT

DE: "CONTROLE DA LUBRI-REFRIGERAÇÃO NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA
COM ÊNFASE NA REDUÇÃO DO FLUÍDO DE CORTE - MQL E NA LIMPEZA DA SUPERFÍCIE DE
CORTE DO REBOLO"

PARA:

*Retificação cilíndrica do aço ABNT 4340
com aplicação do fluido de corte pela
técnica de MQL com sistema de limpeza
da superfície de corte do resbalo*

Bauru, 25 de novembro de 2016.

Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi
Orientador

DEDICATÓRIA

À minha família com amor, carinho e gratidão, aos professores pelos fundamentos e compreensão e a todos que me apoiaram ao longo da realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida e por simplesmente tudo.

Aos meus familiares, em especial a meus pais Rainer Dominicus Hildebrandt e Eunice Machado Hildebrandt, pela educação e incentivo aos estudos, minha sogra Maria Rosa Rodrigues Pinheiro, meus filhos Felipe Pinheiro Hildebrandt, Fernando Pinheiro Hildebrandt e minha querida esposa Valéria Cristina R. P. Hildebrandt pelo amor, carinho, compreensão e sabedoria para suportar os momentos difíceis no decorrer do desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Dr. Eduardo Carlos Bianchi pela orientação, pelos ensinamentos, disposição, intensa atenção, enorme paciência, cordialidade e grande amizade.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP por ter-nos concedido recursos de realizar esta pesquisa.

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

Ao companheiro de estudo e Laboratório Rafael Lemes Rodriguez pela excelente contribuição para este trabalho.

À empresa Norton pelo apoio aos consumíveis e informações relevantes para este trabalho.

Aos professores Dr. Luiz Eduardo de Angelo Sanchez, Dr. Ivaldo de Domenico Valarelli e Dr. Paulo Roberto de Aguiar, pelo grande apoio e atenção com o início desta pesquisa.

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

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

“Ainda que eu falasse as línguas dos homens e dos anjos, se não tiver caridade, sou como o bronze que soa, ou como o címbalo que retine. Mesmo que eu tivesse o dom da profecia, e conhecesse todos os mistérios e toda ciência; mesmo que tivesse toda fé, a ponto de transportar montanhas, se não tiver caridade, não sou nada”.

(I Coríntios 13, 1-2)

RESUMO

O presente estudo aborda novas técnicas produtivas para o setor da usinagem por abrasão, destacando as tecnologias limpas e menos agressivas ao meio ambiente, tais como o emprego do fluido de corte biodegradável sem adição de água com o objetivo de reduzir a quantidade do fluido, com o emprego da técnica da mínima quantidade de lubrificação - MQL. Neste trabalho foram feitos estudos sobre a influência da lubri-refrigeração e a técnica MQL no processo de retificação, almejando a integridade da superfície sem danos microestruturais. Dessa forma, a técnica MQL pode ser comparada com ao método convencional de aplicação de fluido no processo de retificação, visando um padrão de qualidade similar. O material empregado foi o aço ABNT 4340 em forma de disco, caracterizados através dos ensaios de rugosidade, do desvio de circularidade, do desgaste diametral do rebolo, da análise metalográfica, da microscopia óptica, da microdureza e da análise da influência da lubri-refrigeração nas variáveis dos sinais de potência e emissão acústica. A execução e o controle das etapas processadas durante as vazões da lubri-refrigeração através do método convencional e da técnica MQL com e sem limpeza da superfície de corte do rebolo, foram fundamentais para obter peças compatíveis com a estrutura esperada, proporcionando assim uma evolução para as etapas subsequentes do processo de retificação. Os parâmetros de vazão pela técnica MQL que mais se destacaram foram na faixa de 30 a 60 ml/h, tendo como diferencial, a inclusão da limpeza da superfície de corte do rebolo, onde melhorou substancialmente em relação ao método sem limpeza, o qual apresentou o empastamento do rebolo, inviabilizando assim este método. Os resultados dos estudos demonstram que ensaios com aplicação do MQL com limpeza da superfície de corte do rebolo proporcionaram um melhor desempenho em relação ao método MQL sem limpeza, ou seja, o método com limpeza foi a condição em que mais se aproximou ao método convencional na maioria das variáveis analisadas. No entanto, as diferenças de valores obtidos não apresentaram divergência dimensional e estrutural, onde os resultados mostraram um ótimo desempenho e condições de conformidade para o processo, viabilizando sua implantação aos processos existentes, podendo também ser inclusos na concepção de novas máquinas.

Palavras chaves: Retificação, Fluido de Corte, Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL), Empastamento, Rebolo, Aço ABNT 4340, Integridade da Superfície.

ABSTRACT

The present study addresses new production techniques for the abrasion machining sector, highlighting the clean and less aggressive technologies to the environment, such as the use of biodegradable cutting fluid without addition of water in order to reduce the amount of fluid with the Minimal Quantity Lubrication (MQL). In this work, studies were done on the influence of the flood coolant and the MQL technique in the grinding process, aiming the integrity of the surface without microstructural damages. Thus, the MQL technique can be compared to the conventional fluid application method in the grinding process, aiming at a similar quality standard. The material used was disc-shaped ABNT 4340 steel, characterized by roughness tests, circularity deviation, diametrical grinding wheel wear, metallographic analysis, optical microscopy, microhardness and analysis of the influence of the flood coolant in the variables of the power and acoustic emission signals. The execution and control of the steps processed during the flood coolant flow through the conventional method and the MQL technique with and without cleaning of the grinding surface of the grinding wheel were fundamental to obtain parts compatible with the expected structure, thus providing an evolution to the subsequent steps of the grinding process. The flow parameters of the MQL technique that stood out most were in the range of 30 to 60 ml / h, having as a differential the inclusion of the cleaning of the cutting surface of the grinding wheel, where it improved substantially in relation to the method without cleaning, which presented the of the wheel clogging, thus making this method unfeasible. The results of the studies show that MQL applications with clean cutting surface of the grinding wheel provided a better performance in relation to the MQL method without cleaning, this way, the cleaning method was the condition that most approached the conventional method in most variables analyzed. However, the differences in values obtained did not show dimensional and structural divergence, where the results showed an excellent performance and compliance conditions for the process, making possible its implementation to the existing processes, and could also be included in the design of new machines.

Keywords: Grinding, Cutting Fluid, Minimal Quantity Lubrication (MQL), Wheel clogging, Grinding Wheel, Steel ABNT 4340, Surface Integrity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1. Retificação Cilíndrica Externa de Mergulho (Adaptado de MALKIN, 1989).....	25
Figura 2.2. Representação da retificação cilíndrica externa de mergulho (Adaptado de CHEN <i>et al.</i> 2002).....	26
Figura 2.3. Relação entre energia específica de retificação e acabamento da superfície (Adaptado de MARINESCU <i>et al.</i> 2007).....	28
Figura 2.4. Representação do ciclo de uma retificação cilíndrica de mergulho (Adaptado de SOARES & OLIVEIRA, 2002).....	29
Figura 2.5. Formação de cavaco por um grão abrasivo (Adaptado de MALKIN, 1989).....	30
Figura 2.6. Grandezas físicas de retificação cilíndrica externa de mergulho (Adaptado de MALKIN, 1989).....	31
Figura 2.7. Principais constituintes do rebolo (WEBSTER & TRICARD, 2004).	37
Figura 2.8. Função do fluido de corte (Adaptado de ROWE, 2014).....	42
Figura 2.9. Classificação dos fluidos solúveis em água (Adaptado de EL BARADIE, 1996).	46
Figura 2.10. Distribuição dos custos da lubri-refrigeração no processo de usinagem na indústria automotiva (Adaptado de SANCHEZ <i>et al.</i> 2010).....	49
Figura 2.11. Processos de fabricação poluindo o meio ambiente (Adaptado de SOKOVIC E MIJANOVIC, 2001).....	52
Figura 2.12. Ilustração esquemática do princípio de funcionamento para o bocal de saída dupla (Adaptado de YIN <i>et al.</i> , 2015).	54
Figura 2.13. Ilustração a) “borra” no rebolo composta entre óleo e cavaco, b) ampliação da área do rebolo em (a).....	56
Figura 2.14. Ilustração das posições dos bocais MQL e sistema de retificação com ar comprimido na limpeza do rebolo (Adaptado de OLIVEIRA <i>et al.</i> , 2012).....	57
Figura 2.15. Representação esquemática do campo de tolerância de circularidade.....	59
Figura 2.16. Peça com desvio de circularidade (Adaptado de TAYLOR-HOBSON, 2001). ..	60
Figura 2.17. Fontes de emissão acústica na retificação (KARPUSCHEWISKI, 2001).....	62
Figura 3.1. Configuração dos Equipamentos – Aquisição de dados	66
Figura 3.2. Desenho técnico, fora de escala, do corpo de prova de Aço ABNT 4340 utilizado na pesquisa.....	67

Figura 3.3. Unidade de controle do aplicador de fluido pela técnica MQL. Fabricante ITW Chemical Products Ltda., modelo ITW Accu-lube 79053D.	68
Figura 3.4. Desenho técnico em corte do bocal utilizado na técnica de aplicação do MQL....	69
Figura 3.5. Sistema de ar comprimido para o MQL.....	69
Figura 3.6. Bocal de Limpeza – a) Posicionador, b) Desenho técnico.....	70
Figura 3.7. Sistema de fixação e posicionamento do bocal de limpeza	71
Figura 3.8. Fixação do bocal de limpeza na retificadora a 30°.....	71
Figura 3.9. Matriz dos ensaios realizados.....	73
Figura 3.10. Rugosímetro utilizado nas medições de rugosidade das amostras.....	74
Figura 3.11. Equipamento de medir circularidade marca Taylor Hobson, modelo Talyrond 31C®	75
Figura 3.12 Método para avaliação de desgaste do rebolo: a) operação de impressão do rebolo na peça. b) peça após a impressão.	76
Figura 3.13 Esquema ilustrativo do processo: a) impressão do perfil do rebolo na peça. b) representação da área desgastada no rebolo.....	76
Figura 3.14. Instrumento utilizado na medição de desgaste diametral do rebolo através da altura dos degraus do corpo de prova.	77
Figura 3.15. Representação do corte da amostra do corpo de prova e retirada de material para as análises de Metalografia e determinação de Microdureza.	77
Figura 3.16. Amostra após o embutimento do corpo de prova em resina baquelite	78
Figura 3.17 Lixadeira manual.....	78
Figura 3.18. Politriz Metalográfica marca STRUERS®	79
Figura 3.19. Microscópio Óptico utilizado na captação das imagens metalográficas.....	80
Figura 3.20. Representação do Microdurômetro utilizado na etapa de indentação.....	80
Figura 3.21. Esquema para medição da microdureza conforme ASTM E384: a) desenho representando a operação, b) imagem captada através da lupa do equipamento de medição de microdureza.	81
Figura 3.22. Potência versus tensão do módulo	83
Figura 4.1. Rugosidade (Ra) do aço ABNT 4340 após retificação cilíndrica em várias condições de vazão (Q).....	86

Figura 4.2. Superfície de rugosidade para as condições de refrigeração convencional e lubri-refrigeração com três variações de vazão.	87
Figura 4.3. Desvio de circularidade em função das condições de vazão.....	88
Figura 4.4. Desvio de circularidade para as condições de refrigeração convencional e lubri-refrigeração com três variações de vazão.	89
Figura 4.5. Desgaste do rebolo de alumina versus a técnica de aplicação de fluido de corte. .	91
Figura 4.6. (a) Ensaio com a vazão (Q) 30 ml/h (S/L) (b) Topografia da superfície de corte do rebolo.	91
Figura 4.7. Análise estatística do desgaste do rebolo para as diversas condições de lubri-refrigeração.	92
Figura 4.8. Potência consumida em função da condição de lubri-refrigeração utilizada.	93
Figura 4.9. Emissão acústica em função da condição de lubri-refrigeração empregada na retificação do aço ABNT 4340.....	95
Figura 4.10. Micrografia do aço ABNT 4340 após retificação com as técnicas: a) Convencional, b) MQL 30 ml/h - C/L, c) MQL 30 ml/h - S/L, d) MQL 60 ml/h - C/L, e) MQL 60 ml/h - S/L, f) MQL 120 ml/h - C/L, g) MQL 120 ml/h - S/L. Ampliação de 500 X.	96
Figura 4.11. Microdureza do aço ABNT 4340 abaixo da superfície usinada após várias condições de lubri-refrigeração.	98
Figura 4.12. Resultados de microdureza após várias condições de lubri-refrigeração.....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Composição típica dos fluidos a base de água.....	43
Tabela 2.2. Características dos principais tipos de fluidos de corte utilizados nas indústrias..	44
Tabela 2.3. Principais tipos de fluidos de corte e suas principais propriedades e composições	45
Tabela 2.4. Identificação do óleo de corte como resíduo perigoso anexo 1 – B resíduos perigosos - classe I de fontes não específicas (Anexo A da NBR-10.004/87).....	51
Tabela 2.5. Composição química do aço ABNT 4340	64
Tabela 3.1. Condições e parâmetros utilizados em todos os ensaios de retificação.....	72
Tabela 3.2. Valores obtidos para calibração.....	82
Tabela 3.3. Configurações do módulo de EA.....	84
Tabela 4.1. Relação da potência consumida em relação ao sistema de lubri-refrigeração convencional.....	94

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

a – profundidade de retificação

a_d – profundidade de dressagem

ANOVA – análise de variância

a_p – profundidade de corte

b – largura de retificação

CNC – Comando Numérico Computadorizado

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

d_e – diâmetro equivalente

d_s – diâmetro da ferramenta de corte - rebolo

d_w – diâmetro da peça de trabalho

DPO – Parâmetro definido pela multiplicação entre o desvio padrão do sinal RMS de emissão acústica e a potência elétrica máxima por passada do rebolo (ciclo)

EPI – equipamento de proteção individual

h_{eq} – espessura equivalente de corte

h_{max} – espessura teórica máxima do cavaco

F_n – força normal de corte

F_t – força tangencial de corte

G – relação G

H – dureza

HRC – dureza Rockwell

HV – dureza Vickers

l_c – arco ou comprimento de contato

MQL – Mínima Quantidade de Lubrificante

n_s – velocidade ou rotação do rebolo

n_w – velocidade ou rotação da peça

P – carga aplicada / potência de retificação

PAIR – perda auditiva induzida pelo ruído

P_w – potência consumida

q_s – relação de velocidade rebolo e peça

Q_w – taxa de remoção volumétrica

Q'_w – taxa específica de remoção volumétrica

R_a – rugosidade média

RMS – valor médio quadrático (*root mean square*)

t – tempo de retificação

t_s – tempo de centelhamento (*spark-out*)

U_c – energia específica

V – tensão elétrica

V_f – velocidade de avanço da ferramenta de corte ou mergulho

V_s – velocidade tangencial da ferramenta de corte

V_w – velocidade tangencial da peça de trabalho

Z_s – volume de rebolo gasto

Z_w – volume de material removido

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	21
1.1. Motivação para a realização deste trabalho.....	22
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
2.1. Processo de retificação.....	24
2.2. Retificação cilíndrica externa de mergulho.....	25
2.2.1. Força tangencial de corte.....	26
2.2.2. Potência de retificação.....	27
2.2.3. Energia Específica (u_c).....	27
2.2.4. Ciclo da retificação cilíndrica externa de mergulho.....	28
2.2.5. Mecanismos de formação do cavaco na retificação.....	30
2.3. Parâmetros do processo de retificação.....	31
2.3.1. Profundidade de Corte (a).....	32
2.3.2. Comprimento de contato (l_c).....	33
2.3.3. Diâmetro equivalente (d_e).....	33
2.3.4. Espessura equivalente de corte (h_{eq}).....	34
2.3.5. Velocidade de corte ou periférica do rebolo (v_s).....	34
2.3.6. Velocidade da peça (V_w).....	35
2.3.7. Velocidade de mergulho (V_f).....	36
2.3.8. Taxa de Remoção de Material (Q_w).....	36
2.4. Rebolo.....	37
2.4.1. Rebolo de Óxido de Alumínio (Al_2O_3).....	38
2.5. Dressagem.....	40
2.6. Fluido de corte.....	41

2.6.1. Tipos de Fluidos de Corte.....	43
2.6.1.1.Fluidos solúveis em água.....	44
2.6.1.2.Óleos emulsificáveis ou emulsões.....	46
2.6.1.3.Fluidos químicos ou sintéticos	47
2.6.1.4.Fluidos semi-sintéticos	48
2.6.2. Custos dos fluidos de corte no processo.....	48
2.6.3. Manuseio, manutenção e descarte do fluido de corte.....	49
2.6.3.1.Problemas devido à aplicação dos fluidos de corte	50
2.7. Usinagem a seco	53
2.8. Técnica de Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL).....	54
2.8.1. Limpeza da superfície de corte do rebolo.....	56
2.9. Caracterização do Processo de Retificação	58
2.9.1. Rugosidade	58
2.9.2. Circularidade	58
2.9.2.1.Desvio de Circularidade	60
2.9.3. Desgaste diametral do rebolo – Relação G.....	60
2.9.4. Emissão Acústica – EA	61
2.9.5. Análise da microestrutura – Microscopia Óptica	63
2.9.6. Microdureza.....	63
2.10. Características do Aço ABNT 4340	63
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	65
3.1. Equipamentos e materiais utilizados.	65
3.1.1 Equipamentos para Monitoramento e Análise.....	66
3.1.2 Corpo de Prova	67

3.1.3	Rebolo.....	67
3.1.4	Sistema de refrigeração convencional	67
3.1.5	Sistema de lubri-refrigeração - mínima quantidade de lubrificação – MQL.....	68
3.1.6	Sistema de limpeza	70
3.2.	Parâmetros e condições para os ensaios	71
3.3.	Caracterização do corpo de prova após o processo de retificação	73
3.3.1.	Medição da Rugosidade.....	74
3.3.2.	Medição da Circularidade.....	74
3.3.3.	Determinação do desgaste do rebolo.....	75
3.3.4.	Análise metalográfica	77
3.3.4.1.	Microscopia óptica	79
3.3.5.	Avaliação da Microdureza.....	80
3.3.6.	Análise de potência de retificação e emissão acústica	81
3.3.6.1.	Análise de potência.....	82
3.3.6.2.	Análise da emissão acústica	83
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	85
4.1.	Rugosidade	85
4.2.	Circularidade	88
4.3.	Desgaste do rebolo	90
4.4.	Valores de Potência Consumida.....	93
4.5.	Emissão acústica.....	95
4.6.	Microscopia óptica	96
4.7.	Microdureza.....	97
5.	CONCLUSÕES	100

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102

1. INTRODUÇÃO

O processo de retificação merece destaque entre os processos abrasivos pela sua importância para a indústria metal-mecânica. Na prática, esse processo se enquadra como abrasão, por constituir como ferramenta principal o rebolo, em que os grãos abrasivos são responsáveis pela retirada de material da peça usinada, caracterizando como a etapa final do processo de fabricação, garantindo valores de rugosidade menores (0,1 a 1,6 μm), como também tolerâncias mais estreitas definidas pelas qualidades de trabalho (IT3 a IT6).

Embora muito empregada, a retificação é um dos processos de usinagem com maior grau de complexidade, devido à grande quantidade de variáveis presentes com um grande número de parâmetros, que em combinação, determinam o acabamento e integridade das peças desejadas.

Atualmente, diversas retificadoras utilizam o sistema convencional de aplicação de fluido de corte consideradas como técnicas de consumo de elevada vazão (250 a 700 l / h) que, conseqüentemente, influenciará no consumo de água e fluido. Sokovic e Mijanovic (2001) relatam que a importância da substituição de processos e métodos tradicionais de lubrificação se faz necessário para gerar condições de fabricação que estejam tecnologicamente e economicamente associadas às reduções do impacto ao meio ambiente. Para o sistema de mínima quantidade de lubrificação - MQL, também chamado como “*Dry-near machining*”, o consumo de fluido de corte é controlado, sendo aplicado através da injeção de uma mistura de ar e óleo a altas pressões em direção à superfície de usinagem (PUSAVEC *et al.*, 2014) e vazão (10 a 240 ml / h). O emprego da técnica MQL resulta em redução drástica da vazão de seu volume, onde o consumo de água é reduzido, representando assim um dos pontos de grande contribuição para o desenvolvimento de pesquisa em usinagem.

Attanasio *et al.* (2006) descrevem que no MQL, primeiramente, é preciso fazer a mistura do ar com o óleo, para depois ser expelido. Existem duas formas de mistura: uma ocorre fora do bocal e outra dentro do mesmo.

Por sua vez, esse fluido é responsável pela transferência de calor com o resfriamento do material, sendo ele responsável também pela retirada do cavaco e das impurezas que se encontram na peça ou na ferramenta, reduzindo o atrito e minimizando o desgaste do rebolo por funcionar como lubrificante.

Assim como a consciência ambiental é exigida e solicitada por meio de ações eficazes, a fim de reduzir os impactos ao ambiente de trabalho e no meio ambiente global, associada às reduções de custos relacionados com fluidos de corte, surgiram alternativas de lubri-refrigeração, entre elas, a mínima aliada aos aspectos econômicos quantidade de lubrificante (MQL), já que a retificação a seco não tem sido apropriada para processos de retificação com rebolos convencionais, devido à geração excessiva de calor (WEINERT *et al.*, 2004).

Segundo Sadeghi *et al.* (2009), a preocupação ambiental se tornou incrivelmente importante para os processos produtivos, e tecnológicos. A crescente busca por técnicas que respeitem o meio ambiente e que reduzam os custos com descarte de fluido tem dado lugar às formas alternativas. Entre elas está o MQL e a usinagem a seco.

Assim, atendendo a determinação das políticas de educação ambiental, conforme lei 9.795 de 27/04/1999 e Decreto nº 4.281 de 25/06/2002, a divulgação nas áreas de ensino e pesquisa, o artigo 8º descreve que as atividades vinculadas à política nacional de educação ambiental devem ser desenvolvidas na educação em geral e na educação escolar, por meio das linhas de atuação inter-relacionadas, conforme inciso 3º, as ações de estudos, pesquisas e experimentações voltar-se-ão para a difusão de conhecimentos, tecnologias e informações sobre a questão ambiental como descrito no item II.

1.1. Motivação para a realização deste trabalho

A melhoria contínua dos processos de fabricação, em especial a usinagem por abrasão, motiva a utilização de novas tecnologias alinhadas à constante redução de custo e adequadas às novas tendências de mercado. O estudo da refrigeração convencional versus a implantação da técnica da mínima quantidade de fluído, vem motivando o desenvolvimento de novas pesquisas com resultados positivos para que se tenha um processo de fabricação mais limpo, com a redução de resíduos e o atendimento pleno às legislações ambientais.

É fundamental aproveitar as potencialidades desta técnica que ainda não foram exploradas, para se produzir peças com a mesma qualidade obtida com o uso dos fluidos de corte em abundância nos processos de retificação.

Nesse sentido, a importância deste estudo está na comparação da técnica de mínima quantidade de lubrificante (MQL) sem e com sistema de limpeza na superfície de corte do rebolo. Ensaio serão realizados com a técnica convencional abundante de fluido de corte,

onde o aperfeiçoamento da lubri-refrigeração poderá reduzir a alta geração de resíduos que se dá no atual processo convencional. Dessa forma, buscar uma nova alternativa de lubri-refrigeração no processo de retificação a partir de dados concretos obtidos experimentalmente, apontando meios práticos para que possam ser aplicada 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 lubri-refrigeração.

Não foi encontrado na literatura específica, nenhum trabalho científico que apresente a proposta de retificação de mergulho do aço ABNT 4340 com a utilização da técnica de MQL com sistema de limpeza de rebolos abrasivos convencionais. Levando em consideração o fenômeno do empastamento do rebolo (TAWAKOLI *et al.*, 2010), o método de limpeza é um dos grandes desafios e objetivos na operação de retificação a serem investigados nesta pesquisa.

A análise do desempenho da técnica aplicação MQL com limpeza será em junção dos parâmetros da rugosidade, do desvio de circularidade, do desgaste diametral do rebolo, da análise metalográfica em conjunto com a microscopia óptica e a microdureza.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada a revisão bibliográfica com relação aos principais tópicos sobre o processo de retificação cilíndrica externa do aço ABNT 4340, com rebolo de óxido de alumínio, do fluido de corte com aplicação da técnica de mínima quantidade de lubrificante (MQL) e das variáveis de saída, apropriando-se das técnicas de caracterização superficial que garantem a credibilidade deste processo em diversas condições do processo de retificação. A interação do proposto é apresentada a seguir.

2.1. Processo de retificação

Segundo Marinescu *et al.* (2013), o termo usinagem por abrasão descreve um processo, onde a superfície individual de corte não só é distribuída, como também aleatoriamente orientada. Dessa maneira, o processo abrasivo de retificação emprega grãos duros como elemento de corte na usinagem, alterando a geometria e a textura da superfície das peças usinadas (MARINESCU *et al.*, 2013).

Diferentemente dos processos nos quais se utilizam ferramentas de geometria definida, como o torneamento e o fresamento, na retificação, os abrasivos têm arestas de corte irregulares (ANDERSON *et al.*, 2008 e REN *et al.*, 2009). De acordo com Rowe (2009), infere-se que o termo retificação é, na prática da usinagem moderna, utilizado para descrever um processo de fabricação com rebolos a altas velocidades. A velocidade da superfície de corte é normalmente entre 20 m/s e 45 m/s na retificação convencional, podendo ser substancialmente maior em retificação de alta velocidade, chegando a 140 m/s ou mais. Este autor ainda apresenta que os rebolos são fabricados em diferentes formas, tamanhos e tipos de abrasivos.

Mais além, Bianchi *et al.* (2012) apresentam que as condições de usinagem e as especificações do rebolo podem aumentar substancialmente a vida útil da ferramenta e otimizar a usinagem, com uma maior capacidade de remoção de material. Esses autores ainda afirmam que pelo fato da retificação ser no acabamento superficial, com vistas à qualidade superficial da peça gerada, a atenuação dos erros dimensionais é importante ao desempenho do processo. Dessa forma, as condições de usinagem são de primordial importância para a geração de peças que atendem à tolerância e qualidade de sua superfície.

Silva Neto (2012), afirmam que o processo de retificação é muito complexo, devido ao elevado número de variáveis envolvidas. Assim, são muito sensíveis à pequenas alterações, além do fato de que a sua qualidade pode ser modificada significativamente com relação às habilidades do operador, atmosfera de trabalho e as condições de usinagem. Marinescu *et al.* (2013), citam que a ferramenta abrasiva move com velocidade tangencial maior comparada com outros processos de usinagem, como fresamento e torneamento.

2.2. Retificação cilíndrica externa de mergulho

Na retificação cilíndrica externa de mergulho, o rebolo avança perpendicularmente à superfície retificada (DINIZ *et al.* 2008). Já Marinescu *et al.* (2013), descrevem que na retificação cilíndrica externa de mergulho, o rebolo se move na direção do corpo de prova com uma velocidade de mergulho, (V_f). Estes autores ainda relatam que esta velocidade é muito menor do que a velocidade tangencial do corpo de prova (V_w), sendo que esta é geralmente menor do que a velocidade periférica do rebolo (V_s).

Segundo Silva Neto (2012), a retificação cilíndrica externa de mergulho se destaca por ser um processo rápido e econômico. Diniz *et al.* (2008), apresentam que além do fato do rebolo normalmente ser mais largo que o comprimento da peça, há ainda possibilidade de se fazer a retificação de várias superfícies simultaneamente através da montagem conjunta de rebolos ou a retificação de perfis, mediante a afiação do rebolo no perfil requerido. A retificação cilíndrica externa de mergulho é apresentada na Figura 2.1.

