



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE ENGENHARIA – *Campus de Bauru*
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
LABORATÓRIO DE USINAGEM POR ABRASÃO (LUA)

**“MÉTODO DA LUBRI-REFRIGERAÇÃO DE MQL, COM A UTILIZAÇÃO DO
ÓLEO SOLÚVEL SINTÉTICO DILUÍDO EM ÁGUA, NA RETIFICAÇÃO
CILÍNDRICA DO AÇO ABNT 4340 COM REBOLO DE CBN”.**

Aluno Alan Rodrigo de Sales

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi

BAURU 2016



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA – *Campus de Bauru*
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
LABORATÓRIO DE USINAGEM POR ABRASÃO (LUA)

ALAN RODRIGO DE SALES

**“MÉTODO DA LUBRI-REFRIGERAÇÃO DE MQL, COM A UTILIZAÇÃO DO
ÓLEO SOLÚVEL SINTÉTICO DILUÍDO EM ÁGUA, NA RETIFICAÇÃO
CILÍNDRICA DO AÇO ABNT 4340 COM REBOLO DE CBN”.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Estadual Paulista como requisito para a obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica

ORIENTADOR: PROF. DR. EDUARDO CARLOS BIANCHI

BAURU 2016

Sales, Alan Rodrigo.

Método da lubri-refrigeração de MQL, com a utilização do óleo solúvel sintético diluído em água, na retificação cilíndrica do aço ABNT 4340 com rebolo de CBN / Alan Rodrigo de Sales, 2016
99 f

Orientador: Eduardo Carlos Bianchi

Tese (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2017

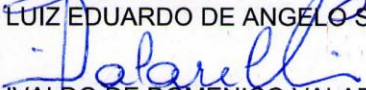
1. Retificação. 2. Fluido de corte. 3. Mínima Quantidade de Lubrificante – (MQL). 4. Empastamento. 5. Rebolo. 6. Aço ABNT 4340. 7. Integridade da Superfície. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Bauru. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE ALAN RODRIGO DE SALES, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA.

Aos 09 dias do mês de dezembro 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. LUIZ EDUARDO DE ANGELO SANCHEZ do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. IVALDO DE DOMENICO VALARELLI do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. ARTHUR ALVES FIOCCHI do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Federal de Uberlândia, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de ALAN RODRIGO DE SALES, intitulada **MÉTODO DA LUBRI-REFRIGERAÇÃO DE MQL, COM A UTILIZAÇÃO DO ÓLEO SOLÚVEL SINTÉTICO DILUÍDO EM ÁGUA, NA RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA DO AÇO ABNT 4340 COM REBOLO DE CBN**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO _____. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.



Prof. Dr. LUIZ EDUARDO DE ANGELO SANCHEZ



Prof. Dr. IVALDO DE DOMENICO VALARELLI



Prof. Dr. ARTHUR ALVES FIOCCHI

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha esposa Camila, meu Sogro Antônio e minha sogra Maria José e aos meus pais Vicente (em memória) e Rosa e ao meu irmão Alison

AGRADECIMENTOS

Agradeço a DEUS pelo dom da vida, pela saúde, força, paciência para resolver as adversidades e por todas as bênçãos.

À minha esposa Camila, pela paciência pelo carinho, apoio e dedicação

Aos meus pais Vicente e Rosa, aos quais devo minha vida, por me ensinarem valores e sempre me incentivarem a buscar novas conquistas.

Ao meu sogro Antônio e minha sogra Maria José pelo apoio e dedicação.

Ao meu orientador Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi pela amizade, constante apoio e confiança em meu trabalho.

Ao Bruno Kenta Sato por ter participado da pesquisa deste trabalho e me ajudado com os resultados.

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

Ao programa de Pós-graduação em Programa em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual Paulista campus Bauru pela oportunidade que me foi concedida

À Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista - *campus* de Bauru, por gentilmente ceder os Laboratórios de Usinagem por Abrasão para a elaboração deste trabalho.

À empresa Quimatic Tapmatic por fornecer os fluidos de corte usados neste trabalho.

Agradeço aos técnicos: Hamilton José de Mello, do Laboratório de Materiais do Departamento de Engenharia Mecânica e a todos da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista - *campus* de Bauru, por gentilmente colaborarem neste projeto.

A todos os amigos e familiares que contribuíram mesmo que de forma indireta para realização deste trabalho.

RESUMO

A aplicação da mínima quantidade de lubrificante (MQL) na usinagem dos metais começaram a ser estudados como alternativa para reduzir o uso dos fluidos de corte, para poder atingir uma produção mais limpa e menos prejudicial ao meio ambiente e aos trabalhadores, na retificação, apesar de ser considerada uma técnica inovadora no aspecto ambiental, sua aplicação é restrita devido à geração excessiva de calor e ao entupimento dos poros do rebolo causado pelos cavacos, e isto prejudica a qualidade final do produto e aumenta o desgaste da ferramenta. Esta pesquisa buscou aprimorar o uso do MQL utilizando óleo solúvel sintético da Quimatic Tapimatic ME-2. Além de usar o jato com a mistura ar e óleo e proporções de água injetado na interface rebolo-peça à alta velocidade um jato de ar comprimido, foi utilizado na superfície de corte do rebolo para minimizar o empastamento do rebolo gerado durante o processo de usinagem pela mistura formada pelo óleo do MQL mais os cavacos. Foram realizados ensaios na retificação cilíndrica externa de mergulho do aço ABNT 4340, temperado e revenido com dureza média de 54 HRC, usando rebolo de nitreto de boro cúbico (CBN) com ligante vitrificado. Os métodos de lubri-refrigeração propostos foram o convencional com fluido em abundância e o MQL (sem limpeza da superfície de corte do rebolo) e MQL (com a limpeza, utilizando o ângulo de incidência do ar comprimido na superfície de corte do rebolo fixo a 30 graus). Este ângulo foi escolhido por ser a melhor condição mostrada nos trabalhos de outros autores. Consideraram-se as variáveis de saída do processo: rugosidade, desgaste diametral do rebolo, circularidade, além de análises metalográficas e medições de microdureza da superfície retificada para verificação de danos térmicos; de forma a analisar a viabilidade da substituição do tradicional método de aplicação dos fluidos em abundância pelo MQL com a limpeza. Os resultados mostraram a possibilidade de implementação da técnica da limpeza do rebolo como um aprimoramento tecnológico da mínima quantidade de lubrificante na retificação, reduzindo o consumo dos fluidos de corte. A técnica MQL com limpeza para um ângulo específico de incidência do ar comprimido mostrou-se extremamente eficiente com a obtenção de melhor acabamento superficial e dimensional, além de menor desgaste da ferramenta abrasiva e isenção de danos térmicos, quando comparada com os métodos convencionais sem a limpeza do rebolo.

Palavras chaves: Retificação cilíndrica, mínima quantidade de lubrificante, rebolo cúbico de boro, aço ABNT 4340, diluição de fluido em água, limpeza do rebolo com ar comprimido

ABSTRACT

The application of minimum quantity of lubricant (MQL) on machining of metals has emerged as an alternative to reduce the abundance of cutting fluids and then achieve a cleaner production. In grinding, although considered a breakthrough technique in the environmental aspect, its application is restricted due to excessive generation of heat and grinding wheel loading caused by the chips, damaging the final product quality and increasing tool wear. The objective of this research was to improve the MQL technique synthetic soluble oil Quimatic Tapmatic ME-2 using beyond the jet with air mixture and oil and water proportions using an additional jet of compressed air to clean the clogged pores of the wheel. Grinding wheel in tests were performed in cylindrical plunge grinding of the ABNT 4340 steel, quenched and tempered (54 HR_C), with a vitrified cubic boron nitride (CBN). The suggested methods of lubrication were conventional (abundant fluid), MQL (that without the use of air jet to cleaning the wheel) and MQL plus cleaning system using the angle of incidence of the compressed air on the cutting surface of the grinding wheel fixed to 30 degrees. Other authors chose This angle to be the best condition shown in the works. This performance was evaluated based on an analysis of the process output variables: roughness, diametric wear of the grinding, roundness, and metallographic analysis plus microhardness measurements of the grounded surface to verify thermal damage incidence. The results showed the possibility of implementing the technique of cleaning as a technological enhancement to minimum quantity of lubricant in the grinding, reducing the use of cutting fluids. The technique MQL plus cleaning system, in a specific incident angle of the compressed air was extremely efficient, resulting in better surface finish, reduced tool wear and free of thermal damage when compared with conventional methods without cleaning of the wheel.

Key words: cylindrical grinding, minimum amount of lubricant, cubic boron grinding wheel, steel ABNT 4340, dilution water fluid, grinding cleaning with compressed air

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa para a realização deste projeto	2
1.2 Objetivo	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 O processo de retificação cilíndrica externa de mergulho	4
2.1.1 O ciclo de retificação cilíndrica externa de mergulho	5
2.1.2 Remoção de material no processo de retificação	6
2.1.3 Danos térmicos causados pela retificação	7
2.1.4 Comprimento de corte (l_c)	8
2.1.5 Profundidade de corte (a)	9
2.1.6 Velocidade de mergulho (V_f)	9
2.1.7 Velocidade de corte (V_s)	10
2.1.8 Velocidade da peça (V_w)	10
2.1.9 Taxa de remoção do material (Q_w)	10
2.1.10 Espessura equivalente de corte (h_{eq})	11
2.2 Nitreto cúbico de boro (CBN)	12
2.2.1 Ligantes	13
2.2.4.2 Vitrificadores	14
2.3 Processo de dressagem do rebolo	15
2.3.1 Tipos de Dressadores	16
2.3.1.1 Dressador estacionário conglomerado	17
2.3.1.2 Microefeito na dressagem	18
2.3.1.3 Desgaste de dressadores estáticos	19
2.4 Fluido de corte	19
2.4.1 Importância da aplicação dos fluidos de corte no processo de retificação	20
2.4.2 Problemas causados pelos fluidos de corte	21
2.4.3 Otimizações na aplicação dos fluidos de corte	22
2.4.4 Busca por formas alternativas de lubri-refrigeração no processo de retificação	25
2.4.4.1 Usinagem a seco	26
2.4.4.2 A técnica da mínima quantidade de lubrificação (MQL)	27
2.4.4.3 Vantagens da utilização do MQL	29

2.4.4.4 Desvantagens no uso da técnica de MQL	29
2.5 Fenômeno do entupimento dos poros do rebolo	30
2.6 Limpeza da superfície de corte do rebolo entupidos por cavacos da usinagem	32
2.6.1 Limpeza da superfície de corte do rebolo com ar comprimido	32
2.7 Variáveis de saída do processo	35
2.7.1 Rugosidade	36
2.7.2 Desvio de Circularidade	37
2.7.3 Desgaste diametral do rebolo	39
2.7.4 Emissão acústica (EA)	40
2.7.5 Potência	41
2.7.6 Vibração	42
2.7.7 Análises metalográficas	42
2.7.8 Microdureza	43
3 MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1 Equipamentos a serem utilizados	44
3.1.1 Retificadora cilíndrica externa	44
3.1.2 Mandril de fixação	45
3.1.3 Corpos de prova	45
3.1.4 Rebolo CBN	46
3.1.5 Dressagem	46
3.1.6 Sistema de refrigeração convencional abundante	46
3.1.7 O sistema de mínima quantidade de lubrificante (MQL)	47
3.1.8 Sistema de limpeza secundário da superfície de corte do rebolo	49
3.2 Classificação e parâmetros dos ensaios	50
3.3 Caracterização dos parâmetros de saída	52
3.3.1 Força tangencial de corte	53
3.3.2 Emissão acústica (EA)	53
3.3.3 Circularidade	53
3.3.4 Rugosidade	54
3.3.5 Desgaste diametral do rebolo	55
3.3.6 Preparação das amostras para análise da microdureza e metalografia	56
3.3.7 Microdureza	56
3.3.7.1 Microestrutura	57

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
4.1 Rugosidade	58
4.2 Circularidade	60
4.3 Desgaste diametral do rebolo	62
4.4 Emissão acústica	64
4.5 Potência na retificação	66
4.6 Vibração	67
4.7 Microestrutura	69
4.8 Microdureza	72
5 CONCLUSÕES	75
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	76
Referências Bibliográficas	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Operação da retificação cilíndrica externa de mergulho (MALKIN 1989, modificado)	5
Figura 2: Representação do ciclo de uma retificação cilíndrica (Hassui e Diniz 2003-modificado)	6
Figura 3: Fases de formação do cavaco na retificação (Klocke, 2009-modificado)	7
Figura 4: Imagem de um dressador conglomerado: 1 - dressador conglomerado; 2 – pastilha do dressador conglomerado (Catálogo T.F.S. Terra Ferramentas Superabrasivas. 2013 adaptado)	17
Figura 5: Representação do microefeito (Hildebrandt 2014)	18
Figura 6: Representação do bocal Webster (Alberdi et al., 2011)	23
Figura 7: Fluxo de ar existente nos rebolos em rotação (Rowe, 2014-modificado)	23
Figura 8: Posicionamento do bocal em três posições distintas (Ebbrell et al., 2000-modificado)	24
Figura 9: Representação de um bocal sapata (Rowe et al., 2014)	24
Figura 10: Vistas esquemáticas: (a) rebolo normal, (b) rebolo estruturado com área de contato reduzida (Tawakoli <i>et al.</i> , 2012-modificado)	27
Figura 11: Cavacos aderidos aos poros do rebolo. (aumento de 100X). (Pereira <i>et al.</i> 2011)	31
Figura 12: Efeito do jato de ar comprimido na superfície de corte do rebolo (a) retificação sem limpeza do rebolo (b) retificação com limpeza do rebolo (Lee <i>et al</i> 2002 adaptado)	33
Figura 13: Variação da profundidade do canal retificado (LEE <i>et al.</i> , 2002, adaptado)	34
Figura 14: Detalhe dos ângulos de incidência do jato de ar comprimido (Oliveira et al 2011)	35
Figura 15: Resultados de rugosidade para o aço 4340 com o uso do óleo accu-lub LB 1000 e rebolo de CBN (Oliveira 2011)	37
Figura 16: Resultados do desvio de circularidade com a utilização do rebolo CBN, e o óleo MQL accu-lub LB 1000 em aços temperados e revenido 4340 (Oliveira 2011)	38
Figura 17: Resultados do desgaste diametral do rebolo de CBN com a utilização do óleo MQL accu-lub LB 1000 em aços temperados e revenido 4340 (Oliveira 2011)	40
Figura 18: Retificadora cilíndrica CNC Sulmecânica - RUAP 515 H Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA)	45

Figura 19: Foto tirada do Laboratório de usinagem por abrasão (LUA) do sistema de ar comprimido e medição de vazão para o MQL.....	48
Figura 20: Demonstração das partes funcionais do bocal para limpeza do rebolo (peças para fixação e sistema de leitura do ângulo de inclinação). (Oliveira <i>et al.</i> 2012).....	49
Figura 21: Diagrama dos ensaios definitivos onde A são os ensaios sem limpeza e B são os ensaios com limpeza de ar comprimido na utilização do MQL e a refrigeração convencional E.....	49
Figura 22: Circularímetro Talyrond da marca Taylor Hobson.....	54
Figura 23: Rugosímetro e suporte utilizados para medir a rugosidade das peças.....	54
Figura 24: Medição do desgaste diametral do rebolo com o auxílio do rugosímetro, Surtronic 3+, da marca Taylor Hobson.....	55
Figura 25: Esquema da medição do desgaste do rebolo.....	56
Figura 26: Média das rugosidades médias (Ra) para cada condição testada de lubri-refrigeração.	58
Figura 27: Resultado do desvio de circularidade.....	60
Figura 28- Média dos desgastes diametral do rebolo em suas respectivas condições de lubri-refrigeração.....	62
Figura 29: Resultados de emissão acústica para as diferentes condições de lubri-refrigeração.	64
Figura 30: Resultados da potência de corte para as diferentes condições de lubri-refrigeração.	66
Figura 31: Média dos valores de vibração para as respectivas condições de lubri-refrigeração.	68
Figura 32: Metalografia da peça temperada antes da retificação.....	69
Figura 33: Microestrutura da amostra retificada na condição de lubri-refrigeração convencional	70
Figura 34: Microestrutura da amostra retificada na condição MQL 1:0 onde A sem limpeza e B com limpeza.....	71
Figura 35: Microestrutura da amostra retificada na condição MQL 1:1 onde A sem limpeza e B com limpeza.....	71
Figura 36: Microestrutura da amostra retificada na condição MQL 1:3 onde A sem limpeza e B com limpeza.....	71

Figura 37: Microestrutura da amostra retificada na condição MQL 1:5 onde A sem limpeza e B com limpeza.....	72
Figura 38: Microdureza das amostras em distâncias de 60, 120, 240, 300 e 360 microns da superfície retificada.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – ANOVA sobre os resultados de rugosidade.....	59
Tabela 2 – ANOVA sobre os resultados de circularidade.....	61
Tabela 3 – ANOVA sobre os resultados do desgaste diametral do rebolo.....	62
Tabela 4 – ANOVA sobre os resultados da emissão acústica.....	65
Tabela 5– ANOVA sobre os resultados da potência de corte.....	66
Tabela 6– ANOVA sobre os resultados da vibração.....	68
Tabela 7 – ANOVA sobre os resultados da microdureza.....	73

LISTA DE ABREVIATURAS

MQL	Mínima Quantidade de Lubrificante
CBN	Nitreto Cúbico de Boro
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
EA	Emissão Acústica
CNC	Comando Numérico Computadorizado
SiC	Carbeto de Silício

LISTA DE SIMBOLOS

d_s	Diâmetro do rebolo	[mm]
d_w	Diâmetro da peça	[mm]
V_f	Velocidade de avanço	[mm/s]
a	Profundidade de retificação	[mm]
F_t	Força tangencial	[N]
F_n	Força normal	[N]
l_c	Comprimento de corte	[mm]
a_e	Profundidade de corte	[mm]
δ	Deflexões do sistema	[°]
V_s	Velocidade de corte	[m/s]
n_s	Rotação de rebolo	[RPM]
V_w	Velocidade da peça	[m/s]
n_w	Rotação da peça	[RPM]
G	Taxa de retificação	[-]
b_w	Largura da peça	[mm]
Q_w	Taxa de remoção do material	[mm ³ /s]
Q'_w	Taxa específica de remoção do material	[mm ² /s]
h_{eq}	Espessura equivalente de corte	(mm)
P	Potência na retificação	[W]
R_a	Rugosidade média	[μm]
R_z	Rugosidade máxima	[μm]
b_d	Largura útil do Dressador	[mm]
V_d	Velocidade do Dressador	[m/s]

1 INTRODUÇÃO

A retificação é um processo de abrasão que tem a finalidade de melhorar o acabamento superficial e corrigir a geometria da peça para ficar dentro das tolerâncias exigidas. Nesse processo para remover uma pequena quantidade de material é necessária uma grande quantidade de energia. A maior parte dessa energia é transformada em calor, as causas dessa conversão estão relacionado com o contato de partículas abrasivas com a peça. Este processo apenas empurra o material gerando atrito entre a peça e o rebolo (SADEGHI *et al.*, 2010), a área de contato entre o rebolo e a peça sofre deformação elástica e plástica em comparação com a quantidade de material removido (TAWAKOLI *et al.*, 2009). Para evitar tais danos na peça os fluidos de corte desempenham um importante papel nos processos de usinagem dos materiais, seu uso implica em muitas situações menores desgastes das ferramentas, associada a uma melhor qualidade da peça (DINIZ *et al.* 2008).

No entanto, os fluidos de corte possuem características negativas como alto custo, considerando a aquisição, manuseio, manutenção e descarte, malefícios à saúde dos operadores (doenças de pele e pulmão) e poluição do meio ambiente (TAWAKOLI *et al.*, 2009). De acordo com Rabiei *et al.* (2015) o fluido de corte é responsável por 80% (oitenta por cento) das doenças causadas na indústria, devido ao contato do fluido com a pele do trabalhador.

Na retificação, devido os gastos com filtragem e descarte correto do fluido, esse custo chega a ser maior que o custo do rebolo e constitui uma grande parte do custo total do processo (TAWAKOLI *et al.*, 2009).

Segundo Tawakoli *et al* (2007), o uso de uma quantidade cada vez menor de fluido na região de corte tem representado grande importância no cotidiano, desde que não ocorra o comprometimento da usinagem. Porém, a redução nas quantidades de fluidos de corte proposta em diversas técnicas deve estar tecnológica e economicamente coerentes, reduzindo os impactos ambientais, mas mantendo os parâmetros finais do processo.

Dentre as técnicas que promovem a redução do consumo de fluido de corte estão a usinagem à seco e a mínima quantidade de lubrificante (MQL). Contudo, a aplicação dessas técnicas apresenta resultados diferentes considerando os vários processos de usinagem, isto em virtude dos diferentes comprimentos de contato na região de corte, das ferramentas empregadas e de outros fatores inerentes aos processos. Nesse aspecto, os processos de usinagem por abrasão necessitam de maior lubrificação, inviabilizando a usinagem à seco em algumas situações (WEINERT *et al.* 2004).

De acordo com Tawakoli *et al.* (2010) estudaram a aplicação da técnica MQL na retificação cilíndrica usando rebolos de alumina na retificação dos aços ABNT 4340 os resultados mostraram um desempenho próximo ou superior ao da lubri-refrigeração convencional (fluido de corte em abundância).

Contudo, Sadeghi *et al.* (2009) mostram que uma redução no uso de fluidos de corte gera dificuldade em manter os poros do rebolo limpos, favorecendo a tendência de entupimento, o que gera o decréscimo da potencialidade de corte dos rebolos.

De maneira semelhante, Alves (2007) realizou um estudo sobre a influência dos métodos de lubri-refrigeração na retificação do aço ABNT 4340 usando rebolo de CBN, e foi constatado um desempenho inferior da técnica MQL considerando a rugosidade, circularidade e desgaste do rebolo.

1.1 Justificativa para a realização deste projeto

Devido às altas temperaturas que o processo de retificação atinge, o uso de fluidos de corte é indispensável para manter a integridade da peça, evitando alterações microestruturais e criação de tensões internas (IRANI *et al.*, 2005). Na atualidade o método de lubri-refrigeração mais utilizado e mais eficiente é a aplicação do fluido de corte em abundância.

Apesar de seus diversos benefícios a peça o fluido de corte possui substâncias nocivas ao meio ambiente e a saúde humana. Essas substâncias quando descartadas de forma incorreta poluem o ar, a água e o solo (SOKOVIC E MIJANOVIC, 2001). Além de causar problemas à saúde do trabalhador, que tem potencial para causar desde uma simples dermatite até um severo câncer (SILVA *et al.*, 2013).

Existe também o fator econômico, com as rigorosas leis ambientais as empresas tiveram que fazer o descarte correto do fluido de corte, e isso faz com que os custos de produção aumentassem. O descarte do fluido de corte é caro, uma vez que o fluido deve ser recolhido e tratado para retirar a toxidade do mesmo. Segundo Barczak *et al.* (2010) os custos com o fluido de corte podem chegar a 17% do custo de produção da peça.

Juntando todas as desvantagens do fluido de corte começou uma busca por novos métodos de lubri- refrigeração que não agredissem o meio ambiente, a saúde do trabalhador e fossem economicamente viáveis. Desses estudos, surgiu a Mínima Quantidade de Lubrificante, esse método utiliza uma pequena quantidade de fluido de corte, assim diminui os riscos de poluição, e a quantidade é tão pequena que não sobra fluido para ser descartado. No entanto esse método

ainda precisa ser aprimorado para a retificação, pois não atinge resultados equivalentes à lubri-refrigeração convencional. Um dos problemas do MQL é a refrigeração deficiente da técnica, pois nesse método o ar é responsável por retirar o calor da zona de contato, esse trabalho tem o intuito de melhorar a qualidade de refrigeração do MQL adicionando água no processo. Assim como a água possui um calor específico maior do que o ar espera-se que a refrigeração seja melhorada. Como foi visto na revisão bibliográfica a adição de água ao fluido pode diminuir a vida útil, devido a proliferação de bactérias que se alimentam do emulgador, no entanto isso não se torna uma preocupação, já que como a quantidade de fluido de corte é mínima no MQL esse fluido não é reaproveitado.

1.2 Objetivo

O objetivo desse trabalho é avaliar o desempenho do óleo solúvel sintético ME 2 ecológico com a técnica da Mínima Quantidade de lubrificante (MQL), com a diluição de óleo em água nas proporções 1:1, 1:3 e 1:5 e o óleo puro, adicionando-se ao MQL um sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo e repetir os ensaios com o MQL sem limpeza da superfície de corte do rebolo, os resultados obtidos serão comparados com a técnica de fluido de corte em abundância. Esses métodos de lubri-refrigeração foram utilizados na retificação do aço ABNT 4340 com o rebolo de nitreto cúbico de boro (CBN), utilizando a retificadora cilíndrica externa de mergulho. Assim a comparação entre os métodos de lubri-refrigeração, será feita pela análise dos dados de rugosidade, circularidade, desgaste diametral do rebolo, energia específica, força tangencial de corte, microdureza e microestrutura.

Desta forma o desempenho de cada método será avaliado, e com isso será mostrado quais as vantagens e desvantagens de cada um, objetivando-se aumentar o conhecimento sobre os métodos de lubri-refrigeração no processo de retificação e analisar se o óleo solúvel sintético ME 2 ecológico pode substituir o óleo accu-lub LB 1000 utilizado na técnica do MQL, com o objetivo de reduzir custos e sanar os problema com o descarte e o meio ambiente.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção serão apresentados os tópicos relevantes para a realização do presente trabalho. Entre esses tópicos estão a retificação cilíndrica externa de mergulho, parâmetros e variáveis de saída, rebolos, fluidos de corte, a técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante, limpeza da superfície de corte do rebolo que são importante para este estudo

2.1 O processo de retificação cilíndrica externa de mergulho

As variações da operação de retificação cilíndrica externa de mergulho é um processo considerado rápido e com viabilidade econômica relativamente baixa, neste processo o rebolo executa movimento de avanço numa direção perpendicular à superfície da peça a ser retificada. Normalmente a espessura do rebolo é maior que o comprimento da peça e por isso há possibilidade de se fazer a retificação de várias superfícies simultaneamente através da montagem de diversos rebolos ou a retificação de perfis, através da afiação do rebolo no perfil adequado (DINIZ *et al.* 2008).

Na retificação quando há um avanço do rebolo sobre a peça vários componentes sofrem deformações elásticas, devido à falta de rigidez tanto da ferramenta como da peça ou da própria máquina, isso resulta em uma diferença entre o avanço real e o programado, conforme a figura 1. Para que no final do processo a profundidade avançada seja próxima à profundidade teórica, existe um período denominado spark-out, onde as deformações elásticas são eliminadas e o rebolo remove o material restante. No spark-out ou tempo de centelhamento não há avanço isso faz com que o avanço real se aproxime do avanço teórico atingindo-se assim as dimensões necessárias à peça (HASSUI e DINIZ, 2003).

