



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



**UM SISTEMA COM UM BLOCO DE TEFLON E UM BASTÃO ABRASIVO
PARA A LIMPEZA DA SUPERFÍCIE DE CORTE DE REBOLOS**

TIAGO DA SILVA

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

Bauru 2014



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



**UM SISTEMA COM UM BLOCO DE TEFLON E UM BASTÃO ABRASIVO
PARA A LIMPEZA DA SUPERFÍCIE DE CORTE DE REBOLOS**

TIAGO DA SILVA

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia
da UNESP – Campus de Bauru, para Obtenção do
título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi

Bauru 2014

Silva, T.

Um sistema com um bloco de teflon e um bastão abrasivo para a limpeza da superfície de corte de rebolos / Tiago da Silva, 2014.

117 f.

Orientador: Eduardo Carlos Bianchi

Dissertação (Mestrado)- Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2014

1. Retificação cilíndrica externa de mergulho.
2. Mínima quantidade de lubrificante (MQL). 3. Limpeza do rebolo. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

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

Aos 18 dias do mês de dezembro do ano de 2013, 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. EDUARDO CARLOS BIANCHI do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. GILBERTO DE MAGALHÃES BENTO GONÇALVES do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. LUCIANA MONTANARI do(a) Departamento de Engenharia Mecânica/USP/EESC, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de TIAGO DA SILVA, intitulado "UM SISTEMA COM UM BLOCO DE TEFLON E UM BASTÃO ABRASIVO PARA A LIMPEZA DA SUPERFÍCIE DE CORTE DE REBOLOS". Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: Aprovado. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI

Prof. Dr. GILBERTO DE MAGALHÃES BENTO GONÇALVES

Prof. Dr. LUCIANA MONTANARI

Dedico esta conquista especialmente aos meus pais
Jorge e Terezinha.

AGRADEÇO

Agradeço primeiramente a Deus, Rei dos Reis. Mestre dos Mestres e Senhor dos Senhores, pela autoridade em todo o caminho trilhado até aqui. Ostento que sem ele nada disso seria possível.

Aos meus pais Jorge Ferreira e Terezinha de Souza, pelo alento durante a vida, contribuindo absolutamente em todas as batalhas que disputei desde o meu nascimento. A minha esposa e companheira Renata Fonseca, pelo amparo nos momentos de dificuldades e compreensão pelos momentos de ausência.

Ao Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi, que além de orientador deste trabalho, foi considerado por mim, um educador não somente de conhecimentos, mas também de valores de amizade, profissionalismo e perseverança aos ideais.

Expresso minha gratidão à Universidade Estadual Paulista em toda a sua dimensão pelos recursos disponibilizados. A todos os professores e funcionários que contribuíram diretamente ou indiretamente na realização e conquista deste título.

Dedico também aos meus amigos e familiares, que acreditaram em meu potencial e dedicaram suas orações e anseios em prol de meu sucesso.

Ninguém educa a si mesmo, os homens educam-se entre si, mediatizados pelo mundo. **(Paulo Freire)**

RESUMO

Uma técnica utilizada para substituir o método de lubri-refrigeração convencional é a mínima quantidade de lubrificante (MQL). Este método utiliza de uma mistura de óleo e ar à elevada pressão, reduzindo a quantidade de fluido de corte necessário para a usinagem. Entretanto, em diversos estudos feitos na área de retificação com MQL, nota-se que há a necessidade de aperfeiçoamento dessa técnica com relação à limpeza da zona de corte do rebolo. Devido à dificuldade do baixo fluxo de fluido, em remover os resíduos superficiais acumulados, cavacos aderem à superfície da ferramenta abrasiva, preenchendo os poros do rebolo e prejudicando o processo. Sendo assim este trabalho busca promover uma técnica de limpeza para o rebolo do tipo CBN, na retificação cilíndrica de aço ABNT4340 temperado e revenido, com a utilização de MQL. Através de um dispositivo, foi colocado em contato na superfície periférica do rebolo, bastões retangulares compostos dos materiais: Teflon, Óxido de Alumínio e Carbetto de Silício. As variáveis de saída do processo analisadas foram o comportamento da força tangencial de corte, rugosidade, emissão acústica, relação G (volume de material removido/volume de rebolo desgastado), fotos em microscópio eletrônico de varredura, microdureza e circularidade. O método MQL com o dispositivo, foi comparado com as seguintes condições de lubri-refrigeração: Convencional; MQL sem limpeza; MQL e limpeza com bocal de ar. Com base nos resultados obtidos, o método de limpeza utilizando o dispositivo juntamente com o bastão de carbetto de silício, comprovou em algumas condições a obtenção de melhores resultados e ausência de danos térmicos, se comparado aos outros métodos.

Palavras chaves: *Retificação cilíndrica externa de mergulho, mínima quantidade de lubrificante (MQL), aço AISI 4340, rebolo CBN, limpeza do rebolo.*

ABSTRACT

A technique used to replace the method of conventional lubrication and cooling is the minimum quantity lubricant (MQL). This method uses a mixture of oil and air to the high pressure, reducing the amount of fluid required for machining. However, in various studies in the field of grinding with MQL, it is noted that there is a need for improvement of this technique with respect to cleaning the cutting zone of the wheel. Due to the difficulty of low fluid flow, to remove the accumulated surface residue, chips adhere to the surface of the abrasive tool, filling the pores of the wheel and impairing the process. Thus, this work seeks to promote a cleaning technique for the type CBN wheel, the grinding cylindrical AISI 4340 steel hardened and tempered, with the use of MQL. Through a device was placed in contact on the peripheral surface of the grinding wheel, rectangular rods compounds materials: Teflon, aluminum oxide and silicon carbide. The output variables of the process were analyzed the behavior of the tangential cutting force, surface roughness, acoustic emission, G ratio (volume of material removed / volume of wheel worn), in photos scanning electron microscope , hardness and roundness. The method MQL with the device was compared with the following conditions of lubrication and cooling: Conventional; MQL without cleaning; MQL and cleaning air nozzle. Based on the results obtained, the cleaning method using the device with the bat silicon carbide, proved in some conditions to obtain better results and no thermal damage, compared to other methods.

Keywords: *External cylindrical grinding diving, minimum quantity lubrication (MQL), AISI 4340, CBN grinding wheel, grinding wheel cleaning.*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVO.....	15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3.1. Processo de Retificação	16
3.2. A retificação cilíndrica externa de mergulho	18
3.3. Rebolos.....	20
3.3.1. Grãos Abrasivos	21
3.3.2. Superabrasivos.....	22
3.3.3. Tamanhos dos Grãos Abrasivos	24
3.3.4. Dureza do Rebolo (Grau do Rebolo).....	25
3.3.5. Estrutura do Rebolo	26
3.3.6. Ligante vitrificado ou cerâmico.....	26
3.4. Parâmetros envolvidos na entrada do Processo de Retificação Cilíndrica	28
3.4.1. Profundidade de corte.....	28
3.4.2. Comprimento de contato	28
3.4.3. Velocidade de Corte	29
3.4.4. Velocidade da Peça.....	30
3.4.5. Velocidade de mergulho	30
3.4.6. Tempo de centelhamento (Spark-out)	30
3.4.7. Taxa de remoção de material.....	31
3.4.8. Forças de corte no processo de retificação	31
3.5. Variáveis de saída no processo de retificação cilíndrica	32
3.5.1. Mecanismo de formação do cavaco	32
3.5.2. Emissão Acústica.....	34
3.5.3. Erro de Circularidade.....	34
3.5.4. Rugosidade	35
3.5.5. Desgaste diametral do rebolo	36
3.6. Fluidos de Corte.....	37
3.6.1. Importância dos fluidos de corte	37
3.6.2. Classificação dos fluidos de corte	39
3.6.3. Mínima quantidade de Lubrificante (MQL).....	41
3.6.4. Método de aplicação da técnica de MQL	42
3.6.5. Vantagens da utilização do MQL	44
3.6.6. Desvantagens no uso da técnica de MQL.....	45
3.6.7. Fenômeno do entupimento do rebolo	46
3.7. Sistemas de limpeza da região periférica do Rebolo	47
3.7.1. Limpeza a laser.....	47
3.7.2. Limpeza com jato de Ar comprimido.....	48
3.7.3. Limpeza com um sistema secundário de fluido de corte.....	51
4. MATERIAIS E MÉTODOS	53
4.1. MATERIAIS	53
4.1.2. Fabricação do mandril.....	53
4.1.3. Corpo de prova.....	55
4.1.4. Rebolo	56
4.1.5. Dressadores	57
4.1.6. O sistema de refrigeração convencional.....	57
4.1.7. Medição de concentração	58
4.1.8. O sistema MQL	58
4.1.9. Sistema de limpeza com o bocal de ar comprimido.....	60
4.1.10. Dispositivo de Limpeza	63
4.2. MÉTODOS	67
4.2.2. Força tangencial de corte.....	68

4.2.3. Emissão acústica	69
4.2.4. Desvios de circularidade	70
4.2.5. Rugosidade	71
4.2.6. Desgaste diametral do rebolo	71
4.2.7. Microdureza	71
4.2.8. Microscopia eletrônica de varredura – MEV	72
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	76
5.1. Rugosidade.....	76
5.2. Erros de circularidade	78
5.3. Desgaste diametral do rebolo.....	80
5.4. Potência na retificação	82
5.5. Emissão acústica	84
5.6. Microscopia óptica e microdureza	85
5.6.1. Corpo de prova não retificado	86
5.6.2. Ensaio com o método de lubri-refrigeração convencional.....	86
5.6.3. Ensaio com o método de lubri-refrigeração de MQL sem limpeza	88
5.6.4. Ensaio com o método de lubri-refrigeração de MQL com limpeza de ar comprimido	90
5.6.5. Ensaio com o método de lubri-refrigeração de MQL e limpeza com o Bloco de teflon.....	92
5.6.6. Ensaio com o método de lubri-refrigeração de MQL e limpeza com o bastão de óxido de alumínio com granulometria 120	94
5.6.7. Ensaio com o método de lubri-refrigeração de MQL e limpeza com o bastão de óxido de alumínio com granulometria 150.	96
5.6.8. Ensaio com o método de lubri-refrigeração de MQL e limpeza com o carbo de silício.....	98
5.7. Microscopia Eletrônica de varredura	100
5.8. Microdureza	103
5.9. Comparativo entre os materiais dos bastões utilizados para a limpeza.....	105
6. CONCLUSÕES.....	107
7. PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS	108
REFERENCIAS	111

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Operação de retificação cilíndrica externa de mergulho.	18
Figura 2 - Representação do ciclo de uma retificação cilíndrica de mergulho.....	19
Figura 3 - Principais constituintes do rebolo.	21
Figura 4 - CBN: a – Tipo I; b- Tipo II – GE Superabrasives.	23
Figura 5 - Ilustração para diversas porosidades do rebolo de CBN..	26
Figura 6 - Superfície de um rebolo de nitreto cúbico de boro com ligante vitrificado ..	27
Figura 7 - Operação de retificação cilíndrica externa de mergulho.	32
Figura 8 - Formação de um cavaco por um grão abrasivo	33
Figura 9 - Funções do fluido de corte no processo de retificação.	38
Figura 10 - Modelo esquemático de um Sistema de Mínima Quantidade de Lubrificação por pressão.....	43
Figura 11 - Esquema de pulverização de névoa do MQL	44
Figura 12 - Cavacos aderidos aos poros do rebolo. (aumento de 100X).....	47
Figura 13 - Limpeza a laser da superfície de corte do rebolo.	48
Figura 14 - Efeito do jato de ar comprimido. (a) Retificação sem limpeza do rebolo, (b) Retificação com limpeza do rebolo.	48
Figura 15 - Variação da profundidade do canal retificado	49
Figura 16 - Posicionamento do bocal de limpeza: (a) tangente, (b) 60 °, (c) 30 °, (d) normal.....	50
Figura 17 - Rugosidade das condições de refrigeração em relação aos avanços.	50
Figura 18 - Influência da limpeza do rebolo no patamar de energia específica	51
Figura 19 - Formas de posicionamento do bocal de limpeza utilizando fluido de corte. (a) Bocal de limpeza posicionado normal à superfície de corte, (b) Bocal posicionado tangencialmente à superfície	52
Figura 20 - Retificadora cilíndrica CNC Sulmecânica - RUAP 515 H.....	53
Figura 21 - Desenho do mandril Projetado.....	54
Figura 22 - Dispositivo fixado a máquina	54
Figura 23 - Corpos de prova que serão usados nesta pesquisa.....	55
Figura 24 - Geometria do corpo de prova usado para a marcação do desgaste do rebolo.	56
Figura 25 - Rebolo CBN.....	56
Figura 26 - Dressador estático do tipo conglomerado.....	57
Figura 27 - Bomba e reservatório de fluido.....	57
Figura 28 - Mangueiras utilizadas na aplicação convencional do fluido de corte.....	58
Figura 29 - Unidade de controle do MQL..... Erro! Indicador não definido.	61
Figura 30 -Duas vistas do bocal para experimentação com MQL	59
Figura 31 -Sistema de ar comprimido para o MQL.....	59
Figura 32 -Projeto do bocal para limpeza dos rebolos com ar comprimido (Dimensões em mm).....	60
Figura 33 -Bocal de limpeza.....	61
Figura 34 -Fixação dos bocais de limpeza na retificadora.	61
Figura 35 -Demonstração das partes funcionais do bocal para limpeza do rebolo (peças de fixação e sistema de leitura do ângulo de inclinação).	62
Figura 36 -Estrutura do dispositivo de limpeza projetado.....	63
Figura 37 -Dispositivo com o cilindro pneumático e circuito eletro-pneumático para permitir o controle do tempo.	63
Figura 38 -Cilindro e sensores de início e fim de curso.	64
Figura 39 -Esquema de posicionamento do sensor.	64
Figura 40 - Dispositivo instalado com os sensores posicionados.....	65
Figura 41 -Posição do bastão em relação ao rebolo.....	66
Figura 42 - Equipamentos para aquisição dos dados.....	67