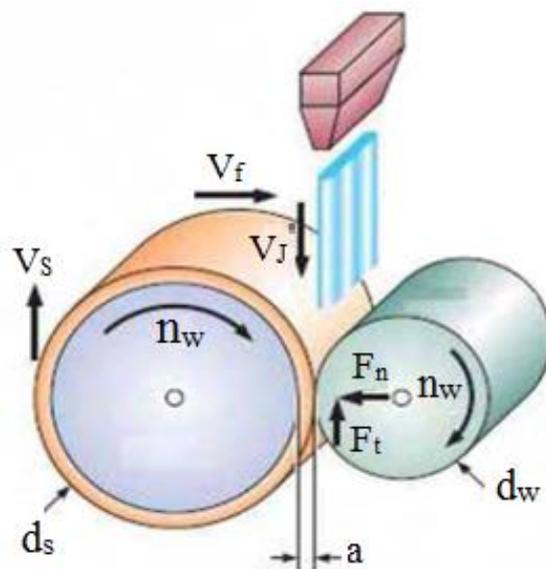


Figura 2.1. Retificação Cilíndrica Externa de Mergulho (Adaptado de MALKIN, 1989).

2.2.1. Força tangencial de corte

Para Li *et al.* (2002), a força na retificação representa uma importante variável na análise do processo. A força pode ser decomposta, conforme a Figura 2.2 em três componentes: normal (F_n), tangencial (F_t) e uma componente que não apresenta significância, pois está aplicada ao longo da direção de avanço longitudinal.

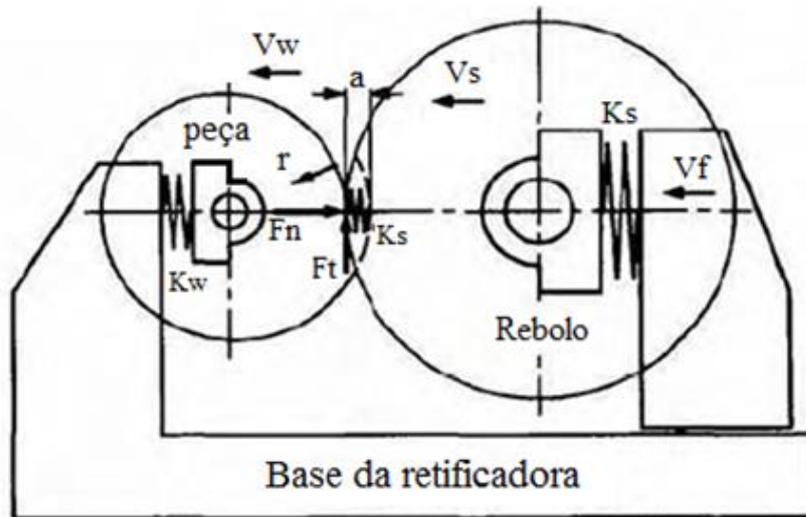


Figura 2.2. Representação da retificação cilíndrica externa de mergulho (Adaptado de CHEN *et al.* 2002).

Marinescu *et al.* (2004), definem matematicamente, a relação da força tangencial de corte, a qual cada grão abrasivo está submetido durante o processo de retificação cilíndrica externa de mergulho com as grandezas físicas da retificação conforme Equação (1).

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

Em que: 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_{\max} (mm) = espessura teórica máxima do cavaco.

Da equação (1), é possível notar que a força tangencial de corte é afetada principalmente pela espessura máxima do cavaco e a largura média no topo dos grãos abrasivos. Dessa forma, Li *et al.* (2002), afirmam que o tamanho do grão abrasivo e a resistência do ligante do rebolo afetam as forças de corte durante o processo de retificação. Em seu trabalho, Heinzl e Bleil (2007) mostraram que outro fator que influencia o aumento da força tangencial de corte tanto na usinagem de aço como de cerâmicas é a diminuição na velocidade de corte.

Por fim, Li *et al.* (2002), afirmam que a força tangencial tem influência principalmente no consumo de energia e no tempo de vida do rebolo, afetando também a temperatura e a rugosidade superficial da peça usinada.

2.2.2. Potência de retificação

Para Malkin (2008), a potência de retificação (P) está relacionada com as componentes tangencial (Ft) e normal (Fn) da força de corte. Essa forma, o autor apresenta a potência de retificação conforme a Equação (2).

$$P = Ft (v_S + v_W) \quad (2)$$

Quando o sentido da velocidade do rebolo (Vs) for oposto ao da velocidade da peça (Vw), deve-se utilizar o sinal de adição. Já quando tiverem mesmo sentido, o sinal de subtração prevalece.

Devido ao fato de que geralmente a velocidade da peça é muito menor que a velocidade do rebolo, obtém-se a Equação (3).

$$P = Ft.v_S \quad (3)$$

2.2.3. Energia Específica (u_c)

Para Tönshoff *et al.* (1999), definem a energia específica de retificação como a quantidade de trabalho necessária para separar um determinado volume de material do seu substrato. Essa energia está associada à três diferentes energias: de formação do cavaco, de fricção entre os grãos abrasivos e a peça e a dissipada na deformação plástica. Para Heinzl &

Bleil (2007), a energia específica também representa uma variável substancial para a análise do processo de retificação.

Dessa forma, a energia específica se relaciona com os parâmetros de retificação assim como na Equação (4).

$$U_c = \frac{F_T V_S}{b \pi d_w V_f} \quad (4)$$

Em que: d_w = diâmetro da peça

Para Salmon (1992), grande quantidade de energia específica que estão relacionados com elevados gradientes térmicos, além de tensões residuais e integridade metalúrgica baixa. Essa relação também vale para a rugosidade da superfície assim como ilustrado na Figura 2.3.

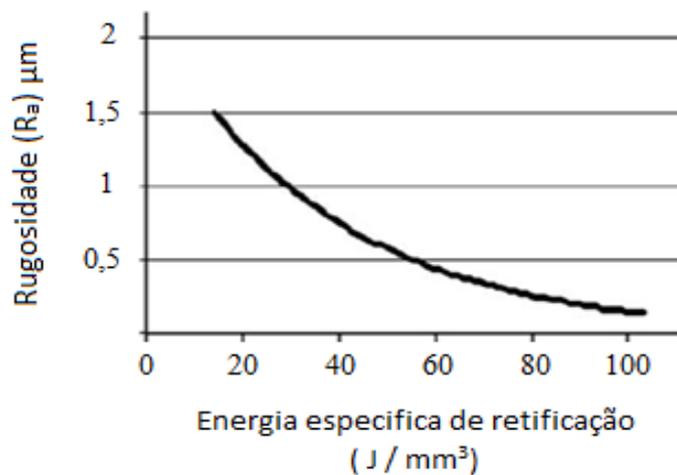


Figura 2.3. Relação entre energia específica de retificação e acabamento da superfície (Adaptado de MARINESCU *et al.* 2007).

2.2.4. Ciclo da retificação cilíndrica externa de mergulho

Segundo Soares e Oliveira (2002), o ciclo de retificação é entendido como um conjunto de etapas que ocorrem em uma operação. Assim, este se estende desde a preparação com a colocação da peça na máquina até sua obtenção dentro de especificações pré-estabelecidas. Dessa forma, o ciclo de retificação é subdividido em fases e, cada uma, possui um tempo para sua execução.

O ciclo de retificação e suas respectivas fases são apresentados na Figura 2.4 na sequência.

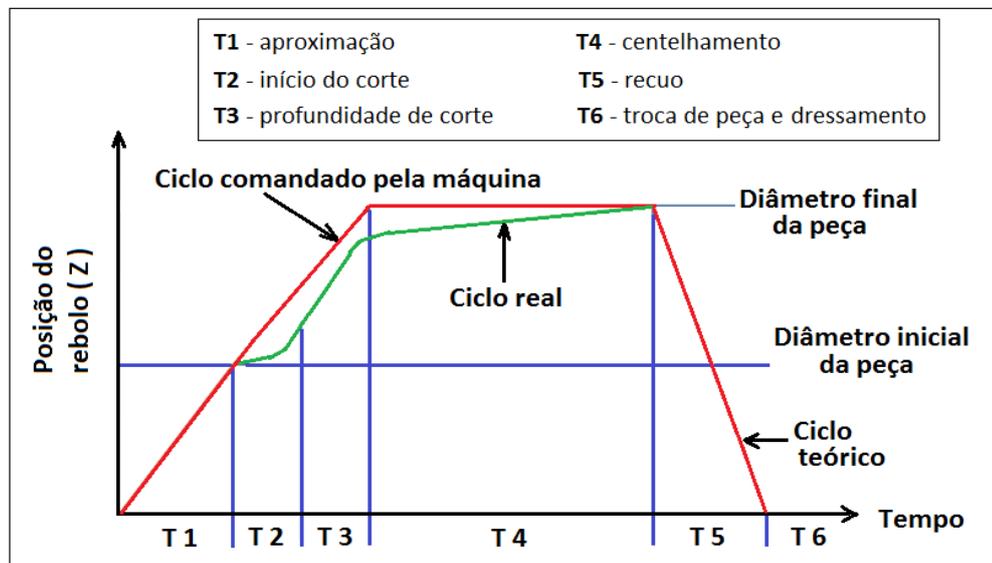


Figura 2.4. Representação do ciclo de uma retificação cilíndrica de mergulho (Adaptado de SOARES & OLIVEIRA, 2002).

Uma breve descrição de cada intervalo de tempo indicado na Figura 2.4 é apresentada na sequência:

T1: deslocamento do rebolo em direção à peça, não havendo remoção de material;

T2: início do contato entre o rebolo e a peça, proporcionando deformações elásticas em ambos e também na máquina. Estas deformações são responsáveis pelo atraso entre a posição real do rebolo e a posição indicada pelo comando da máquina. É nesta fase que se inicia a formação do cavaco.

T3: atinge-se a profundidade de corte estabelecida para um ciclo;

T4: período de centelhamento (*spark out*), onde não há avanço do rebolo, permitindo, desta forma, eliminar as deformações adquiridas durante o período T2. O tempo de *spark out* é de fundamental importância dentro de um ciclo de retificação, pois é neste momento que se atinge as tolerâncias dimensionais e geométricas com reduzidos valores de rugosidade superficial, característicos do processo de retificação;

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

T6: é o momento da realização de uma possível operação de dressagem, a qual é composta pelo movimento do rebolo até o dressador, pela dressagem propriamente dita e pelo retorno do rebolo até a posição de trabalho.

Para concluir, Soares e Oliveira (2002) afirmam que a soma total dos tempos das fases que representa o tempo total de retificação é um parâmetro de grande importância, pois tem relação direta com o custo final da peça.

2.2.5. Mecanismos de formação do cavaco na retificação

A formação de cavaco ocorre por cisalhamento decorrente do contato dos grãos abrasivos com a peça, resultando na remoção de material (MALKIN, 1989). As três fases necessárias para que a esta remoção de material ocorra estão demonstradas na Figura 2.5 e comentadas na sequência.

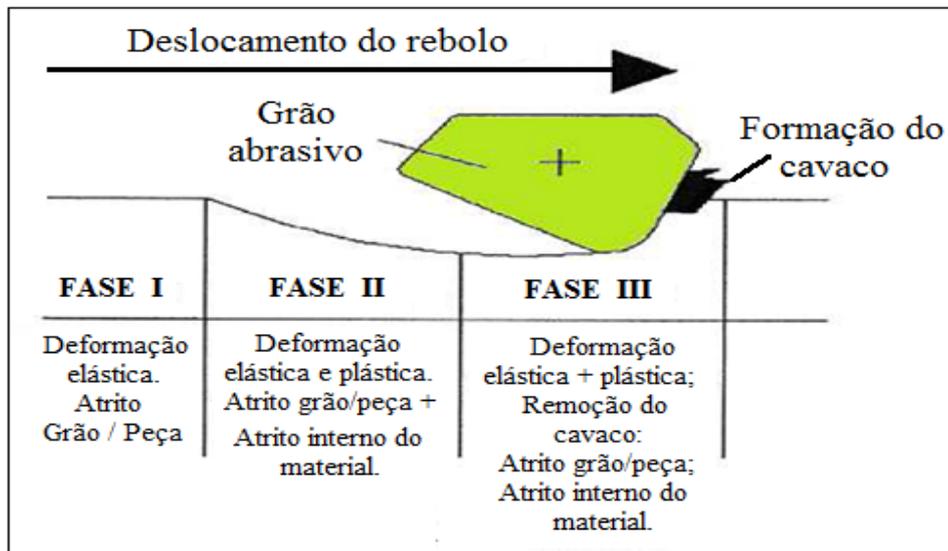


Figura 2.5. Formação de cavaco por um grão abrasivo (Adaptado de MALKIN, 1989).

- **Fase 1:** nesta fase, ocorre o primeiro contato entre grão abrasivo e peça, ocasionando apenas a deformação elástica do material da peça, assim a energia fornecida ao processo é consumida pelo atrito, calor e deformações.

- **Fase 2:** nesta segunda fase, os grãos abrasivos continuam penetrando na peça, proporcionando deformações plásticas, escoamento lateral e recuperação das deformações elásticas ocorridas no estágio anterior. A maior penetração dos grãos implica em maiores forças de atrito entre peça e rebolo, onde grande parte da energia continua sendo dissipada por deformações, atrito e calor.

- **Fase 3:** neste terceira fase, a aresta de corte atinge um valor de penetração crítico, iniciando a formação de cavaco. Dessa forma, grande parte da energia passa a ser consumida no cisalhamento do material.

Para concluir, Alfares e Elsharkawy (2009), afirmam que no processo de retificação existem outras situações que produzem forças no grão, além do corte. Essas situações são: escorregamento do grão, quando a peça e o próprio grão se deformam elasticamente e a deformação plástica, quando a tensão entre o grão e a peça aumenta, provocando o escoamento do material.

2.3. Parâmetros do processo de retificação

A seguir serão apresentadas as principais grandezas físicas do processo de retificação e são ilustrados na Figura 2.6.

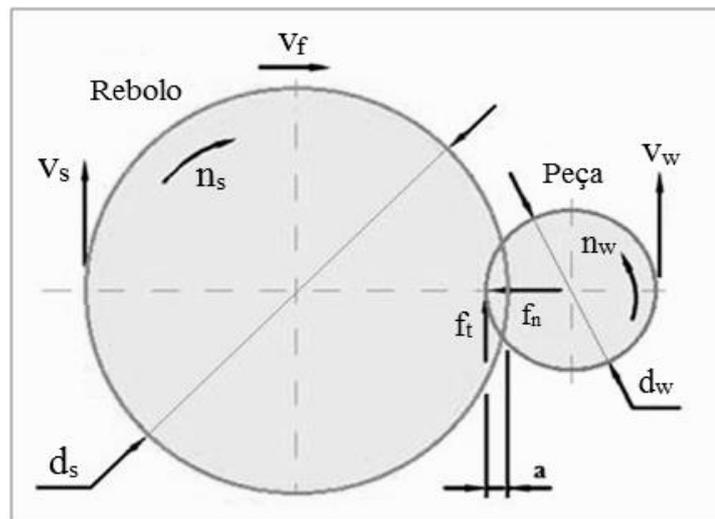


Figura 2.6. Grandezas físicas de retificação cilíndrica externa de mergulho (Adaptado de MALKIN, 1989).

Dessa forma, os parâmetros envolvidos no processo e que serão brevemente discutidos na sequência, são:

- a - profundidade de corte;
- d_s - diâmetro do rebole;
- d_w - diâmetro da peça;
- F_n - força normal de corte;
- F_t - força tangencial de corte;
- v_f - velocidade de mergulho (avanço) do rebole;
- v_s - velocidade de corte ou periférica do rebole;

- v_w - velocidade periférica da peça;
- n_s - rotação do rebolo;
- n_w - rotação da peça.

2.3.1. Profundidade de Corte (a)

De acordo com Malkin (1989), denomina a profundidade de corte em 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 (5).

$$a = \frac{\pi \cdot d_w \cdot v_f}{v_w} \quad (5)$$

Em que: v_f (mm/min);

v_w (mm/min).

A profundidade de corte (a) influencia na integridade superficial dos componentes retificados. (Rowe e Morgan 1993). Marinescu *et al.* (2004), relataram que a peça, o rebolo e os componentes da máquina sofrem deformação no momento em que ocorre o contato entre o rebolo e a peça. Nesse sentido, se calculado o real valor do parâmetro “a”, este é menor do que o calculado com base na velocidade de avanço v_f . Esse fato ocorre em função das deflexões mecânicas e térmicas, além do desgaste do rebolo. Estes autores ainda apresentam que, embora esse desvio ocorra, depois de certo tempo de avanço, as deflexões se estabilizam e se tornam constantes.

Segundo Diniz *et al.* (2008), a profundidade de corte (a) está fortemente relacionada com o parâmetro da espessura equivalente de corte (heq), sendo que (a) é proporcional a (heq). Dessa forma, quando há aumento da profundidade (a), ocorre aumento da espessura (heq), isso acarreta num desgaste maior do rebolo e aumento da rugosidade e dos esforços de corte.

Ainda sobre o assunto, Bianchi *et al.* (1996), afirmam que o aumento na profundidade de corte provoca um aumento no número de grãos ativos e também no tempo de contato entre a peça e o rebolo. Isso faz com que cada grão abrasivo remova uma quantidade menor de material, sendo assim a temperatura é elevada durante o processo.

2.3.2. Comprimento de contato (l_c)

Segundo Silva Neto (2012), o comprimento de contato define sua extensão entre a peça e o rebolo, podendo ser calculado apenas considerando a geometria dos elementos em contato. Marinescu *et al.* (2007), equacionam o comprimento de contato conforme a Equação (6).

$$l_c = (a \cdot d_e)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

Em que: l_c = comprimento de contato (mm);

a = profundidade de retificação (mm);

d_e = diâmetro equivalente (mm).

O comprimento de contato não considera os movimentos e deformações envolvidas. Dessa forma, ele descreve como uma área aparente de contato entre a peça e o rebolo e, com isso, esse parâmetro pode ser descrito como comprimento de contato estático.

2.3.3. Diâmetro equivalente (d_e)

King & Hahn (1992), inferem que a diferença de curvatura entre a peça e o rebolo influencia no comprimento de contato. Além disso, a diferença de curvatura entre a retificação cilíndrica externa e interna pode ser relacionada, segundo Guo & Malkin (2000), com a retificação plana através do diâmetro equivalente (d_e), conforme a Equação (7).

$$d_e = \frac{d_s}{1 \pm \left(\frac{d_s}{d_w}\right)} \quad (7)$$

Em que: d_s é diâmetro do rebolo (mm)

d_w é diâmetro da peça (mm)

No que se refere à equação (6), Anderson *et al.* (2008) apresentam que a remoção de cavaco e a subsequente geração de calor ocorrem ao longo do comprimento de contato. No caso do processo de retificação plana, o diâmetro da peça (d_w) deve ser considerado infinito e, portanto, $d_e = d_s$. Ainda, segundo esse autor, a curvatura oposta do rebolo e da peça diminui

(lc) na retificação cilíndrica externa de mergulho, assim apresenta o menor comprimento de contato comparado às outras variações de processo.

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

De acordo com Malkin (2008), a espessura equivalente de corte (h_{eq}) é definida como a relação que envolve a taxa de remoção específica de material (Q_w), a velocidade de movimento relativo da peça e velocidade de corte (V_s). No caso da retificação cilíndrica, essa relação é dada pela Equação (8).

$$h_{eq} = \frac{Q_w}{v_s} = \frac{\pi \cdot d_w \cdot v_f}{60 \cdot 1000 \cdot v_s} \quad (8)$$

Em que: h_{eq} (mm).

Silva Neto (2012) apresenta que parâmetro de espessura equivalente é o que melhor caracteriza o processo de retificação, pois engloba as três importantes características do processo (v_s , v_f , d_w). Nessa tocante, Malkin (1989), afirma que a velocidade de corte é responsável pela “dureza dinâmica” do rebolo. Dessa forma, sua elevação proporciona o aumento do número de grãos ativos num mesmo intervalo de tempo, provocando a diminuição da força de tangencial de corte. Marinescu *et al.* (2004), relatam que esse parâmetro não considera o espaçamento dos grãos do rebolo. Dessa forma, fica evidente que o comportamento da retificação está intimamente relacionado com a combinação da espessura equivalente de corte e a densidade das arestas de corte. Malkin (1989), por sua vez afirma que a espessura equivalente de corte está diretamente relacionada a variáveis envolvidas no processo como a rugosidade e topografia do rebolo.

2.3.5. Velocidade de corte ou periférica do rebolo (v_s)

Segundo Winter (2014), velocidade de corte ou velocidade periférica do rebolo (v_s), consiste no deslocamento de um ponto na superfície de corte do rebolo em um determinado espaço de tempo. Dessa forma, a velocidade de corte não só influencia a vida útil do rebolo, como também altera a capacidade de remoção de grãos abrasivos, o que consiste em influências ao acabamento superficial do componente, rugosidade, tensão residual, vibrações, dentre outros.

A velocidade do rebolo pode ser calculada Equação (9).

$$VS = \frac{\pi.ds.ns}{60.100} \quad (9)$$

Em que: n_s (rotação por minuto).

Jackson *et al.* (2001), constataram que o aumento na velocidade do rebolo, proporcionou uma melhor qualidade superficial final da peça e menor desgaste da ferramenta abrasiva, contudo contribui para o aumento na geração de calor. Bianchi *et al.* (1996) explicam esse fenômeno pelo fato de que um único grão abrasivo passa a remover um menor volume de cavaco quando a velocidade de corte é aumentada. Dessa forma, os autores apresentam que isso ocorre em função da maior frequência de contato do rebolo com a peça, ocorrendo uma menor espessura dos cavacos removidos, a uma velocidade de corte constante. Com isso, as forças de corte são reduzidas, assim como as solicitações de cada grão abrasivo, que aumentam a dureza dinâmica do rebolo. Entretanto, a temperatura se eleva no processo e, conseqüentemente, ocorre um aumento da potência de corte consumida.

2.3.6. Velocidade da peça (V_w)

Segundo Silva Neto (2012), essa velocidade representa a velocidade periférica da peça. De acordo com Graf (2004), a velocidade da peça (V_w) pode ser determinada em função do diâmetro e rotação da mesma, sendo assim expressada pela equação (10).

$$VW = \frac{\pi.dw.nw}{60.1000} \quad (10)$$

Em que: n_w = rotação da peça (RPM).

Graf (2004) comenta ainda que o aumento da velocidade da peça (V_w) implica na taxa de remoção de material, gerando cavacos mais espessos e aumentando a carga sobre cada grão. Dessa forma, obtêm-se valores mais elevados de força tangencial de corte.

2.3.7. Velocidade de mergulho (V_f)

A velocidade de mergulho (V_f) corresponde à taxa com que o rebolo avança sobre a peça, sendo também definida como velocidade de avanço (MARINESCU *et al.* 2004).

Dessa forma, Baldo (1994), defende que no início do processo de retificação ou desbaste, remove-se cerca de 95% do material da peça, à uma velocidade de mergulho que deve estar entre 0,4 a 2,0mm/min. Para o acabamento, a velocidade de mergulho deve cair e estar entre 0,1 a 0,3mm/min.

2.3.8. Taxa de Remoção de Material (Q_w)

De acordo com 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. Nesse sentido, Malkin (1989), apresenta que durante o processo de retificação, a taxa de remoção de material (Q_w) é um parâmetro determinado pela profundidade de corte (a), pela velocidade relativa entre a peça e o rebolo (V_w) e pela largura de retificação (b). Dessa forma, Demirci *et al.* (2008) apresenta em seu trabalho a seguinte relação, apresentada na Equação (11).

$$Q_w = \pi \cdot d_w \cdot v_f \cdot b \quad (11)$$

Em que: Q_w (mm^3/s);

b = largura de retificação (mm).

Segundo Malkin (1989), é possível se obter a taxa específica de remoção de material (Q_w'), ao dividir a taxa de remoção de material (Q_w) pela largura de retificação (b). Dessa forma, temos a seguinte Equação (12).

$$Q_w' = \pi \cdot d_w \cdot v_f \quad (12)$$

Em que: Q_w' = taxa de remoção de material específica ($\text{mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$).

Malkin (2008) comenta que a taxa de remoção específica de material Q_w' , é possível avaliar a produtividade de um processo de retificação. Isso é possibilitado, pois Q_w'/v_s

corresponde à espessura equivalente de corte (h_{eq}), apresentada na Equação (8). Este parâmetro de espessura equivalente de corte está diretamente relacionado ao comportamento do processo de retificação em função das variáveis envolvidas como: força de corte, rugosidade, topografia da ferramenta, dentre outras.

2.4. Rebolo

De acordo com Cai e Rowe (2002) e Malkin (1989), os rebolos consistem de grãos abrasivos ligados por uma matriz aglomerante. Além desses dois componentes, há a presença da porosidade para acomodar os cavacos e transportar os fluidos de corte. Os autores ainda comentam que os grãos abrasivos são arestas cortantes com geometria indefinida, sendo que cada um promove a remoção do material de maneira simultânea. A Figura 2.7 apresenta as constituintes do rebolo.

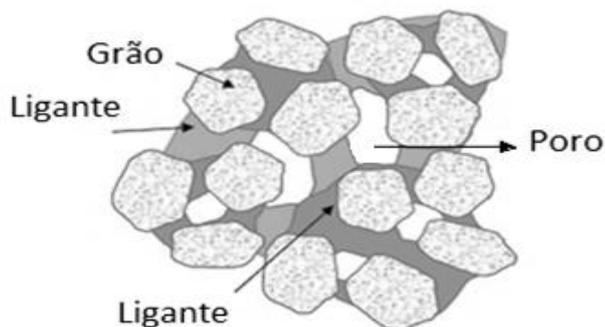


Figura 2.7. Principais constituintes do rebolo (WEBSTER & TRICARD, 2004).

Segundo Malkin (1989), o desempenho do rebolo está diretamente relacionado a três importantes características: tipo e tamanho do grão abrasivo, propriedades abrasivas do material aglomerante e porosidade do conjunto.

Para Shaw (1996), os grãos abrasivos são partículas refratárias duras e frágeis, sendo possíveis de serem classificadas de acordo com sua dureza ou composição química. No que se refere ao rebolo como um todo, Nguyen & Butler (2005), afirmam que estes são frequentemente caracterizados pela densidade de seus grãos abrasivos e pelas suas arestas de corte.

No que diz respeito ao desgaste do rebolo, Badger (2009), lista três diferentes regimes: por atrito devido à força normal e tangencial e aumento de energia, fratura do ligante e fratura do grão, sendo que ambas estão relacionadas à auto afiação do rebolo. Nesse sentido, em relação

à remoção de material, Krueger *et al.* (2000), destacam que um parâmetro muito importante é a relação “G”, esse parâmetro é uma medida de quanto volume de material é removido da peça por unidade de volume de rebolo gasto. Este autor ainda afirma que essa relação mede a eficiência do rebolo.

De acordo com Marinescu *et al.* (2007), a relação “G” está representada pela Equação (13).

$$G = \frac{Z_w}{Z_s} \quad (13)$$

Em que: Z_w = volume de material removido da peça (mm³);

Z_s = volume de rebolo gasto (mm³).