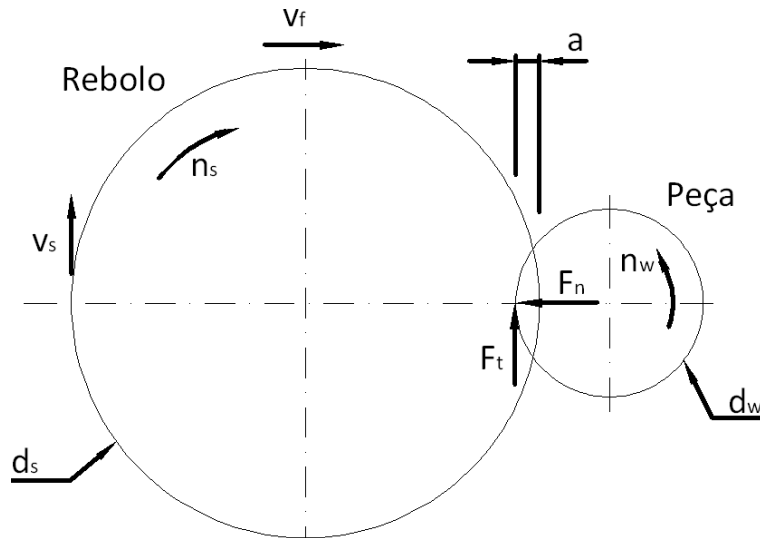


Figura 1: Operação da retificação cilíndrica externa de mergulho (MALKIN 1989, modificado).

De acordo com a Figura 1, (MALKIN *et al.* 1989) a operação de retificação cilíndrica externa de mergulho é basicamente constituída dos seguintes parâmetros, penetração de retificação ou profundidade de corte (a) correspondente ao final do ciclo de retificação, velocidade tangencial do rebolo (V_s), velocidade de mergulho (V_f), velocidade tangencial da peça (V_w), diâmetro da ferramenta (d_s), diâmetro da peça (d_w), rotação da peça (n_w), força tangencial de corte (F_t) e força normal de corte (F_n). A correlação entre eles caracterizam a operação de retificação cilíndrica externa de mergulho.

2.1.1 O ciclo de retificação cilíndrica externa de mergulho

Segundo Soares e Oliveira (2002), o ciclo de retificação externa de mergulho é demonstrado como o conjunto de etapas que ocorrem em um processo de fabricação, iniciando com a colocação da peça na máquina até a saída desta dentro de especificações pré-determinadas. O ciclo de retificação é subdividido em fases e cada uma possui um tempo para sua execução como demonstra a figura 2.

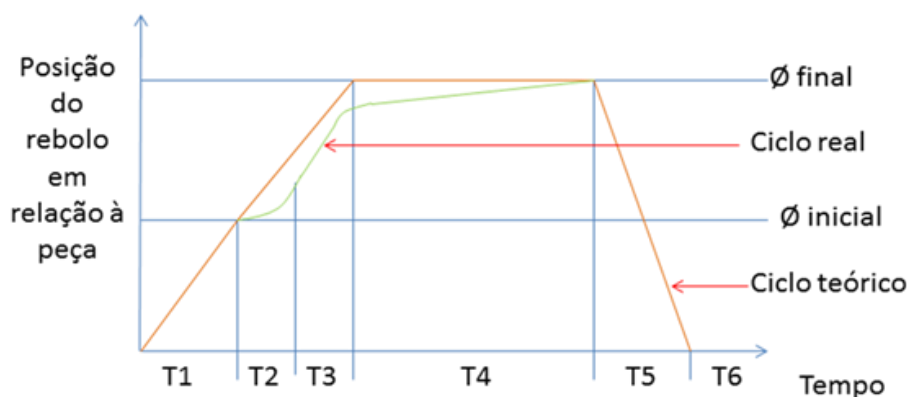


Figura 2: Representação do ciclo de uma retificação cilíndrica (HASSUI E DINIZ 2003-modificado).

A figura 2 é dividida em intervalos onde Hassui e Diniz (2003) detalham cada intervalo como T1 quando há contato entre o rebolo e a peça, o rebolo apenas avança em direção à peça. T2 é o início do contato entre o rebolo e a peça, aumento da força de corte gerando deformações elásticas, o avanço é menor do que o programado, e gera uma diferença entre a posição real e a teórica, T3 é a remoção do cavaco e a posição real se iguala a posição teórica, T4 spark-out, não há avanço e assim a peça, a máquina e o rebolo se recuperam da deformação gerada no T2. Nesse período as tolerâncias dimensionais e geométricas da peça são atingidas e a rugosidade superficial diminui T5 é o recuo da ferramenta permitindo a retirada da peça usinada e a colocação de outra peça a ser trabalhada e T6 a 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.

2.1.2 Remoção de material no processo de retificação

A remoção do material no processo de retificação é feita por partículas abrasivas com forma irregular e dispostos aleatoriamente na ferramenta de corte comumente chamado de rebolo (RASIM *et al.*, 2015).

De acordo com o trabalho de Nguyen e Butler (2005), dependendo das condições de retificação, pequenos números de partículas abrasivas do rebolo entram em contato com a superfície da peça. Dentre as partículas abrasivas ativas, somente uma pequena parte corta e produz cavaco. Na retificação de materiais, três fases distintas de interação do grão com peça são descrita como a região elástica, plástica e de corte.

De acordo com Klocke (2009) a formação de cavaco na retificação é dividida em três etapas como mostrado na figura 3. Na primeira etapa começa o contato entre o grão abrasivo e a peça causando uma deformação plástica. Conforme a profundidade de penetração aumenta, começa a surgir a deformação elástica, dando início a segunda etapa. Quando se atinge uma profundidade, a terceira etapa começa a ocorrer, que é a formação do cavaco. A profundidade de fatores como qual material a serem retificados, os parâmetros de retificação utilizados, a forma dos grãos entre outros (RASIM *et al.*, 2015).

O cisalhamento é a ação responsável pela formação do cavaco, enquanto a fricção e a deformação consomem energia sem remover material (SINHA *et al.*, 2016).

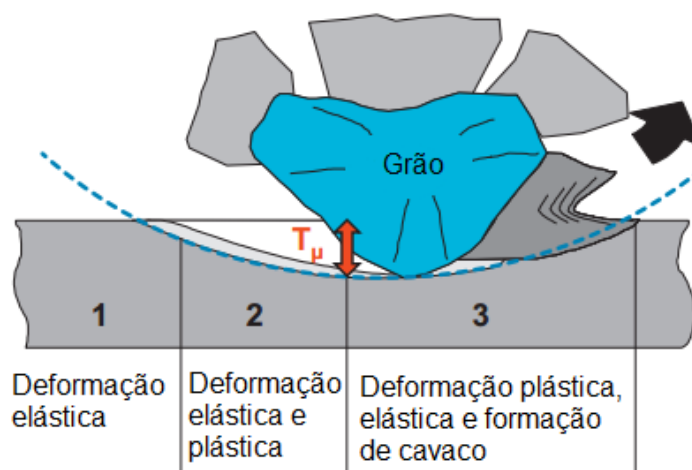


Figura 3: Fases de formação do cavaco na retificação (Klocke, 2009-modificado).

2.1.3 Danos térmicos causados pela retificação

Segundo Anderson *et al.* (2007) o erro mais comum que pode ocorrer na retificação é a queima da peça. Assim, é importante estudar quais as principais causas da queima para evitá-las. Na retificação, muitos dos grãos abrasivos estão em contato com a peça a cada segundo, no entanto apenas uma pequena parte desses grãos está realmente cortando, a maioria dos grãos estão se arrastando causando as altas temperaturas devido ao atrito gerado (TAWAKOLI *et al.* 2009).

A queima da peça ocorre quando o processo de retificação atinge uma temperatura e energia suficientes para causar descoloração e manchas que podem ser vistas na peça. A queima da peça também pode não apresentar defeitos físicos a serem observados. Conforme a

temperatura aumenta, a microestrutura do material pode se alterar, variando a dureza na parte afetada. Essas variações na dureza podem ocasionar tensões residuais na superfície, o que pode resultar em uma menor resistência a fadiga. Se o material for sensível o bastante, podem surgir trincas no material devido às tensões residuais ou às expansões térmicas (IRANI *et al.*, 2005).

As altas temperaturas podem causar vários tipos de danos térmicos na peça, como a queima superficial, modificações microestruturais, aquecimento superficial e sub superficial que pode causar a têmpera e a retempera superficial. Além disso, a expansão térmica não controlada e a contração da peça durante a retificação contribuem para erros dimensionais e de forma, geralmente esses erros são de circularidades (SILVA *et al.*, 2007).

O calor gerado na retificação na área de contato entre a peça e o rebolo é a principal causa da deterioração das propriedades metalúrgicas, da qualidade superficial, da precisão nas dimensões e na vida de rebolo (ALAGUMURTHI *et al.*, 2007).

2.1.4 Comprimento de corte (l_c)

O comprimento de corte é definido de acordo com Marinescu *et al.* (2004) como sendo a extensão de contato entre o rebolo e a peça e pode ser calculado pela equação 1:

$$l_c = \sqrt{a \cdot d_e} \quad (1)$$

Onde: l_c = comprimento de contato (mm); a = profundidade de corte (mm) e d_e = diâmetro equivalente (mm)

Marinescu *et al.* (2004) afirma que o comprimento de corte real pode ser muito maior que o comprimento de corte calculado pela equação, a equação é uma boa aproximação quando a operação de retificação possui grande profundidade de corte.

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

De acordo com Anderson *et al.* (2008) a retirada de material e a geração de calor ocorrem ao longo do comprimento de contato. O comprimento de contato de acordo com os autores depende da cinemática do processo e dos contatos mecânicos durante a retificação.

King & Hahn (1992) afirmam que a diferença de curvatura entre a peça e o rebolo influencia no comprimento de contato. Além do mais, 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 (2):

$$d_e = \frac{d_s}{1 \pm \frac{d_s}{d_w}} \quad (2)$$

Onde: d_s = diâmetro do rebolo (mm) e d_w = diâmetro da peça (mm)

2.1.5 Profundidade de corte (a)

A profundidade de corte para Marinescu *et al.* (2007) é a profundidade de material removido para cada revolução.

A peça, o rebolo e a estrutura da máquina defletem quando o contato é estabelecido, assim a real profundidade de corte é menor do que a calculada baseando-se no avanço (MARINESCU *et al.*,2004). O mesmo autor afirma que para que não haja muita diferença entre a profundidade de corte real e a calculada existe um período denominado spark-out onde não há avanço, assim as deflexões tendem a se estabilizar.

Marinescu *et al.* (2004) define a profundidade de corte real sendo a diferença entre, a profundidade de corte programada, as deflexões, o desgaste do rebolo e a expansão térmica. Assim a profundidade real de corte é calculada pela equação 3.

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

Onde: v_f = velocidade de avanço (mm/min) e v_w = velocidade da peça (mm/min).

2.1.6 Velocidade de mergulho (V_f)

A velocidade de mergulho é a velocidade como o rebolo avança sobre a peça. Essa velocidade também pode ser denominada velocidade de avanço (MARINESCU *et al.*,2004).

A velocidade de mergulho afeta o acabamento pretendido e também a força tangencial de corte, que se eleva com o aumento da mesma.

Segundo Baldo (1994), no início do processo de retificação ou desbaste, remove-se cerca de 95% do material da peça, sendo que a velocidade de mergulho deve estar entre 0,4 a 2,0mm/min. Já para o acabamento, a velocidade de mergulho deve estar entre 0,1 a 0,3mm/min.

2.1.7 Velocidade de corte (V_s)

Segundo Graf (2010) a velocidade de corte é a velocidade como um ponto da superfície do rebolo se desloca. Assim a equação que representa essa variável é a 4.

$$v_s = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60 \cdot 1000} \quad (4)$$

Onde n_s é a rotação do rebolo e d_s o diâmetro do rebolo.

Segundo Jackson *et al.* (2001) o aumento da velocidade de corte proporciona uma diminuição nas forças envolvidas no processo, um menor desgaste do rebolo e uma melhor rugosidade da superfície. Consequentemente aumenta a qualidade da peça e melhora a produtividade. Entretanto com o aumento da velocidade de corte a quantidade de energia térmica produzida no processo de retificação também aumenta.

Marinescu *et al.* (2007) cita que a maioria das retificadoras tem como padrão uma velocidade de corte de 43 m/s para abrasivos convencionais. O mesmo autor afirma que ao aumentar a velocidade de corte a espessura do cavaco diminui assim como o número de arestas ativas de corte.

2.1.8 Velocidade da Peça (v_w)

A velocidade da peça é definida por Graf (2010) de acordo com a equação 5.

$$v_w = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_w}{60 \cdot 1000} \quad (5)$$

Nota-se que a velocidade da peça é a velocidade periférica da peça. Segundo Graf (2004) o aumento da velocidade da peça faz com que a taxa de remoção de material aumente. Isso causam maior esforços em cada grão, elevando-se a força tangencial de corte. Desta forma, com um aumento da velocidade da peça confere ao rebolo um comportamento macio.

2.1.9 Taxa de remoção do material (Q_w)

Segundo Klocke (2009) a taxa de remoção do material é definida como o volume de material removido por unidade de tempo, Marinescu (2004) define a taxa de remoção do material na retificação segundo a equação (6).

$$Q_w = a \cdot v_w \cdot b = \pi \cdot d_w \cdot v_f \cdot b \quad (6)$$

Onde: Q_w = taxa de remoção de material (mm^3/min); e b = largura de retificação (mm).

Segundo Rowe (2014) para aumentar a taxa de remoção do material é necessário aumentar a velocidade de avanço, no entanto ao aumentar esse parâmetro há um aumento das forças e na rugosidade, diminui a vida do rebolo e a energia específica.

De acordo com Rowe (2014) a taxa específica de remoção do material (Q'_w) é a taxa de remoção do material pela largura da retificação. Isto permite que este valor se apresente de forma mais geral, sendo mais empregado.

Dividindo a taxa de remoção do material pela largura de retificação temos a equação 7.

$$Q'_w = a \cdot v_w = \pi \cdot d_w \cdot v_f \quad (7)$$

A taxa específica de remoção do material tem uma particular relevância no estresse causado nos grãos abrasivos, na taxa de desgaste dos abrasivos e todos os aspectos do comportamento do abrasivo, incluindo as altas temperaturas e os danos térmicos (ROWE, 2014).

2.1.10 Espessura equivalente de corte (h_{eq})

Segundo Shaw (1996), a espessura da camada de material removida pelo rebolo com a velocidade periférica do mesmo denomina-se espessura equivalente de corte h_{eq} , e é um parâmetro que permite quantificar uma condição de trabalho. Heinzel & Bleil (2007) definem esse parâmetro na retificação cilíndrica como a razão entre a taxa de remoção específica do material Q'_w e a velocidade de corte v_s , conforme a equação (8):

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

Onde: h_{eq} = espessura equivalente de corte (mm).

Rowe (2014) ainda afirma que quando a espessura equivalente de corte aumenta o estresse nos grãos abrasivos aumenta caso contrário o estresse nos grãos abrasivos diminui. Isso explica o motivo pelo qual existe a necessidade da busca por aumentar a velocidade do rebolo.

Marinescu *et al.* (2004) afirma que a espessura equivalente de corte é muito utilizada por sua simplicidade. Em um trabalho experimental é difícil determinar precisamente o espaçamento dos grãos abrasivos, uma vez que essa variável depende da profundidade de corte e do desgaste do rebolo.

Marinescu *et al.* (2007) escreve que a espessura equivalente não leva em conta o espaçamento dos grãos na superfície do rebolo. Mas é um fator importante já que determina a espessura com que os cavacos emergem da retificação e para que também sejam consideradas as características do rebolo é possível calcular a espessura teórica máxima do cavaco h_{max} que é apresentada na equação (9).

$$h_{max} = 2L \frac{v_w}{v_s} \sqrt{\frac{a}{d_s}} \quad (9)$$

Onde: h_{max} = espessura teórica máxima do cavaco (mm); L = espaçamento médio entre grãos abrasivos (mm).

2.2 Nitreto cúbico de boro (CBN)

O nitreto cúbico de boro é um superabrasivo sintético que surgiu para retificar aços e algumas ligas não ferrosas de alta resistência. A maioria dos grãos de CBN produzidos são monocristalinos. No entanto, os abrasivos policristalinos com cristais de tamanho sub micron tem sido introduzidos. Na sua forma policristalina o CBN é considerado significativamente mais duro, enquanto em sua forma monocristalina os grãos tendem a ser mais robustos, com arestas afiadas, com faces suaves, o que torna a ação dos ligantes difícil (MALKIN e GUO, 2008).

Segundo Rowe (2014) o CBN é o segundo material mais duro e é amplamente usado na retificação de aços. Apesar de ter um custo elevado, o CBN tem sido utilizado no lugar dos abrasivos convencionais na retificação de precisão de aços endurecidos, pela sua baixa taxa de desgaste e sua habilidade de gerar uma pequena faixa de tolerância nas peças produzidas.

De acordo com Marinescu *et al.* (2004) o CBN é no mínimo de 3 a 4 vezes mais barato que o diamante sintético. O CBN é o mais recente dos quatro principais abrasivos, industrialmente pode ser conhecido como *Borazon* (pela General Electric a primeira empresa que o fabricou comercialmente) (MARINESCU *et al.*, 2007).

O CBN tem sido utilizado no lugar do óxido de alumínio nas indústrias aeroespaciais, automotiva e de rolamentos, pois as partículas abrasivas de CBN possuem elevada dureza, resistência ao desgaste, além de diminuir a temperatura na zona de corte da retificação, reduzindo assim a tendência de danos térmicos e tensões residuais. A melhora da situação térmica do processo, não é apenas a menor energia requerida, mas também a alta condutividade térmica dos grãos superabrasivos CBN (GUO *et al.*, 2007).

A dureza em Knoop do CBN em temperatura ambiente é aproximadamente 45 GPa, é quase a metade da dureza do diamante e duas vezes mais duro que os abrasivos convencionais. Sua condutividade térmica é quase tão grande quanto a do diamante e a expansão térmica é em torno de 20% maior que a do diamante (MARINESCU *et al.*, 2007).

Em comparação com o diamante, uma importante vantagem do CBN é sua estabilidade térmica (MALKIN e GUO, 2008). O CBN é termicamente estável em uma atmosfera inerte a temperaturas maiores de 1500°C, e em ar o CBN forma uma camada de óxido de boro (B_2O_2) que protege o abrasivo de uma futura oxidação, assim o CBN no ar é estável termicamente até uma temperatura de 1300°C. No entanto, essa camada protetora é dissolvida pela água quando é utilizado um fluido a base de água no processo, assim o CBN tende a se desgastar mais rapidamente nesse caso do que quando se utiliza fluidos de corte de óleo puro (ROWE, 2014).

As vantagens do CBN comparado a outros abrasivos é a alta dureza, a estabilidade térmica, ser inerte quimicamente e ter uma boa condutividade térmica o que o torna adequado para retificação de alto desempenho (CAGGIANO e TETI, 2013).

Os rebolos de CBN são mais caros comparados a rebolos fabricados de outros materiais. Sua vida útil é maior e isso pode significar uma produção de qualidade, um custo baixo, além de aumentar a produtividade, pois uma maior vida da ferramenta significa menor tempo de dressagem, isto é menor tempo preparando o rebolo (CAGGIANO e TETI, 2013).

Para produção do CBN primeiramente é fabricado o nitreto de boro, uma solução branca com uma estrutura atômica hexagonal em camadas, chamada de HBN (ou α -Bn). Em seguida esse composto é submetido à alta temperatura e pressão para se converter em uma estrutura cúbica, similar a estrutura do diamante (MARINESCU *et al.*, 2007).

2.2.1 Ligantes

As partículas abrasivas são presas com vários tipos de materiais ligantes. Em geral os ligantes devem ser fortes o suficiente para suportar as forças de corte no processo de retificação, a temperaturas e as forças centrífugas sem se desintegrar, além de resistir ao ataque químico gerado pelo fluido de corte. Outras qualidades que podem ser exigidas do ligante são rigidez e habilidade de reter o grão abrasivo durante o corte até que o grão perca o corte (MALKIN e GUO, 2008).

De acordo com Marinescu *et al.* (2004) o ligante deve obedecer às seguintes funções proporcionar uma adequada retenção do grão, sem que haja uma prematura perda do abrasivo,

permitir uma controlada erosão do ligante para que as arestas de corte dos grãos abrasivos sejam expostas, ser suficientemente forte para transferir as forças de retificação do eixo para a peça, proporcionar uma adequada dispersão térmica.

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

Para a escolha do ligante deve se levar em conta o tamanho do rebolo, as condições de trabalho, a vida do rebolo e o custo de sua produção (JACKSON e MILS, 2000).

2.2.2 Vitrificados

Os ligantes vitrificados são demasiadamente mais duros que os resinoides e consideravelmente mais macios que os metálicos. A grande vantagem desse ligante é que o rebolo pode ser produzido com diversos perfis, além de poder ser remoldado quando o rebolo se torna sem corte ou irregular (ROWE, 2014).

O rebolo vitrificado de alumina representa quase a metade dos rebolos convencionais e na maioria das vezes sua aplicação é na retificação de precisão de alta produção. Os rebolos superabrasivos vitrificados, especialmente com CBN, têm crescido rapidamente no setor (MARINESCU *et al.*, 2007).

Segundo Malkin e Guo (2008) o ligante vitrificado é formado por uma mistura de argila, feldspato e frita. A quantidade de cada substância é determinada de acordo com a natureza do rebolo. Esses materiais são misturados com água e ligantes, em seguida a mistura é compactada em um molde. Já moldado, o material passa por ciclos térmicos onde as temperaturas são maiores que 1300°C. Quando as temperaturas estão em torno de 1100°C o ligante começa a se vitrificar.

As principais características para o uso de rebolos vitrificados são: alta estabilidade térmica, friabilidade, rigidez, e sua habilidade de suportar altos níveis de porosidade (MARINESCU *et al.*, 2007).

A atração principal para produção de rebolos vitrificados é a possibilidade de altos níveis de porosidade, e manter a integridade da estrutura. Isso proporciona um bom acesso do fluido de corte a área de contato e um transporte dos cavacos gerados no processo (MARINESCU *et al.*, 2007). Klocke (2009) descreve o rebolo vitrificado como friável, e sensível ao impacto, alto

módulo de elasticidade, resistente à temperatura, no entanto sensível às mudanças bruscas na temperatura, quimicamente resistente ao óleo e à água.

Em muitos casos envolvendo o CBN o ligante de metal tem sido substituído pelo vitrificado, isso porque o ligante metálico é de difícil dressagem (MARINESCU *et al.*, 2007).

Os rebolos vitrificados de CBN têm sido muito bem aceitos pelo seu custo benéfico elevado na retificação. Isso principalmente devido a sua longa vida útil, produção de uma superfície de qualidade, fácil preparação, e durabilidade em sua forma (AZIZI *et al.*, 2009). De acordo com Marinescu *et al.* (2007) a produção de rebolos vitrificados de CBN foi complicada uma vez que os ligantes utilizados na produção de rebolos vitrificados convencionais eram muito reativos e convertiam o CBN em óxido de boro. Assim tiveram que adaptar o ligante.

2.3 Processo de dressagem do rebolo

Idealmente, o rebolo deveria se auto afiar, isto é, as partículas abrasivas deveriam automaticamente ficar afiadas quando desgastadas, ou se desprendendo do rebolo totalmente ou se fraturando, expondo assim novas arestas de corte mais afiadas. No entanto, o que acontece é que as características funcionais e geométricas do rebolo são restauradas por periódicas dressagens (JACKSON *et al.*, 2007).

A dressagem é uma preparação do rebolo para a retificação. A dressagem serve para (ROWE, 2014) eliminar os desvios de uma forma específica e sua linearidade, alcançar as arestas de corte afiadas e uniformizar as arestas de corte, Eliminar o ligante em volta do grão abrasivo para criar uma superfície mais aberta do rebolo, isso é importante principalmente para rebolos resinoides e vitrificados, remover a camada de abrasivo que está carregada com cavacos gerados pelo processo.

Para Marinescu *et al.* (2007) a dressagem consiste em deixar o rebolo perfeitamente circular, concêntrico com o eixo de rotação, ou gerar um particular formato para o rebolo, limpar a superfície do rebolo de qualquer resto de material da peça que tenha se incorporado ao rebolo, obter novos grãos abrasivos com arestas de corte afiadas e remover o ligante em volta dos grãos abrasivos

Os rebolos apresentam defeitos macroscópicos, o que provoca problemas no processo de retificação e falta de precisão dimensional nos componentes produzidos. O desgaste microscópico, como a falta de corte nos grãos abrasivos, está associado ao aumento das forças

na retificação, assim como a maior potência requerida. Mais ainda o perigo de danos térmicos nas camadas superficiais da peça também cresce.

A dressagem segundo Klocke (2009) é necessária tanto no primeiro uso do rebolo, quanto durante o processo de retificação, para manter a qualidade da peça.

Segundo Marinescu *et al.* (2004) a topográfica da superfície do rebolo varia durante o processo de retificação. O processo de dressagem do rebolo gera uma específica geometria na superfície abrasiva e isso é relevante, pois a topografia do rebolo determina as forças na retificação, a temperatura, a produtividade e a qualidade do processo. A dressagem é responsável pelo grau de afiação do rebolo e afiação que reflete na energia específica. Além disso, afeta o comportamento ao desgaste do rebolo, assim pode ser considerada também uma influência as propriedades de dureza do rebolo.

Do ponto de vista de remoção de material, as principais propriedades estáticas da topografia superficial do rebolo são os parâmetros das arestas de corte e sua distribuição. Os parâmetros das arestas de corte são o formato, a altura, a densidade, e a inclinação dos grãos. A densidade de arestas de corte ativas é o número de arestas de corte ativas por unidade de área do rebolo. A densidade e a angulação das arestas de corte ativas quantificam o grau de afiação do rebolo (AZIZI *et al.*, 2009).

A estratégia de dressagem depende dos requisitos econômicos e qualitativos e da concepção da máquina. O tipo de abrasivo, ligante e do formato do rebolo determinam os possíveis métodos e ferramentas de dressagem a serem utilizados (Klocke, 2009).

A aplicação de fluido de corte na dressagem é indispensável para manter o diamante em temperaturas baixas do dressador, e o fluido de corte deve ser ligado antes que comece a dressar, para evitar choques térmicos no diamante (ROWE, 2014).

