



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JULIO DE MESQUITA FILHO”
Campus de Bauru



**ANÁLISE COMPARATIVA DOS MÉTODOS MQL, MQL/ÁGUA E
CONVENCIONAL NA RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA DO AÇO ABNT 52100, COM
REBOLO DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO**

CASSIANO FERRARI

**Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da
UNESP - *Campus* de Bauru, para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Mecânica.**

BAURU - SP

2015



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JULIO DE MESQUITA FILHO”
Campus de Bauru



**ANÁLISE COMPARATIVA DOS MÉTODOS MQL, MQL/ÁGUA E
CONVENCIONAL NA RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA DO AÇO ABNT 52100, COM
REBOLO DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO**

CASSIANO FERRARI

**Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da
UNESP - *Campus* de Bauru, para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Mecânica.**

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto de Aguiar
Área de concentração: Processos de Fabricação

**BAURU - SP
2015**

Ferrari, Cassiano.

Análise comparativa dos métodos MQL, MQL/água e convencional na retificação cilíndrica do aço ABNT 52100, com rebolo de óxido de alumínio / Cassiano Ferrari, 2015
88 f.

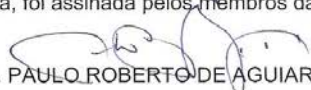
Orientador: Paulo Roberto de Aguiar

Dissertação (Mestrado)- Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2015

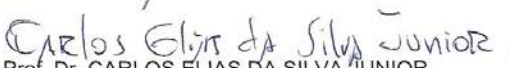
1. Retificação. 2. Mínima quantidade de lubrificante (MQL). 3. Rebolo de óxido de alumínio. 4. Aço ABNT 52100. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE CASSIANO FERRARI,
DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DO(A)
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.**

Aos 27 dias do mês de fevereiro do ano de 2015, às 14:00 horas, no(a) Anfiteatro da Seção Técnica de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia de Bauru, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. PAULO ROBERTO DE AGUIAR do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. CARLOS ELIAS DA SILVA JUNIOR do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Tecnológica Federal do Paraná, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de CASSIANO FERRARI, intitulado "ANÁLISE COMPARATIVA DOS MÉTODOS MQL, MQL/ÁGUA E CONVENCIONAL NA RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA DO AÇO ABNT 52100, COM REBOLO DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO". 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. PAULO ROBERTO DE AGUIAR


Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI


Prof. Dr. CARLOS ELIAS DA SILVA JUNIOR

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, professores e a todas as pessoas que me apoiaram.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a DEUS pela saúde, força e paciência para resolver as adversidades.

À minha mãe Izaura Efrizio Ferrari e ao meu pai Jair Ferrari *in memoriam*, por me ensinarem valores e me incentivarem na busca de novas conquistas.

À minha esposa Lilian Luisa da Silva Ferrari e à minha filha Giullia Silva Ferrari pelo amor, carinho, apoio e dedicação.

Ao meu orientador Prof. Dr. Paulo Roberto de Aguiar pela amizade, atenção, dedicação, troca de experiências, companheirismo, constante apoio e confiança em meu trabalho.

Ao Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi, pela amizade, companheirismo, atenção, dedicação, apoio e troca de experiências no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Thiago Vale França, pela participação em minha qualificação, contribuindo com valiosas sugestões construtivas para melhoria desta dissertação.

Ao Prof. Dr. Carlos Elias da Silva Júnior, pela participação da comissão examinadora da Defesa Pública desta dissertação, contribuindo significativamente para a melhoria e o refinamento deste trabalho.

Ao grande amigo Alexandre Frutuoso da Costa, pelo incentivo, companheirismo e apoio prestado no decorrer desta trajetória.

Aos professores do Senac-Bauru pelo apoio, incentivo, amizade e companheirismo.

Aos amigos Murillo Ricardo Lombardo Poletto e Hamilton Funes Junior, pelo companheirismo e apoio prestado no desenvolvimento deste trabalho.

A todos os familiares, amigos e colegas que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho.

À Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista UNESP - campus de Bauru, por gentilmente ceder os Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA) e Laboratórios de Materiais para a elaboração deste trabalho.

A empresa ITW - Chemical por fornecer os fluidos de corte utilizados neste trabalho.

A empresa INA - Schaeffler Group do Brasil Ltda., pela doação dos corpos de prova utilizados neste trabalho.

A empresa SIVAT - Abrasivos Especiais Ltda., pela doação dos rebolos utilizados neste trabalho.

RESUMO

A correção de irregularidades nas superfícies de peças metálicas pode ser realizada mediante a usinagem por abrasão, na qual, torna-se indispensável, tanto a refrigeração da superfície usinada, quanto a lubrificação no contato da ferramenta (rebolo) com a peça, visando a uma melhor qualidade final para o produto. Para tanto, deve-se buscar métodos que, quando comparados aos processos de usinagem que utilizam o sistema convencional de lubri-refrigeração (fluido abundante), apresentem melhores resultados quanto à qualidade das peças, realizando as principais funções existentes de refrigeração, lubrificação e limpeza dos cavacos da zona de corte. Um dos métodos é a Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL), que utiliza baixo fluxo de óleo a elevada pressão, diminuindo, pois, os resíduos finais do processo. Também existe outro método que consiste em adicionar água ao sistema de MQL, diminuindo ainda mais o volume de óleo no fluido de corte. Desse modo, esta dissertação apresenta como alternativa ao método convencional de lubri-refrigeração, a técnica MQL, em suas condições puro e com adição de água. Para as quais, por meio dos resultados obtidos experimentalmente no processo de retificação cilíndrica externa, foi avaliada a eficiência desses métodos em comparação ao método convencional, verificando dessa forma as melhorias nos resultados finais. Os testes foram realizados com o aço ABNT 52100 revenido e temperado. A ferramenta utilizada foi o rebolo de óxido de alumínio com ligante vitrificado, que apresenta elevada dureza, porém reduzida friabilidade; o qual é indicado para retificação cilíndrica de aços e suas ligas. Foram analisadas e avaliadas as seguintes variáveis de saída do processo de retificação: rugosidade, circularidade, desgaste diametral do rebolo, potência de corte, emissão acústica, microestrutura e microdureza. Os resultados obtidos, revelam que o menor desgaste diametral do rebolo, ocorreu na aplicação do método convencional de lubri-refrigeração, e que, utilizando as técnicas da MQL, obteve-se os menores valores de rugosidade, como também a redução no desvio de circularidade da peça, através da utilização da técnica MQL 1:5 (óleo/água), e assim como no método convencional, não houve o comprometimento da integridade da peça usinada. Portanto, as técnicas MQL apresentadas neste trabalho, mostraram-se como alternativas viáveis de usinagem quando comparadas ao método convencional de lubri-refrigeração.

Palavras-chave: retificação; Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL); lubri-refrigeração; rebolo de óxido de alumínio, aço ABNT 52100.

ABSTRACT

The correction of irregularities on the surfaces of metal workpieces can be carried out through the machining by abrasion, in which is necessary, both the cooling of the machined surface, and the lubrication in contact of the tool (grinding wheel) with the workpiece, obtaining a better final quality of the product. Thereby, we must seek methods that, when compared to the machining processes that use the conventional system of lubrication-cooling (abundant fluid), show better results in terms of quality of the workpieces, performing the main existing functions of cooling, lubrication and cleaning of the chips of the cutting zone. One of the methods is the Minimum Quantity Lubricant (MQL), which uses low oil flow to high pressure, reducing then the final waste of the process. There is also another method consisting in adding water to the MQL system, further decreasing the volume of oil in the cutting fluid. Thus, this work presents as an alternative to the conventional method of lubrication-cooling, the MQL technique, in its pure conditions and with water addition. To which, through the experimentally obtained results in the external cylindrical grinding process, the efficiency of these methods when compared to the conventional method was evaluated, verifying the improvements in the final results. The tests were performed with the steel quenched and tempered ABNT 52100. The tool used was the grinding wheel of aluminum oxide with vitrified binder, which presents high hardness, but low friability; which is suitable for cylindrical grinding of steels and alloys. The following output variables of the grinding process were analyzed and evaluated: roughness, roundness, diametrical wear of the grinding wheel, cutting power, acoustic emission, microstructure and microhardness. The obtained results show that the smaller diametrical wear of the grinding wheel occurred in the application of the conventional method of lubrication-cooling, and that, using the MQL techniques, lower roughness values were obtained, as well as the reduction in the deviation of circularity of the workpiece, by using the MQL 1:5 (oil/water) technique, and as in the conventional method, there was no compromise of the integrity of the machined workpiece. Therefore, the MQL techniques presented in this work showed to be viable alternative of machining, when compared to the conventional method of lubrication-cooling.

Keywords: *grinding; Minimum Quantity Lubricant (MQL); lubrication-cooling; grinding wheel of aluminum oxide; steel ABNT 52100.*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Objetivos	17
1.2 Justificativas	17
1.3 Estrutura do trabalho	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 Processo de retificação	19
2.2 Retificação cilíndrica externa de mergulho	19
2.3 Parâmetros do processo de retificação	20
2.3.1 Profundidade de corte (a)	21
2.3.2 Velocidade de mergulho (avanço) do rebolo (v_f).....	21
2.3.3 Velocidade de corte ou periférica do rebolo (v_s)	22
2.3.4 Velocidade periférica da peça (v_w)	22
2.3.5 Comprimento de contato (l_c).....	23
2.3.6 Diâmetro equivalente (d_e)	23
2.3.7 Taxa de remoção do material (Q_w)	24
2.3.8 Espessura de corte equivalente (h_{eq}).....	25
2.4 Ciclo da retificação cilíndrica externa de mergulho.....	25
2.5 Mecanismos de formação do cavaco na retificação	26
2.6 Rebolo.....	28
2.6.1 Rebolo de Óxido de Alumínio (Al_2O_3).....	29
2.6.2 Dressagem do rebolo.....	30
2.7 Danos térmicos no processo de retificação.....	31
2.8 Fluidos de corte	32
2.9 A técnica de refrigeração convencional (abundante)	33

2.10 A técnica da Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL)	34
2.10.1 A técnica da Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) com água	36
2.11 Variáveis de saída no processo de retificação	37
2.11.1 Rugosidade	38
2.11.2 Desvio de Circularidade	38
2.11.3 Desgaste diametral do rebolo	39
2.11.4 Emissão Acústica (EA)	39
2.11.5 Análise da Microestrutura - Microscopia Óptica	40
2.11.6 Microdureza	40
3. MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1 Equipamentos e materiais utilizados no processo	41
3.1.1 Retificadora cilíndrica externa	41
3.1.2 Corpo de prova	41
3.1.3 Mandril de fixação	42
3.1.4 Descrição do rebolo utilizado	43
3.1.5 Dressador	44
3.1.6 Sistema convencional de refrigeração	44
3.1.7 Sistema da Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL)	45
3.2 Classificação e parâmetros dos ensaios	47
3.3 Sequência de realização dos ensaios	48
3.4 Caracterização dos parâmetros de saída	50
3.4.1 Aquisição de dados	50
3.4.2 Rugosidade	50
3.4.3 Emissão acústica	51
3.4.4 Desvio de circularidade	52
3.4.5 Força tangencial de corte	52
3.4.6 Desgaste diametral do rebolo	53

3.4.7 Preparação das amostras para análise metalográfica e de microdureza	54
3.4.8 Microscopia óptica	55
3.4.9 Microdureza	56
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.1 Rugosidade.....	57
4.2 Desvio de Circularidade	60
4.3 Desgaste Diametral do Rebolo.....	63
4.4 Potência de Corte na Retificação	67
4.5 Emissão Acústica	69
4.6 Microestrutura	71
4.7 Microdureza	75
5. CONCLUSÕES	76
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Retificação Cilíndrica Externa de Mergulho	20
Figura 2	Ciclo de retificação cilíndrica de mergulho	25
Figura 3	Formação de cavaco por um grão abrasivo	27
Figura 4	Exemplo de queima de retificação do aço ABNT 52100	32
Figura 5	Conceito das gotículas de água envoltas pela película de óleo	36
Figura 6	Área de contato do cavaco na face de ataque	37
Figura 7	Fotografia de parte dos corpos de prova utilizados nos ensaios	41
Figura 8	Desenho esquemático do corpo de prova utilizado nos ensaios	42
Figura 9	Desenho do mandril para usinagem entre pontas do corpo de prova	43
Figura 10	Rebolo de Óxido de Alumínio utilizado nos ensaios	44
Figura 11	Unidade de controle do MQL	45
Figura 12	Bocal para experimentação com MQL	46
Figura 13	Sistema de ar comprimido para MQL	46
Figura 14	Matriz de ensaios	47
Figura 15	Dressador multigranular do tipo conglomerado utilizado nos ensaios	49
Figura 16	Ensaio sendo realizado	49
Figura 17	Medição de rugosidade do corpo de prova	51
Figura 18	Sensor fixo de emissão acústica, posicionado no cabeçote móvel	51
Figura 19	Medição do desvio de circularidade do corpo de prova	52
Figura 20	Processo de marcação do rebolo	53
Figura 21	Esquema ilustrativo do processo de impressão do perfil do rebolo	54
Figura 22	Amostras retiradas para a análise metalográfica e de microdureza	54
Figura 23	Desenho esquemático do embutimento do corpo de prova em resina baquelite	55
Figura 24	Representação do corpo de prova com detalhe para metodologia utilizada no ensaio de microdureza	56

Figura 25	Resultados de rugosidade para as diferentes condições de lubri-refrigeração	58
Figura 26	Resultados de desvio de circularidade para as diferentes condições de lubri-refrigeração	61
Figura 27	Micrografias que medem o desgaste do rebolo nos métodos, (a) Convencional de lubri-refrigeração, (b) MQL puro	63
Figura 28	Micrografias que medem o desgaste do rebolo nos métodos, (c) MQL 1:1, (d) MQL 1:3, (e) MQL 1:5	64
Figura 29	Resultados de desgaste diametral do rebolo para as diferentes condições de lubri-refrigeração	65
Figura 30	Resultados de potência de corte na retificação para as diferentes condições de lubri-refrigeração	67
Figura 31	Resultados de emissão acústica para as diferentes condições de lubri-refrigeração	69
Figura 32	Metalografia de corpos de prova - Método convencional de lubri-refrigeração	72
Figura 33	Metalografia de corpos de prova - Método MQL puro	72
Figura 34	Metalografia de corpos de prova - Método MQL 1:1	73
Figura 35	Metalografia de corpos de prova - Método MQL 1:3	73
Figura 36	Metalografia de corpos de prova - Método MQL 1:5	74
Figura 37	Resultados de microdureza para as amostras estudadas	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Composição química média do aço ABNT 52100	42
Tabela 2	Parâmetros de entrada	48
Tabela 3	Valor P com $\alpha = 0,05$ para rugosidade	58
Tabela 4	Teste de Tukey para a rugosidade entre os métodos	59
Tabela 5	Valor P com $\alpha = 0,05$ para o desvio de circularidade	61
Tabela 6	Teste de Tukey para o desvio de circularidade entre os métodos	62
Tabela 7	Teste de Tukey para o desgaste diametral do rebolo entre os métodos	65
Tabela 8	Teste de Tukey para a potência de corte na retificação entre os métodos	68
Tabela 9	Teste de Tukey para a emissão acústica entre os métodos	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

a	Profundidade de corte	[mm]
a _d	Profundidade de dressagem	[mm]
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio	
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas	
b	Largura de retificação	[mm]
b _w	Largura do corpo de prova	[mm]
b _s	Largura do rebolo	[mm]
CBN	Nitreto de Boro Cúbico	
CNC	Comando Numérico Computadorizado	
d _e	Diâmetro equivalente	[mm]
d _s	Diâmetro do rebolo	[mm]
d _w	Diâmetro da peça	[mm]
EA	Emissão Acústica	[V]
f _n	Força normal de corte	[N]
f _t	Força tangencial de corte	[N]
G	Relação G	[-]
h _{eq}	Espessura equivalente de corte	[μm]
HK	Micro-dureza Knoop	[kgf/mm ²]
HR _c	Dureza Rockwell C	[kgf/mm ²]
HV	Dureza Vickers	[kgf/mm ²]
LADAPS	Laboratório de Aquisição de Dados e Processamento de Sinais	
l _c	Comprimento de contato	[mm]
LUA	Laboratório de Usinagem por Abrasão	
mV	Milivolts	
MQL	Mínima Quantidade de Lubrificante	

n_s	Rotação do rebolo	[rpm]
n_w	Rotação da peça	[rpm]
P_{elet}	Potência elétrica	[W]
Q_w	Taxa de remoção de material	[mm ³ /min]
Q_w'	Taxa de remoção específica de material	[mm ³ /mm.min]
R_a	Rugosidade média	[μm]
t_{so}	Tempo de centelhamento	[s]
v_d	Velocidade de dressagem	[mm/min]
v_f	Velocidade de mergulho (avanço) do rebolo	[mm/min]
v_s	Velocidade de corte ou periférica do rebolo	[m/s]
v_w	Velocidade periférica da peça	[m/s]
Z_w	Volume de rebolo gasto	[mm ³]
Z_s	Volume de material removido	[mm ³]

1 INTRODUÇÃO

A retificação é um processo de usinagem de grande importância para as indústrias em geral, pois o seu emprego tem como objetivo a obtenção de peças com extrema precisão dimensional e excelente acabamento superficial (MALKIN, 2008).

No processo de retificação, a interação entre o abrasivo e a peça usinada é intensa e gera grande quantidade de calor, o que pode provocar danos térmicos à peça, como: trincas, queima superficial, mudanças micro estruturais e aparecimento de tensões residuais (MARINESCU *et al.*, 2004).

Objetivando evitar e/ou minimizar os efeitos provocados pelo excesso de calor na região de corte, tem-se como recurso a aplicação de fluidos de corte, que tem como função lubrificar, refrigerar, transportar cavacos, limpar o rebolo, dentre outras atribuições, resultando, em muitas ocasiões, no aumento da vida útil da ferramenta (rebolo) e em uma melhor qualidade da peça usinada (WEBSTER & LIU, 1995 e DINIZ *et al.*, 2008).

De acordo com Gonçalves (2008), vários estudos e pesquisas foram realizados visando desenvolver novas tecnologias para a redução da utilização e consumo desses fluidos de corte, devido ao seu alto custo, considerando a aquisição, manuseio, manutenção e descarte; além dos danos à saúde dos operadores, como doenças de origem dermatológica e pulmonar, assim como a poluição do meio ambiente.

Para Alves *et al.* (2011), a utilização em massa dos fluidos de corte tende a diminuir com o passar do tempo. Contudo, Sadeghi *et al.* (2009) mostraram que a redução no uso de fluidos de corte gera dificuldade em manter os poros do rebolo limpos, favorecendo a tendência de entupimento, decrescendo assim a potencialidade de corte dos rebolos.

Silva *et al.* (2007) e Tawakoli *et al.* (2010) estudaram a aplicação da técnica MQL na retificação cilíndrica do aço DIN 100Cr6 usando o rebolo de alumina, e os resultados mostraram um melhor desempenho em relação ao método de lubri-refrigeração convencional.

O sistema de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) funciona por meio de um jato de ar pressurizado que impacta em uma gota de óleo e a fragmenta, formando uma mistura de ar pressurizado e micro gotas de óleo, denominado spray. A quantidade de óleo diluído no spray é a mínima necessária para lubrificar a região de corte, melhorando as propriedades tribológicas da região. Essa é a razão do emprego do termo “Mínima Quantidade de Lubrificante”, em que qualquer quantidade acima do necessário para lubrificação da região significa desperdício de óleo (BIELOMATIK, 2012 ; LUBRIX, 2012).

A técnica de Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL) mistura ar e óleo, onde o ar refrigera a peça/ferramenta e o óleo a lubrifica, reduzindo desta maneira a potência de retificação e o desgaste do rebolo. O sistema MQL é um método intermediário entre a usinagem a seco e o método convencional de lubri-refrigeração (HAFENBRAEDL & MALKIN, 2001 e HEISEL *et al.*, 1998).

De acordo com Silva *et al.* (2013), a usinagem com a MQL têm chamado a atenção de pesquisadores e técnicos na área de usinagem como alternativa aos fluidos tradicionais. O sistema MQL baseia-se no princípio do uso de um baixo fluxo de fluido de corte, misturado ao ar comprimido em elevadas pressões.

A técnica MQL pode ser utilizada com o lubrificante diluído em água, diminuindo o volume de óleo aplicado e aumentando o poder de refrigeração. A adição de água pode ser feita em diversas proporções e dependendo da mistura pode melhorar a refrigeração e a lubrificação durante o processo de retificação.

1.1 Objetivos

Avaliar a eficiência dos métodos de lubri-refrigeração MQL puro e com adição de água e compará-las com o método convencional (fluido abundante) no processo de retificação cilíndrica externa do aço ABNT 52100, com rebolo vitrificado convencional de óxido de alumínio. Para isso, os resultados obtidos foram analisados de acordo com as variáveis de saída do processo de retificação, como, rugosidade, desvio de circularidade, desgaste diametral do rebolo, potência de corte na retificação, emissão acústica, microestrutura e microdureza, verificando desta maneira as possíveis melhoras nos resultados finais.

1.2 Justificativas

A importância fundamental da utilização do fluido de corte no processo de retificação, nasce do fato de ser esse um processo que gera uma grande quantidade de calor entre a ferramenta abrasiva e a peça, de forma que esses fluidos atuam na remoção de parte do calor gerado e na refrigeração e lubrificação da área de contato entre a peça e a ferramenta, garantindo assim, uma melhor qualidade e acabamento das peças produzidas.

Existe a preocupação ocupacional e ambiental com o uso dos fluidos de corte, pois são tóxicos aos operadores das máquinas e impactam o meio ambiente.

O uso desses fluidos em abundância também apresenta um elevado custo de manufatura, tendo em vista a grande quantidade necessária para a usinagem, manutenções do sistema e descarte ecológico.

Portanto, esta dissertação visa aprimorar o desenvolvimento tecnológico da Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) na retificação cilíndrica externa de mergulho, por meio da adição de água à MQL, sendo essa uma contribuição inovadora do presente trabalho.

Também, visa-se a uma redução dos insumos de retificação, os quais são prejudiciais ao meio ambiente e ao operador da máquina, além de possibilitar a redução de custos ao processo de fabricação, tornando a manufatura mais competitiva no mercado.

Essa forma inovadora de lubri-refrigeração estudada nesta dissertação, apresenta um vasto campo de pesquisa, uma vez que existem poucos trabalhos publicados na literatura relacionados ao processo de retificação.

1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está dividido em capítulos, conforme descrito abaixo:

O capítulo 1 apresenta a introdução sobre o processo de retificação e a utilização de fluido de corte, assim como os objetivos e as justificativas para a realização desta dissertação.

No capítulo 2 encontra-se a revisão bibliográfica do assunto com a abordagem e desmembramento dos principais tópicos e itens relacionados à retificação cilíndrica e seus parâmetros de processo e sistemas de lubri-refrigeração.

A metodologia empregada, bem como os materiais e equipamentos utilizados encontram-se no capítulo 3.

O capítulo 4 apresenta os resultados e discussões referentes às abordagens deste trabalho.

No capítulo 5 apresentam-se as conclusões obtidas mediante a análise comparativa dos resultados.

Na sequência apresentam-se as sugestões para trabalhos futuros.

Ao final desta dissertação, encontra-se as referências bibliográficas que foram utilizadas para a elaboração deste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica aqui apresentada compreende os principais assuntos discutidos nesta dissertação, como a retificação cilíndrica externa de mergulho e os seus principais parâmetros de processo, fluidos de corte, método convencional de lubri-refrigeração, a técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) puro e com adição de água, utilização de rebolo de óxido de alumínio e as variáveis de saída do processo de retificação.