2.4.1. Rebolo de Óxido de Alumínio (Al₂O₃)

O primeiro óxido de alumínio sintético foi co-produzido pelo processo de eletro fusão da bauxita por um funcionário da empresa Ampere Electro-Chemical em 1900, Charles Jacobs. O óxido de alumínio é o mais duro entre os óxidos, sendo assim possível de ser encontrado no mercado em diversas formas e tamanhos (SHAW, 1996).

Segundo Nascimento (2014), na atualidade, o óxido de alumínio é o abrasivo convencional mais empregado nas operações de retificação. Essa grande importância na indústria se deve ao fato de que esses abrasivos convencionais foram desenvolvidos para atender às variadas exigências das operações de retificação, além do fato de que apresenta alta resistência relativa ao impacto, o que possibilita ser empregado na retificação de materiais ferrosos.

Marinescu (2007) considera que o óxido de alumínio possui uma estrutura cristalina muito grande, nesse sentido um grão abrasivo somente pode conter até três cristais em sua microestrutura. Essa característica pode resultar na perda total quando o grão é fraturado, assim apresenta baixa eficiência no processo.

Quanto a sua classificação, Jackson e Mills (2001), classificam os grãos de óxido de alumínio em categorias de acordo com sua composição química, sendo elas: alumina, alumina semi-friável, alumina branca, alumina rosa e sol-gel.

No caso do óxido de alumina, existem diversos tipos em função do seu processo de formação e da sua composição química. A característica geral a todas essas possíveis

variações é a baixa condutividade térmica, que atua como um fator limitante no processo de retificação (MARINESCU *et al.*, 2004).

Considerando-se que este abrasivo é artificial, no que tange à sua fabricação, Salmon (1992), relata as seguintes duas etapas iniciais: extração do óxido hidratado de alumínio e calcinação do mesmo. Em seguida, o óxido é misturado ao coque e levado ao forno. Saindo do forno, o material é armazenado e esfriado por alguns dias. Na sequência, moído e lavado. Devido à caracterização desse processo de fabricação, o óxido é conhecido como óxido de alumínio fundido. Quanto ao seu parâmetro de resistência ao desgaste (a dureza), este autor ainda afirma que este cresce conforme sua pureza aumenta.

De acordo com Salmon (1992), em relação a sua aplicabilidade na indústria, pode-se ressaltar que o óxido de alumínio fundido é usado maciçamente para usinar ligas de baixa usinabilidade e altas ligas de aço. O autor ainda coloca que existem diferentes modos de modificar sua dureza, friabilidade e tipo de ligante (material aglutinante que age na aglomeração dos grãos), alterando-se as suas propriedades. Dentre os modos de alteração das propriedades, é possível destacar: tratamento térmico com sílica, que proporciona adesão do ligante resinoide ao grão; tratamentos térmicos, como adição de elementos de liga, que aumentam a friabilidade dos grãos, entre outros.

Para concluir o processo, o material é moído e triturado, formando-se os grãos. Ademais, com o objetivo de aumentar propriedades como dureza, friabilidade, tenacidade, entre outros, os autores ainda afirmam que são incorporadas impurezas à solução inicial em até 15%, podendo ser dióxido de magnésio, titânio, magnésia e zircônia.

De acordo com Salmon (1992) e quanto a sua aplicação na indústria, pode-se destacar que os rebolos de sol-gel são mais utilizados na retificação robusta. O rebolo possui um alto nível de corte e ação agressiva, que é resultado da combinação da cerâmica com o óxido de alumínio fundido. Dessa forma, é produzido um rebolo mais adequado à retificação de ultra-precisão, pois garante qualidade geométrica, dimensional e maior vida útil a ferramenta. Além do mais, a friabilidade do óxido de alumínio fundido ainda acrescenta as propriedades do grão de sol-gel.

Para concluir, Malkin (1989) afirma que quando uma operação de retificação é realizada com rebolo convencional, no caso do óxido de alumínio, à medida que se eleva a relação “G”, maiores esforços ocorrem produzindo, conseqüentemente, uma geração excessiva de energia térmica na região de corte, embora uma aplicação adequada de fluido de

corte reduza as temperaturas e conseqüentemente os esforços envolvidos. Isso possibilita inferir que a utilização do fluido de corte pode ampliar a relação “G”.

2.5. Dressagem

De acordo com Srivastava (2013), o processo de dressagem consiste na criação e a exposição de novas arestas de corte na superfície do rebolo, sendo definida basicamente como uma operação que é realizada no rebolo com o propósito de reestabelecer a capacidade de corte da ferramenta. Aurich *et al.* (2013) afirmam que além do perfil necessário do rebolo no processo de retificação, o processo de dressagem também deve produzir um perfil apropriado. Dessa forma, o perfilamento do rebolo influencia diretamente: a rugosidade da superfície da peça de trabalho, a camada superficial do rebolo, o desgaste da camada abrasiva e o volume de poro. O autor preconiza que o processo de perfilamento deve permitir terminantemente um processo de retificação o mais consistente possível, no que se refere ao desgaste do rebolo. Para tal, os aspectos de dressagem incluem:

- Eliminar desvios de forma específica ou retidão;
- Obter uma superfície de corte afiada e uma distribuição aleatória uniforme das arestas de corte;
- Remover a camada de abrasivo que está ocupada com o material da peça de trabalho, promovendo a limpeza do rebolo.

Quanto aos tipos de dressadores, para Marinescu *et al.* (2006), existem dois tipos básicos: as ferramentas estacionárias e as rotativas. No caso dos estacionários, estes podem ser compreendidos por dressadores estáticos de ponta única e conglomerado (ROWE, 2014).

De acordo com Marinescu *et al.* (2007), o primeiro consiste basicamente em um diamante preso a uma haste metálica, sendo este exposto de forma parcial, aproximadamente um terço de sua altura. Segundo o mesmo autor, o segundo são formados por um aglomerado de diamantes em uma liga metálica, permitindo maior durabilidade e vigor nas operações de dressagem.

Jackson *et al.* (2007) apresentam que somente 10% do rebolo é realmente gasto no processo de usinagem do material. Cerca dos 90% do rebolo que é gasto é consumido no processo que forma uma superfície particular na superfície do rebolo, a dressagem. Segundo esses mesmos autores, esse processo de afiação do rebolo é de suma importância, à medida que o processo de retificação ocorre, também entra em ação o fenômeno de arredondamento

das arestas de corte dos grãos abrasivos do rebolo. Os autores também alertam para processo de empastamento da ferramenta abrasiva, assim os poros ficam ocupados de cavacos oriundos do material que está sendo usinado, isso faz com que o rebolo perca o seu poder de corte e a qualidade superficial final da peça de trabalho seja prejudicada.

Sobre a topografia da superfície do rebolo, Saleh *et al.* (2009), apontam que alguns parâmetros que estão relacionados às arestas de corte e suas distribuições que influenciam diretamente as suas propriedades estáticas mais importantes, dentre esses parâmetros estão: afiação, largura e densidade (o número de arestas de corte ativas por unidade de área da superfície do rebolo). Por tal motivo, é necessária a realização da operação de dressagem, que recupera a topografia do rebolo com uma nova superfície ativa de corte, caso seja tardia, pode ocorrer o surgimento de queimas na superfície, trincas e fabricação de peças fora da rugosidade superficial especificada.

2.6. Fluido de corte

De acordo com Tawakoli *et al.* (2009), os fluidos de corte são descritos como os líquidos refrigerantes utilizados no processo de usinagem, sendo responsáveis por resfriar e lubrificar o processo. Rowe (2014) lista os propósitos para a utilização de fluidos de corte:

- Lubrificação mecânica;
- Lubrificação químico-física;
- Lubri-refrigeração na área de contato;
- Os cavacos são arrastados e retirados da zona de contato peça-rebolo;
- Limpeza do rebolo;

Estes autores, contudo, apontaram infelizmente, os aspectos negativos dos fluidos de corte em usinagem, destacando-se principalmente riscos à saúde do operador de máquina, ao meio ambiente com a poluição devido ao descarte e aos gases emitidos, além da possibilidade de explosão (no caso em que há utilização de óleos minerais). Stanford & Lister (2002) salientaram que o surgimento de leis trabalhistas e ambientais mais rígidas e complexas, fazendo com que as empresas na época buscassem reduzir seu consumo de fluidos de corte, além de procurarem e desenvolverem métodos eficazes que permitam a reutilização desses fluidos. Com isso, ocorreu a redução significativa de sua utilização nos processos de usinagem. Este autor também destacava que estas supostas alternativas de otimização do seu

uso, deveriam atender aos requisitos de qualidade da peça, sem deixar de considerar a importância em diminuir a agressividade à saúde dos operadores e ao meio ambiente.

Para Umeda *et al.* 2012, os meios de produção estão procurando adequar-se, cada vez mais, aos padrões de sustentabilidade, mais conscientes do ponto de vista ambiental. Seguindo essa tendência, a sustentabilidade dos processos abrasivos conta com considerável esforço de pesquisas científicas (AURICH *et al.*, 2013). A Figura 2.8, representa a técnica da aplicação do fluido de corte em abundância.

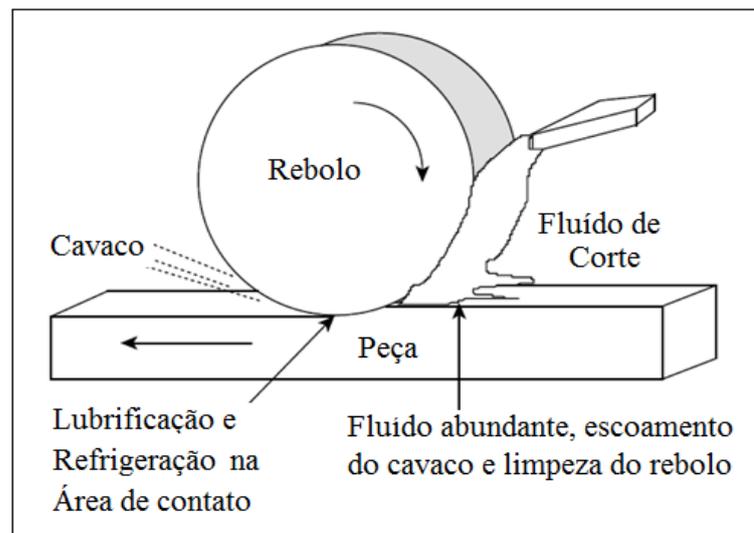


Figura 2.8. Função do fluido de corte (Adaptado de ROWE, 2014).

Apesar das ressalvas feitas em relação aos riscos da utilização dos fluidos de corte, Sokovic e Mijanovic (2001), preconizaram que a sua utilização nas operações do processo de retificação possibilita aumento significativo da produtividade, por permitir utilizar maiores velocidades e taxas de remoção, e reduzir os custos de fabricação. Os autores também advertem sobre a escolha do fluido de corte adequado à operação a se realizar, sendo primordial a escolha conforme o material que se vai usinar e a ferramenta abrasiva, uma vez que esse fluido traz benefícios como prolongamento da vida útil da ferramenta, redução dos valores de rugosidade superficial, diminuição das forças de corte, elevação do grau de precisão da peça, com a diminuição dos erros dimensionais e geométricos.

Desse modo, a escolha correta do sistema de lubri-refrigeração é essencial no processo de retificação, uma vez que se tratando de um processo onde a geração de calor é elevada, a redução da temperatura na zona de corte é de fundamental importância para que a qualidade superficial não fique prejudicada e ocorram elevados erros dimensionais e geométricos na peça de trabalho. Além disso, os fluidos de corte também apresentam propriedades

anticorrosivas que preservam da oxidação a peça e a máquina-ferramenta (TAWAKOLI *et al.*, 2009).

No que diz respeito às elevadas temperaturas geradas na zona de contato peça-rebolo, Malkin e Guo (2008), afirmam que estas são causadas em função de um alto consumo de energia em retificação. Em teoria, toda essa energia é dissipada na região de corte, onde ocorre interação entre rebolo e peça, gerando altas temperaturas, podendo surgir vários tipos de danos térmicos, tais como queima da peça, transformação de fase da estrutura, alteração da dureza superficial, tensão residual superficial desfavorável, trincas na peça e no rebolo e redução da resistência à fadiga.

De acordo com Barczak *et al.* (2010), o controle da geração de calor se faz absolutamente necessário no processo de retificação para a qualidade e integridade térmica da peça final. O atrito gera a deformação elástica e remoção de cavaco e as temperaturas na zona de corte que podem atingir 1800°C. Os autores relataram que esta solicitação térmica tem duração de poucos milissegundos, sendo proporcional à velocidade de corte. Eles concluem, portanto, com a informação de que na indústria, o método mais empregado para aplicação de fluido de corte é pela técnica convencional, no qual o fluido lubrificante ocorre com abundância na área de corte entre 250 e 700 l/h.

2.6.1. Tipos de Fluidos de Corte

Para Irani *et al.* (2005), os fluidos de corte são classificados em quatro diferentes categorias em função de sua composição, sendo sintéticos, semi-sintético, óleos emulsionáveis e óleos minerais, nos quais os óleos utilizados podem ser sintéticos ou minerais, Rowe (2014) apresenta as composições dos três primeiros conforme a Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Composição típica dos fluidos a base de água

Fluido	% Concentração da Composição					Diluição com água
	Óleo Mineral	EP/Aditivos Lubrificantes	Emulsificadores	Reagentes	Inibidores de corrosão	
Óleos emulsionáveis	50 - 80	0 - 10	10 - 40	0,5 - 3	0 - 10	1:40 - 1:80
Semi-sintéticos	5 - 30	0 - 10	Acima de 50	0,5 - 3	0 - 10	1:50 - 1:80
Sintéticos	Acima de 5	—	0 - 40	0,5 - 3	Acima de 40 - 1:200	1:10

Fonte: adaptado de ROWE, 2014.

Esses estudos revelaram que os óleos integrais apresentam vantagens quanto ao acabamento superficial e desgastes do rebolo. No caso da alumina, foram comparados os desempenhos de óleo mineral e uma emulsão. Segundo Tönshoff *et al.* (1999), o óleo mineral resultou em melhor rugosidade superficial, que se deve à sensibilidade da alumina ao choque térmico e também pelo fato de que a emulsão apresenta maior capacidade calorífica, gerando gradientes de temperatura, tensões térmicas e, por consequência, fraturas frágeis.

Nesse sentido, Barczak (2010), afirma que é imprescindível o controle da geração de calor na retificação, uma vez que a qualidade da peça gerada é assegurada pela integridade térmica. Os autores destacam que, na atualidade, o controle da geração de calor está intimamente relacionado à escolha adequada do fluido de corte, uma vez que este é responsável pela redução de calor na peça de trabalho por meio de lubri-refrigeração por convecção. Dessa forma, é evidente que a eficiência da lubri-refrigeração do fluido de corte utilizado exerce forte influência no desempenho final do processo de retificação. Como é notável a grande importância da escolha adequada do óleo. Na Tabela 2.2 são mostradas as principais características de cada tipo.

Tabela 2.2. Características dos principais tipos de fluidos de corte utilizados nas indústrias

Tipo de fluido	Sintético	Semi-sintético	Óleo emulsionável	Óleo mineral
Características				
Calor removido	Excelente	Ótimo	Bom	Ruim
Lubrificação	Ruim	Bom	Ótimo	Excelente
Manutenção	Ótimo	Bom	Ruim	Excelente
Filtrabilidade	Excelente	Ótimo	Bom	Ruim
Danos-Meio ambiente	Excelente	Ótimo	Bom	Ruim
Custo	Excelente	Ótimo	Bom	Ruim

Fonte: adaptado de WEBSTER, 1995.

2.6.1.1. Fluidos solúveis em água

De acordo com El Baradie (1996) óleos solúveis são misturas de óleos minerais com emulsificantes. Após esta mistura adicionada a água, ocorre a dispersão de gotículas oleosas na fase aquosa, de modo a produzir uma emulsão óleo em água. De forma mais aprofundada, Runge e Duarte (1990) relatam que os fluidos de corte solúveis são compostos, geralmente,

por emulgadores, acopladores, materiais anticorrosivos, biocidas, aromas e corantes, antiespumantes, enxofre como agente de extrema pressão, fósforo como aditivo antidesgaste, cálcio, matérias graxas, combinações de aditivos antidesgaste. Na Tabela 2.3 são apresentadas as composições e algumas propriedades.

Tabela 2.3. Principais tipos de fluidos de corte e suas principais propriedades e composições

FLUIDOS DE CORTE					
Classificação	Integrais	Solúveis em Água			Gases
		Emulsões óleos emulsificáveis	Semi-Sintéticos	Sintéticos	
Principais Composições	Óleos minerais	Água	Água	Água	Ar
	Óleos graxos	Óleo Mineral	Óleo Mineral	Sais	Argônio
	Cloro	Emulsificantes	Elementos orgânicos e inorgânicos	Inorgânicos	Hélio
	Enxofre	Cloro	Cloro	Enxofre	Nitrogênio
	Fósforo	Enxofre	Cloro	Biocidas	Gás
Principais Propriedades		Glicol	Enxofre	Agentes	Carbônico
		Biocidas	Biocidas	Umectantes	
	Lubrificação	Refrigeração	Refrigeração	Refrigeração	Anti-oxidação
	Extrema-Pressão	Extrema-Pressão	Extrema-Pressão	Extrema-Pressão	Usinagem a seco
	Anticorrosão	Anti-oxidação	Anti-oxidação	Anti-oxidação	
		Anticorrosão	Anticorrosão		
		Lubrificação	Lubrificação		
		Lavagem			

Fonte: adaptado de El BARADIE, 1996.

Para El Baradie (1996), a água é um dos meios refrigerantes mais utilizados pelo fato de apresentar alto calor específico, elevada condutividade térmica e alto calor de vaporização. Dessa forma, quando misturados com a água, os fluidos solúveis refrigeram e lubrificam moderadamente as operações para remoção de metal que apresentam altas velocidades, alta geração de calor e baixas pressões. O mesmo autor ainda apresenta que os fluidos solúveis em água são classificados da seguinte forma óleos emulsificáveis (óleos solúveis), fluidos químicos (sintéticos) e fluidos semi-químicos (semi-sintéticos). A Figura 2.9, mostra esta classificação dos fluidos de corte solúveis em água, além dos tipos derivados de cada classe.



Figura 2.9. Classificação dos fluidos solúveis em água (Adaptado de EL BARADIE, 1996).

2.6.1.2. Óleos emulsificáveis ou emulsões

Uma emulsão é definida como a suspensão de gotículas de óleo em água, sendo produzidas através de uma mistura de óleo com a utilização de agentes emulgadores e acopladores. Mais especificamente, estes agentes são emulsificantes que quebram o óleo em minúsculas partículas, mantendo-as dispersas na água por longos períodos (El BARADIE, 1996). Ainda segundo Runge e Duarte (1990), faz-se necessária a presença de emulgadores, uma vez que a estabilização das emulsões de óleo solúvel depende de materiais tenso ativos, que formam na superfície de cada gotícula de óleo, uma carga negativa para a sua dispersão na água. As cargas elétricas são iguais em todas as gotículas, dessa forma ocorre repulsão entre elas e a estabilidade da emulsão, evita-se a coalescência, ou seja, a união das gotículas de óleo e separação da fase oleosa da aquosa.

Se algum fenômeno influir sobre essas cargas elétricas, ocorre instabilidade das emulsões (RUNGE e DUARTE, 1990). A separação das duas fases, mesmo que por um intervalo de tempo exíguo, restringe o uso da emulsão como fluido de corte, pois este terá reduzida sua capacidade de lubrificação (BATALLER *et al.*, 2004)

Com a adição de óleos graxos (animal ou vegetal) ou outros ésteres, são produzidas emulsões muito gordurosas que apresentam enorme valor lubrificante, ademais, a adição de

enxofre, cloro ou fósforo produz um fluido com valor lubrificante maior ainda, chamado de emulsão de extrema pressão (SILLIMAN, 1992).

Assim como relata Bataller *et al.* (2004), as emulsões são, geralmente, obtidas por meio da diluição de um fluido de corte concentrado em água, adequando-se para cada tipo de operação de usinagem determinada concentração. O concentrado deve ser estável, não viscoso e apresentar uma aparência monofásica, sendo este produzido a partir de óleos emulsionáveis fornecidos e misturados com a água. Esta mistura pode variar de 1:100 até 1:5 partes de óleo para água.

Segundo El Baradie (2006), as emulsões não somente apresentam propriedades lubrificantes, como também anticorrosivas do óleo que se combinam às propriedades refrigerantes da água. Desse modo, devido à presença da água ocorrem corrosão e a contaminação, que são controladas pela incorporação, respectivamente, de aditivos anticorrosivos e bactericidas.

As emulsões com propriedades lubrificantes são aplicadas com maior eficiência em operações de corte que envolve altas velocidades, baixa pressão e considerável geração de calor. Dessa forma, as emulsões podem ser empregadas em praticamente todas as operações de corte leves e moderadas e também na maioria das operações pesadas, salvo aquelas que incluem materiais extremamente difíceis de usinar (El BARADIE, 1996).

2.6.1.3. Fluidos químicos ou sintéticos

Para Novaski (2002), os fluidos químicos ou fluidos sintéticos são totalmente isentos de óleo de natureza vegetal ou mineral, esse tipo de fluido também é chamado de solução verdadeira e quando é misturado com água, a separação é impossível devido à sua miscibilidade em água. De acordo com El Baradie (1996), em relação a sua composição, os fluidos químicos ou sintéticos são soluções químicas formadas por substâncias inorgânicas e outros materiais, dissolvidos em água, apresentando propriedades refrigerantes e, alguns deles, também lubrificantes. Estes fluidos são classificados como fluidos de corte solúveis em água (RUNGE e DUARTE, 1990).

Quanto à sua composição química, El Baradie (1996) descreve que esses fluidos podem apresentar substâncias inorgânicas tais como boratos, molibdatos e fosfatos que inibem a corrosão e reagem às propriedades da água e também apresentam substâncias orgânicas, tais como aminas e amidas para proteção suplementar anticorrosão, sabões e

agentes umectantes, para melhorar a lubrificação e reduzir a tensão superficial. Além disso, não somente álcoois complexos são incorporados como agentes umectantes, mas também compostos de cloro, fósforo e enxofre são utilizados para a lubrificação e para controlar o crescimento de bactérias. Dessa forma, com a presença desses últimos compostos, Novaski & Rios (2004), relatam que os fluidos sintéticos apresentam elevada estabilidade microbiológica, não sendo necessário serem periodicamente descartados por contaminação por bactérias.

2.6.1.4. Fluidos semi-sintéticos

Segundo a definição dada por El Baradie (1996), os fluidos semi-sintéticos nada mais são que uma combinação de fluidos sintéticos e óleos solúveis em água. Desse modo, esses fluidos são emulsões químicas que apresentam baixa quantidade de óleo mineral emulsificável, 5 a 30% de fluido básico. Assim forma-se uma solução translúcida estável que, com adição de EP podem ser aplicados na lubrificação, na usinagem mais pesada.

Os fluidos semi-sintéticos apresentam alto teor de emulgadores, formando-se glóbulos de óleo menores, resultando em emulsões translúcidas que faz com que sejam confundidas com soluções. Ademais, esse tipo de fluido apresenta propriedades umectantes e lubrificantes, além de baixo potencial de corrosão e de ataque bacteriano. No que se refere às propriedades de umectação, eles as apresentam melhores que os óleos solúveis convencionais, o que permite se trabalhar em velocidades e avanços mais altos. Os fluidos semi-sintéticos possuem propriedades de decantação e de limpeza em função do teor de detergentes que apresentam, proporcionando, dessa maneira, vida útil mais longa aos sistemas de refrigeração (RUNGE e DUARTE (1990).

Para El Baradie (1996), os fluidos semi-sintéticos combinam as melhores qualidades dos fluidos sintéticos e dos óleos emulsificáveis. Porém de acordo com Irani *et al.* (2005), por possuírem menos óleos minerais em comparação aos fluidos de cortes solúveis.

2.6.2. Custos dos fluidos de corte no processo

De acordo com Sanchez *et al.* (2010), os custos com lubri-refrigeração representam aproximadamente 18% do custo total com a manufatura, como mostra a Figura 2.10.

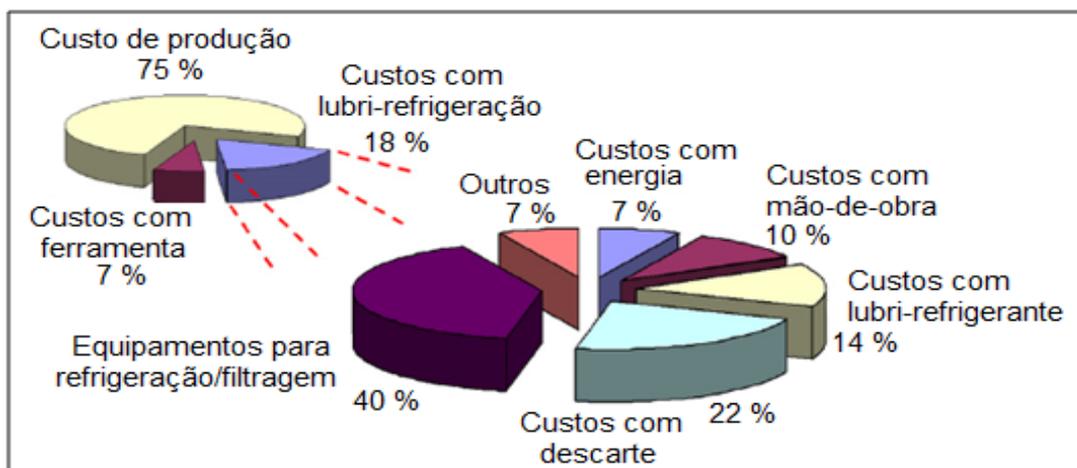


Figura 2.10. Distribuição dos custos da lubri-refrigeração no processo de usinagem na indústria automotiva (Adaptado de SANCHEZ *et al.* 2010).

Sanchez *et al.* (2010) salientam que os custos efetivos com os fluidos lubri-refrigerantes são menos aparentes, enquanto os maiores custos da lubri-refrigeração estão relacionados aos equipamentos para a refrigeração e filtragem. Sobretudo, os altos custos intrínsecos ao complicado processo de descarte são perceptíveis. Nesse sentido, a redução da quantidade de fluido utilizada no processo de usinagem é substancial, gerando iminentes benefícios econômicos e ambientais.

Em relação à energia gasta no processo de produção, 38% da energia consumida durante o processo de usinagem está relacionada direta ou indiretamente com o uso de fluido de corte convencional, ficando ainda mais evidente não somente a influência causada pelo uso do fluido de corte no custo final do processo de manufatura, mas também os impactos ambientais.

A Figura 2.10 apresenta os principais pontos dos custos relacionados à lubri-refrigeração, ficando clara essa distribuição, tornando-se um ótimo indicador para tomada de ações quanto à aplicação de novas técnicas para o uso do fluido de corte.

2.6.3. Manuseio, manutenção e descarte do fluido de corte

O monitoramento e a manutenção da qualidade do fluido são dois elementos de extrema importância para o êxito do processo de redução do consumo de fluidos de corte na fonte. Os importantes aspectos que envolvem o monitoramento são inspeções do sistema, medidas e ajustes periódicos dos parâmetros (como a concentração, o pH e o crescimento

microbiológico), a correção apropriada de biocidas, a remoção de óleo contaminante e dos cavacos.

No que diz respeito a sua estocagem, Silliman (1992) aborda que o controle de qualidade dos fluidos de corte se inicia com justamente boas condições de estocagem, sendo que a temperatura é um parâmetro a ser observado, sendo que as temperaturas extremas precisam ser evitadas. Ademais, os fluidos de corte solúveis em água requerem mais cuidados na estocagem do que os óleos integrais em razão da complexidade da composição química dos fluidos emulsificáveis, que são mais suscetíveis às mudanças físicas resultantes das temperaturas extremas de estocagem.