2.3.1 Tipos de dressadores

O tipo convencional de dressagem é a dressagem mecânica, que usa uma ponta de diamante. O ligante fratura e o grão abrasivo se rompe, resultado do choque do dressador com o material do rebolo, gerando uma perda excessiva de material do rebolo. Cerca de 90% de material do rebolo é perdido na dressagem enquanto apenas 10% são utilizados na retificação (JACKSON *et al.*, 2007).

2.3.1.1 Dressador estacionário conglomerado

As ferramentas utilizadas no processo não exibem nenhum movimento na direção periférica do rebolo. O perfil do rebolo é originado pelo movimento axial no contorno do rebolo, compara-se esse processo com o torneamento (KLOCKE, 2009).

Esse tipo de dressador conglomerado possui vários pontos de corte conforme a figura 4, assim possui uma vida útil maior. É possível criar vários formatos de dressadores para lidar com os diferentes tipos de rebolos (ROWE, 2014).

O dressador conglomerado possui um arranjo espacial de grãos que permite maiores avanços na dressagem e uma maior largura de dressagem. No entanto, os resultados da dressagem nesse caso não são exatamente previsíveis.

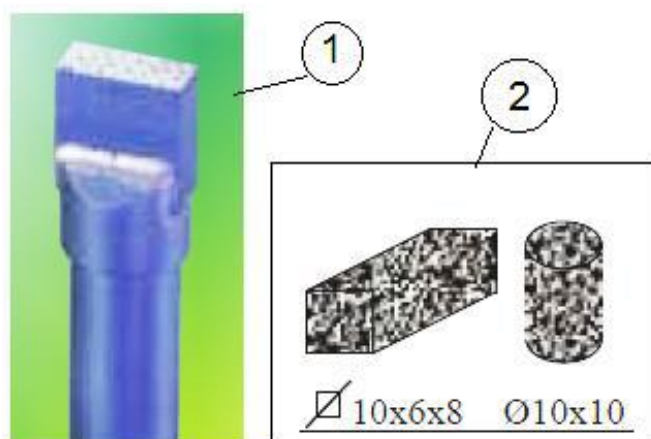


Figura 4. Imagem de um dressador conglomerado: 1 - dressador conglomerado; 2 – pastilha do dressador conglomerado (Catálogo T.F.S. Terra Ferramentas Superabrasivas. 2013 - adaptado).

Os grãos de diamante ao entrarem em contato com o rebolo se arredondam e abafam a sua capacidade de corte, que sejam retirados da matriz. Isso acontece devido ao acréscimo das forças operando sobre eles, deixando que os grãos com cortes afiados, situados na camada logo abaixo, possam agir. Como consequência, sucede uma leve alteração nos resultados da dressagem, o que é perceptível em metodologias de precisão. De outra maneira, caso os grãos desgastados não forem extraídos, o dressador perde o poder de corte e não consegue mais abrir a estrutura do rebolo, passando praticamente a alisá-lo (MURAKAWA *et al.*, 2001).

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

2.3.1.2 Microfeito na dressagem

O microfeito é formado pela retirada dos grãos desgastados com baixa ancoragem na liga e fratura dos grãos que não se desgastaram por completo, onde novas arestas de corte são geradas pelo dressador, conforme é apresentado na figura 5.



Figura 5: Representação do microfeito (Hildebrandt 2014)

No microfeito, a agressividade das arestas depende das condições de dressagem e em grande parte da friabilidade do grão abrasivo. Na dressagem fina, por exemplo, onde há baixa profundidade de dressagem e o avanço do dressador ocorre à remoção ou fratura de grãos muito pequenos, o que proporciona a formação de planos nas superfícies de corte dos mesmos tornando-os mais agressivos ou não em função de sua granulometria. Analisando os extremos em termos de dressagem, a dressagem grossa com elevada profundidade de avanço do dressador, uma grande parte dos grãos abrasivos são quebrados, formando maiores arestas e mais afiadas (HASSUI *et al.*, 2003).

Na dressagem de rebolos é comum o uso da ferramenta de dressagem se deslocando transversalmente em relação ao rebolo rotacionado.

2.3.1.3 Desgaste de dressadores estáticos

O desgaste dos dressadores é especialmente influenciado pelos parâmetros de dressamento. No processo de retificação a rugosidade é altamente dependente do nível de desgaste dos grãos abrasivos (PORTO, 2004). O desgaste demorado e contínuo da ferramenta de diamante é o ponto para alcançar condições do plano do rebolo consistente e um resultado de retificação seguro (SHIH, 2001). À medida que o diamante desgasta, sua geometria se modifica e, conseqüentemente, são geradas variações significativas nos resultado do dressamento., resultando em uma topografia com mais força no rebolo quando dressado com os mesmos parâmetros. A modificação do perfil de dressadores com grãos de diamante natural também leva à variação da rugosidade inicial do rebolo.

A geometria do dressador interfere nos resultados do dressamento. Assim não basta conservar os parâmetros do processo constantes para se obter topografias reproduzíveis no dressamento (MESSER, 2003).

No desgaste do dressador de ponta única sua largura efetiva vai se alterando para mais, paralelamente ao momento que as etapas se propagam, resultando no aumento do raio de curvatura do diamante. Para manter o grau de recobrimento em uma constante, é necessário neste caso, suavizar o avanço axial. No dressador com diamantes em forma de grão, esse problema igualmente acontece, mas com menor intensidade (MESSER, 2003).

Os dressadores com grãos de diamantes naturais e os dressadores conglomerados apresentam uma forma de desgaste desejável por ser mais versátil e robustez e por também possuir múltiplas pontas cortantes. O dressador conglomerado é uma ferramenta constituída por uma haste de aço e uma pastilha de secção redonda ou retangular, composta de pequenas pedras de diamante natural aglomerada através de uma liga (MESSER, 2003).

2.4 Fluido de corte

Os fluidos de corte foram introduzidos no processo de retificação para melhorar as características do processo e conseqüentemente aumenta a vida da ferramenta, possibilitando velocidades de corte mais econômicas e assim melhorando a eficiência da produção (SOKOVIC e MIJANOVIC, 2001).

As principais tarefas que um fluido de corte deve cumprir são (KLOCKE, 2009) de reduzir o atrito entre a partícula abrasiva e a peça e entre o ligante e a peça, formando uma

camada lubrificante, resfriar a área de contato, absorvendo e transportando o calor, assim o fluido de corte não apenas deve refrigerar como também tem um papel importante na lubrificação. (MARINESCU *et al.*, 2004).

2.4.1 Importância da aplicação dos fluidos de corte no processo de retificação

Na retificação altas temperaturas são atingidas. Para evitar danos térmicos, é essencial que grandes quantidades de energia térmica sejam retiradas do processo, caso contrário pode ocorrer queima da peça, desgaste acelerado do rebolo, deformações induzidas termicamente resultando assim em baixa qualidade dos componentes (SANCHEZ *et al.*, 2010).

Para Debnath *et al.* (2014) o fluido de corte, produz melhor controle dimensional e uma ótima qualidade superficial. Esse último item não é desejado apenas por apresentar uma melhor aparência, mas também para melhorar as propriedades tribológicas como as tensões residuais e a resistência à corrosão.

O fluido de corte é responsável por diminuir o atrito entre o rebolo e a peça, pelo seu efeito lubrificante, além disso, ele remove o cavaco produzido da área de corte e tem um papel importante na refrigeração do processo (CAGGIANO e TETI, 2013).

Os fluidos de corte reduzem a temperatura de duas formas. A primeira é retirando diretamente o calor do processo e a segunda é mantendo a eficiência de corte do rebolo, isto é, reduzindo o atrito e o desgaste do rebolo diminui a energia específica e assim a temperatura produzida é reduzida. Essa última forma é mais significativa do que o resfriamento direto (Rowe, 2014).

Klocke (2009) ainda descreve as tarefas secundárias do fluido de corte como transportar os cavacos gerados no processo para fora da área de contato, proteger contra a corrosão tanto a retificadora quanto a peça.

Como as propriedades químicas, físicas e biológicas do fluido de corte influenciam na retificação, a seleção correta do fluido de corte é de extrema importância (KLOCKE, 2009).

Segundo Klocke (2009) a principal característica física de um fluido de corte é a viscosidade. Essa característica está ligada às duas principais funções do fluido de corte, a lubrificação e a refrigeração. Um fluido de corte com baixa viscosidade aumenta o poder refrigerante, é mais fácil de retirar da peça e de se filtrar. No entanto, aumenta a produção de vapor, formando uma névoa que causa irritação na pele e doenças respiratórias.

Para a seleção de um fluido de corte apropriado deve-se levar em conta características econômicas, estabilidade operacional (vida) e se é agressivo ao meio ambiente. (MARINESCU *et al.*, 2007):

2.4.2 Problemas causados pelos fluidos de corte

Apesar das vantagens oferecidas pelo fluido de corte, a utilização dele tem sido questionada devido aos vários efeitos negativos. Seu uso inapropriado pode causar danos ao solo e às reservas de água, além de ser responsável por problemas respiratórios e reações alérgicas nos operários (DHAR *et al.*, 2007).

Sua utilização geralmente produz uma névoa, fumaça, partículas em suspensão que prejudicam a qualidade de ar no ambiente de trabalho. Os fluidos de corte convencionais utilizados na retificação são considerados um problema para os fabricantes, pois essas substâncias provocam sérios danos à saúde humana e ao meio ambiente (SADEGHI *et al.*, 2009).

O fluido de corte sofre alterações durante a retificação. A princípio o fluido de corte novo oferece apenas um pequeno risco, isso muda conforme o seu tempo de serviço. Substâncias secundárias surgem pela reação de produtos e por microrganismos presentes que se desenvolvem no fluido. Os operários podem ser afetados pelo contato dessas várias substâncias contidas no fluido de corte. A saúde deles pode ser prejudicada pelo contato na pele, por engolir as substâncias ou inalando os vapores e a névoa produzida (SOKOVIC e MIJANOVIC, 2001).

Para evitar a proliferação de bactérias e fungos, aditivos químicos são adicionados, e esses aditivos são substâncias tóxicas tanto para o meio ambiente como para os trabalhadores. Tem-se discutido que as indústrias utilizam o biocida mais para manter o fluido de corte estável do que para proteger a saúde dos trabalhadores. Muitos biocidas possuem em sua composição formaldeído é um potencial causador de câncer, assim como pesquisas mostraram que o uso de óleo mineral é cancerígeno (SHOCKRANI *et al.*, 2012).

De acordo com Hadad (2015) a exposição prolongada aos fluidos de corte durante a usinagem pode causar irritações respiratórias, asma, pneumonia, dermatite e câncer. Hadad e Sharbati (2016) o descarte inapropriado de óleos a base de petróleo é problemática, pois causam contaminação da água, poluição do ar e solo.

Os fluidos de corte são conhecidos por causar irritações na pele, como a dermatite. Possuem metais pesados que afetam o sistema respiratório e digestório (IRANI *et al.*, 2005).

De acordo com Rabiei *et al.* (2015) um estudo mostrou que 80% das doenças causadas nas indústrias são causadas pelo contato com o fluido de corte. A composição do fluido de corte é complexa e pode causar irritação ou alergia. Toxinas são geradas por bactérias e fungos que se proliferam no fluido, principalmente em fluidos de corte à base de água.

De acordo com Rowe (2014) o usuário deve ser responsável para descartar o fluido de corte. Vários aspectos ambientais devem ser considerados. As leis nacionais e internacionais têm aumentado a fim de evitar potenciais danos à saúde e proteger o meio ambiente.

Com as fortes pressões sobre questões ambientais, as indústrias começaram a procurar novos métodos de lubri-refrigeração, para uma produção mais sustentável. O novo paradigma da produção sustentável inclui o critério social, meio ambiente e econômico (SANCHEZ *et al.*, 2010; PUSAVEC *et al.*, 2010). Uma vez que o fluido leva a esses tipos de danos e traz consequências ao meio ambiente, as indústrias providenciaram novos métodos de lubri-refrigeração para uma produção mais sustentável e que seja ao mesmo tempo mais econômico.

2.4.3 Otimizações na aplicação dos fluidos de corte

Pensando no meio ambiente e na saúde dos trabalhadores pesquisas vêm sendo desenvolvidas para diminuição do uso de fluido de corte. Pesquisadores começaram a analisar novos métodos de aplicação de fluido de corte no processo de retificação (ALBERDI *et al.*, 2011).

Segundo Alberdi *et al.* (2011) a dinâmica de fluido computacional (CFD) é uma ferramenta de grande ajuda na otimização dos aspectos construtivos dos bocais utilizados na retificação. O bocal Webster se tornou popular nos recentes anos devido ao seu excelente desempenho em diferentes situações. As características geométricas do bocal podem ser vistas na figura 6, onde as medidas são expressas em milímetros.

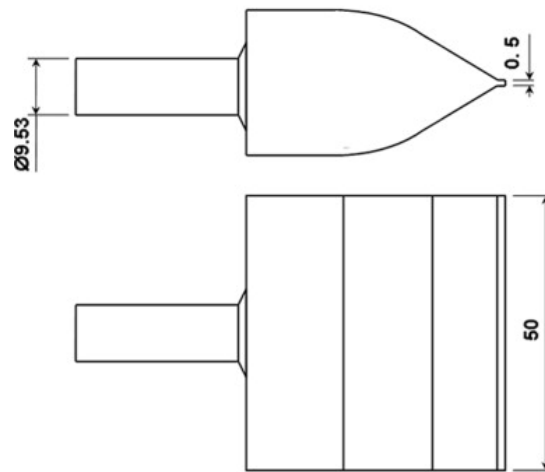


Figura 6: Representação do bocal de Webster (Alberdi et al., 2011).

O ar situado em volta do rebolo forma uma barreira que impede a penetração do fluido na zona de corte. Essa barreira é um ambiente de baixa pressão com o ar se movimentando em grandes velocidades. Quando essa camada de ar chega ao contato do rebolo com a peça, não consegue atravessar, assim se desfaz como esquematizado na figura 7 (Rowe, 2014).

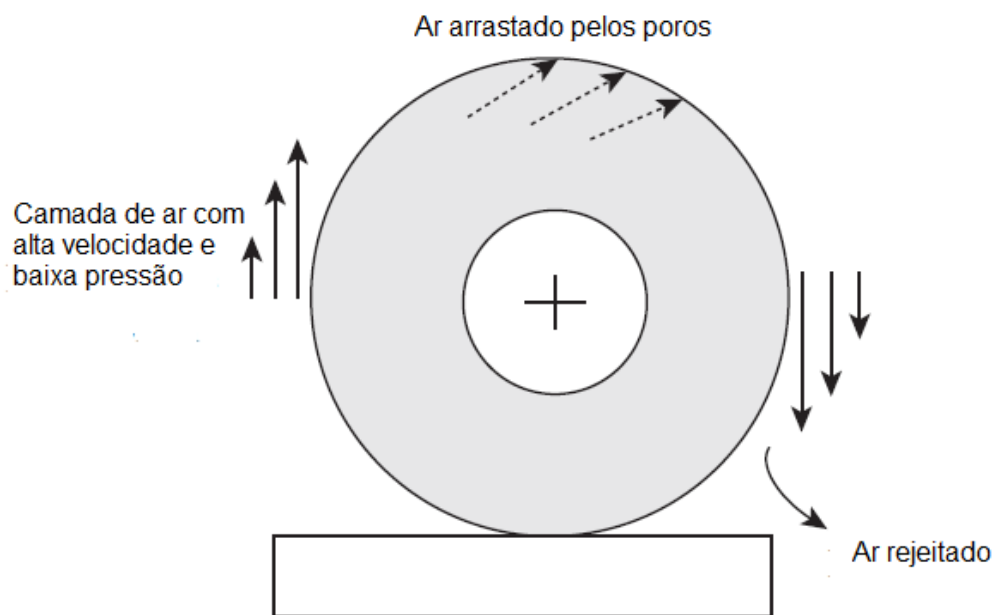


Figura 7: Fluxo de ar existente nos rebolos em rotação (Rowe, 2014-modificado).

De acordo com Ebbrell *et al.* (2000) essa camada de ar impede que a maioria do fluido de corte chegue à zona de retificação. Assim o fluido de corte aplicado com um bocal que produz jato de ar com fluido de corte, tem dois benefícios, o primeiro é que o fluido adquire

velocidade necessária para vencer a barreira de ar, e o segundo é que pode ser utilizado na limpeza do rebolo, removendo os cavacos alojados. Em seus trabalhos Ebbrell *et al.* (2000) estudam quais seriam as melhores posições para colocar o bocal (tangencial, intermediária e com um ângulo de 15°) conforme a figura 8.

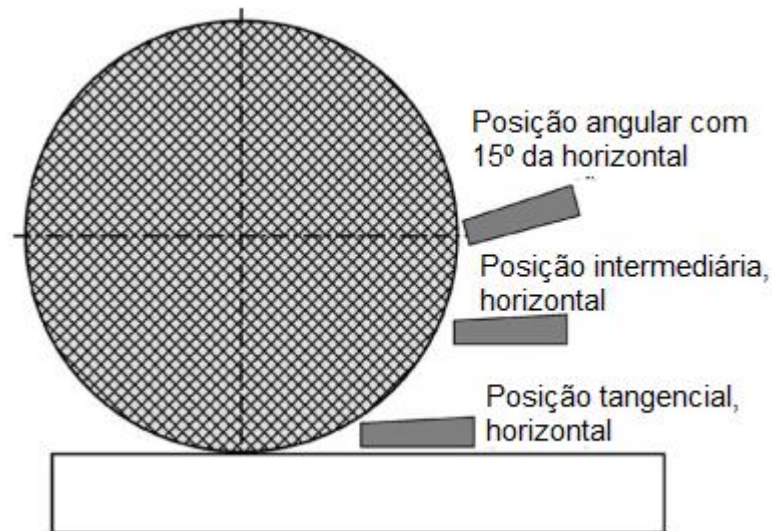


Figura 8: Posicionamento do bocal em três posições distintas (Ebbrell *et al.*, 2000-modificado).

Em seus trabalhos, Ebbrell *et al.* (2000), comparando as três posições analisadas, concluíram que a posição intermediária seria a melhor.

Outro possível bocal na utilização da aplicação do fluido de corte é a sapata, que se encaixa ao redor de um lado do rebolo onde é introduzida uma placa que dispersa a barreira de ar, isso possibilita que o fluido de corte seja aplicado com baixa pressão e velocidade, esquematizado na figura 14 (ROWE, 2014).



Figura 9: Representação de um bocal sapata (ROWE *et al.*, 2014).

O bocal de sapata tem boa eficiência porque eles são capazes de maximizar a quantidade de fluido que passa pela zona de corte. Com isso as forças de corte, a temperatura e o atrito são reduzidas (IRANI *et al.*, 2005).

Rameshi *et al.* (2001) citados por Irani *et al.* (2005) desenvolveram um bocal de sapata com três orifícios ajustáveis para melhorar a aplicação de fluidos de corte em rebolos CBN. O primeiro orifício quebra a barreira de ar envolta do rebolo e um vácuo surge, permitindo um grande fluxo de fluido de corte. O segundo orifício fornece o fluido de corte que cria uma camada refrigerante no rebolo. E por fim o terceiro furo fornece o fluido de corte direto para zona de contato. Com esse bocal, as forças de corte são reduzidas entre 40-60% dependendo do material da peça. Uma desvantagem dos bocais de sapata é que eles retiram potência do eixo do rebolo (ROWE, 2014).

2.4.4 Busca por formas alternativas de lubri-refrigeração no processo de retificação

Para evitar os problemas de saúde e de poluição na produção industrial e se adequar ao desenvolvimento de uma estratégia sustentável de energia, a indústria tem procurado substituir o tradicional fluido de corte em abundância por alternativas de lubri-refrigeração como a retificação a seco e o MQL (Zhang *et al.*, 2015).

Os objetivos da busca por formas alternativas de lubri-refrigeração é desenvolver tecnologias que reduzam a emissão de gases poluentes, evite o uso de produtos tóxicos e poluentes, diminuir o barulho produzido e acabar com os desperdícios. (Hadam e Sharbati, 2016).

Apesar das diversas vantagens que o uso de fluido de corte apresenta, nas últimas décadas houve um grande aumento por pesquisas para reduzir ou até eliminar o uso de fluido de corte, devido às sérias desvantagens que ele apresenta, como problemas econômicos e ambientais (Tawakoli *et al.*, 2010).

Nos últimos anos, o meio ambiente se tornou um dos principais tópicos, levando governos a estabelecer rigorosas leis para proteger o meio ambiente e as fontes de energia. Isso levou as indústrias, centros de pesquisa e universidades a estudar meios alternativos de diminuir a produção de resíduos perigosos ao meio ambiente (SILVA *et al.*, 2013).

2.4.4.1 Usinagem a seco

A usinagem a seco foi o mais antigo método criado pelos pesquisadores para ser sustentável e não agressivo ao meio ambiente (PUSAVEC E KENDA, 2014). É o melhor método para eliminar o uso de fluido de corte e assim reduzir os custos de produção e os perigos ecológicos (SHOCKANI *et al.*, 2012).

A retificação a seco vem sendo cada vez mais investigada a fim de diminuir os impactos ambientais causados pelo fluido de corte e diminuir a preocupação com descarte correto dos fluidos de corte (TAWAKOLI e AZARHOUSHANG, 2008).

A introdução da retificação a seco poderia salvar vários recursos (fluidos de corte, filtros) e energia (para a bomba e aceleração do fluido de corte). Além disso, a dimensão das máquinas iria diminuir devido à abstenção dos tanques e filtros do fluido de corte, no entanto as principais funções do fluido de corte (remoção do cavaco da área de corte e estabilização térmica do processo) devem ser feitas por outros sistemas (AURICH *et al.*, 2008).

Algumas vezes é necessário que a peça continue seca durante o processo de retificação, neste caso um jato de ar pode ser aplicado para melhorar o resfriamento sem que envolva algum fluido. A presença de vapor de água é aceitável nesse caso e aumenta a eficiência do processo, lubrificando a área de contato (ROWE, 2014).

Na retificação a seco não existe fluido de corte para absorver o calor da zona de contato, assim problemas como danos térmicos frequentemente ocorrem. Comparado com o fluido de corte abundante, a retificação a seco apresenta uma maior energia de retificação, maiores forças, desgaste excessivo do rebolo, baixa taxa de remoção do material (HADAD e SADEGHI, 2012). Sanchez *et al.* (2010) ainda cita que sem o fluido de corte resulta no aumento da temperatura, afeta a qualidade superficial e a precisão geométrica.

As técnicas que são empregadas pelos pesquisadores para compensar os efeitos que surgem quando se elimina o fluido de corte na usinagem podem ser divididas em: dissipação indireta de calor e melhorando as propriedades da ferramenta introduzindo novos materiais como o CBN e o diamante (SHOKRANI *et al.*, 2012).

Focando evitar o aumento excessivo de calor na zona de retificação, são utilizados rebolos com área de contato reduzida e/ou ligantes macios. No entanto, as maiorias das aplicações falharam, resultando em desgastes excessivos ou queima da peça. Em muitos casos, o problema da retificação a seco é o grande aumento da temperatura, assim uma solução é o resfriamento da peça antes da usinagem (OLIVEIRA *et al.*, 2015).

Apesar do interesse em aplicar a retificação a seco, esse método não é muito usado na indústria devido à sua ineficiência econômica. Para melhorar a eficiência desse processo, a formação do cavaco deve ser otimizada de forma que o atrito entre o rebolo e a peça seja minimizado. Isso depende do material da peça, dos parâmetros de retificação, do tamanho do grão abrasivo e do número de arestas ativas. Para otimizar o último item, diminuindo o número de arestas ativas, foi desenvolvido rebolos estruturados, representados na figura 9. Esse tipo de rebolo pode diminuir as forças de corte, a potência consumida no processo e o calor gerado na zona de contato (TAWAKOLI *et al.*, 2012).

Assim segundo Sadeghi *et al.* (2009), as limitações da usinagem a seco podem ser superadas pela introdução da mínima quantidade de lubrificante.

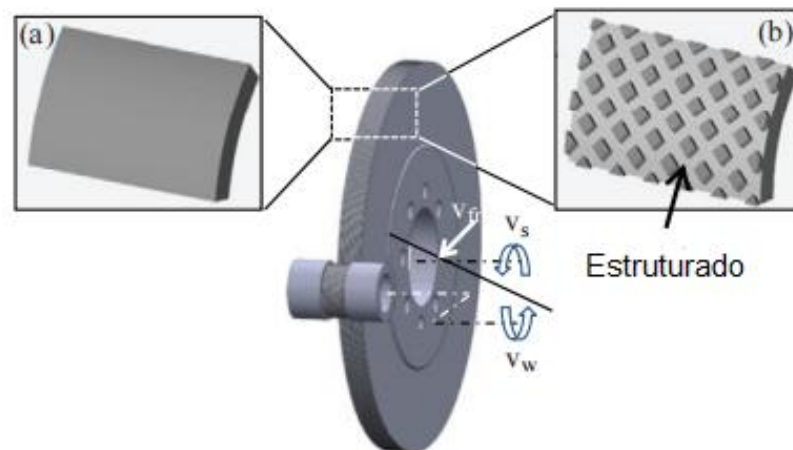


Figura 10: Vistas esquemáticas: (a) rebolo normal, (b) rebolo estruturado com área de contato reduzida (Tawakoli *et al.*, 2012-modificado).

2.4.4.2 A técnica da mínima quantidade de lubrificação (MQL)

Uma eficiente alternativa é a mínima quantidade de lubrificação, que fornece uma eficiente lubrificação e melhora o desempenho do corte com apenas uma pequena quantidade de fluido (RABIEI *et al.*, 2014).

A mínima quantidade de lubrificante (MQL) ou usinagem quase seca é uma alternativa para processos de usinagem em que a usinagem a seco não é aplicável, quando há um interesse na eficiência e na qualidade da superfície (SHOKRANI *et al.*, 2012).

De acordo com Marinescu *et al.* (2007) o MQL surgiu para reduzir a quantidade de lubrificante usado no processo de fabricação de peças. Com a assistência de ar pressurizado, uma névoa de fluido de corte é pulverizada na superfície do rebolo. Idealmente nesse processo uma fina camada de fluido cobre toda superfície do rebolo lubrificando a área de contato. Apesar das dificuldades do processo, em certas operações de retificação a técnica de MQL mostra potencial.

Segundo Walker (2013) o MQL utiliza uma pequena quantidade de fluido que reduz o atrito entre a peça e a ferramenta de corte, por possuir um alto fator de penetração na área de contato. O autor ainda fala que os fluidos utilizados na técnica MQL são mais caros, no entanto o aumento do preço não se compara com a diminuição da quantidade utilizada.