2.1 Processo de retificação

O processo de retificação ocorre devido à remoção de material através da ação de grãos abrasivos, que apresentam arestas com formas e orientação irregulares e possuem elevada dureza (MACHADO *et al.*, 2009).

A retificação é um processo de acabamento e precisão dimensional, para o qual erros resultam em elevado custo, devido ao alto valor agregado da peça até esta etapa. Diferente dos processos nos quais se utilizam ferramentas de geometria definida, como torneamento e fresamento, na retificação, os abrasivos têm arestas de corte irregulares (ANDERSON *et al.*, 2008 e REN *et al.*, 2009).

Devido à complexidade da interação entre o grão abrasivo e a peça, nos últimos anos, o processo de retificação vem sendo pesquisado e estudado, na busca constante de uma melhor compreensão dos diversos fatores que envolvem o rebolo, a peça, tipos de fluidos de corte, a máquina-ferramenta e os parâmetros do processo. Essa complexidade se dá devido ao desgaste e fratura das partículas abrasivas, à grande quantidade de arestas de corte e à contínua alteração da geometria, bem como à aleatoriedade dos formatos das arestas de corte durante a retificação (NGUYEN & BUTLER, 2005).

2.2 Retificação cilíndrica externa de mergulho

Para facilitar a comparação das grandezas entre processos com geometrias distintas, necessitou-se estabelecer certos parâmetros, obtidos, na maioria das vezes, por meio da operação de retificação plana, por ser melhor compreendida que a cilíndrica (HASSUI, 2002).

De acordo com Diniz *et al.* (2008), na retificação cilíndrica externa de mergulho, o rebolo avança perpendicularmente à superfície retificada. Normalmente o rebolo é mais largo que a espessura da peça, possibilitando a retificação de várias superfícies simultaneamente,

mediante a montagem de diversos rebolos ou até mesmo a retificação de perfis, obtidos através de afiação do adequado perfil de reboło.

2.3 Parâmetros do processo de retificação

Os parâmetros apresentados na sequência são de grande importância, pois facilitam a comparação de grandezas entre os processos com geometrias diferentes e também melhoram a compreensão de alguns fenômenos no processo de retificação.

A figura 1 esquematiza a operação de retificação cilíndrica externa de mergulho com a indicação dos principais parâmetros envolvidos no processo, sendo esses:

- a - profundidade de corte;
- d_s - diâmetro do reboło;
- d_w - diâmetro da peça;
- f_n - força normal de corte;
- f_t - força tangencial de corte;
- v_f - velocidade de mergulho (avanço) do reboło;
- v_s - velocidade de corte ou periférica do reboło;
- v_w - velocidade periférica da peça;
- n_s - rotação do Reboło;
- n_w - rotação da Peça.

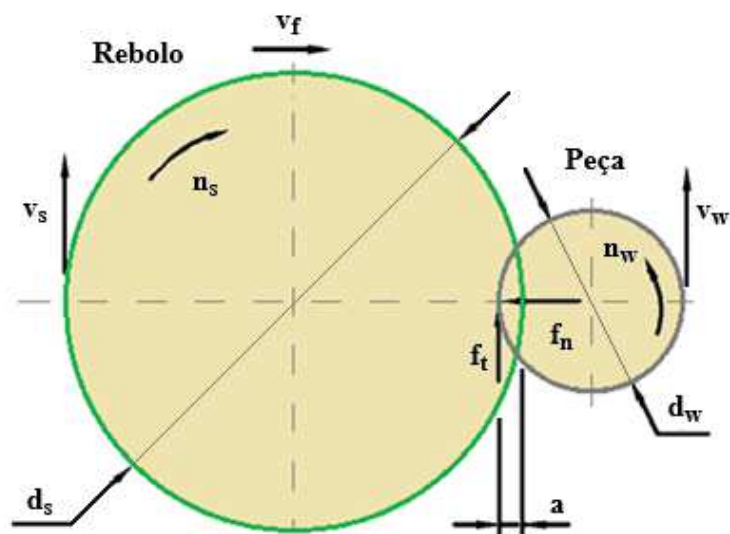


Figura 1 - Retificação Cilíndrica Externa de Mergulho (MALKIN 1989, Modificado).

2.3.1 Profundidade de corte (a)

Segundo Diniz *et al.* (2008) a profundidade de corte (a) está amplamente relacionada com a espessura equivalente de corte (h_{eq}), em que (a) é proporcional a (h_{eq}), ou seja, o aumento da profundidade (a) resulta no aumento da espessura (h_{eq}), provocando dessa maneira um desgaste maior do rebolo e um aumento da rugosidade e dos esforços de corte.

O aumento na profundidade de corte provoca um aumento no número de grãos ativos e no tempo de contato entre a peça e o rebolo, fazendo com que cada grão abrasivo remova uma quantidade menor de material, elevando dessa maneira a temperatura durante o processo (BIANCHI *et al.*, 1996).

De acordo com Malkin (1989), é denominada (a) a profundidade que o rebolo entra na peça com uma determinada velocidade (v_f) durante uma revolução (volta) completa da peça, sendo determinada pela equação (1).

$$a = \frac{\pi \cdot d_w \cdot v_f}{v_w} \quad (1)$$

Conforme Rowe & Morgan (1993) a profundidade de corte (a) pode influenciar também na integridade superficial dos componentes retificados. Marinescu *et al.* (2004) relatam que no contato entre o rebolo e a peça ocorre a deformação de ambos, juntamente com a estrutura da máquina. Dessa maneira, devido às deflexões térmicas, mecânicas e ao desgaste do rebolo, o valor real da profundidade de corte (a) é menor do que o calculado com velocidade de avanço (v_f), porém se torna constante e estabilizado após determinado tempo de avanço.

2.3.2 Velocidade de mergulho (avanço) do rebolo (v_f)

Segundo Baldo (1994) a velocidade de mergulho (v_f) é definida como a velocidade de avanço do rebolo em relação à peça e deve estar entre 0,4 a 2,0 mm/min. durante o desbaste que ocorre no início do processo de retificação, quando cerca de 95% de material da peça é removido.

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

Para o acabamento, a velocidade de mergulho (v_f) deve estar entre 0,1 a 0,3 mm/min. Ressaltando que com o aumento da (v_f) a força tangencial de corte (f_t) se eleva.

2.3.3 Velocidade de corte ou periférica do rebolo (v_s)

Segundo Winter (2004), o deslocamento de um ponto na superfície de corte do rebolo em um determinado espaço de tempo é denominado velocidade de corte ou velocidade periférica do rebolo (v_s). A velocidade de corte determina a vida útil do rebolo, alterando a capacidade de remoção de grãos abrasivos e influenciando no acabamento superficial das peças, rugosidade, queima superficial da peça, tensão residual, vibrações da máquina, etc.

A equação (2) segundo Graf (2010), apresenta a velocidade de corte ou velocidade periférica em m/s.

$$v_s = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60 \cdot 1000} \quad (2)$$

De acordo com Jackson *et al.* (2000), o aumento na velocidade do rebolo, melhora a qualidade final da peça e diminui o desgaste da ferramenta abrasiva, porém gera um aumento de calor.

Para Bianchi *et al.* (1996), um único grão abrasivo passa a remover um menor volume de cavaco quando a velocidade de corte é aumentada. Isso ocorre devido a uma maior frequência de contato do rebolo com a peça, obtendo, dessa maneira, mediante a velocidade de corte constante, uma menor espessura dos cavacos removidos. Isso reduz, por exemplo, as forças de corte, em função da menor solicitação de cada grão abrasivo, aumentando a dureza dinâmica do rebolo. Contudo, a temperatura se eleva e ocorre um aumento da potência de corte consumida.

2.3.4 Velocidade periférica da peça (v_w)

Na retificação cilíndrica, segundo Graf (2004), a velocidade da peça (v_w), pode ser determinada em função do diâmetro da peça (d_w) e da rotação (n_w), conforme a equação (3).

$$v_w = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_w}{60 \cdot 1000} \quad (3)$$

De acordo com Graf (2004), a taxa de remoção de material se eleva com o aumento da velocidade da peça (v_w), gerando cavacos mais espessos e aumentando a carga sobre cada grão, obtendo assim, valores mais elevados de força tangencial de corte.

2.3.5 Comprimento de contato (l_c)

Representa a extensão de contato entre o rebolo e a peça durante a operação de retificação, podendo ser calculado considerando apenas a geometria dos elementos em contato (MARINESCU *et al.*, 2007).

Malkin (1989) fez um equacionamento do comprimento de contato, desprezando as deformações e movimentos envolvidos no processo, conforme demonstrado na equação (4).

$$l_c = \sqrt{a \cdot d_e} \quad (4)$$

Onde:

- d_e = diâmetro equivalente (mm).

A equação (4) não considera os movimentos e deformações envolvidas e por isso ela descreve uma aparente área de contato entre a peça e o rebolo e, com isso, esse parâmetro pode ser descrito como comprimento de contato estático (MALKIN, 1989).

2.3.6 Diâmetro equivalente (d_e)

Segundo King e Hahn (1992) o diâmetro equivalente (d_e) estabelece que a diferença de curvatura entre a peça e o rebolo influencia no comprimento de contato.

Para Guo e Malkin (2000) a diferença de curvatura entre a retificação cilíndrica externa e interna pode ser relacionada com a retificação plana através do diâmetro equivalente (d_e) apresentado na equação (5):

$$d_e = \frac{d_s}{1 \pm \frac{d_s}{d_w}} \quad (5)$$

Na equação (5) a retificação cilíndrica externa é representada pelo sinal (+) e o sinal (−) representa a retificação cilíndrica interna.

2.3.7 Taxa de remoção do material (Q_w)

A taxa de remoção do material ocorre quando cada grão abrasivo do rebolo penetra na peça e remove o material que está em sua trajetória, e segundo Chen *et al.* (2002) essa remoção de material acontece em três estágios: escorregamento, deformação plástica e corte.

A taxa de remoção de material (Q_w) é um parâmetro determinado pela profundidade de corte (a), pela velocidade relativa entre a peça e o rebolo (v_w) e pela largura de retificação (b). (MALKIN, 1989).

A equação (6) segundo Demirci *et. al.* (2007) demonstra este parâmetro.

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

Onde:

- Q_w = Taxa de remoção de material em (mm^3/min).
- b = Largura de retificação em (mm).

Também segundo Malkin (1989), conforme apresenta a equação (7), pode-se obter a taxa de remoção específica de material ($Q_{w'}$) dividindo a taxa de remoção de material (Q_w) pela largura de retificação (b).

$$Q_{w'} = a.v_w = \pi.d_w.v_f \quad (7)$$

Onde:

- $Q_{w'}$ = Taxa específica de remoção de material em ($\text{mm}^3/\text{mm.min}$).

Com base na taxa de remoção específica de material $Q_{w'}$ pode-se avaliar a produtividade de um processo de retificação, pois $Q_{w'}/v_s$ corresponde à espessura equivalente de corte h_{eq} apresentada na equação (8), que, por sua vez, está diretamente relacionada ao comportamento do processo de retificação em função das variáveis envolvidas como, força de corte, rugosidade, topografia da ferramenta, entre outras (MALKIN, 2008).

2.3.8 Espessura de corte equivalente (h_{eq})

Segundo Malkin (2008) a espessura equivalente de corte é definida como a relação entre a taxa de remoção específica de material, a velocidade de movimento relativo da peça e a velocidade de corte (velocidade periférica do rebolo). Para a retificação cilíndrica, essa relação é dada na equação (8):

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

Para Marinescu *et al.* (2004), a espessura equivalente de corte (h_{eq}) não leva em consideração o espaçamento dos grãos do rebolo, porém, engloba três importantes características do processo, como velocidade do rebolo (v_s), velocidade de mergulho do rebolo (v_f) e diâmetro da peça (d_w).

2.4 Ciclo da retificação cilíndrica externa de mergulho

De acordo com Soares e Oliveira (2002), o ciclo do processo de retificação é definido como o conjunto de etapas que ocorrem em uma operação, desde a colocação da peça na máquina até a saída desta dentro de especificações pré-determinadas. Soares e Oliveira (2002) demonstram na figura 2, o ciclo de retificação e suas respectivas etapas:

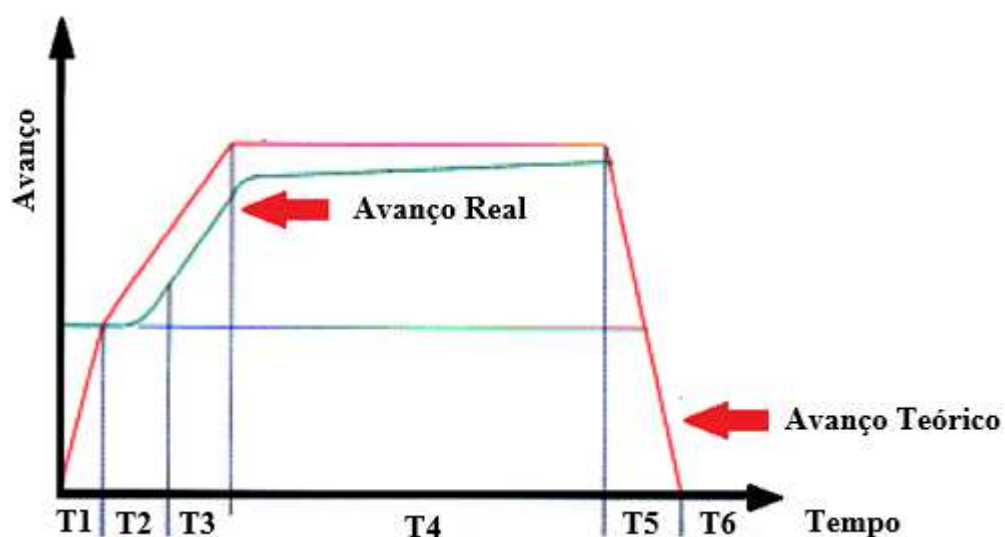


Figura 2 - Ciclo de retificação cilíndrica de mergulho
(Adaptada de SOARES & OLIVEIRA, 2002).

Os intervalos indicados na figura 2 estão detalhados na sequência, onde:

- **T1:** Indica a aproximação do rebolo em direção a peça, sem remoção de material.
- **T2:** Representa o início do contato entre o rebolo e a peça, proporcionando deformações elásticas em ambos e também na máquina, atrasando a posição real do rebolo em relação a posição indicada pelo comando da máquina. Inicia-se também nesta fase a formação de cavaco.
- **T3:** Indica o momento em que se atinge a profundidade de corte estabelecida para um ciclo de retificação.
- **T4:** Representa o (spark out), ou período de centelhamento, quando não há avanço do rebolo, permitindo, dessa forma, eliminar as deformações adquiridas durante o período T2. Esse tempo é crucial dentro de um ciclo de retificação, pois é o momento em que se obtêm as tolerâncias dimensionais e geométricas com valores de rugosidade superficial reduzidos.
- **T5:** Indica o recuo do rebolo, permitindo a retirada da peça usinada e a colocação de outra peça a ser trabalhada.
- **T6:** Representa o momento para a troca da peça e possível dressagem.

2.5 Mecanismos de formação do cavaco na retificação

De acordo com Malkin (1989) o contato dos grãos abrasivos com a peça resulta na remoção de material durante a operação de retificação, formando dessa maneira cavacos por cisalhamento.

Em relação a remoção de material um parâmetro muito importante é a relação “G” que é uma medida de quanto volume de material é removido da peça por unidade de volume de rebolo gasto, essa relação mede a eficiência do rebolo em contraposição ao desgaste (KRUEGER *et al.*, 2000).

A relação “G” de acordo com Marinescu *et al.* (2007), está representada equação (9):

$$G = \frac{Z_w}{Z_s} \quad (9)$$

Onde:

- Z_w = volume de material removido (mm^3);
- Z_s = volume de rebolo gasto (mm^3).

Para que esta remoção de material ocorra são necessárias três fases, demonstradas na figura 3:

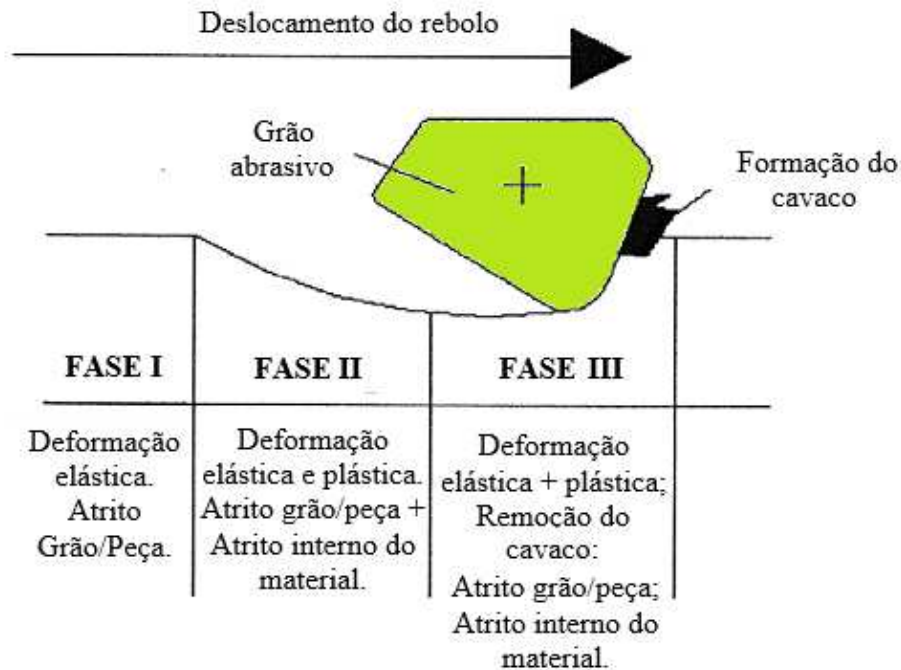


Figura 3 - Formação de cavaco por um grão abrasivo (MALKIN 1989, modificada).

- **Fase 1:** Nesta fase ocorre o primeiro contato entre grão abrasivo e peça, ocasionando apenas à deformação elástica do material da peça, onde a energia fornecida ao processo é consumida pelo atrito, calor e deformações.
- **Fase 2:** Nesta etapa os grãos abrasivos continuam penetrando na peça, proporcionando deformações plásticas, escoamento lateral e recuperação das deformações elásticas ocorridas no estágio anterior. A maior penetração dos grãos implica em maiores forças de atrito entre peça e rebolo, onde grande parte da energia continua sendo dissipada por deformações, atrito e calor.
- **Fase 3:** Neste momento a aresta de corte atinge um valor de penetração crítico, iniciando a formação de cavaco, onde grande parte da energia passa a ser consumida no cisalhamento do material.

Segundo Alfares & Elsharkawy (2009), na retificação, além do corte, existem outras situações que produzem forças no grão, tais como: o escorregamento do grão, quando a peça e o próprio grão se deformam elasticamente e a deformação plástica, quando a tensão entre o grão e a peça aumenta, promovendo, assim, o escoamento do material.

2.6 Rebolo

Os rebolos, caracterizam-se por possuírem um grande número de grãos abrasivos ligados por uma matriz aglomerante e porosidade necessária para acomodar os cavacos e transportar os fluidos. Cada um destes grãos abrasivos são arestas cortantes com geometrias indefinidas que promovem a remoção do material de maneira simultânea (MALKIN, 1989).

Segundo Cai e Rowe (2004), citados por Webster e Tricard (2004), tal ferramenta engloba quatro partes fundamentais:

- Grãos (convencionais ou superabrasivos);
- Ligantes (unem e suportam todos os abrasivos);
- Porosidade (acomodam os cavacos gerados e transportam os fluidos);
- Design (perfil do rebolo, camada de abrasivo, material do corpo, resistência à força rotacional, precisão e resistência ao ataque químico).

Para Shaw (1996) os grãos abrasivos, empregados na retificação, são partículas refratárias duras e frágeis, podendo ser classificadas de acordo com sua dureza ou composição química.

Segundo Malkin (1989) o rebolo é constituído por grãos abrasivos, aglomerantes e porosidade, formando assim um sistema trifásico. O desempenho do rebolo, segundo o mesmo autor, está relacionado ao tipo e ao tamanho do grão abrasivo, às propriedades abrasivas do material aglomerante e à porosidade do conjunto.

De acordo com Marinescu *et al.* (2004) o grão abrasivo pode ser escolhido baseando-se nos testes de durabilidade envolvendo resistência a fadiga de compressão e ao impacto, resistência ao lascamento e friabilidade dinâmica, os quais ocorrem sob a influência de tensão térmica.

Para Malkin (1989) uma característica importante de um abrasivo é que seja mais duro do que o material a ser retificado, e, geralmente, esta dureza é definida em termos de resistência a indentação estática, cuja mensuração é realizada mediante a realização do teste de dureza Knoop, que consiste em fazer uma microindentação na amostra com uma ponta de diamante lapidada na forma piramidal sob cargas que podem variar de 25 a 300 gramas.

O valor da dureza Knoop é feito medindo a diagonal da marca produzida pelo diamante e relacionando-a com a carga utilizada (STEMMER, 1992).

A friabilidade (capacidade do grão abrasivo gerar arestas de corte quando submetido aos esforços de corte) é uma característica essencial para avaliação de um abrasivo, ou seja, é a tendência da desintegração do grão. A friabilidade é uma função da forma, integridade e pureza do cristal que forma o grão (MARINESCU *et al.*, 2004).

O desgaste do rebolo está associado à falha de seus componentes sob certas condições e está dividido em três regimes:

- Atrito, devido à força normal e tangencial e ao aumento de energia;
- Fratura do grão;
- Fratura do ligante, relacionada à auto-afiação da ferramenta abrasiva.

Desse modo, o desempenho do rebolo está relacionado ao tipo e ao tamanho do grão abrasivo, às propriedades abrasivas do material aglomerante e à porosidade existente na matriz aglomerante, sendo a porosidade de vital importância no desempenho do rebolo, pois acomoda e posteriormente expulsa o cavaco da zona de corte (HASSUI, 2002).

Ainda, segundo Hassui (2002), as ferramentas abrasivas são utilizadas em processos que demandam superfícies de alta qualidade e precisão, com estreitas faixas de tolerâncias geométricas e dimensionais, bem como, baixos índices de rugosidade e circularidade.

2.6.1 Rebolo de Óxido de Alumínio (Al_2O_3)

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

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

Os abrasivos artificiais possuem vantagens em relação aos abrasivos naturais, pois, eliminam as impurezas e inconsistências presentes nos abrasivos naturais, e sua produção pode ser cuidadosamente controlada (KRAR, 1994).

O óxido de alumínio possui uma estrutura cristalina muito grande e um grão abrasivo contém até três cristais, somente. Dessa forma, quando ocorre a fratura do grão, o resultado pode ser a sua perda total, gerando, assim, baixa eficiência no processo (MARINESCU, 2007).

Segundo Jackson e Mills (2000), os grãos de óxido de alumínio podem ser classificados em categorias de acordo com sua composição química, sendo elas: alumina, alumina semi-friável, alumina branca, alumina rosa e sol-gel.

Malkin (1989) afirma que quando se utiliza rebolo convencional, como o de óxido de alumínio, uma relação “G” elevada pode provocar maiores esforços, conduzindo a uma geração excessiva de energia térmica na região de corte. No entanto, com a aplicação eficiente de fluido de corte, os esforços e as temperaturas envolvidas podem diminuir, possibilitando a ampliação dessa relação “G”.