Figura 43 - Tela de apresentação do programa de aquisição de dados.....	68
Figura 44 - Módulo de aquisição de dados.....	69
Figura 45 - Sensor fixo posicionado no cabeçote móvel.....	69
Figura 46 - Aparelho Sensis DM42.....	70
Figura 47 - Medição da circularidade da peça usinada.	70
Figura 48 - Exemplo de operação de medição de rugosidade.	71
Figura 49 - Representação do corpo de prova com detalhe para metodologia utilizada no ensaio de microdureza.	72
Figura 50 - Amostra preparada para a análise de microdureza e microscopia.	73
Figura 51 - Equipamento OXFORD para medição da microscopia eletrônica de varredura.....	74
Figura 52 - Resultados de rugosidade para diferentes condições de lubri-refrigeração.	76
Figura 53 - Resultados de circularidade para diferentes condições de lubri-refrigeração.	78
Figura 54 - Resultados de desgaste diametral do rebolo para as diferentes condições de lubri-refrigeração.	80
Figura 55 - Resultados de potência para as diferentes condições de lubri-refrigeração.	82
Figura 56 - Resultados de emissão acústica para as diferentes condições de lubri-refrigeração.....	84
Figura 57 - Microscopia de um corpo de prova não retificado(ampliação de 500 vezes).	86
Figura 58 - Microscopia para os ensaios com lubri-refrigeração convencional (ampliação de 500 vezes). a)velocidade 0,25mm/min. b)velocidade de 0,50 mm/min. c) velocidade de 0,75mm/min.	87
Figura 59 - Microscopia para os ensaios com lubri-refrigeração de MQL sem limpeza (ampliação de 500 vezes). a)velocidade 0,25mm/min. b)velocidade de 0,50 mm/min. c) velocidade de 0,75mm/min.	89
Figura 60 - Microscopia para os ensaios com lubri-refrigeração de MQL com limpeza de bocal de ar comprimido(ampliação de 500 vezes). a)velocidade 0,25mm/min. b)velocidade de 0,50 mm/min. c)velocidade de 0,75mm/min.	91
Figura 61 - Microscopia para os ensaios com lubri-refrigeração de MQL com limpeza com um bloco de teflon(ampliação de 500 vezes). a)velocidade 0,25mm/min. b)velocidade de 0,50 mm/min. c) velocidade de 0,75mm/min.	93
Figura 62 -Microscopia para os ensaios com lubri-refrigeração de MQL com limpeza com um bastão de óxido de alumínio com granulometria 120 (ampliação de 500 vezes). a)velocidade 0,25mm/min. b)velocidade de 0,50 mm/min. c)velocidade de 0,75mm/min.....	95
Figura 63 - Microscopia para os ensaios com lubri-refrigeração de MQL com limpeza com um bastão de óxido de alumínio com granulometria 150 (ampliação de 200 vezes). a)velocidade 0,25mm/min. b)velocidade de 0,50 mm/min. c) velocidade de 0,75mm/min.....	97
Figura 64 - Microscopia para os ensaios com lubri-refrigeração de MQL com limpeza com carbeto de silício (ampliação de 200 vezes). a)velocidade 0,25mm/min. b)velocidade de 0,50 mm/min. c) velocidade de 0,75mm/min.	99
Figura 65 - Microscopia eletrônica de varredura para os ensaios com lubri-refrigeração de MQL com limpeza com um bastão de óxido de alumínio com granulometria 150 (ampliação de 2000 vezes). a)velocidade 0,25mm/min. b)velocidade de 0,50 mm/min. c) velocidade de 0,75 mm/min.	101
Figura 66 - Microscopia eletrônica de varredura para os ensaios com lubri-refrigeração de MQL com limpeza com carbeto de silício (ampliação de 2000 vezes). a)velocidade 0,25mm/min. b)velocidade de 0,50 mm/min. c) velocidade de 0,75mm/min.	102
Figura 67 - Resultados de microdureza para todas as técnicas com velocidade de mergulho 0,25mm/min.	103

Figura 68 - Resultados de microdureza para todas as técnicas com velocidade de mergulho 0,50mm/min.	104
Figura 69 - Resultados de microdureza para todas as técnicas com velocidade de mergulho 0,75mm/min.	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos fluidos para processamento de base líquida	40
Tabela 2 - Caracterização dos principais tipos de fluidos.....	40
Tabela 3 - Comparativo entre os bastões utilizados no método MQL + limpeza com bastões, nas velocidades 0,25mm/min.; 0,50mm/min.; e 0,75mm/min.....	106

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

a – profundidade de corte	(μm)
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas	
ad - profundidade de dressagem	(μm)
Al₂O₃ - óxido de alumínio	
ASTM - American Society for Testing and Materials	
b - largura média no topo dos grãos abrasivos	(mm)
c - comprimento da trinca crítica	(μm)
CBN – nitreto cúbico de boro	
CNC - comando numérico computadorizado	
h_{max} – espessura máxima do cavaco	(μm)
D_e – diâmetro equivalente	(mm)
D_s – diâmetro do rebolo	(mm)
D_w – diâmetro da peça	(mm)
E – módulo de elasticidade ou módulo de Young	(GPa)
F_n – força normal de corte	(N)
F_T – força tangencial de corte	(N)
G – relação entre volume de material removido e volume de rebolo gasto	
H – dureza do material	(GPa)
h_{eq} – espessura equivalente de corte	(μm)
HV – dureza Vickers	(GPa)
L_c – comprimento de contato	(mm)
IFSC – Instituto de Física de São Carlos	
ISO - International Organization for Standardization	
K_{ic} – tenacidade à fratura	(MPa)
K_s – pressão específica de corte	(N/mm ²)
K_n – tensão de escoamento do material	(N/mm ²)
L – espaçamento entre grãos abrasivos	(μm)
MEV - microscópio eletrônico de varredura	
MQL – mínima quantidade de lubrificação	
N – número de encontros dos grãos abrasivos ativos com a peça	
P – força normal aplicada aos grãos abrasivos	(N)
p_b – probabilidade do grão ser desalojado devido à fratura do aglomerante	
Q_w – taxa de remoção de material	(mm ³ /s)
Q'_w – taxa específica de remoção de material	(mm ² /s)
R – fator de resistência ao desgaste	
Sic – carbetto de silício	
SiO₂ – óxido de silício	
t – tempo de retificação	(s)
t_s – tempo de centelhamento	
USP – Universidade de São Paulo	
V_f – velocidade de mergulho ou avanço	(m/s)
V_s – velocidade tangencial do rebolo	(m/s)
V_w – velocidade tangencial da peça	(m/s)
W – peso médio de cada grão	(g)
Z_s – volume de rebolo gasto	(mm ³)
Z_w – volume de material removido	(mm ³)
δ - desgaste radial do rebolo	(mm)
σ - tensão de ruptura	(MPa)

1. INTRODUÇÃO

Por se utilizar do fenômeno de abrasão, a retificação é aplicada para usinar superfícies que precisam de grande qualidade dimensional e bom acabamento. Neste processo, cavacos de dimensões inferiores aos obtidos em outros processos de usinagem, são retirados pela ação mecânica de grãos abrasivos que possuem tamanhos e formas irregulares.

Porém para promover a remoção do cavaco, as inúmeras arestas de corte formadas pelos grãos abrasivos do rebolo, necessitam de uma grande quantidade de energia por unidade de volume de material removido. A maior parte desta energia é convertida em calor o qual fica concentrado na zona de corte causando altas temperaturas nessa região.

Sendo assim, os meios de aplicação de fluidos que utilizam altas taxas de volume para remover calor, acabam agregando mais custo ao processo. Após o uso, além de ser tratado corretamente, o fluido deverá ser descartado de acordo com as leis de proteção ao meio ambiente em lugares e processos de coletas específicos.

Segundo Silva *et al.* (2013) a usinagem com mínima quantidade de lubrificante (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 pressões elevadas.

Para Alves *et al.* (2011), a utilização em massa dos fluidos de corte tende a diminuir com o passar do tempo. Porém Sadeghi (2009) demonstra que uma redução no uso de fluidos de corte gera uma dificuldade em manter os poros do rebolo limpos, favorecendo a tendência de empastamento, o que gera o decréscimo da potencialidade de corte dos rebolos. Assim cavacos que não são retirados da região de corte aderem à superfície da ferramenta ocupando os poros, causando um desgaste maior do rebolo e aumentando a rugosidade superficial da peça.

Cameron *et al.* (2010) afirmou que a fenomenologia do entupimento do rebolo acontece quando os resíduos gerados no processo de retificação não são totalmente removidos da zona de corte por meio do fluido refrigerante. Se os cavacos alojarem-se nos poros do rebolo, os fluidos não atingem perfeitamente a zona de corte.

Os detritos alojados na superfície de corte do rebolo afetam a eficiência e a qualidade da operação de retificação. Uma das justificativas para isto decorre do fato de que com a porosidade do rebolo ocupada, a força necessária para promover a deformação elástica e plástica para a remoção do cavaco aumenta. Quando isso ocorre, a energia inicial do processo irá subir e o calor na zona de corte também, prejudicando assim características essenciais necessárias às peças retificadas.

Portanto, a utilização de um sistema que promova a limpeza do rebolo durante a retificação, é um recurso para se obter maior eficiência ao uso da mínima quantidade de lubrificante, tornando este método, uma opção cada vez mais viável para a aplicação reduzida dos fluidos de corte.

2. OBJETIVO

Este trabalho busca analisar o desempenho da técnica de mínima quantidade de lubrificante (MQL), juntamente com um sistema de limpeza por contato mecânico para a retirada dos resíduos da superfície de corte do rebolo (utilizando-se bastões abrasivos de Carbetto de silício granulometria 150 mesh; Óxido de alumínio com granulometria 150 mesh; Óxido de alumínio com granulometria 120 mesh; e também de Teflon), durante a retificação cilíndrica externa de mergulho do aço ABNT 4340 temperado e revenido.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica apresentada a seguir fundamenta os principais assuntos abordados nesse trabalho relativos ao tema que será desenvolvido: processo de retificação, influência dos parâmetros envolvidos na entrada do processo de retificação cilíndrica, variáveis de saída no processo de retificação cilíndrica, rebolos de CBN, fluidos de corte, mínima quantidade de lubrificante (MQL).

3.1. Processo de Retificação

O Processo de retificação segundo Linke e Dorlnfed (2012), é um dos processos abrasivos fundamentais na obtenção de peças com alta qualidade superficial e ótimas tolerâncias dimensionais. A característica da retificação é a remoção de material pelo contato entre uma ferramenta chamada rebolo que contém grãos abrasivos, e a superfície da peça.

Segundo Ren *et al.*, (2009) neste processo, cada grão que compõe a estrutura topográfica do rebolo remove uma pequena quantidade de material, proporcionando melhor acabamento à superfície em trabalho. Diferente dos processos onde se tem ferramentas de geometria definida, no processo de retificação os abrasivos têm arestas de corte irregulares.

A operação de retificação é normalmente aplicada nas fases finais do processo de produção e é empregada na fabricação de componentes que requerem tolerâncias bastante estreitas, com excelente qualidade superficial, o que é praticamente impossível de se obter utilizando outros processos de usinagem.

A otimização do processo de retificação segundo Choi *et al.* (2008) demanda um profundo conhecimento de todos os parâmetros de entrada e de seu desempenho refletido nas variáveis de saída. Já que mesmo que tenha havido uma grande quantidade de esforço para caracterizar e compreender os processos de retificação, ainda existem diversas dificuldades devido ao fato de que neste processo a forma dos elementos de corte não pode ser bem definidas.

Li e Rong (2011), afirmam que o processo em si, pode ser influenciado basicamente pelo tipo de abrasivo utilizado, o modelo das máquinas-ferramenta envolvidas, material da peça a ser retificada e as variáveis operacionais. Todas estas quatro categorias de entrada, interagem uns com os outros, o que culmina com as

medidas do processo, saída técnica e de saída do sistema. Portanto, para se controlar melhor a retificação é necessário analisar o maior número de variáveis possíveis, evitando assim perdas de peças durante o processo.

No entanto, o domínio do processo não se restringe apenas aos parâmetros envolvidos. *Diniz et al. (2008)* afirma que uma das principais diferenças do processo de retificação com outros processos está na velocidade. No caso da retificação o grão abrasivo pode chegar a ser até 10 vezes maior quando comparada com a velocidade utilizada no processo de torneamento. Igualmente, a energia total requerida para o processo de retificação é da ordem de 2 a 20 vezes maior que para outros processos de usinagem.

A operação de retificação tem sido comumente relacionada com a usinagem de materiais duros com tolerâncias muito apertadas e acabamento de superfície superior. No entanto, tal como foi reconhecido por *Singh et al. (2012)* alguns materiais ainda tem dificuldades em serem retificados devido à alta energia específica envolvida neste processo.

Segundo *Diniz et al. (2008)* as nomenclaturas próprias para os processos de retificação compõe-se de: retificação cilíndrica externa entre pontas (de mergulho e longitudinal); retificação cilíndrica externa sem centros (centerless); retificação cilíndrica interna (de mergulho); retificação plana frontal e tangencial.

3.2. A retificação cilíndrica externa de mergulho

Destaca-se entre as variações da operação de retificação a cilíndrica externa de mergulho, pois é um processo rápido e econômico. Nesse tipo de retificação, o rebolo executa o movimento de avanço numa direção perpendicular à superfície a ser retificada.

A largura do rebolo normalmente é superior à da peça, o que viabiliza a retificação de várias superfícies simultaneamente através da montagem de diversos rebolos ou a retificação de perfis, através da afiação do rebolo no perfil adequado (DINIZ *et al.*, 2008). A retificação cilíndrica externa de mergulho é apresentada na Figura 1.

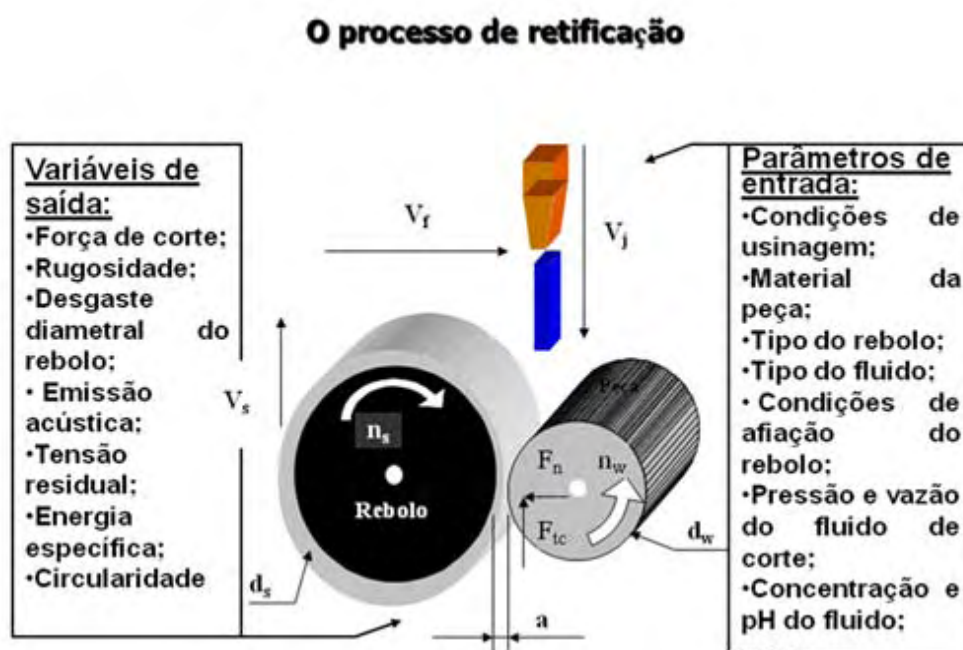


Figura 1 - Operação de retificação cilíndrica externa de mergulho (MALKIN 1989, modificado).

Onde:

- V_s é a velocidade tangencial do rebolo ou de corte;
- d_s é o diâmetro do rebolo;
- d_w é o diâmetro da peça;
- a é a profundidade de corte;

• V_w é a velocidade tangencial da peça;

• V_f é a velocidade de avanço do rebolo.