Em seus trabalhos Rabie *et al.* (2014) conclui que o MQL pode consideravelmente diminuir as forças de corte e o coeficiente de atrito para aços macios e duros. Além disso, a qualidade superficial é significativamente melhor quando o MQL é aplicado na retificação de aços duros. No entanto, no caso de aços moles a qualidade superficial é pior do que quando o aço é retificado a seco ou com fluido de corte em abundância.

Comparada com a retificação a seco a retificação com MQL apresenta melhores performances de corte, pois aumenta a vida do rebolo e melhora a qualidade superficial das peças (TAWAKOLI *et al.*, 2009).

A utilização do MQL é considerada mais um método de lubrificação do que de resfriamento. Essa baixa capacidade de resfriamento limita sua utilização na usinagem de materiais mais duros, como titânio e ligas de níquel, onde o principal problema é a geração de calor excessivo (SHOKRANI *et al.*, 2012).

Segundo os resultados de Tawakoli *et al.* (2011) a utilização de rebolos CBN aplicando a técnica MQL apresentam as melhores qualidades superficiais, menores forças de corte. Para os rebolos convencionais os melhores para serem utilizados são os com alta porosidade.

Para Emami *et al.* (2014) o tipo de fluido de corte utilizado na técnica MQL é de significativa importância para o sucesso da técnica. As propriedades químicas e físicas do fluido influenciam na eficiência de lubrificação.

Em certas condições de uso na retificação foram observadas menores forças de corte, diminuição no desgaste do rebolo, melhora na rugosidade superficial e baixo residual estresse (BARCZAK *et al.*, 2010).

Segundo Mao *et al.* (2015) com a alta pressão a técnica MQL consegue que o fluido de corte penetre na região de contato com eficiência reduzindo assim as forças na retificação.

Rabiei *et al.* (2015) cita que a aplicação de MQL na retificação de aços duros reduz a força normal, enquanto a aplicação da técnica na retificação de aços moles faz com que a força normal aumente em comparação com o método convencional de lubri-refrigeração.

2.4.4.3 Vantagens da utilização do MQL

De acordo com Klocke e Einsenblätter (1997), a técnica de MQL apresenta vantagens se comparada com a refrigeração convencional na retificação. Dentre elas, a redução da potência de retificação e energia específica, além da melhora da qualidade superficial e do menor desgaste do rebolo.

Conforme disse Attanasio *et al.* (2006), MQL é uma técnica que pode reduzir muitos problemas vindos do alto consumo de lubrificantes, como alto custo de usinagem ou problemas ambientais e de saúde.

Ainda segundo o mesmo autor, a técnica de MQL apresenta outras vantagens. O cavaco a peça e a ferramenta apresentam menos resíduos do lubrificante, o que torna sua limpeza mais fácil e econômica. Também durante a usinagem, a área de trabalho não fica inundada de fluido de corte, possibilitando assim observar a operação claramente.

Heisel *et al.* (1998) e Klocke *et al.* (2000) afirmam também que com a técnica de MQL, não é necessário o uso de um sistema de filtragem e reciclagem; há menor manutenção com o fluido; as peças saem mais limpas no final da operação; há redução no volume de fluido impregnado no cavaco e do uso de biocidas e fungicidas.

Heisel *et al.* (1998) relatam que, no caso da retificação, uma vantagem da mínima quantidade de lubrificante é que não aparecem as tensões residuais causadas por grandes gradientes de temperaturas, sendo isto especialmente importante no caso de materiais de corte frágeis.

2.4.4.4 Desvantagens no uso da técnica de MQL

Para Klocke *et al.* (2000) a técnica de MQL apresenta algumas desvantagens frente à refrigeração convencional, como por exemplo, a necessidade de implantação de um sistema pneumático capaz de pressurizar o ar, além de outros equipamentos, tais como coifas e exaustores, responsáveis pela sucção de poluentes em suspensão no ar.

Segundo Hafenbraedl e Malkin (2001) a principal desvantagem da MQL refere-se ao resfriamento insuficiente da peça, causando dilatações térmicas e dificuldade com o controle dimensional.

Além disso, Diniz *et al.* (2003) também apresentam algumas desvantagens dos processos de mínima quantidade de lubrificante, poluição ambiental, a pulverização levanta no ambiente atmosférico local, muitas partículas de óleo que exigem cuidados especiais. Deve-se exigir então que a máquina seja totalmente fechada e possua um sistema de exaustão com controle de partículas, no caso do consumo a aplicação do fluido por névoa é considerado sem retorno, isto é, há total perda do fluido. Mesmo a baixos níveis de vazão, o consumo deve ser considerado. O ruído é outro problema. Na pulverização é utilizada uma linha de ar comprimido que funciona intermitentemente durante todo o processo. Essas linhas de ar geram muito ruído, normalmente com potência superior às máximas permitidas para o ouvido humano (80 dB). Além de afetar a saúde, o ruído polui o ambiente, prejudicando a comunicação.

Outra desvantagem do método MQL está no maior entupimento dos poros do rebolo. Como a característica técnica e funcional do sistema de mínima quantidade de lubrificante é o uso de baixa vazão de fluido, a remoção dos cavacos gerados na zona de corte é menor. Como consequência ocorre um maior entupimento dos poros da ferramenta abrasiva

2.5 Fenômeno do entupimento dos poros do rebolo

Wang *et al.* (2000) comenta quando a energia na interface rebolo e a peça reproduzem um aumento na temperatura, pode ocorrer maior aderência de partículas metálicas nos poros do rebolo. Por conta disso, haverá uma elevação de temperatura, causando danos térmicos como a queima superficial da peça, além do acabamento da peça não ser satisfatório e aumentar o desgaste do rebolo. Portanto, quanto menor a energia específica associada ao processo, menor a chance de danos ao trabalho (SALMON, 1992).

Quando o rebolo inicia o contato com a peça, os cavacos vão sendo gerados e não são eliminados da zona de corte com a aplicação do sistema de refrigeração convencional, mas quando se utiliza o MQL, misturam-se ao óleo do MQL e alojam-se nos poros do rebolo observado na figura 11. À medida que a usinagem ocorre, essa proporção de cavacos vai aumentando até o momento em que ocorre o contato entre a peça e os cavacos alojados. Assim, haverá atrito entre eles, ocasionando apenas deformação elástica e plástica da peça, além do

atrito maior, o que aumentará a potência de corte, a rugosidade e circularidade da peça e o desgaste do rebolo.

O cavaco no poro do rebolo irá gerar reações nos grãos abrasivos e na peça. Com isso, desgaste do rebolo se acentuará pelo desprendimento dos grãos. Adicionalmente, a peça será riscada pelo cavaco, piorando sua rugosidade.

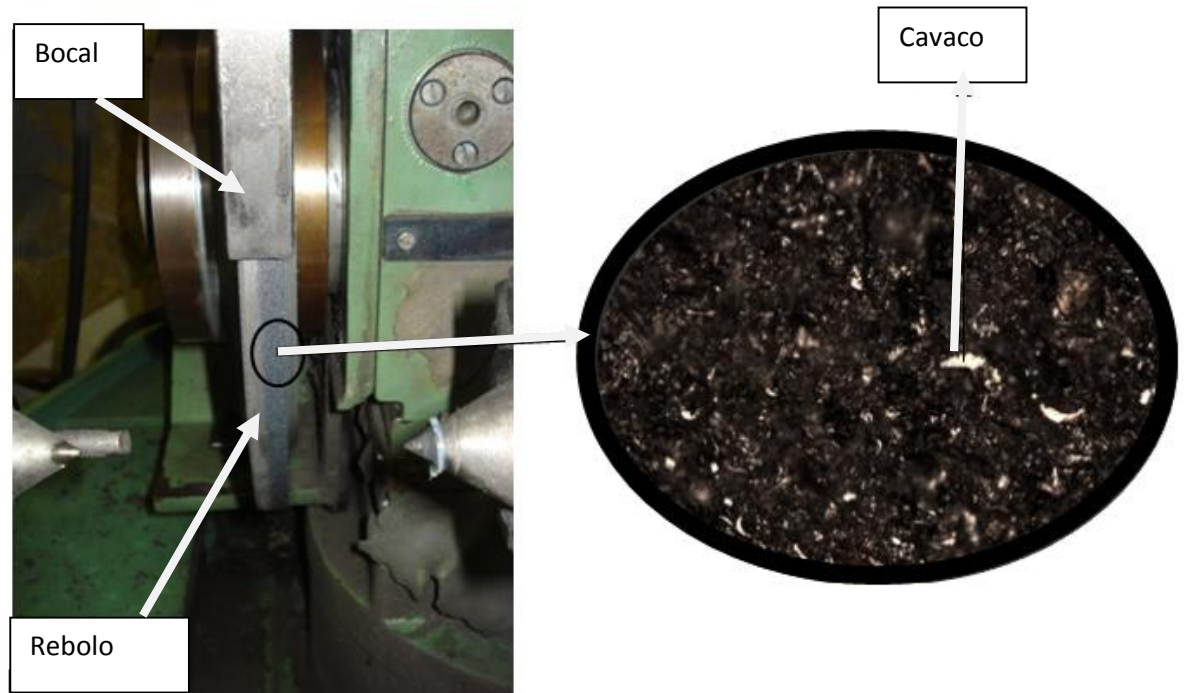


Figura 11: Cavacos aderidos aos poros do rebolo. (aumento de 100X). (Pereira *et al.* 2011)

Segundo Sinot *et al.* (2006), alguns materiais são caracterizadas como de difícil usinabilidade, e pode haver um entupimento maior nos poros do rebolo. Este efeito ocorre quando as partículas do material sofrem uma compressão nos espaços entre os grãos. Com altas taxas de remoção, o fenômeno é mais acentuado, e alguns rebolos estão mais suscetíveis ao entupimento.

Em outras palavras, as arestas de corte do rebolo deverá aumentar a contribuição total específica de energia, e o calor gerado na zona de corte irá aumentar, aumentando o fluxo de calor para a peça de trabalho.

2.6 Limpeza da superfície de corte do rebolo entupidos por cavacos da usinagem

Segundo Sinot *et al* (2006) o processo de limpeza da superfície de corte do rebolo é considerada eficaz quando a carga no rebolo é evitado. Quando a estrutura do rebolo sofre desgastes devido ao processo de retificação, o processo de limpeza deve permanecer eficiente, a fim de evitar os esforços no rebolo.

2.6.1 Limpeza da superfície de corte do rebolo com ar comprimido

Conforme Oliveira (2012) o uso da técnica de lubri-refrigeração MQL associada a um jato de ar comprimido para limpeza da superfície de corte do rebolo com angulo de incidência de 30 graus propiciou limpeza eficiente do rebolo e com isto, melhores resultados em todas as variáveis analisadas, quando comparados a lubri-refrigeração convencional e especialmente o MQL sem o uso de jato de ar.

De acordo com Koenig & Arciszewski (1988), os rebolos de CBN (nitreto cúbico de boro) e diamantado são boas ferramentas abrasivas que mantêm a forma superficial quando submetidas a pequenos desgastes. Entretanto, por causa do fenômeno do entupimento dos poros desses rebolos, torna-se complicado manter a forma final da ferramenta, em função disso, ocorre a queima na superfície da peça trabalhada e baixa qualidade superficial.

Conforme o trabalho realizado por Lee *et al.* (2002) na retificação de canais em peças, o jato de ar comprimido é uma alternativa para impedir o fenômeno descrito anteriormente, pois o ar incide no rebolo e retira todas as impurezas que aderiram à ferramenta demonstrado na figura 12.

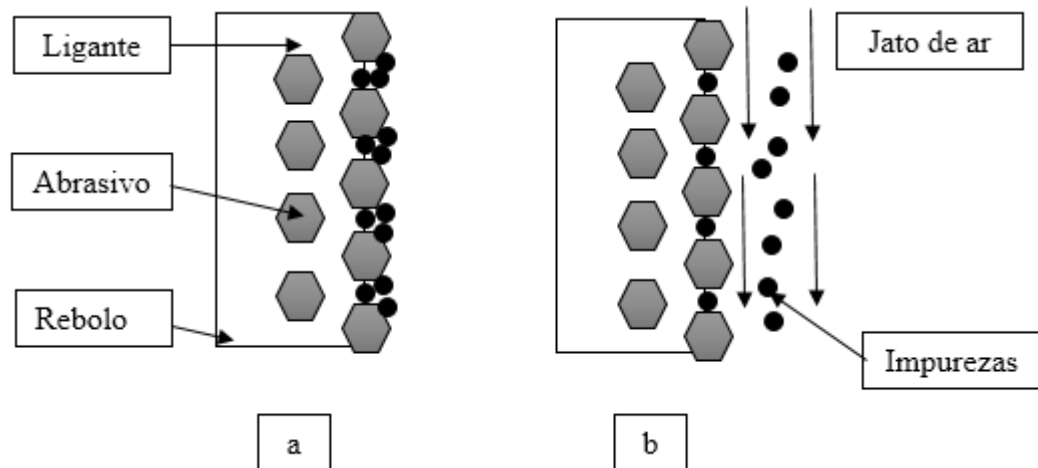


Figura 12: Efeito do jato de ar comprimido na superfície de corte do rebolo, (a) retificação sem limpeza do rebolo (b) retificação com limpeza do rebolo (Lee *et al* 2002 adaptado)

Este experimento foi realizado colocando o jato de ar comprimido de duas maneiras, na mesma direção que a rotação do rebolo e na direção oposta à rotação do rebolo Lee *et al.* (2002) concluíram que quando o jato de ar foi usado, houve uma menor diminuição na profundidade de corte decorrente da diminuição do desgaste da ferramenta abrasiva. Além do mais, a precisão dimensional com o jato de ar foi melhor do que com o líquido refrigerante somente, ou seja, melhores valores de rugosidade podem ser obtidos com a limpeza. Esse resultado indica que o jato removeu o fino pó, e preveniu o entupimento. Isso contribui na manutenção de uma forma do rebolo. Outra conclusão tirada do trabalho foi que o jato de ar na mesma direção da rotação do rebolo obteve melhores resultados que na direção contrária, pois este último resultou em trepidação no rebolo, o que piora a precisão dimensional.

A Figura 13 demonstra a variação da profundidade do canal retificado com jato de ar em diferentes condições. Nota-se, pois, com o uso de tais jatos conseguiu-se maior precisão dimensional.

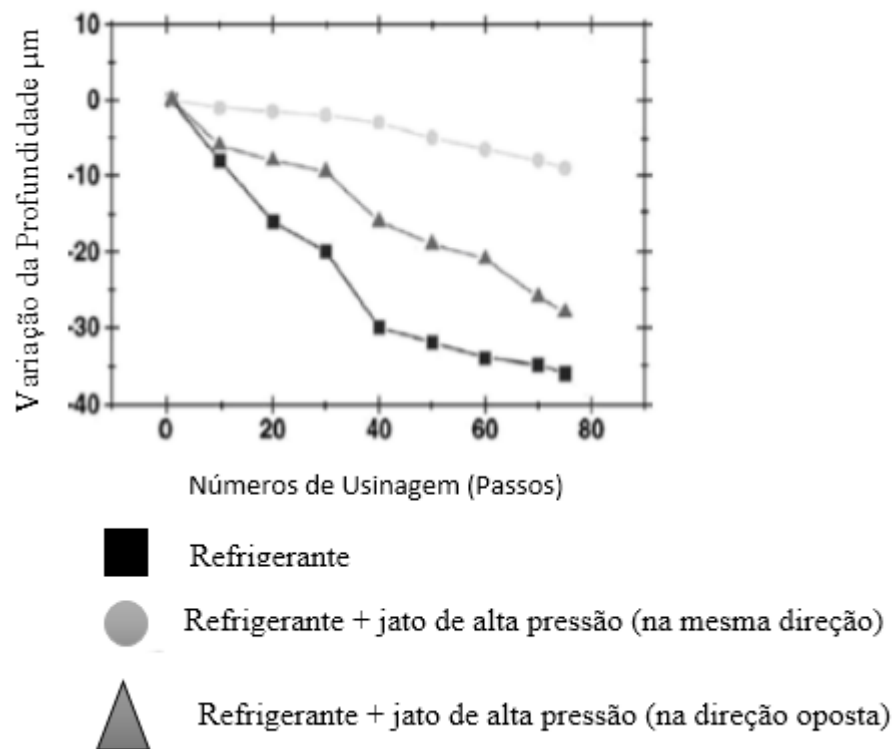


Figura 13: Variação da profundidade do canal retificado (LEE *et al.*, 2002, adaptado)

Oliveira *et al* (2011) ressalta que além do uso do jato de limpeza, o sistema projetado permite o ajuste do ângulo de incidência, e os melhores resultados foram alcançados nos posicionamentos tangenciais; a 30° e a 60° nas três velocidades de mergulho empregadas: 0,25; 0,50 e 0,75 mm/min. A inclinação de 30° do bocal do jato de ar foi a condição que alcançou maior eficiência na limpeza do rebolo nas velocidades de 0,25 e 0,75 mm/min, gerando assim os menores valores de rugosidade. Já para a velocidade de mergulho de 0,50 mm/min as situações de limpeza MQL +30° e MQL +60° apresentam intervalos de confiança próximos, porém as duas situações apresentaram rugosidades inferiores aos outros métodos conforme verificado na figura 14.

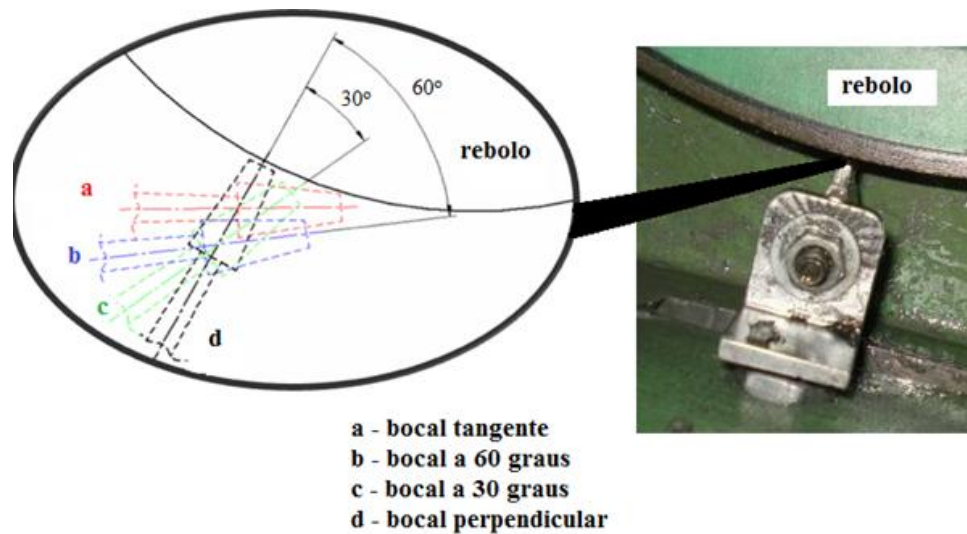


Figura 14: Detalhe dos ângulos de incidência do jato de ar comprimido (Oliveira et al 2011)

2.7 Variáveis de saída do processo

Segundo Winter *et al.* (2014) essas variáveis de saída podem ser divididas em três etapas, a primeira é a transformação da peça em uma forma e acabamento desejado, a segunda é o consumo de energia, gasto e impactos ambientais e por fim os parâmetros que definem a performance da retificação.

De acordo com Tonshoff *et al.* (2002) a retificação é um processo difícil de prever os resultados, por possuir uma grande quantidade de parâmetros. Assim o monitoramento de dados possibilita um conhecimento maior sobre o fenômeno, gerando potencial para aperfeiçoar o processo quanto ao tempo, custo e qualidade.

Liu *et al.* (2008) fala que uma retificação de qualidade deve resultar em uma boa rugosidade superficial, integridade superficial e precisão na forma e tamanho.

Holesovsky e Hrala (2004) falam que a integridade superficial está ligada com propriedades superficiais da peça, que são: rugosidade superficial, estresse residual, mudanças na dureza da camada superficial, mudanças estruturais e trincas.

De acordo com Sinha *et al.* (2016) a integridade superficial da peça é um parâmetro de extrema importância, pois decide a habilidade da peça em resistir a condições severas.

A integridade superficial de uma peça é de extrema importância, pois decide se a peça vai aguentar aos esforços a que será submetida. Assim os, monitoramentos desses parâmetros de saída devem ser feitos (SINHA *et al.*, 2016).

2.7.1 Rugosidade

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

Assim, Marinescu *et al.* (1998) define a rugosidade como o conjunto de irregularidades (erros microgeométricos) encontradas nas superfícies usinadas. Um dos parâmetros de rugosidade utilizado é a rugosidade média (R_a) que é definida como a média aritmética do desvio do perfil de rugosidade em relação à linha média (MAYER & FANG, 1993).

Segundo Li *et al.* (2015) a rugosidade superficial é a mais fundamental e importante indicador da integridade superficial, e tem uma influência significativa na vida da peça quando submetida à fadiga. Ainda os mesmos autores falam que o entupimento do rebolo prejudica o

A rugosidade média não descreve a superfície da melhor maneira e dois diferentes perfis de superfície podem apresentar a mesma R_a (HOLESOVSKY E HRALA, 2004).

Além disso, Ramesh & Huang (2003) dizem que o tempo de centelhamento, e o tipo de dressagem melhoram a qualidade superficial porque há uma fragmentação nos cavacos.

Segundo Oliveira (2011) para o aço 4340 com a utilização do óleo accu-lub LB 1000, quando se aplicou o jato de ar para limpeza do rebolo, os valores de rugosidade caíram substancialmente. Isto sugere que a piora da qualidade da peça quando se trocou do método de lubri-refrigeração convencional para MQL sem limpeza foi causado pelo entupimento dos poros do rebolo pelo cavaco observado na figura 15.

Nota-se que para as velocidades maiores a redução da rugosidade cresce percentualmente: na velocidade de 0,50 mm/min a redução de rugosidade na melhor situação de limpeza, MQL + 30° (0,27 R_a), foi de 61% se comparada ao método convencional (0,71 R_a), e 87% se comparado ao MQL (2,13 R_a) (OLIVEIRA 2011).

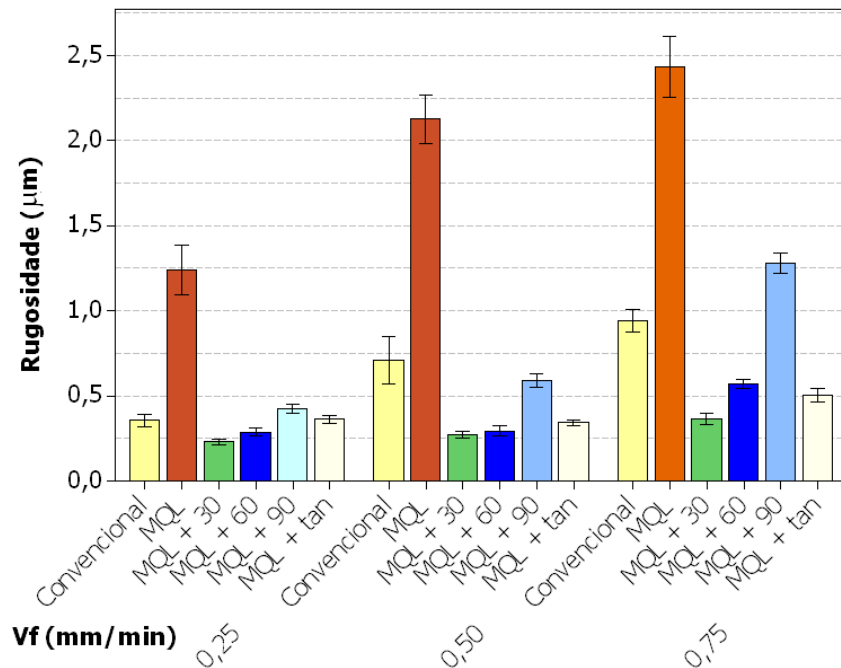


Figura 15: Resultados de rugosidade para o aço 4340 com o uso do óleo accu-lub LB 1000 e rebolo de CBN (Oliveira 2011)

2.7.2 Desvio de Circularidade

Peças com a circularidade baixa não se encaixam perfeitamente, gerando folgas, comprometendo seu uso. Esse parâmetro é a diferença entre os raios de duas circunferências concêntricas em que a maior é suficientemente grande para conter o maior pico e a menor é suficientemente pequena para estar contida no maior vale. A deficiência desse sistema é que ele não leva em conta o perfil da secção da peça assim uma mesma tolerância de circularidade pode possuir diversos perfis (CHO E TU, 2001).

O desvio de circularidade é definido como a diferença entre o ponto mais próximo do centro da peça e o ponto mais distante do centro da peça. Segundo Holesovsky e Hrala (2004) esse tipo de desvio aumenta quando há vibração no sistema, nos casos em que o rebolo está mal balanceado ou mal dressado.

Segundo Shaji e Radhakrishnan (2003) a geometria resultante da retificação depende das variáveis, que são as características do rebolo, diâmetro do rebolo, tipo e tamanho do grão abrasivo, tipo de ligante, método de dressagem, grau de balanceamento do rebolo, características da peça dureza, estrutura e composição química, características da máquina vibrações e características dinâmicas condições de operação velocidade do rebolo, avanço,

aplicação de fluido, é de grande importância analisar esses parâmetros na retificação cilíndrica, uma vez que nessa modalidade de retificação visa-se obter uma peça cilíndrica.

De acordo com Oliveira (2011) analisando a figura 16, a menor circularidade obtida para a velocidade de 0,25 mm/min foi o MQL mais limpeza para um ângulo de 30°. Para as velocidades de 0,5 e 0,75 mm/min, as menores circularidades também ocorreram nesta configuração de lubri-refrigeração. Assim como nos resultados de rugosidade, ocorreram variações nos resultados de circularidade com a variação da velocidade de mergulho. Embora o desempenho da lubri-refrigeração MQL+30°, também seja melhor que o convencional e MQL, a redução do erro de circularidade com esta técnica manteve-se praticamente constante para as diferentes velocidades: em torno de 20%, comparada ao convencional, e em torno de 40%, comparada ao MQL.