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

Contudo, estudos apontam que através da utilização da técnica da aplicação do fluido de corte pelo método MQL, apresentou uma queda considerável na redução dos resíduos e na manutenção do sistema, sendo essa uma proposta que contribuirá ao meio ambiente, consequentemente, atendendo às leis e ao decreto das políticas de educação ambiental.

2.6.3.1. Problemas devido à aplicação dos fluidos de corte

Embora as vantagens tecnológicas que os fluidos de corte geram aos processos de usinagem, atualmente muito se questionam quanto aos efeitos nocivos que eles trazem. Como são constituídos no geral por substâncias tóxicas, que tem por função de garantir maior vida útil de operação aos processos. Entre as substâncias constituintes estão os anticorrosivos e biocidas, elementos esses que estão descritos em detalhes Tabela 2.3. Essas substâncias causam prejuízos à saúde humana onde as pessoas podem entrar em contato com tais substâncias através da inalação da névoa dos fluidos, do contato pela pele, ou até por ingestão de pequenos fragmentos. Consequências ocorrem no decorrer do tempo, por meio de sintomas de alergias e perturbações no sistema respiratório. Tais distúrbios são devidos aos metais pesados integrantes na composição.

Com o avanço das pesquisas direcionadas à aplicação do fluido de corte pelo método MQL, estas vem proporcionando alternativas para melhorias no processo de usinagem, minimizando a utilização de grandes quantidades de fluidos. Segundo Pusavec *et al.* (2014),

os riscos à saúde e ao meio ambiente são significativamente reduzidos devido ao fato de se diminuir o volume de óleo utilizado no processo na ordem de 1.000 vezes e, em alguns casos, em 10.000 vezes. Nesse sentido, leis ambientais estão cada vez mais rígidas, exigindo-se providências no que se refere à redução do impacto ambiental nos processos produtivos, apontando como uma potencial vantagem, a curto e longo prazo, a redução do uso dos fluidos de corte nos processos de fabricação.

Leis estão vigentes na constituição federal para assegurar a todos os brasileiros que tenha direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem como o uso comum da população e essencial à qualidade de vida, impondo-se ao poder público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para os presentes e futuras gerações (Art. 225. Constituição Federal, 1988). A mesma constituição estabelece neste mesmo artigo, parágrafo 3º, que “As condutas e atividades consideradas lesivas ao meio ambiente sujeitarão os infratores, pessoas físicas ou jurídicas, a sanções penais e administrativas, independentemente da obrigação de reparar os danos causados”.

Dessa forma, quanto ao ponto de vista da lei, a resolução CONAMA nº 23/96, art. 11, apresenta uma relação de resíduos a serem controlados por classe e periculosidade, como demonstradas na Tabela 2.4 através do anexo 1-B.

Tabela 2.4. Identificação do óleo de corte como resíduo perigoso anexo 1 – B resíduos perigosos - classe I de fontes não específicas (Anexo A da NBR-10.004/87).

Indústria	Código do Resíduo Perigoso	Resíduo Perigoso	Código de Periculosidade
Genérica	F 30	Óleo usado incluindo os de uso: - lubrificante (motores, engrenagens, turbinas), com fluido hidráulico (incluindo aquele usado em transmissão), - no trabalho com metais (incluindo para corte, polimento, usinagem, estampagem, resfriamento e cobertura) e - óleo usado em isolamento ou na refrigeração em que seja contaminado.	(T)
Nota: (T) Tóxico, (I) Inflamável, (R) Reativo, (E) altamente tóxico			

Fonte: Adaptado da RESOLUÇÃO CONAMA nº 23, de 12 de dezembro de 1996, Publicada no DOU no 13, de 20 de janeiro de 1997, Seção 1, pág. 506.

A Figura 2.11 apresenta a esquematização do fluxo dos processos de fabricação que representam as entradas que são constituídas pelos trabalhadores, conhecimento técnico, materiais (peças e conjuntos), energia e água, resultando nas saídas de produtos, resíduos diversos e serviços. Esses processos não são limpos de forma adequada, além de liberarem substâncias que contaminam o meio ambiente, estão relacionados com problemas que nem sempre são solucionados pelos processos de fabricação.

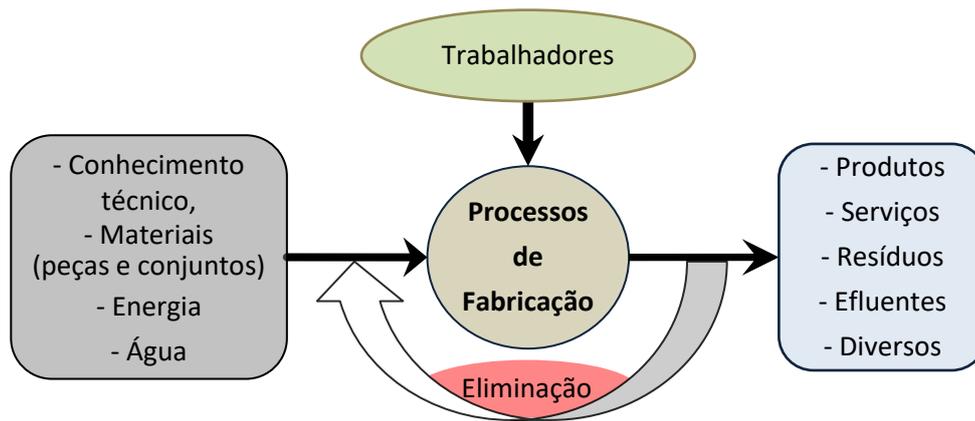


Figura 2.11. Processos de fabricação poluindo o meio ambiente (Adaptado de SOKOVIC E MIJANOVIC, 2001).

O fluxograma acima demonstra os processos de fabricação de um produto por adição de materiais que acabam gerando problemas em relação às emissões de resíduos. Nesse sentido, a busca por soluções e alternativas para o controle desses resíduos é primordial para tornar o mais sustentável possível os processos mecânicos em relação aos convencionais (SOKOVIC e MIJANOVIC 2001). Essa busca tem como objetivo alcançar a eficiência máxima de produção, através de tecnologia apropriada e condições econômicas aceitáveis, causando o mínimo impacto ambiental possível. Segundo Aurich *et al.* (2013) a interpretação de sustentabilidade é a compreensão de três dimensões como a economia, meio ambiente e a sociedade.

Até o início da década de noventa, os impactos ambientais gerados pelas práticas industriais não eram considerados como uma variável significativa na tomada de decisões técnicas sobre os processos de fabricação (HOWES, TÖNSHOFF e HEUER 1999). Essa condição mudou com a regulamentação governamental por meio das leis e resoluções. Com isso, o empresariado identifica a relação de custo benefício com práticas coerentes ambientalmente, por meio da reciclagem e reutilização de materiais.

2.7. Usinagem a seco

Em relação à usinagem a seco, Sharma *et al.* (2014), apresentaram que para usinagem a seco de aço AISI D2, a temperatura de corte envolvida aumentou substancialmente em relação à usinagem com a aplicação da técnica de lubri-refrigeração, sendo provável a danificação da integridade superficial da peça e também da ferramenta. Primordialmente, os autores concluíram que a técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL) apresentou queda na temperatura em comparação à usinagem a seco, além de perfis de rugosidade com média aritmética menor. Com as conclusões obtidas, ficam demonstrados os problemas de se eliminar totalmente a utilização de fluidos de corte nos processos de usinagem.

No processo de retificação, a alta geração de calor está relacionada com o ângulo de incidência da aresta de corte e grande comprimento de contato, se comparado com outras operações, por exemplo, o torneamento. Levando em consideração a essência do processo de retificação, sendo este um processo de acabamento, precisão dimensional, de forma e de qualidade superficial, o qual é de extrema importância para a qualidade final do produto. No caso da usinagem a seco, os autores colocam que é possível reduzir a geração de calor com a escolha de condições especiais do rebolo como o tamanho do grão, ligante e porosidade, da profundidade de corte, da taxa de remoção de material e da velocidade avanço.

A usinagem a seco poderia ser uma boa alternativa ao método convencional de lubri-refrigeração, uma vez que é uma técnica ambientalmente correta e apresenta vantagem econômica na utilização em larga escala nas indústrias, quando utilizadas em condições especiais de retificação. Entretanto, Sharma *et al.* (2014), recomendam que esta técnica não deva ser utilizada em operações que almeja tolerância dimensional e geométrica mais apertada e acabamento superficial de maior qualidade. Entretanto, Jiang *et al.* (2013) afirmam como uma excelente alternativa a utilização de pequenas quantidades de lubrificante, mais conhecida como a técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL).

Nos processos de usinagem, as propriedades dos materiais são o que determinam o seu comportamento para a escolha de qual método de lubri-refrigeração será utilizado. Dentro desta lacuna existem algumas alternativas de lubri-refrigeração que podem ser aplicadas a diferentes métodos, entre eles o convencional, a seco e o da técnica de mínima quantidade de lubrificação.

2.8. Técnica de Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL)

No processo de retificação, os fluidos de corte são utilizados para lubrificar e resfriar a zona de corte. O uso dos fluidos de corte é necessário para melhorar não somente a qualidade da peça usinada, mas também prolongar a vida útil da ferramenta de trabalho (ZHANG *et al.*, 2014).

Segundo Malkin (2008), a aplicação convencional dos fluidos na retificação não é muito eficiente, pois estes não conseguem penetrar adequadamente na zona de contato peça-rebolo. Além do mais, a introdução de alto volume de fluido pode gerar efeitos prejudiciais à saúde e ao ambiente, sendo assim o consumo de fluidos de corte devem ser restringidos. Dessa forma, é evidente a importância da busca por uma técnica alternativa de lubri-refrigeração, destacando-se a Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL).

A técnica da mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) consiste basicamente na aplicação um jato de ar comprimido com uma quantidade mínima de fluido de corte de forma direta na zona de corte. Nesse sentido, é de extrema importância que a mínima quantidade de fluido de corte seja suficiente para que o atrito seja reduzido e a aderência de materiais seja evitada. Nessa técnica que envolve uma pequena quantidade de óleo lubrificante e um fluxo de ar comprimido, uma névoa é formada de modo a ser direcionada à região de contato entre a peça e o rebolo. Na medida em que há redução do atrito na zona de contato entre rebolo e a peça, o calor gerado no processo de retificação é menor, não havendo prejuízos à integridade da ferramenta e da peça em razão de altas temperaturas (BIANCHI *et al.*, 2012).

A título de ilustração do funcionamento da técnica de MQL, apresenta-se a Figura 2.12 que mostra em detalhes a configuração esquema de MQL para um bocal de saída dupla.

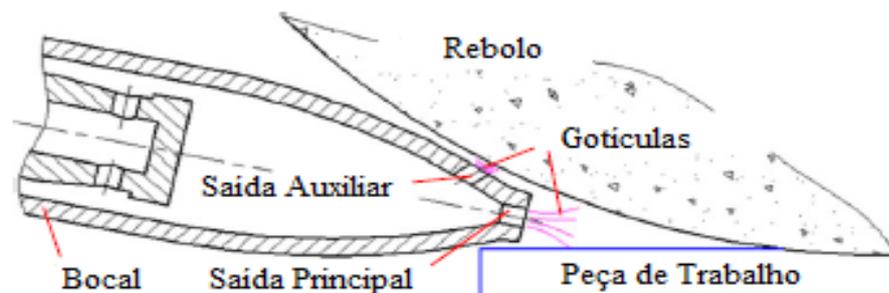


Figura 2.12. Ilustração esquemática do princípio de funcionamento para o bocal de saída dupla (Adaptado de YIN *et al.*, 2015).

Para Heisel *et al.* (1998), o sistema de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) forma um elo entre os métodos de lubri-refrigeração convencionais e a usinagem a seco. Esse método MQL apresenta-se como uma alternativa extremamente interessante, uma vez que reduz a vazão de óleo em aproximadamente de 27.000 vezes. Nos processos convencionais de lubrificação, a vazão média pode chegar a 45-50 litros de fluido por minuto, já esta técnica utiliza em geral de 10 até no máximo 100 mililitros por hora a uma pressão de 0,4 a 0,6 MPa. Fica evidente que a técnica de MQL é uma alternativa coerente, combinando não só a funcionalidade da refrigeração aliada com o ar comprimido, como também um consumo baixo de fluido de corte. O mesmo autor ainda destaca as principais vantagens da técnica MQL em detrimento da refrigeração convencional, sendo elas:

- Baixíssima quantidade de fluido utilizado;
- Redução substancial da quantidade de fluido a ser descartado, sendo que um bom mecanismo de exaustão é suficiente;
- As peças usinadas ficam quase secas, eliminando o processo posterior de lavagem;
- A necessidade de aplicação de bactericidas e/ou fungicidas nos reservatórios é eliminada.

O autor, porém apontam as seguintes desvantagens na utilização do MQL.

- A geração de névoas, também coloca em risco a saúde respiratória do operador da máquina, destacando a necessidade de sistema de exaustão eficiente e uso de EPI (Equipamento de Proteção Individual) para proteção respiratória.

- O ruído gerado pelo sistema de lubri-refrigeração, também pode levar à Perda Auditiva Induzida pelo Ruído (PAIR), fazendo-se assim necessário o enclausuramento da máquina e, caso não seja possível, o uso de proteção auricular.

Em sua investigação acerca da retificação externa de mergulho do aço AISI 4340 sob a aplicação da técnica de MQL, Silva *et al.* (2013), chegaram à conclusão que perante os parâmetros como a rugosidade, o desgaste diametral do rebolo, as forças de retificação e a tensão residual sofreram melhorias em razão do maior escorregamento do grão na zona de contato devido a capacidade do fluido pela técnica MQL proporcionar excelente propriedade de lubrificação. Mais além sobre o estudo do comportamento da técnica MQL na retificação externa de mergulho para esse material, os autores afirmam que esse sistema não apresentou nenhuma influência negativa à integridade superficial da peça, além de ser uma técnica mais sustentável que o método convencional de lubri-refrigeração.

Segundo Zhang *et al.* (2015), numerosos estudos e experimentos indicam que a técnica de MQL pode melhorar as propriedades da retificação e atingir resultados positivos comparando ao método de lubrificação convencional, isso perante certas condições experimentais.

2.8.1. Limpeza da superfície de corte do rebolo

Uma alternativa ao uso abundante de fluido de corte convencional é a aplicação da mínima quantidade de lubrificante (MQL) com a conservação da propriedade intrínseca à superfície da peça e à dimensão. No entanto, com a utilização dessa técnica, a retirada do cavaco da região de corte é realizada de forma limitada, criando assim um abstrato composto do óleo e cavaco, no qual penetram nos poros da superfície do rebolo e os entope, formando uma espécie de borra como ilustra a Figura 2.13.

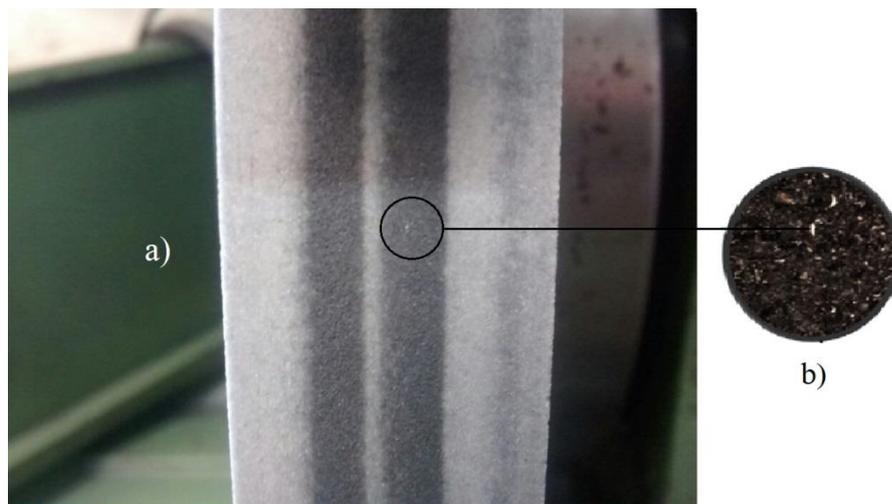


Figura 2.13. Ilustração a) “borra” no rebolo composta entre óleo e cavaco, b) ampliação da área do rebolo em (a)

Para que ocorra a retirada do cavaco e do óleo neste método, uma nova técnica de limpeza com a injeção de ar comprimido deve ser adicionada em conjunto ao sistema. Segundo Lee *et al.* (2002) relatam que com a aplicação de um jato de ar comprimido torna-se uma alternativa para impedir o fenômeno de aderência do óleo e cavaco no processo de retificação de peças, pois o ar incide diretamente no rebolo e retiram as impurezas que se aderem à ferramenta.

A Figura 2.14, demonstra o efeito do jato de ar comprimido na limpeza do rebolo.

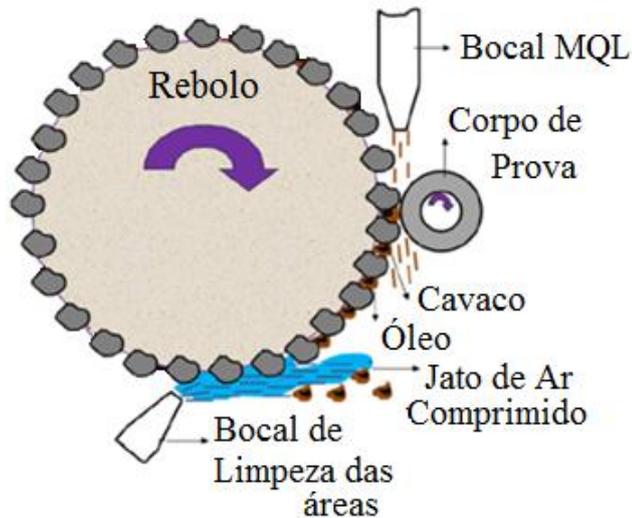


Figura 2.14. Ilustração das posições dos bocais MQL e sistema de retificação com ar comprimido na limpeza do rebolo (Adaptado de OLIVEIRA *et al.*, 2012).

Para o melhor desempenho do sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo, um requisito é determinante, o posicionamento do bocal de limpeza a 30° em relação a sua base de fixação. A importância desse posicionamento está em obter o melhor aproveitamento no processo de limpeza, que conseqüentemente minimizará a implantação de demais pontos de limpeza do rebolo. Como observado, a retificação quando ocorre sob a aplicação do fluido de corte no sistema MQL combinada com o sistema auxiliar de limpeza, a angulação do bocal é eficaz a 30° (OLIVEIRA *et al.*, 2012), atingindo efetivamente melhores resultados para todos parâmetros de saída analisados. Os autores relatam também que mesmo com o aumento da velocidade de corte, o rendimento é mantido pelo sistema de lubri-refrigeração do MQL com o sistema de ar comprimido a 30° de inclinação. Isso possibilita aumentar a taxa específica de remoção do material, logo, a diminuição do tempo de usinagem sem colocar em risco a qualidade final da peça gerada. Dessa forma, esse sistema auxiliar de limpeza utilizada, além de garantir a rugosidade superficial final, também garantem os desvios de circularidade e o desgaste do rebolo, indicando que o sistema de lubri-refrigeração diminui os riscos inerentes ao processo de retificação, de forma que possibilita um processo de manufatura mais limpo e rápido, com um menor custo. Nesse sentido, a pesquisa será realizada com a proposta de averiguar a ação e efetividade da instalação de um sistema auxiliar de limpeza no processo de retificação do aço ABNT 4340 com rebolo de óxido de alumínio, sob a aplicação do sistema de lubri-refrigeração pela técnica (MQL).

2.9. Caracterização do Processo de Retificação

Nesta seção, serão apresentadas as principais variáveis de saída envolvidas no processo de retificação estudadas nesta pesquisa, a fim de caracterizar este processo.

2.9.1. Rugosidade

Hecker & Liang (2003), afirmam que a rugosidade é um parâmetro utilizado para quantificar a qualidade topográfica de uma superfície. É notável também que essa qualidade superficial tem forte relação com características tais como eficiência na lubrificação, a vida útil do rebolo, resistência à fadiga e corrosão, entre muitas outras. Sendo a rugosidade uma das características que controlam a qualidade do acabamento superficial (PATNAIK *et al.* 2010).

A rugosidade apresenta micro irregularidade geométrica presente na superfície do material que foi usinado. Sua média é representada pela sigla (Ra) que é um dos parâmetros utilizados para quantificar, sendo assim, determinado como a média aritmética entre picos e vales dentro do percurso de medição.

Segundo Puerto *et al.* (2013), a evolução da rugosidade da superfície usinada está relacionada basicamente a quatro fatores principais, sendo os parâmetros de dressagem, as condições de usinagem, as forças envolvidas e o desgaste diametral do rebolo. Para Weck *et al.* (2001), o uso de lubri-refrigerantes pode reduzir as forças e a energia envolvida no processo de modo a proporcionar menor rugosidade na superfície devido às suas propriedades. Em adição, o tipo de dressagem e o tempo de centelhamento melhoram a qualidade superficial, uma vez que proporcionam a fragmentação dos cavacos (RAMESH & HUANG, 2003).

Para Bigerelle *et al.* (2008), a redução da rugosidade tem relação direta com o tamanho e a forma do grão abrasivo, pontuando em que na medida em que mais arestas de corte estão em contato com a superfície, melhor é a rugosidade gerada.

2.9.2. Circularidade

A circularidade é denominada desvio de forma dentro das tolerâncias geométricas, com uma relação à sua forma teórica tais como retas, planos, círculos, cilindros, perfis e

superfícies (COSTA e MACHADO, 2011). Desta definição, destaca-se um erro de forma utilizado comumente para o controle de qualidade de uma peça, a circularidade. Esta possibilidade de erro pode surgir principalmente pela falta de rigidez (fixações inadequadas das peças e condições de usinagem), batimento e desgaste das ferramentas.

Segundo Agostinho (1997) circularidade é definido como um desvio macro geométrico que ocorre nos processos de usinagem, este erro ocorre entre a forma ideal (círculo) e a forma real da peça após a usinagem.

O parâmetro dimensional de referência é definido pelo campo de tolerância, determinado por duas circunferências que tem o mesmo centro e raios diferentes, estando o centro dessas circunferências situado no eixo da peça (Alves, 2005).

A diferença entre os diâmetros de forma teórica está representada no espaço t entre as duas circunferências como demonstrado na Figura 2.15. O campo de tolerância de circularidade deve estar envolvido entre a adjacência de cada seção da peça.

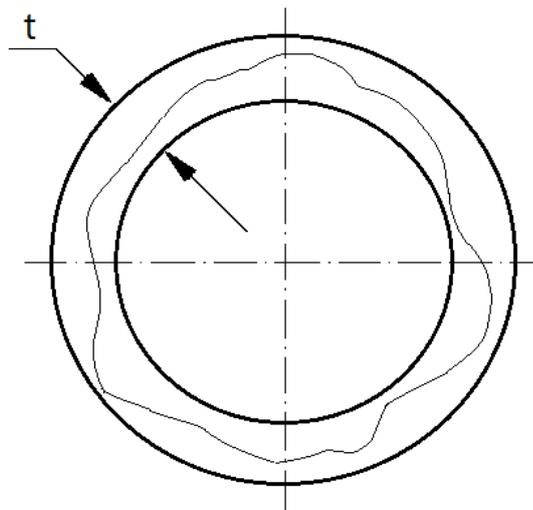


Figura 2.15. Representação esquemática do campo de tolerância de circularidade.

É de suma importância a análise do erro de circularidade neste projeto, uma vez que uma peça somente é submetida à retificação cilíndrica externa de mergulho quando requer qualidade superficial, limites estreitos de tolerância dimensional e geométrica.

2.9.2.1. Desvio de Circularidade

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, lubri-refrigeração inadequada, ação incorreta de corte, defeitos nos componentes da máquina, vibrações, desalinhamento dos mandris. A Figura 2.16 ilustra o perfil do desvio de circularidade de uma peça modelo, o qual apresenta o desvio dentro das duas circunferências interna e externa representada pelo mesmo centro com raios diferentes.

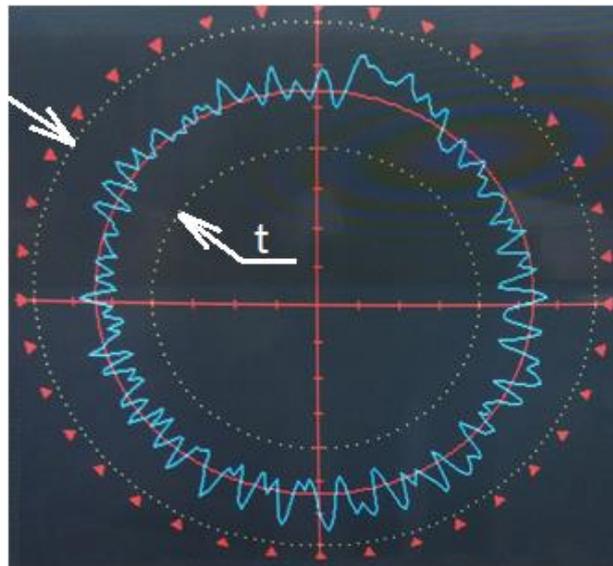


Figura 2.16. Peça com desvio de circularidade (Adaptado de TAYLOR-HOBSON, 2001).

O exemplo da peça modelo apresenta um desvio 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).

2.9.3. Desgaste diametral do rebolo – Relação G

Existem três formas básicas de desgaste do rebolo durante a retificação de uma peça, sendo elas: atrito entre o grão abrasivo e a peça, fratura do grão e fratura do ligante. As

formas de desgaste ocorrem em decorrência das solicitações mecânicas às quais o rebolo é submetido, além da deterioração térmica do ligante (LIAO *et al.*, 2000).

A eficiência do rebolo em relação ao seu desgaste pode ser dada através da relação chamada de “G”. Os rebolos que apresentam relação “G” mais alta produzem mais e sofrem menos desgaste, dessa forma, essa relação apresenta uma conotação econômica, estando relacionada com o custo do rebolo em muitas operações (KRUEGER *et al.*, 2000). A relação G é dada conforme a Equação (14).

$$G = \frac{Z_w}{Z_s} \quad (14)$$

Em que: Z_w = volume de metal removido.

Z_s = volume de rebolo gasto

Marinescu *et al.* (2013), afirmam que 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 que ocasiona perdas na superfície da ferramenta abrasiva, desgaste da ferramenta de dressagem, tempo gasto desnecessariamente, dentre outras.

2.9.4. Emissão Acústica – EA

A emissão acústica (EA) pode ser definida como ondas de tensão elástica gerada como resultado da liberação rápida de energia de deformação dentro de um material submetido a um estímulo externo, devido ao rearranjo de sua estrutura. Estas ondas de tensão produzem deslocamentos na superfície do material que podem ser detectados por um sensor piezoelétrico que transforma estes deslocamentos em sinais elétricos (DINIZ *et al.*, 1992).

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) é utilizada no processo de retificação para melhor 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.

Nas últimas décadas a aquisição de sinais vem se propagando através da utilização de sensores. A exemplo, a emissão acústica tem se tornado comum para todo tipo de processo de usinagem, trazendo uma grande variedade de sensores, especialmente produzidos com o propósito de monitoramento com 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).

Seguindo as tendências tecnológicas, o monitoramento dos processos de usinagem está a cada dia se adequando à sua evolução. A Figura 2.17 apresenta as fontes de emissão acústica no processo de retificação, que são muito eficientes no controle e na avaliação deste processo.