2.6.2 Dressagem do rebolo

De acordo com Jackson *et al.* (2007), somente 10% do rebolo é gasto no processo de usinagem, e cerca de 90% do rebolo é consumido com a dressagem, operação de afiação que gera uma superfície particular na superfície de corte do rebolo. O que é de fundamental importância, pois durante o processo de retificação ocorre o arredondamento das arestas cortantes das partículas abrasivas do rebolo e, também, o empastamento da ferramenta abrasiva, cujos poros ficam impregnados de cavacos do material que foi retificado, deixando o rebolo com menor poder de corte, prejudicando a qualidade final da peça retificada.

Os parâmetros relacionados às arestas de corte e suas distribuições, como afiação, largura e densidade, decorrem das propriedades estáticas mais importantes da topografia do rebolo, sendo o número de arestas de corte ativas por unidade de área da superfície do rebolo conhecido como densidade de arestas (SALEH *et al.*, 2009).

A topografia do rebolo influencia na geometria do cavaco produzido e no processo de retificação, sendo esta topografia geralmente caracterizada pelo número de arestas de corte. Portanto, realiza-se a operação de dressagem para recuperar a topografia do rebolo obtendo, dessa maneira, uma nova superfície ativa de corte (CHEN *et al.*, 1990).

2.7 Danos térmicos no processo de retificação

De acordo com Malkin (1989), o calor que se concentra na zona de corte, no processo de retificação, é proveniente da alta quantidade de energia por volume de material removido e pode comprometer a integridade superficial de uma peça retificada por meio de danos de origem térmica como: queima superficial, tensões residuais de tração, transformação de fase, redução na resistência a fadiga, nucleação, propagação de trincas, retêmpera, super-revenimento, etc.

Dentre os danos térmicos mais comuns à integridade superficial da peça retificada, destaca-se a queima superficial, que pode ser observada por tons azulados na superfície da peça. Isso ocorre devido à formação de uma camada de óxido, que é responsável pelo aumento da potência e força de corte, com o consequente aumento do desgaste do rebolo. Tanto a cor azulada como a espessura da camada de óxido dependem do tempo, temperatura e oxigênio presentes no ambiente de retificação. Todavia, devido à eliminação do oxigênio, com elevadas pressões e vazões dos fluidos de corte, a queima pode não ser caracterizada pelos tons azulados na superfície da peça (SHAW, 1996).

Segundo Silva *et al.* (2007), os fenômenos de aquecimento (durante a remoção do material) e resfriamento (provocado pelo fluido de corte) podem induzir transformações micro estruturais na superfície do material, provocando a perda das características mecânicas obtidas no processo de fabricação anterior.

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

Segundo Marinescu *et al.* (2004) durante a retificação, pode-se atingir em algumas situações, temperaturas superiores a de austenitização do material, e um rápido resfriamento pode promover uma nova tempera à superfície retificada. Devido a sua coloração clara quando vista ao microscópio um termo utilizado para sua denominação é queima branca, sendo esta muito prejudicial a integridade da peça, pois a superfície endurecida torna-se extremamente frágil, além de serem verificadas tensões residuais de tração que tornam o material suscetível a trincas, reduzindo consideravelmente a resistência ao desgaste e a fadiga da peça.

Essa camada retemperada normalmente possui uma pequena espessura seguida de uma região com perda de dureza, denominada queima escura. A queima escura não indica transformações microestruturais, porém, quando a martensita sofre este super-revenimento há uma diminuição da dureza. A profundidade de ocorrência da queima escura não é superior a 100 μm (MARINESCU *et al.* 2004).

A figura 4 apresenta um exemplo de queima branca seguida de queima escura do aço ABNT 52100 após a retificação com abrasivo convencional, no qual, 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 (OLIVEIRA *et al.* 2012).



Figura 4 - Exemplo de queima de retificação (aço ABNT 52100 apresentando queimas após a retificação com abrasivo convencional (1000 X)).

2.8 Fluidos de corte

A utilização de fluido de corte no processo de retificação possibilita aumentar a produtividade por meio de maiores velocidades e taxas de remoção, reduzindo, assim, os custos de fabricação. É de fundamental importância a escolha e utilização do fluido de corte adequado ao material e à ferramenta abrasiva, uma vez que esse fluido tende a prolongar a vida útil da ferramenta, reduzir os valores de rugosidade, diminuir as forças de corte, e elevar o grau de precisão da peça, diminuindo os erros dimensionais e geométricos (SOKOVIC & MIJANOVIC, 2001).

No processo de retificação, a refrigeração e a lubrificação são essenciais, uma vez que há grande geração de calor, o que prejudica a qualidade superficial e promove perdas dimensionais e geométricas na peça. Dessa maneira, os fluidos de corte, além de promover a refrigeração e a lubrificação na retificação, possuem propriedades anticorrosivas que preservam a peça e a máquina-ferramenta da oxidação. Além disso, também transportam os cavacos gerados e promovem a limpeza do rebolo (TAWAKOLI *et al.*, 2007).

De acordo com Malkin & Guo (2007), para a remoção de material no processo de retificação, é requerido um alto consumo de energia e, teoricamente, toda essa energia é dissipada como calor na região de corte onde o rebolo interage com a peça, conduzindo à geração de altas temperaturas que podem causar vários tipos de danos térmicos, tais como: queima da peça, transformação de fase da estrutura, alteração da dureza superficial, tensão residual superficial desfavorável, trincas na peça e no rebolo e redução da resistência à fadiga.

Segundo Stanford & Lister (2002), o uso de fluidos de corte tem sido questionado devido aos danos que podem causar à saúde dos trabalhadores e aos impactos que causam ao meio ambiente. Com o surgimento de leis trabalhistas e ambientais, as empresas estão buscando reduzir seu consumo de fluidos de corte, além de adotar métodos eficazes de reciclagem desses fluidos, ou mesmo, sua remoção completa dos processos de usinagem.

Tem-se que lembrar que a troca, ou otimização do uso do fluido de corte tem que atender aos requisitos de qualidade da peça. Contudo, a higiene ocupacional e ambiental, com a racionalização de uma forma de uso menos agressiva aos trabalhadores e ao meio ambiente, deve ser observada.

2.9 A técnica de refrigeração convencional (abundante)

Para Brinksmeier *et al.* (1999), grandes quantidades de fluido de corte são aplicadas no processo de retificação com o objetivo de reduzir as altas temperaturas oriundas do processo. Quando se aplica fluido de corte no processo de retificação, o tipo de refrigerante, sua composição, vazão, posição do bocal e seu design são parâmetros que influenciam na produtividade, qualidade da peça e desgaste do rebolo.

Irani *et al.* (2005) apresentaram um estudo sobre a aplicação de fluidos de corte, em que o projeto e o posicionamento do bocal aplicador, assim como a velocidade de aplicação do fluido foram considerados relevantes para a eficaz lubri-refrigeração.

Para Ebbrell *et al.* (1999) *apud* Irani *et al.* (2005), os fluidos de corte são utilizados frequentemente no meio industrial, porém, de maneira inadequada, pois é aplicado de forma abundante, a elevadas vazões e baixa pressão, gerando consideráveis desperdícios.

O principal problema decorrente do processo de retificação, está relacionado com o uso de fluidos de corte, devido aos grandes danos que essas substâncias provocam à saúde das pessoas e ao meio-ambiente (BARTZ, 1998).

Segundo Howell *et al.* (2006), os principais problemas à saúde humana, decorrentes do uso dos fluidos de corte são: danos na pele, como alergias e dermatite, problemas no aparelho respiratório e digestivo, pela inspiração da névoa de fluido e ingestão de pequenas partículas.

A causa maior desses problemas é a composição química dos fluidos de corte, como os anticorrosivos, antiespumantes e biocidas (HONG & BROOMER, 2000).

Sabe-se que a lubrificação e refrigeração dependem da entrada efetiva do fluido na região de corte entre a peça e o rebolo, e, por meio da otimização da aplicação, pode-se reduzir grandes volumes de fluido.

2.10 A técnica da Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL)

Para Heisel *et al.* (1998), no processo de retificação, a lubri-refrigeração é essencial para que se obtenha maior vida útil da ferramenta e qualidade superficial desejada. Para isso apresenta-se o sistema da Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) que é um elo entre os métodos de lubri-refrigeração convencionais e a usinagem a seco. O método MQL caracteriza-se como uma alternativa interessante, pois reduz a vazão de óleo em torno de 27.000 vezes, enquanto processos convencionais de lubrificação chegam a utilizar 45-50 litros de fluido por minuto. Esta técnica utiliza geralmente de 10 até no máximo 100 ml/h a uma pressão de 4,0 a 6,0 kgf/cm², sendo, portanto uma alternativa coerente, já que combina a funcionalidade da refrigeração (ar comprimido) com um consumo muito baixo de fluido de corte. A técnica MQL consiste em uma mistura de ar comprimido e óleo, formando uma névoa, direcionada à região de contato peça-ferramenta, onde o óleo tem a função de lubrificar e o ar tem a função de refrigerar.

Segundo o mesmo autor as principais vantagens da técnica MQL frente à refrigeração convencional são:

- Quantidade muito inferior de fluido utilizado;

- Descarte de pequena quantidade de fluido, pois, na MQL, a quantidade de fluido a ser descartada é tão pequena, que um bom mecanismo de exaustão é suficiente;
- Dispensa lavagem posterior, pelo fato das peças retificadas ficarem quase secas;
- Elimina-se a necessidade de aplicação de bactericidas e/ou fungicidas nos reservatórios.

Como desvantagens na utilização do MQL destacam-se os seguintes itens:

- Geração de névoas que podem ocasionar doenças respiratórias nos trabalhadores, necessitando de sistema de exaustão eficiente e eficaz objetivando deixar a concentração de névoas dentro dos limites de tolerância e caso não ocorra, deve-se utilizar EPI - Equipamento de Proteção Individual para proteção respiratória;
- Ruído gerado pelo sistema, podendo ocasionar Perda Auditiva Induzida pelo Ruído (PAIR), devendo enclausurar a máquina para que o ruído permaneça abaixo dos limites de tolerância e, caso não ocorra, deve-se fazer o uso de proteção auricular.

Para Klocke (2001), a grande quantidade de calor existente no processo de retificação proveniente do atrito entre as inúmeras arestas de corte dos grãos abrasivos e a peça, torna-o um dos processos mais críticos referente à implementação da técnica MQL.

Na lubri-refrigeração convencional, a elevada quantidade de fluido também atua na retirada dos cavacos da zona de corte, enquanto na técnica MQL a menor quantidade de fluido não é suficiente para remover os cavacos, que por sua vez ficam alojados nas porosidades do rebolo impedindo a entrada do fluido de corte e provocando um maior riscamento da superfície da peça (TAWAKOLI *et al.*, 2007).

Apesar da lubrificação eficiente, redução da energia de retificação e da energia específica comparado com processos que utilizam fluidos de corte (óleos solúveis) em abundância, no sistema MQL, em situações não muito severas de usinagem, os valores de rugosidade alcançados não são relativamente bons (HAFENBRAEDEL & MALKIN, 2001).

De acordo com os estudos realizados por Oliveira *et al.* (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 ângulo de incidência de 30 graus, propiciou limpeza eficiente do rebolo e com isto, melhores resultados nas variáveis analisadas: rugosidade, circularidade, desgaste diametral do rebolo, microestrutura e microdureza, quando comparados à lubri-refrigeração convencional e, especialmente, o MQL sem o uso de jato de ar.

2.10.1 A técnica da Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) com água

Segundo Itoigawa *et al.* (2006) e de acordo com a figura 5, essa nova técnica apresenta extrema capacidade de resfriamento devido às gotículas de água envoltas pela camada de óleo, que evaporam facilmente nas superfícies da ferramenta e da peça, e refrigerando-as, como efeito de sua sensibilidade e latência ao calor.

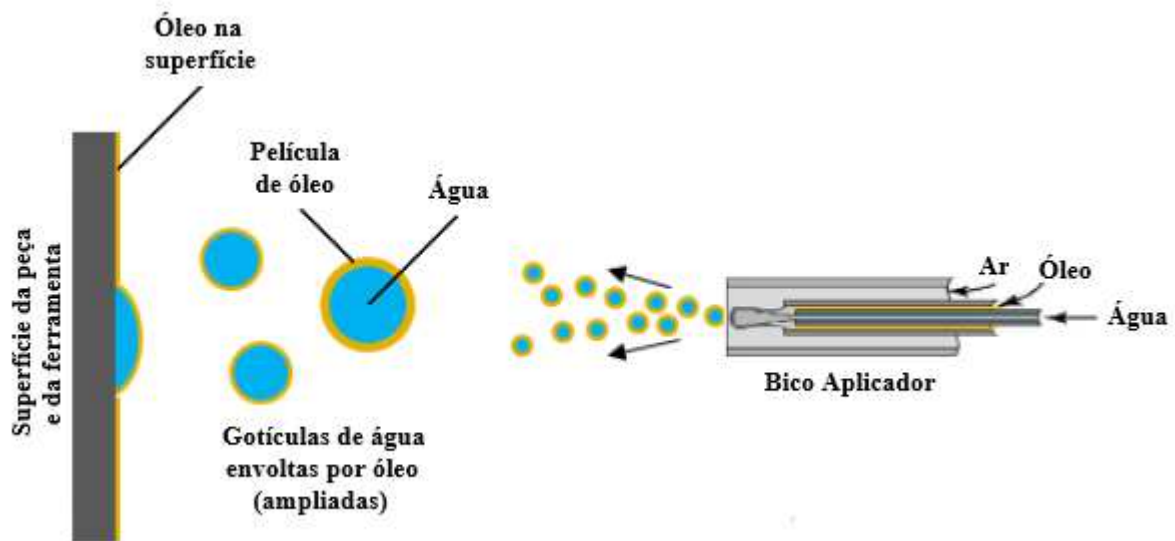


Figura 5 - Conceito das gotículas de água envoltas pela película de óleo (ITOIGAWA *et al.*, 2006, Modificada).

Essa alta capacidade de resfriamento é importante tanto para a exatidão dimensional, geométrica e da rugosidade superficial como para outros fenômenos envolvidos entre a ferramenta e a superfície de usinagem, como a aderência.

Além da boa refrigeração, Itoigawa *et al.* (2006) afirmaram que o método de MQL com adição de água melhora o efeito de lubrificação em relação ao método de MQL tradicional, proporcionando a redução do coeficiente de atrito entre rebolo e peça. Os cavacos formados na MQL com água, assim como no método convencional de aplicação do fluido, são seguramente mais enrolados, haja vista que quanto maior o efeito refrigerante mais curvo torna-se o cavaco.

A figura 6 mostra micrografias da superfície da ferramenta após ensaios realizados com os principais métodos de aplicação do fluido de corte (método convencional, MQL tradicional, MQL com adição de água e usinagem a seco).

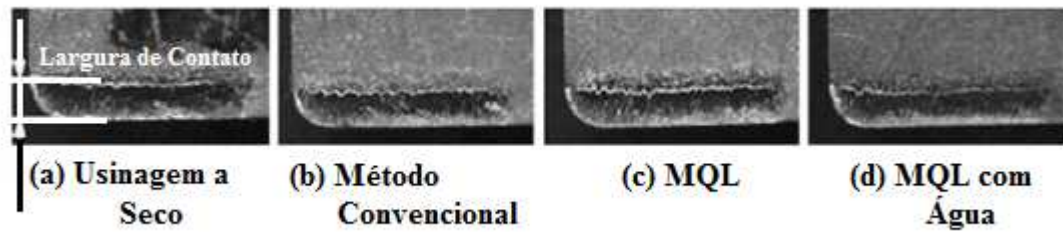


Figura 6 - Área de contato do cavaco na face de ataque (ITOIGAWA *et. al.*, 2006, adaptada).

Observando a figura 6 pode-se verificar que para o método convencional de aplicação de fluido de corte e MQL com adição de água, a largura de contato na ferramenta é sensivelmente menor quando comparada com a MQL tradicional e a usinagem a seco.

De acordo com Yoshimura *et al.* (2005), o sistema de MQL com água é mais eficiente que o sistema de MQL tradicional, pois, além da redução das forças de usinagem e da redução do desgaste da ferramenta, a MQL com água mostra-se também mais eficiente na supressão da expansão térmica. Essas conclusões citadas referem-se ao estudo da MQL com adição de água nos processos de geometria definida, pois poucos trabalhos foram publicados na literatura formal, e, no que se refere ao processo de retificação, tem-se um número ainda menor de publicações.

De acordo com Bianchi *et al.* (2014), ao se aumentar a proporção de água na retificação cilíndrica externa de cerâmicas avançadas, observa-se a tendência da elevação dos valores de rugosidade, devido à perda de capacidade de lubrificação, tendo em vista que a proporção de óleo é menor. Ou seja, quanto mais óleo e menos água na mistura é mais fácil a retirada de cavacos dos poros, porém é pior a lubrificação das interfaces cavaco-ferramenta. Então a inserção de água na mistura tem efeito positivo na rugosidade (facilidade de limpeza do rebolo) e efeito negativo na lubrificação.

2.11 Variáveis de saída no processo de retificação

Para melhor compreensão dos resultados, foram analisadas as variáveis de saída, pois a interação singular entre o grão abrasivo e a peça possui uma influência direta na modelagem destas variáveis (HECKER *et al.*, 2007).

O objetivo dos sistemas de monitoramento para os processos de produção é melhorar a qualidade das peças produzidas, pois permite que o processo seja controlado de forma a evitar qualquer defeito de produção, o que é extremamente importante especialmente em processos

de acabamento, como a retificação. Dessa maneira, evita-se o descarte e a perda de peças nos processos (TÖNSHOFF *et al.*, 2000).

2.11.1 Rugosidade

De acordo com Hecker & Liang (2003), a rugosidade é representada pelas micro irregularidades geométricas decorrentes do processo de fabricação, e é um parâmetro típico que tem sido utilizado para quantificar a qualidade topográfica da superfície da peça. O parâmetro de rugosidade mais utilizado é a média aritmética (R_a) e é definido como a média aritmética do desvio do perfil de rugosidade em relação à linha média.

Para Agostinho *et al.*, (1981) os processos de usinagem afetam diretamente a rugosidade da peça, podendo ser controlada através de melhores condições de fabricação, como uma forma mais eficiente de aplicação de fluido de corte, a utilização de um rebolo mais eficaz, e um bocal de melhor geometria. O principal fator que influencia na rugosidade final de uma peça é a lubrificação fornecida pela aplicação de fluido de corte. De acordo com o mesmo autor a melhor lubrificação promove a redução da potência de retificação e da energia específica, melhorando assim a qualidade superficial da peça usinada.

2.11.2 Desvio de Circularidade

Segundo Jedrzejewski & Modrzycky (1997), o erro de circularidade é definido como qualquer diferença entre a peça usinada e a projetada, com tolerâncias especificadas. O desvio de circularidade se baseia em dois limites circulares concêntricos, que compreendem o maior pico e o menor vale de um perfil.

De acordo com Fusse *et al.* (2004) o erro de circularidade ocasionado pelo processo durante a usinagem está diretamente relacionado com as condições de retificação, os danos térmicos, as solicitações mecânicas, a pressão e a vazão de fluido de corte utilizado.

O erro de circularidade expressa qual o erro de forma final da peça usinada, pois, em processos de retificação, esse fator é muito importante, já que indica qual o estado cilíndrico final da peça (FUSSE *et al.*, 2004).

De acordo com Minke (1999) o elevado atrito na região peça/rebolo é um dos principais fatores e, além disso, esse atrito gera o calor que promove dilatações e deformações térmicas, que acarretam erros de circularidade.

2.11.3 Desgaste diametral do rebolo

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

Segundo Krueger *et al.* (2000), a eficiência do rebolo em contraposição ao desgaste pode ser medida por meio da relação “G”. Essa relação é um parâmetro importante porque mantém certa ligação com os custos do rebolo em muitas operações. Por esse motivo, rebolos que apresentam relação “G” alta produzem mais e desgastam-se menos.

Para Choi *et al.* (2008), as mudanças nas arestas de corte da superfície de corte da ferramenta abrasiva afetam o desempenho da retificação. A relação “G” está primariamente relacionada com a espessura equivalente de corte, em que o aumento dessa espessura promove diminuição do parâmetro “G”. Além do mais, a maior eficiência do grão abrasivo é conseguida por meio de uma maior velocidade de corte e também pela, aplicação de lubri-refrigeração. Marinescu *et al.* (2004) relatam que o desgaste do rebolo durante a retificação influencia, entre outros, nos seguintes aspectos do processo:

- 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.

2.11.4 Emissão Acústica (EA)

A liberação de grande quantidade de energia durante a retificação resulta em uma onda de tensão que se propaga através do material, dando origem a Emissão Acústica (EA) que é definida como uma onda elástica transiente gerada por uma rápida liberação de energia de uma fonte localizada no material, quando submetido a um estado de tensão (MALKIN, 2008).

A emissão acústica representa uma energia resultante da interação entre o grão abrasivo e a peça, podendo ser definida também como a variação de tensão, que se propaga através da estrutura do material (INASAKI, 1990).

Para Lee *et al.* (2001), a sensibilidade associada à localização do sensor é um problema quando se utiliza a (EA) para monitoramento do processo, uma vez que, para uma melhor leitura dos dados, o sensor deve estar mais próximo da região de corte. Porém, segundo o mesmo autor, a deformação plástica, a fratura e o atrito são fortes fontes de energia de emissão acústica e geram um grande potencial para monitoramento. Apesar de a (EA) ser um método indireto de sensoriamento e de haver outras técnicas para monitoramento da usinagem, a emissão acústica é a mais utilizada e a mais conveniente, pois seu sensor é bastante robusto, sendo adequado para o uso em ambientes industriais.

2.11.5 Análise da Microestrutura - Microscopia Óptica

A técnica da microscopia óptica é de extrema importância para a caracterização da estrutura da peça, pois possibilita a análise das superfícies, permitindo uma visão geral de danos, desgaste e/ou falhas, bem como danos térmicos.

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

2.11.6 Microdureza

De acordo com Malkin (1989), a microdureza é uma variável que reforça as afirmações que podem ser feitas na análise da micrografia do material usinado. A retificação dos aços geralmente ocorre após seu tratamento térmico. Durante a retificação, dependendo da temperatura do processo de corte, a peça pode sofrer dentre outros um amolecimento próximo à superfície acabada. A perda de dureza superficial é um fenômeno complexo, e depende da temperatura no corte, e do tempo envolvido no processo.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão descritos todos os equipamentos e materiais empregados nos ensaios, e também os procedimentos aplicados na realização dos experimentos.

Todo o processo de retificação dos corpos de prova foi realizado no Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA) da Faculdade de Engenharia Mecânica - UNESP, *campus* Bauru, e os resultados obtidos foram analisados no Laboratório de Materiais e no Laboratório de Aquisição de Dados e Processamento de Sinais (LADASP) da UNESP, *campus* Bauru.

3.1 Equipamentos e materiais utilizados no processo

Os equipamentos e materiais empregados nos ensaios estão detalhados na sequência:

3.1.1 Retificadora cilíndrica externa

Os ensaios foram realizados na retificadora cilíndrica CNC fabricada pela empresa SULMECÂNICA, modelo RUAP 515H, equipada com comando numérico computadorizado CNC da Fagor para o acionamento do eixo “X”.

3.1.2 Corpo de prova

Foi utilizado o aço ABNT 52100 como corpo de prova durante os ensaios, conforme ilustram a fotografia na figura 7 e o desenho esquemático na figura 8, apresentando as seguintes dimensões: diâmetro externo $54,0 \pm 0,1\text{mm}$; diâmetro interno $30,0 \pm 0,1\text{mm}$; espessura $4,0 \pm 0,1\text{ mm}$.