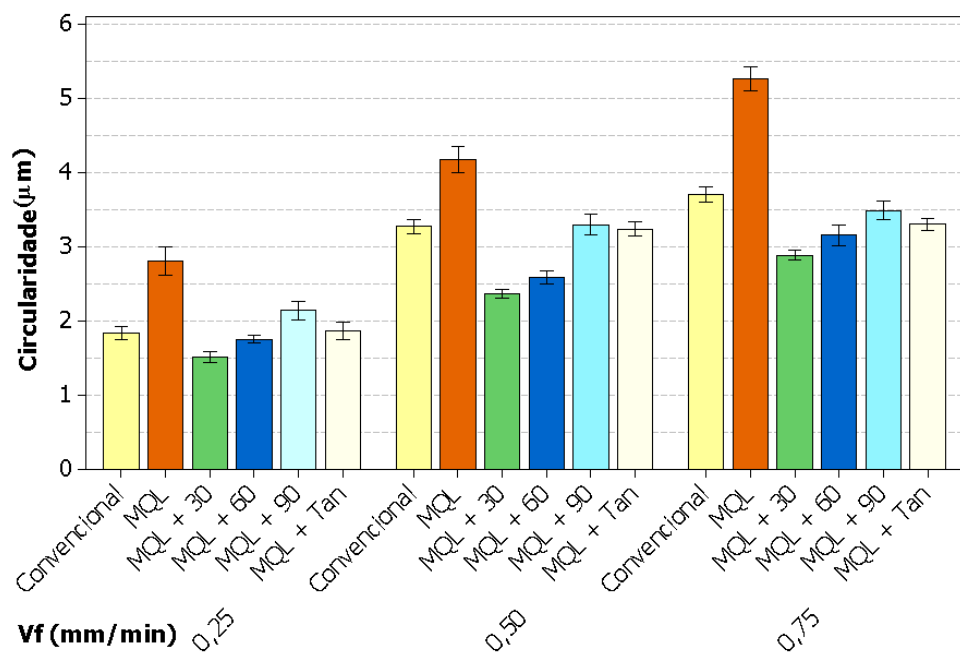


Figura 16: Resultados do desvio de circularidade com a utilização do rebolo CBN, e o óleo MQL accu-lub LB 1000 em aços temperados e revenido 4340 (Oliveira 2011)

2.7.3 Desgaste diametral do rebolo

Durante a retificação de uma peça existem três formas de desgaste da ferramenta abrasiva: pelo atrito entre o grão abrasivo e a peça; fratura do grão; fratura do ligante. Essas formas de desgaste são decorrentes das solicitações mecânicas à que o rebolo é submetido e também da deterioração térmica do próprio ligante (LIAO *et al.* 2000).

Assim, de acordo com Marinescu *et al.* (2004), a relação “G” é uma medida de quanto volume de material é removido da peça por unidade de volume de rebolo gasto conforme a equação 10.

$$G = \frac{V_w}{V_s} \quad (10)$$

Onde: V_w - volume de material removido e V_s - volume de rebolo gasto.

Com isso, Marinescu *et al.* (2004) relatam que o desgaste do rebolo durante a retificação influencia, entre outros, nos seguintes aspectos do processo como erro na profundidade de corte, erro na dimensão final da peça, aumento das forças características do processo, aumento ou decréscimo da rugosidade, mudança no número de arestas de corte efetivas nova dressagem do rebolo, ocasionando perdas na superfície da ferramenta, desgaste da ferramenta de dressagem e também gasto de tempo.

Observando a figura 17, verifica-se que quando é utilizada a lubri-refrigeração com o sistema de limpeza do rebolo a rugosidade apresenta-se inferior ao MQL sem o sistema de limpeza.

Segundo Tawakoli *et al.* (2007), na lubri-refrigeração convencional a elevada quantidade de fluido também atua na retirada dos cavacos da zona de corte. Já quando é utilizada a técnica MQL a menor quantidade de fluido não é suficiente para remover os cavacos das porosidades do rebolo. Os cavacos alojados nas porosidades além de impedir a entrada do fluido de corte produzem maior estrias na superfície da peça comprometendo assim a qualidade da peça.

De acordo com Oliveira (2012), quando se aplicou o jato de ar para limpeza do rebolo, os valores de rugosidade caíram substancialmente. Isto sugere que a piora da qualidade da peça quando se trocou do método de lubri-refrigeração convencional para MQL sem limpeza foi causado pelo entupimento dos poros do rebolo pelo cavaco.

Além do uso do jato se limpeza, o sistema projetado permitia o ajuste do ângulo de incidência, e os melhores resultados foram alcançados nos posicionamentos tangenciais; a 30°

e a 60° nas três velocidades de mergulho empregadas: 0,25; 0,50 e 0,75 mm/min. A inclinação de 30°. do bocal do jato de ar foi a condição que alcançou maior eficiência na limpeza do rebolo nas velocidades de 0,25 e 0,75 mm/min, gerando assim os menores valores de rugosidade. Já para a velocidade de mergulho de 0,50 mm/min as situações de limpeza MQL +30° e MQL +60° apresentam intervalos de confiança próximos, porém as duas situações apresentaram rugosidades inferiores aos outros métodos.

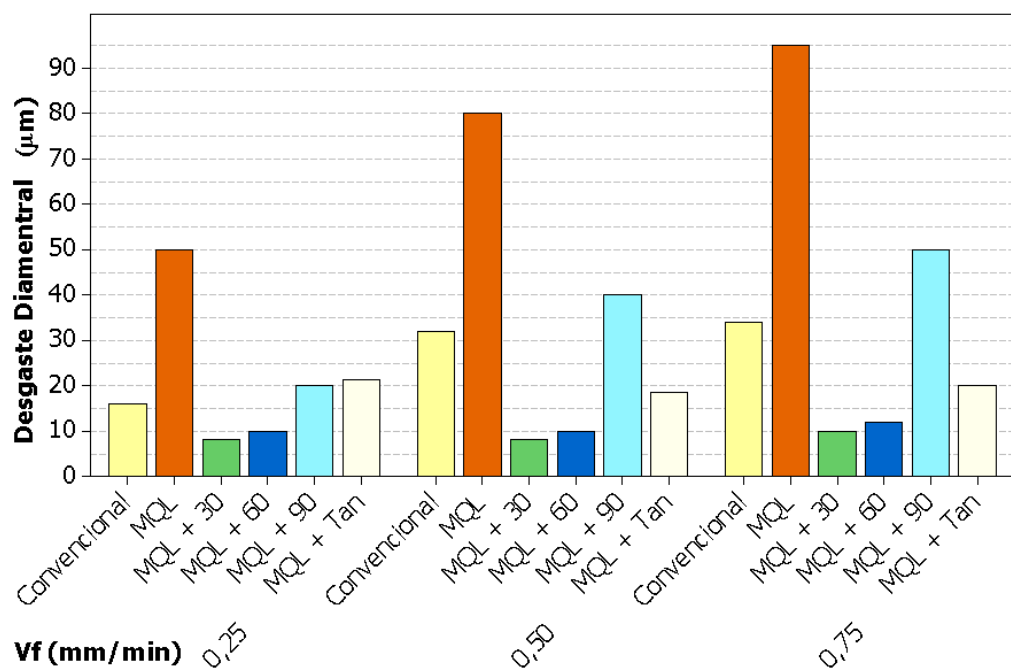


Figura 17: Resultados do desgaste diametral do rebolo de CBN com a utilização do óleo MQL accu-lub LB 1000 em aços temperados e revenido 4340 (Oliveira 2011)

2.7.4 Emissão acústica (EA)

Segundo Marinescu *et al.* (2007) a aplicação de sensores de emissão acústica se tornou bem popular, por apresentar os requisitos necessários para um sensor com baixo custo, sem influenciar na rigidez da ferramenta, além de ser capaz de transmitir sinais de partes que rotacionam.

De acordo com Stephenson *et al.* (2006) como as ondas de EA se propagam com frequências entre 100KHz a 1MHz, acima das frequências naturais estruturais da máquina, as vibrações da retificadora não influenciam no sinal de EA. Essas ondas são captadas por um sensor de EA (piezoelétrico) que geralmente é montado em uma posição perto do chão.

A EA surgiu com o intuito de monitorar o que ocorre na retificação. Entre as possíveis detecções dessa aquisição de dados está a detecção do contato peça-rebolo, esforço demasiado do rebolo e danos térmicos (BABEL *et al.*, 2013).

Assim esse parâmetro auxilia no julgamento se o processo está ou não ocorrendo em boas condições. A EA é utilizada na detecção de vários propósitos como o desgaste do rebolo, queima da peça e verificação de dressagem (KIM *et al.*, 2001).

Em seus trabalhos Stephenson *et al.* (2006) comprovam que a EA pode ser utilizada para detecção do entupimento do rebolo e para monitorar o estado do rebolo. Em seus trabalhos mostraram que quando ocorreu o entupimento do rebolo a energia da emissão acústica aumentou.

Os processos que causam a EA são as deformações por deslocamento ou deformações nos planos, transformações de fases, atrito, formação de trincas e assim como sua propagação e mudanças estruturais causadas mecanicamente ou termicamente. Babel *et al.* (2013) mostram que existem picos nos sinais de EA captados durante a retificação, esses picos ocorrem no início e término do contato entre o rebolo e a peça. Esses picos potencializam o risco de danos à peça.

2.7.5 Potência

De acordo com Nascimento *et al.* (2015) a potência está diretamente ligada as forças de corte. Nesse trabalho foi utilizada a potência em vez das forças de corte devido a maior facilidade de se mensurar a grandeza

Belentani *et al.* (2014) explica que o aumento do efeito refrigerante do fluido eleva-se a potência de corte consumida no processo de retificação devido ao fato de que conforme se mantém a temperatura baixa, na zona de contato, a resistência do material da peça não diminui devido ao calor elevado e com isso é necessário maior esforço para remove-lo. Essa afirmação complementa os resultados obtidos nessa pesquisa. Observa-se na figura 26 que conforme aumenta-se o poder refrigerante do fluido (adiciona-se água) a potência aumenta.

Belentani *et al.* (2014) completa que a potência consumida é influenciada diretamente pela eficiência de lubrificação do processo, uma vez que com mais lubrificação as forças de corte são menores devido à maior facilidade em que o rebolo tem de remover e deslizar sobre a peça. Associando essa afirmação com a figura 26 é possível destacar que a potência de corte realmente aumenta conforme a lubrificação do processo se torna menos eficaz, posto que conforme adiciona-se água ao fluido diminui-se o poder lubrificante do mesmo.

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

2.7.6 Vibração

De acordo com Ahrens *et al.* (2013) a vibração é um parâmetro importante para se monitorar, pois ela limita a produtividade e a qualidade superficial das peças.

A vibração está diretamente ligada com a perda de precisão nas tolerâncias da peça, é responsável por produzir ondulações na superfície da peça (ROWE, 2014). De acordo com Parenti *et al.* (2016) a vibração geralmente ocorre devido a um batimento radial e causa ondulações na peça prejudicando a circularidade da peça.

O sensor de vibração incorpora filmes piezelétricos para converter energia mecânica em sinais elétricos. O componente geralmente incorpora um peso suspenso entre dois filmes piezelétricos. O peso se move em resposta à vibração e comprime o filme piezelétrico, o qual envia um sinal elétrico a cada vez que o peso o comprime (MOBLEY 1999).

2.7.7 Análises metalográficas

Algumas vezes as altas temperaturas na zona de contato da retificação podem provocar mudanças de fases no material, que podem afetar as propriedades mecânicas do produto (SINHA *et al.*, 2016). Assim a importância de avaliar a microestrutura da peça após a retificação.

Ao mesmo tempo em que a deformação plástica a formação do cavaco e assim a remoção do material, o atrito também gera calor. A temperatura em que a superfície da peça alcança pode ser alta podendo resultar em queima, mudanças nas fases metalúrgicas, retempera, tensões residuais desfavoráveis, trincas e redução da resistência à fadiga (SIENIAWSKI e NADOLNY, 2016). Com isso há uma necessidade de avaliar a microestrutura da peça após a retificação.

Utilizando uma técnica adequada é possível observar a microestrutura do material. A importância dessa técnica é que as propriedades mecânicas de um material estão diretamente ligadas com a composição química e sua textura. (COLPAERT, 2008):

Segundo Marinescu (2004) a microscopia eletrônica de varredura é aplicada para investigar a estrutura superficial da peça, isso é avaliar se a peça passou por danos térmicos e/ou mecânicos durante o processo de usinagem. Esse método consiste em bombardear um feixe fino de elétrons na superfície, com isso o impacto dos elétrons primários de feixe faz com que os elétrons secundários da superfície analisada sejam emitidos e captados, assim com a captação dos elétrons secundários é possível construir a imagem da superfície do material.

2.7.8 Microdureza

O endurecimento mecânico da superfície ocorre quando a superfície sofre uma sobrecarga. Assim há possibilidade de acontecer mudanças estruturais e com isso mudanças mecânicas (HOLESOVSKY e HRALA, 2004).

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

O endurecimento da superfície ocorre quando há um aumento da temperatura da superfície acima da temperatura de austenitização e em seguida um rápido resfriamento (têmpera). Isso faz com que a microestrutura resultante seja a martensita a qual possui uma alta dureza (SALOTINIS, 2014).

É possível também ocorrer o amolecimento da superfície. A retificação normalmente ocorre depois dos tratamentos térmico, assim caso a peça tenha sofrido têmpera e a temperatura do processo for alta a peça pode sofrer revenimento e com isso perder dureza. O revenimento depende da temperatura e o tempo exposto a essa temperatura, assim o tempo de retificação influencia no revenimento da estrutura martensítica (MALKIN e GUO, 2008).

A realização desse teste é importante para reforçar os resultados obtidos na micrografia.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Serão descritos os materiais e equipamentos necessários e que serão utilizados para a realização da usinagem, além dos métodos empregados para a realização do mesmo.

Também serão detalhados os equipamentos e o procedimento para aquisição de dados, medições diretas das variáveis de saída, citadas na revisão bibliográfica, e indiretas das demais variáveis conforme os diversos parâmetros de entrada determinados nos ensaios preliminares.

Os ensaios do experimento foram realizados no Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA) da Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB) - UNESP. Após a realização dos ensaios os corpos de prova serão encaminhados para os laboratórios na UNESP, *campus* de Bauru.

3.1 Equipamentos a serem utilizados

Neste item serão apresentado e explicados os equipamentos que serão utilizados nos ensaios.

3.1.1 Retificadora cilíndrica externa

Os ensaios ocorreram na retificadora cilíndrica externa de mergulho fabricada pela empresa *SULMECÂNICA*, modelo RUAP 515H como demonstra a figura 18, equipada com comando numérico computadorizado (CNC) da Fagor para acionamento do eixo X. Foram utilizados dois programas CNC; um para usinagem dos corpos de prova e outro para impressão do rebolo desgastado.

Por ser equipada com CNC foi possível uma repetição na realização da retificação, uma vez que a máquina repetirá todas as vezes o mesmo programa.

A retificadora possui vedação com cortinas plásticas e placas de policarbonato para minimizar a perda de fluido para o ambiente.



Figura 18: Retificadora cilíndrica CNC Sulmecânica - RUAP 515 H Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA)

3.1.2 Mandril de fixação

O corpo de prova em forma de anel foi fixado com interferência e com uma porca em um mandril e este, por sua vez, fixado entre pontas na máquina. Este tipo de sistema é um dos mais utilizados nas indústrias, pois garante rapidez, facilidade de fixação e precisão reduzindo os erros encontrados nas fixações com placas.

3.1.3 Corpos de prova

O corpo de prova utilizado para os ensaios é feito de aço ABNT4340. Após a confecção, os mesmos foram temperados e revenidos pela empresa Thermix- Tratamentos Térmicos, passando a apresentar uma dureza média de $59 \pm 2 H_{RC}$.

O aço ABNT 4340 possui em sua composição 4% de C, 1,8% de Ni, 0,8% de Cr, 0,23% de Mo, 0,68% de Mn e 0,23% de Si. É classificado como aço temperável e é utilizado em peças que necessitam de uma combinação de resistência mecânica e tenacidade (SILVA *et al.*, 2007).

Esse aço é utilizado na fabricação de diversos componentes mecânicos como virabrequins e eixos, peças que necessitam de elevada solicitação mecânica. Esse aço combina uma

resistência mecânica média com a resistência a fatura, além de possuir uma alta resistência à fadiga. Possui elevada temperabilidade e boa forjabilidade, no entanto sua usinabilidade é baixa e para ser soldado necessita de métodos sofisticados (CAMARGO *et al.* 2009).

O corpo de prova possui o formato de um anel onde o diâmetro externo é de 54 mm, o interno é de 30 mm e possui uma espessura de 4 mm.

Outro corpo de prova será utilizado para realizar a impressão do rebolo, e assim medir o desgaste do mesmo. O material desse outro corpo de prova será o aço ABNT 1045 não temperado. Esse material foi escolhido por ser dúctil quando não temperado, com isso a impressão do rebolo é facilitada.

3.1.4 Rebolo CBN

No ensaio foi utilizado um rebolo CBN com ligante vitrificado do tipo 19A80SVSB, fornecido pela empresa Nikkon Ferramentas de Corte Ltda. As dimensões do rebolo são: diâmetro externo de 350 mm, diâmetro interno de 127 mm, uma largura de 19 mm e uma camada de CBN de 5 mm.

3.1.5 Dressagem

As condições de dressagem foi mantida constante nos ensaios de forma a não afetarem no resultado final. A dressagem foi realizada com um dressador multigranular do tipo conglomerado, onde os diamantes estão dispostos em uma matriz metálica como mostrado na figura 19. O dressador utilizado foi fornecido pela empresa Master Diamond e tem as dimensões de 15x8x10. Pretende-se penetrar o dressador em 2 μm em cada passada durante o perfilhamento até o momento que toda a camada desgastada seja removida, o que corresponde a 40 μm de remoção a velocidade (v_d) de 600 mm/min. Foi feito de forma manual para que a partir das condições de dressagem adotadas, houvesse a predominância de um micro efeito na afiação da ferramenta.

3.1.6 Sistema de refrigeração convencional abundante

O sistema de refrigeração convencional é basicamente o mesmo em todos os casos. É composto por um tanque para armazenar o fluido, uma bomba de sucção, mangueiras, bocais

para aplicação e o próprio fluido de corte. No presente caso o tanque da retificadora a ser utilizada possui capacidade para 80 litros.

O fluido de corte utilizado foi em abundância com uma emulsão de 2 litros de óleo para 80 litros de água, o óleo utilizado foi o semissintético solúvel em água QUIMATIC ME-I concentrado, em sua composição química existem aditivos como anticorrosivos, biocidas, fungicidas, alcalinizantes, antiespumantes, tensocitivos não iônicos, alcanolomidas, entre outros.

Foram utilizados dois bocais difusores do tipo fixoflex, também da empresa, QUIMATIC com furos de Ø 6,35 mm O fluido de corte foi aplicado a uma vazão de 17 l/min. Esta vazão foi a máxima alcançada pela bomba empregada e foi mensurada através de um medidor tipo turbina e um display digital.

3.1.7 O sistema de mínima quantidade de lubrificante (MQL)

O sistema de MQL utilizado é composto por um compressor de ar, um regulador de pressão, um medidor de vazão de ar, um dosador de fluido de corte, e um bocal projetado para utilização de MQL na retificação como observado na figura 19.

O dosador de fluido de corte é o equipamento responsável por controlar a quantidade de fluido e ar comprimido. O dosador utiliza um sistema pulsante de fornecimento de fluido e a regulagem da vazão de ar e de fluido são independentes. O aplicador utilizado nessa pesquisa foi o *ITW Accu-lube 79053D*, como mostrado na figura 28, de micro-lubrificação, fornecido pela empresa *ITW Chemical Products Ltda.* Por meio de um registro tipo agulha, esse equipamento permite uma fina regulagem do volume de ar pressurizado, nesse estudo a mistura será atomizada em um fluxo e pressão contínuos de ar a $6,37 \times 10^5$ Pa.

Um medidor de vazão também foi utilizado no experimento para um controle da vazão de ar comprimido. O medidor de vazão foi conectado a uma rede de ar comprimido, fornecendo a leitura direta da vazão em m^3/h , cuja característica construtiva foi do tipo turbina, onde de acordo com a rotação da turbina, o campo magnético era mais ou menos intenso, sendo tal campo captado por um sensor posicionado próximo a turbina do medidor, a vazão do ar no sistema MQL foi de aproximadamente $30 \text{ m}^3/\text{h}$.

A mistura de ar comprimido e fluido de corte é realizado no bocal. Esse bocal possui uma câmara interna para uma correta mistura do ar comprimido e fluido através do princípio de

Venturi. O bocal é de latão e possui duas entradas para a fixação de mangueiras para o fornecimento de ar comprimido e fluido de corte.

O fluido de corte utilizado na aplicação da técnica MQL é o ME 2 – Óleo Solúvel Sintético Ecológico, fornecido pela empresa Quimatic Tapmatic do Brasil. No presente estudo foi avaliado a diluição do fluido de corte em água, assim o fluido de corte será diluído em água nas proporções óleo puro, 1 óleo/1 água, 1 óleo/3 água e 1 óleo/5 água.

A vazão do fluido utilizada na técnica MQL foi de $1 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{h}$ determinado nos ensaios preliminares. Para a regulagem da vazão de fluido foi instalada uma graduação no reservatório de óleo, e com isso será possível observar qual a vazão do fluido.

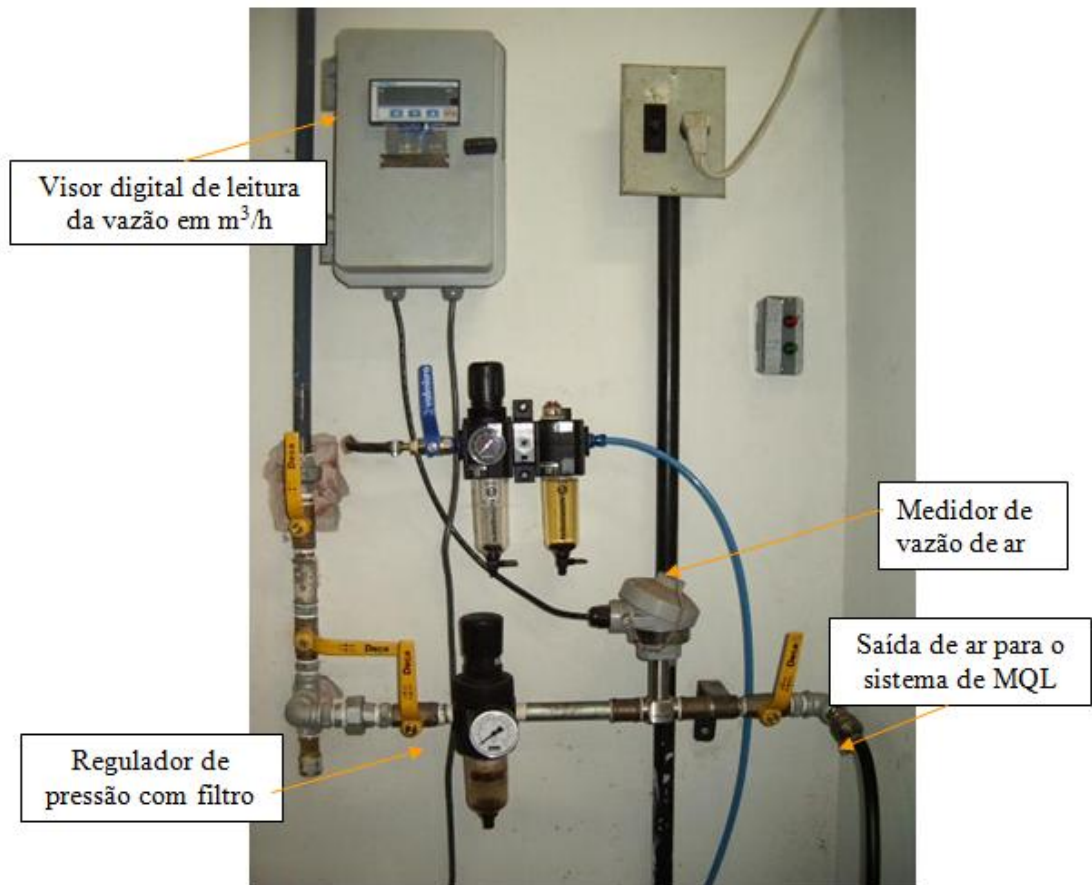


Figura 19: Foto tirada do Laboratório de usinagem por abrasão (LUA) do sistema de ar comprimido e medição de vazão para o MQL.

3.1.8 Sistema de limpeza secundário da superfície de corte do rebolo

Esse sistema é independente do sistema de MQL e constituído de um compressor, reguladores de vazão e pressão e o bocal de limpeza. Optou-se por construir um sistema de ar comprimido independente, para não sobrecarregar um único compressor e ter maior eficiência e precisão nos resultados dos ensaios.

Ao sistema de limpeza também foi acoplado um sistema para medição da vazão de ar comprimido. Para aplicação do ar comprimido usado na limpeza do rebolo foi projetado um bocal com um sistema de fixação que permitia o posicionamento do jato de ar em diferentes ângulos de incidência conforme demonstrado na figura 20. A alteração do ângulo de incidência é feita através de uma escala graduada com resolução de 30°. A geometria do bocal e seu sistema de fixação e posicionamento.

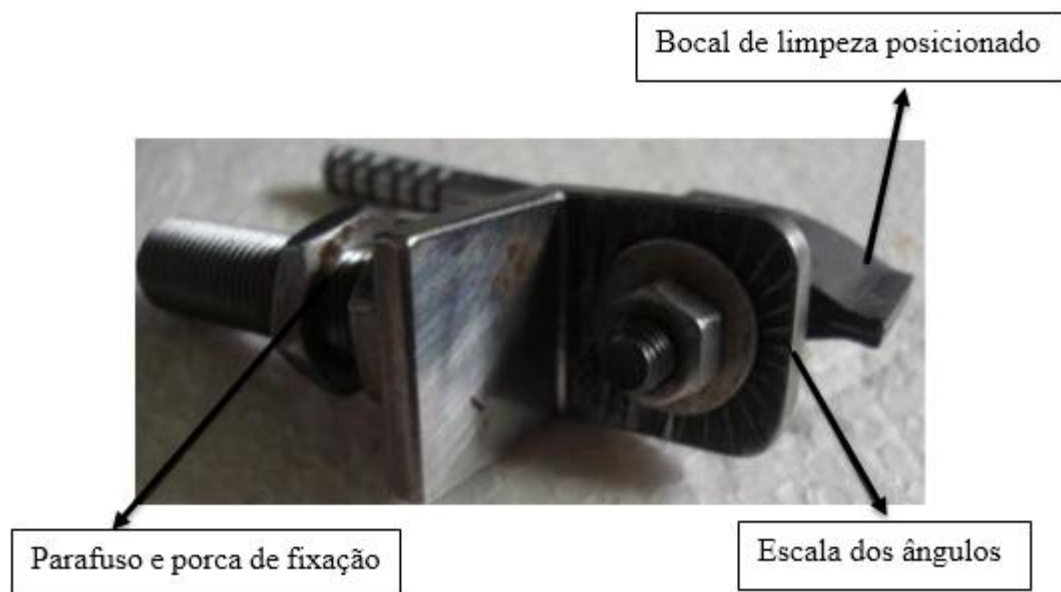


Figura 20: Demonstração das partes funcionais do bocal para limpeza do rebolo (peças para fixação e sistema de leitura do ângulo de inclinação). (Oliveira *et al.* 2012).