Segundo Soares e Oliveira (2002), o ciclo de retificação é entendido 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. O ciclo de retificação é subdividido em fases e, cada uma possui um tempo para sua execução.

Na Figura 2, Soares & Oliveira (2002) demonstram, o ciclo de retificação e as respectivas etapas.

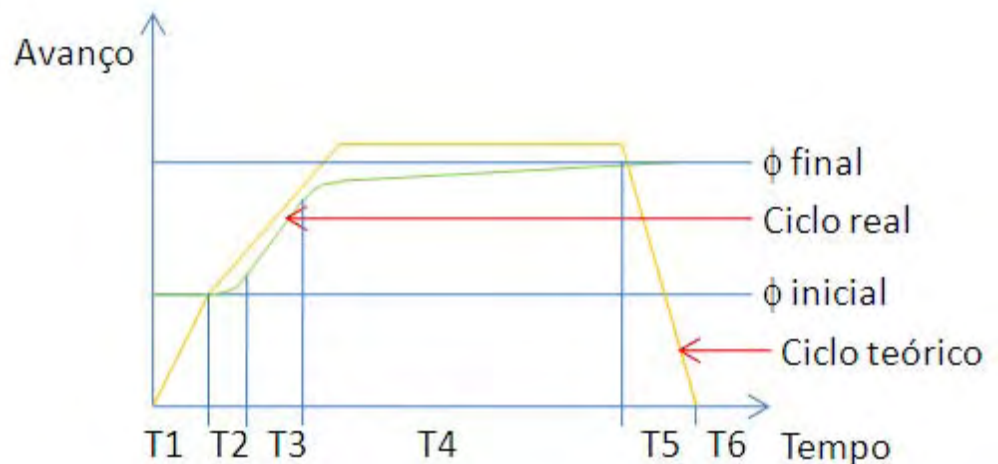


Figura 2 - Representação do ciclo de uma retificação cilíndrica de mergulho (adaptado de Soares e Oliveira, 2002).

Uma descrição dos intervalos de tempo indicados nesta Figura é:

- T1: deslocamento do rebolo em direção à peça, sem remoção de material;

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

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

- T4: período de centelhamento (spark out), onde não há avanço do rebolo, permitindo, desta forma, eliminar as deformações adquiridas durante o período T2. Tem fundamental importância dentro de um ciclo de retificação, pois é neste

momento que se atinge as tolerâncias dimensionais e geométricas com reduzidos valores de rugosidade superficial, característicos do processo de retificação;

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

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

A soma de todos os tempos das fases, descritas anteriormente, resulta no tempo total de retificação, que é um parâmetro significativamente importante na produção em massa.

3.3. Rebolos

O uso de ferramentas abrasivas está registrado em artefatos pré-históricos com mais de dois milhões de anos atrás. Segundo Krar (1994) estas descobertas comprovam que nossos ancestrais dependiam de ferramentas produzidas por processos de lascamento abrasivo para sobreviver.

Uma das ferramentas utilizadas nos processos abrasivos é o rebolo. Malkin (2008) afirma que o rebolo é a ferramenta utilizada nos processos de retificação. É composto basicamente de grãos abrasivos de elevada dureza que efetuam o corte, presos a uma matriz aglomerante de um material menos duro. Estes grãos formam arestas de corte de geometria indefinida.

Marinescu *et al.* (2007) diz que no rebolo, o grão abrasivo é responsável pelo corte da peça que está sendo retificada; o ligante tem como função manter o grão abrasivo no lugar, e a porosidade, corresponde aos espaços vazios entre os grãos, tendo este último item a importante finalidade de conduzir o fluido refrigerante para a peça e dar espaço para os cavacos. Na Figura 3 podem-se observar estes elementos.

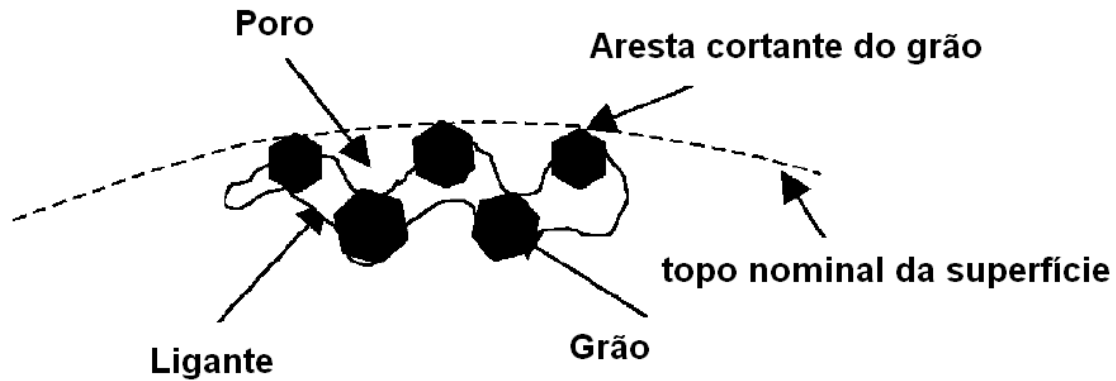


Figura 3 - Principais constituintes do rebolo (adaptado de MARINESCU *et al.* 2007).

Segundo Shaw (1996), as ferramentas abrasivas podem ser divididas em dois principais grupos: produtos ligados e produtos revestidos. Nos produtos ligados, para manter os grãos abrasivos unidos utiliza-se um elemento ligante, formando assim, uma camada ou corpo abrasivo no corpo da ferramenta.

Rebolos destinados à retificação são fabricados com diversos tipos de grãos, dentre uma ampla faixa de tamanhos, combinados com diversos tipos de ligantes em composições distintas. Deste modo, estas ferramentas adaptam-se às diversas máquinas retificadoras e aos inúmeros trabalhos a serem executados, conduzindo a uma enorme diversidade de rebolos (MALKIN, 1989).

3.3.1. Grãos Abrasivos

De acordo com Marinescu *et al.* (2007), materiais usados como abrasivos, podem ter origens tanto minerais naturais, quanto de produtos sintéticos. Os grãos abrasivos podem ser considerados como ferramentas de corte com formas aleatórias e caracterizam-se por uma elevada dureza, arestas cortantes, e boa capacidade de corte.

Sua escolha para uma aplicação em particular pode ser baseada nos testes de durabilidade que envolve aspectos como: resistência ao impacto, resistência à fadiga de compressão, fiabilidade dinâmica e a resistência ao lascamento.

A dureza de um abrasivo é geralmente definida em termos de resistência a endentação estática como determinado por um teste de dureza Knoop. Segundo Malkin (1989), uma importante característica de um abrasivo é que ele seja mais duro

do que o material a ser retificado. O método de medição de dureza Knoop consiste em realizar 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 é definido pela medição da principal marca produzida pelo diamante e relacionando-a com a carga utilizada. (STEMMER, 1992)

Outra característica essencial para avaliação de um abrasivo é a friabilidade. Para Marinescu *et al.* (2004), friabilidade é a tendência da desintegração do grão em pequenos fragmentos sob pressão. Esta característica é em função da forma, integridade e pureza do cristal que formam o grão. Estas propriedades que são criadas em consequência do crescimento do cristal durante sua síntese.

Existem dois principais grupos de grãos: naturais e artificiais. Os abrasivos naturais são aqueles extraídos diretamente da natureza, pode-se citar como os principais representantes deste grupo: coríndon, esmeril, quartzo e o diamante.

O segundo grupo, os abrasivos artificiais, iniciou o seu desenvolvimento no final do sec. XIX. Estes abrasivos possuem vantagens em relação aos abrasivos naturais, pois, eliminaram os problemas das impurezas e a inconsistência dos abrasivos naturais. Isto é, sua produção pode ser cuidadosamente controlada. Os principais representantes deste grupo são: diamante, nitreto de boro cúbico, carbetto de silício (SiC), alumina sinterizada, carbetto de tungstênio e óxido de alumínio (KRAR, 1994). Dentre estes abrasivos artificiais, tem-se a subdivisão em dois grupos: Convencionais e os Superabrasivos.

3.3.2. Superabrasivos

Um dos maiores avanço na tecnologia de retificação foi o desenvolvimento dos superabrasivos: diamante sintético e o nitreto de boro cúbico (CBN). Eles são especialmente adequados para a retificação difícil dos seguintes materiais: metais de difícil retificação (Difficult-To-Grind - DTG), super ligas, metal duro, cerâmicas e materiais compósitos. (KRAR, 1994)

Conforme Kopac & Krajnik (2006), os superabrasivos recebem este nome em razão de serem mais duros, mais resistentes ao desgaste e uma vida mais longa quando aplicados adequadamente quando se comparados com abrasivos convencionais.

3.3.2.1. Nitreto de Boro Cúbico – CBN

Os superabrasivos são muito utilizados na retificação de materiais de difícil usinagem (de difícil retificação – difficult to grind), superligas, metal duro, cerâmicas e materiais compósitos (RAHMAN *et al.*, 2010). Segundo Salmon (1992), como um resultado do trabalho realizado para o desenvolvimento de um diamante sintético, a General Electric Company introduziu um novo abrasivo na indústria em 1969 com o nome comercial de Borazon, ou nitreto de boro cúbico (CBN) como é conhecido popularmente.

O CBN surgiu da pesquisa de uma substância lúbrica branca com uma estrutura atômica laminada hexagonal chamada de Nitreto de Boro Hexagonal (hBN) similar ao grafite, mas com átomos de nitrogênio e boro alternados. Nitrogênio e o Boro situam-se ao lado do carbono na tabela periódica e foi postulado que em altas temperaturas e pressões poderia converter HBN para uma estrutura cúbica similar ao diamante. Isto foi primeiro mostrado pelo grupo de cientistas de Wentdorf em 1957 (MARINESCU *et al.* 2007)

O CBN é um material sintético obtido através da transformação alotrópica do nitreto de boro hexagonal, mediante elevadas pressões e temperaturas, na presença de catalisadores, como metais alcalinos, antimônio, chumbo, lítio, magnésio e nitretos (MARINESCU *et al.*, 2004). A Figura 4 mostra alguns tipos de CBN disponíveis comercialmente.



Figura 4 - CBN: a – Tipo I; b- Tipo II – GE Superabrasives (KRAR & RATTERMAN, 1990).

Bertalan (1997) afirma que o Nitreto de boro cúbico (CBN) é um material sintético obtido através da transformação alotrópica do nitreto de boro hexagonal, mediante elevadas pressões e temperaturas. Segundo Monici (2003), o nitreto de boro cúbico (CBN) é empregado na retificação de materiais de difícil retificação (DTG – Difficult to Grind), tais como aços rápidos, aços alta liga e aços ligados ao Ni, Cr, Ti e outros. Kopac e Krajnic (2006) sintetizam ainda que a grande funcionalidade desses rebolos diz respeito à retificação de aços de durezas na faixa de 55 HRC ou mais.

Em comparação com o carbeta de silício, o nitreto cúbico de boro apresentou um menor desgaste e fica afiado por muito mais tempo entre cada dressagem, além de apresentar uma vida de aproximadamente cem vezes maior que o óxido de alumínio (MALKIN, 2008). Segundo Marinescu *et al.* (2007), outra importante característica do CBN é sua alta condutividade térmica. Em temperatura ambiente, a condutividade térmica é 200 a 1300W/mK e a sua expansão térmica é aproximadamente 20% maior do que o diamante.

Para o emprego do CBN recomenda-se a utilização de máquinas com alta rigidez e que também possuam dispositivo dressador adequado ao rebole utilizado. Recomenda-se trabalhar com velocidades de corte superiores aquelas aplicadas com rebolos com abrasivos convencionais. É importante também eliminar qualquer tipo de vibração que possa ocorrer durante a operação.

3.3.3. Tamanhos dos Grãos Abrasivos

A classificação do tamanho de grão é feita, segundo Malkin (2008), pelo método do peneiramento. O parâmetro empregado na classificação é denominado mesh, que corresponde à quantidade de fios por polegada linear existentes na peneira, podendo-se considerar uma média de grãos por polegada da área do rebole. Quanto maior este número, mais fino é o grão.

Segundo Stemmer (1992), classificam-se os grãos pela norma americana ANSI Standard B74. 12-1977 “Specification for Size of Abrasive Grain”, a qual determina o tamanho do grão em mesh, isto é, fornece a quantidade de furos por polegada linear da peneira na qual os grãos ficam retidos durante o processo de seleção.

De acordo com King e Hahn (1992), o tamanho do grão abrasivo influencia o tipo de operação a realizar. Rebolos com grãos grossos são recomendados para operações mais grosseiras, com alta remoção de cavaco, como as de desbaste.

Já rebolos com grãos mais finos possibilitam a obtenção de acabamento mais fino, dentro de estreitas faixas de tolerância dimensional (DINIZ *et al.*, 2003). Segundo Marinescu *et al.*(2007), para grãos de diamante e CBN é usada para a classificação a Norma europeia FEPA (Federation Europeene des Fabricants de Produits Abrasifs) que especifica o diâmetro teórico do grão.

3.3.4. Dureza do Rebolo (Grau do Rebolo)

A dureza de um rebolo está relacionada à dificuldade de remoção dos grãos abrasivos de sua superfície, ou ainda, à dificuldade de proporcionar o rompimento entre o grão e o material aglomerante. Quanto mais ligante, menos poros, maior superfície ligada, e maior resistência ao arrancamento das partículas abrasivas, portanto a quantidade de ligante misturado ao grão irá determinar a dureza do rebolo (SALMON,1992).

King & Hahn, (1992) afirmam ainda que as características do material aglomerante são fundamentais para determinar a dureza dos rebolos. A dureza é diretamente dependente das propriedades mecânicas do material aglomerante, pois se este possuir elevada resistência mecânica reduzirá a possibilidade de ruptura dos grãos abrasivos, devido a uma satisfatória acomodação dos impactos sofridos pelo rebolo.

A dureza de um abrasivo é, casualmente, definida em termos de resistência e indentação estática obtida através de um teste de microdureza Knoop (MALKIN, 2008). Este método consiste em realizar uma microindentação na amostra com uma ponta de diamante lapidado no formato piramidal, sob a variação de diversas cargas. O valor da dureza é definido pela medição da diagonal da marca produzida pelo diamante e relacionando-a com a carga utilizada (BROOKES, 2010).

3.3.5. Estrutura do Rebolo

A estrutura do rebolo refere-se ao espaçamento entre os grãos abrasivos no rebolo. Quanto menor o número de poros, maior a quantidade de partículas abrasivas, menor o espaçamento entre elas, portanto mais fechada a estrutura. Da mesma forma, quanto maior o número de grãos, menor a quantidade de partículas abrasivas, mais abertas é a estrutura (DINIZ *et al.*, 2003).

A Figura 5 mostra três tipos de estruturas de um rebolo CBN (fechada, média e aberta).