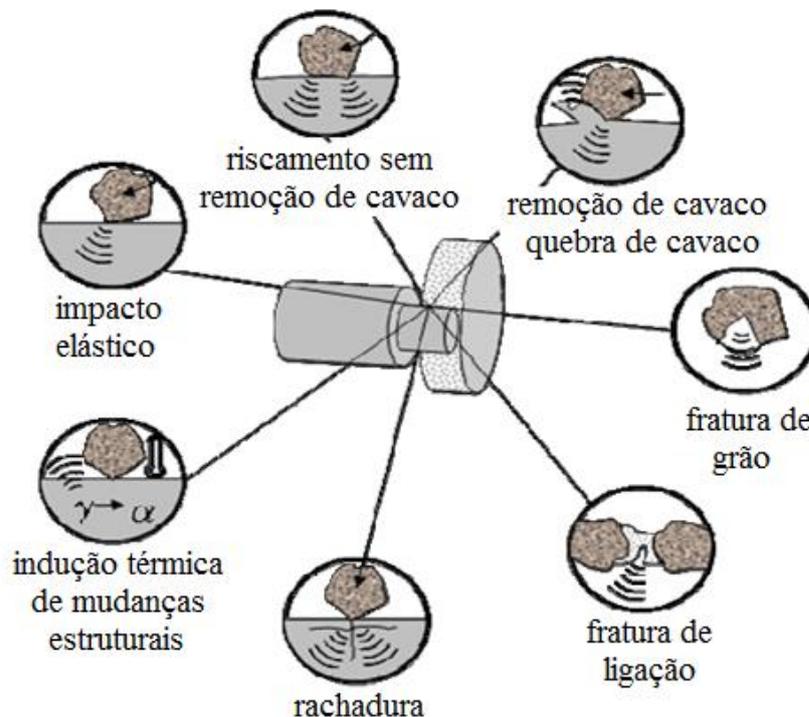


Figura 2.17. Fontes de emissão acústica na retificação (KARPUSCHEWISKI, 2001).

Outra fonte potencial para o monitoramento do processo de retificação é a queima. Nesse sentido, Yang *et al.* (2014), em seu trabalho utilizaram os sinais de emissão acústica e de vibração para identificar a queima, apresentando-se como uma fonte potencial de monitoramento no processo de retificação.

2.9.5. Análise da microestrutura – Microscopia Óptica

A técnica da microscopia óptica possibilita uma análise micro estrutural da peça usinada que é de suma importância para a caracterização da estrutura da peça, permitindo a identificação de trincas superficiais, lascamentos, danos térmicos, dentre outros. Através do estudo da estrutura do material possibilita-se a detecção de problemas, por exemplo, a queima superficial que pode ocasionar a retêmpera, de modo a originar uma microestrutura extremamente frágil e pouco resistente à fadiga.

2.9.6. Microdureza

A análise da microdureza torna-se um método importante para a avaliação das alterações microestruturais que são passíveis de ocorrer após o tratamento térmico seguido da retificação, sendo esta uma etapa que complementa a avaliação dos resultados que foram coletados na microscopia. As variações de temperatura podem gerar danos térmicos que são uns dos principais fatores que afetam a qualidade superficial e a produtividade. Assim, a maioria dos danos na retificação tem origem térmica e altas temperaturas que causam transformações internas (MALKIN & GUO, 2007).

A etapa de retificação provoca um calor demasiado na área de corte, elevando assim a temperatura da peça durante a retirada de material. A temperatura elevada seguida por uma rápida ação de resfriamento do fluido de corte induz a deformação plástica na superfície e sub superfície da peça, afetando o perfil de microdureza (KUMAR *et al.*, 2011).

2.10. Características do Aço ABNT 4340

O aço ABNT 4340 é um aço de alta resistência que embora tenha sido desenvolvido para aplicação em estruturas de grande porte, não apresenta aumento de peso das construções,

se comparado a outros aços de menor resistência mecânica. A Tabela 2.5 apresenta sua composição química.

Tabela 2.5. Composição química do aço ABNT 4340

SAE	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo
4340	0,38	0,60	0,030	0,040	0,15	1,65	0,70	0,20
	0,43	0,80	máx.	máx.	0,35	2,00	0,90	0,30

Fonte: Adaptado de FAVORIT Aços Especiais, 2016.

De acordo com Silva *et al.* (2013), o aço ABNT 4340 é o que apresenta maior temperabilidade dentre os aços utilizados na construção mecânica. Apesar de ser de difícil usinabilidade e soldabilidade, apresenta boa forjabilidade e é muito utilizado na fabricação de peças que combinam boa tenacidade e resistência mecânica, apresentando essas propriedades de modo uniforme em toda sua seção. Essas propriedades são obtidas por meio da têmpera seguida do revenimento do material. Os mesmos autores preconizam que após esses tratamentos térmicos, com o objetivo de que sejam geradas peças que atendam um dimensionamento preciso, a retificação do material é de suma importância, uma vez que o processo de retificação elimina as distorções dimensionais causadas durante o tratamento térmico de têmpera.

Considerado um aço para construção mecânica muito utilizado na fabricação de diversos elementos de máquinas como eixos, engrenagens, bielas, virabrequins e peças com elevadas sollicitação mecânica, na indústria aeroespacial e na automobilística.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e métodos utilizados nos ensaios de retificação com o sistema de lubri-refrigeração convencional e no método MQL, onde serão monitoradas as variáveis de saída. Para isso, um projeto com variações da vazão do MQL foi estabelecido para validação do processo.

A lubri-refrigeração nos métodos convencional e no sistema MQL composto por três vazões, foram avaliadas através dos parâmetros de rugosidade, desvio de circularidade, do desgaste diametral do rebolo, análise metalográfica, da microscopia óptica, avaliação da microdureza, influência da lubri-refrigeração na potência e emissão acústica. As amostras foram caracterizadas por diferentes técnicas em busca dos parâmetros de retificação que conciliem a melhor condição de vazão e dimensional da peça submetida ao processo de retificação.

Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA) situado na Faculdade de Engenharia Mecânica da UNESP, campus Bauru.

3.1. Equipamentos e materiais utilizados.

A seguir são apresentados as máquinas e equipamentos utilizados neste trabalho, além dos procedimentos referentes às etapas para realização da pesquisa.

Os experimentos foram realizados na retificadora cilíndrica CNC do fabricante SULMECÂNICA[®], modelo RUAP 515 H, equipada com comando numérico computadorizado (CNC) com processador Fagor.

Neste trabalho, a retificadora foi utilizada para as etapas de retificação dos corpos de prova, avaliação do desgaste do rebolo através da técnica de impressão do perfil em um tarugo que tenha a mesma característica do corpo de prova. A rotina utilizada no comando numérico computadorizado para este processo foi padronizada para todas as condições impostas na pesquisa.

3.1.1 Equipamentos para Monitoramento e Análise

Para o monitoramento do processo de retificação, foi desenvolvido 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, do fabricante National Instruments[®]. A placa de aquisição coleta instantaneamente os sinais de tensão elétrica (V) do motor que rotaciona a ferramenta de corte através de um inversor de frequência, os quais são posteriormente tratados pela aplicação do LabView[®]. A metodologia de tratamento desses dados esta descrita no item 3.3.6. Ainda foi utilizado um modulador (ou circuito condicionador) de sinais para que não cheguem saturados ou atenuados na referida placa. A Figura 3.1 mostra esquematicamente o banco de ensaios para a aquisição dos dados.

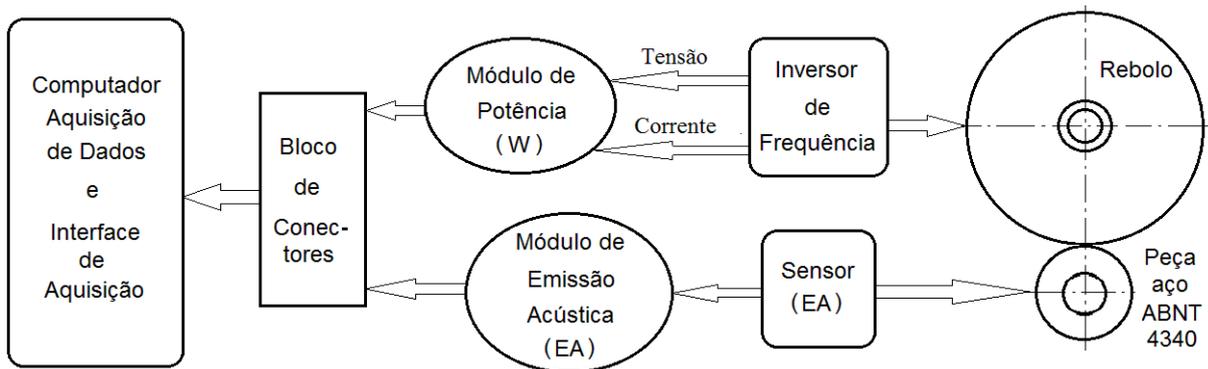


Figura 3.1. Configuração dos Equipamentos – Aquisição de dados

Os sensores utilizados para aquisição de dados de emissão acústica e vibração, 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[®] foi ligado 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 Corpo de Prova

Os corpos de prova que serão utilizados nos ensaios são de aço ABNT 4340 temperado e revenido, com dureza média de (60 ± 2) HRc $\approx (697 \pm 23)$ HV. A Figura 3.2 apresenta seu formato e dimensões.

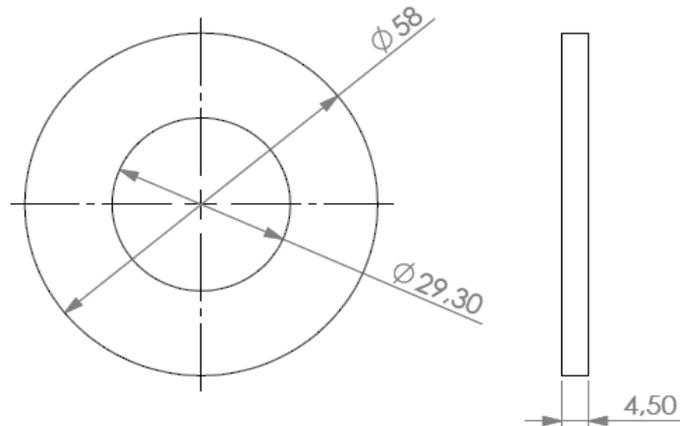


Figura 3.2. Desenho técnico, fora de escala, do corpo de prova de Aço ABNT 4340 utilizado na pesquisa.

3.1.3 Rebolo

A ferramenta de corte empregada foi um rebolo de óxido de alumínio branco para aço e aço rápido, fabricado pela empresa NORTON[®], com as dimensões de 355,6 mm de diâmetro externo, 127 mm de diâmetro interno, 25,4 mm de largura. As especificações dele são: 38 AA 150 L 6 V, rotação máxima 1775 rpm, estrutura 6, ligante vitrificado, dureza média, tamanho de grão de 150 mesh.

3.1.4 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. Ele consiste em um reservatório acomodando o fluido, uma bomba de sucção, mangueiras de condução de fluido e bocais aplicadores. O fluido de corte utilizado foi

uma emulsão em água com 2,5% de óleo solúvel mineral convencional semissintético QUIMATIC ME-1. Este fluido já é composto de uma fórmula concentrada de agentes emulsionantes e de lubricidade, 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.

3.1.5 Sistema de lubri-refrigeração - mínima quantidade de lubrificação – MQL

O sistema de lubri-refrigeração MQL utilizado é constituído pelo compressor, sistema de regulagem e distribuição do ar, medidor de vazão de ar, dosador de óleo e bocal de aplicação, como demonstrado na Figura 3.3. O fluxo de ar é regulado à pressão constante de 0,7 MPa aproximadamente, sendo que o volume de ar e óleo é regulado de forma separada por meio de um registro tipo agulha com as vazões de 30, 60 e 120 ml/h conforme definido para este projeto. O fluido de corte utilizado foi o Accu-Lube LB 1000 do fabricante ITW Chemical Products Ltda. Ele é integral de base vegetal biodegradável, contendo antioxidantes como aditivos. E na Figura 3.4 encontra-se o desenho do bocal desenvolvido para aplicação e direcionamento do fluido de corte pela técnica MQL no processo de retificação.

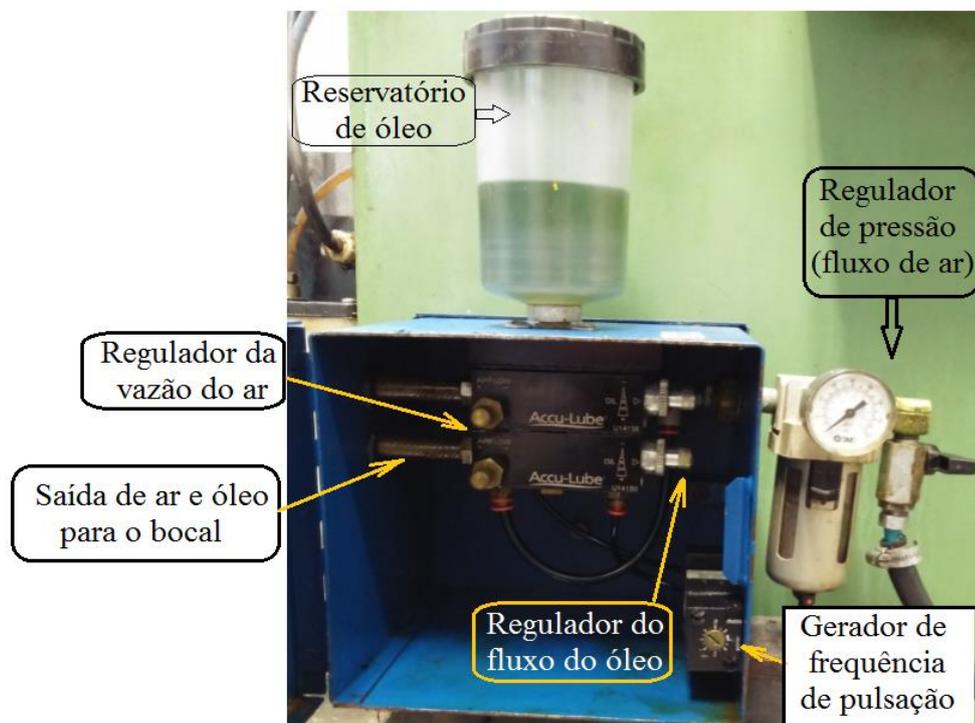


Figura 3.3. Unidade de controle do aplicador de fluido pela técnica MQL. Fabricante ITW Chemical Products Ltda., modelo ITW Accu-lube 79053D.

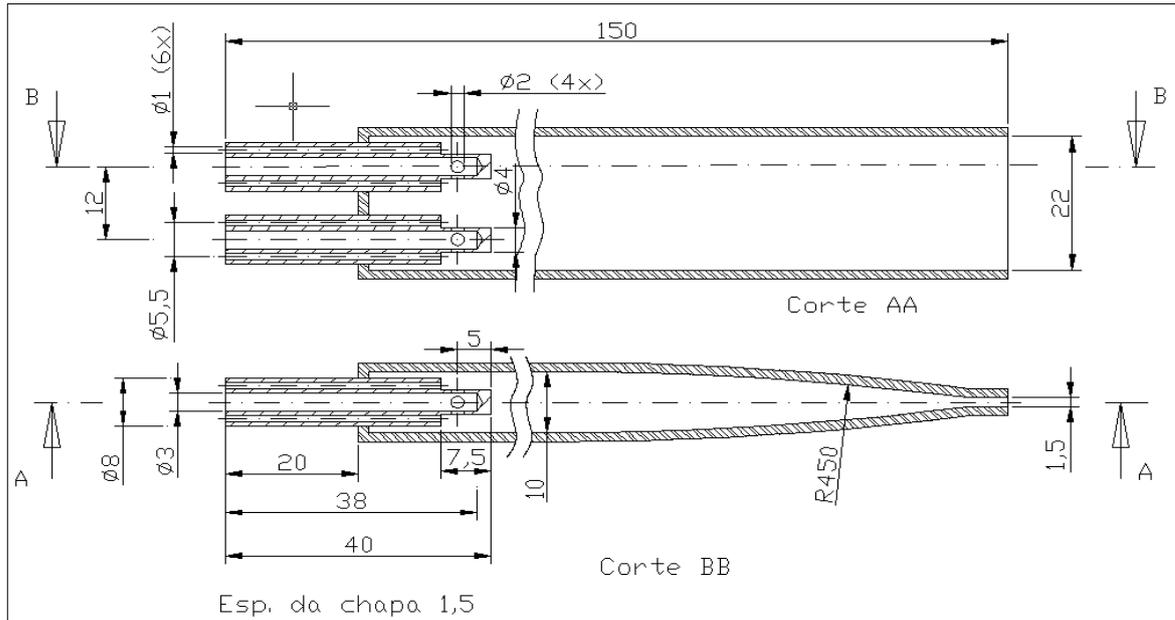


Figura 3.4. Desenho técnico em corte do bocal utilizado na técnica de aplicação do MQL.

Para a medição precisa das vazões de ar comprimido utilizadas nos experimentos. Para proporcionar velocidades requeridas, são necessários um medidor de vazão e um regulador de pressão com filtro, os quais são mostrados na Figura 3.5. O medidor de vazão foi conectado a uma rede de ar comprimido, fornecendo a leitura direta da vazão em m^3/h .

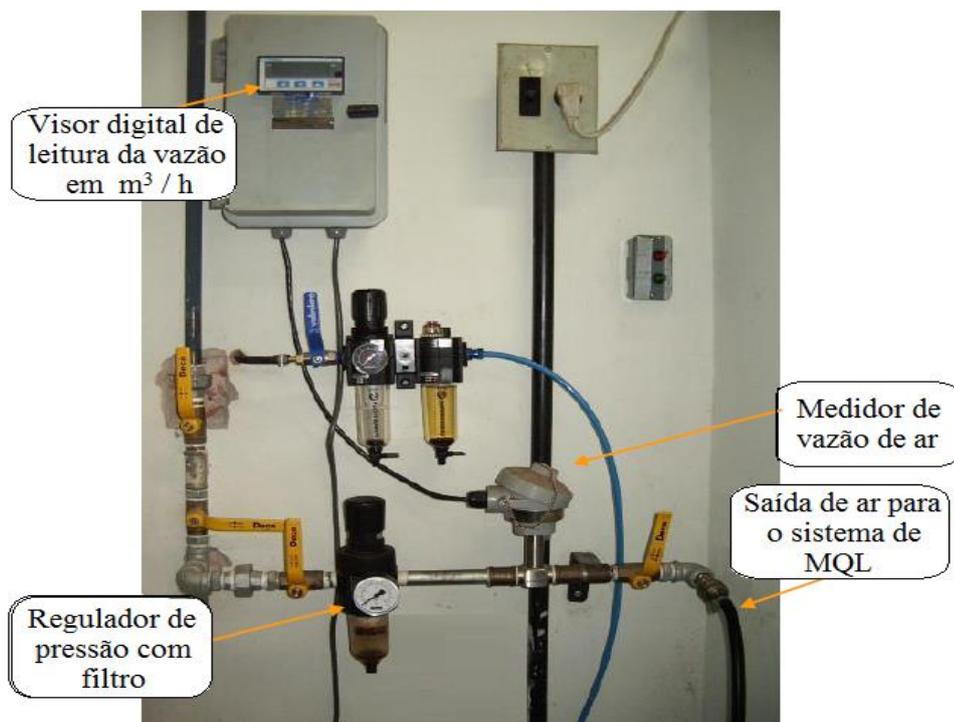


Figura 3.5. Sistema de ar comprimido para o MQL

3.1.6 Sistema de limpeza

O sistema de limpeza do rebolo foi desenvolvido de forma a atuar em paralelo ao sistema de MQL, contudo, o controle e ajuste são feitos de forma independente 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 3.6, 3.7 e 3.8 respectivamente.

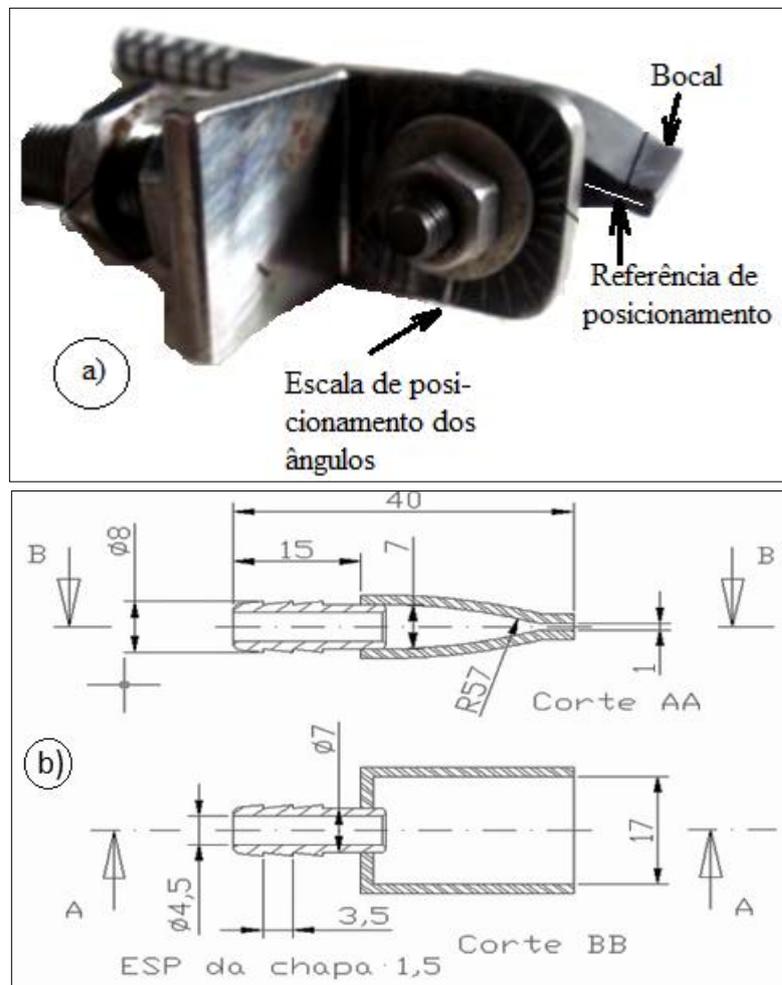


Figura 3.6. Bocal de Limpeza – a) Posicionador, b) Desenho técnico.

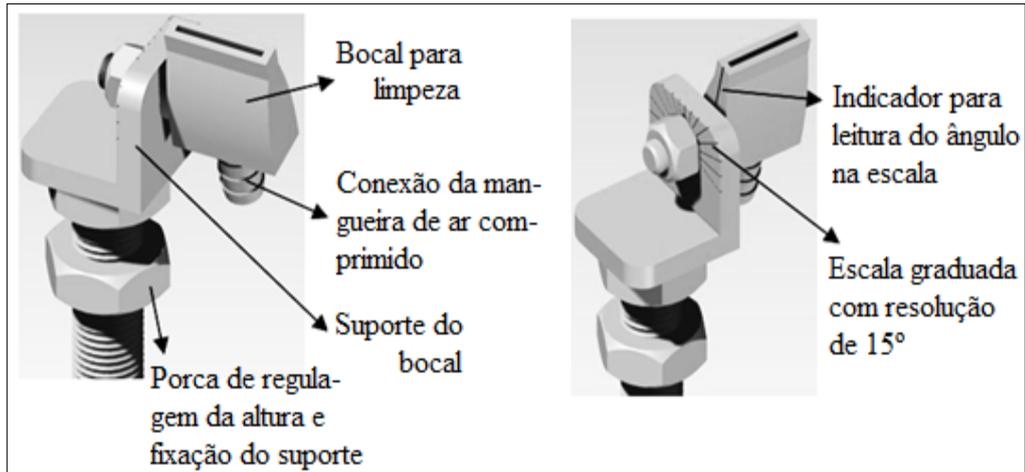


Figura 3.7. Sistema de fixação e posicionamento do bocal de limpeza

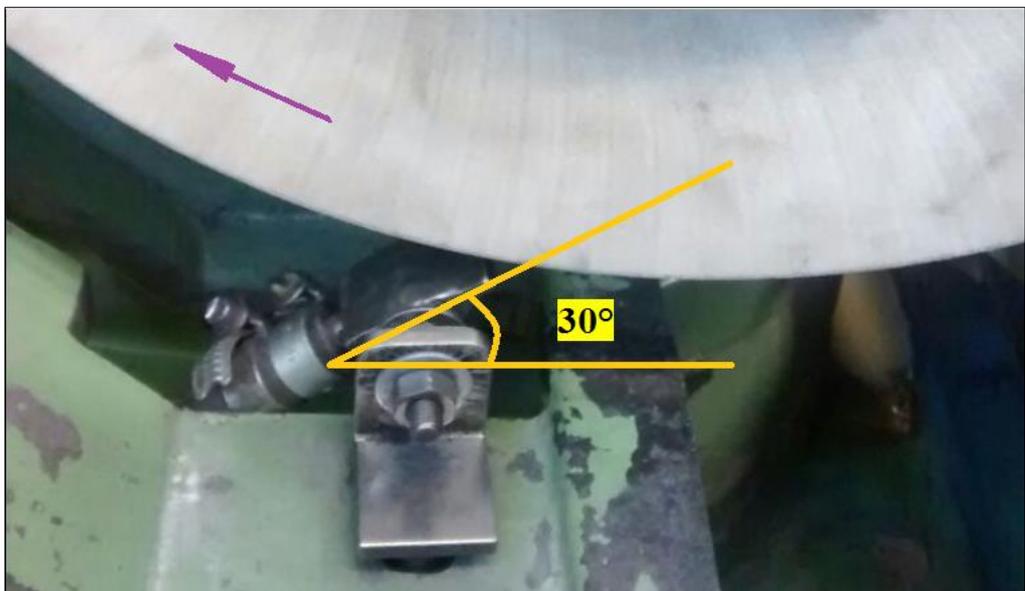


Figura 3.8. Fixação do bocal de limpeza na retificadora a 30°.

Na realização dos experimentos com o sistema de limpeza, foi definida uma pressão constante de 0,7 MPa aproximadamente, a mesma utilizada na rede convencional de ar comprimido.

3.2. Parâmetros e condições para os ensaios

Os parâmetros definidos para esta pesquisa estão fundamentados na prática com a relação da velocidade do rebolo e da peça, definida por (qs). Conforme características deste

projeto ficaram entre $60 \leq (q_s) < 90$, determinando assim como uma operação de desbaste, condições essas que foram mantidas constantes para todos os ensaios.

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)	33 m/s
- Velocidade da peça (v_w)	0,58 m/s
- Rotação do rebolo (n_s)	1775 rpm
- Profundidade efetiva de corte (a_e)	1.5×10^{-3} mm/rev
- Tempo de centelhamento para ciclos de retificação (t_s)	1,8 s
- Tempo de centelhamento no final do ensaio (t_s)	3,6 s
- 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)	0,2 mm (50 ciclos de 0,004 mm cada)
- Velocidade de dressagem (v_d)	740 mm/min
- Material da peça	Aço ABNT 4340 (Temperado) (60 ± 2) HRc \approx (697 ± 23) HV
- Quantidade de peças para os ensaios	21 peças
- Tempo de Spark out (t_s)	8 s
- Condições de lubri-refrigeração	Convencional (abundante) e MQL
- 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	30, 60 e 120 ml/h
- Pressão média do fluido de corte convencional	0,3 MPa
- Pressão média do ar comprimido no MQL	0,7 Mpa
- Ângulo de incidência do bocal de limpeza	30°

Fonte: Adaptado do Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA), 2016.