O bocal está fixado na proteção de aço que existe em torno da ferramenta abrasiva. No local é acoplado o medidor de vazão e pressão para obter os parâmetros que serão importantes para a correta limpeza e remoção dos cavacos com óleo aderidos na superfície de corte do rebolo.

Durante a realização dos ensaios com o sistema de limpeza o ar foi expelido contra a superfície de corte do rebolo a uma vazão de aproximadamente 30 m³/h e pressão de 5,8 x 10⁵ Pa durante os ensaios.

3.2 Classificação e parâmetros dos ensaios

Considerando algumas limitações da retificadora empregada como, por exemplo, baixas rotações do rebolo, ensaios preliminares foram realizados com o intuito de se obter as melhores condições de usinagem para serem usadas nos ensaios definitivos. Salienta-se que para alguns parâmetros os valores utilizados não são os ideais, porém são os valores máximos alcançados na retificadora empregada.

O trabalho consistiu de 27 ensaios, considerando a aplicação de cinco condições de lubri-refrigeração com velocidade de avanço de 50 mm/s como demonstrado na figura 21.

Para cada situação de ensaios foram utilizados 3 corpos de prova nas condições de lubri-refrigeração dos quais são:

- Convencional condição adotada como referência para análise das variáveis de saída por ser a mais amplamente empregada;
- MQL sem o sistema de limpeza (MQL -);
- MQL com sistema de limpeza; (MQL +)

Quando foi usado o sistema MQL juntamente com o sistema de limpeza do rebolo foi fixado o ângulos de incidência de 30° do jato de limpeza Oliveira *et al.*(2011) em seu trabalho limpando a superfície do rebolo com jato secundário de ar comprimido verificou que o ângulo de incidência de 30° obteve os melhores resultados. As condições analisada foram.

- MQL- sem o sistema de limpeza do rebolo com óleo puro ou seja sem adição de agua representado por A1, A2 e A3;
- MQL+ com o sistema de limpeza posicionado a 30° em relação ao rebolo com óleo puro ou seja sem adição de agua representado por B1, B2 e B3;
- MQL- 1:1 sem o sistema de limpeza do rebolo com óleo e diluição de água nas proporções 1:1 ou seja uma parte de óleo e uma parte de água representado por A4, A5 e A6;

- MQL+1:1 com o sistema de limpeza posicionado a 30° em relação ao rebolo com óleo e diluição de água nas proporções 1:1 ou seja uma parte de óleo e uma parte de água representado por B4, B5 e B6;
- MQL-1:3 sem o sistema de limpeza do rebolo com óleo e diluição de água nas proporções 1:3 ou seja uma parte de óleo e três parte de água representado por A7, A8 e A9;
- MQL+1:3 com o sistema de limpeza posicionado a 30° em relação ao rebolo com óleo e diluição de água nas proporções 1:3 ou seja uma parte de óleo e uma parte de água representado por B7, B8 e B9;
- MQL- 1:5 sem o sistema de limpeza do rebolo com óleo e diluição de água nas proporções 1:5 ou seja uma parte de óleo e cinco parte de água representado por A10, A11 e A12;
- MQL+1:5 com o sistema de limpeza posicionado a 30° em relação ao rebolo com óleo e diluição de água nas proporções 1:3 ou seja uma parte de óleo e uma parte de água representado por B10, B11 e B12;

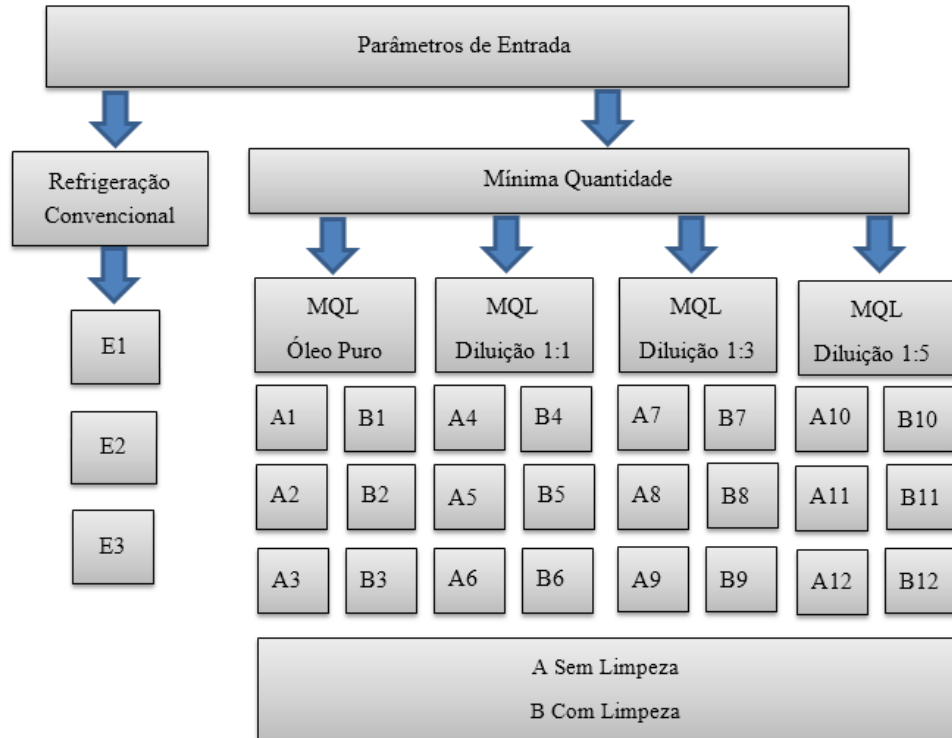


Figura 21: Diagrama dos ensaios definitivos onde A são os ensaios sem limpeza e B são os ensaios com limpeza de ar comprimido na utilização do MQL e a refrigeração convencional E.

Foram retificadas três peças em cada ensaio totalizando um volume de material removido de aproximadamente 3900 mm³. Para analisar as variáveis de saída foram realizados dois ensaios na periferia do rebolo antes da dressagem, após a impressão no corpo de prova para a análise do desgaste diametral do rebolo. Após a impressão no corpo de prova o rebolo foi dressado. Os parâmetros de entrada que foram mantidos constantes em todos os ensaios definitivos foram:

- Velocidade de corte (v_s) de 30 m/s (baixa para o rebolo de CBN, limitada pela retificadora);
- Velocidade de mergulho (0,50 mm/min)
- Rotação da peça (n_w) de 204 RPM ($v_w = 0,58$ m/s);
- Sobremetal removido a cada ciclo 0,1 mm;
- Tempo de centelhamento (t_{so}) igual a 8 segundos;
- Largura de retificação de 4 mm;
- Vazão do fluido de corte na refrigeração convencional de 17 l/min;
- Vazão do fluido de corte no MQL de 1×10^{-4} m³/h;
- Pressão do ar no MQL de 8 bar;
- Velocidade de saída do ar de 30 m/s no bocal;
- Pressão do sistema de limpeza: $5,8 \times 10^5$ Pa;
- Vazão do ar no sistema de limpeza: 30 m³/h;
- Profundidade de dressagem (a_d) de 2 µm;
- Velocidade de dressagem (v_d) de 600 mm/min (Feita manualmente, marcando-se o tempo para percorrer determinada distância).

3.3 Caracterização dos parâmetros de saída

Realizados os ensaios procederam-se as medições das variáveis de saída: circularidade; rugosidade; desgaste diametral do rebolo; microdureza e análises metalográficas. Escolheram-se tais parâmetros, pois são os mais utilizados pelas indústrias além de serem aqueles que mais indicam as interferências do processo de retificação na Integridade do material.

3.3.1 Força tangencial de corte

A força tangencial de corte foi medida analisando a potência elétrica consumida pelo motor de acionamento do eixo árvore do rebolo. Para isso deverão ser monitorados os valores de tensão e corrente elétrica do motor elétrico.

Para isso, o LUA possui um módulo eletrônico, Curvopower, projetado e construído pelo grupo de pesquisa em usinagem e abrasão da Faculdade de Engenharia de Bauru, sob coordenação do Prof. Dr. Paulo Roberto Aguiar. O Curvopower transforma os valores de tensão e corrente elétrica provenientes do motor em sinais de tensões adequados para serem enviados a uma placa de aquisição de dados e manipulados pelo programa de aquisição de dados, que foi desenvolvido, utilizando-se o software LabView 7.1®, da National Instruments®.

3.3.2 Emissão acústica (EA)

O sistema de emissão acústica utilizado é do fabricante Sensis, modelo DM12, o sensor utilizado foi fixo e posicionado no cabeçote móvel da retificadora próximo ao contraponto, com a finalidade de detectar possíveis variações desse sinal em relação às outras variáveis de saída.

3.3.3 Circularidade

O desvio de circularidade foi medido com o auxílio de um medidor de circularidade modelo Talyround 31C, marca Taylor Hobson conforme mostrado na figura 22.

A ponta do apalpador é de diamante, elemento que entra em contato com a peça para a medição do desvio de circularidade. O circularímetro é alimentado através de um sistema de ar comprimido, garantindo precisão e suavidade em seus movimentos.

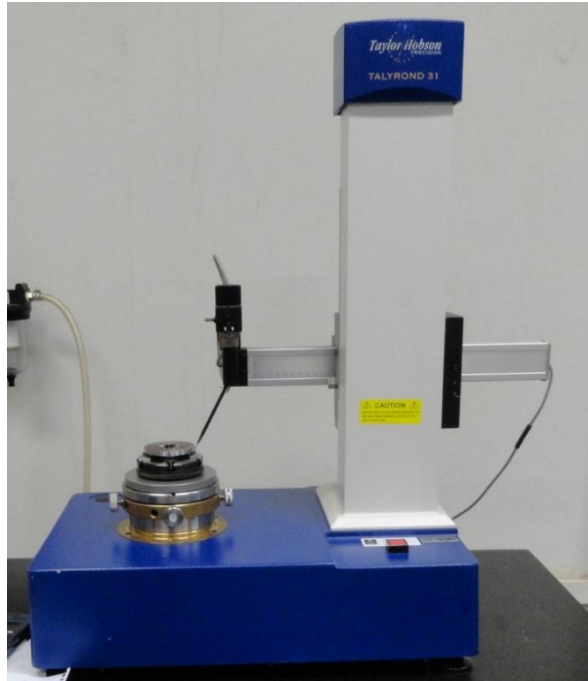


Figura 22: Circularímetro Talyrond da marca Taylor Hobson

3.3.4 Rugosidade

Para a medição da rugosidade foi utilizado o rugosímetro Surtronic 3+, da marca Taylor Hobson. O rugosímetro e o suporte para fixação da peça utilizados na medição são mostrados na figura 23.

A rugosidade foi medida perpendicularmente às marcas da retificação, com um comprimento de medição (*cut-off*) de 0,25 mm e um percurso total (*ln*) de 1,25 mm. Para não haver erros na medição a rugosidade foi medida em três pontos em cada peça, distantes de 120° um do outro.



Figura 23: Rugosímetro e suporte utilizados para medir a rugosidade das peças.

3.3.5 Desgaste diametral do rebolo

O desgaste diametral do rebolo foi medido por meio do método de impressão do rebolo em um corpo de prova preparado para esta operação. O método consiste na retificação do corpo de prova (ABNT 4340), retirando um volume fixo de material. A marcação do desgaste do rebolo é possível pelo fato de que apenas uma parte do rebolo é utilizada, já que o rebolo tem 19 mm de largura e a peça tem 4 mm de largura (possibilitando a realização de dois ensaios para cada dressagem). Feito isso, os desníveis das regiões desgastadas e não desgastadas do rebolo serão repassadas ao corpo de prova (ABNT 1020). O desgaste foi medido com o auxílio do rugosímetro Surtronic 3+, junto com o software TalyMap, ambos da Taylor Hobson como mostrado na figura 24.

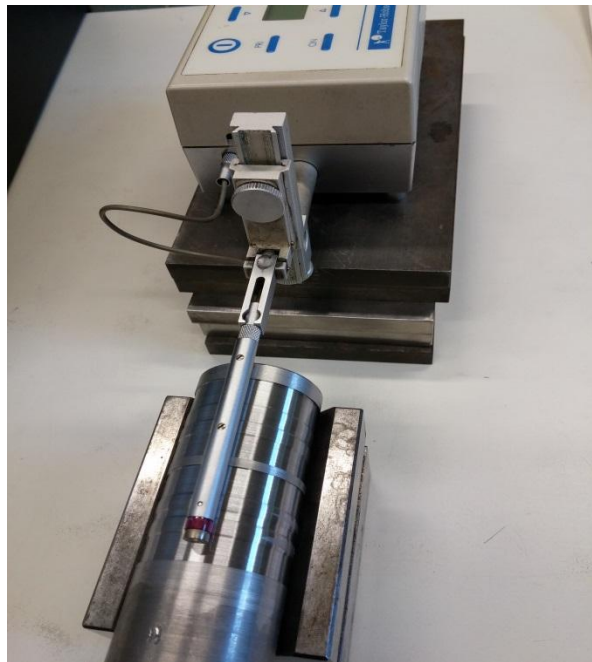


Figura 24: Medição do desgaste diametral do rebolo com o auxílio do rugosímetro, Surtronic 3+, da marca Taylor Hobson

Assim, com o perfil obtido no programa de medição, pôde-se verificar o desgaste radial do rebolo e conseqüentemente o diametral, através da leitura da dimensão “a” na figura 25.

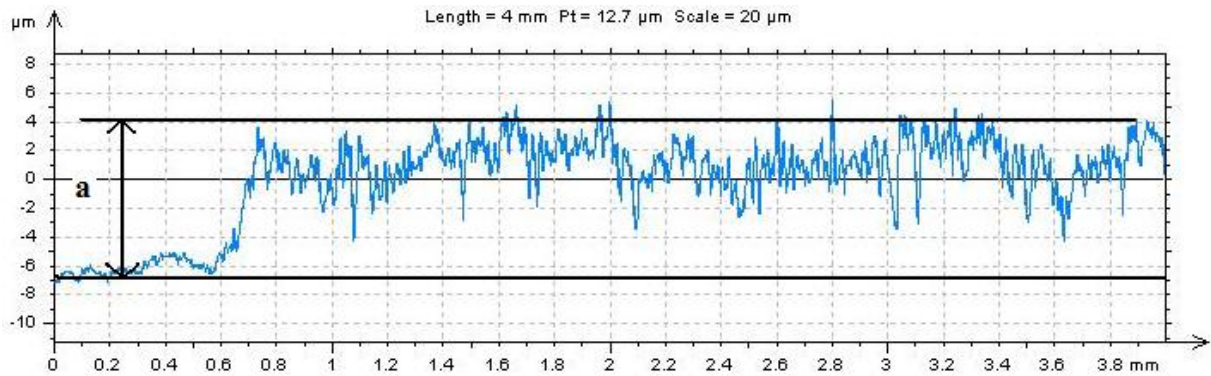


Figura 25: Esquema da medição do desgaste do rebolo.

3.3.6 Preparação das amostras para análise da microdureza e metalografia

A análise da microestrutura foi realizado no laboratório de materiais da Faculdade de Engenharia de Bauru. Para isso foi realizado a micrografia de uma seção definida da peça, após o corpo de prova foi cortado em uma máquina de corte metalográfica com os devidos cuidados para não haver um aumento excessivo da temperatura e assim uma modificação estrutural. Em seguida o pedaço da peça cortada foi embutido em bakelite, que facilita os processos posteriores.

Foi feito um lixamento da superfície da peça cortada com lixas 80, 120, 320 400, 500 e 600, com um suporte manual para lixas que umidifica as lixas da água.

Após esse processo foi realizado o polimento da superfície com uma politriz metalográfica com grãos de alumina de 1 μm em suspensão.

3.3.7 Microdureza

Para a medição da microdureza foi utilizado a escala Vickers, que utiliza um penetrador de diamante de formato piramidal. O penetrador Vickers possibilita mensurar a microdureza de regiões finas, assim se torna ideal para o presente estudo.

Com o intuito de avaliar se houve endurecimento superficial na peça retificada foi realizada a medição de microdureza na peça. Para esse fim foi utilizado o equipamento da marca Mitutoyo, MicroWizhard versão 1.04. Esse equipamento mediu os resultados de microdureza em escalas Vickers, a conversão feita pelo aparelho será de acordo com os critérios de conversão da normal ASTM E140.

Em cada superfície analisada foram feitas várias penetrações, com distâncias definidas pela norma ASTM E 384, para permitir verificar o comportamento da perda ou ganho de dureza.

3.3.7.1 Microestrutura

Para realizar as análises metalográficas foi utilizado o microscópio óptico, dotado de câmera e software para captura das imagens das amostras. Com o objetivo de melhorar o contraste para diferenciar os microconstituintes além das regiões afetadas termicamente pela retificação, as amostras foram atacadas quimicamente usando o reagente Nital 2% por 10 segundos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados, para cada condição de retificação realizada das variáveis de saída: rugosidade, circularidade, desgaste diametral além da microdureza e metalografia para verificação da integridade das superfícies retificadas.

Conforme demonstrado os ensaios foram realizados seguindo um fluxograma, iniciando com a usinagem do corpo de prova e refrigeração convencional, os demais ensaios foram utilizados o MQL sem limpeza e com limpeza da superfície de corte do rebolo e intercalados os ensaios ou seja foi usinado um corpo de prova com limpeza e outro sem limpeza com óleo puro e nas proporções de óleo e água 1:1, 1:3, 1:5. Para analisar a eficiência do método os resultados serão comparados com o método de refrigeração convencional.

4.1 Rugosidade

A figura 25 apresenta os resultados obtidos para a rugosidade média Ra, referente à comparação entre as condições de lubri-refrigeração nas proporções de óleo empregado na refrigeração.

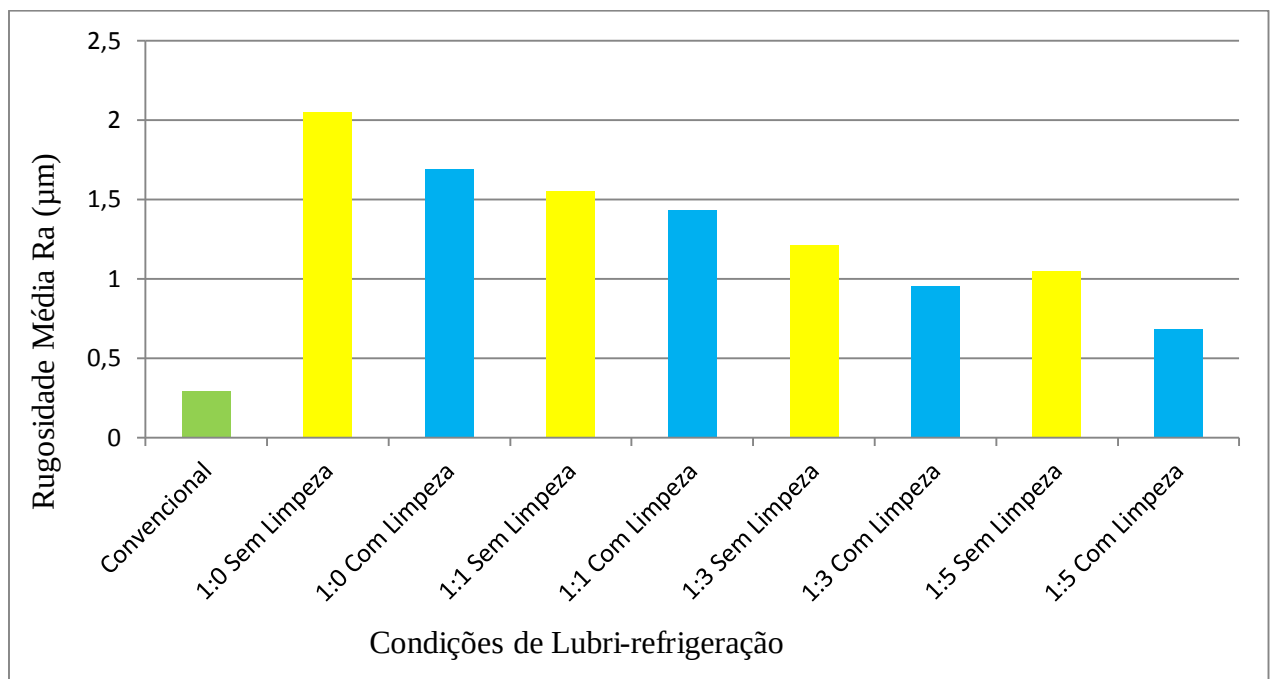


Figura 26: Média das rugosidades (Ra) para cada condição testada de lubri-refrigeração.

Tabela 1– ANOVA sobre os resultados de Rugosidade

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	19,6084	8	2,45105	161,801	0,0000	2,08919
Dentro dos grupos	0,95436	63	0,01515			
Total	20,5627	71				

A interpretação do quadro ANOVA é realizada baseando-se no valor P (probabilidade). O intervalo de confiança adotado de 95% indica a probabilidade de 5% ($\alpha = 0,05$) de significância nas diferenças dos resultados, assim valores P menores que este previamente estabelecido indica que a hipótese inicial de variâncias iguais para esses casos foi rejeitada, ou seja, os fatores utilizados nas condições de lubri-refrigeração ocasionaram significativa variação na resposta dos resultados da rugosidade.

Através da figura 26, é possível observar o fato que a refrigeração convencional apresentou menores resultados de rugosidade em comparação aos outros métodos de lubri-refrigeração. De acordo com Silva *et al.* (2013) os valores de rugosidade diminuem pela melhor eficiência na lubrificação e refrigeração nos abrasivos no contato entre a peça e rebolo. Através dessa informação é possível constatar que o método de lubri-refrigeração que possui melhor lubrificação e refrigeração, entre os nove testados, é o convencional. Segundo Tawakoli *et al.* (2007), na lubri-refrigeração convencional a elevada quantidade de fluido também atua na retirada dos cavacos da zona de corte. Já quando é utilizada a técnica MQL a menor quantidade de fluido não é suficiente para remover os cavacos das porosidades do rebolo. Os cavacos alojados nas porosidades além de impedirem a entrada do fluido de corte produzem mecanismo de remoção na superfície piorando assim a rugosidade da peça.

. Verifica-se que quando é utilizado a técnica de MQL sem o sistema de limpeza do rebolo a rugosidade apresenta-se inferior a técnica MQL com o sistema de limpeza por ar comprimido na superfície de corte do rebolo.

Contudo, quando se aplicou o jato de ar para limpeza do rebolo, os valores de rugosidade caíram substancialmente e quando se trocou do método de MQL com limpeza para o sem limpeza houve agravamento da rugosidade e isso foi causado pelo entupimento dos poros do rebolo pelo cavaco.

Outro fator interessante conforme aumentou a diluição de água no óleo refrigerante, respectivamente a rugosidade diminuiu.

Conforme a lubrificação aumenta o coeficiente de atrito entre a peça e o rebolo diminui e com isso há menor geração de calor e o processo se torna mais eficiente. No entanto óleos com viscosidade excessivamente alta tornam o processo menos eficiente devido à ampliação das forças de corte (TAWAKOLI *et al.*, 2010). Outro fator influenciou na melhor rugosidade na condição de um de óleo para cinco de água na técnica de MQL é que a viscosidade da água é menor do que a do óleo, com isso quando maior a quantidade de água na proporção menor será a viscosidade. Assim o que pode ter acontecido é que o óleo sintético puro foi mais viscoso para o processo.

4.2 Circularidade

A figura 27 apresenta os resultados obtidos para o desvio de circularidade referente à comparação entre as condições de lubri-refrigeração e o MQL nas diferentes proporções de óleo empregado.

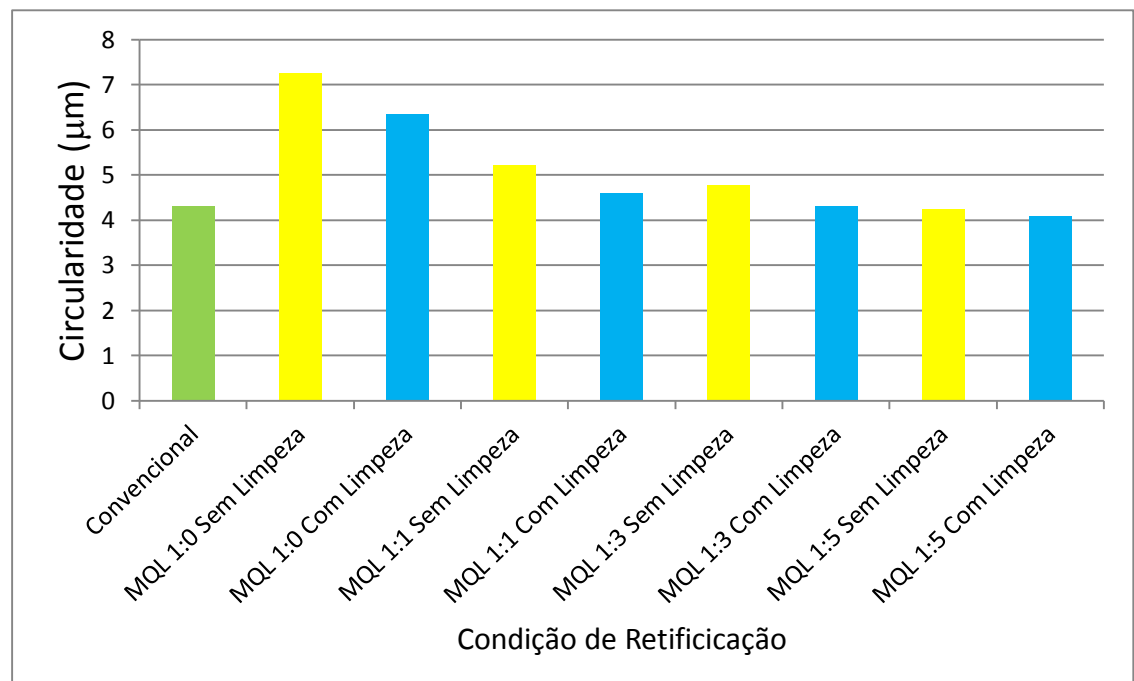


Figura 27: Resultado da circularidade

Tabela 2 – ANOVA sobre os resultados de circularidade

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	53,2489	8	6,65611	18,4317	0,0000000	2,14266
Dentro dos grupos	16,9728	47	0,36112			
Total	70,2217	55				

De maneira semelhante aos resultados de rugosidade, considerando os fatores de lubri-refrigeração, os valores P encontrados pela ANOVA indicam que existem diferenças estatísticas para os resultados encontrados.

Conforme a figura 39 o método de lubri-refrigeração com MQL na proporção 1:5 com limpeza na superfície de corte do rebolo apresentou os melhores valores de circularidade, superior ao método convencional. Analisando a figura 39 há uma tendência de que com o aumento da diluição de água melhora substancialmente o desvio da circularidade, esta tendência também pode ser observada na rugosidade. O pior resultado obtido foi para a diluição de 1:0 sem limpeza ou seja o óleo sem adição de água mostra que o poder de resfriamento da peça nesta condição não é favorável.