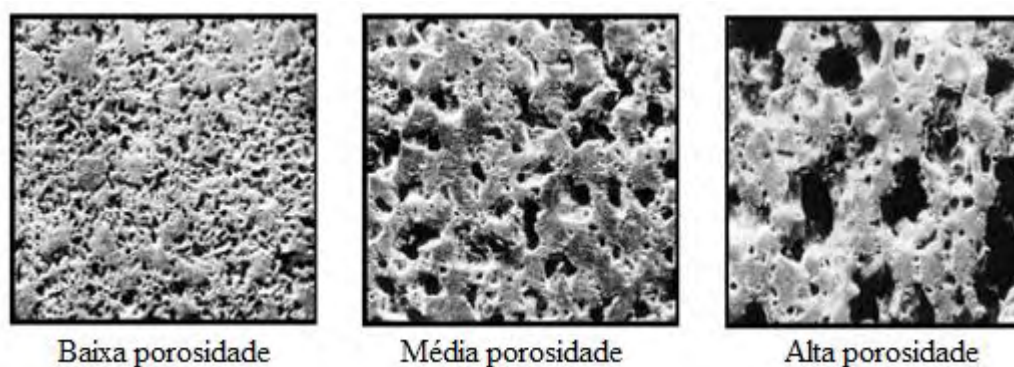


Figura 5 - Ilustração para diversas porosidades do rebolo de CBN. (Adaptada MARINESCU *et al.* 2001).

Malkin (1989) ressalta que uma estrutura fechada apresenta maior número de grãos em contato com a peça durante o corte, fato que proporciona melhor acabamento, pois cada grão é responsável pela retirada de uma quantidade menor de material. No entanto, há tendência à queima da peça e ao empastamento do rebolo, devido à dificuldade de retirada do cavaco da região de corte.

3.3.6. Ligante vitrificado ou cerâmico

A manutenção e fixação dos grãos abrasivos em um rebolo devem-se à ação de materiais aglomerantes. Estes compostos devem resistir às forças de retificação, às elevadas temperaturas, às forças centrípetas oriundas dos elevados níveis de rotação da ferramenta e ainda aos ataques químicos provocados por componentes dos fluidos de corte. Os aglomerantes são responsáveis por assegurar a rigidez do rebolo e manter as partículas abrasivas em posição (MALKIN, 2008).

Shaji *et al.* (2003) afirma que, a maioria dos rebolos utilizados em geral na indústria, são compostos de ligantes vitrificados. Este ligante é constituído de argila ou feldspato e fundido a uma temperatura elevada, para formar uma estrutura

semelhante a vidro. Algumas de suas vantagens são por fornecer uma ligação forte, rígida e dar bom acabamento sem sofrer reação com a água ou outros fluidos de refrigeração.

Apresentam durezas superiores às dos resinóides e devido a isso, juntamente com o fato de ter porosidade natural, prestam-se a tarefas que exigem elevadas taxas de remoção. Esta porosidade abre espaço para a formação de cavaco e para o fluxo de refrigerante.

No entanto, os rebolos de CBN com ligas vitrificadas requerem pressões de retificação razoavelmente altas para cortar e, portanto funcionam melhor em retificadoras de alta potência. A fragilidade das ligas vitrificadas e as altas pressões necessárias no processo de retificação fizeram com que os fabricantes produzissem rebolos segmentados, de forma que o ligante possa expandir e não trincar a altas velocidades. Esta opção tem como desvantagem o elevado custo de fabricação.

Jackson *et al.* (2001), obtiveram em seu trabalho, uma imagem de uma matriz de um rebole de CBN com ligante vitificado, conforme a Figura 6.

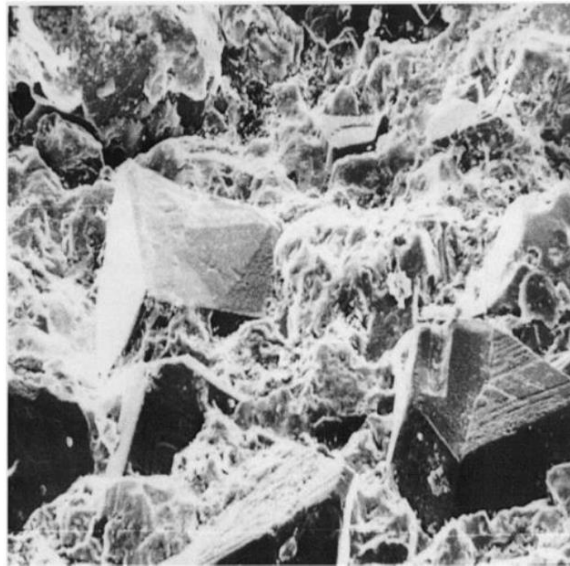


Figura 6 - Superfície de um rebole de nitreto cúbico de boro com ligante vitificado (JACKSON *et al.*, 2001).

Antes os rebolos de diamante sintético policristalino, eram usados com ligante resinóide, mas foram substituídos pelos de ligante vitificado que obtiveram um melhor desempenho principalmente em termos de dressagem. (WEBSTER e TRICARD, 2004).

3.4. Parâmetros envolvidos na entrada do Processo de Retificação Cilíndrica

3.4.1. Profundidade de corte

De acordo com Malkin (2008), a velocidade de corte a , é referente à profundidade que o rebolo entra em contato com uma peça, com velocidade v_f , durante uma volta completa da mesma. Esta relação é definida pela equação (1).

$$a = \frac{\pi \cdot v_f \cdot dw}{V_w} \quad (1)$$

Para Nguyen (2011), a profundidade de corte é importante na retificação cilíndrica, pois, ela varia durante o mergulho na peça. Esta variação influencia significativamente no controle da temperatura no material, e por sua vez pode afetar as características da peça.

Segundo Marinescu *et al.* (2004) em função das reações mecânicas, térmicas e do desgaste do rebolo, a estrutura da máquina e o rebolo tendem a sofrer uma deflexão quando se estabelece o contato entre o rebolo e a peça. Sendo assim o valor real do parâmetro a , é menor do que o calculado baseado na taxa de avanço v_f . No entanto, as deflexões se estabilizam e se tornam constantes com o passar do tempo de processo.

A equação (2) é utilizada quando a taxa de desgaste do rebolo é desconsiderada. No entanto, para a retificação de material muito duro, onde a taxa de desgaste do rebolo é maior, o parâmetro a será dado conforme a equação (4), com G denominada relação “G” que designa o volume de material removido por volume de rebolo gasto.

$$a = \frac{\pi \cdot dw}{\left(1 \left(\frac{1}{G}\right) \cdot \left(\frac{dw}{ds}\right)\right) \cdot \left(\frac{v_f}{v_w}\right)} \quad (2)$$

3.4.2. Comprimento de contato

Para Agarwal (2012), arco ou comprimento de contato define a extensão e contato entre o rebolo e a peça durante a operação de retificação. O comprimento de contato depende das deflexões que modificam a forma da zona de contato. As deflexões

de contato podem influenciar geometricamente tanto o acabamento da superfície da peça de trabalho quanto à precisão da peça.

Marinescu *et al.* (2004) equacionam o comprimento de contato (l_c) conforme a equação (3) que envolve a profundidade de corte a_e e o diâmetro equivalente do rebolo d_e :

$$l_c = \sqrt{a_e \cdot d_e} \quad (3)$$

Segundo Malkin (2008), a equação (3) 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.

De acordo com King & Hahn [1992], o diâmetro equivalente estabelece que a diferença de curvatura entre o rebolo e a peça influi no comprimento de contato. O diâmetro equivalente correlaciona à retificação plana e a diferença de curvatura em retificações cilíndrica interna e externa. O diâmetro equivalente é dado pela equação (4) composta por:

$$d_e = \frac{d_s}{1 \pm \left(\frac{d_s}{d_w} \right)} \quad (4)$$

Malkin (2008) afirma que a validade deste equacionamento é para retificação plana, não considerando os movimentos e deformações envolvidos no processo. O autor afirma que, o sinal positivo representa a operação de retificação cilíndrica externa e o negativo a interna. No caso da retificação plana, d_w assume valor infinito. Além do mais, a curvatura oposta do rebolo e da peça diminui l_c na retificação cilíndrica externa e, na interna, aumenta.

3.4.3. Velocidade de Corte

A velocidade periférica do rebolo ou velocidade de corte é extremamente importante no processo de retificação, e é representada pelo deslocamento de um ponto, na superfície de corte do rebolo, em um determinado tempo.

Sendo assim Oliveira *et al.* (2009) afirma que ao aumentar a velocidade de corte de um rebolo, aumenta-se também a taxa de remoção de material. Outra consequência do aumento da velocidade de corte, é a auto-afiação do rebolo, já que com

o aumento da pressão de corte, o rebolo tende a liberar os grãos abrasivos com maior agilidade. Isto favorece a redução de tempo de dressagem e perfilamento.

De acordo com Graf (2004), a velocidade de corte em m/s pode ser expressa pela equação 5:

$$V_s = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60 \cdot 1000} \quad (5)$$

3.4.4. Velocidade da Peça

Na retificação plana, a velocidade da peça é igual a velocidade da mesa, é geralmente dada em metros por minuto. De acordo com Graf (2004), na retificação cilíndrica, a velocidade da peça V_w , pode ser determinada em função do diâmetro da peça (d_w), e rotação (n_w) da mesma conforme a equação 6.

$$V_w = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_w}{60} \quad (6)$$

3.4.5. Velocidade de mergulho

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

3.4.6. Tempo de centelhamento (Spark-out)

Para Hassui (2002) a falta de rigidez do sistema máquina-peça-ferramenta favorece o surgimento de deformações elásticas durante a movimentação de mergulho da peça. Este efeito ocasiona um atraso do avanço real em relação ao teórico, o que resulta em um possível “atraso dimensional”.

Por este motivo se estabelece no processo de mergulho, um período em que não haja avanços, denominado tempo de centelhamento, ou ainda spark-out. Neste período as deformações emergentes do processo são eliminadas, removendo material e finalmente eliminando o atraso. Este período pode ser visualizado neste trabalho na figura 2 do tópico 3.2 no tempo T4.

3.4.7. Taxa de remoção de material

Segundo Malkin (2008), a taxa de remoção de material (Q_w) é definida pela profundidade de corte (a), pela velocidade relativa entre a peça e o rebolo (V_w) e pela largura de retificação (b) como mostra a equação (7):

$$Q_w = \pi \cdot d_w \cdot v_f \cdot b = V_w \cdot a \cdot b \quad (7)$$

Ainda segundo Malkin (2008), pode-se obter a taxa específica de remoção de material (Q_w), dividindo a taxa de remoção de material (Q_w) pela largura de retificação (b) e, com base nesta taxa específica, pode-se avaliar a produtividade de um processo de retificação.

No caso da retificação de material de alta dureza observa-se um desgaste relativamente rápido do rebolo. Assim, Marinescu *et al.* (2004) afirma que a taxa de remoção de material deve ser expresso pela equação (8):

$$Q_w = \frac{b_w \cdot \pi \cdot dw}{1 \left(\frac{1}{G} \right) \cdot \left(\frac{dw}{ds} \right)} \quad (8)$$

3.4.8. Forças de corte no processo de retificação

A força de corte na retificação para Agarwal *et al.* (2013) desempenha um papel importante no processo de retificação, pois ela pode ter influência direta sobre o desgaste do rebolo, precisão da peça, temperatura e da integridade da superfície. Outra influência está na deformação da superfície local e na natureza desta deformação. De acordo com Ren *et al.* (2009) os esforços de corte no processo de retificação são gerados entre a interação do abrasivo e a peça em forma de deformação plástica e elástica, pela formação do cavaco e pelo atrito entre abrasivo, ligante e peça.

Malkin (2008) afirma que essa força pode ser decomposta, como ilustrado na Figura 7, em duas componentes: normal (F_n), tangencial (F_t). De acordo com Li *et al.* (2002) há também uma componente ao longo da direção de avanço longitudinal (axial - F_a), que não tem muita significância. A força tangencial afeta principalmente o consumo de energia e o tempo de vida de serviço do rebolo, o que acaba afetando também a temperatura e rugosidade da peça trabalhada.

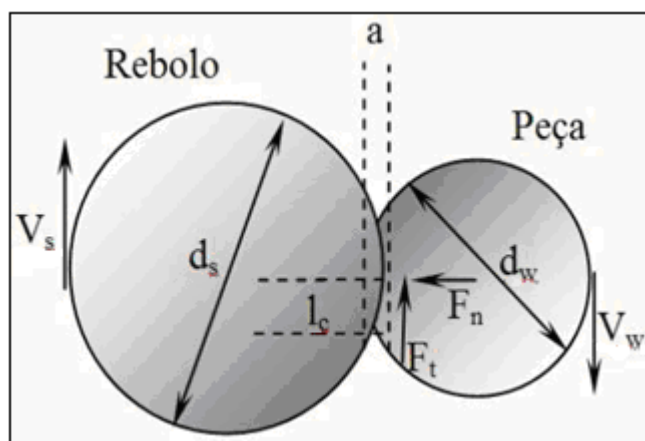


Figura 7 - Operação de retificação cilíndrica externa de mergulho (MALKIN, 1989).

Segundo Liang (1992), a força tangencial de corte apresenta extrema importância no processo da usinagem por ser um parâmetro de análise do desempenho da operação de retificação, uma vez que ela está diretamente relacionada à remoção de material, desgaste do rebolo, temperatura de retificação e à integridade dos componentes retificados.

Marinescu *et al.* (2004), afirmam que a força normal atua perpendicularmente à superfície do rebolo e depende da dureza do grão abrasivo e do material a ser usinado. Essa é maior que a tangencial e age diretamente na redução da profundidade de corte, sendo também responsável por deflexões da peça, rebolo e estrutura da máquina. A componente axial só ganhará importância quando houver certo deslocamento lateral do rebolo.

3.5. Variáveis de saída no processo de retificação cilíndrica

3.5.1. Mecanismo de formação do cavaco

De acordo com Diniz *et al.* (2003) a formação do cavaco influencia diversos fatores ligados à usinagem tais como o desgaste da ferramenta, os esforços de corte, o calor gerado e a penetração do fluido de corte.

Com base no trabalho de Nguyen e Butler (2005), sabe-se que, dependendo das condições de retificação, somente um pequeno número de grãos abrasivos no rebolo irá entrar em contato com a superfície da peça. Entre esse número de grãos ativos, somente uma pequena parte irá cortar e produzir cavaco. Na retificação

de materiais dúcteis, três fases distintas de interação do grão na peça são vistas: região elástica, plástica e de corte.

O processo de remoção de cavaco pode ser dividido em três fases, conforme König (1988), na Figura 8: Esses três estágios aumentam a força e energia no processo.