Figura 7 - Fotografia de parte dos corpos de prova utilizados nos ensaios.

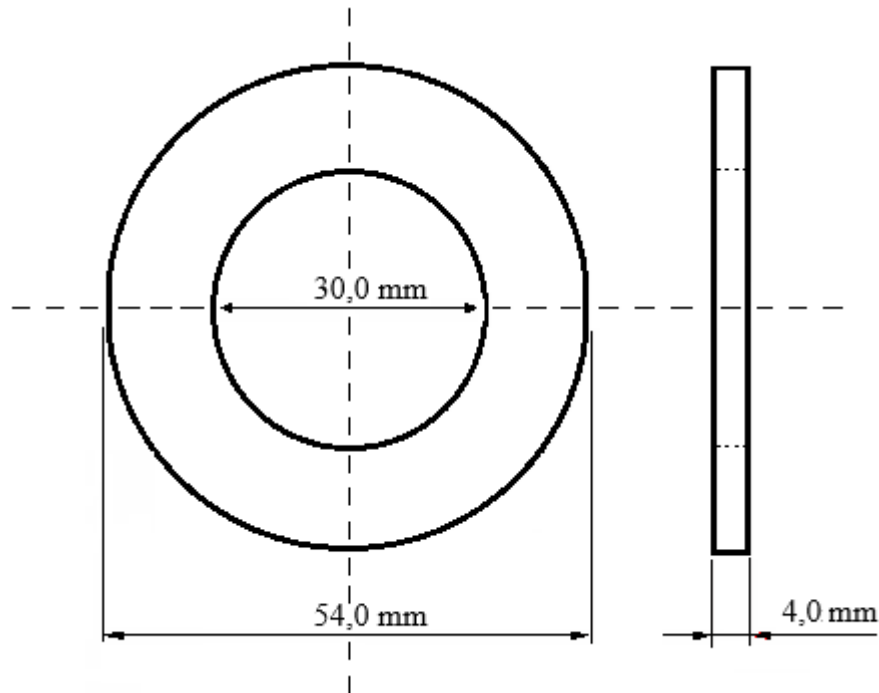


Figura 8 - Desenho esquemático do corpo de prova utilizado nos ensaios.

Após a confecção, os corpos de prova foram temperados e revenidos pela empresa INA (Grupo Schaeffler), passando a apresentar uma dureza média de 62 HRC, e sua composição química média está apresentada na tabela 1.

*Tabela 1 - Composição química média do aço ABNT 52100 (adaptado)
(<http://www.gerdau.com.br/produtos-e-servicos/produtos-por-aplicacao-detalle-produto>)*

ABNT	C	Si	Mn	Cr
52100	0,98 %	0,25%	0,35%	1,45%

3.1.3 Mandril de fixação

Foi confeccionado um mandril conforme ilustrado na figura 9, permitindo, dessa maneira, a fixação e a usinagem entre pontas do corpo de prova.

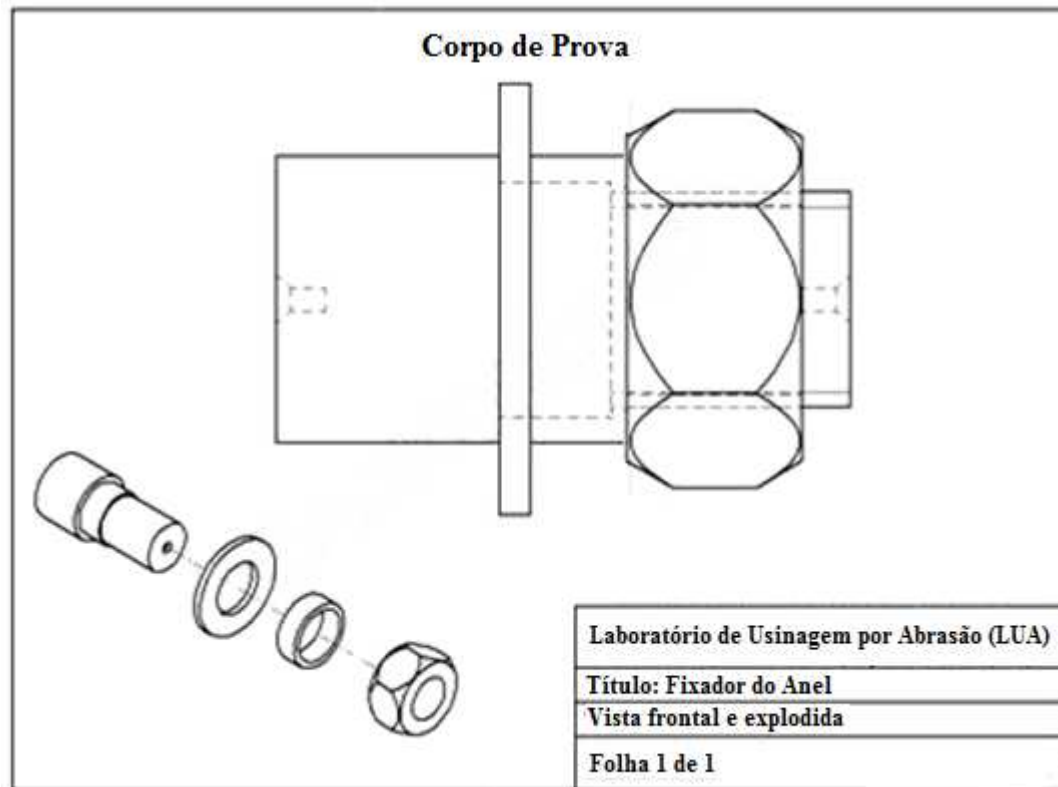


Figura 9 - Desenho esquemático do mandril para usinagem entre pontas do corpo de prova.

3.1.4 Descrição do rebolo utilizado

Utilizou-se o rebolo convencional de óxido de alumínio conforme ilustra a figura 10, com as seguintes especificações:

- Diâmetro externo 355,6 mm;
- Diâmetro interno 127,0 mm;
- Largura 25,4 mm;
- Abrasivo - óxido de alumínio branco (AA) para aço e aço rápido;
- Granulometria 100 mesh;
- Dureza média;
- Estrutura 6;
- Ligante vitrificado;
- Especificação do fabricante AA 100 L6 V15;
- Rotação máxima 1775 rpm.



Figura 10 - Rebolo de óxido de alumínio utilizado nos ensaios.

O óxido de alumínio apresenta elevada dureza (9,0 a 9,5 na escala de Mohs), sendo indicado para trabalhos que exigem tal característica.

3.1.5 Dressador

Para a dressagem do rebolo utilizou-se um dressador multigranular do tipo conglomerado da empresa Master Diamond, com a ponta composta por diamantes em uma matriz metálica, e as dimensões da pastilha são 15 x 8 x 10 mm.

Durante a dressagem foi utilizada uma penetração de 0,04 mm por passada até um valor correspondente à eliminação total da camada desgastada. As condições de dressagem do rebolo foram mantidas constantes para não influenciarem significativamente nos resultados finais, sendo velocidade de dressagem (v_d) de 600 mm/min (Feita manualmente, marcando-se o tempo para percorrer determinada distância), profundidade de dressagem (a_d) de 0,04 mm e velocidade de translação média do dressador de 100 mm/min.

3.1.6 Sistema convencional de refrigeração

É composto de um reservatório com capacidade para o armazenamento de 80 litros de fluido de corte, onde o fluido circula no sistema por meio de uma bomba de sucção, mais um conjunto de mangueiras e bocais aplicadores. O fluido de corte utilizado nos ensaios foi o óleo solúvel semi-sintético ME-I concentrado, fabricado pela empresa TAPMATIC do Brasil Ltda., que foi diluído em 10 partes de água, e para sua aplicação foi direcionado na região de corte por meio de tubos flexíveis com pressão de $2,9 \times 10^5$ Pa e vazão de 17 l/min.

3.1.7 Sistema da Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL)

O sistema MQL permite uma regulação precisa do volume de lubrificante e ar separadamente, por meio de um registro do tipo agulha, atomizando-o em um fluxo de ar de aproximadamente $6,5 \times 10^5$ Pa de pressão. Este sistema é basicamente composto por: regulador de pressão, medidor de vazão de ar, dosador (equipamento de MQL) e bocal projetado para sua utilização na retificação.

O fluido de corte utilizado no método MQL puro foi o Accu-Lube LB 1000 e no método MQL/Água utilizou-se o BIOCUT 9000 diluído em água nas proporções 1:1; 1:3 e 1:5 (óleo/água), ambos fornecidos pela empresa ITW Chemical Products Ltda. A dosagem do óleo lubrificante e a regulação da vazão de ar comprimido foram realizadas pela unidade de controle do sistema MQL, detalhado na figura 11.

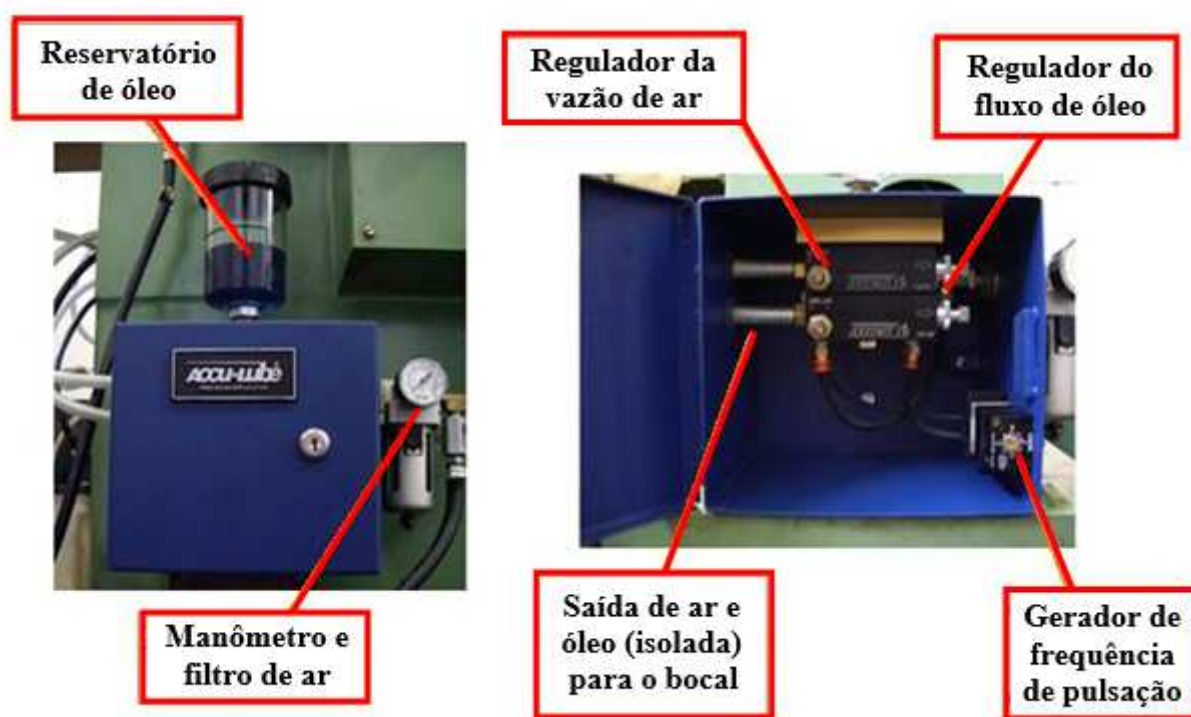


Figura 11 - Unidade de controle do MQL.

Na figura 12 vê-se imagens do bocal desenvolvido para utilização durante os ensaios, onde foi posicionado a 30 mm da região de corte.

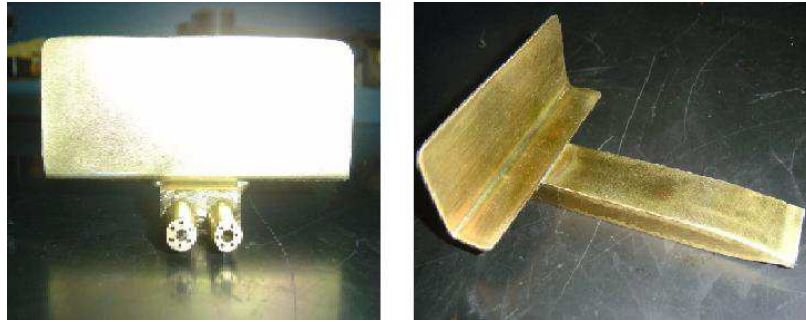


Figura 12 - Bocal para experimentação com MQL.

A vazão de óleo empregada no sistema MQL foi de 100 ml/h $2,8 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$ com pressão do ar comprimido de $6,5 \times 10^5 \text{ Pa}$, sendo que para sua medição foi utilizada uma proveta graduada que coletou o óleo expelido em determinado intervalo de tempo. Foi utilizado nos ensaios um medidor de vazão e um regulador de pressão (figura 13) para a medição precisa das vazões de ar comprimido. Conectado a uma rede de ar comprimido o medidor de vazão forneceu uma leitura direta da vazão (em m^3/h).

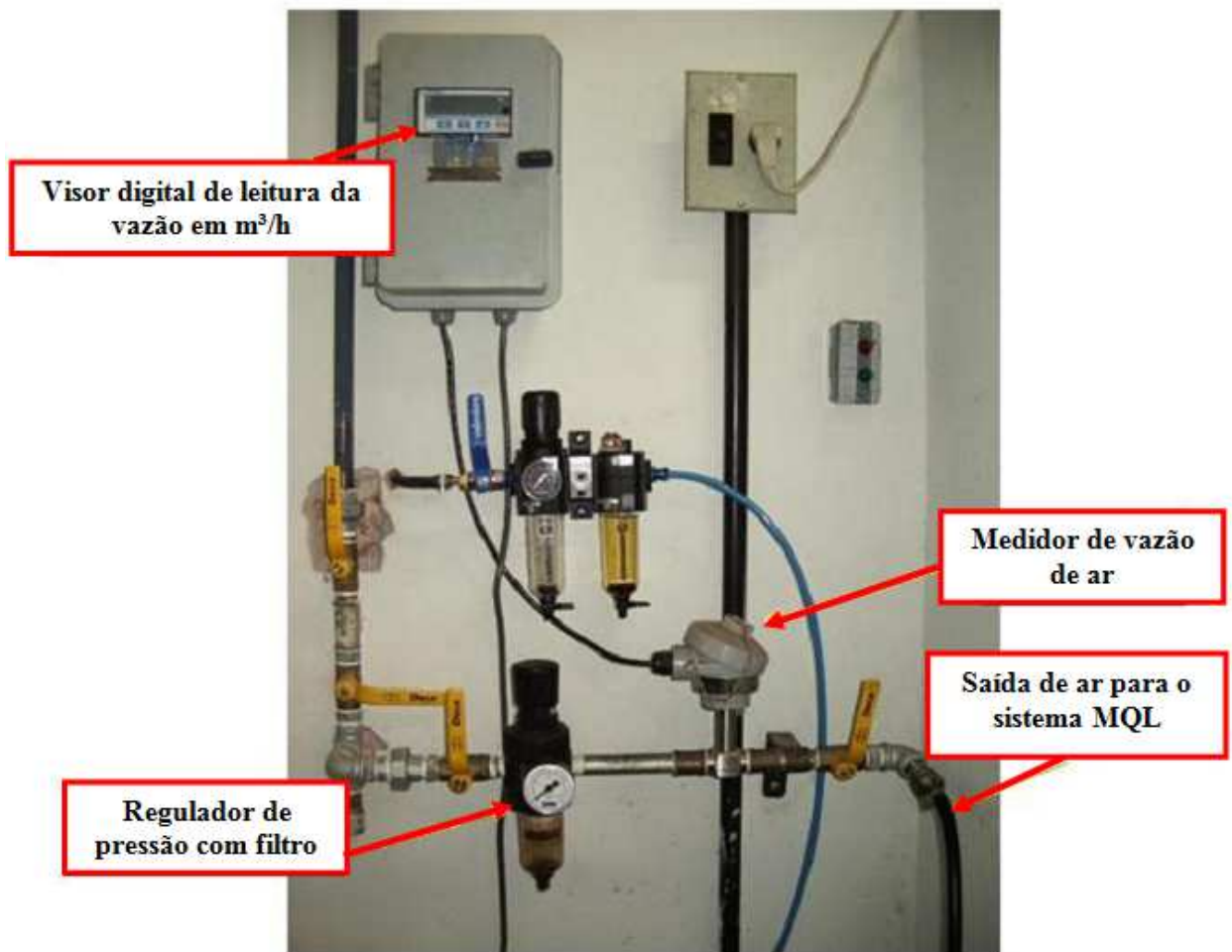


Figura 13 - Sistema de ar comprimido para MQL.

3.2 Classificação e parâmetros dos ensaios

Devido a 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. É importante salientar que, para alguns parâmetros, os valores utilizados não são os ideais, porém, foram os valores máximos alcançados na retificadora empregada.

Este trabalho se constitui de ensaios com as condições de lubri-refrigeração representadas na figura 14.

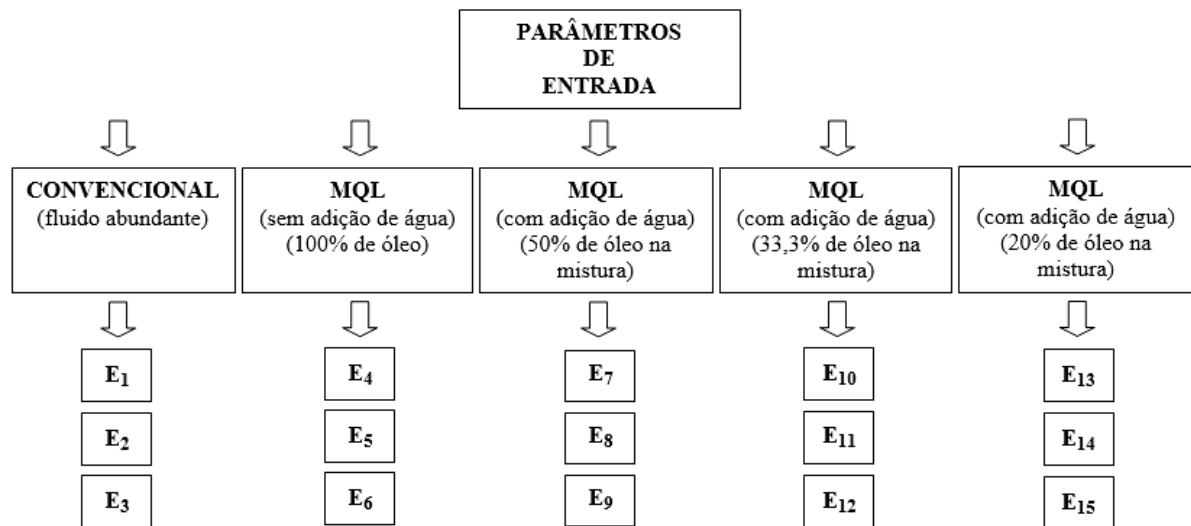


Figura 14 - Matriz de ensaios.

Onde se utilizou os seguintes sistemas de lubri-refrigeração (sem o uso do jato de ar para limpeza do rebolo):

- Sistema convencional para referência, por ser amplamente empregado no processo de usinagem;
- Sistema MQL (puro, sem adição de água);
- Sistema MQL (1:1 parte de óleo/parte de água) - 50% de óleo na mistura;
- Sistema MQL (1:3 parte de óleo/partes de água) - 33,3% de óleo na mistura;
- Sistema MQL (1:5 parte de óleo/partes de água) - 20% de óleo na mistura.

Foram retificadas três peças em cada ensaio, totalizando um volume de material removido de 3.900 mm³.

Para analisar as variáveis de saída foram realizadas duas repetições em cada ensaio. Antes de cada ensaio o rebolo foi dressado. Os parâmetros de entrada foram mantidos constantes em todos os ensaios, conforme seguem na tabela 2:

Tabela 2 - Parâmetros de entrada.

Velocidade de corte ou periférica do rebolo (v_s) (baixa para rebolo de Al_2O_3 limitada pela retificadora)	30 m/s
Rotação da peça (n_w)	204 rpm
Velocidades de mergulho (avanço) do rebolo (v_f)	0,50 mm/min - ($8,33 \times 10^{-6}$ m/s)
Profundidade de corte (a)	0,1 mm
Tempo de centelhamento (t_{so})	8 segundos
Distância do bocal de MQL à região de corte	30 mm
Largura de retificação (b)	4 mm
Vazão do fluido de corte convencional	17 l/min - $2,83 \times 10^{-4}$ m ³ /s
Pressão do fluido de corte convencional	$2,9 \times 10^5$ Pa
Vazão do fluido de corte na MQL	100 ml/h - $2,8 \times 10^{-8}$ m ³ /s
Pressão do ar comprimido na MQL	$6,5 \times 10^5$ Pa
Profundidade de dressagem (a_d)	0,04 mm
Velocidade de translação média do dressador	100 mm/min - $1,66 \times 10^{-3}$ m/s

3.3 Sequência de realização dos ensaios

As operações de dressagem foram realizadas antes de cada ensaio, com o objetivo de reduzir a influência do desgaste do rebolo nas variáveis de saída, e para uniformizar a superfície de corte do rebolo, a cada novo ensaio. A figura 15 ilustra o dressador multigranular do tipo conglomerado utilizado nos ensaios para a dressagem do rebolo.

Pelo fato de a retificadora empregada não possuir dispositivo de dressagem automática, o deslocamento transversal para a dressagem foi feito manualmente, por meio da remoção de material da ferramenta abrasiva, eliminando, dessa forma, as marcas referentes à usinagem anterior.



Figura 15 - Dressador multigranular do tipo conglomerado utilizado nos ensaios.

Para a retificação do corpo de prova entre pontas, ele foi fixado por meio de porca em um mandril, visando maior precisão na usinagem. Como a largura do corpo de prova ($b_w = 4$ mm) era menor que a largura do rebolo ($b_s = 25,4$ mm), realizavam-se dois ensaios em regiões distintas do rebolo antes das operações de dressagem.

Considerando-se os mesmos parâmetros de dressagem em todos os ensaios, a ferramenta abrasiva apresentou as mesmas condições iniciais para todos os ensaios. A figura 16 mostra a realização de um ensaio com a lubri-refrigeração MQL.

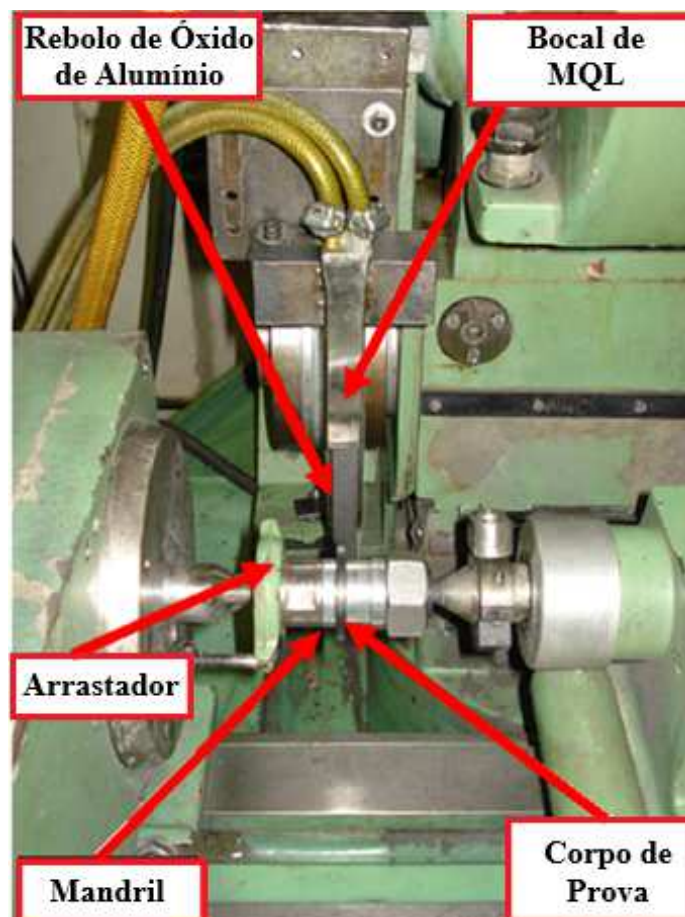


Figura 16 - Ensaio sendo realizado

3.4 Caracterização dos parâmetros de saída

Realizados os ensaios, procederam-se às medições das variáveis de saída: rugosidade; desvio de circularidade; desgaste diametral do rebolo; potência de corte na retificação, emissão acústica, microestrutura e microdureza.