Para a técnica MQL, além da vazão, foi também testada a operação com e sem limpeza na superfície de corte do rebolo. As vazões do fluido de corte para este trabalho foram definidas em três etapas, sendo determinadas as vazões de 30 ml/h, 60 ml/h e 120 ml/h.

Com os parâmetros apresentados, foi então organizada uma matriz dos ensaios e a caracterização através das variáveis de saída, a qual está descrita na Figura 3.9.

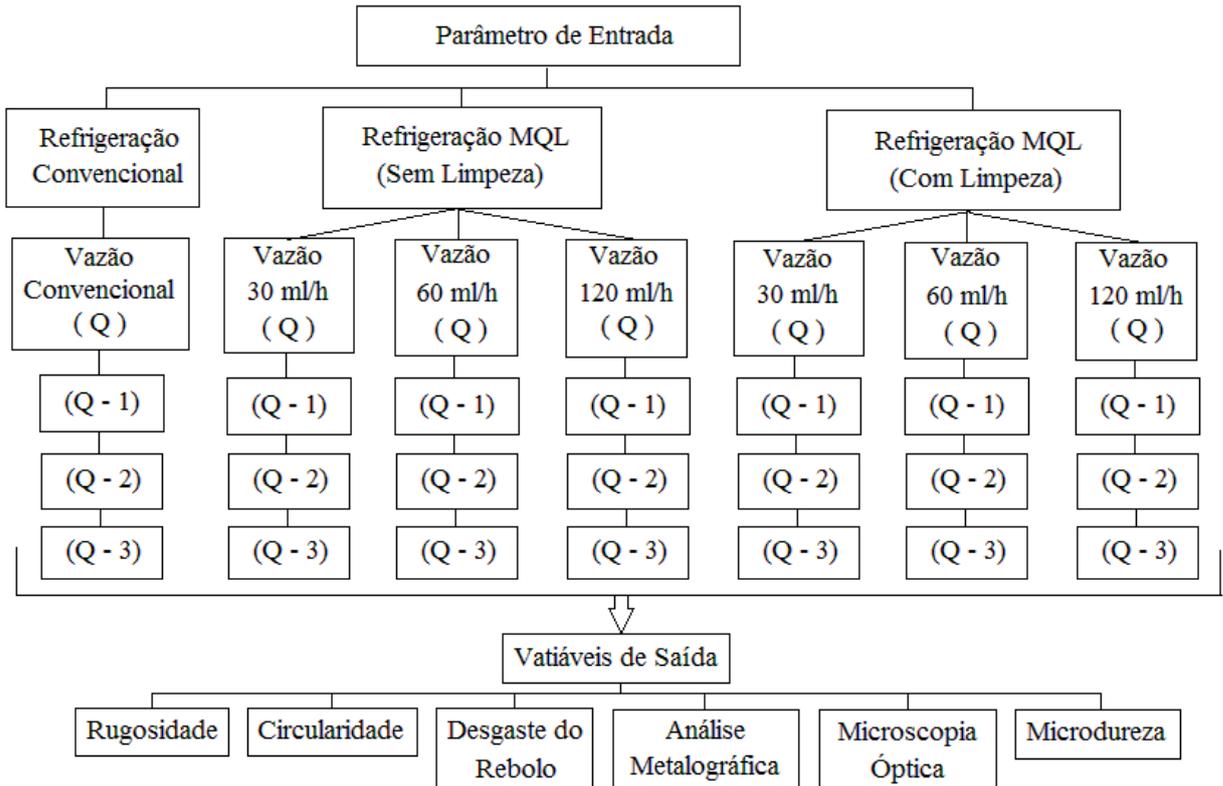


Figura 3.9. Matriz dos ensaios realizados

Houve um controle cauteloso para as vazões determinadas para o fluido de corte MQL. É importante destacar que na finalização de cada etapa de ensaio era realizado o processo de dressagem do rebolo com um dressador conglomerado de diamante conforme condições apresentadas na Tabela 3.1.

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

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

Para todas as avaliações foram seguidos parâmetros de processos de fabricação e procedimentos conforme as normas de cada variável em questão.

Quanto á medição e monitoramento das variáveis de saída, a seguir serão apresentados os detalhes desta etapa.

3.3.1. Medição da Rugosidade

A medição da rugosidade (Ra) média dos corpos de prova foi realizada com o auxílio do rugosímetro modelo Surtronic 3+, marca Taylor Hobson[®], a Figura 3.10 ilustra o aparelho de medição da rugosidade.

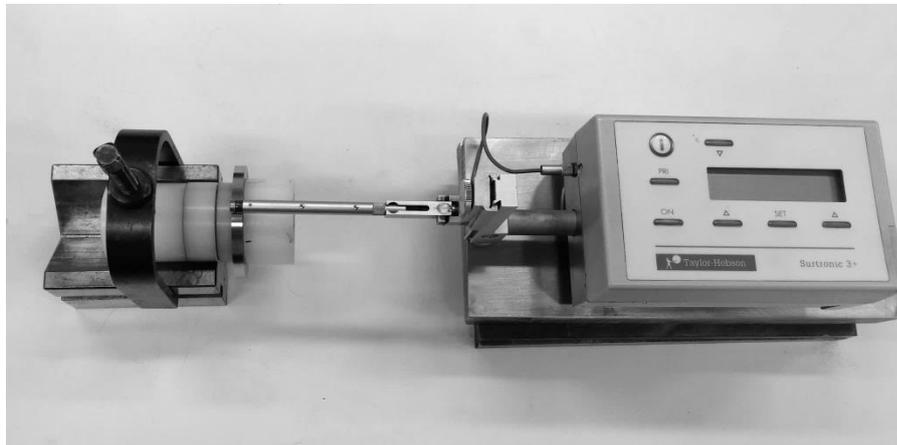


Figura 3.10. Rugosímetro utilizado nas medições de rugosidade das amostras.

O rugosímetro foi ajustado para efetuar as medidas através de seu braço de deslocamento, sendo efetuada a medição na direção perpendicular à superfície de retificada, com um comprimento de medição *cut-off* igual a 0,25 mm e percurso total (ln) 1,25 mm. Para essa etapa, foram realizadas três medições dispostas em 120° entre cada medição.

3.3.2. Medição da Circularidade

Os valores do desvio de circularidade foram obtidos através de um equipamento marca Taylor Hobson, modelo Talyrond 31C[®], antes do início das medições o aparelho foi aferido e calibrado, seguida as amostras foram lavadas com álcool antes de cada medição para evitar que pequenas partículas abrasivas influenciassem na medição desta grandeza. A Figura 3.11

apresenta os detalhes da etapa de medição, onde detalha o apalpador no qual efetua o contato com a peça para obtenção das medidas de circularidade.



Figura 3.11. Equipamento de medir circularidade marca Taylor Hobson, modelo Talyrond 31C®

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

3.3.3. Determinação do desgaste do rebolo.

Com a finalidade de registrar o desgaste do rebolo, foi utilizada uma peça em aço ABNT 1045 laminada. A análise do desgaste do perfil dar-se-á pela impressão que o rebolo deixará na peça após o contato. Esta incisão é realizada com a velocidade de mergulho de 0,25 mm/min, o instrumento utilizado para medição será o rugosímetro Surtronic³⁺, com auxílio do *software TalyMap*, ambos do fabricante *Taylor Hobson*®.

A medição do desgaste do rebolo é mais apropriada para a avaliação dos métodos de refrigeração e lubri-refrigeração no processo de retificação, considerando os mesmos parâmetros e condições de usinagem. A utilização desse método é possível por não se estar utilizando toda a largura do rebolo (bs) de 25,4 mm. Nas Figuras 3.12 e 3.13 são apresentadas

o processo para a impressão do rebolo na peça e o esquema para avaliação do volume do material desgastado do rebolo respectivamente.

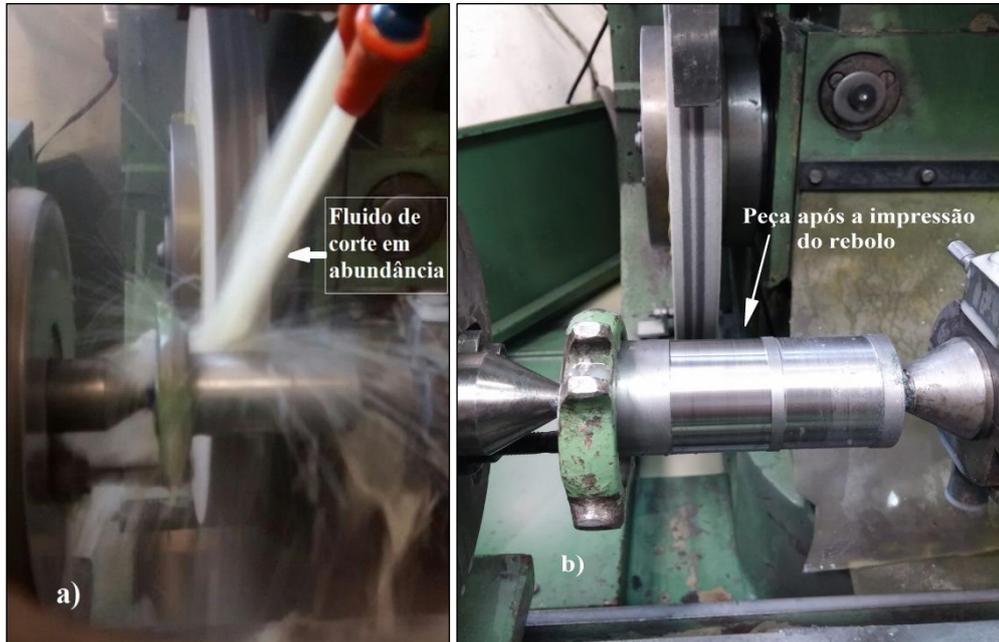


Figura 3.12 Método para avaliação de desgaste do rebolo: a) operação de impressão do rebolo na peça. b) peça após a impressão.

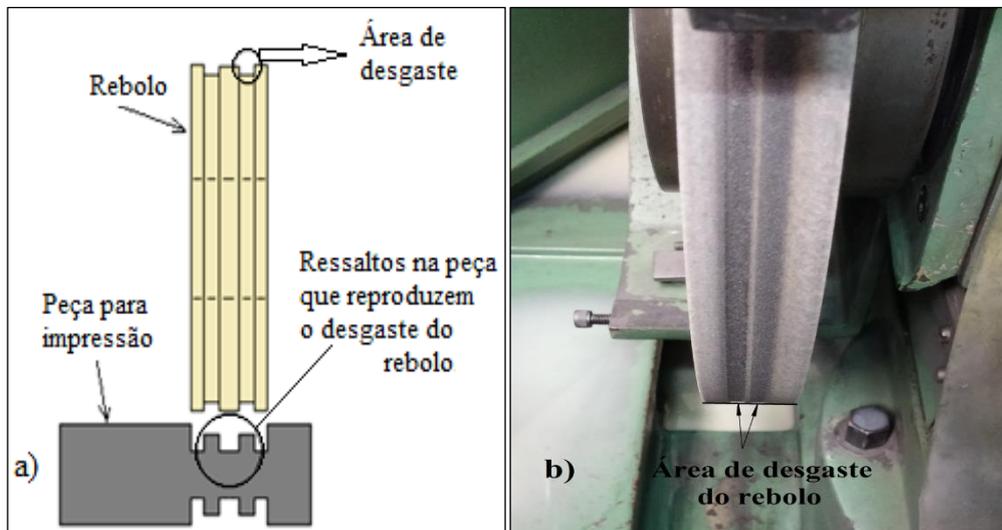


Figura 3.13 Esquema ilustrativo do processo: a) impressão do perfil do rebolo na peça. b) representação da área desgastada no rebolo.

O cilindro de impressão do desgaste do rebolo foi colocado em um prisma em V a fim de medir o deslocamento do raio da amostra, com isso se determina uma linha referencial entre as duas extremidades e se avalia a diferença entre a marca inicial de referência sem desgaste com a parte mais baixa no sentido radial (área que reproduziu o desgaste do rebolo), conforme mostrado na Figura 3.14.



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

3.3.4. Análise metalográfica

A análise metalográfica dos corpos de prova foi realizada após os ensaios e escolheu-se uma das peças de cada condição. Este corpo de prova foi cortado em uma cortadora metalográfica conforme ilustrado na Figura 3.15.



Figura 3.15. Representação do corte da amostra do corpo de prova e retirada de material para as análises de Metalografia e determinação de Microdureza.

A finalidade da realização dos ensaios de metalografia está em observar as alterações microestruturais na subsuperfície da peça, avaliando o possível surgimento de queimas e alterações estruturais provocados durante a usinagem nas distintas condições de corte empregadas nos ensaios. As amostras dos corpos de prova foram analisadas na região da superfície retificada no sentido longitudinal, a fim de visualizar melhor sua estrutura e conferir sua dureza, através de uma determinada área.

Com o objetivo de não causar danos térmicos aos corpos de prova, o processo de corte destas peças foi efetuado em baixa velocidade e com uso de fluido refrigerante. Após a realização do corte, foi feito o embutimento das amostras cortadas em baquelite, conforme ilustrado na Figura 3.16.

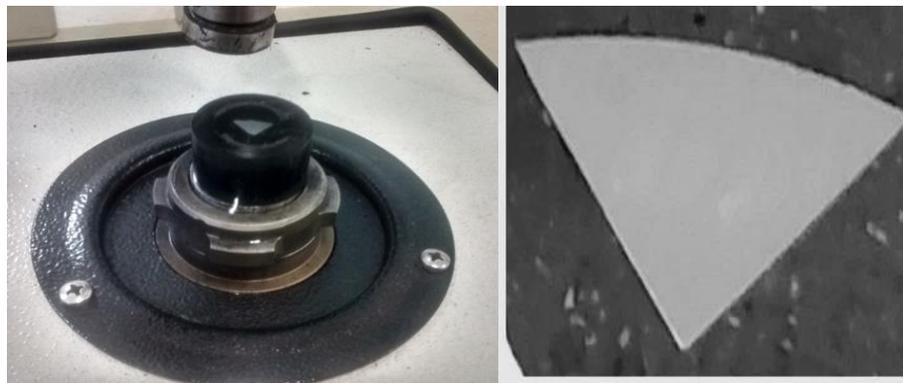


Figura 3.16. Amostra após o embutimento do corpo de prova em resina baquelite

Em seguida, foi efetuado o lixamento da amostra embutida em baquelite, com o auxílio de uma lixadeira manual conforme a Figura 3.17, passando a peça pela sequência de lixas de alumina de granulometria *mesh* na seguinte: 80, 120, 220, 320, 400, 500 e 600.



Figura 3.17 Lixadeira manual

Posteriormente ao lixamento, foi realizado o polimento por meio de máquina politriz metalográfica modelo AP 2, marca STRUERS[®], com a rotação do prato em 500 rpm, com a utilização de alumina de granulometria 1 μm , como mostra a Figura 3.18.



Figura 3.18. Politriz Metalográfica marca STRUERS[®].

Em relação ao ataque químico para a revelação da microestrutura, as amostras foram atacadas quimicamente com Nital 2% ao um tempo de 10 s aproximadamente, seguido lavado com água destilada e álcool etílico 100% (99%v). O ataque possibilitou melhor visualização da microestrutura do material por meio da micrografia, realizada no microscópio óptico.

3.3.4.1. Microscopia óptica

A microscopia óptica foi realizada com o equipamento da marca OLYMPUS[®], modelo BX 51M. A Figura 3.19 mostra o equipamento dotado de câmera e software para captura das imagens, com ajuste de foco opcional, ampliação adotada foi de 500x referência baseada em (COLPAERT, 2008), em sua literatura de análise metalográfica dos produtos siderúrgicos comuns.

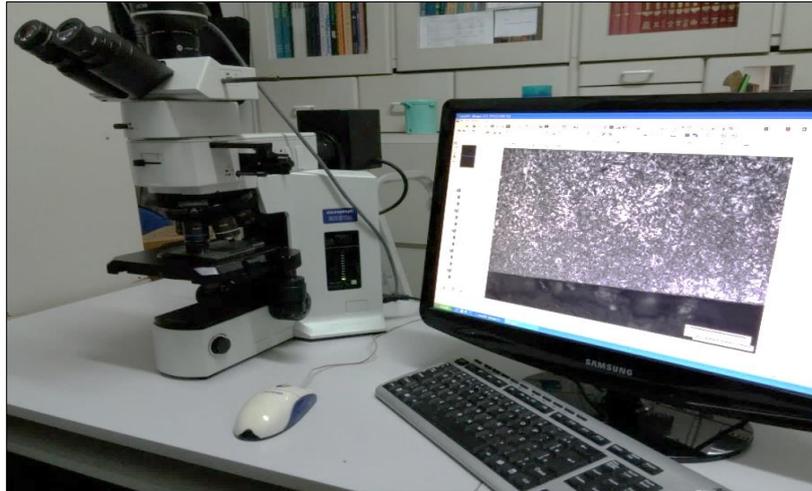


Figura 3.19. Microscópio Óptico utilizado na captação das imagens metalográficas.

A principal vantagem deste ensaio, está na análise da superfície que será usinada (retificada), com objetivo de observar se ocorreram alterações microestruturais mediante as condições de usinagem proposta.

3.3.5. Avaliação da Microdureza

Para a medição da microdureza das amostras, foi utilizado o equipamento da marca Mitutoyo®, modelo MicroWizhard, versão 1.04. A Figura 3.20 demonstra o equipamento na etapa de indentação, onde a escala selecionada para análise de microdureza foi Vickers – HV.



Figura 3.20. Representação do Microdurômetro utilizado na etapa de indentação.

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, cuja suas diagonais possam ser medidas. A carga solicitada para este projeto foi de 300 g, onde se obtém melhor visualização da indentação.

Para cada peça analisada, realizaram-se três linhas de indentação, onde cada série contempla cinco medições de microdureza. A indentação foi realizada a partir da superfície retificada em direção ao centro. A referência das dimensões à serem utilizadas para realização da indentação é fundamentada na norma ASTM E384, onde o posicionamento das impressões é o valor da maior diagonal multiplicada por dois. Valores e a forma de medição estão representados na Figura 3.21.

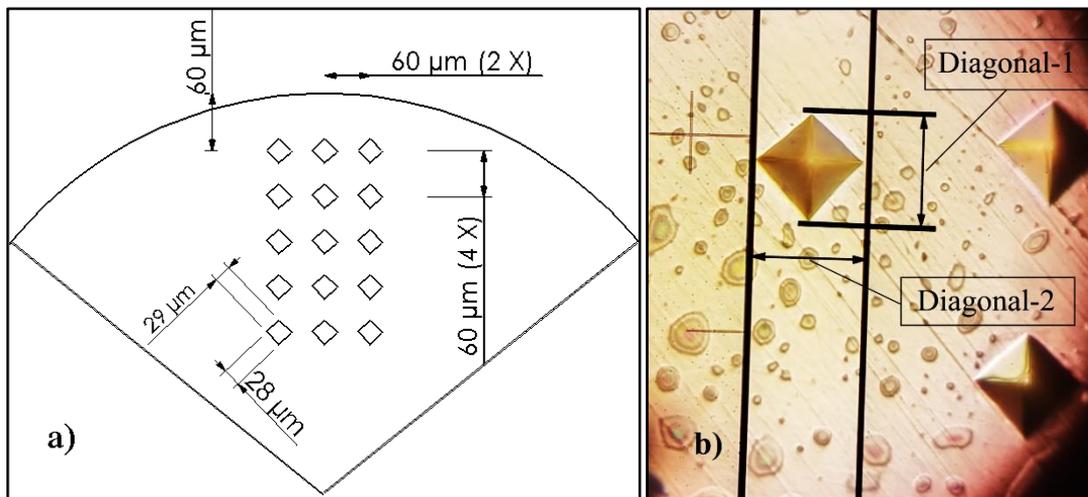


Figura 3.21. Esquema para medição da microdureza conforme ASTM E384: a) desenho representando a operação, b) imagem captada através da lupa do equipamento de medição de microdureza.

Deve-se ressaltar que as medições em diferentes profundidades permitem identificar o comportamento estrutural, verificando assim se ocorreu perda de dureza e se houve regiões afetadas pela temperatura.

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

Os valores da potência elétrica do motor em watts foram obtidos através da Equação (15) e sua calibração está disposta na Tabela 3.2 e na Figura 3.22.

$$P_w = 360 \cdot V + 3,5 \text{ [Watts]} \quad (15)$$

Em que: P_w = Potência 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 é obtida através do módulo Curvopower3. 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. Os sinais podem ser monitorados tanto pela corrente elétrica do motor elétrico, como pelo produto entre a tensão e o sinal da corrente, que resulta na potência elétrica consumida pelo motor (NAKAI *et al.*, 2015).

Tabela 3.2. Valores obtidos para calibração

Potência (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

Fonte: Adaptado do Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA), 2016.

Com os valores da tabela 3.2, construiu-se o gráfico da potência em função da tensão de saída do módulo com demonstra a Figura 3.22.

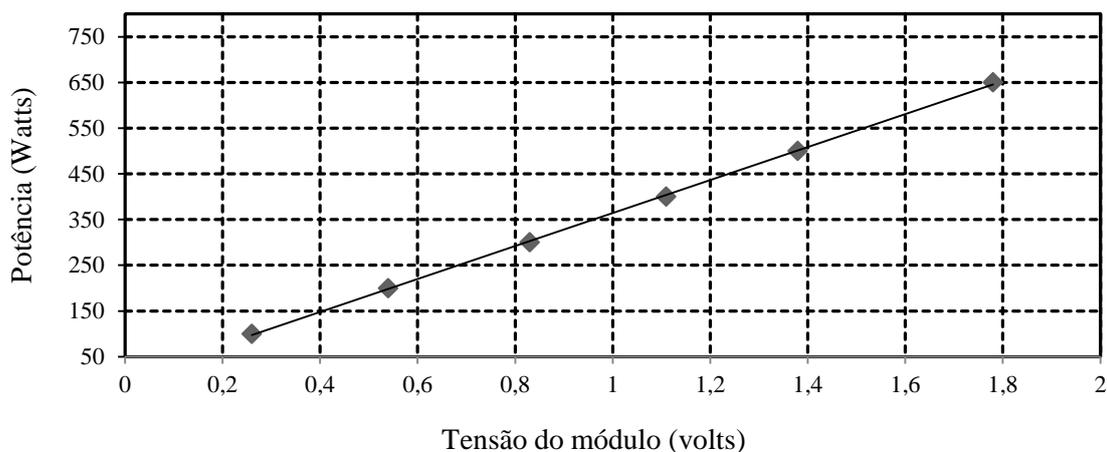


Figura 3.22. Potência versus tensão do módulo

A potência consumida está relacionada com as forças 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. A velocidade linear do rebolo, a velocidade da peça e a profundidade de retificação estão todas desempenhando influência significativa na retificação.

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 e o parâmetro DPO, sendo este último função dos valores RMS de EA e 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

Fonte: Adaptado do Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA), 2016.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados deste estudo foram divididos em seis condições que foram caracterizadas. E nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados referentes à suas variáveis de saída que é rugosidade (Ra), desvio de circularidade, desgaste diametral, influência da lubri-refrigeração na emissão acústica e potência de retificação e microdureza na superfície usinada, nos quais foram apresentados em forma de gráficos com respectivos valores médios e desvio padrão para cada condição analisada.

4.1. Rugosidade

Na Figura 4.1 estão apresentados os valores de rugosidade (Ra) para os ensaios realizados em função das condições de lubri-refrigeração (Convencional e com aplicação da técnica MQL). As vazões do fluido de corte foram definidas em abundância para o método convencional e a vazão controlada para o sistema MQL com os valores estabelecidos em 30, 60 e 120 ml/h, com e sem limpeza na área de corte do rebolo.

Avaliando os resultados da Figura 4.1, verifica-se uma relação dos valores de rugosidade com o método convencional no sistema MQL com limpeza. Em geral, os valores de rugosidade resultantes nestes dois métodos foram similares e menores em analogia aos valores de rugosidade obtidos nos ensaios com o método MQL sem limpeza.

Para a condição de lubri-refrigeração no sistema MQL com limpeza na superfície de corte do rebolo, constata-se que esse método foi responsável por proporcionar menores valores da rugosidade em relação aos da condição do sistema MQL sem limpeza.

Para os ensaios com a vazão de 30 ml/h com limpeza no método MQL a rugosidade média obtida foi próxima de 16 % maior que o método convencional e cerca de 107 % menor em relação ao método MQL sem limpeza. Com a vazão de 60 ml/h com limpeza no método MQL, a rugosidade média obtida foi próxima de 13 % maior que o método convencional e cerca de 62 % menor em relação ao método MQL sem limpeza. E para a vazão de 120 ml/h com limpeza no método MQL a rugosidade média obtida foi próxima de 11 % maior que o método convencional e cerca de 55 % menor em relação ao método MQL sem limpeza.

Constatou que os baixos valores de rugosidade utilizando o sistema MQL com limpeza na superfície de corte do rebolo em relação ao sistema sem limpeza é justificado pelo fato de que esse sistema proporciona melhor ação de retirada do cavaco e do óleo que estão

impregnados na estrutura do rebolo, gerando assim maior força na zona de corte durante a retificação e um melhor efeito do método. A Figura 4.1 apresenta os resultados de rugosidade média (Ra) em função da condição de lubri-refrigeração utilizada nos ensaios conforme parâmetros da (Tabela 3.1).

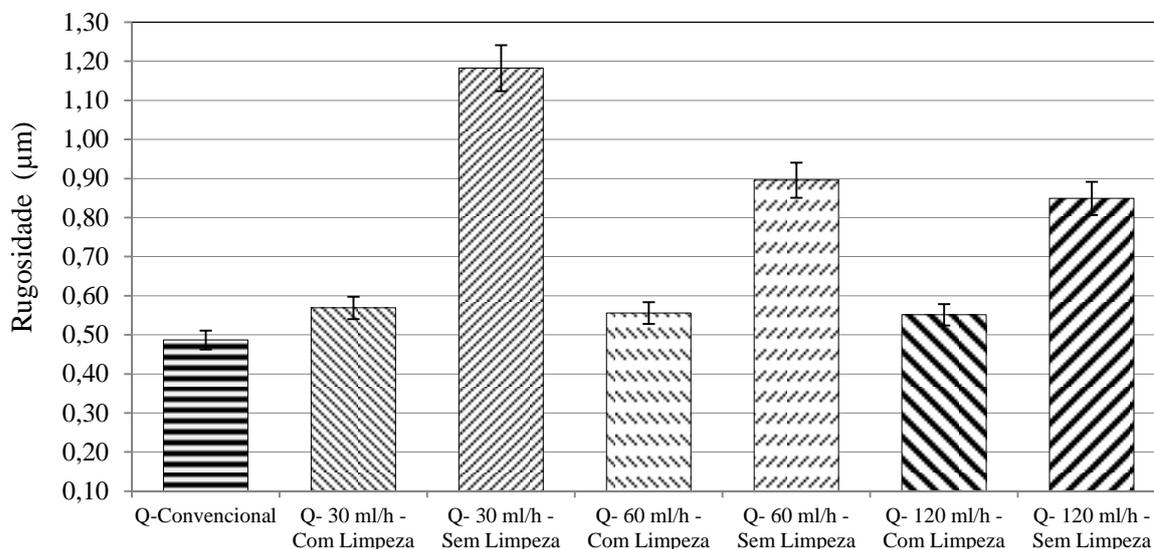


Figura 4.1. Rugosidade (Ra) do aço ABNT 4340 após retificação cilíndrica em várias condições de vazão (Q).