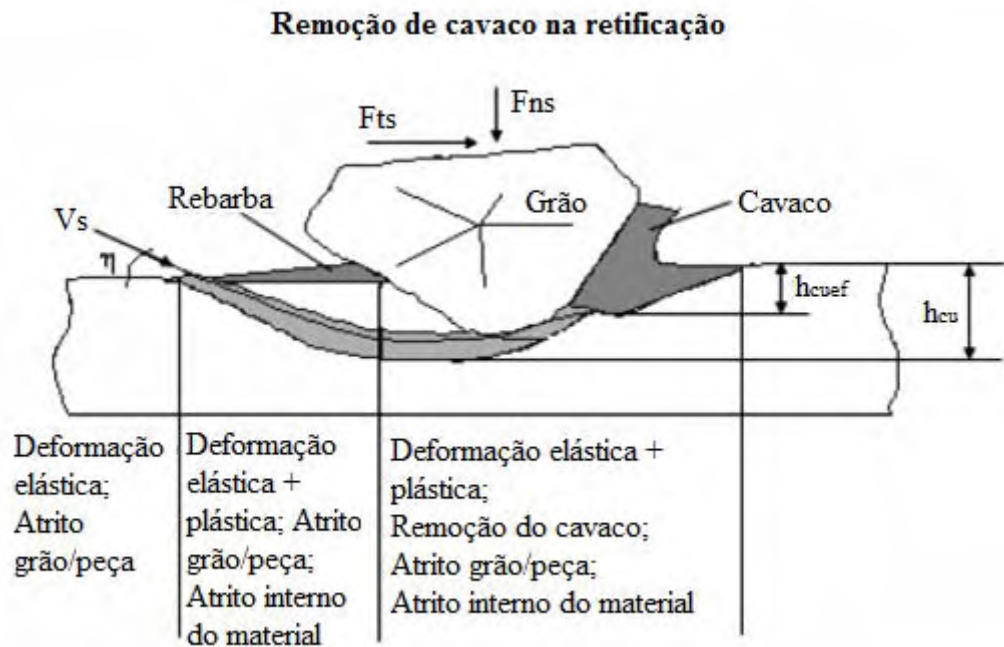


Figura 8 - Formação de um cavaco por um grão abrasivo (KONIG 1980)

De acordo com Malkin (1989), as fases podem ser classificadas como:

Fase I: momento do primeiro contato entre grão abrasivo e peça. Toda energia fornecida ao processo é consumida pelo atrito, calor e deformação. Observa-se uma deformação elástica do material da peça.

Fase II: nesta etapa ocorrem deformações plásticas, escoamento lateral e recuperação das deformações elásticas ocorridas no estágio anterior. No entanto, grande parte da energia continua sendo dissipada por deformações, atrito e calor.

Fase III: nesta fase a aresta de corte atinge um valor de penetração crítico, que por consequência gera uma pressão também crítica. Tal pressão é definida como sendo a pressão mínima para que ocorra a ruptura do material. Neste momento inicia-se a formação de cavaco e grande parte da energia passa a ser consumida no cisalhamento do material.

Com base nessas considerações, Malkin (1989) ainda afirma que apenas uma parcela da energia é empregada no processo de remoção de cavaco, sendo que a

grande porcentagem restante é envolvida em outros como, por exemplo, no atrito existente entre as regiões planas dos grãos e a peça e na deformação plástica da peça antes da formação do cavaco.

Depois de formado, o cavaco é removido da região de corte por meio das porosidades do rebolo, sendo posteriormente expulso da ferramenta pela ação da força centrífuga ou pela lavagem do rebolo feita pelo fluido de corte.

3.5.2. Emissão Acústica

Nos últimos anos, o uso da monitoração dos processos de usinagem tem sido feito para providenciar maior qualidade do produto. Jing *et al.* (2012), cita a emissão acústica, como uma ferramenta importante na obtenção de informações valiosas para a retificação. No entanto, os sinais produzidos na zona de retificação, são geralmente complexos o que dificulta a interpretação destes sinais.

Segundo Kramer (2007), como o modo de remoção de cada material é diferente, é possível identificar os sinais de emissão acústica individualmente. Esses sinais podem ser modulados por drásticas mudanças no mecanismo de remoção do material como no caso das cerâmicas onde pode haver a transição entre os modos frágil e dúctil. Assim, com o emprego da emissão acústica, pode-se analisar a interface peça/ferramenta, o desgaste do rebolo, o corte do material, e também a integridade superficial. Além do mais, Webster *et al.* (1996) enfatiza o emprego dessa variável na verificação da dressagem e dos danos térmicos.

Rangawala e Dornfeld (1991) ainda associam a existência da relação da emissão acústica, com a primeira e segunda zona de centelhamento, associada com a grande energia da deformação plástica.

Entretanto, segundo Lee e Kim (2001), o principal prejuízo encontrado em tal técnica, está na sensível dependência da localização do sensor, uma vez que quanto mais próximo o sensor do ponto de retificação, melhor a sensibilidade e a leitura dos dados.

3.5.3. Erro de Circularidade

O erro de circularidade é definido como qualquer diferença entre a peça usinada e a projetada com tolerâncias especificadas. Fernandes *et al.* (2009) afirma que um dos problemas mais importantes que limitam a circularidade de peças é a ocorrência

de vibrações. Devido ao fato de que este processo é normalmente utilizado para obter superfícies com acabamento elevado, o aparecimento de erros de circularidade, é indesejável.

Com base nisso, Demeter e Hockenberger (1997), assimilam o calor na zona de corte com a dilatação e deformações térmicas sofridas pela peça. Se o calor for excessivo então ocorrerá na peça um aumento nos erros geométricos, especialmente no erro de circularidade. Para que isso seja evitado é conveniente o uso de refrigerantes no processo.

3.5.4. Rugosidade

A qualidade da superfície gerada na retificação de qualquer material determina muitas características da peça.

Assim, Marinescu *et al.* (1998) define a rugosidade como o desvio da forma geométrica ideal da superfície. O parâmetro de rugosidade mais utilizado é a média aritmética (*Ra*) e é definido como a média aritmética do desvio do perfil de rugosidade em relação à linha média.

Diversos fatores no processo de retificação interferem na rugosidade de uma peça retificada. Yueming *et al.* (2013) refere-se aos formatos dos grãos abrasivos, tais como o tipo esfera, cone truncado ou cone, como fator determinante nas variáveis da rugosidade.

Bigerelle *et al.* (2008) relata que a redução da rugosidade superficial está diretamente relacionada com o tamanho e a forma do grão abrasivo do rebolo, onde quanto mais arestas de corte em contato com a superfície melhor a rugosidade. A natureza do ligante também influencia nessa variável, segundo Demirci *et al.* (2008).

Já para Hecker e Liang (2007), a rugosidade é uma função das condições cinemáticas do processo (profundidade de corte, velocidade de corte e da peça) e também do material usinado. Assim, uma maior velocidade melhora a qualidade superficial, pois haverá uma maior quantidade de grão em contato com a peça.

Entretanto, para Huang (2003), a velocidade de corte não afeta significativamente a rugosidade, quando o modo de remoção dominante é por fratura frágil no caso das cerâmicas.

3.5.5. Desgaste diametral do rebolo

A eficiência do rebolo em contraposição ao desgaste pode ser medida por meio da relação G. Segundo Tawakoli *et al.* (2012) um rebolo mais efetivo, pode ser obtido através da monitorização do processo e a sua medição pós-processo. Tendo essas medidas como referência é possível efetuar o ajuste e a adaptação dos parâmetros de corte utilizados.

No trabalho de Liao *et al.* (2000), durante a retificação de uma peça, seja aço ou cerâmica, existem três formas de desgaste da ferramenta abrasiva. O desgaste pode ocorrer, pelo atrito entre o grão abrasivo e a peça, fratura do grão e pela fratura do ligante. Essas formas de desgaste são decorrentes das solicitações mecânicas que o rebolo é submetido e também da deterioração térmica do próprio ligante.

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

$$G = \frac{Z_w}{Z_s} = \frac{a.V_w.t}{\pi.D_s \delta}$$

Onde: t = tempo de retificação;

δ = desgaste radial do rebolo.

Z_w = volume de metal removido.

Z_s = volume de rebolo gasto

Segundo Choi *et al.* (2008), as mudanças nas arestas de corte da superfície de corte da ferramenta abrasiva afetam a performance da retificação. Com isso, Marinescu *et al.* (2004) relata que o desgaste do rebolo durante a retificação influencia, entre outros, nos seguintes aspectos do processo:

- Erro na profundidade de corte;
- Erro no tamanho final da peça;
- Aumento das forças características do processo;
- Aumento ou decréscimo da rugosidade superficial;

- 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.

No entanto, Choi *et al.* (2008), afirma que a relação G está primariamente relacionada com a espessura equivalente de corte, onde o aumento dessa espessura promove diminuição do parâmetro G. Além do mais, a maior eficiência do grão abrasivo é conseguida por meio de maior velocidade de corte e também pela aplicação de lubri-refrigeração.

3.6. Fluidos de Corte

3.6.1. Importância dos fluidos de corte

Segundo Runge e Duarte (1990), os fluidos de corte podem ser definidos como qualquer espécie de fluido que é introduzida no processo de usinagem.

De acordo com Pawlak *et al.* (2004), através da lubrificação os fluidos de corte são aplicados na usinagem dos materiais com o propósito de reduzir as consequências dos processos tribológicos que estão sempre presentes na superfície de contato entre a peça e a ferramenta, e também reduzir o calor na região de corte, através da refrigeração.

Zhang *et al.* (2013) afirma que durante o processo, as altas temperaturas produzidas na zona de retificação, podem causar vários tipos de danos térmicos à peça de trabalho, tais como micro trincas e até fissuras térmicas.

Durante a retificação, muitos grãos abrasivos estão em contato com a peça a cada segundo, mas apenas uma pequena parte desses tem o papel de corte no processo real, enquanto os outros apenas geram calor. Geração de calor e temperatura alta na zona de contato está associada com o ângulo de inclinação negativa elevado, e um grande comprimento de contato no processo de retificação. Esse calor pode ser reduzido pela aplicação de fluido de corte (TAWAKOLI *et al.* 2009).

Esse calor, segundo Guo *et al.* (2007), provém do atrito entre peça e rebolo. Ele irá gerar deformação térmica na máquina e na peça, limitando a precisão da

usinagem. Segundo Irani *et al.* (2005), o dano térmico causado por essa grande geração de calor é um dos maiores fatores limitantes no processo de retificação.

O efeito lubrificante do fluido pode reduzir o calor pela diminuição do atrito e, com isso, as forças serão menores e a tensão residual também. Ramesh *et al.* (2004), afirmam que uma boa aplicação de lubri-refrigerante evita tensão residual, pois reduz as tensão térmicas e mecânicas durante a formação do cavaco.

Além de lubrificar e refrigerar, o fluido de corte também tem como funções importantes, a propriedade anti-corrosão que dá as peças e a máquina (STANFORD E LISTER, 2007), o de transporte dos cavacos gerados e a limpeza do rebolo (MARINESCU *et al.*, 2007).

De acordo com Minke (1999), as funções do fluido de corte são mostradas na Figura 9:

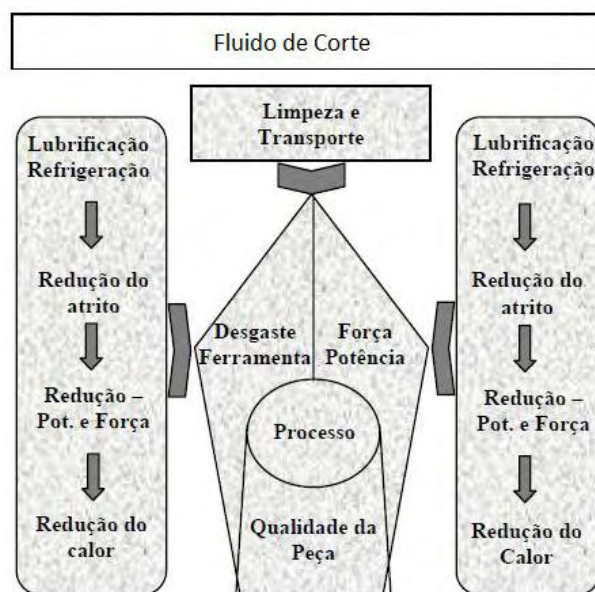


Figura 9 - Funções do fluido de corte no processo de retificação (MINKE, 1999).

De acordo com Sokovic e Mijanovic (2001), além de todas as vantagens citadas, o fluido de corte aumenta a vida útil da ferramenta (maior produtividade), permite maiores velocidades, maior economia no processo e redução da rugosidade (melhor acabamento).

Segundo Marinescu *et al.* (2007) os principais requisitos de um fluido de corte para se obter uma operação econômica, eficiente, estável operacional (longa vida), e com proteção ambiental são:

- Filtragem e reciclagem fáceis.
- Seus resíduos devem ser passíveis de fácil remoção na peça, no rebolo e na máquina.
- Transportar e remover os cavacos
- Evitar a formação de espuma e formação de névoa
- Não ser muito inflamável
- Ter boa compatibilidade química com os materiais do sistema máquina-ferramenta.

3.6.2. Classificação dos fluidos de corte

Segundo Blenkowski (1993), os fluidos podem ser divididos em quatro grupos básicos: óleo integral, óleos solúveis (formadores de emulsões), fluidos semi-sintéticos e fluidos sintéticos. Cada classe é definida em função da quantidade de óleo presente mineral ou sintético.

Os fluidos solúveis em água são utilizados em retificações de alta velocidade, pelo fato de apresentarem as melhores capacidades de resfriamento. Os fluidos denominados sintéticos são compostos por materiais inorgânicos, não apresentando nenhum tipo de óleo mineral. O fluido semi-sintético é uma combinação de fluidos sintéticos com óleos emulsificantes, agregando as melhores propriedades de cada um deles.

Ainda segundo Marinescu *et al.* (2004), é possível fazer uma classificação dos fluidos de base líquida existentes, separando-os em classes, subclasses e grupos pertencentes de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação dos fluidos para processamento de base líquida.
(MARINESCU *et al.*2004).

CLASSES	SUB-CLASSES	GRUPOS
Óleos integrais (não miscíveis em água)	Óleos naturais	Óleos animais, óleos vegetais óleos de peixe
	Óleos minerais	Óleos parafínicos, óleos olefinicos óleos aromáticos
	Óleos sintéticos	Óleos de hidrocarbonetos saturados, óleos de estrutura complexa
Fluidos a base de água	Soluções	Soluções de sal mineral, soluções sintéticas
	Emulsões	Emulsões de óleo (óleos solúveis),
		Emulsões sintéticas

Webster (1995) relaciona algumas características dos quatro principais tipos de fluidos de corte: óleo mineral, óleo solúvel, fluidos semi-sintéticos e fluidos sintéticos, mostradas na Tabela 2.

Tabela 2 - Caracterização dos principais tipos de fluidos (WEBSTER, 1995).

	Sintético	Semi-sintético	Óleo emulsionável	Óleo mineral
Calor removido	Excelente	Ótimo	Bom	Ruim
Lubrificação	Ruim	Bom	Ótimo	Excelente
Manutenção	Ótimo	Bom	Ruim	Excelente
Filtrabilidade	Excelente	Ótimo	Bom	Ruim
Danos – Meio ambiente	Excelente	Ótimo	Bom	Ruim
Custo	Excelente	Ótimo	Bom	Ruim
Vida do rebolo	Ruim	Bom	Ótimo	Excelente

3.6.3. Mínima quantidade de Lubrificante (MQL)

Atualmente trabalhos como o de Alves *et al.* (2011), defendem que a tendência da maioria das empresas, é procurar maneiras de diminuir a utilização em massa dos fluidos de corte. E propõe para isto, o método de mínima quantidade de lubrificante (MQL), que se baseia no uso de um baixo fluxo de fluido de corte, com uma mistura com o ar comprimido, utilizado em pressões elevadas.