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.

3.4.1 Aquisição de dados

Mediante a utilização de um computador com placa de aquisição de dados da National Instruments, modelo PCI-6111E e software LabVIEW versão 7.1 do fabricante National Instruments, foi realizada a aquisição dos dados, onde os parâmetros coletados foram: rotação do rebolo (n_s), Emissão Acústica e Potência Elétrica (P_{elet}) consumida pelo motor que acionava a ferramenta.

A programação se deu em sub-rotinas, destacando-se: entrada de dados físicos dos materiais ensaiados; aquisição de dados em tempo real; análise e disposição dos dados em gráficos simultaneamente à sua aquisição; apresentação dos resultados e armazenamento dos dados de interesse em arquivos.

Os dados foram coletados em tempo real e armazenados através do software na forma de tensão (V), os quais foram posteriormente processados através do software Matlab, da empresa MathWorks.

Os dados de rotação e potência elétrica consumida, gerados durante o processo de retificação, foram transmitidos à placa de aquisição de dados através de um circuito condicionador de sinais que possuía bornes de entradas para o recebimento dos dados.

3.4.2 Rugosidade

A medição da rugosidade média dos corpos de prova (R_a) foi realizada através de um rugosímetro Surtronic3+, da marca Taylor Hobson, conforme apresenta a figura 17.

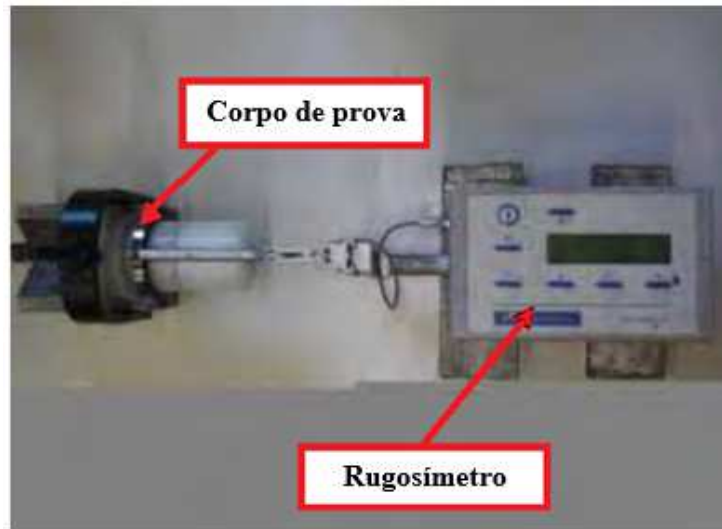


Figura 17 - Medição de rugosidade do corpo de prova.

A medição foi realizada na direção perpendicular à superfície de retificação. O rugosímetro foi ajustado para efetuar a medição com um comprimento de medição (*cut-off*) igual a 0,25 mm. Realizaram-se cinco medições em posições distintas na região retificada de cada uma das três peças retificadas em cada ensaio.

3.4.3 Emissão acústica

A emissão acústica foi medida com a utilização de um módulo DM12, da marca *Sensis*, com um sensor fixo que foi posicionado no cabeçote móvel da retificadora próximo do contraponta, para a detecção das possíveis variações deste sinal e sua relação com as outras variáveis de saída. A figura 18 mostra o sensor fixado no cabeçote móvel da retificadora.



Figura 18 - Sensor fixo de emissão acústica, posicionado no cabeçote móvel

3.4.4 Desvio de circularidade

Os resultados obtidos para o desvio de circularidade são referentes à comparação entre os diferentes métodos estudados, obtidos através da média de 5 medições feitas em diferentes posições no corpo de prova para cada um dos 3 ensaios realizados em cada condição de lubri-refrigeração.

Os valores de desvio de circularidade foram obtidos por meio da utilização de um medidor de circularidade, modelo Talyrond 31C, marca Taylor Hobson, conforme figura 19.

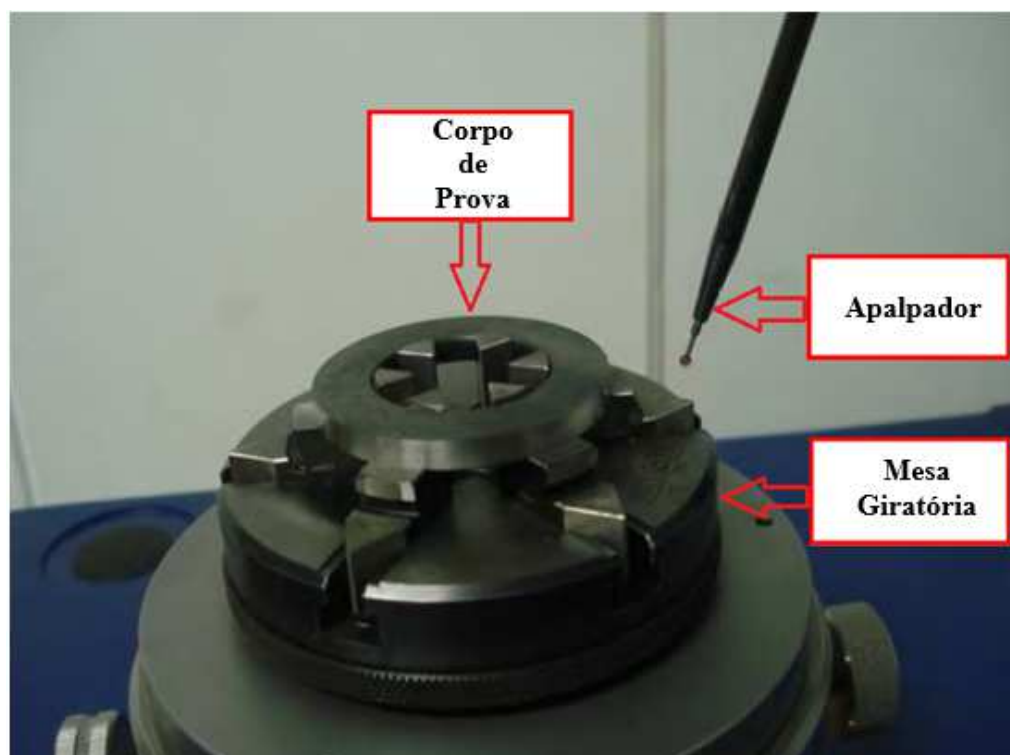


Figura 19 - Medição do desvio de circularidade do corpo de prova.

Na ponta do braço encontra-se a parte mais sensível da máquina, o apalpador com uma ponta de diamante, elemento que efetua o contato com a peça para a obtenção do desvio de circularidade.

3.4.5 Força tangencial de corte

Foi medida pela determinação da potência elétrica consumida pelo motor de acionamento do eixo árvore do rebolo, com o monitoramento dos valores de tensão e corrente elétrica, provenientes deste motor elétrico.

Utilizou-se para isso um módulo eletrônico, denominado Curvopower, projetado e construído pelo grupo de pesquisa em usinagem por abrasão da faculdade de Engenharia de Bauru, sob coordenação do Prof. Dr. Paulo Roberto de Aguiar, sendo utilizado para transformação dos valores de corrente elétrica e tensão (provenientes do motor) em sinais de tensões compatíveis, para serem enviados a uma placa de aquisição de dados, e processados pelo software LabView 7.1®, da National Instruments®.

3.4.6 Desgaste diametral do rebolo

Em todas as condições de usinagem removeu-se o mesmo volume de material e a marcação do desgaste do rebolo foi possível devido a não utilização da largura total do rebolo (b_s) de 25,4 mm, pois a largura utilizada foi de 8 mm, ou seja, dois ensaios por rebolo.

Após a retificação dos corpos de prova do ensaio (ABNT 52100) marcou-se o desgaste (degrau criado no rebolo) em outro corpo de prova de (aço SAE 1020). A figura 20 mostra o processo de marcação do rebolo.



Figura 20 - Processo de marcação do rebolo.

O desgaste diametral do rebolo foi medido por meio do método de impressão do perfil do rebolo desgastado em um corpo devidamente preparado para tal fim, onde os desníveis existentes entre as regiões gastas e não gastas do rebolo foram repassados ao corpo retificado, conforme ilustra a figura 21. Desta forma, realizou-se a medição do desnível com um rugosímetro portátil Surtronic3+, utilizado juntamente com o software TalyMap, ambos da Taylor Hobson.

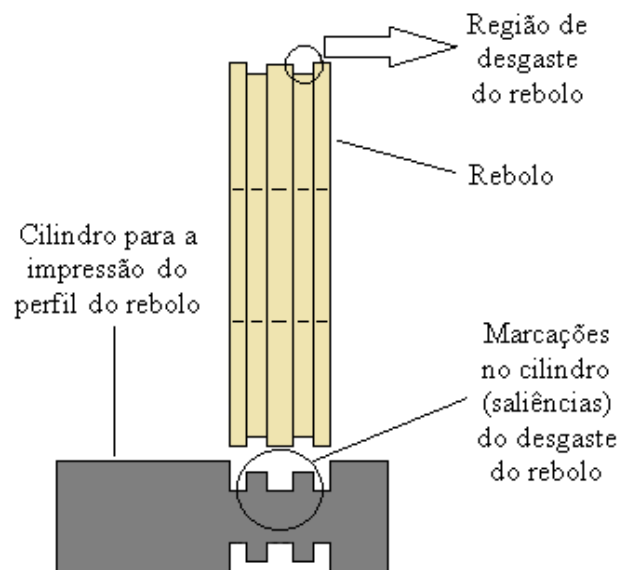


Figura 21 - Esquema ilustrativo do processo de impressão do perfil do rebolo.

3.4.7 Preparação das amostras para análise metalográfica e de microdureza

As amostras para as análises metalográficas e de microdureza foram retiradas do último corpo de provas de cada ensaio, após a realização de todos os ensaios. Para análise da superfície o corpo de prova foi cortado numa máquina *cut-off*, conforme ilustra a figura 22.



Figura 22 - Amostras retiradas para a análise metalográfica e de microdureza.

O processo de corte destas peças foi efetuado vagarosamente e com fluido refrigerante para não causar danos térmicos ao corpo de prova, e após o corte, foi feito o embutimento das amostras cortadas em uma resina baquelite, conforme ilustra a figura 23.

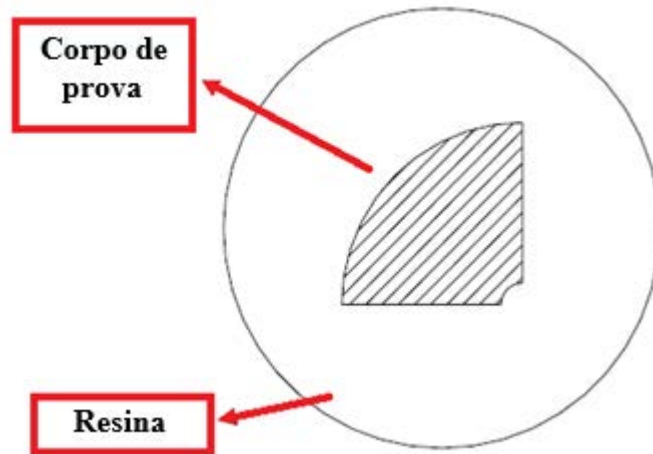


Figura 23 - Desenho esquemático do embutimento do corpo de prova em resina baquelite.

Em seguida, foi feito o lixamento da amostra embutida na resina, com lixadeira manual, começando com a lixa número 80, depois, na sequência, a 120, 220, 320, 400, 500 e 600, e posteriormente o polimento por meio de máquina politriz metalográfica com alumina de granulometria 1 μm .

3.4.8 Microscopia óptica

Devido às diferentes condições utilizadas nos ensaios, realizaram-se os ensaios de microscopia óptica para observar se houve ou não alterações microestruturais no material. Para realizar as análises metalográficas foi utilizado o microscópio óptico, dotado de câmera e software para captura das imagens das amostras, com ampliação de 200x.

Realizando-se a metalografia das peças retificadas é possível observar a ocorrência de danos térmicos; a retêmpera caracteriza-se como uma fase diferente do restante do material, e a região de perda de dureza normalmente é evidenciada por uma alteração da coloração.

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 1% por 10 segundos, no laboratório de materiais da Faculdade de Engenharia de Bauru - FEB.

3.4.9 Microdureza

As medições de microdureza foram obtidas através de um microdurômetro Vicker, mas foram convertidas para a escala Rockwell C, por ser amplamente utilizada e apresentar maior facilidade de compreensão dos resultados. O equipamento utilizado foi o modelo MicroWizhard, versão 1.04 da marca Mitutoyo.

A distância entre indentações deve ser maior que o dobro da maior diagonal formada pelo indentador Vicker, de modo que a marcação seguinte não sofra prejuízo por encruamento da superfície. Neste trabalho utilizou-se a carga de 500g, a qual gera uma marca maior e agrega uma área mais homogênea de superfície. A distância entre uma marcação e outra foi definida em 70 μ m, obedecendo-se à norma ASTM E384 que estabelece a distância mínima entre as impressões. A figura 24 apresenta a metodologia utilizada no ensaio de microdureza.

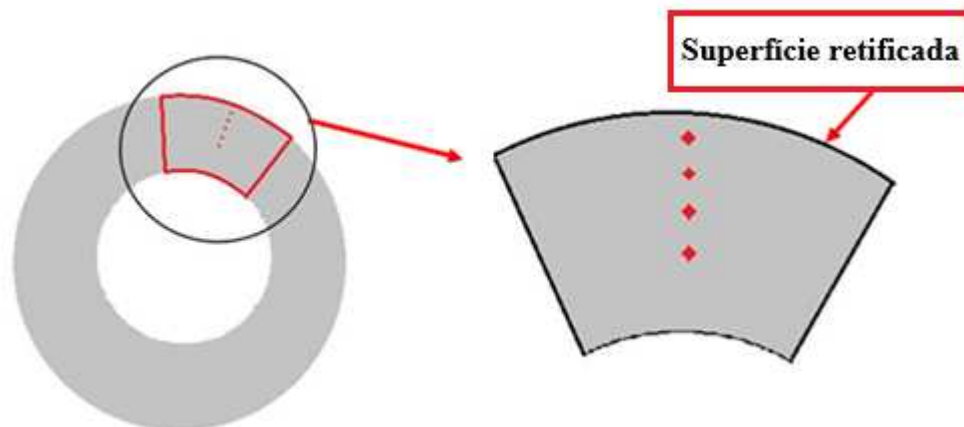


Figura 24 - Representação do corpo de prova com detalhe para metodologia utilizada no ensaio de microdureza.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados para cada condição de retificação realizada estão apresentados nesta seção, como as variáveis de saída: potência de corte na retificação, emissão acústica e desgaste diametral do rebolo, assim como: rugosidade, desvio de circularidade, microestrutura e microdureza, no que se refere à análise da integridade superficial da peça.

Os parâmetros escolhidos são os mais utilizados pela indústria, pois indicam as interferências do processo de retificação na integridade do material.

Os resultados para as variáveis analisadas: rugosidade, desvio de circularidade, desgaste diametral do rebolo, potência de corte na retificação e emissão acústica, estão dispostos na forma de gráficos de colunas, contendo a média das medições.

Para a análise comparativa entre os ensaios e os métodos de lubri-refrigeração, no caso de rugosidade e desvio de circularidade e entre os métodos de lubri-refrigeração, para o de desgaste diametral do rebolo, potência de corte na retificação e emissão acústica, utilizou-se um teste de hipóteses para médias ANOVA com fator único, seguido do teste de comparações múltiplas de Tuckey (ou teste de diferença honestamente significativa), executadas por meio dos softwares Microsoft Excel e Matlab.

Para comparar as microestruturas e verificar a ocorrência de danos térmicos, desgaste e/ou falhas, foram realizadas análises metalográficas.

Em relação a microdureza, os resultados estão dispostos em um gráfico de linhas.

4.1 Rugosidade

Os resultados obtidos para a rugosidade média, R_a , referente à comparação entre as diferentes condições de lubri-refrigeração, estão demonstrados na figura 25.

A análise de rugosidade foi realizada em 3 ensaios com cinco medições em cada um, gerando 15 medições em cada método de lubri-refrigeração.

Foi aplicado em cada método de lubri-refrigeração um teste ANOVA com fator único, o qual indicou, com um nível de confiança de 95%, que não houve diferença estatisticamente significativa entre os ensaios, $P > 0,05$, conforme tabela 3, o que permitiu a utilização das 15 medições em cada método de lubri-refrigeração como uma amostra única, pois se houvesse diferença estatística entre os ensaios, não seria possível aplicar ANOVA para os métodos de lubri-refrigeração estudados.

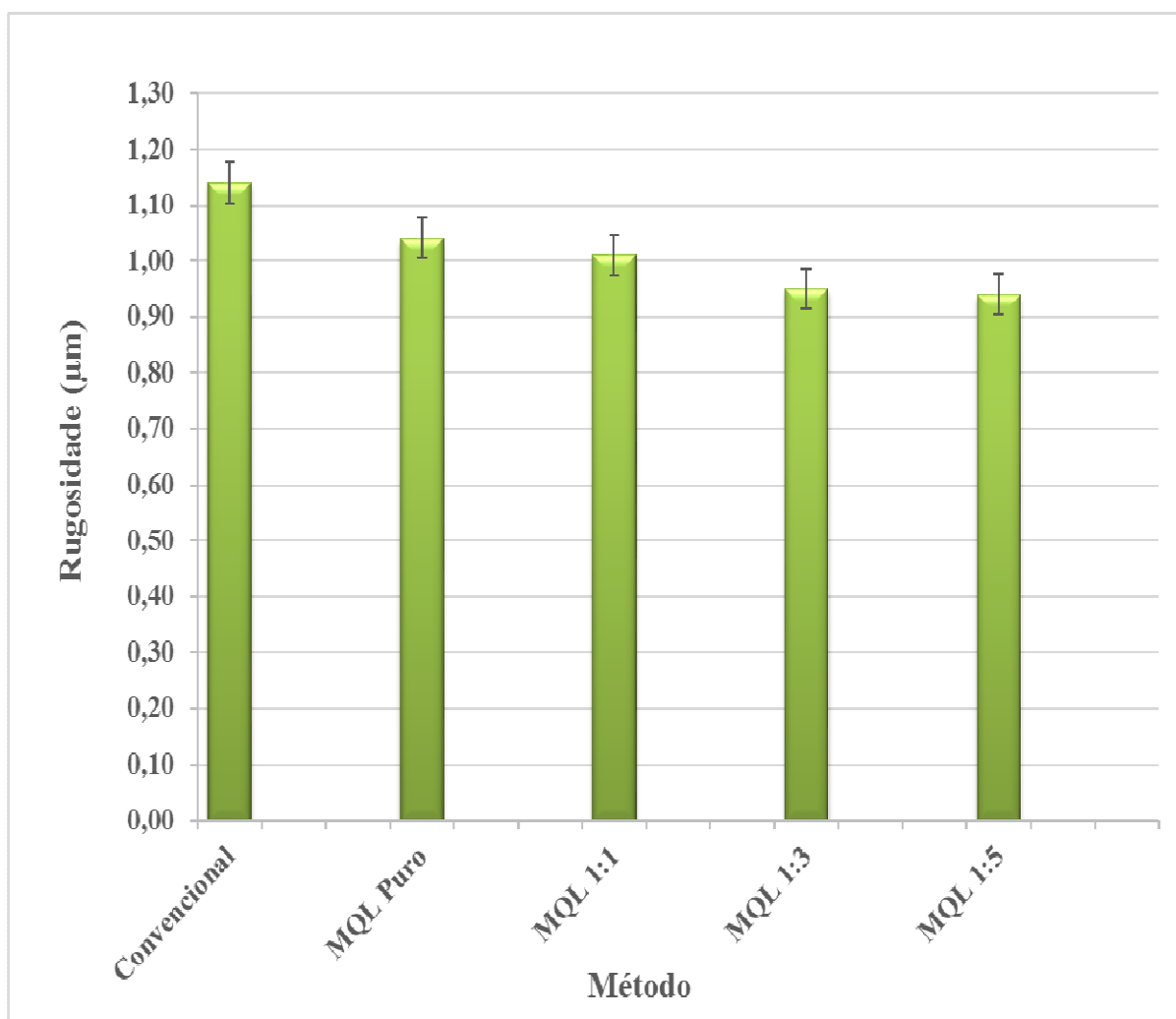


Figura 25 - Resultados de rugosidade para as diferentes condições de lubri-refrigeração.

Conforme a tabela 3, os valores de $P > 0,05$ permitiram a utilização das 15 medições em cada método de lubri-refrigeração como uma amostra única.

Tabela 3 - Valor P com $\alpha = 0,05$ para rugosidade.

Métodos	Valor P
Convencional	0,89619
MQL Puro	0,75021
MQL 1:1	0,65848
MQL 1:3	0,05097
MQL 1:5	0,85942

Desta maneira, aplicou-se novamente o teste ANOVA, sendo agora para análise comparativa entre os métodos de lubri-refrigeração, e obteve um valor P de $1,32536 \times 10^{-14}$, ou seja, $P < 0,05$ indica que houve diferença estatisticamente significativa entre os métodos.

Porém, o teste de Tuckey, como pode ser verificado na tabela 4, mostra que não existe diferença significativa para os pares de métodos (MQL puro e MQL 1:1), (MQL 1:1 e MQL 1:3), (MQL 1:1 e MQL 1:5), e (MQL 1:3 e MQL 1:5).

Tabela 4 - Teste de comparações múltiplas de Tukey para a rugosidade entre os métodos

Pares de métodos		Intervalo de Confiança [$\alpha = 0,05$] para a diferença entre as médias		Diferença entre as médias
Convencional	MQL Puro	0,0394	0,1219	0,0807
Convencional	MQL 1:1	0,0668	0,1492	0,1080
Convencional	MQL 1:3	0,0841	0,1666	0,1253
Convencional	MQL 1:5	0,1068	0,1892	0,1480
MQL Puro	MQL 1:1	-0,0139	0,0686	0,0273
MQL Puro	MQL 1:3	0,0034	0,0859	0,0447
MQL Puro	MQL 1:5	0,0261	0,1086	0,0673
MQL 1:1	MQL 1:3	-0,0239	0,0586	0,0173
MQL 1:1	MQL 1:5	-0,0012	0,0812	0,0400
MQL 1:3	MQL 1:5	-0,0186	0,0639	0,0227

A não compreensão do 0 (zero) no intervalo de confiança, indica diferença estatisticamente significativa para o par em estudo, ou seja, existe diferença estatisticamente significativa entre o método convencional em comparação com os métodos (MQL puro; 1:1; 1:3 e 1:5).