Pode-se constatar que os melhores valores de rugosidade obtidos próximo ao método convencional foi o sistema MQL com limpeza, ou seja, utilizando a limpeza na superfície de corte do rebolo, confirmando-se assim, uma opção a mais de lubri-refrigeração para o processo de retificação. Ao contrário o sistema MQL sem limpeza, que obteve um baixo desempenho quanto aos valores finais, inviabilizando este processo.

Considerando os valores apresentados na figura 4.1, pode-se notar que para as condições de lubri-refrigeração convencional e com aplicação da técnica MQL com limpeza, os valores de rugosidade obtidos nos ensaios se enquadram nos parâmetros estabelecidos para este estudo, que foram fundamentados na prática com a relação da velocidade do rebolo e da peça, na qual foi definida como uma operação de desbaste tendo seus valores de rugosidade enquadrados na qualidade de trabalho exigida neste processo, atendendo assim os padrões de qualidade exigidos pela retificação.

De acordo com Puerto *et al.* (2013), a retificação é um processo de usinagem por abrasão, em especial, para operações de acabamento em materiais de alta dureza e com a finalidade de se obter baixa rugosidade. Segundo normas ABNT NBR 8404 e 6158, essa faixa de valores estão compreendidas nas classes N3 (Ra 0,01 μm) a N7 (Ra 1,6 μm).

Outro procedimento foi utilizado para comparar os valores de rugosidade entre os métodos propostos em relação à variação da vazão do fluido de corte e o método convencional, os resultados para as variáveis analisadas estão demonstrados através da técnica estatística (ANOVA) em forma de gráficos, contento a média das medições e seus respectivos intervalos calculados com 95% de confiabilidade, onde foram testadas as hipóteses de que as médias de duas ou mais populações são iguais em determinadas condições ou momentos no processo (Convencional e MQL com limpeza). A Figura 4.2 apresenta as condições entre linhas o estado dos resultados obtidos, demonstrando que o sistema MQL com limpeza para as três vazões definidas, ficaram sempre próximas das condições dos resultados do método convencional.

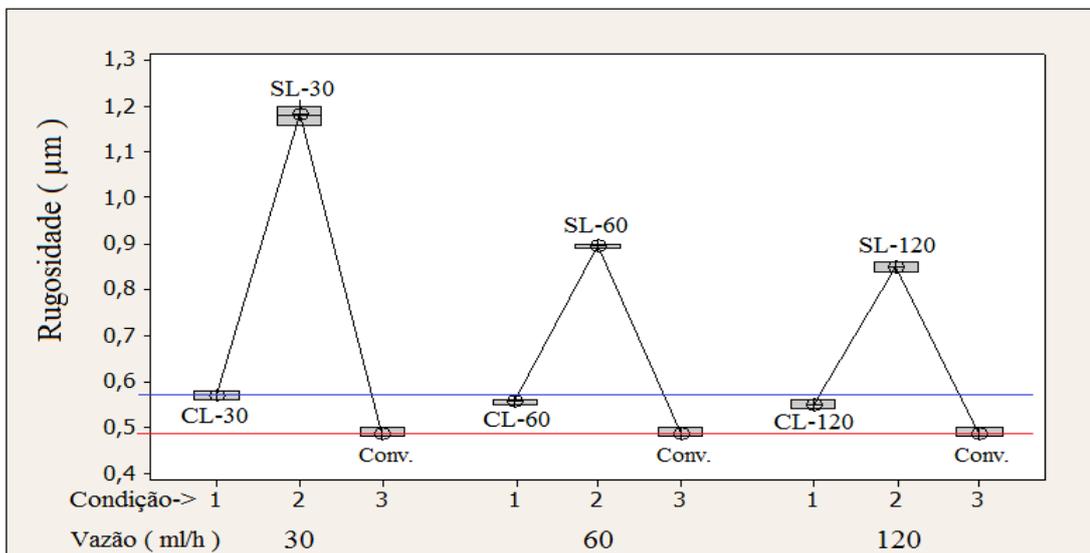


Figura 4.2. Superfície de rugosidade para as condições de refrigeração convencional e lubri-refrigeração com três variações de vazão.

Na Figura 4.2, observa-se que os valores da rugosidade obtidos após a usinagem com lubri-refrigeração MQL sem limpeza são bem maiores em relação ao MQL com sistema de limpeza do rebolo. A técnica MQL com limpeza proporcionou um (Ra) bem próximo àqueles obtidos pela técnica convencional, devido a aplicação da técnica de limpeza da superfície de corte do rebolo.

Os valores de (Ra) maiores foram obtidos ao usinar com a técnica MQL na vazão de 30 ml/h sem limpeza da superfície de corte do rebolo. Enquanto que para a maior vazão de 120 ml/h, proporcionou uma rugosidade menor em ambas às condições de ensaio em relação às demais vazões. Para essa vazão foi notado o entupimento dos poros do rebolo. Segundo Oliveira *et al.* (2012) como há alta tendência dos cavacos aquecidos se alojarem nos poros do

rebolo, ocorre o empastamento, o que foi detectado por eles após a retificação do aço ABNT 4340 com rebolo super abrasivo de CBN sob ação da lubri-refrigeração MQL com uma vazão de 100 ml/h. Cameron *et al.* (2010) explicam que quando os cavacos gerados no processo de retificação não são removidos totalmente da zona de corte por ação do fluido de corte, eles tendem a se alojarem nos poros do rebolo. Com isso, o fluido encontra dificuldade de chegar a zona de corte, consequentemente, colocando em risco a lubri-refrigeração no processo e afetando, negativamente, a eficiência e qualidade da peça usinada.

4.2. Circularidade

Os valores dos desvios de circularidade obtidos durante os ensaios para as sete condições de lubri-refrigeração estão apresentados na Figura 4.3. Comparando os resultados dos desvios de circularidade obtidos durante os ensaios, o valor do sistema convencional se torna uma referência para os demais métodos testados. Observa-se que à medida que aumenta a vazão do volume do óleo, o valor do desvio de circularidade diminui proporcionalmente como visualizado para as condições de 30, 60 e 120 ml/h MQL com limpeza. Em geral, os valores dos desvios de circularidade para os ensaios utilizando a técnica MQL com limpeza na superfície de corte do rebolo foram menores em relação aos ensaios utilizando a técnica MQL sem limpeza. Nota-se que os resultados obtidos entre os valores da amostra convencional e o sistema MQL com limpeza, estão muito próximos, apresentando uma redução do desvio de circularidade muito similar. Fato este, deve-se ao aumento da vazão do fluido de corte que promove uma boa refrigeração e a ação de limpeza do na zona de corte.

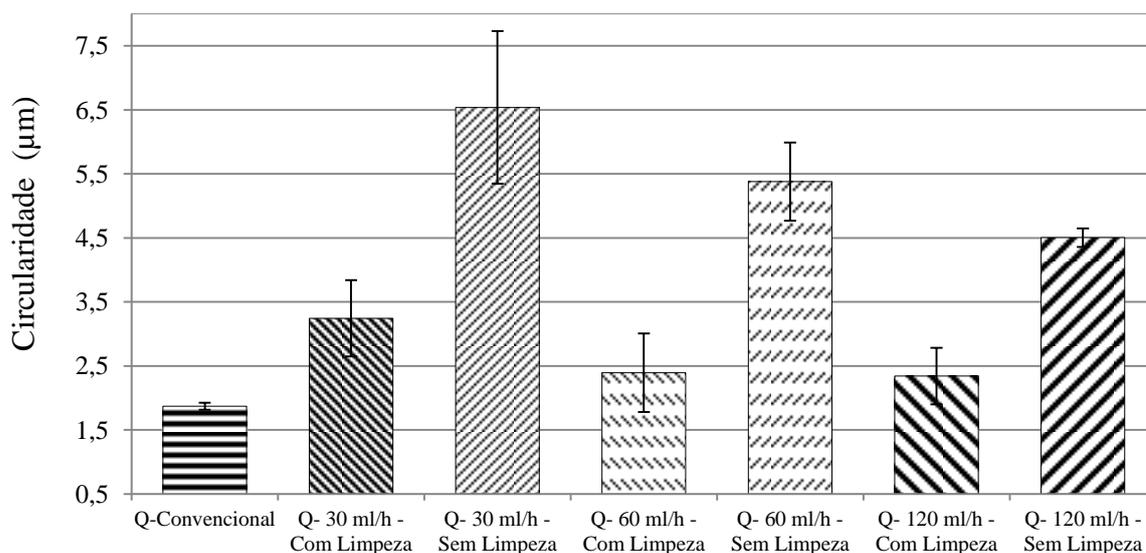


Figura 4.3. Desvio de circularidade em função das condições de vazão.

Para a usinagem sob a aplicação da MQL com e sem limpeza, observou-se que a circularidade foi menor após usinagem com a maior vazão 120 ml/h em relação às vazões de 30 ml/h e 60 ml/h. Segundo norma ABNT NBR ISO 2768-2 (2001), as tolerâncias de média precisão admissíveis, a exemplo do valor estudado no projeto, onde o valor do diâmetro do eixo é de 53 mm na condição após usinagem, para uma escala de referência para furo base H7 e eixo g6. Sendo esta, uma escala de referência que se aproxima ao corpo de prova em sua condição final, pode-se considerar conforme indicado em tabela da norma um valor referência para a circularidade de 19 μm a margem de tolerância permitida para esse processo. Dessa forma, destaca-se que os valores obtidos estão compatíveis com o que é aplicado na indústria para os processos de usinagem da mecânica corrente e extra precisa.

Os resultados da Figura 4.3 foram tratados estatisticamente e os resultados foram apresentados na Figura 4.4 para as variáveis analisadas dos desvios de circularidade. Eles são apresentados com intervalos de confiança com 95% de confiabilidade, onde foram testadas as hipóteses entre as médias das três condições de vazões, para verificar suas igualdades em determinadas condições ou momentos no processo.

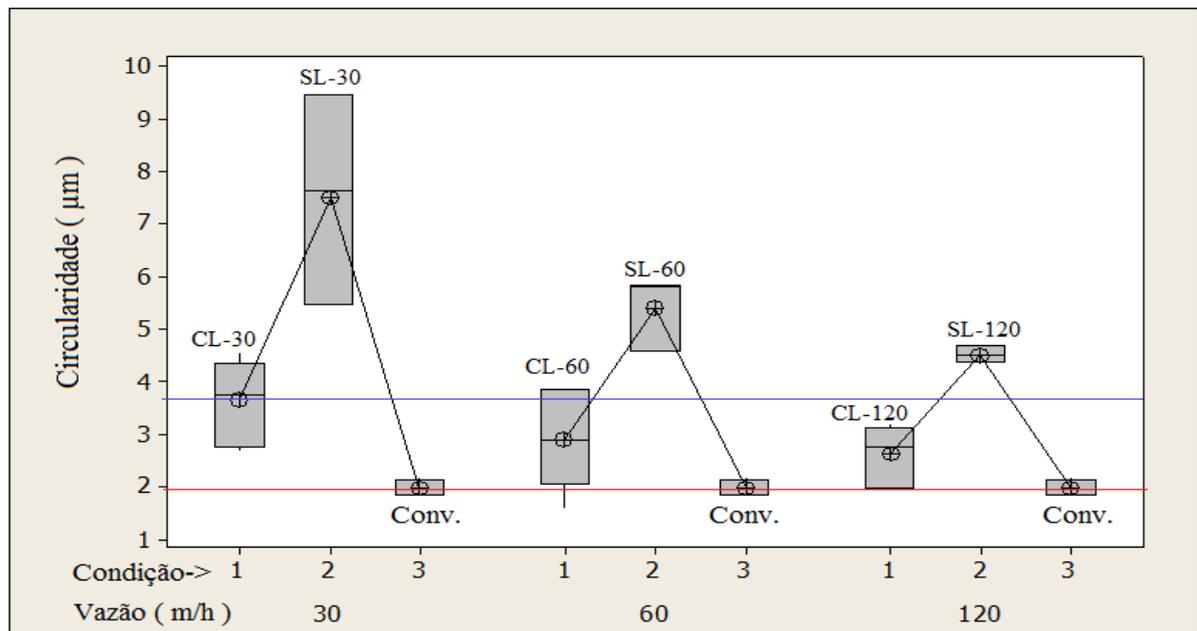


Figura 4.4. Desvio de circularidade para as condições de refrigeração convencional e lubri-refrigeração com três variações de vazão.

Da Figura 4.4 observa-se que os valores do desvio da circularidade para a lubri-refrigeração MQL sem o sistema de limpeza são maiores que aqueles valores obtidos pelas

demais condições avaliadas. Sendo assim, as condições apresentadas na Figura 4.4 que estão entre as linhas de referência, os resultados obtidos demonstram que o sistema MQL com limpeza (CL) para as três vazões de 30, 60 e 120 ml/h, ficaram sempre próximas das condições dos resultados do método convencional (Conv.).

Segundo Oliveira *et al.* (2012) quando o sistema de MQL é utilizado, pode ocorrer de os cavacos se aglutinarem com o óleo do MQL e formar uma pasta, que se alojará nos poros do rebolo e portanto irá atritar com a peça durante a usinagem. Durante o processo de retificação, a quantidade de cavacos gerada continua aumentando (assim como o atrito) até que ocorra o contato entre a peça de trabalho e o cavaco alojado nos poros do rebolo, causando tanto a deformação de origem plástica como a elástica na peça de trabalho. Isso pode elevar as forças de corte, causa vibrações que irão afetar os desvios dimensionais e a geometria da peça. Desse modo, é possível ressaltar ao empregar a técnica MQL com a vazão de 120 ml/h, a remoção de cavaco ocorreu de forma mais eficiente que as demais. Com benefício, diminuiu ou eliminou a tendência de empastamento do cavaco nos poros do rebolo e, por conseguinte, a elevação de erros de circularidade.

Para todas as condições testadas no processo de retificação, os valores médios dos desvios de circularidade para a dimensão que foi estabelecida no projeto, mantiveram-se abaixo da tolerância máxima permitida (19 μm) conforme normas ABNT NBR 6158 (1995) e 2768-2 (2001).

4.3. Desgaste do rebolo

A Figura 4.5 mostra os resultados obtidos para o desgaste diametral do rebolo através da lubri-refrigeração convencional e da técnica MQL com e sem limpeza, onde são comparadas as diversas condições de vazão e parâmetros que foram definidos na Tabela 3.1.

Os valores obtidos para o desgaste do rebolo em função das técnicas aplicadas na retificação dos corpos de prova seguirão as referências das condições do método de refrigeração convencional, com a qual os resultados obtidos serão comparados.

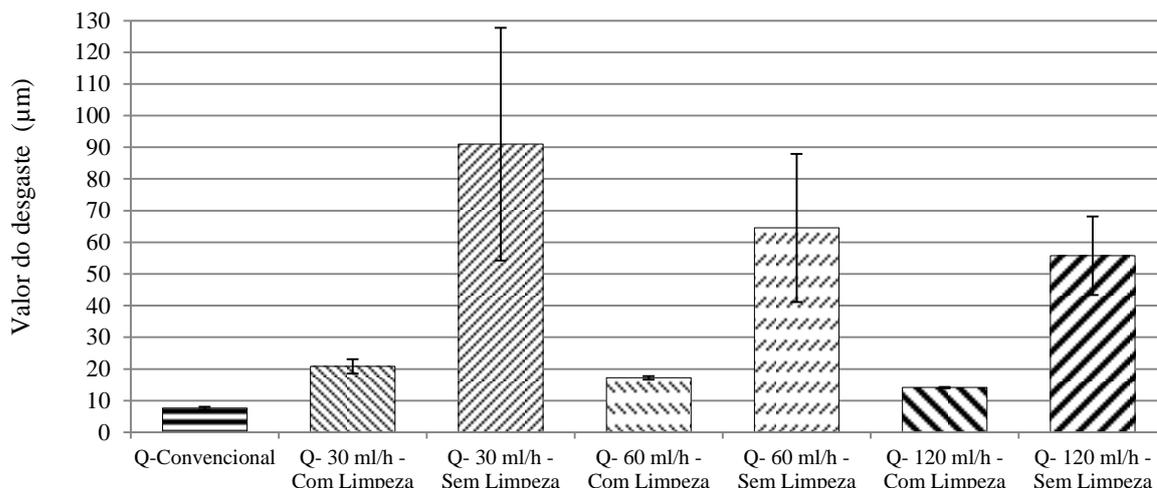


Figura 4.5. Desgaste do rebolo de alumina versus a técnica de aplicação de fluido de corte.

Os valores elevados de desgaste do rebolo para o ensaio utilizando a vazão de 30 ml/h sem limpeza, conforme apresentado na Figura 4.5 está relacionado com a baixa vazão do fluido de corte e a ausência da limpeza da superfície de corte, onde acarretou o empastamento da superfície do rebolo, comprometendo assim, sua eficiência. Vimos que a presença de cavacos e o excesso de óleo na região de corte do rebolo dificulta sua ação, aumentando seus esforços durante a remoção de material e logo, o aumento do valor de desgaste do rebolo.

A Figura 4.6 demonstra a etapa do sistema MQL sem limpeza (SL) com a vazão (Q) de 30 ml/h, evidenciando a realização do ensaio e o desgaste excessivo do rebolo, para as demais condições sem limpeza, a influência do desgaste do rebolo foi menor. Já para as condições do sistema MQL com limpeza na superfície de corte, o empastamento do rebolo e o desgaste foram desprezíveis, ficando com valores dentro das tolerâncias do processo.



Figura 4.6. (a) Ensaio com a vazão (Q) 30 ml/h (S/L) (b) Topografia da superfície de corte do rebolo.

Observa-se pela Figura 4.6 (b) para o caso do desgaste diametral do rebolo, que esta condição é em função da ausência da limpeza da superfície de corte do rebolo. Determinando assim que é necessária a aplicação do sistema de limpeza para que o processo de usinagem seja eficaz.

À medida que as forças de retificação e a qualidade da operação de usinagem são determinadas pelo desempenho da ferramenta de corte, é de suma importância estudar o comportamento do desgaste do rebolo para que a qualidade e a eficiência do processo de retificação sejam atendidas (DING *et al.*, 2014). Segundo, Iceri *et al.* (2012) o desgaste do rebolo tem relação direta com o sistema de lubrificação utilizada, sendo que o melhor sistema é aquele que possibilita aos grãos abrasivos permanecerem por mais tempo ao ligante. Silva *et al.* (2007) também afirmam que com o aumento da lubri-refrigeração pela aplicação do fluido de corte, ocorre a diminuição do desgaste do rebolo. Isso ocorre em razão da diminuição do atrito entre o grão, a peça e o cavaco, que permite aos grãos abrasivos que permaneçam por mais tempo fixados ao ligante, o que acarreta em menor desgaste diametral do rebolo.

Os resultados da Figura 4.5 foram tratados estatisticamente e os resultados apresentados na Figura 4.7 para as variáveis analisadas quanto ao desgaste do rebolo, demonstrando o comportamento em cada condição do sistema de lubri-refrigeração, contento a média das medições e seus respectivos intervalos calculados com 95% de confiabilidade, onde foram testadas todas as hipóteses de que as médias dos ensaios são iguais em determinadas condições ou momentos no processo, às linhas paralelas na Figura 4.7 demonstram essas condições (Convencional e MQL com limpeza).

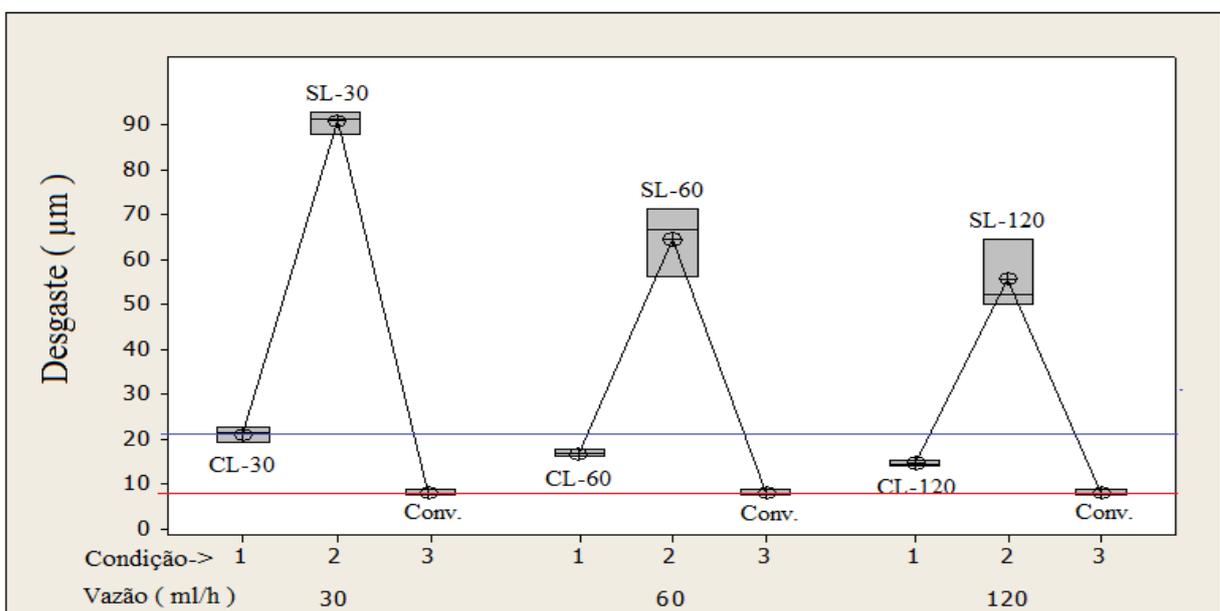


Figura 4.7. Análise estatística do desgaste do rebolo para as diversas condições de lubri-refrigeração.

Na Figura 4.7 observa-se que os resultados do desgaste do rebolo situaram-se entre 10 a 20 μm para as condições de lubri-refrigeração convencional (Conv.) e no sistema MQL com limpeza (CL), demonstrando uma interação entre os processos de retificação.

Para Malkin (2008), o desgaste do rebolo ocorre em função de dois fatores, que são a deterioração gerada pelo calor e a elevada solitação mecânica, as quais o rebolo é submetido. À medida em que melhora a capacidade de refrigeração e a dissipação térmica da região de corte, a perda de resistência do ligante diminui, proporcionando um menor desgaste do rebolo.

4.4. Valores de Potência Consumida

Na Figura 4.8 são apresentados os valores de potência (W) consumida em função da condição de lubri-refrigeração utilizada no processo de retificação do aço ABNT 4340 com rebolo de óxido de alumínio. Por meio da conversão dos dados obtidos em tempo real de usinagem, foram construídos gráficos para as potências de corte consumida durante ao processo, referentes a comparação em meio às técnicas de lubri-refrigeração convencional, sistema MQL com e sem limpeza na superfície de corte do rebolo.

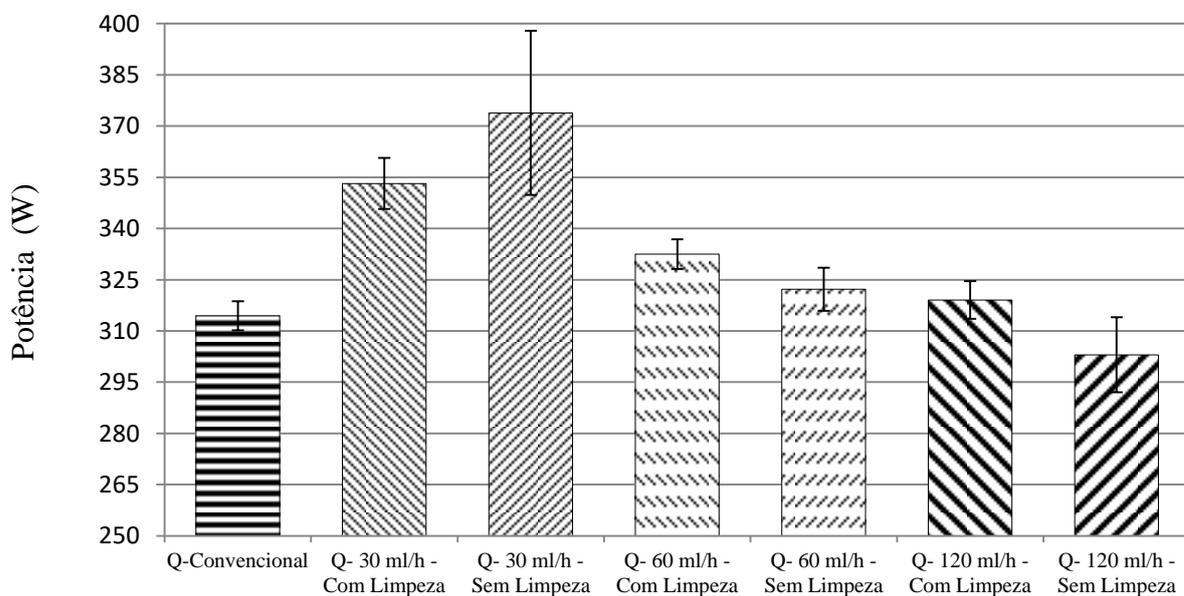


Figura 4.8. Potência consumida em função da condição de lubri-refrigeração utilizada.

Da Figura 4.8 observa-se que a menor potência de usinagem foi para a condição MQL sem limpeza com vazão de 120 ml/h, comparando com a condição convencional.

No caso da condição MQL sem limpeza com vazão de 30 ml/h é a maior potência consumida comparando com a condição convencional, característica essa apresentada devido ao cavaco que adere ao poro do rebolo não ser retirado e a utilização de uma menor vazão do óleo. Com isso, um número maior de partículas entram em atrito com a peça, necessitando de maior potência para esta etapa.

Com analogia às condições avaliadas entre o sistema MQL com e sem limpeza da superfície de corte do rebolo, em termos de rugosidade, desvio de circularidade e desgaste do rebolo, o sistema com limpeza foi mais eficiente para todas as condições, mas em relação à potência consumida, ocorreram algumas variações de consumo não sendo a melhor.

Com base nos resultados da Figura 4.8 a diferença de percentual da potência consumida se comparando ao sistema convencional, é apresentada na Tabela 4.1 sua relação de consumo.

Tabela 4.1. Relação da potência consumida em relação ao sistema de lubri-refrigeração convencional.

Sistema de Lubri-refrigeração	Potência consumida (W)
MQL 30 ml/h – Sem limpeza	(+) 19 %
MQL 30 ml/h – Com limpeza	(+) 12 %
MQL 60 ml/h – Sem limpeza	(+) 2,5 %
MQL 60 ml/h – Com limpeza	(+) 6 %
MQL 120 ml/h – Sem limpeza	(-) 3,6 %
MQL 120 ml/h – Com limpeza	(+) 1,6 %

Observa-se na Tabela 4.1 que a variação da potência consumida não está correlacionada a um só critério, mas sim, às variáveis estipuladas ao processo, como a incidência do ângulo do bico de limpeza estar atuando contra o sentido de corte do rebolo e a variação de vazão do fluido de corte.

Portanto, os resultados do consumo de potência se mostram bastantes desproporcionais aos resultados do método convencional, mas não apresentando valores expressivos ao consumo. Demonstrando que a potência consumida é obtida com variáveis na vazão e sem condição de limpeza, além da influência da fenomenologia do corte. Há também o controle da quantidade de óleo injetado. Com isso, demonstra uma relação complexa para se quantificar, pois pode-se obter uma potência menor a uma rugosidade maior e uma rugosidade menor com uma potência maior.