Segundo Silva *et al.* (2013) diz que se o processo não for resfriado adequadamente a peça pode sofrer dilatação térmica comprometendo a precisão do processo logo com o aumento de água na diluição do óleo-lubri-refrigerante há uma melhora no resfriamento da peça.

Segundo Moerlein *et al.* (2009), a precisão de uma peça usinada na retificação depende de alguns fatores, tais como: a precisão do equipamento, a magnitude de desgaste do rebolo, rigidez do conjunto máquina, peça, ferramenta, sistema de fixação, a taxa de remoção do material e energia específica. De acordo com Belentani *et al.* (2014) a água tem maior capacidade de refrigeração que o óleo puro. Assim conforme se aumenta a quantidade de água no fluido de corte para a aplicação com MQL melhor o efeito refrigerante, e com isso melhorando a circularidade das peças.

Belentani *et al.* (2014) afirma que a viscosidade do fluido utilizado na técnica MQL está diretamente ligada com a capacidade de retirar o cavaco impregnado no rebolo. Conforme a viscosidade do fluido diminui a capacidade de evitar o empastamento do rebolo (cavacos alojados nos poros do rebolo) aumentam logo para a condição com o óleo puro e sem limpeza da superfície de corte do rebolo houve aumento no desvio da circularidade.

4.3 Desgaste diametral do rebolo

A figura 28 apresenta os resultados obtidos para o desgaste diametral do rebolo. Para a medição do desgaste do rebolo não foram feitas repetições.

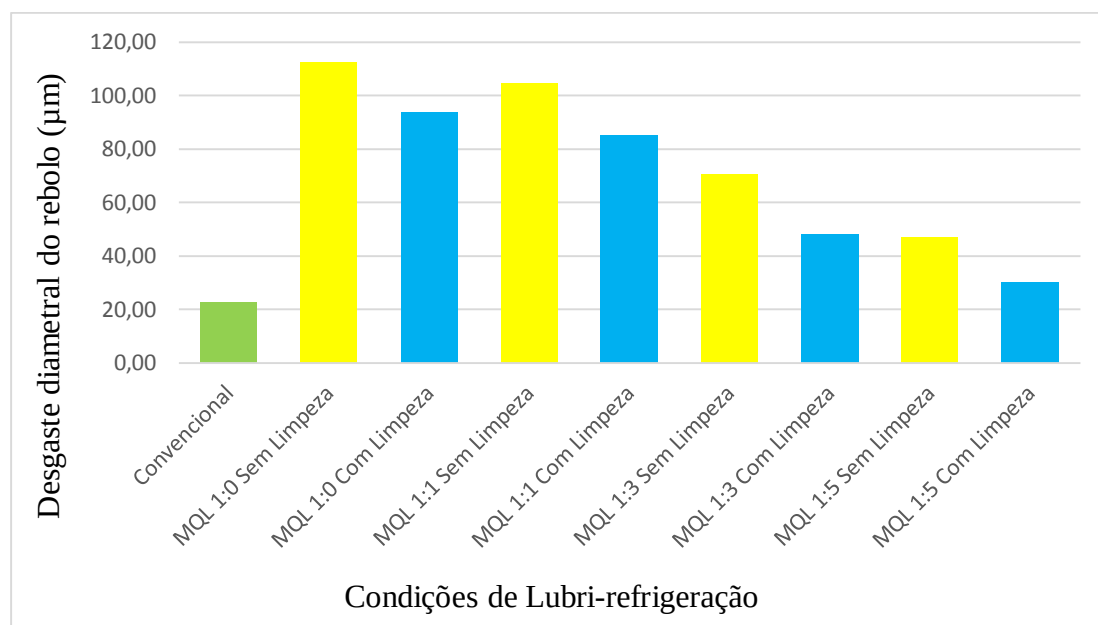


Figura 28: Média dos desgastes diametral do rebolo em suas respectivas condições de lubri-refrigeração.

Tabela 3 – ANOVA sobre os resultados do desgaste diametral do rebolo

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	17139,01167	7	2448,4365,9679	37,1154	0,00000	2,65719
Dentro dos grupos	1055,486667	16	2			
Total	18194,49833	23				

Os valores P encontrados pela ANOVA indicam que existem diferenças estatísticas para os resultados encontrados

A velocidade periférica empregada foi de 30m/s, limitada pelas características construtivas da máquina disponível para os ensaios.

Segundo Oliveira *et al.* (2009), as velocidades de corte consideradas baixas para o rebolo de CBN encontram-se na faixa de 40–80 m/s. Porém a maior parte das aplicações dos rebolos de CBN ocorre em velocidades superiores à 100 m/s chegando até a velocidade de 200 m/s.

Em baixas velocidades periféricas o desempenho do rebolo de CBN é inferior já que em maiores velocidades de corte sua dureza dinâmica é maior.

Rowe (2014) cita que o desgaste do rebolo e a rugosidade aumentam com a técnica de MQL. Essa afirmação comprova os resultados obtidos na figura 40, onde a condição onde ocorreu menores desgastes diametral do rebolo foi na condição convencional de refrigeração. Analisando a figura 40 nota-se que conforme a proporção de água aumenta no fluido utilizado na técnica MQL menores são os desgastes.

A limitação de velocidade de corte presente nos ensaios contribuiu para que o desgaste de tal ferramenta se apresente mais acentuado, se comparadas às situações de lubri-refrigeração propostas, com o aumento da diluição de água em óleo o método de lubri-refrigeração apresentado mostra resultados satisfatórios, na condição de óleo puro o desgaste do rebolo de CBN foi maior. Apesar de apresentar uma boa lubrificação a refrigeração foi deficiente e com isso houve um grande desgaste do rebolo.

Para as oito condições de MQL apresentada os menores valores de desgaste diametral do rebolo foi para a condição de 1:5 com limpeza da superfície de corte do rebolo Oliveira (2012) cita em seu trabalho que os cavacos alojados no rebolo quando não removidos totalmente aumentam as forças de corte devido ao atrito entre eles e a peça aumentando o desgaste do rebolo.

Esta condição foi a que propiciou menores valores de rugosidade e circularidade da peça e, portanto, mais eficiência na limpeza do rebolo. É interessante notar que, no processo de limpeza, o jato de ar não remove partículas do rebolo consigo, pelo contrário, preserva o rebolo contra um desgaste mais acentuado. A presença de cavacos nos poros incentivou o desgaste do rebolo, já que as condições de maior desgaste diametral do rebolo foram as que apresentaram maiores valores de rugosidade e circularidade da peça (MQL sem limpeza).

4.4 Emissão acústica

Na Figura 29 são analisados os resultados de emissão acústica (RMS) em Volts (V) e são apresentados em função das condições de lubri-refrigeração.

De acordo com Oliveira *et al.* (2012) a técnica MQL tem dificuldade em remover totalmente os cavacos no processo de retificação, com isso ocorre o entupimento dos poros do rebolo, tornando o processo menos eficiente. Foi observado em seu trabalho que conforme mais cavacos aderiam no rebolo maiores eram os sinais de emissão acústica. Essa informação é comprovada uma vez que os valores de emissão acústica da condição de refrigeração convencional foram menores do que as condições MQL, de acordo com Belentani *et al.* (2014) na refrigeração convencional não há formação de pasta de fluido com cavaco. Outro ponto que se pode destacar através dessa afirmação é que conforme a proporção de água aumenta no fluido de corte, menos cavacos aderem à superfície do rebolo, pois como já observado quanto menos água presente no fluido na técnica de MQL maiores são os valores de emissão acústica.

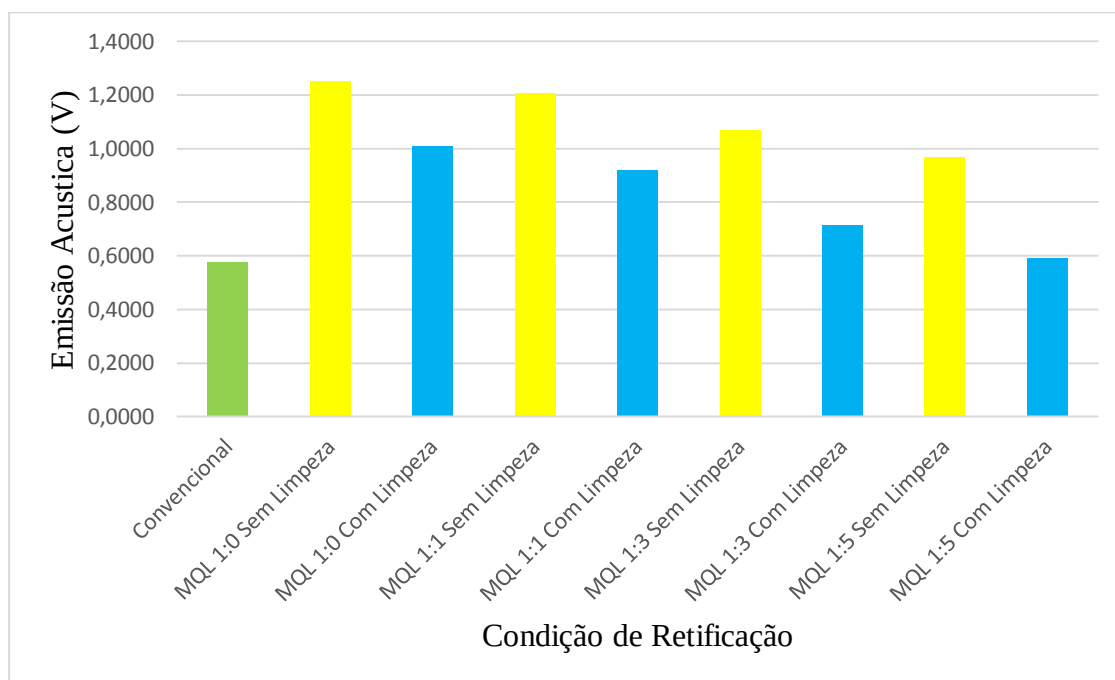


Figura 29: Resultados de emissão acústica para as diferentes condições de lubri-refrigeração

Tabela 4 – ANOVA sobre os resultados da emissão acústica

ANOVA							
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1,52633 2	8	0,19079 2	14,4748 2	0,00000 2	2,51015 8	3,51015789 5
Dentro dos grupos	0,23725 7	18	0,01318 1				
Total	1,76358 9	26					

Os valores P encontrados pela ANOVA indicam que existem diferenças estatísticas para os resultados encontrados

Dentre os métodos analisados, o que possui geralmente menor quantidade de cavaco na zona de corte é o convencional, pois não há a formação da pasta de fluido com cavaco, por esse motivo obtêm-se melhores resultados. Porém o método MQL 1:5 com limpeza da superfície de corte do rebolo foi tão eficiente quanto o método convencional de refrigeração.

Com o aumento de água no fluido de corte aumenta a possibilidade de retirar os cavacos dos poros do rebolo, outro fator importante a limpeza da superfície de corte do rebolo com o bocal de ar comprimido com incidência de 30° se mostrou eficiente, como pode se notar na figura 21, isto mostra que a limpeza na superfície de corte do rebolo foi favorável.

Como pode se observar os resultados de emissão acústica seguiu as mesmas tendência dos outros resultados, conforme a proporção de água aumenta no fluido utilizado na técnica MQL diminui-se os valores de emissão acústica.

O maior valor obtido foi pra condição de óleo puro sem limpeza, embora o óleo de corte tem a propriedade de lubrificação não se mostrou eficiente na remoção dos cavacos da superfície de corte do rebolo, devido à ausência de água na diluição formou-se uma borra de óleo e cavaco na superfície de corte do rebolo comprometendo o resultado.

De acordo com Yang *et al.* (2014) a emissão acústica pode ser utilizada para detectar queimas na superfície da peça, isso é explicado pelo fato de que a emissão acústica é gerada pela distorções dos planos da estrutura cristalina, mudanças de fases e micro trincas.

4.5 Potência na retificação

Como observado na figura 30 é possível observar que na condição de refrigeração com menor potência consumida foi a convencional. É observado que conforme a quantidade de água presente no fluido aumenta na técnica MQL, maior é a potência consumida no processo.

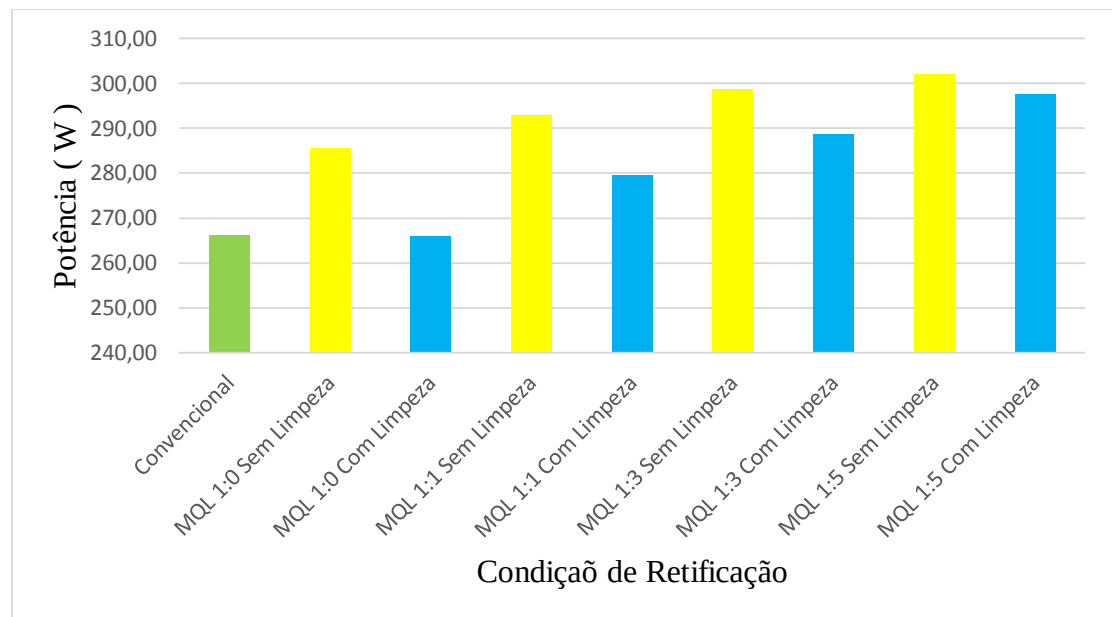


Figura 30: Resultados da potência de corte para as diferentes condições de lubri-refrigeração

Tabela 5– ANOVA sobre os resultados da potência de corte

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,220719	7	0,174388	162,3841	0,0000000	2,657197
Dentro dos grupos	0,017183	16	0,001074			
Total	1,237901	23				

Os valores P encontrados pela ANOVA indicam que existem diferenças estatísticas para os resultados encontrados

A condição de lubri-refrigeração com MQL óleo puro foi um dos métodos que proporcionou resultados satisfatórios de potência de corte. Isso pode ser explicado pela

capacidade que o MQL tem de penetrar a barreira de ar formada ao redor do rebolo em movimento. O ar comprimido é então capaz de vencer essa barreira e introduzir o lubrificante na região de corte, mas ao mesmo tempo nenhum cavaco aderido ao poro do rebolo foi retirado e com isso, um número maior de cavacos ficam alojados nos poros do rebolo aumentando o atrito com a peça necessitando uma potência maior. Nota-se que a condição de MQL com Bocal de ar comprimido na condição de óleo puro exigiu menor potência de corte, no caso do bocal de ar comprimido isso ocorreu em função de que esse método permite retirar com eficiência a borra de cavaco com óleo dos poros do rebolo, o que diminuiu o atrito entre as partículas do rebolo e a peça, diminuindo assim a potência de corte. Outro fator importante quando há um acréscimo na diluição de água no óleo solúvel aumenta a potência consumida. Este fenômeno é influenciado diretamente pela eficiência de refrigeração do processo, uma vez que com mais refrigeração as forças de corte são maiores devido à menor facilidade em que o rebolo tem de remover material e deslizar sobre a peça. Associando essa afirmação, é possível destacar que a potência de corte realmente aumenta conforme a diluição de água no óleo solúvel que é maior se torna menos eficaz.”

4.6 Vibração

De acordo com a figura 31 a condição de lubri-refrigeração que apresentou menor valor foi a convencional. Observa-se também na mesma figura que os valores de vibração decresceram de acordo com o aumento da proporção de água presente no fluido utilizado na técnica MQL.

A qualidade de uma peça com bom acabamento no processo de retificação pode ser afetado por vibrações internas ou fontes externas. As vibrações interna são frequentemente causada por oscilações, a vibração geralmente ocorre devido a um batimento radial e causa ondulações na peça prejudicando a circularidade da peça. No processo de retificação devido o rebolo ter suas características oscilatórias o desbalanceamento desenvolve as vibrações no sistema. Também as vibrações da peça de trabalho podem passar para o rebolo devido à variação da força de contato. O rebolo excita a oscilação da peça de trabalho ainda mais, fazendo com que uma ondulação aumente na retificação em cada revolução.

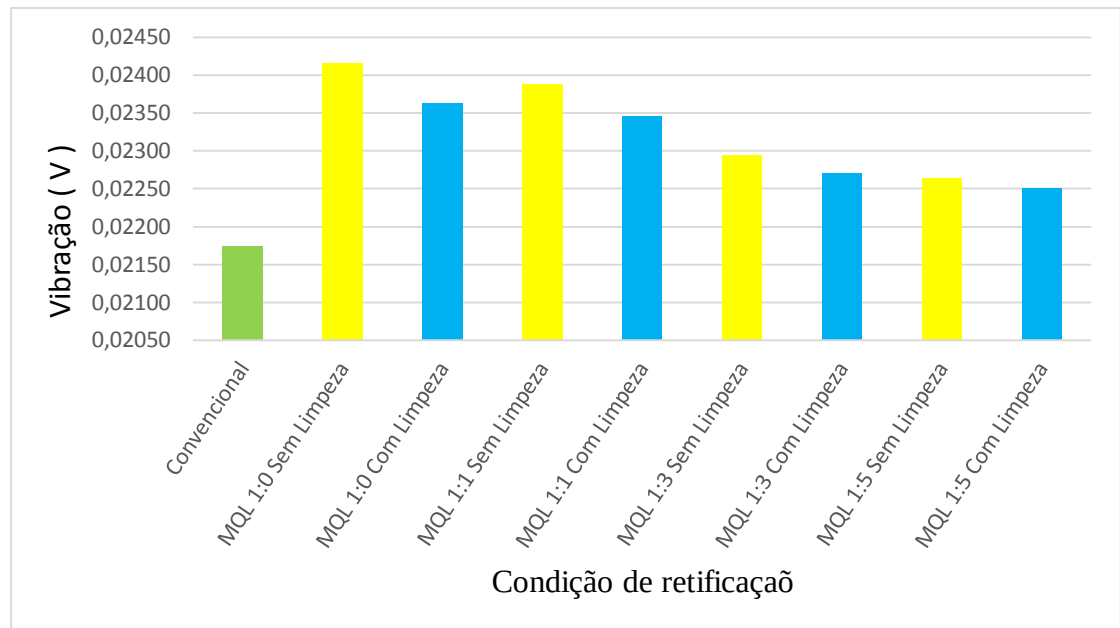


Figura 31: Média dos valores de vibração para as respectivas condições de lubri-refrigeração

Tabela 6– ANOVA sobre os resultados da potência de corte

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	5,94566E-05	8	7,43207E-06	2,781017343	0,034064146	2,51015
Dentro dos grupos	4,81037E-05	18	2,67243E-06			8
Total	0,00010756	26				

Os valores P encontrados pela ANOVA indicam que existem diferenças estatísticas para os resultados encontrados.

Segundo Németh *et al* (2007) a vibração durante a usinagem é relativamente de baixa intensidade e por isso não existe influência negativa sobre o processo de corte. Por outro lado, as vibrações de alta intensidade. Poderiam afetar negativamente tanto em alguns processos de corte como na formação de ondulações na superfície usinada e também na precisão das peças usinadas. Pode também ocasionar alta rugosidade na superfície, processo que é mais intenso no desgaste da ferramenta, além de afetar negativamente a vida útil da máquina.

Dessa forma, à medida em que a quantidade de diluição de água no fluido de corte aumentou, a vibração diminuiu. Ainda que a vibração não tenha produzido efeitos que comprometessem o acabamento e a tolerância geométrica de forma significativa, no experimento de MQL na proporção de 1:5 com limpeza na superfície de corte do rebolo mostrou melhores resultados, devido a utilização do bocal de ar comprimido para limpeza da superfície de corte do rebolo e em função de que esse método permite retirar com eficiência a borra de cavaco com óleo dos poros do rebolo, o que diminuiu a vibração. Nos ensaios de MQL sem limpeza, os níveis de vibração atingiram valores altos assim como a qualidade da superfície caiu (maior rugosidade) e os erros de circularidade foram maiores.

4.7 Microestrutura

A não visualização de defeitos à olho nu, não isenta a peça de apresentar danos térmicos. Nesse aspecto a análise metalográfica permite visualizar as alterações microestruturais que ocorreram.

Neste caso a camada branca apresenta uma microestrutura diferente da matriz, formada através de uma austenitização e transformação durante a retificação; já a camada escura tem a mesma microestrutura, porém a alteração na tonalidade indica que ocorreu naquela região um novo revenimento durante a usinagem, ocasionando uma diminuição da dureza.

A figura 32 demonstra a metalografia da superfície da peça antes do processo de retificação.

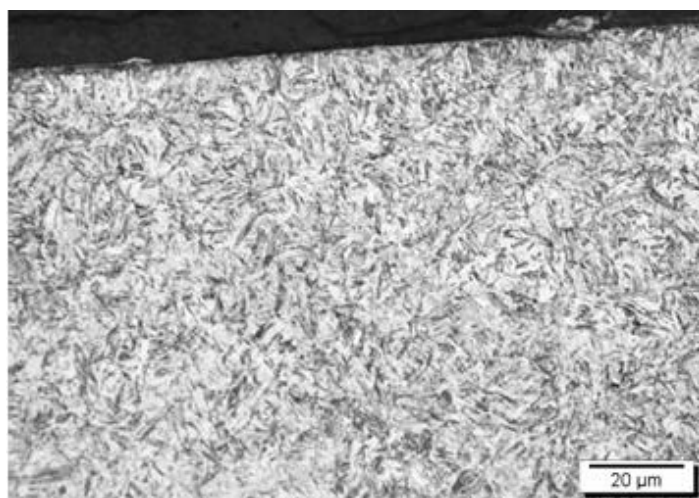


Figura 32: Metalografia da peça temperada antes da retificação

A fim de comparar as microestruturas e verificar a ocorrência de danos térmicos, realizaram-se análises metalográficas com ampliação de 1000 vezes em seções transversais dos corpos de prova.

Quando a superfície da peça é retificada fica exposta a altas temperaturas e tempo suficiente para alterar a microestrutura. E nesse aspecto as condições de lubri-refrigeração junto com o material da ferramenta exercem papel de fundamental importância no controle das temperaturas e dissipação do calor.

Rowe (2014) afirma que a integridade superficial é vital em muitos casos. Uma superfície que sofreu endurecimento superficial pode trincar, assim como uma superfície que deveria ser dura pode se amolecer e assim sofrer desgaste prematuro. Observar a microestrutura da amostra após o ensaio é fundamental para detectar se o método avaliado de lubri-refrigeração atende os requisitos e refrigera suficientemente o processo para não haver mudanças micro estruturais na peça.

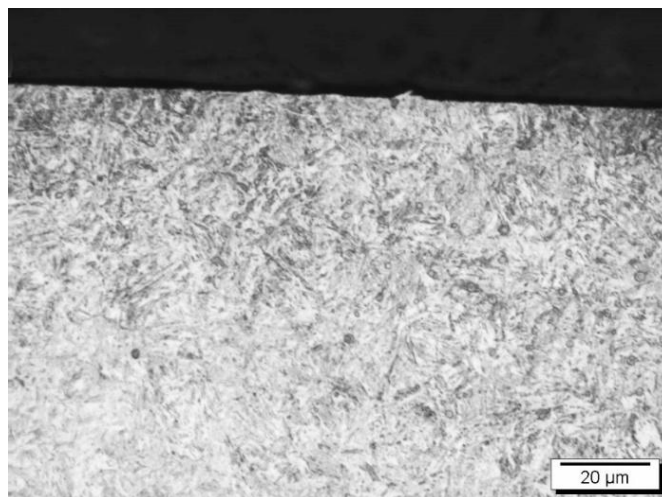


Figura 33: Microestrutura da amostra retificada na condição de lubri-refrigeração convencional.

Analisando-se a figura 33, é possível verificar a microestrutura apresentada pelo aço ABNT 4340 temperado e revenido é homogênea considerando a superfície usinada e o núcleo.