Também existe diferença estatisticamente significativa entre o método MQL puro em comparação com os métodos (MQL 1:3 e 1:5).

O desempenho inferior do método convencional em relação aos métodos (MQL puro e MQL 1:1; 1:3 e 1:5), se explica pelo fato de que nesse método não ocorre a quebra da barreira aerodinâmica do ar em torno do rebolo, o que provoca o desvio do jato do fluido, dificultando a sua penetração na área de contato rebolo-peça.

Pode-se notar que no sistema MQL a mistura ar-óleo entra na região de corte com a mesma velocidade periférica do rebolo, quebrando assim a barreira aerodinâmica do ar em torno do rebolo, o que facilita a sua penetração.

Os valores obtidos para os métodos (MQL 1:3 e 1:5) foram mais satisfatórios do que os apresentados para o MQL puro (tradicional), pois a diluição da MQL em água diminui a viscosidade do óleo e contribui para a retirada de cavacos impregnados no rebolo, reduzindo a rugosidade.

De acordo com Bianchi *et al.* (2011), o melhor desempenho da mistura ar-óleo-água em comparação com ar-óleo na MQL tradicional ocorre, porque a menor viscosidade da água faz com que a borra cavaco-fluido seja menos aderente ao rebolo e, consequentemente, mais fácil de ser retirada dos poros do rebolo, pois os cavacos presos aos poros do rebolo riscam a peça, aumentando a sua rugosidade. Deve-se também observar, a influência da melhor capacidade de refrigeração da água em comparação com o óleo do sistema da MQL tradicional.

Os rebolos convencionais, como o utilizado neste trabalho (Al_2O_3), são indicados para a utilização da técnica da MQL devido à sua alta capacidade de alojar cavacos e consequentemente evitar a formação de borra (mistura de cavaco com fluido que empasta a superfície de corte do rebolo), a qual prejudicaria a qualidade superficial da retificação (TAWAKOLI *et al.*, 2011).

Apesar das diferenças estatísticas existentes entre alguns métodos, no geral, os valores de rugosidade obtidos nos ensaios são coerentes para o processo de retificação (R_a abaixo de $1,6\text{ }\mu\text{m}$), o que é atribuído, dentre outros, ao tempo de centelhamento.

Segundo Hara (1999), o efeito da rugosidade pôde ser melhorado pelo fato dos ensaios terem envolvido regiões de centelhamento de 8 segundos.

4.2 Desvio de Circularidade

Os resultados obtidos para o desvio de circularidade, referente à comparação entre as diferentes condições de lubri-refrigeração, estão demonstrados na figura 26.

A análise do desvio de circularidade foi realizada em 3 ensaios com cinco medições em cada um, gerando 15 medições em cada método de lubri-refrigeração.

Foi aplicado em cada método de lubri-refrigeração um teste ANOVA com fator único, o qual indicou, com um nível de confiança de 95%, que não houve diferença estatisticamente significativa entre os ensaios, $P > 0,05$, conforme tabela 5, o que permitiu a utilização das 15 medições em cada método de lubri-refrigeração como uma amostra única, pois se houvesse diferença estatística entre os ensaios, não seria possível aplicar ANOVA para os métodos.

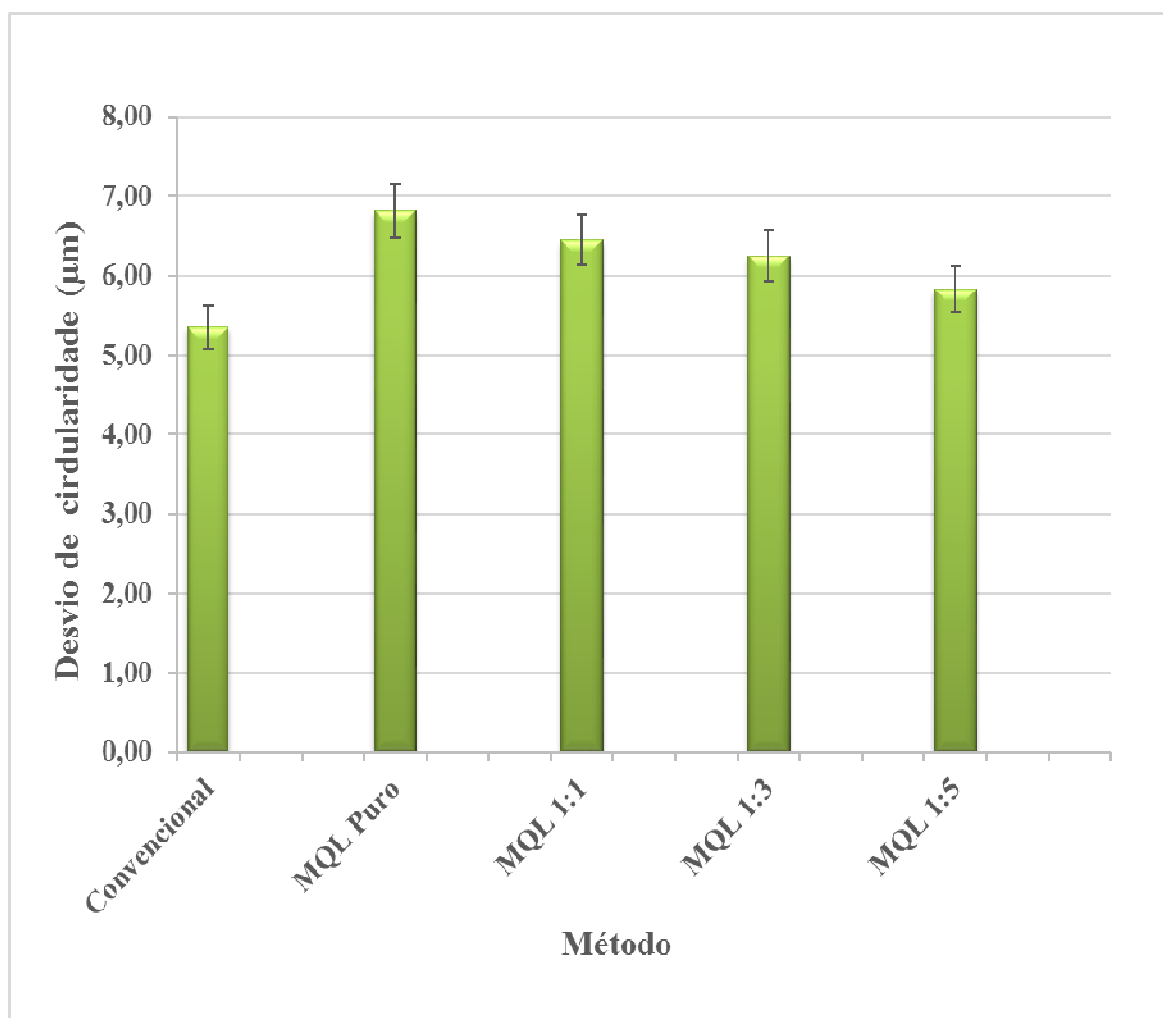


Figura 26 - Resultados de desvio de circularidade para as diferentes condições de lubri-refrigeração.

Conforme a tabela 5, os valores de $P > 0,05$ permitiram a utilização das 15 medições em cada método de lubri-refrigeração como uma amostra única.

Tabela 5 - Valor P com $\alpha = 0,05$ para o desvio de circularidade.

Métodos	Valor P
Convencional	0,84506
MQL Puro	0,15449
MQL 1-1	0,09907
MQL 1-3	0,88363
MQL 1-5	0,40799

Desta maneira aplicou-se novamente o teste ANOVA, sendo agora para análise comparativa entre os métodos de lubri-refrigeração e obteve-se um valor P de $3,72223 \times 10^{-6}$, ou seja, $P < 0,05$ indica que houve diferença estatisticamente significativa entre os métodos.

Porém, o teste de Tuckey, como pode ser verificado na tabela 6, mostra que não existe diferença significativa para os pares de métodos (Convencional e MQL 1:5), (MQL puro e MQL 1:1), (MQL puro e MQL 1:3), (MQL 1:1 e MQL 1:3), (MQL 1:1 e MQL 1:5) e (MQL 1:3 e MQL 1:5).

Tabela 6 - Teste de comparações múltiplas de Tukey para o desvio de circularidade entre os métodos

Pares de métodos		Intervalo de Confiança [$\alpha = 0,05$] para a diferença entre as médias		Diferença entre as médias
Convencional	MQL Puro	-2,2106	-0,7227	-1,4667
Convencional	MQL 1:1	-1,9840	-0,4960	-1,2400
Convencional	MQL 1:3	-1,5706	-0,0827	-0,8267
Convencional	MQL 1:5	-1,3106	0,1773	-0,5667
MQL Puro	MQL 1:1	-0,5173	0,9706	0,2267
MQL Puro	MQL 1:3	-0,1040	1,3840	0,6400
MQL Puro	MQL 1:5	0,1560	1,6440	0,9000
MQL 1:1	MQL 1:3	-0,3306	1,1573	0,4133
MQL 1:1	MQL 1:5	-0,0706	1,4173	0,6733
MQL 1:3	MQL 1:5	-0,4840	1,0040	0,2600

A não compreensão do 0 (zero) no intervalo de confiança, indica diferença estatisticamente significativa para o par em estudo, ou seja, existe diferença estatisticamente significativa entre o método convencional em comparação com os métodos (MQL puro; 1:1 e 1:3).

Também existe diferença estatisticamente significativa entre o método MQL puro em comparação com o método (MQL 1:5).

O desempenho inferior dos métodos (MQL puro; MQL 1:1 e 1:3) em relação ao método convencional, se explica pelo fato de que o sistema MQL, apesar de apresentar um bom efeito lubrificante, não atende aos requisitos refrigerantes exigidos na retificação.

De acordo com Hadad e Sadeghi (2012), a redução de fluido abundante ocasiona uma menor dissipação térmica de calor gerado na zona de corte, o que acarreta um maior desvio de circularidade, devido uma maior dilatação térmica na retificação.

Segundo Minke (1999), os elevados atritos gerados entre a peça e o rebolo, durante o processo de retificação, podem ser considerados como fator de extrema importância para o aparecimento dos erros de circularidade e, portanto, recomenda-se a utilização de um fluido com boa capacidade lubrificante, além da refrigerante para redução desses atritos.

O método convencional apresentou os melhores valores de circularidade, pois é o que apresenta o melhor efeito refrigerante. Com isso, há menores dilatações térmicas das peças, possibilitando maior exatidão dimensional e geométrica.

O desempenho superior do método (MQL 1:5) em relação ao método MQL puro, deve-se ao fato de a água ser um refrigerante mais eficaz do que o óleo, e como já citado anteriormente, o aumento da proporção de água no MQL diminui a viscosidade do óleo, amenizando a formação da pasta de fluido com cavaco e, conseqüentemente, o entupimento dos poros do rebolo por cavacos, além de melhorar a capacidade de refrigeração da mistura. Por esses motivos, o aumento da proporção de água no MQL proporcionou menores valores de circularidade.

É importante destacar que os valores de circularidade para o MQL com adição de água na proporção de 1:5 e o método convencional mantiveram-se próximos (em valores absolutos), e não apresentaram diferenças estatisticamente significativas, pois ambos os métodos apresentaram um melhor poder refrigerante.

4.3 Desgaste Diametral do Rebolo

As figuras 27 e 28 apresentam as micrografias realizadas no corpo de prova de impressão do perfil de desgaste do rebolo, o qual medem o desgaste do rebolo em cada método de lubri-refrigeração.

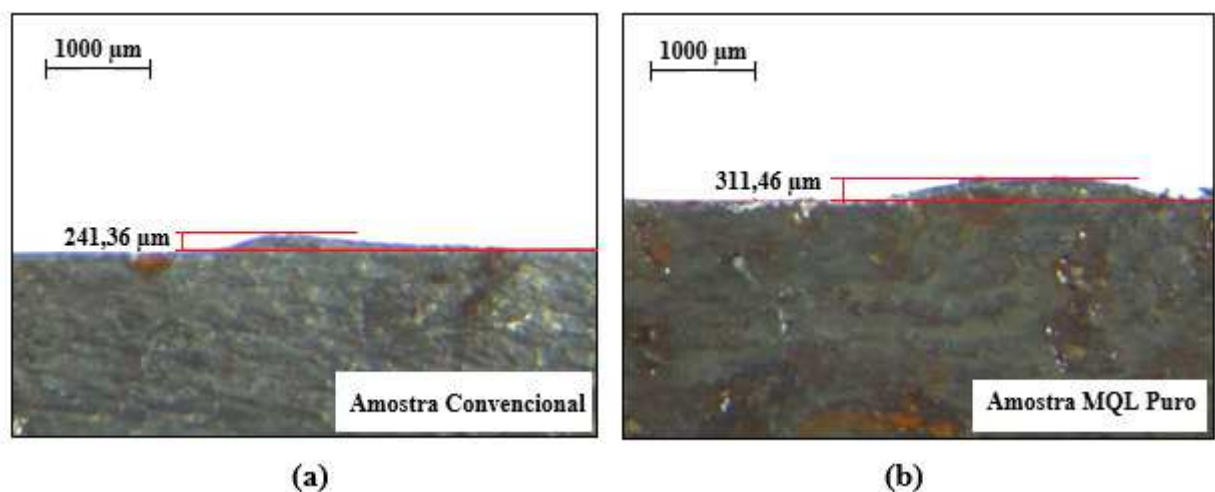


Figura 27 - Micrografias que medem o desgaste do rebolo nos métodos, (a) Convencional de lubri-refrigeração, (b) MQL puro.

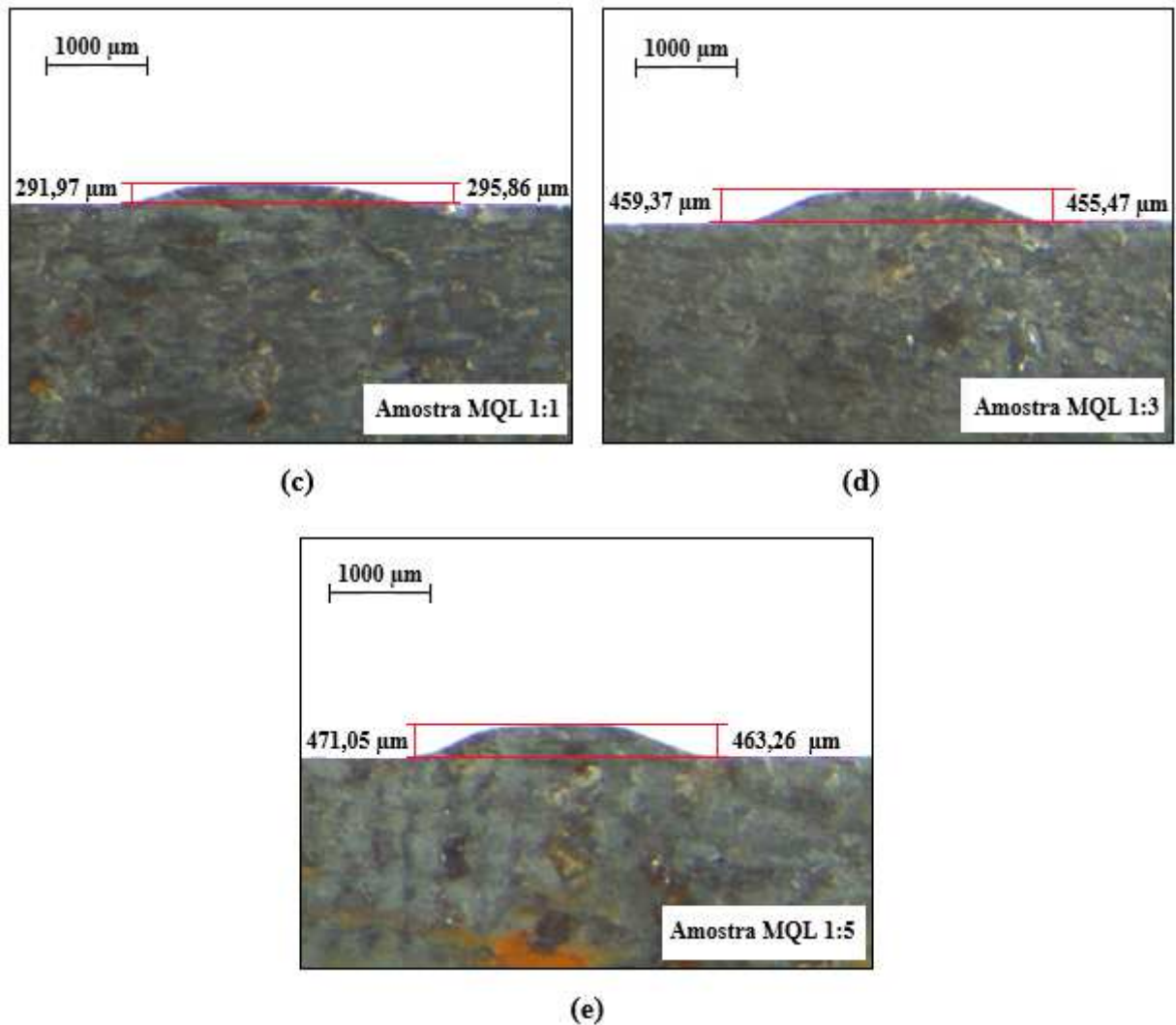


Figura 28 - Micrografias que medem o desgaste do rebolo nos métodos, (c) MQL 1:1(óleo/água), (d) MQL 1:3 (óleo/água), (e) MQL 1:5 (óleo/água).

Para a medição do desgaste diametral médio do rebolo não foram feitas repetições.

Os resultados obtidos para o desgaste diametral do rebolo, referente à comparação entre as diferentes condições de lubri-refrigeração, estão demonstrados na figura 29.

A análise estatística foi feita entre os métodos de lubri-refrigeração estudados, empregando um teste de hipóteses para médias ANOVA com fator único, que resultou em um valor P de $2,4443 \times 10^{-8}$ indicando, com um nível de confiança de 95%, a rejeição da hipótese nula de igualdade entre as médias, ou seja, $P < 0,05$ indica que houve diferença estatisticamente significativa entre os métodos de lubri-refrigeração.

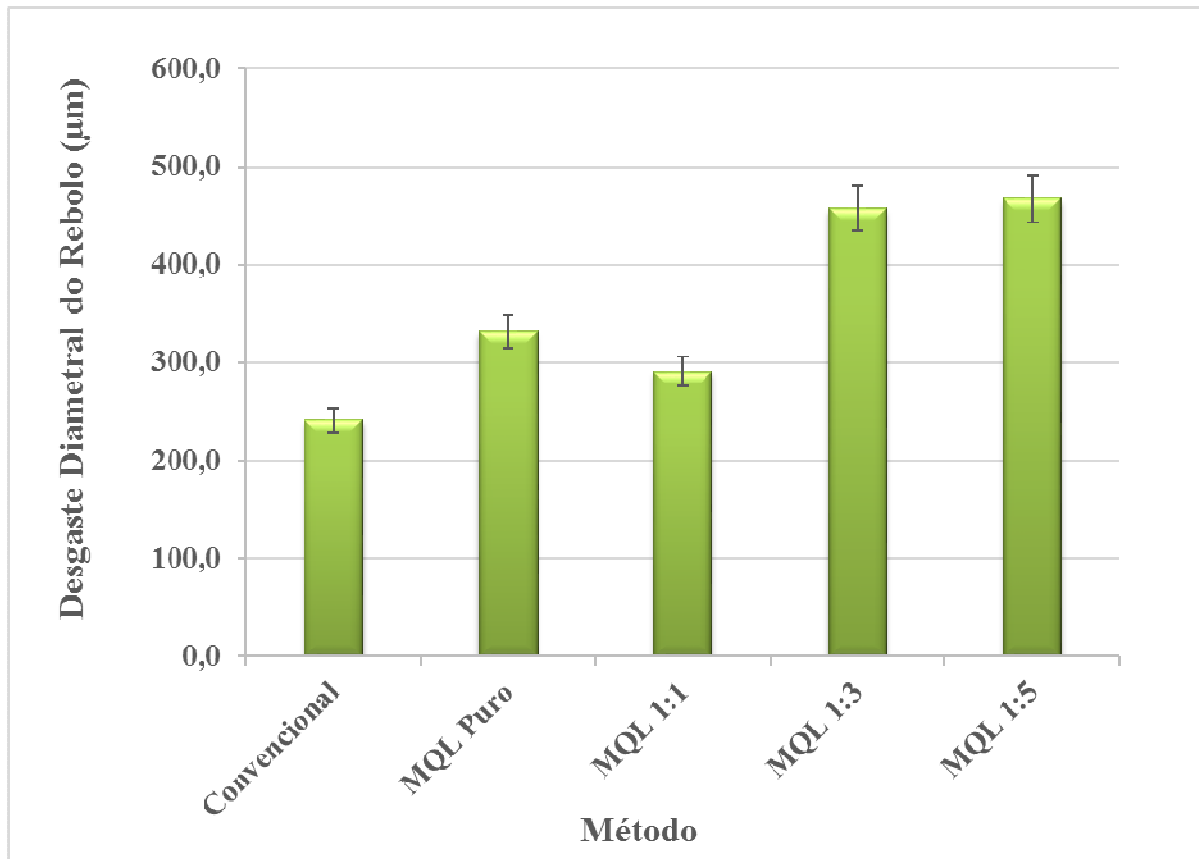


Figura 29 - Resultados de desgaste diametral do rebolo para as diferentes condições de lubri-refrigeração.

Porém, o teste de Tuckey, como pode ser verificado na tabela 7, mostra que não existe diferença significativa para o par de métodos (MQL 1:3 e MQL 1:5).

Tabela 7 - Teste de comparações múltiplas de Tukey para o desgaste diametral do rebolo entre os métodos

Pares de métodos		Intervalo de Confiança [$\alpha = 0,05$] para a diferença entre as médias		Diferença entre as médias
Convencional	MQL Puro	-82,2029	-57,9971	-70,1000
Convencional	MQL 1:1	-64,6579	-40,4521	-52,5550
Convencional	MQL 1:3	-228,1629	-203,9571	-216,0600
Convencional	MQL 1:5	-237,8979	-213,6921	-225,7950
MQL Puro	MQL 1:1	5,4421	29,6479	17,5450
MQL Puro	MQL 1:3	-158,0629	-133,8571	-145,9600
MQL Puro	MQL 1:5	-167,7979	-143,5921	-155,6950
MQL 1:1	MQL 1:3	-175,6079	-151,4021	-163,5050
MQL 1:1	MQL 1:5	-185,3429	-161,1371	-173,2400
MQL 1:3	MQL 1:5	-21,8379	2,3679	-9,7350

A não compreensão do 0 (zero) no intervalo de confiança, indica diferença estatisticamente significativa para o par em estudo, ou seja, com exceção do par de métodos (MQL 1:3 e MQL 1:5), existe diferença estatisticamente significativa entre todos os outros pares de métodos.

Dessa maneira, pode-se observar que o menor desgaste diametral do rebolo ocorreu no método convencional, devido o melhor efeito refrigerante desse método. De acordo com Malkin (2008), o desgaste diametral do rebolo é ocasionado pela deteriorização térmica e pela elevada solicitação mecânica a que o rebolo é submetido, ou seja, quanto melhor a dissipação térmica da região de corte, menor é a perda de resistência do ligante e, conseqüentemente, é menor o desgaste do rebolo.

Silva *et al.* (2007) citam que o aumento da lubri-refrigeração proporcionado pelo fluido de corte, resulta na diminuição do desgaste do rebolo através da redução do atrito entre o grão e a peça e do atrito do cavaco, permitindo que os grãos abrasivos permaneçam por mais tempo unidos ao ligante, ocasionando menor desgaste do rebolo.