4.5. Emissão acústica

Na Figura 4.9 são apresentados os valores de emissão acústica (RMS) em função do aço ABNT 4340 em várias condições de corte, observa-se que os valores da emissão acústica em geral foram mais elevados após as usinagens com a técnica MQL sem limpeza do rebolo.

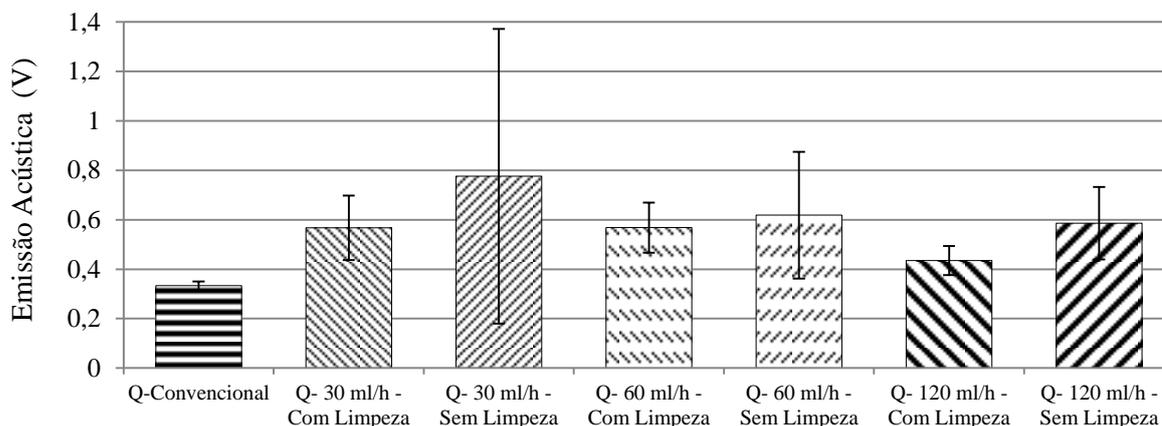


Figura 4.9. Emissão acústica em função da condição de lubri-refrigeração empregada na retificação do aço ABNT 4340

Da Figura 4.9 observa-se que a usinagem com a técnica MQL com sistema de limpeza proporcionou valores de emissão acústica baixa e próxima daqueles obtidos pela técnica convencional. Isso ocorreu devido à remoção dos cavacos dos poros da ferramenta abrasiva que foi eficiente e promoveu menor atrito entre o rebolo e a peça que esta sendo retificada, proporcionando menos defeitos na peça, bem como o ruído gerado, por consequência, menor a emissão acústica gerado na usinagem. Outra característica na redução da emissão acústica foi a relação na variação da vazão do fluido de corte. Com a elevação do volume aplicado, gerou uma película mais espessa, reduzindo o atrito entre a peça e o rebolo, apresentando assim melhores resultados.

Analisando os resultados, pode-se constatar uma diferença entre as características apresentadas entre a emissão acústica e potência consumida, na qual apresentou variações desordenadas quanto ao sistema de limpeza e a variação de vazão. Dados estes analisados, se dá pela evolução das informações que vem avançando com a aquisição de dados, pois uma grande variedade de sensores em especial os de emissão acústica são produzidos com a finalidade de monitoramento com aplicação na indústria. Eles reúnem características importantes como o monitoramento de peças em rotação, resistência à influência externa, fácil montagem e baixo custo (MARINESCU, *et al.*, 2007).

4.6. Microscopia óptica

Após análise da microscopia óptica das amostras especificadas na Figura 4.10, podemos identificar a ocorrência de possíveis danos ou alterações na microestrutura após a retificação nas diferentes condições estabelecidas, conforme parâmetros especificados na Tabela 3.1. Convencionou-se a escolha de uma amostra que apresentou o menor desvio padrão em relação à média dos valores de rugosidade (Ra) e de desvio de circularidade (μm).

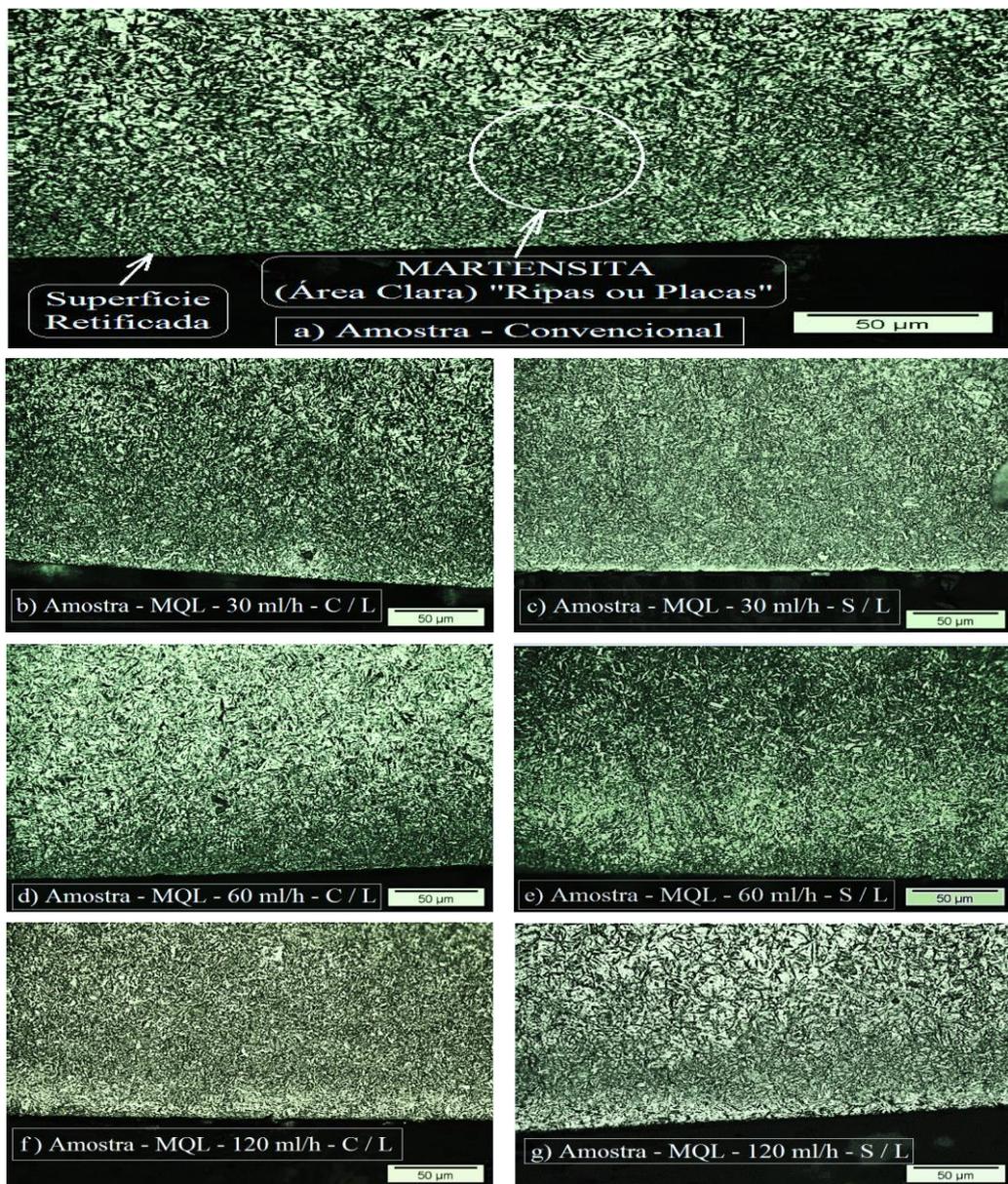


Figura 4.10. Micrografia do aço ABNT 4340 após retificação com as técnicas: a) Convencional, b) MQL 30 ml/h - C/L, c) MQL 30 ml/h - S/L, d) MQL 60 ml/h - C/L, e) MQL 60 ml/h - S/L, f) MQL 120 ml/h - C/L, g) MQL 120 ml/h - S/L. Ampliação de 500 X.

Da Figura 4.10, observa-se que não há evidências de dano de origem térmica, tanto próximo, quanto abaixo da superfície retificada, independente da condição de lubri-refrigeração. Foi possível também verificar que a microestrutura dos corpos de prova apresentou-se a matriz martensítica bem definida através das áreas claras representadas por ripas ou placas, como identificado na Figura 4.10 (a), não havendo alterações significativas e muito menos danos térmicos à superfície ou à subsuperfície.

Comparando as metodologias, nota-se que a usinagem em ambos os métodos de lubri-refrigeração (convencional e MQL), mostram-se capazes de retirar o calor da região de corte do rebolo. Segundo Malkin e Guo (2008), na remoção de material no processo de retificação é requerido um alto consumo de energia. Este resultado apresenta-se com significativa importância para as indústrias, uma vez que o fato de não ocorrer danos térmicos na peça garante a manutenção de pontos como a qualidade micro estrutural, propriedades mecânicas de projeto e eficácia do processo de usinagem (RASIM *et al.*, 2015).

As características apresentadas pelas as amostras demonstram que o processo de usinagem avaliado nesta tese obteve bons resultados como exposto nas propriedades estruturais de cada análise realizada, ainda que caracterizada por uma microestrutura homogênea, como se pode visualizar pela estrutura da martensita, através das formas alongadas representadas pelas ripas ou placas e para algumas condições em forma acicular.

Observa-se também que as vazões utilizadas no método convencional e MQL com e sem limpeza do rebolo tiveram efeitos semelhantes na região de corte do rebolo durante a retificação.

Em termos de análises microestruturais da superfície retificada relacionado à sua dureza, será avaliado através da microdureza no próximo tópico.

4.7. Microdureza

Através da análise da microestrutura, podem-se identificar possíveis danos térmicos provocados pela remoção de material durante o processo de retificação. Com as medições da microdureza, complementam-se os resultados da análise metalográfica, comprovando por meio de variável quantitativa a não ocorrência de qualquer dano entre as subcamadas abaixo da superfície retificada, além de possibilitar a identificação da profundidade da camada afetada termicamente pelo processo. A Figura 4.11 apresenta os valores da microdureza em função da distância da extremidade ao centro da peça.

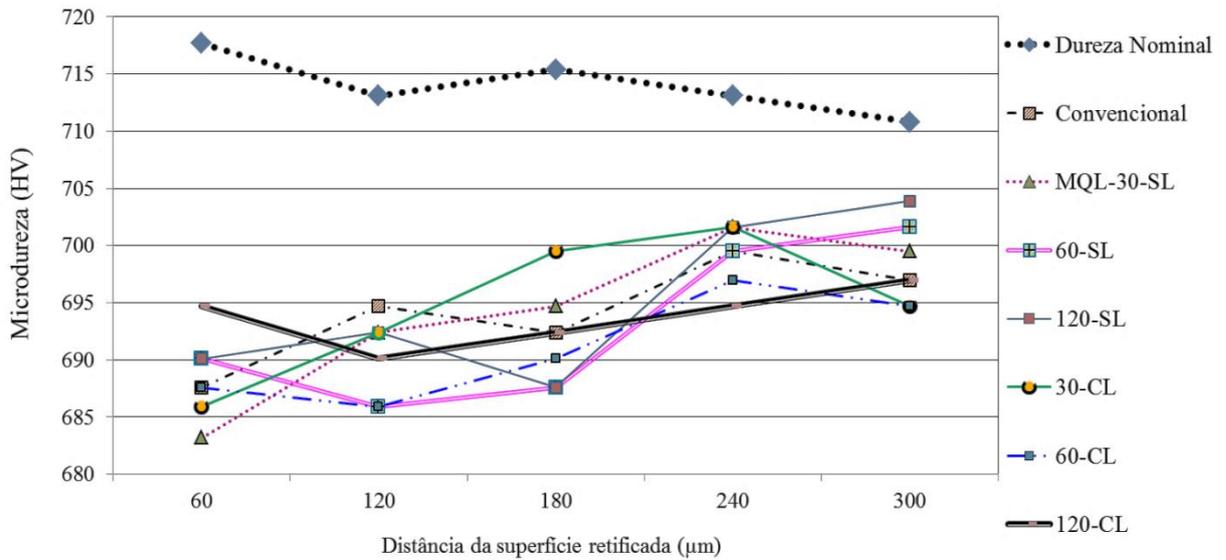


Figura 4.11. Microdureza do aço ABNT 4340 abaixo da superfície usinada após várias condições de lubri-refrigeração.

Na Figura 4.11 pode-se observar a ocorrência na redução da dureza das peças retificadas, demonstrando o fenômeno do revenimento que ocorre nos aços temperados quando submetidos ao processo de retificação. Segundo Malkin & Guo (2008), aços endurecidos retificados, mesmo quando nenhuma queima é detectada, apresentam, geralmente, uma diminuição na dureza na superfície usinada, devido ao efeito de super revenimento que ocorre perto da superfície.

Na Figura 4.12 são apresentados os resultados da avaliação da microdureza das amostras retificadas nas condições de lubri-refrigeração, seguindo os parâmetros definidos pela norma ASTM E 384-16, onde foram estabelecidas cinco pontos de medições após a face retificada, iniciando-se com a profundidade de 60 µm até 300 µm, conforme valores das diagonais obtidas no equipamento microdurômetro.

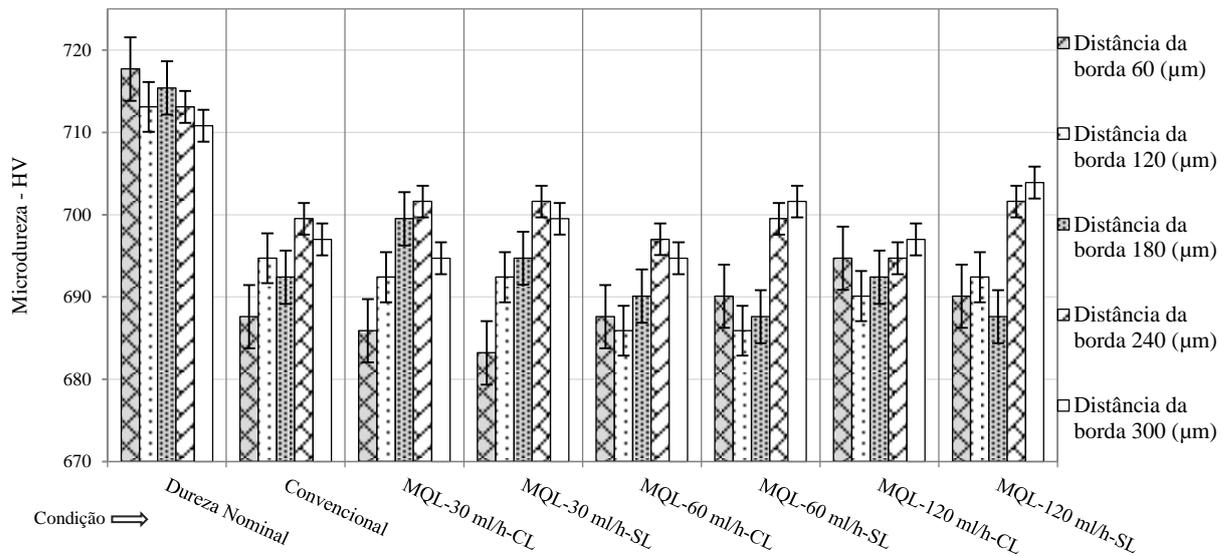


Figura 4.12. Resultados de microdureza após várias condições de lubri-refrigeração.

A análise das figuras 4.11 e 4.12 permitem concluir que as condições de lubri-refrigeração utilizadas não interagiram nas propriedades mecânicas. Observa-se nas condições investigadas neste trabalho, que a dureza nominal das peças antes da usinagem era de 715 HV aproximado, podendo afirmar que os valores encontrados nas medições apresentaram variações significativas na microestrutura do material das amostras retificadas sob os diferentes métodos de lubri-refrigeração.

Dessa forma, com os resultados da microdureza e a micrografia das peças em aço ABNT 4340, pode-se assegurar que não houve a queima e nem a formação de camadas na superfície da peça, onde para essas condições a dureza seria acima do valor nominal. Como os valores encontrados foram menores em relação à dureza nominal, caracterizou-se o revenimento durante o processo, o qual faz parte em função das condições do material e o processo de usinagem estabelecido.

5. CONCLUSÕES

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

As condições testadas utilizando o método MQL com a limpeza do rebolo e as três vazões estabelecidas para este trabalho, mostraram-se mais eficientes que o sistema de lubri-refrigeração sem a limpeza do rebolo, ou seja, apresentaram em geral melhores condições de retificação, qualidade das peças superior em relação ao seu dimensional e apresentou menor consumo da ferramenta de corte.

Ainda para a condição de MQL sem a limpeza do rebolo, os resultados dos testes influenciaram significativamente nos valores de rugosidade, circularidade e no desgaste do rebolo durante o processo de retificação.

No geral, a média dos resultados para as etapas de rugosidade e desvio de circularidade para as condições com métodos de lubri-refrigeração convencional e MQL com a limpeza do rebolo, mantiveram-se abaixo da tolerância máxima consentida para fabricação do corpo de prova estipulado neste projeto (modelo de um eixo). Para o processo de retificação cilíndrica externa, as tolerâncias estão fundamentadas nas normas citadas neste trabalho.

As análises de microdureza demonstraram resultados significativos para todas as condições de lubri-refrigeração testadas, onde todas as condições de retificação mantiveram os valores de dureza abaixo do valor nominal especificado 715 HV, não apresentando danos térmicos à superfície das peças retificadas, mantendo sua estrutura dentro dos parâmetros especificados para os aços endurecidos retificados, sendo satisfatório para o este processo de retificação.

Assim a técnica MQL com limpeza se destacou como uma condição a ser implantada e muito significativa para o processo de retificação, pois demonstrou que as propriedades que serão solicitadas as peças de trabalho estão muito similares à técnica convencional em todas as análises realizadas.

Portanto esses resultados poderão servir como referência para a implementação de uma nova metodologia de trabalho na retificação atual e na concepção de novas máquinas/equipamentos a serem fabricadas, demonstrando uma tecnologia que irá contribuir com o meio ambiente na redução de resíduos e dos custos aplicado ao processo de retificação.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- 1- Análise de custos da implantação do sistema MQL - (fluido puro e com adição de água), com e sem limpeza na zona de corte do rebolo (medir o ganho econômico com a utilização da técnica de lubri-refrigeração por MQL).
- 2- Realizar o estudo verificando a tensão residual por difração de Raio X.
- 3- Implantar o sistema MQL em uma linha de produção com atuação em afiação e manutenção de ferramentas de cortes industriais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. S.; LIRANI, J. (1997). **Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análise de Dimensões**. 5a. ed. Edgard Blucher Ltda.

ALFARES, M., ELSHARKAWY, A. (2009). **Effect of grinding forces on the vibration of grinding machine spindle system**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 40p. 2003-2030.

ALVES, M.C.S. (2005). **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.

ANDERSON, D., WARKENTIN, A., BAUER, R. (2008). **Experimental validation of numerical thermal models for dry grinding**. Journal of materials processing technology, 204, p. 269-278.

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.

ATTANASIO, A., GELFI, M., GIARDINI, C., REMINO, C. (2006). **Minimal quantity lubrication in turning: Effect on tool wear**. Wear 260 (2006) 333-338.

AURICH J.C.; B. LINKE, B; HAUSCHILD, M.; CARRELLA. M; KIRSCH, B. (2013). **Sustainability of abrasive processes**. CIRP Annals - Manufacturing Technology 62 – 653-672.

AYUBI, M.A., MOHAMED, A.B., ESA, A.H. (2014). **In-line inspection of roundness using machine vision**. Procedia Technology 15: 808-817.

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

BALDO, Édimo Dudas. (1994). **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. (2010). **A study of plane surface grinding under minimum quantity lubrication (MQL) conditions**. International Journal of Machine Tools and Manufacture. v. 50, p. 977-985.

BATALLER, H et al. (2004). **Cutting fluid emulsions produced by dilution of a cutting fluid concentrate containing a cationic/nonionic surfactant mixture**. J. Mater. Process. Tehnol, 152: 215-220p.

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

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

CAMERON, A.; BAUER, R.J.; WARKENTIN, A. (2010). **An investigation of the effects of wheelcleaning parameters in creep-feed grinding**. Int J Mach Tools Manuf 50:126-130. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2009.08.008.

CHEN, M. C. (2002). **Roundness measurements for discontinuous perimeters via machine visions**. Computers in Industry, Vol. 47, p. 185-197.

CHEN, X., ROWE, W.B. (1990). **Analysis and simulation of the grinding process, Part I: Generation of the grinding wheel surface**. International Journal of Machine Tools and Manufacture. Vol. 36, No. 8, pp. 871-882.

CHEN, X.; ROWE, W. B.; CAI, R. (2002). **“Precision grinding using CBN wheels”**. International Journal of Machine Tools & Manufacture 42, p.584-593.

COLPAERT, H. (2008). **“Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns”**. 4. ed. São Paulo : Ed. Edgard Blucher Ltda.

CONAMA. RESOLUÇÃO nº 23, de 12 de dezembro de 1996. Publicada no DOU nº 13, de 20 de janeiro de 1997, Seção 1, pág. 1116-1124.

CONSTITUIÇÃO FEDERAL, Art. 225 (1988).

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

DING, K., FU, Y., SU, H., GONG, X., WU, KEQIN. (2014). **Wear of Diamond grinding wheel in ultrasonic vibration-assisted grinding of silicone carbide**. International Journal of Manufacturing Technology, 71:1929-1938.

DINIZ, A. E.; LIU, J. J.; DORNFELD, D. A. (1992). **Correlating tool life, tool wear and surface roughness by monitoring acoustic emission in finish turning**. Wear, v. 152, n. 2, p. 395-407.

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

EL BARADIE, M. A. (1996). **Cutting Fluids: Part II – Recycling and Clean Machining**. Journal of Materials Processing Technology, vol. 56, No. 1-4, pg. 798-806.

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

FERRARI, C. (2015). **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.

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

GUO, C.; MALKIN, S. (2000). **Energy Partition and Cooling During Grinding**. Journal of Manufacturing Processes. Vol. 2/No. 3.

HECKER, R. L.; LIANG S. Y. (2003). **Predictive modeling of surface roughness in grinding**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 43, nº 8, p. 755-761.

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

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

ICERI, D.M., SOUSA, R.M., DESTRO, R.S., OIKAWA, M.H., BIANCHI, E.C., AGUIAR, P.R., FORTULAN, C.A. (2012). **Comparação entre os métodos de aplicação de fluido de corte convencional e otimizado na retificação plana de cerâmicas**. Cerâmica, 58: 84-89.

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

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

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

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

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

KING, R. I.; HAHN, R. S. (1992). **Handbook of modern technology**.3a Ed.

KRUEGER, M.K.; YOON, S.C.; GONG, D. (2000). **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.

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

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

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

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

MACHADO, A. R.; DINIZ, A. E. (2011). **Advantages and disadvantages of the use of the cutting fluids**. Machining Congress, São Paulo.

MALKIN, S. (1989). **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.

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

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

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

MAO, C.; ZHOU, X.; YIN, L.; ZHANG, M; TANG, K.; ZHANG, J. (2015). **Investigation of the flow field for a double-outlet nozzle during minimum quantity lubrication grinding.** Int J Adv Manuf Technol. DOI 10.1007/s00170-015-7896-2.

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

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

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

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

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

MARTINS, Cesar H. R. et al. (2014). **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.

NASCIMENTO, W.R. (2014). **Utilização da Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) com água no processo de retificação cilíndrica de cerâmica avançada com rebolo de ligante resino cerâmico/metálico.** Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista.

NAKAI, M. E., Aguiar, P. R., Junior, H. G., Bianchi, E. C., Spatti, D. H., & D'Addona, D. M. (2015). **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

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

NOVASKI, O.; RIOS, M. (2004). **Introdução teórica e vantagens de uso na usinagem de aços-liga.** Revista Máquinas e Metais, v. 460, p. 214-223,

NOVASKI, O.; RIOS, M. (2002). **Vantagens do uso de fluidos sintéticos na usinagem.** Revista Metal Mecânica, nº 118 : 56-62.

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

OLIVEIRA, J. F. G.; BIANCHI, E. C.; SOUZA, G. F. (1992). **O desempenho de rebolos pode ser controlado pela dressagem**. Revista Máquinas e Metais, v. 317, p. 12-28.

PATNAIK Durgumahanti US, Singh V, Venkateswara Rao P. (2010). **A new model for grinding force prediction and analysis**. Int J Mach Tools Manuf 5: 231-240.

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

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

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

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

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

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

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

ROWE, W. B. (2009). **Principles of Modern Grinding Technology**. New York: William Andrew Inc, 300 p.

ROWE, W. B.; MORGAN, M. N. (1993). **The effect of deformation on the contact area in grinding**. Annals of the CIRP, vol. 42/1.

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

SALEH, T., BISHWAS, I., RAHMAN, M. (2009). **Efficient dressing of the wheel in ELID grinding by controllable voltage with force feed back**. International Journal of Machine Tools & Manufacture.

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

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

SHARMA, V.S.; SINGH G.; SØRBY, K. (2014). **A Review on Minimum Quantity Lubrication for Machining Processes**. Mater Manuf Process 30: 935-953. doi: 10.1080/10426914.2014.994759.

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

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

SILVA NETO, J.F. (2012). **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.

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

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

SOKOVIC, M.; MIJANOVIC, K. (2001). **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.

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

SUN, L., Yang, S., Yang, L., Zhao, P., Wu, P., & Jiang, Z. (2015). **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.

TAWAKOLI, T.; HADAD, M. J.; SADEGHI, M.H. (2010). **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.

TAWAKOLI, T.; HADAD, M.J.; SADEGHI, M.H.; DANESHI, A.; STOCKERT, S.; RASIFARD, A. (2009). **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.

TÖNSHOFF, H.K.; LIERSE, T.; INASAKI, I. (1999). **“Grinding of advanced ceramics”**. In: JAHANMIR, S.; RAMULU, M.; KOSHY, P. Machining of Ceramics and Composites, Marcel Dekker, cap.3.

UMEDA, Y.; TAKATA, S.; KIMURA; TOMYAMA, T.; SUTHERLAND, J.; KARA, S.; HERRMANN, C.; DUFLOU, J.R. (2012). **Toward Integrated Product and Process Life Cycle Planning – an Environmental Perspective**. STCA, P.681.

WEBSTER, J.; CUI, C.; MINDEK JR., R. B. (1995). **Grinding Fluid Application System Design**. Annals of the CIRP, v. 44, n° 1, p. 333-338.

WEBSTER, J; TRICARD, M. (2004). **Innovations in Abrasive Products for Precision Grinding**. CIRP Annals – Manufacturing Technology. v.53, p. 597-617.

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

WEINERT, K.; INASAKI, I.; SUTHERLAND, J.W.; WACABAYASHI, T. (2004). **Dry machining and minimum quantity lubrication**, CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 53, p. 511-537.

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

ZHANG, Y.B., LI, C.H., JIA, D., ZHANG, D.K., ZHANG, X.W. (2015). **Experimental evaluation of MoS₂ nanoparticles in jet MQL grinding with different types of vegetable oil as base oil**. Journal of Cleaner Production, Volume 87, p. 930–940.

ZHANG, XH; YAN, C; CHEN, GY; AN, WK; DENG, ZH. (2014). **Experimental investigations of microcracks in laser induced cracking turning alumina ceramic**. Mater Manuf Process 29 (10): 1277-1283.