As figuras 34, 35, 36 e 37 apresentam as metalografias dos corpos de prova nas condições: MQL sem limpeza da superfície de corte do rebolo e MQL com limpeza de ar comprimido com o bocal posicionado a 30° da superfície de corte do rebolo, para a velocidade de mergulho de 0,50 mm/min

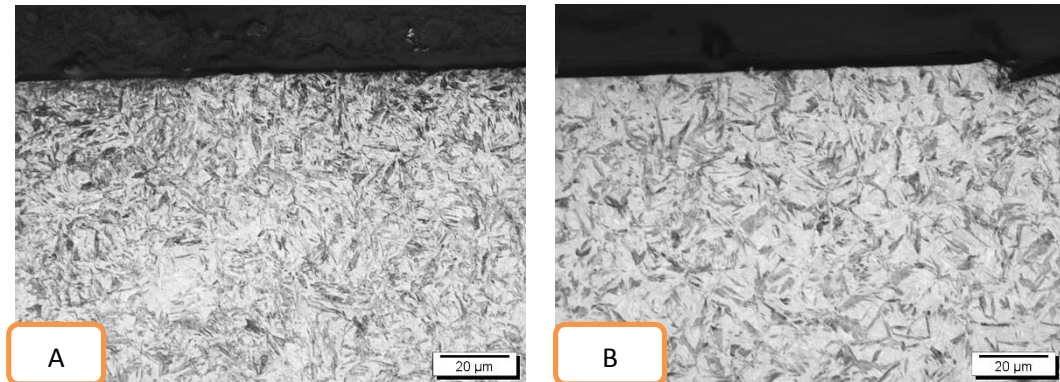


Figura 34: Microestrutura da amostra retificada na condição MQL 1:0 onde A sem limpeza e B com limpeza

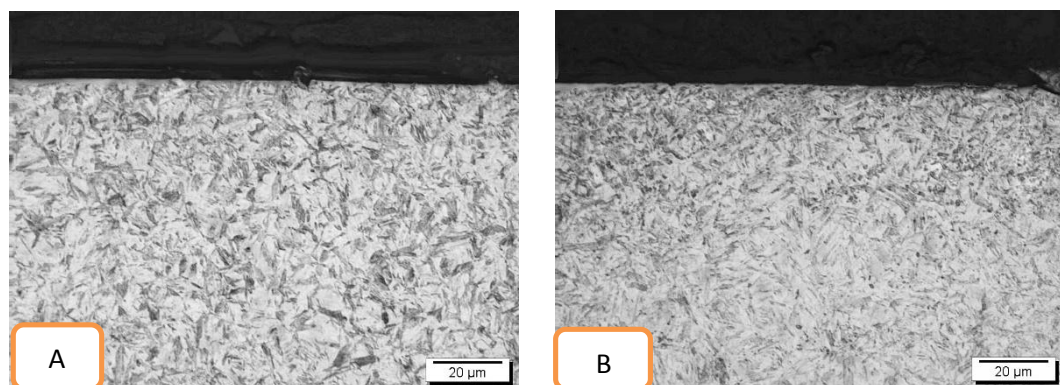


Figura 35: Microestrutura da amostra retificada na condição MQL 1:1 onde A sem limpeza e B com limpeza

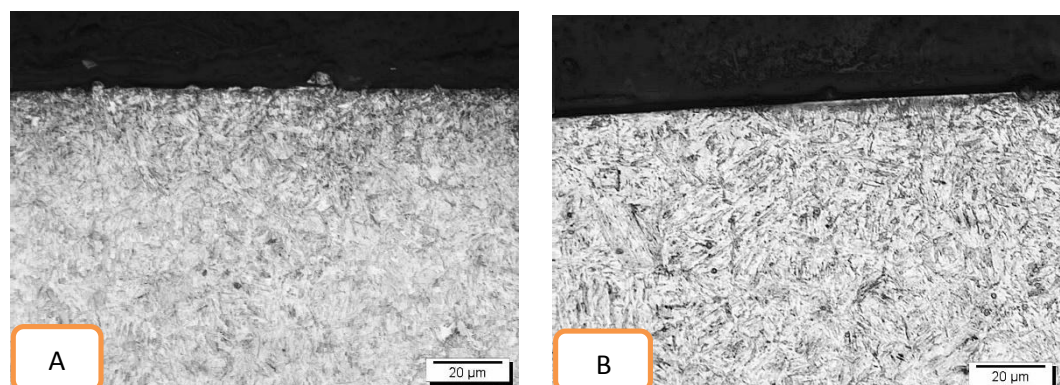


Figura 36: Microestrutura da amostra retificada na condição MQL 1:3 onde A sem limpeza e B com limpeza

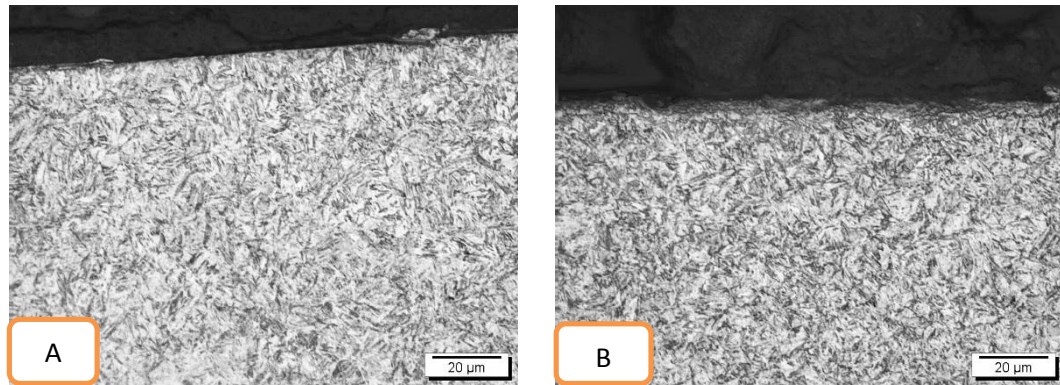


Figura 37: Microestrutura da amostra retificada na condição MQL 1:5 onde A sem limpeza e B com limpeza

Comparando-se as superfícies das peças retificadas com o método de MQL mostrado nas figuras (34, 35, 36 e 37) e a superfície da peça retificada no método de refrigeração convencional figura (33) a microestrutura apresenta-se inalterada nas regiões mais próximas a superfície retificada.

Verifica-se que não ocorreram transformações microestruturais nas peças retificadas, isto é, não há formação de camada branca e camada escura em nenhuma das superfícies após a retificação.

Na análise das metalografias verifica-se que todas as condições de lubri-refrigeração propostas permitiram condições de temperatura que impediram os fenômenos de alterações microestruturais, e isso só foi possível graças ao uso do rebolo de CBN.

Como importante fator na preservação das microestruturas para as condições adotadas nos ensaios, a alta condutividade do rebolo de CBN removeu o calor em um intervalo de tempo inferior ao necessário para ocasionar as alterações microestruturais, garantindo assim a integridade da microestrutura superficial durante o processo de retificação.

4.8 Microdureza

As medições de microdureza complementam os resultados das metalografias, comprovando através de uma variável quantitativa a isenção de danos térmicos.

As medições de microdureza permaneceram em Vickers, por apresentar maior tolerância nos resultados.

O fabricante informa que a dureza média dos corpos de prova fornecidos é de $54 \pm 2\text{HRc}$ aproximadamente 727 Vickers, as amostras analisadas não apresentaram variações muito significativas em relação a essa microdureza.

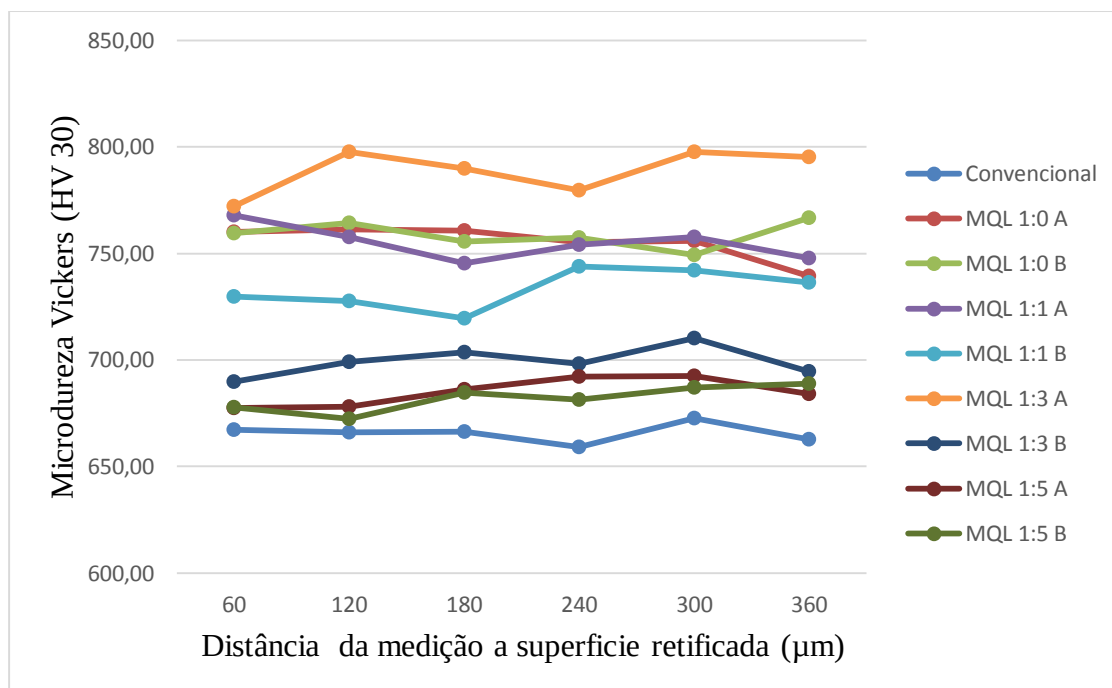


Figura 38: Microdureza das amostras em distâncias de 60, 120, 240, 300 e 360 microns da superfície retificada.

Tabela 7 – ANOVA sobre os resultados da microdureza

ANOVA						
Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	88353,74	8	11044,2175	189,833898	4,79988E-32	2,15213287
Dentro dos grupos	2618,02444	45	58,1783209	8		9
Total	90971,7644	53				

A análise da figura 38 permite concluir que nas condições de lubri-refrigeração utilizadas, não houve perda de dureza por causa das temperaturas de retificação. O rebolo de CBN empregado proporcionou uma maior dissipação do calor da região de corte reduzindo

assim: as temperaturas do processo, e consequentemente a incidência dos danos térmicos (GUO *et al.* 2007).

Como o dano térmico é caracterizado por alguma alteração na microestrutura do material, diferentes microestruturas apresentam diferentes propriedades mecânicas.

Para medições realizadas não foram constatadas variações significativas nas leituras de microdureza, pode-se então, considerar que não ocorreram danos térmicos.

Nota-se que mesmo na lubri-refrigeração MQL onde a quantidade de lubrificante é menor a alta condutividade térmica do rebolo de CBN permitiu maior dissipação do calor. De acordo com Silva *et al.* (2013) dados experimentais demonstram que longas exposições em altas temperaturas fazem com que o material perca dureza. No entanto, de acordo com a figura 29 as condições menos eficientes de refrigeração (MQL 1:0, 1:1 e 1:3) apresentaram maiores valores de dureza, isso pode ser explicado pelo fato de que a escala Vickers é muito sensível, assim uma pequena alteração durante a fabricação das peças (têmpera ou revenimento) pode ser detectada na medição. Com isso não é possível comparar as peças entre si, pois podem ter sido de lotes diferentes e com isso a microdureza base é heterogênea.

Nas condições de MQL 1:5 comparando com o método convencional fluido em abundância a microdureza ficou próximo isto mostra a eficiência da técnica MQL.

5 CONCLUSÕES

Uma análise geral dos resultados indica que a refrigeração pela técnica da refrigeração convencional é a que proporciona melhores resultados de rugosidade, erro de circularidade da peça e desgaste diametral.

Através da análise dos resultados, pode-se concluir que:

- O uso da técnica da lubri-refrigeração MQL associada a um jato de ar comprimido para limpeza da superfície de corte do rebolo com ângulo de incidência de 30 graus proporcionou limpeza eficiente do rebolo e com isto, melhores resultados em todas as variáveis analisadas, quando comparados ao MQL sem o uso de jato de ar comprimido.
- A utilização do óleo solúvel sintético ME 2 ecológico apresentou valores próximos do óleo accu-lub LB 1000 em todas as variáveis analisadas, podendo substituir a utilização do óleo accu-lub LB 1000, assim reduzindo impactos ao meio ambiente e redução nos custos.
- A potência de retificação apresenta resultados inversamente proporcionais em relação à rugosidade, desgaste diametral e circularidade, vibração e emissão acústica, na utilização do sistema de limpeza do rebolo, pois além da influência da fenomenologia do corte, há também a influência da força que o jato de ar imprime ao rebolo para retirar os cavacos aderidos, outro fator que proporcionou o aumento da potência foi a diluição de água no óleo refrigerante, quanto maior a proporção de água menor é a eficiência de lubrificação, quanto maior a eficiência da limpeza, maior a potência de corte.
- Os métodos de lubri-refrigeração testados foram suficientes para resfriar o processo evitando danos térmicos ao material. A microscopia óptica das peças não mostrou sinais de mudanças significativas na microestrutura da peça, sendo a microestrutura original e final das peças martensita.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

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

- Verificar o comportamento do MQL com óleo solúvel sintético diluído em água mais sistema de limpeza utilizando abrasivos convencionais usados para retificação de aços;
- Verificar o comportamento do MQL com óleo solúvel biodegradável com rebolo de CBN;
- Utilizar diluições de água acima da relação de 1:5 no óleo solúvel para testar a eficiência da técnica MQL;

Referências Bibliográficas

- AHRENS, M. DAGEN, M. DENKENA, B. ORTMAIER, T. **An Active Damping Method for Chatter Vibration in Plunge Grinding using Electromagnetic Actuators (2016) Procedia CIRP 46 (2016) 197 – 200**
- A LAGUMURTHI, N., PALANIRADJA, K., SOUNDARARAJAN, V. “Heat generation and heat transfer in cylindrical grinding process - a numerical study”, **Int J Adv Manuf Technol** (2007) 34:474–482.
- ANDERSON, D., WARKENTIN, A., BAUER, R. “Experimental validation of numerical thermal models for dry grinding”, **Journal of Materials Processing Technology** 204 (2008) 269–278.
- ALBERDI, R., SANCHEZ, J. A., POMBO, I., ORTEGA, N., IZQUIERDO, B., PLAZA, S., BARRENETXEA, D. ” Strategies for optimal use of fluids in grinding”, **International Journal of Machine Tools & Manufacture** 51 (2011) 491–499.
- AURICH, J. C., HERZENSTIEL, P., SUDERMANN, H., MAGG, T. “High-performance dry grinding using a grinding wheel with a defined grain pattern”, **CIRP Annals - Manufacturing Technology** 57 (2008) 357–362.
- AZIZI, A., REZAEI, S. M., RAHIMI, A. “Study on the rotary cup dressing of CBN grinding wheel and the grinding performance”, **Int J Adv Manuf Technol** (2010) 47:1053–1063.
- BARCZAK, L. M., BATAKO, A. D. L., MORGAN, N. M. “A study of plane surface grinding under minimum quantity lubrication (MQL) conditions”, **International Journal of Machine Tools & Manufacture** 50 (2010) 977–985.
- BABEL, R., KOSH, P., WEISS, M. “Acoustic emission spikes at workpiece edges in grinding: Origin and applications”, **International Journal of Machine Tools & Manufacture** 64 (2013) 96–101.
- CAGGIANO, A., TETI, R. “CBN Grinding Performance Improvement in by controllable voltage with force feed back”, **Int J Adv Manuf Technol** (2010) 46:123–130.
- DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. Artiliber Editora Ltda, Campinas, SP, Brasil, 2ª Edição, 2000, p.225-244.
- DHAR, N. R., ISLAM, S., KAMRUZZAMAN, M. “Effect of Minimum Quantity Lubrication (MQL) on Tool Wear, Surface Roughness and Dimensional Deviation in Turning AISI-4340 Steel”, **G.U. Journal of Science** 20(2): 23-32 (2007).
- DEBNATH, S., REDDY, M. M., YI, Q. S. “Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review”, **Journal of Cleaner Production** 83 (2014) 33-47.

- EBBRELL, S., WOOLLEY, N. H., TRIDIMAS, Y. D., ALLANSON, D. R., ROWE, W. B. "The effects of cutting fluid application methods on the grinding process", **International Journal of Machine Tools & Manufacture** 40 (2000) 209–223.
- GINTING, Y. R., BOSWELL, B., BISWAS, W., ISLAM, M. N., "Investigation into alternative cooling methods for achieving environmentally friendly machining process", **Procedia CIRP** 29 (2015) 645 – 650.
- GRAF, W., "**Handbook Cylindrical Grinding**", Winterthur Schleiftechnik AG, Switzerland, 2010.
- GUO, C., SHI, Z., ATTIA, H., MCINTOSH, D. "Power and Wheel Wear for Grinding Nickel Alloy with Plated CBN Wheels", **Annals of the CIRP Vol. 56/1/2007**.
- HADAD, M. "An experimental investigation of the effects of machining parameters on environmentally friendly grinding process", **Journal of Cleaner Production** 108 (2015) 217–231.
- HADAD, M., SHARBATI, A. "Thermal Aspects of Environmentally Friendly-MQL grinding Process", **Procedia CIRP** 40 (2016) 509 – 515.
- HASSUI, A., DINIZ, A. E. "Correlating surface roughness and vibration on plunge cylindrical grinding of steel", **International Journal of Machine Tools & Manufacture** 43 (2003) 855–862.
- HILDEBRANDT, R, A, Análise do comportamento do desgaste de dressadores de ponta única confeccionados com diamantes naturais e sintético piramidais. 2014. 130 f. **Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia**, 2014 pg 12.
- HOLESOVSKY, F., HRALA, M. "Integrity of ground cylindrical surfasse", **Journal of Materials Processing Technology** 153–154 (2004) 714–721.
- IRANI, R. A., BAUER, R. J., WARKENTIN, A. "A review of cutting fluid application in the grinding process", **International Journal of Machine Tools & Manufacture** 45 (2005) 1696–1705.
- JACKSON, M. J., DAVIS, C. J., HITCHINER, M. P., MILLS, P. "High-speed grinding with CBN grinding wheels - applications and future technology", **Journal of Materials Processing Technology** 110 (2001) 78–88.
- JACKSON, M. J., KHANGAR, A., CHEN, X., ROBINSON, G.M., VENKATESH, V. C., DAHOTRE, N. B. "Laser cleaning and dressing of vitrified grinding wheels", **Journal of Materials Processing Technology** 185 (2007) 17–23.

- JACKSON, M. J., MILLS, B. “Materials selection applied to vitrified alumina & CBN grinding wheels”, **Journal of Materials Processing Technology** 108 (2000) 114-124.
- KIM, H. Y., KIM, S. R., AHN, J. H., KIM, S. H., “Process monitoring of centerless grinding using acoustic emission”, **Journal of Materials Processing Technology** 111 (2001) 273-278.
- KLOCKE, F. “**Manufacturing Processes 2, Grinding, Honing, Lapping**” Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009.
- LIU, Q., CHEN, X., GINDY, N.” Robust design and optimisation of aerospace alloy grinding by different abrasive wheels”, **Int J Adv Manuf Technol** (2008) 39:1125–1135.
- MALKIN, S., GUO, C. “**Grinding Technology: Theory And Applications Of Machining With Abrasives**”, 2^a ed. Industrial Press Inc., New York, 2008.
- MARINESCU, I. D.; HITCHNER M.; UHLMANN E.; ROWE, W. B.; INASAKI, I. “**Handbook of Machining with Grinding Wheels**”, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2007.
- MARINESCU, I. D.; ROWE, W.B.; DIMITROV, B.; INASAKI, I. “**Tribology of abrasive machining processes**”. 1^aed. Norwich, William Andrew Inc, 2004.
- MARUDA, R. W., KROLCZYK, G. M., FELDSHTEIN, E., PUSAVEC, F., SZYDLOWSKI, M., LEGUTKO, S., SOBCZAK-KUPIEC, A. “A study on droplets sizes, their distribution and heat exchange for minimum quantity cooling lubrication (MQCL)”, **International Journal of Machine Tools & Manufacture** 100 (2016) 81–92.
- MOBLEY, K.R., 1999. Introduction to Vibration, Hardback.
- NÉMETH, S. NESLUSAN, M. **Vibration in grinding operations** 7th international multidisciplinary conference Baia Mare, Romania, May 17-18, 2007 ISSN-1224-3264
- NGUYEN, T.A.; BUTLER, D.L. **Simulation of precision grinding process, part 1: generation of the grinding wheel surface**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v.45, p. 1321–1328, 2005.
- OLIVEIRA, D. J., GUERMANDI, L. G., BIANCHI, E. C., DINIZ, A. E., AGUIAR, P. R., CANARIM, R. C. “Improving minimum quantity lubrication in CBN grinding using compressed air wheel cleaning”, **Journal of Materials Processing Technology** 212 (2012) 2559– 2568.
- OLIVEIRA, J. F. G., SILVA, E. J., COELHO, R. T., BROZEK, L., BOTTENE, A. C., MARCOS, G. P. “Dry grinding process with workpiece precooling”, **CIRP Annals - Manufacturing Technology** 64 (2015) 329–332.

- PUSAVEC, F., KENDA, J. “The transition to a clean, dry, and energy efficient polishing process: an innovative upgrade of abrasive flow machining for simultaneous generation of micro-geometry and polishing in the tooling industry”, **Journal of Cleaner Production** 76 (2014) 180-189.
- PUSAVEC, F., KRAMAR, D., KRAJNIK, P., KOPAC, J. “Transitioning to sustainable production – part II: evaluation of sustainable machining Technologies”, **Journal of Cleaner Production** 18 (2010) 1211–1221.
- RABIEI, F., RAHIMI, A. R., HADAD, M. J., ASHRAFIJOU, M. “Performance improvement of minimum quantity lubrication (MQL) technique in surface grinding by modeling and optimization”, **Journal of Cleaner Production** 86 (2015) 447-460.
- RASIM, M., MATTFELD, P., KLOCKE, F. “Analysis of the grain shape influence on the chip formation in grinding”, **Journal of Materials Processing Technology** 226 (2015) 60–68.
- ROWE, W. B. “**Principles of Modern Grinding Technology**”, 2^a ed., Waltham, William Andrew, 2014.
- SADEGHI, M. H., HADAD, M. J., TAWAKOLI, T., VESALI, A., VESALI, E. “An investigation on surface grinding of AISI 4140 hardened steel using minimum quantity lubrication-MQL technique”, **Int J Mater Form** (2010) 3:241–251.
- SADEGHI, M. H., HADDAD, M. J., TAWAKOLI, T., EMAMI, M. “Minimal quantity lubrication-MQL in grinding of Ti-6Al-4V titanium alloy”, **Int J Adv Manuf Technol** (2009) 44:487–500.
- SALMON, S. C. “**Modern Grinding Process Technology**”. MacGraw-Hill, 1992.
- SANCHEZ, J. A., POMBO, I., ALBERDI, R., IZQUIERDO, B., ORTEGA, N., PLAZA, S., MARTINEZ-TOLEDANO, J. “Machining evaluation of a hybrid MQL-CO₂ grinding technology”, **Journal of Cleaner Production** 18 (2010) 1840-1849.
- SHOKRANI, A., DHOKIA, V., NEWMAN, S. T. “Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids”, **International Journal of Machine Tools & Manufacture** 57 (2012) 83–101.
- SIENIAWSKI, J., NADOLNY, K. “The effect upon grinding fluid demand and workpiece quality when an innovative zonal centrifugal provision method is implemented in the surface grinding of steel CrV12”, **Journal of Cleaner Production** 113 (2016) 960-972.
- SILVA, L. R., BIANCHI, E. C., FUSSE, R. Y., CATAI, R. E., FRANÇA, T. V., AGUIAR, P. R. “Analysis of surface integrity for minimum quantity lubricant—MQL in grinding”, **International Journal of Machine Tools & Manufacture** 47 (2007) 412–418.

- SILVA, L. R., CORRÊA, E. C. S., BRANDÃO, J. R., ÁVILA, R. F. “Environmentally friendly manufacturing: Behavior analysis of minimum quantity of lubricant - MQL in grinding process”, **Journal of Cleaner Production** 2013.
- SINHA, M., SETTI, D., GHOSH, S., RAO, V. “An investigation on surface burn during grinding of Inconel 718”, **Journal of Manufacturing Processes** 21 (2016) 124–133 .
- SOKOVIC, M., MIJANOVIC, K., “Ecological aspects of the cutting fluids and its influence on quantifiable parameters of the cutting processes”, **Journal of Materials Processing Technology** 109 (2001) 181-189.
- STEPHENSON, D. J., SUN, X., ZERVOS, C. “A study on ELID ultra precision grinding of optical glass with acoustic emission”, **International Journal of Machine Tools & Manufacture** 46 (2006) 1053–1063.
- TAWAKOLI, T., AZARHOUSHANG, B. “Influence of ultrasonic vibrations on dry grinding of soft steel”, **International Journal of Machine Tools & Manufacture** 48 (2008) 1585–1591.
- TAWAKOLI, T., HADAD, M. J., SADEGHI, M. H. “Investigation on minimum quantity lubricant-MQL grinding of 100Cr6 hardened steel using different abrasive and coolant-lubricant types”, **International Journal of Machine Tools & Manufacture** 50 (2010) 698–708.
- TAWAKOLI, T., HADAD, M. J., SADEGHI, M. H., DANESHI, A., STOCKERT, S., RASIFARD, A. “An experimental investigation of the effects of workpiece and grinding parameters on minimum quantity lubrication—MQL grinding”, **International Journal of Machine Tools & Manufacture** 49 (2009) 924–932.
- TAWAKOLI, T., HADAD, M., SADEGHI, M. H., DANESHI, A., SADEGHI, B. “Minimum quantity lubrication in grinding: effects of abrasive and coolant-lubricant types”, **Journal of Cleaner Production** 19 (2011) 2088-2099.
- TAWAKOLI, T., HADAD, M., SADEGHI, M. H., DANESHI, A., SADEGHI, B., “Minimum quantity lubrication in grinding: effects of abrasive and coolant-lubricant types”, **Journal of Cleaner Production** 19 (2011) 2088-2099.
- TAWAKOLI, T., HEISEL, U., LEE, D. H., DANESHI, A. “An Experimental Investigation on the Characteristics of Cylindrical Plunge Dry Grinding with Structured CBN Wheels”, **Procedia CIRP** 1 (2012) 399 – 403.

- TAWAKOLI, T., WESTKAMPER, E., RABIEY, M., RASIFARD, A. “Influence of the type of coolant lubricant in grinding with CBN tools”, **International Journal of Machine Tools & Manufacture** 47 (2007) 734–739.
- TONSHOFF, H. K., FRIEMUTH, T., BECKER, J.C. “Process Monitoring in Grinding”, 2002.
- WALKER, T. “**The MQL Handbook – A guide to machining with Minimum Quantity Lubrication**”, Copyright © 2013 Unist, Inc. V1.0.3.
- WEBSTER, J., TRICARD, M. “**Innovations in Abrasive Products for Precision Grinding**”, 2004.
- WINTER, M., IBBOTSON, S., KARA, S., HERRMANN, C., “Life cycle assessment of cubic boron nitride grinding wheels”, **Journal of Cleaner Production** 107 (2015) 707-721.
- WINTER, M., LI, W., KARA, S., HERRMANN, C. “Determining optimal process parameters to increase the eco-efficiency of grinding processes”, **Journal of Cleaner Production** 66 (2014) 644-654.
- XUN, L., SHUANG, M., FANJUN, M. “Surface integrity of GH4169 affected by cantilever finish grinding and the application in aero-engine blades”, **Chinese Journal of Aeronautics** (2015) 28(5): 1539–1545.
- YANG, Z., YU, Z., XIE, C., HUANG, Y. “Application of Hilbert–Huang Transform to acoustic emission signal for burn feature extraction in surface grinding process”, **Measurement** 47 (2014) 14–21.
- ZHANG, Y., LI, C., JIA, D., ZHANG, D., ZHANG, X. “Experimental evaluation of MoS₂ nanoparticles in jet MQL grinding with different types of vegetable oil as base oil”, **Journal of Cleaner Production** 87 (2015) 930-940.
- ZHOU, N., PENG, R., PETTERSSON, R. “Surface integrity of 2304 duplex stainless steel after different grinding operations”, **Journal of Materials Processing Technology** 229 (2016) 294–304.