O método (MQL 1:1) tendeu ao melhor resultado, ficando atrás apenas do método convencional. Esse fato, de acordo com Yamamoto *et al.* (2014), ocorre devido à relação intermediária (50%) que melhora a refrigeração e lubrificação e a capacidade de limpeza do rebolo no ponto de contato, levando a um menor desgaste diametral do rebolo.

O resultado para o método MQL puro, ficou entre os métodos, convencional e (MQL 1:1). Segundo Sarni (2011), no método MQL puro, um maior número de cavacos permanecem aderidos à superfície do rebolo atritando com a peça e, este atrito aliado ao baixo poder de refrigeração deste método, contribui positivamente para a geração de calor, o que causa a dilatação do conjunto máquina-peça-ferramenta, acarretando um aumento na força normal de corte, levando a uma maior remoção de partículas do rebolo, desgastando-o mais rapidamente.

Além disso, de acordo com Oikawa *et al.* (2011), há um agravante na técnica do MQL puro, no qual há a formação de uma “borra” de cavaco com óleo que a força centrífuga do rebolo não consegue eliminar. Ela entope os poros do rebolo e prejudica a sua ação de corte e provoca um desgaste excessivo do rebolo.

Os métodos (MQL 1:3 e 1:5) apresentaram as condições menos efetivas de lubri-refrigeração, pois, um maior número de cavacos permaneceu aderido à superfície do rebolo em atrito com a peça e, este atrito, aliado ao baixo poder de lubrificação, resultou em um maior desgaste.

De acordo com Yamamoto *et al.* (2014), verifica-se que quanto mais água na mistura, como é o caso dos métodos (MQL 1:3 e MQL 1:5) desse estudo, maiores são os valores de força de corte obtidos. Isso explica porque nesse momento existe uma ineficiência na lubrificação. Na retificação os grãos abrasivos vão se desgastando ao longo da usinagem, sendo que os seus topos começam a perder as “cristas”, ou seja, sua afiação, tornando os grãos “cegos”. Por ineficiência de lubrificação na região de contato, ou seja, com aumento de água no método de lubri-refrigeração, existe perda prematura dos grãos ocorrendo um aumento nos esforços de remoção do material, originando deformações na superfície do material ao invés de sua efetiva remoção. Com aumento desses esforços e deformações citadas ocorre o aumento da força de corte tangencial, em consequência de maiores atritos do topo do grão abrasivo com a superfície do material, gerando temperaturas altas e calor envolvido no processo.

4.4 Potência de Corte na Retificação

A figura 30 apresenta a comparação da potência de corte na retificação entre as diferentes condições de lubri-refrigeração.

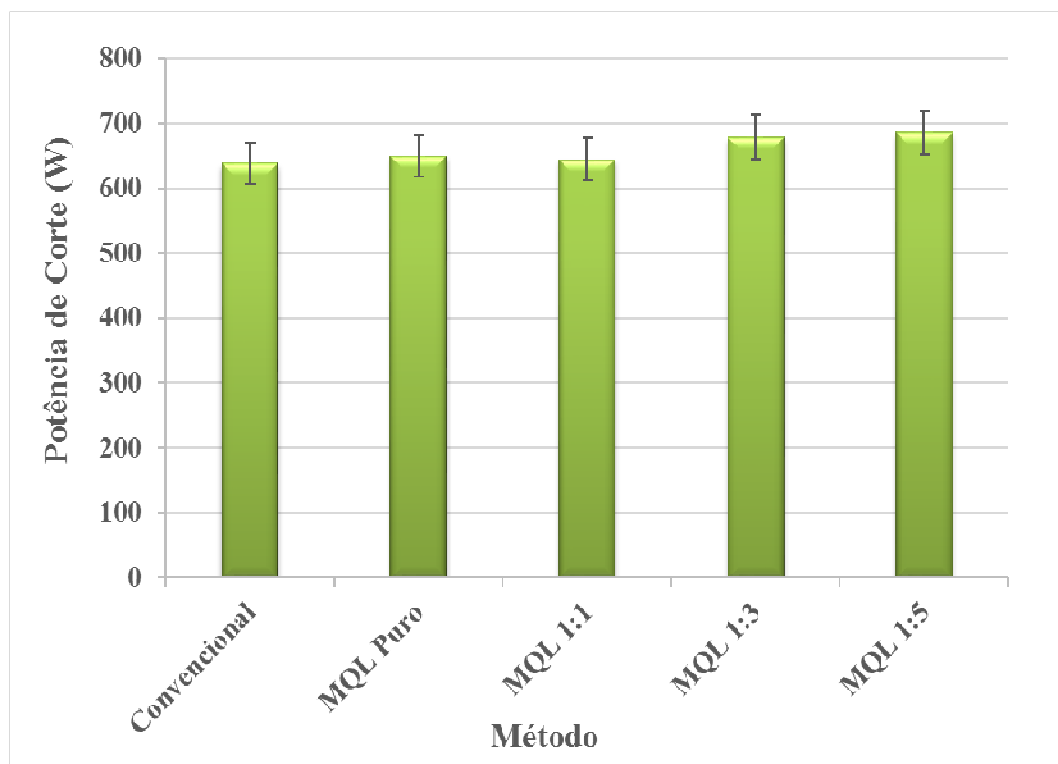


Figura 30 - Resultados de potência de corte na retificação para as diferentes condições de lubri-refrigeração.

Os resultados de potência de corte na retificação foram obtidos por meio do processamento e conversão dos dados em tempo real, durante os ensaios.

As medições de potência de corte na retificação foram realizadas por ensaio (três medições para cada condição de lubri-refrigeração) e a análise estatística foi feita entre os métodos de lubri-refrigeração estudados, empregando um teste de hipóteses para médias ANOVA com fator único, que resultou em um valor P de 0,2257, indicando, com um nível de confiança de 95%, a não rejeição da hipótese nula de igualdade das médias, ou seja, $P > 0,05$, indica que não houve diferença estatisticamente significativa entre os métodos.

Esse fato também é confirmado pelo teste de comparações múltiplas de Tukey, conforme pode ser verificado na tabela 8, todos os intervalos de confiança contém o 0 (zero), indicando que não há diferenças significativas para nenhum dos pares.

Portanto, não houve diferença estatisticamente significativa entre os métodos de lubri-refrigeração referente a potência de corte na retificação.

Tabela 8 - Teste de comparações múltiplas de Tukey para a potência de corte na retificação entre os métodos.

Pares de métodos		Intervalo de Confiança [$\alpha = 0,05$] para a diferença entre as médias		Diferença entre as médias
Convencional	MQL Puro	-86,8484	64,1817	-11,3333
Convencional	MQL 1:1	-81,8484	69,1817	-6,3333
Convencional	MQL 1:3	-115,1817	35,8484	-39,6667
Convencional	MQL 1:5	-122,8484	28,1817	-47,3333
MQL Puro	MQL 1:1	-70,5150	80,5150	5,0000
MQL Puro	MQL 1:3	-103,8484	47,1817	-28,3333
MQL Puro	MQL 1:5	-111,5150	39,5150	-36,0000
MQL 1:1	MQL 1:3	-108,8484	42,1817	-33,3333
MQL 1:1	MQL 1:5	-116,5150	34,5150	-41,0000
MQL 1:3	MQL 1:5	-83,1817	67,8484	-7,6667

Pode-se comentar em termos de valores absolutos, que a potência de corte na retificação no método convencional apresentou menores valores e esta mesma tendência foi observada para o método (MQL 1:1). De acordo com Canton *et al.* (2011), isso ocorre porque a capacidade de se retirar calor do sistema rebolo-peça é melhor na refrigeração convencional e, como o método (MQL 1:1) combina o poder de refrigeração e de lubrificação, também obtém-se menores valores de potência de corte na retificação.

Quando se utiliza o método MQL puro, observa-se em valores absolutos, que a potência de corte requerida é levemente maior do que no método (MQL 1:1). Segundo Canton *et al.* (2011), isso ocorre porque ao se utilizar apenas óleo, há pouca refrigeração, ocasionando maior dilatação do sistema máquina-peça-rebolo e consequentemente maior potência.

Nas técnicas (MQL 1:3 e 1:5) observa-se, em valores absolutos, um aumento da potência de corte durante a retificação. Segundo Belentani *et al.* (2011), isso se dá pelo fato de haver menor lubrificação nesse método, ou seja, a menor lubrificação gera, naturalmente, uma maior força de atrito entre rebolo e peça, o que sugere uma maior potência para a realização do corte. Quanto maior a adição de água, menor a concentração de óleo no spray e, portanto, menor poder lubrificante ele terá, fazendo com que o atrito seja maior.

4.5 Emissão Acústica

Os resultados de Emissão Acústica (RMS) em milivolts (mV) estão apresentados na figura 31, referente à comparação entre as diferentes condições de lubri-refrigeração.

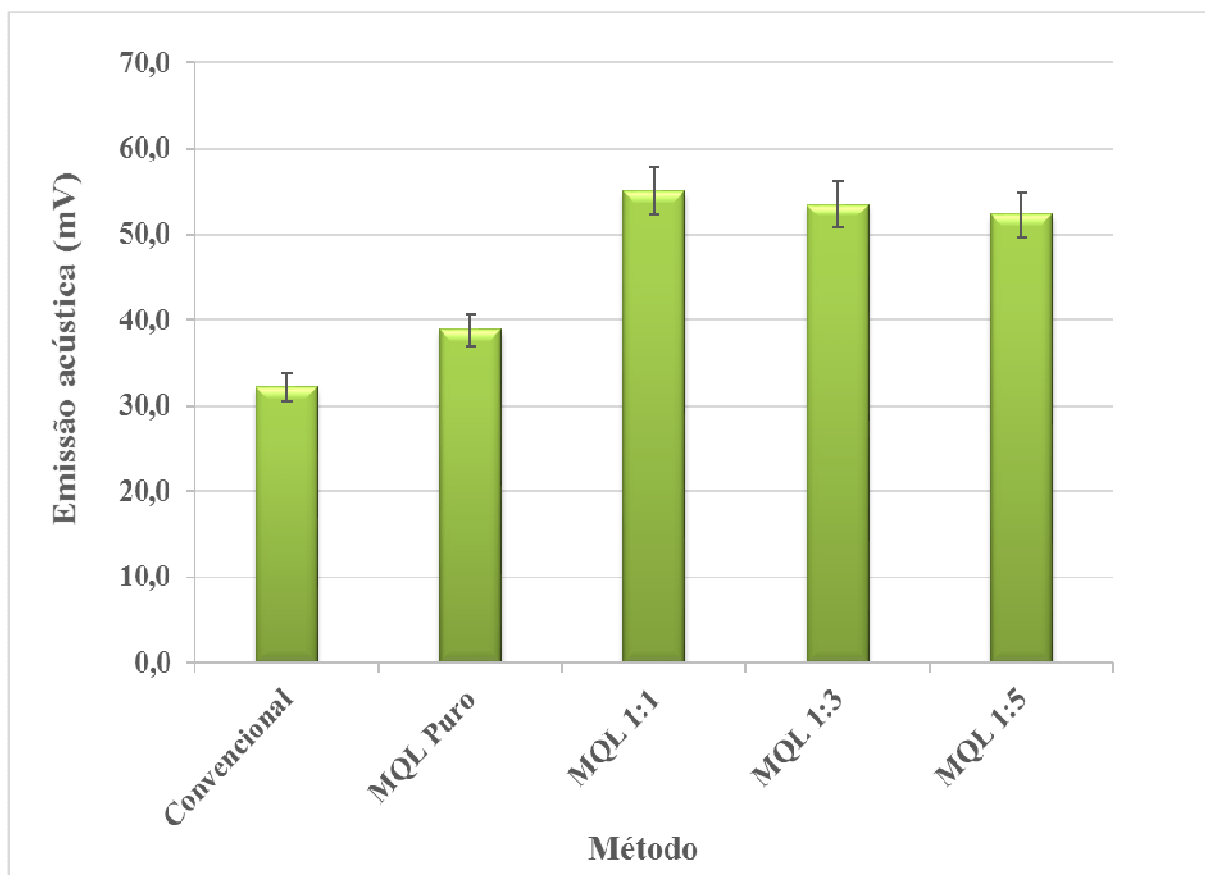


Figura 31 - Resultados de emissão acústica para as diferentes condições de lubri-refrigeração.

As medições de emissão acústica foram realizadas por ensaio (três medições para cada condição de lubri-refrigeração) e a análise estatística foi feita entre os métodos de lubri-refrigeração estudados, empregando um teste de hipóteses para médias ANOVA com fator único, que resultou em um valor P de $5,6425 \times 10^{-9}$, indicando, com um nível de confiança de 95%, a rejeição da hipótese nula de igualdade das médias, ou seja, $P < 0,05$, indica que houve diferença estatisticamente significativa entre os métodos. Porém o teste de Tuckey, como pode ser verificado na tabela 9, mostra que não existe diferença significativa para os pares de métodos (MQL 1:1 e MQL 1:3); (MQL 1:1 e MQL 1:5) e (MQL 1:3 e MQL 1:5)

Tabela 9 - Teste de comparações múltiplas de Tukey para a emissão acústica entre os métodos

Pares de métodos		Intervalo de Confiança [$\alpha = 0,05$] para a diferença entre as médias		Diferença entre as médias
Convencional	MQL Puro	-10,5150	-2,8955	-6,7053
Convencional	MQL 1:1	-26,7094	-19,0898	-22,8996
Convencional	MQL 1:3	-25,1756	-17,5561	-21,3658
Convencional	MQL 1:5	-23,9524	-16,3329	-20,1426
MQL Puro	MQL 1:1	-20,0041	-12,3846	-16,1943
MQL Puro	MQL 1:3	-18,4703	-10,8508	-14,6606
MQL Puro	MQL 1:5	-17,2471	-9,6276	-13,4374
MQL 1:1	MQL 1:3	-2,2760	5,3435	1,5338
MQL 1:1	MQL 1:5	-1,0528	6,5667	2,7570
MQL 1:3	MQL 1:5	-2,5866	5,0330	1,2232

A não compreensão do 0 (zero) no intervalo de confiança, indica diferença estatisticamente significativa para o par em estudo, ou seja, existe diferença estatisticamente significativa entre o método convencional em comparação com os métodos (MQL puro; 1:1; 1:3 e 1:5). Também existe diferença estatisticamente significativa entre o método MQL puro em comparação com os métodos (MQL 1:1; 1:3 e 1:5).

O método convencional apresentou desempenho superior em relação aos métodos (MQL puro e MQL 1:1; 1:3 e 1:5). De acordo com Funes Junior *et al.* (2011), no método convencional, a grande quantidade de água na composição do fluido reduz a quantidade de cavacos na zona de corte, pois não há formação da pasta de fluido com cavaco. Dessa maneira, quanto mais cavacos são retirados dos poros do rebolo, menor o atrito com a peça sendo retificada, bem como o ruído gerado.

O método de MQL puro obteve maiores valores de emissão acústica em relação ao método convencional.

Para Silva (2014), essa técnica de MQL puro não consegue retirar os cavacos dos poros do rebolo, aumentando assim os ruídos gerados durante o processo de retificação.

De acordo com Figueiredo *et al.* (2011), nota-se uma maior liberação de energia na lubrificação com MQL. Isso acontece devido a fatores como: a formação de cavacos, a menor dissipação de temperatura pela pouca refrigeração do óleo e a menor ação de lubrificante no método MQL, quando comparado ao método convencional.

Segundo Babel *et al.* (2013), a emissão acústica engloba características referentes a fenômenos como a formação de cavacos, atrito, fratura de ligante e a transição de fase termomecânica ativa.

Os métodos (MQL 1:1; 1:3 e 1:5) apresentaram os maiores valores de emissão acústica quando comparados com os demais métodos em estudo. Isso se deve ao seu baixo poder lubrificante, pois, a menor lubrificação gera, naturalmente, maior força de atrito entre rebolo e peça, aumentando os ruídos gerados.

Porém, devido aos valores de dispersão obtidos nos resultados, não houve diferença estatisticamente significativa entre as medidas realizadas para esses métodos, evidenciando sua proximidade em termos de emissão acústica.

4.6 Microestrutura

A Microscopia Óptica é uma técnica utilizada para a caracterização da estrutura da peça, pois permite analisar as superfícies, mostrando uma visão geral de danos térmicos, desgaste e/ou falhas.

Durante o processo de retificação, quando a superfície da peça é exposta a altas temperaturas por tempo suficiente, alterações microestruturais podem ocorrer.

É nesse aspecto que as condições de lubri-refrigeração, juntamente com o material da ferramenta, exercem fundamental importância no controle das temperaturas e dissipação do calor.

Para comparar as microestruturas e verificar a ocorrência de danos térmicos, desgaste e/ou falhas, foram realizadas análises metalográficas com ampliação de 200 vezes em seções transversais dos corpos de prova, conforme apresentam as figuras 32 a 36.

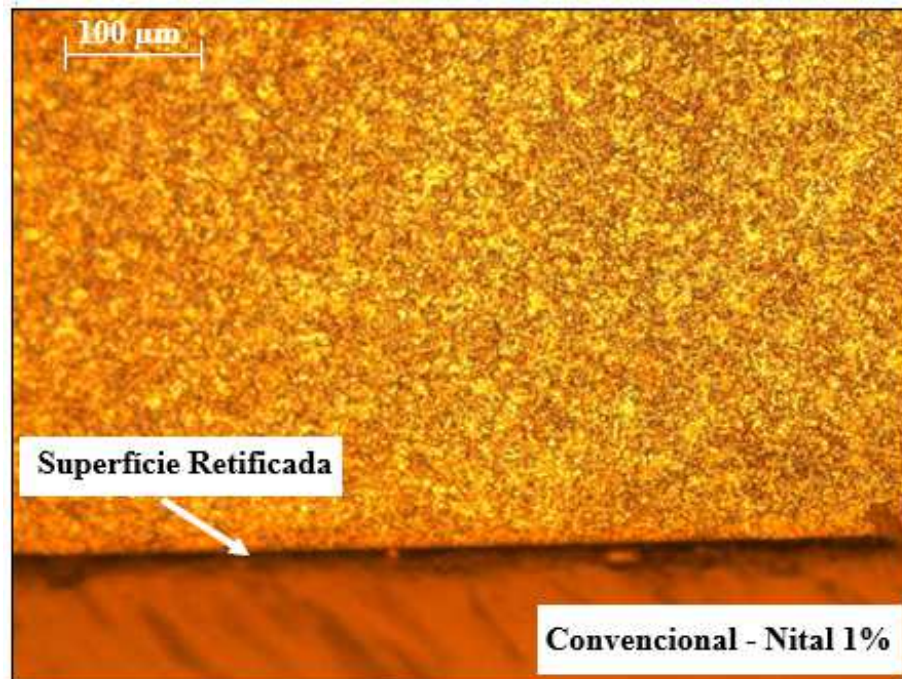


*Figura 32 - Metalografia de corpos de prova. Nital 1%.
Método convencional de lubrificação.*

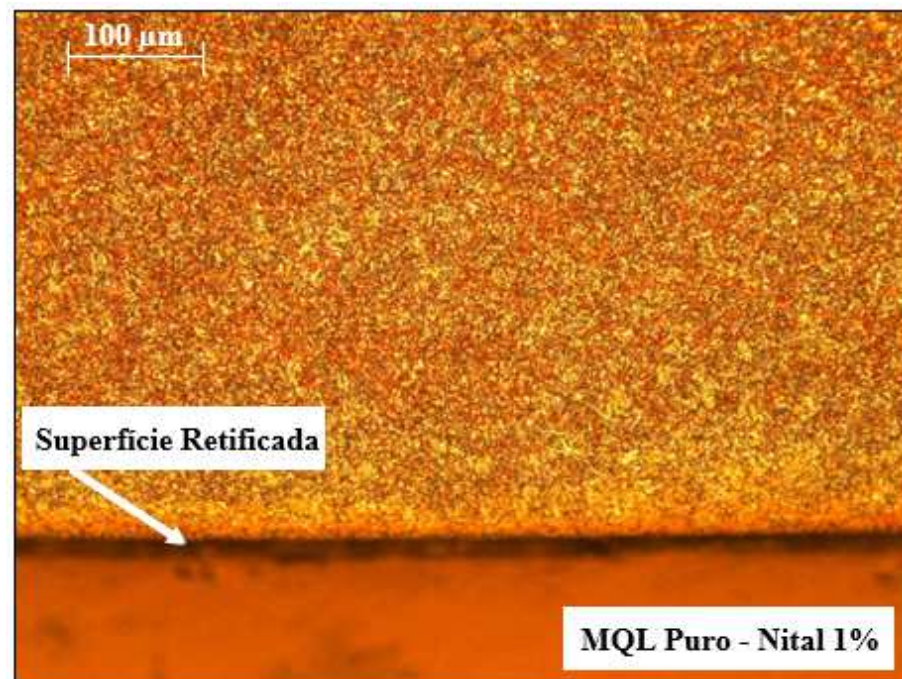


*Figura 33 - Metalografia de corpos de prova. Nital 1%.
Método MQL puro.*

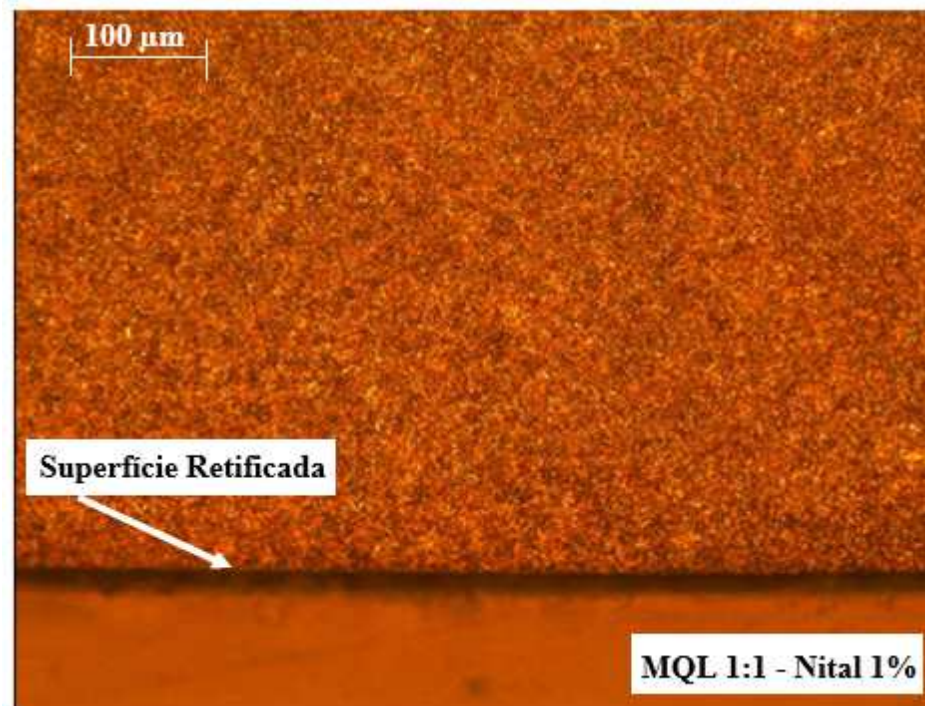


*Figura 34 - Metalografia de corpos de prova. Nital 1%.
Método MQL 1:1.*

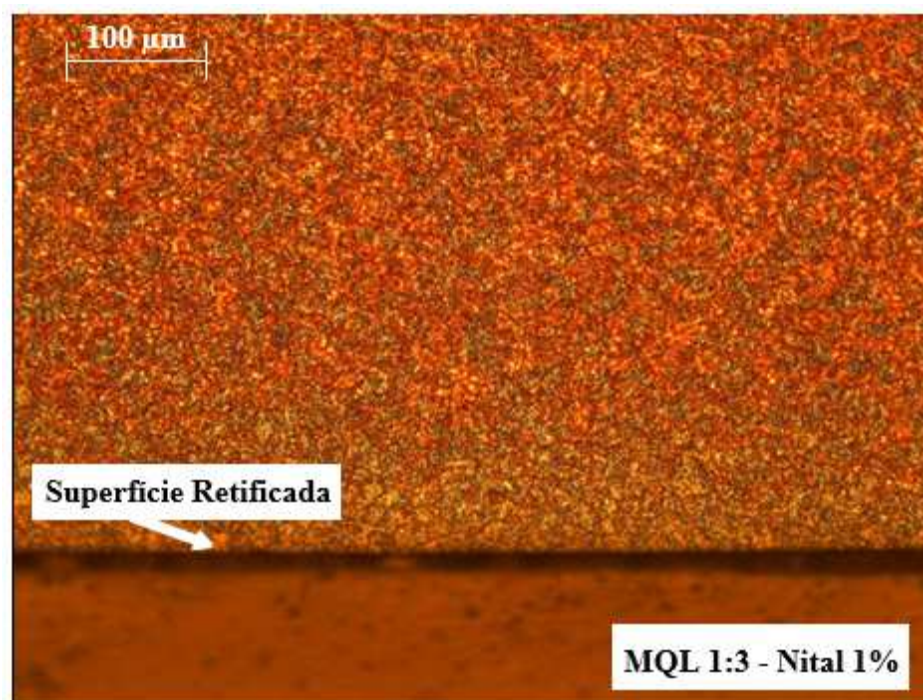


*Figura 35 - Metalografia de corpos de prova. Nital 1%.
Método MQL 1:3.*



*Figura 36 - Metalografia de corpos de prova. Nital 1%.
Método MQL 1:5.*

Segundo Marinescu *et al.* (2004) pode ocorrer a queima branca durante a retificação, por se atingir temperaturas superiores a de austenitização do material, seguida de um rápido resfriamento, podendo promover uma nova têmpera a superfície retificada. A queima branca é muito prejudicial a integridade da peça, pois a superfície endurecida torna-se extremamente frágil, além de serem verificadas tensões residuais de tração que tornam o material suscetível a trincas, reduzindo consideravelmente a resistência ao desgaste e a fadiga da peça.