Segundo Machado e Diniz, (2000), existem duas opções para a redução no uso de fluidos de corte: o corte completamente sem fluido (corte a seco) e o corte com mínima quantidade de refrigeração (MQL), pelo qual uma mínima quantidade de óleo é pulverizada em um fluxo de ar comprimido.

Porém de acordo com Novaski e Door (1999), sem a utilização de fluidos de corte, algumas principais funções tais como, a redução do atrito (lubrificação), eliminação do calor (refrigeração) e auxílio ao transporte de cavacos (limpeza) deixam de existir. Logo, sem a lubrificação, a camada de separação entre a ferramenta e o material não será mais suficientemente garantida e o atrito aumentará e também ocorrerá uma elevação da temperatura no processo. Como consequência para a ferramenta tem-se o aumento do desgaste abrasivo e de adesão.

Assim Hadad e Sadeghi (2013) afirmam que em grande número dos estudos que visam reduzir a aplicação de fluidos de corte. Em comparação com a usinagem a seco, a técnica MQL, melhora substancialmente o desempenho de corte, em termos de aumento da vida útil da ferramenta e melhorar a qualidade das peças.

De acordo com Neto (2012), a técnica da Mínima Quantidade de Lubrificação pode ser entendida como uma pequena quantidade de óleo lubrificante misturada a um fluxo de ar comprimido, capaz de formar uma névoa que é direcionada à região de contato entre peça e ferramenta.

Tawakoli *et al.* (2010) refere-se à técnica de Mínima quantidade de lubrificante (MQL), como uma alternativa promissora para aplicação de fluido de corte. De acordo com os mesmos autores, essa técnica destaca-se atualmente como uma tendência dentre os métodos de lubri-refrigeração empregados nos processos de usinagem em geral.

Segundo Attanasio *et al.* (2006) a técnica de MQL (mínima quantidade de lubrificante) surge como uma alternativa coerente, uma vez que combina a funcionalidade da refrigeração com um consumo extremamente baixo de fluidos. Os fluidos de corte custam em torno de 7-17% dos custos do processo enquanto que as ferramentas 2-4%. Dessa forma, no método de MQL são usados fluidos com vazão na ordem de ml/h ou l/min.

Tawakoli *et al.* (2009), diz que tecnicamente, o método de MQL é uma aspersão de gotículas de óleo em um jato de ar comprimido, que é injetado na região de corte. O aerosol é uma suspensão gasosa no ar na forma de partículas líquidas.

Segundo Heisel *et al.* (1998), neste método a função de lubrificação é assegurada pelo óleo e a de refrigeração, principalmente, pelo ar comprimido. O aerosol é uma suspensão gasosa no ar na forma de partículas líquidas. Segundo Heisel *et al.* (1998), neste método a função de lubrificação é assegurada pelo óleo e a de refrigeração, principalmente, pelo ar comprimido.

3.6.4. Método de aplicação da técnica de MQL

Para aplicar este método, Attanasio *et al.* (2006) explica em seu trabalho que primeiramente é preciso fazer a mistura do ar com o óleo para depois ser aplicado. Existem duas formas de mistura: uma ocorre fora e a outra dentro do bocal. Usando o sistema com a mistura dentro do aspersor, tem-se um fácil controle da mistura e redução dos gases prejudiciais.

Neste sistema, o óleo é aspergido pelo ar, ou através de um sistema único, ou através de um sistema duplo, ou seja, o óleo sai de um reservatório e o ar de outro. A formação do aerossol dá-se no aspersor através do princípio de Venturi. A Figura 10 demonstra o funcionamento de um sistema de mínima quantidade de lubrificação.

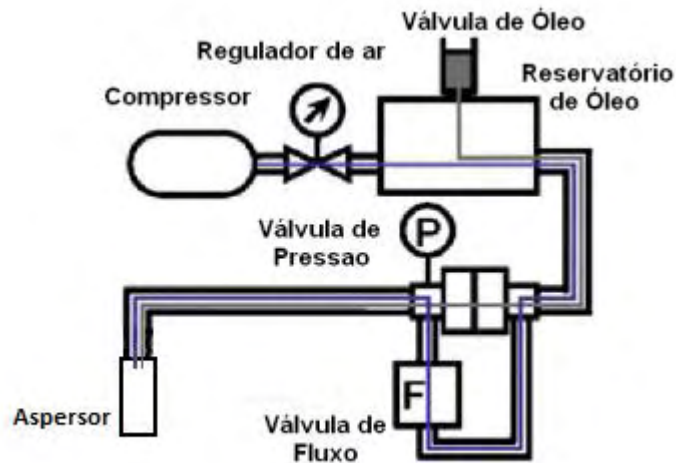


Figura 10 - Modelo esquemático de um Sistema de Mínima Quantidade de Lubrificação por pressão (OBIKAWA 1999, adaptado).

Porém a mistura do ar com o óleo pode influenciar no formato e tipo do jato fornecido. Em um estudo sobre uma melhor compreensão da aplicação da mínima quantidade de lubrificante (MQL), Park *et al.*, (2010) pesquisou sobre parâmetros importantes, tais como o tamanho e distribuição de gotas, e chegou à conclusão que há diferenças nos níveis de eficiência com a variação dos termos da distância do bocal e da pressão de ar.

Outro aspecto importante para Tawakoli *et al.*(2010) para a aplicação do MQL é observar a posição de aplicação do MQL em relação à ferramenta. No processo de retificação, a cortina de ar que se forma em torno do rebolo produz uma barreira para entrada do fluído.

Sendo assim no método MQL se o bico pulverizador for direcionado acima da região de turbulência, associado com a velocidade de corte e distância correta, o fluxo de ar favorável nesta região, irá favorecer em maior penetração do fluído de corte na zona de contato conforme demonstra a Figura 11.

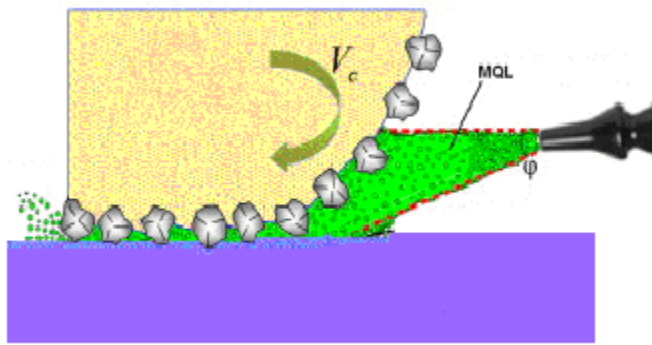


Figura 11 - Esquema de pulverização de névoa do MQL (TAWAKOLI *et al.* 2010, adaptado)

As propriedades lubrificantes do óleo utilizado no MQL também são importantes. O óleo é responsável por reduzir o atrito, que por sua vez resulta numa redução do calor gerado, mantendo a ferramenta dentro de faixa de temperatura que não prejudique o seu desempenho.

Uma opção para a técnica de MQL são os óleos derivados de plantas. Estes óleos, se inalados com a formação do aerosol, causam um menor risco à saúde. Sabendo disso, Rahim e Sasahara (2011), pesquisaram a aplicação deste método utilizando o óleo de Palma, e citou este tipo como vantajoso para a biodegradabilidade do fluido de corte. E ainda de acordo com os resultados, o óleo de palma pode aumentar a capacidade de lubrificação e de arrefecimento em comparação com a aplicação do MQL com éster sintético.

3.6.5. Vantagens da utilização do MQL

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

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

Ainda segundo o mesmo autor, a técnica de MQL apresenta outras vantagens. O cavaco a peça e a ferramenta apresentam menos resíduos do lubrificante, o que torna sua limpeza mais fácil e econômica. Também durante a usinagem, a área de

trabalho não fica inundada de fluido de corte, possibilitando assim observar a operação claramente.

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

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

3.6.6. Desvantagens no uso da técnica de MQL

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

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

Além disso, Diniz *et al.* (2003) também apresentam algumas desvantagens dos processos de mínima quantidade de lubrificante :

- Poluição ambiental: A pulverização levanta no ambiente atmosférico local, muitas partículas de óleo que exigem cuidados especiais. Deve-se exigir então que a máquina seja totalmente fechada e possua um sistema de exaustão com controle de partículas;

- Consumo: A aplicação do fluido por névoa é considerado sem retorno, isto é, há total perda do fluido. Mesmo a baixos níveis de vazão, o consumo deve ser considerado.

- Ruído: Na pulverização é utilizada uma linha de ar comprimido que funciona intermitentemente durante todo o processo. Essas linhas de ar geram muito ruído, normalmente com potência superior às máximas permitidas para o ouvido humano (80 dB). Além de afetar a saúde, o ruído polui o ambiente, prejudicando a comunicação.

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

3.6.7. Fenômeno do entupimento do rebolo

Quando o cavaco gerado no processo de retificação não é totalmente removido da zona de corte por meio do fluido refrigerante, esses cavacos alojam-se, então, nos poros do rebolo, não deixando os fluidos entrarem perfeitamente na zona de corte e, dessa forma, dificultando ainda mais a limpeza.

Sadeghi *et al.* (2009) afirma que os cavacos não retirados da região de corte, devido ao baixo fluxo de fluido de corte, aderem à superfície da ferramenta (Figura 12), causando um desgaste maior do rebolo e aumentando a rugosidade superficial da peça.

Também Wang *et al.* (2000) explicam que, quando a energia no contato entre o rebolo e a peça gera um aumento na temperatura, isso implica em uma maior tendência de aderência de partículas de metais nos grãos abrasivos. Portanto, quanto menor a energia específica associada ao processo, menor a chance de danos. Na Figura 12 pode-se notar cavacos aderidos a um rebolo.

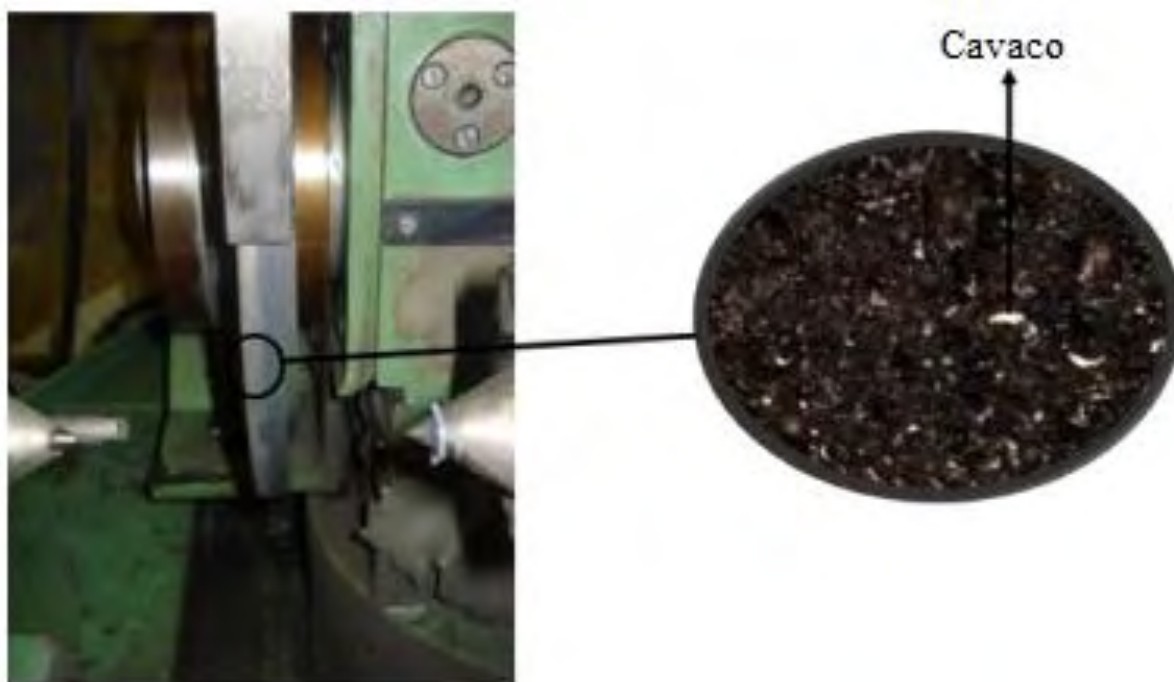


Figura 12 - Cavacos aderidos aos poros do rebolo. (aumento de 100X). (Pereira *et al.* 2011)

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

3.7. Sistemas de limpeza da região periférica do Rebolo

3.7.1. Limpeza a laser

A utilização de um laser de alta potência foi defendida por Jackson *et al.* (2007) para promover a fusão dos cavacos de metal na superfície de corte do rebolo. Após serem fundidos, os cavacos eram removidos da região de corte naturalmente no processo de retificação.

O laser passa por uma lente convexa e irradia na superfície do rebolo com grande quantidade de energia. Essa energia é capaz de cortar o rebolo, removendo grãos de corte e cavacos aderidos conforme a Figura 13.

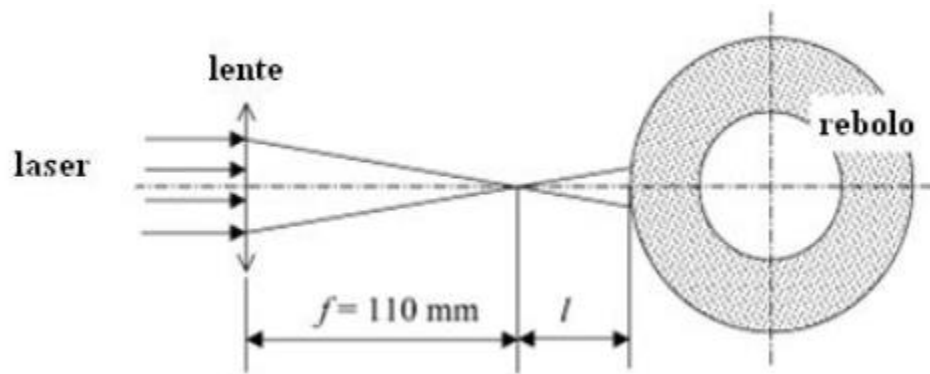


Figura 13 - Limpeza a laser da superfície de corte do rebolo (JACKSON *et al.*, 2007).

No entanto, é preciso controlar a irradiação para que ela não danifique o rebolo, sendo dois parâmetros importantes: fluxo de energia e duração do feixe. Ajustando o foco l , o primeiro pode ser controlado. Controlar a duração do pulso do laser e sua frequência, também pode ajudar a ajustar o nível de energia de irradiação.