Essa camada retemperada normalmente possui uma pequena espessura seguida de uma região com perda de dureza, denominada queima escura. A queima escura não indica transformações microestruturais, porém, quando a martensita sofre este super-revenimento há uma diminuição da dureza. A profundidade de ocorrência da queima escura não é superior a 100 μm (MARINESCU *et al.* 2004).

Apesar de o material do rebolo (Al_2O_3) não ser um bom dissipador de calor, analisando as metalografias realizadas, verifica-se que todas as condições de lubrificação propostas permitiram condições de temperatura que impediram os fenômenos de alterações microestruturais, com ocorrências de camadas branca e escura ou trincas decorridas da usinagem, ou seja, a microestrutura existente em cada um dos métodos estudados não sofreu alterações.

4.7 Microdureza

Os valores obtidos no ensaio de microdureza em todas as amostras estudadas estão detalhados na figura 37.

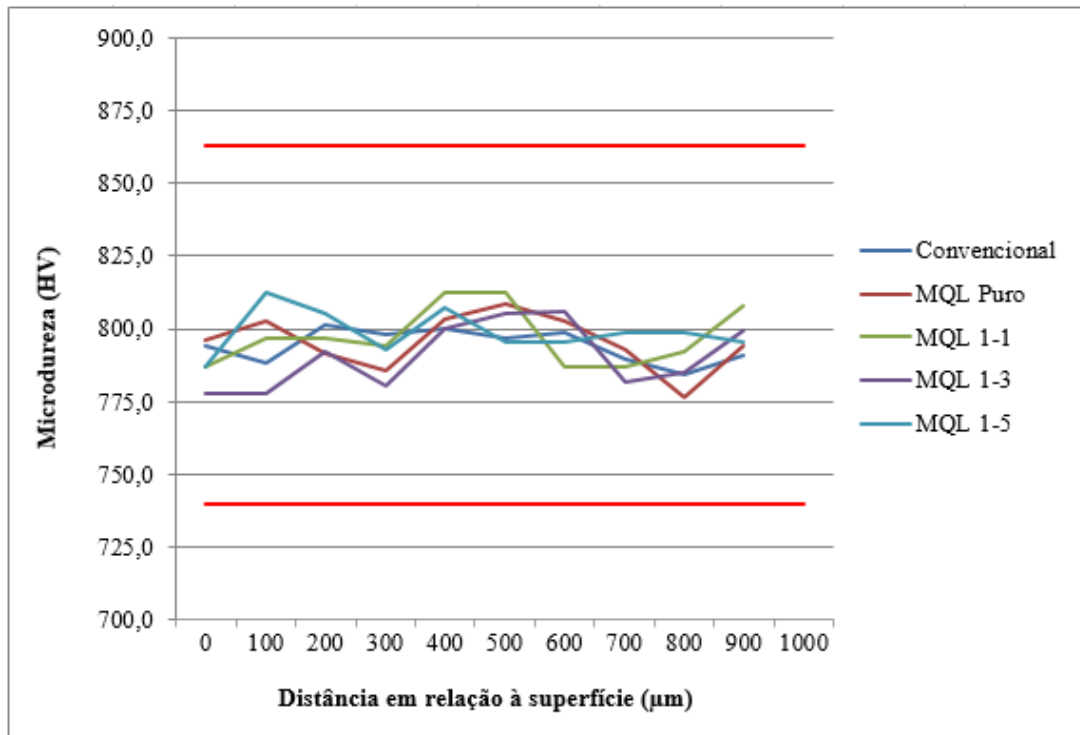


Figura 37 - Resultados de microdureza para as amostras estudadas

As medições de microdureza complementam os resultados da metalografia, comprovando, por meio de uma variável quantitativa, a isenção de danos térmicos.

As diferentes leituras encontradas nas diferentes condições de lubri-refrigeração estudadas, devem-se ao fato de se tratar de peças diferentes. A dispersão encontrada em todos os resultados obtidos é típica de medições de microdureza e, portanto, todos os métodos atenderam às tolerâncias especificadas nos projetos.

A dureza média do material, após a têmpera e o revenimento, é de 62HRc (740HV, destacada na figura 37 pela linha vermelha inferior), podendo alcançar 66HRc (863HV, destacada na figura 37 pela linha vermelha superior) na condição temperada. Sendo assim, pode-se observar que o valor da microdureza, em todos os casos e em todas as distâncias em relação à superfície indentada, manteve-se dentro da tolerância esperada.

Portanto, pode-se concluir que não houve perda de dureza por causa das temperaturas de retificação.

5. CONCLUSÕES

Baseado nos resultados obtidos neste trabalho, referente à retificação cilíndrica externa de mergulho do aço ABNT 52100 com rebolo de Óxido de Alumínio Al_2O_3 , pode-se concluir que:

Em termos de rugosidade, os métodos (MQL puro e MQL 1:1; 1:3 e 1:5) apresentaram os melhores resultados em relação ao método convencional de lubri-refrigeração, e os valores obtidos para os métodos (MQL 1:3 e 1:5) foram mais satisfatórios do que os apresentados para o MQL puro (tradicional). No geral, todos os valores de rugosidade obtidos neste estudo são coerentes para o processo de retificação, com R_a abaixo de $1,6 \mu m$, o que é atribuído, dentre outros, ao tempo de centelhamento.

Em relação ao desvio de circularidade da peça, o método convencional apresentou os melhores valores em comparação com os métodos (MQL puro; MQL 1:1 e 1:3), e o método (MQL 1:5) apresentou desempenho superior em relação ao método MQL puro. Importante destacar que (em valores absolutos) a MQL 1:5 e o método convencional mantiveram-se próximos, e não apresentaram diferenças estatisticamente significativas, pois ambos os métodos apresentaram um melhor poder refrigerante.

O menor desgaste diametral do rebolo ocorreu no método convencional, e o método (MQL 1:1) também apresentou ótimos resultados, sobretudo devido à relação de 50% óleo e 50% água, que melhora a refrigeração e a lubrificação, consequentemente aumentando a capacidade de limpeza do rebolo no ponto de contato. O resultado obtido no método MQL puro (tradicional), ficou entre os métodos convencional (fluido abundante) e (MQL 1:1). Os métodos (MQL 1:3 e MQL 1:5) apresentaram as condições menos efetiva de lubri-refrigeração.

Referente a potência de corte na retificação, pode-se concluir que não houve diferença estatisticamente significativa entre os métodos.

A emissão acústica foi menor no método convencional, pois a grande quantidade de água na composição do fluido reduz a quantidade de cavacos na zona de corte, diminuindo o atrito e o ruído gerado. Para os métodos (MQL 1:1; 1:3 e 1:5) a emissão acústica foi maior, apresentando desempenho inferior em relação à emissão acústica dos métodos (Convencional e MQL puro), isso se deve ao baixo poder lubrificante desses métodos, pois a menor lubrificação gera, naturalmente, maior força de atrito entre rebolo e peça, aumentando os ruídos gerados.

Em relação à microestrutura e à microdureza, independentemente do método utilizado de lubrificação, não ocorreram alterações na estrutura dos corpos de prova estudados, evidenciando assim a ausência de trincas ou qualquer dano térmico à superfície, não comprometendo a dureza do material.

Em função da redução significativa da quantidade de fluido utilizada no método MQL, podem ser reduzidos os impactos ambientais e os danos à saúde dos trabalhadores, possibilitando um processo de retificação mais limpo, que pode acarretar em ganhos econômicos.

Portanto, em comparação ao método convencional de lubri-refrigeração, as técnicas MQL, apresentadas neste trabalho, mostraram-se como alternativas viáveis de usinagem.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Objetivando o aprimoramento da lubri-refrigeração MQL, seguem na sequência algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Utilizar jato de ar para limpeza do rebolo posicionado em diferentes ângulos de incidência e avaliar os resultados na aplicação dos métodos MQL e MQL/Água em comparação com o sistema convencional de lubri-refrigeração, na retificação cilíndrica externa de mergulho do aço ABNT 52100, com rebolo de óxido de alumínio (Al_2O_3) e com rebolo de CBN.
- Realizar estudo para a captação e reaproveitamento das névoas de óleo geradas no método MQL.
- Avaliar os níveis de ruído e concentração de névoas geradas no ambiente de trabalho durante a retificação com utilização do sistema MQL.
- Realizar estudo financeiro para aplicação do método MQL em comparação com o sistema convencional de lubri-refrigeração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGOSTINHO, O. L., RODRIGUES, A. C. S., LIRANI, J. **Princípios de Engenharia de fabricação Mecânica-Processos de Fabricação-Volume 2**. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1981.
- ALFARES, M., ELSHARKAWY, A. **Effect of grinding forces on the vibration of grinding machine spindle system**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 40, p. 2003 - 2030, 2009.
- ANDERSON, D., WARKENTIN, A., BAUER, R. **Experimental validation of numerical thermal models for dry grinding**. Journal of materials processing technology, 204, p. 269-278, 2008.
- ALVES, M., BIANCHI, E., AGUIAR, P. **Influência da lubri-refrigeração na qualidade superficial de metais retificados**. Metalurgia e materiais, 2011, p. 505-512.
- BABEL, R., KOSHY, P. AND WEISS, M. 2013. **Acoustic Emission Spikes at Workpiece Edges in Grinding: Origin and Applications**, International Journal of Machine Tools And Manufacture.
- BALDO, E. D. **Redução do ciclo de retificação cilíndrica de mergulho com auxílio da emissão acústica**. Dissertação de Mestrado - UNICAMP, Campinas, 1994.
- BARTZ, W.J. **Lubricants and the environment**, Tribology International, 31, p. 35–47, 1998.
- BELENTANI, M. R.; CANTON, B., BIANCHI, E. C.; JUNIOR, FUNES, H.; DINIZ, A.E; AGUIAR, P.R. **Utilização da Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) com água no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho em aços endurecidos com rebolos CBN**. (2011).

BIANCHI, E. C.; CANTON, B.; SARNI, E. A.; AGUIAR, P.R.; DINIZ, A.E. **Retificação cilíndrica externa de mergulho de cerâmicas avançadas com adição de água.** Revista Máquinas e Metais, nº 585, p. 66-75, Outubro. 2014.

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

BIELOMATIK, a company of the Leuze group GmbH, Neuffen, Alemanha, Disponível em: <http://www.bielomatik.com/en/lubrication/minimalquantitylubrication/2337?pms=2337>. Acessado em: 12/09/2014.

BRINKSMEIER, E.; HEINZEL, C.; WITTMANN, M. **Friction, Cooling and Lubrication in Grinding.** CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 48, p. 581-598, 1999.

CANTON, B., SARNI, E. A., BIANCHI, E. C., DINIZ, A. E., & DE AGUIAR, P. R. (2011). **Utilização da Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) com água no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho em cerâmicas com rebolos diamantados.**

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

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

CHOI, T.J.; SUBRAHMANYA, N.; LI, H.; SHIN Y.C. **Generalized practical models of cylindrical plunge grinding processes.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, v.48, p. 61-72, 2008.

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

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, School of Engineering, Liverpool, Reino Unido, Vol. 40, p. 209-223, 1999.

FIGUEIREDO, R.R., BIANCHI, E.C., AGUIAR, P.R.; JUNIOR, FUNES, H., ANJOS, M.A. **Estudo da aplicação de diferentes condições de lubri-refrigeração na retificação do aço VP50 com rebolo convencional de carbureto de silício preto com óxido de alumínio branco.** In: VIII - Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM, 2014, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil, 2014.

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

GONCALVES, P.S.C. **Boas práticas ambientais na utilização de fluidos de corte nos processos de usinagem.** Dissertacao de Mestrado - UNESP, Bauru, 2008.

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

GUO, C., MALKIN, S. **Energy Partition and Cooling During Grinding.** Journal of Manufacturing Processes, vol. 2, Nº. 3, 2000.

GUO, C.; SHI, Z.; ATTIA, H.; MCINTOSH, D. **Power and Wheel Wear for Grinding Nickel Alloy with Plated CBN Wheels.** CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 56, p.343-346, 2007.

HADAD, M.J., TAWAKOLI, T., SADEGHI, M.H., SADEGHI, B., 2012. **Temperature and energy partition in minimum quantity lubrication - MQL grinding process.** International Journal of Machine Tools & Manufacture 54–55, 10–17.

HAFENBRAEDL, D.; MALKIN, S. **Tecnologia ambientalmente correta para retificação cilíndrica interna.** Revista Máquinas & Metais, Vol. 37, nº 426, p. 40-55, julho 2001.

HARA, C.M., **Uma contribuição para o monitoramento de retificação cilíndrica de mergulho,** Tese de D.Sc., Unicamp, Campinas, SP, Brasil, 1999.

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

HECKER, R. L.; LIANG S. Y. **Predictive modeling of surface roughness in grinding.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 43, p. 755–761, 2003.

HECKER, R.L., LIANG, S.Y., WU, X.J.; **Grinding force and power modeling based on chip thickness Analysis.** International Journal of Advanced Manufacuturing Technology, v.33, p.449-459, 2007.

HEISEL, U.; LUTZ, M.; SPATH, D.; WASSMER, R.; WALTER, U. **A técnica da quantidade mínima de fluidos e sua aplicação nos processos de corte.** Revista Máquinas e Metais, Ano XXXIV, nº 385, p. 22-38, 1998.

<http://www.gerdau.com.br/produtos-e-servicos/produtos-por-aplicacao-detalhe-produto> (visitado em 20/09/2014).

HONG, S.Y.; BROOMER, M. **Economical and ecological cryogenic machining of AISI 304 austenitic stainless steel.** Clean Products Process, 2, p. 157–166, 2000.

HOWELL, J.K.; LUCKE, W.E.; WHITE, E.M. **Health and Safety Aspects in the Use of Metalworking Fluids,** by Taylor & Francis Group, LLC, 2006.

INASAKI, I. **Monitoring and optimization of grinding process.** CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 40, 1990.

IRANI, R.A.; BAUER, R.J.; WARKENTIN, A. **A review of cutting fluid application in the grinding process**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 45, p. 1696 – 1705, 2005.

ITOIGAWA, F.; CHILDS, T.H.C.; NAKAMURA, T.; BELLUCO, W.; **Effects and mechanisms in minimal quantity lubrication machining of an aluminum alloy**. Wear 260, p. 339-344, 2006.

JACKSON, M. J.; MILLS, B. **Materials selection applied to vitrified alumina & CBN grinding whells**. Journal of Materials Processing Technology nº 108, p. 114-124, 2000.

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

JEDRZEJEWSKI J.; MODRZYCKI W. **Intelligent supervision of thermal deformations in high precision machine tools**. Proc. 32nd Int. MATADOR Conf, Manchester, UK, 1997.
KING, R. I.; HAHN, R. S. Handbook of modern technology.3a Ed., 1992.

JUNIOR, FUNES, H.; BELENTANI, M.R.; NETO, L.M.G.; BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P.R., DINIZ, A.E. **Utilização da técnica da Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) com adição de água no processo de retificação cilíndrica de mergulho de aços endurecidos com rebolos de CBN**. (2011).

KLÖCKE, E. F.; BECK, T.; EISENBLÄTTER, G.; FRITSCH, R.; LUNG, D.; PÖHLS, M. **Applications of Minimal Quantity Lubrication – Motivation, Fundamentals**. 12th Int'l Colloq. Ind'l & Automotive Lub'n: Institute of Machine Tools and Production Engineering, 2001. 112p.

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

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

LEE, S. E.; KIM, N. H., **A study on the machining characteristics in the external plunge grinding using the current signal of the spindle motor**, International Journal of Machining Tools & Manufacture, number 41, p. 937-951, 2001.

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

LUBRIX GmbH. Disponível em: <http://www.lubrix.de>. Acessado em 12/09/2014.

MACHADO, R.M.; ABRÃO, A.M.; COELHO, R.T.; SILVA, M. B.; **Teoria da usinagem dos materiais.** Editora E. Blucher, São Paulo. Brasil, 371p. 2009.

MALKIN, S. **Grinding mechanisms e grinding temperatures and thermal damage**, In: **Grinding Technology: theory and applications of machining with abrasives.** 1. ed. Chichester, Ellis Horwood Limited, Cap. 5 e 6, p.108-171, 1989.

MALKIN, S. **Grinding Technology: theory and applications of machining with abrasives.** 1. ed. Chichester, Ellis Horwood Limited, 1989.

MALKIN, S.; GUO, C. **Thermal analysis of grinding.** CIRP Annals. Vol. 56, No.2, pp.760-782, 2007.

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

MARINESCU, I. D.; ROWE, W.B.; DIMITROV, B.; INASAKI, I. **Tribology of abrasive machining processes.** 1ªed. Norwich, William Andrew Inc, 2004.

MARINESCU, I. D.; HITCHINER, M.; UHLMANN, E.; ROWE, W.B.; INASAKI, I. **Handbook of Machining with Grinding Wheels** 1.ed. CRC Press Taylor & Francis Group, 2007.

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

MINKE, E. **Contribution to the role of coolants on grinding process and work results.** Technical Paper - Society of Manufacturing Engineers. MR (MR99-227), 1999, pp. 1–18.

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, vol. 45 (2005), p. 1321–1328.

OIKAWA, M. H., BIANCHI, E. C., DESTRO, R. S., SOUSA, R. M., CANARIM, R. C., SIMÕES, R. P., & AGUIAR, P. R. (2011). **Cerâmicas avançadas no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho com rebolos diamantados com a técnica da mínima quantidade de lubrificação e refrigeração otimizada**, 57, 263-273.

OLIVEIRA, D.J.; GUERMANDI, L.G.; BIANCHI, E.C.; AGUIAR, P.R.; CANARIM, R.C. **Improving minimum quantity lubrication in CBN grinding using compressed air wheel cleaning.** Journal of Materials Processing Technology. Lausanne: Elsevier B.V. Sa, v. 212, n. 12, p. 2559-2568, 2012.

OLIVEIRA, D.J. **Aprimoramento da técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL) no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho de aços endurecidos.** Dissertação de Mestrado em Ciências e Tecnologia dos Materiais, Universidade Estadual Paulista - Unesp, Bauru, Brasil, 2011.

ROWE, W.B.; MORGAN, M.N., **The effect of deformation on the contact area in grinding.** CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 42 1993, p. 409-412.

SADEGHI, M.H.; HADDAD M.J.; TAWAKOLI T.; EMAMI M. **Minimal quantity lubrication-MQL in grinding of Ti-6Al-4V titanium alloy**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.44, p. 487–500, 2009.

SALEH, T., BISHWAS, I., RAHMAN, M. **Efficient dressing of the wheel in ELID grinding by controllable voltage with force feedback**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 46, p. 123-130, 2009.

SARNI, E. A. **Utilização da Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) com água no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho, em cerâmicas, com rebolo diamantado**. Dissertação de Mestrado em Processos de Fabricação, Universidade Estadual Paulista - Unesp, Bauru, Brasil, 2011.

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

SHEN, B. **Minimum Quantity Lubrication Grinding Using Nano fluids**. A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of 104 Doctor of Philosophy (Mechanical Engineering) in The University of Michigan 2008, Chapter 3, pg. 33-34.

SILVA, T. **Um sistema com um bloco de teflon e um bastão abrasivo para a limpeza da superfície de corte de rebolos**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2014.

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

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

SOARES, D.D.; OLIVEIRA, J.F.G. **Diagnóstico de processos de retificação pela análise de sinais**. Revista Maquinas e metais, Ano XXXVIII, no 436, p. 140- 157maio, 2002.

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

STANFORD, M., LISTER, P.M. **Future role of metalworking fluids**, Industrial Lubrification Tribology, Vol. 54, No.1, pp. 11-19, 2002.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II: brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos, abrasivos**. Editora da UFSC, Florianópolis, 314 p., 1992.

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

TAWAKOLI, T.; WESTKAEMPER E.; RABIEY M. **Dry grinding by special conditioning**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 33, p. 419-424, 2007.

TAWAKOLI, T.; HADAD, M.J.; SADEGHI. **Influence of oil mist parameters on minimum quantity lubrication–MQL grinding process**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v.50, p. 521-531, 2010.

TAWAKOLI T., HADAD M.J., SADEGHI M.H, DANESHI A., SADEGHI B. **Minimum quantity lubricant in grinding: effects of abrasive and coolant-lubricant types**. Journal of Cleaner Production, 19 (2011), 2088-2099.

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

WEBSTER, J., LUI, C. **Flow rate and jet velocity determination for design of a grinding cooling system**. Presented at 1st Machining and Grinding Conference, Dearborn, p.12-14, MI, September, 1995.

WINTER. **Retificação**. Apostila de treinamento técnico da Empresa Winter, Jundiaí, SP, Brasil, 2004.

YAMAMOTO, A. A., BIANCHI, E. C., YAMAMOTO, A. A., DO NASCIMENTO, W. R. **Utilização da Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) com água no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho em cerâmica avançada com rebolo diamantado metálico**. In: VIII - Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM, 2014, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil, 2014.

YOSHIMURA, H.; ITOIGAWA, F.; NAKAMURA, T.; NIWA, K.; **Development of Nozzle System for Oil-on-Water Droplet Metalworking Fluid and Its Application on Practical Production Line**. JSME International Journal Series C, v.48, pp. 723-729, 2005.