3.7.2. Limpeza com jato de Ar comprimido

O trabalho proposto por Lee *et al.* (2002), para prevenir o fenômeno do entupimento do rebolo e melhorar a precisão dimensional da peça, foi um jato de ar de alta pressão a ser aplicado na retificação. Segundo Lee *et al.*, (2002), na Figura 14 mostra os efeitos do jato de ar no rebolo,

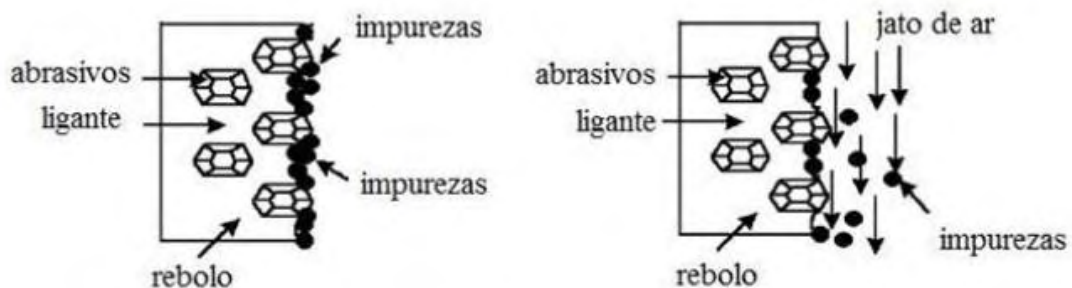


Figura 14 - Efeito do jato de ar comprimido. (a) Retificação sem limpeza do rebolo, (b) Retificação com limpeza do rebolo (Lee *et al.*, 2002, adaptado).

Este experimento foi realizado colocando o jato de ar comprimido de duas maneiras:

- Na mesma direção que a rotação do rebolo
- Na direção oposta à rotação do rebolo

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

A Figura 15 demonstra a variação da profundidade do canal retificado com jato de ar em diferentes condições. Nota-se, pois, com o uso de tais jatos conseguiu-se maior precisão dimensional.

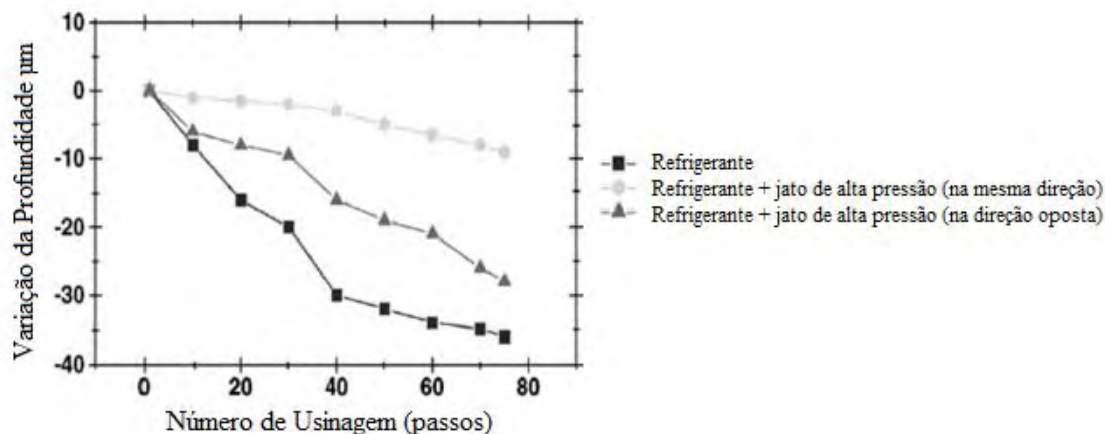


Figura 15 - Variação da profundidade do canal retificado (LEE *et al.*, 2002, adaptado)

Também usando ar comprimido Neto *et al.* (2012), testaram a aplicação do jato com ângulos diferentes em relação ao rebolo conforme a Figura 16.

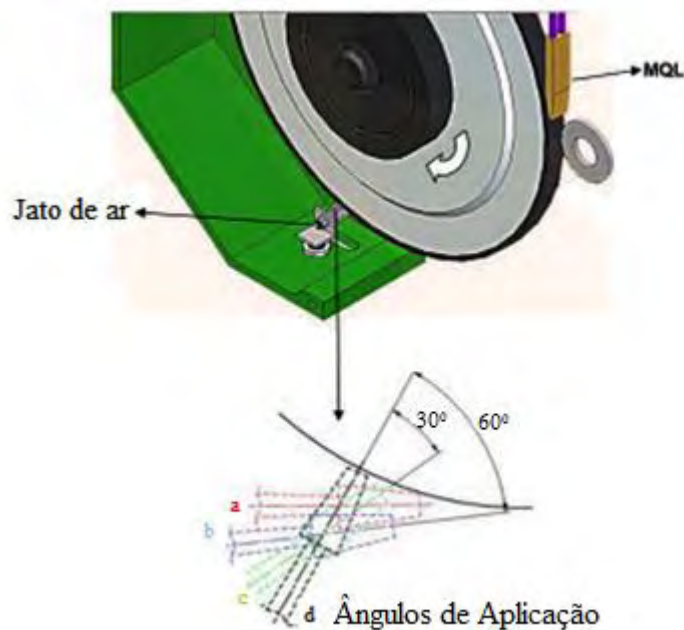


Figura 16 - Posicionamento do bocal de limpeza: (a) tangente, (b) 60°, (c) 30°, (d) normal (Oliveira *et al.* 2012)

Na aplicação com ângulo de 30° graus, os autores concluíram que os erros de circularidade e desgaste do rebolo caíram substancialmente em comparação ao MQL sem limpeza. E analisando os resultados de rugosidade alcançados, o sistema de MQL com jato de ar a 30°, obteve menores valores se comparado ao método convencional de aplicação de fluidos conforme mostra a Figura 17.

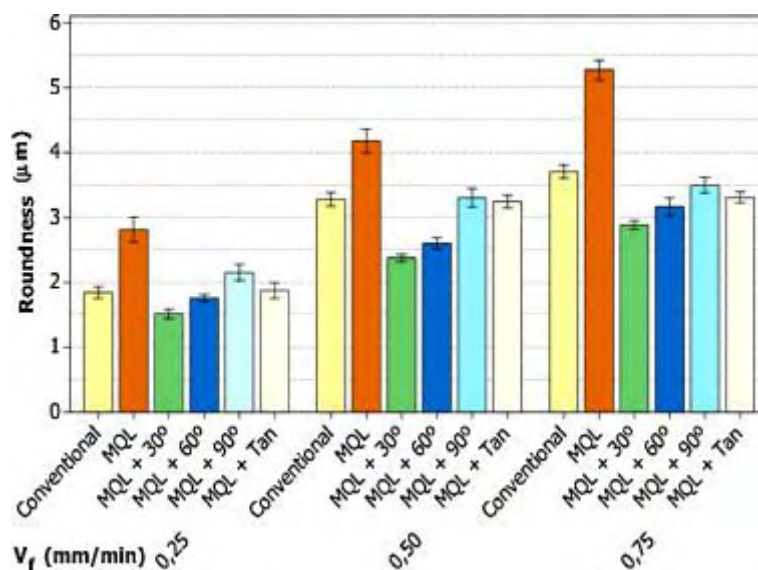


Figura 17 - Rugosidade das condições de refrigeração em relação aos avanços (Oliveira *et al.* 2012).

Portanto, a utilização da técnica de MQL, combinado com um jato de ar comprimido para a limpeza da superfície do rebolo, promoveu uma limpeza eficiente. Deste modo, melhores resultados foram alcançados em quase todas as saídas dos processos analisados.

3.7.3. Limpeza com um sistema secundário de fluido de corte

Para ajudar a reduzir o fenômeno de entupimento do rebolo de CBN Cameron e Warkentin (2009), utilizaram um jato de limpeza independente do fluido de corte. Este jato foi aplicado usando uma vazão de fluido de corte a alta velocidade voltada para a superfície do rebolo. Os autores analisaram diferentes velocidades de aplicação, e chegaram à conclusão de que o aumento na velocidade do jato reduziu a energia específica no processo conforme demonstra a Figura 18.

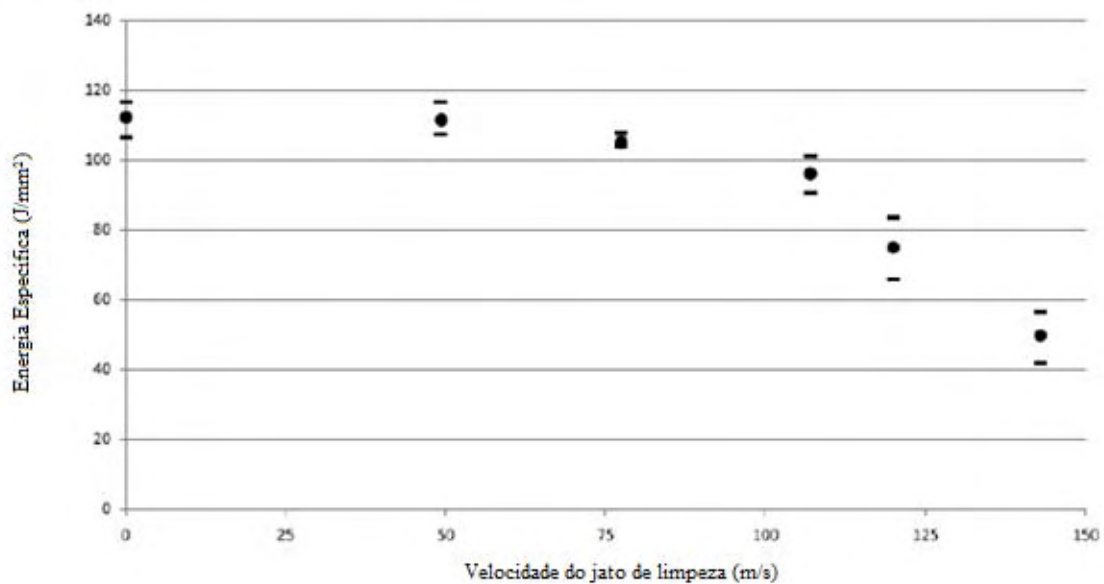


Figura 18 - Influência da limpeza do rebolo no patamar de energia específica (CAMERON & WARKENTIN, 2009)

Também Brinksmeier *et al.* (1999) relatou, em seu trabalho, diferentes orientações para a aplicação do jato de limpeza do rebolo na Figura 19. Em uma, o bocal estava apontando normal à superfície de corte do rebolo e outra, tangencialmente. Na orientação normal, os autores observaram que foi preciso aplicar uma pressão de aproximadamente 0,80 MPa para ser eficiente e a tangencial, na direção contrária à rotação do rebolo, permitiu pressões menores para ser igualmente satisfatória.

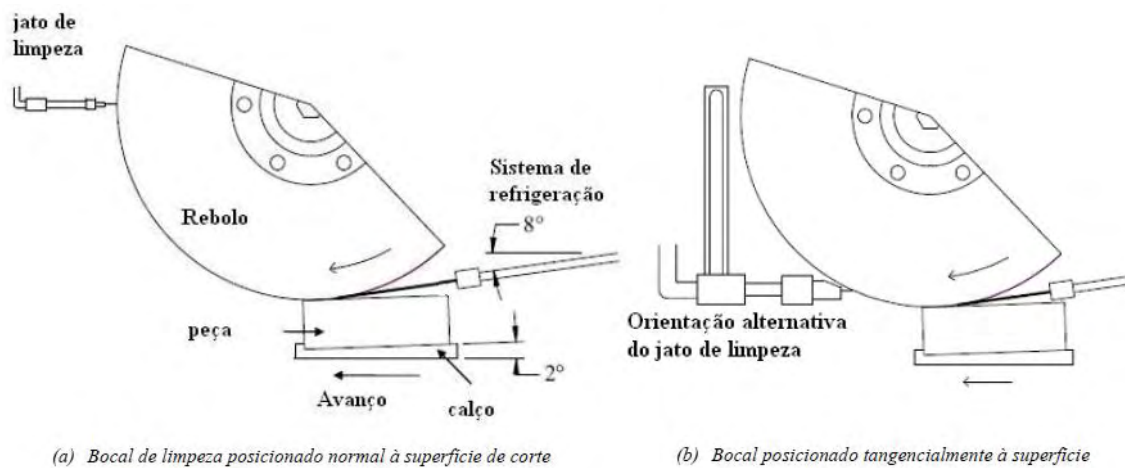


Figura 19 - Formas de posicionamento do bocal de limpeza utilizando fluido de corte. (a) Bocal de limpeza posicionado normal à superfície de corte, (b) Bocal posicionado tangencialmente à superfície (adaptado de Brinksmeier *et al.*, 1996)

Outra descrição da aplicação deste método, foi feita por Webster *et al.* (1995) em uma avaliação de uma fábrica de cames, o jato independente utilizando-se de alta pressão, foi adicionado ao processo de retificação para limpar o rebolo. Assim o fabricante conseguiu aumentar a confiabilidade de seu processo e reduzir as inspeções de defeitos, economizando \$300.000 por ano com mão-de-obra e consumo de materiais.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Serão descritos todos os equipamentos e materiais utilizados nos ensaios, assim como a descrição dos procedimentos durante a experimentação.

4.1. MATERIAIS

4.1.1. Retificadora Cilíndrica externa

Os experimentos serão realizados na retificadora cilíndrica CNC fabricada pela empresa Sulmecânica, modelo RUAP 515 H ilustrada na Figura 20.



Figura 20 - Retificadora cilíndrica CNC Sulmecânica - RUAP 515 H

4.1.2. Fabricação do mandril

O mandril fabricado para prender o corpo de prova, tomando possível a usinagem entre pontas, está ilustrado na Figura 21 e 22:

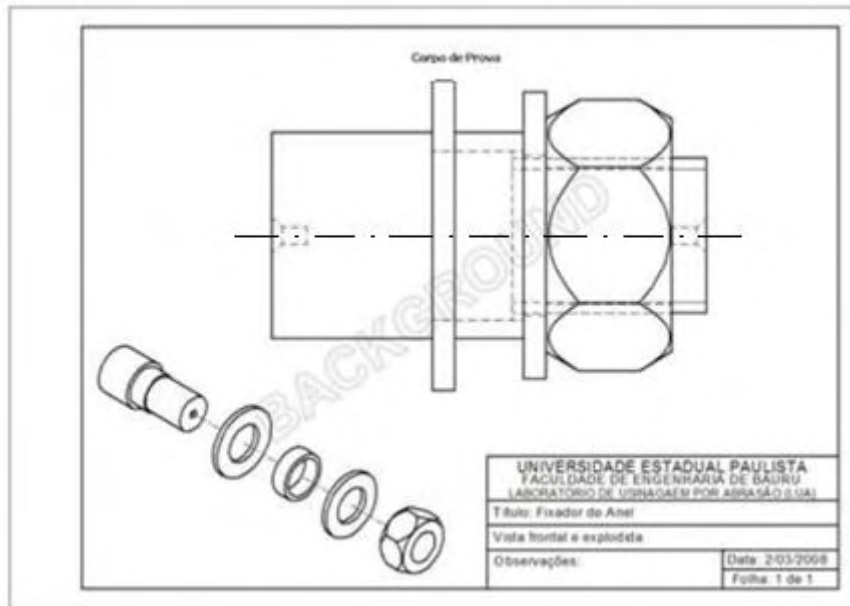


Figura 21 - Desenho do mandril Projetado



Figura 22 - Dispositivo fixado a máquina

4.1.3. Corpo de prova

O corpo de prova que será utilizado para os ensaios é feito de aço ABNT 4340. Temperados e revenidos pela empresa Thermix – Tratamentos Térmicos, passando a apresentar dureza média de 59 HRc. Esse aço é muito utilizado na fabricação de peças que exigem boa combinação de resistência e tenacidade, com valores relativamente uniformes em toda a seção. As dimensões do corpo de prova são: diâmetro externo 54 mm, diâmetro interno 30 mm, espessura 4 mm.

Serão usinados 3 corpos de prova para cada condição de velocidade e cada condição de refrigeração totalizando 63 amostras. A Figura 23 ilustra o formato do corpo de prova que será usado nesta pesquisa.



Figura 23 - Corpos de prova que serão usados nesta pesquisa.

Além deste corpo de prova, será utilizada outra peça para a impressão do rebolo, com o objetivo de medir se desgaste. O material desse segundo tipo de corpo de prova é um aço ABNT 1045, não temperado. A escolha desse aço deve-se ao fato de ser um aço dúctil quando não temperado. Dessa forma a marcação do perfil desgastado do rebolo é facilitada. As dimensões são: 37 mm de diâmetro e comprimento de 40 mm (Figura 24)



Figura 24- Geometria do corpo de prova usado para a marcação do desgaste do rebolo.

4.1.4. Rebolo

Para a realização dos ensaios foi utilizado, um rebolo CBN de ligante vitrificado do tipo 14A1, com dimensões de 350 mm (diâmetro externo) x 15 mm (largura) x 5 mm (camada), diâmetro interno de 127mm, dureza da liga R, concentração 300 e tamanho de grão de 91 mm (14A1 350X15X125 B91R300V23A) da empresa Nikkon Ferramentas de Corte Ltda. A figura 25 ilustra a ferramenta que será usada nessa pesquisa.



Figura 25 - Rebolo CBN

4.1.5. Dressadores

A dressagem foi realizada com o dressador multigranular do tipo conglomerado visto na Figura 26, da empresa Master Diamond. Trata-se de um dressador cuja ponta é composta por diamantes em uma matriz metálica. As dimensões da pastilha são 15x8x10 mm. É prevista uma penetração de 2 μ m por passada durante o perfilamento até um valor correspondente à eliminação total da camada desgastada com velocidade de 30m/min.



Figura 26 - Dressador estático do tipo conglomerado.

4.1.6. O sistema de refrigeração convencional

O sistema de refrigeração convencional é o mesmo utilizado em várias empresas atualmente. Consistem essencialmente do reservatório de fluido (80 litros), bomba, mangueiras, bocais aplicadores e o fluido de corte demonstrado nas Figuras 27 e 28.

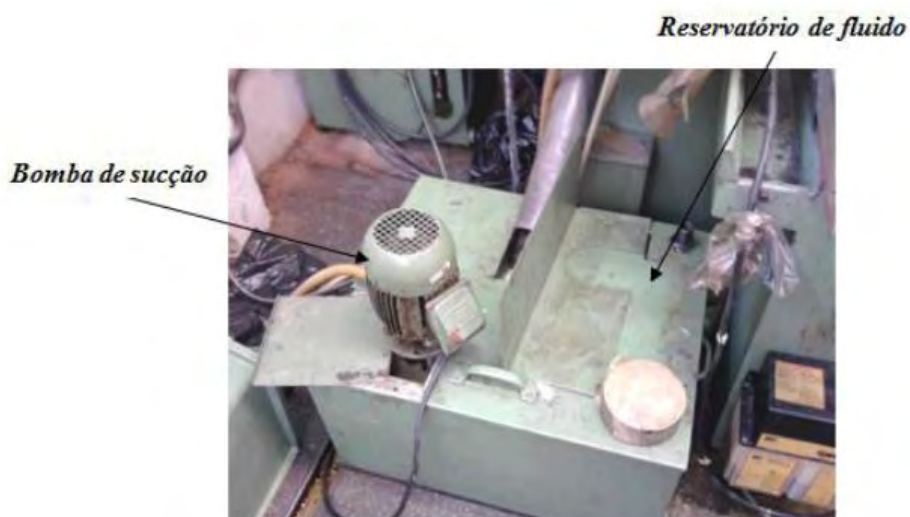


Figura 27 - Bomba e reservatório de fluido.

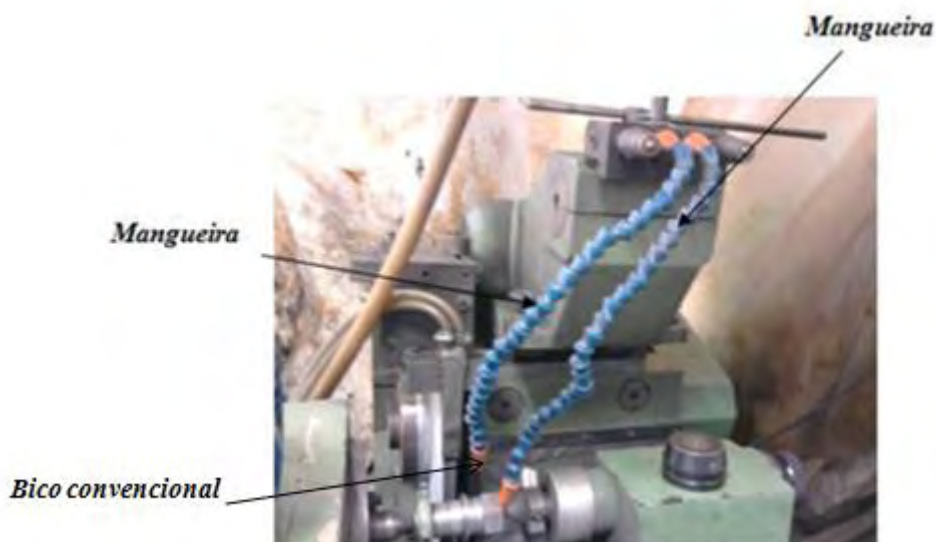


Figura 28 - Mangueiras utilizadas na aplicação convencional do fluido de corte.

O lubrificante de corte utilizado foi o óleo solúvel semi-sintético ME-I concentrado, fabricado pela empresa Tapmatic do Brasil Ltda., que pode ser diluído em 39 partes de água, para aplicações em retificação. A vazão utilizada para os ensaios foi de 17l/min e pressão de 0,2 kgf/cm².

4.1.7. Medição de concentração

As medições da concentração da emulsão foram verificadas periodicamente através do refratômetro portátil do fabricante Atago modelo N-1E, na concentração de 5%.

4.1.8. O sistema MQL

O sistema MQL é composto basicamente de: compressor, regulador de pressão, medidor de vazão de ar, dosador (equipamento de MQL) - Figura 29. Há também o bocal projetado para a utilização de MQL na retificação Figura 30.

O equipamento de mínima quantidade de lubrificante permite uma fina regulagem do volume de lubrificante/ar separadamente, por meio de um registro tipo agulha, atomizando-o em um fluxo de ar à pressão constante de 6,5 kgf/cm², aproximadamente.

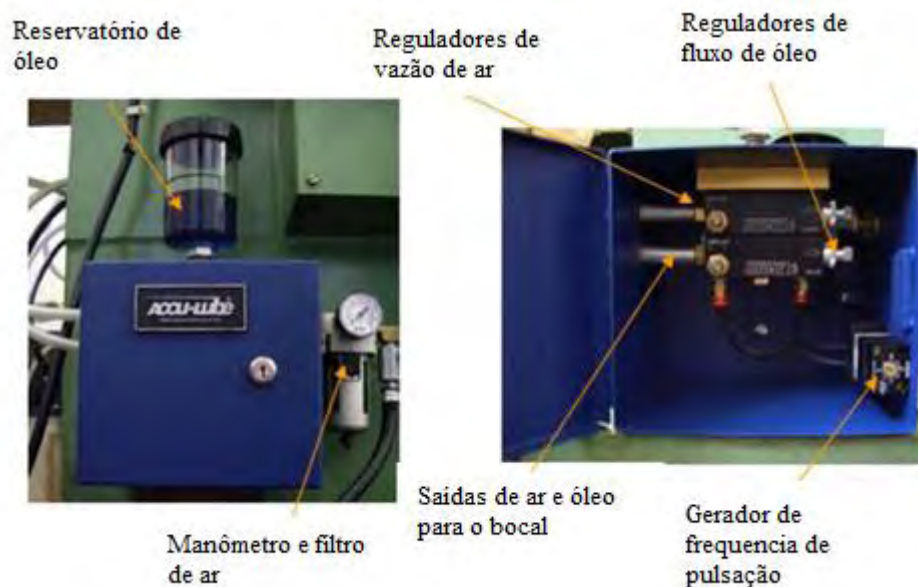


Figura 29 - Unidade de controle do MQL.

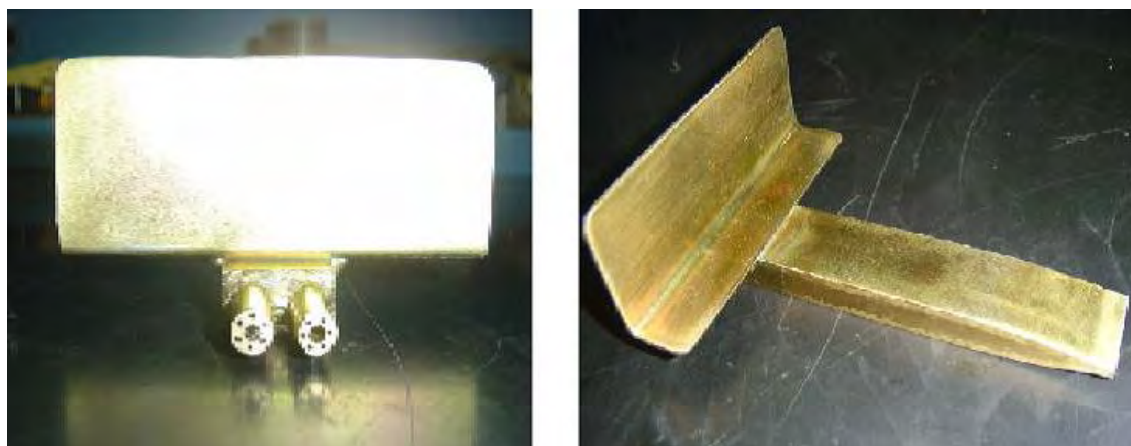


Figura 30 - Duas vistas do bocal para experimentação com MQL.

Para a medição precisa das vazões de ar comprimido utilizadas nos experimentos é necessário um medidor de vazão e um regulador de pressão com filtro, mostrado na Figura 31. O medidor de vazão é conectado a uma rede de ar comprimido, para fornecer a leitura direta da vazão, é do tipo turbina, onde o campo magnético, de acordo com sua rotação, é mais ou menos intenso, sendo captado por um sensor posicionado próximo à turbina do medidor.

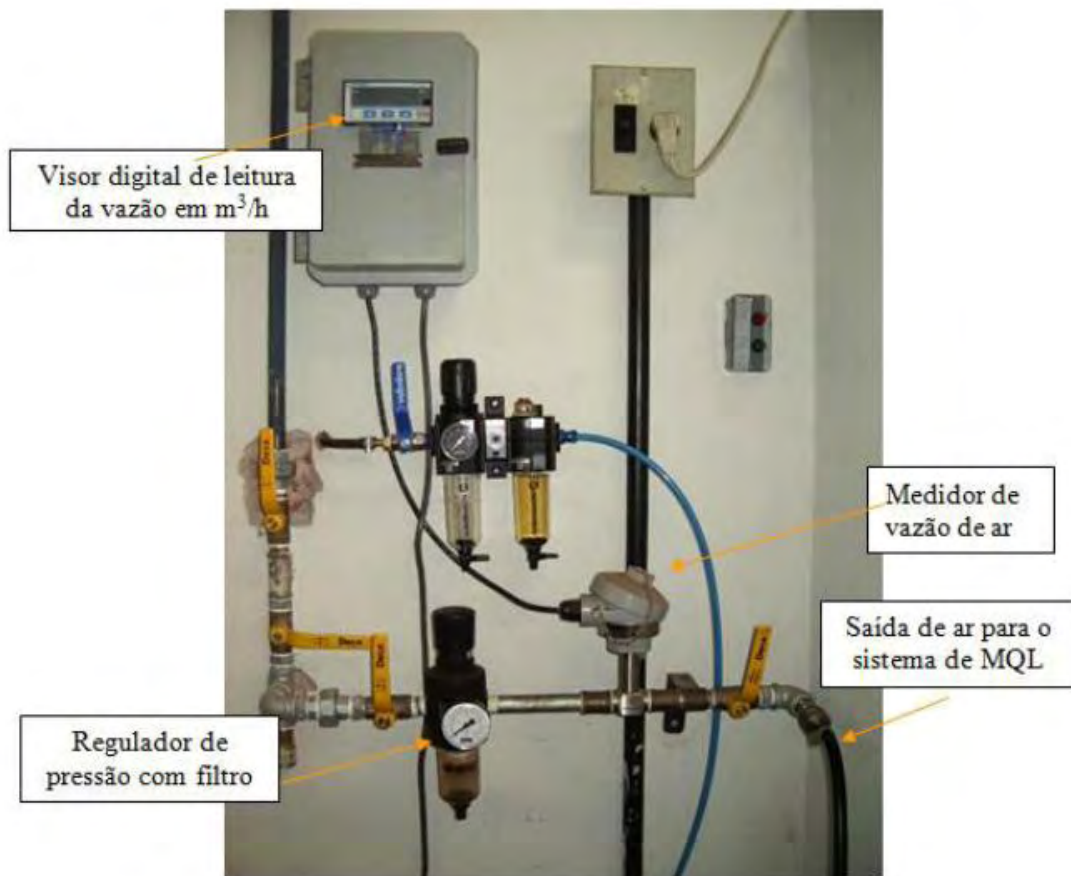


Figura 31 - Sistema de ar comprimido para o MQL.

O fluido de corte utilizado na MQL será o Accu-Lube LB 1000, fornecido pela empresa ITW Chemical Products Ltda., a uma vazão de 120 ml/h, com ar à pressão constante de 6,5 kgf/cm².

4.1.9. Sistema de limpeza com o bocal de ar comprimido.

O bocal de limpeza de rebolo com ar comprimido é composto por uma série de equipamentos como: compressor MSV 40 Max – Schulz, para suprir as necessidades de ar comprimido; medidor de vazão (Meter run), de pressão modelo 7MF4433-1EA02-1PC6-Z, para determinar com precisão a vazão e pressão do ar comprimido que sai do bocal de limpeza; e um bocal para a limpeza da superfície de corte do rebolo, como ilustrado na Figura 32. O bocal será colocado o mais próximo possível, aproximadamente 0,5mm de distância da superfície de corte do rebolo com vazão de ar de 480 l/min.

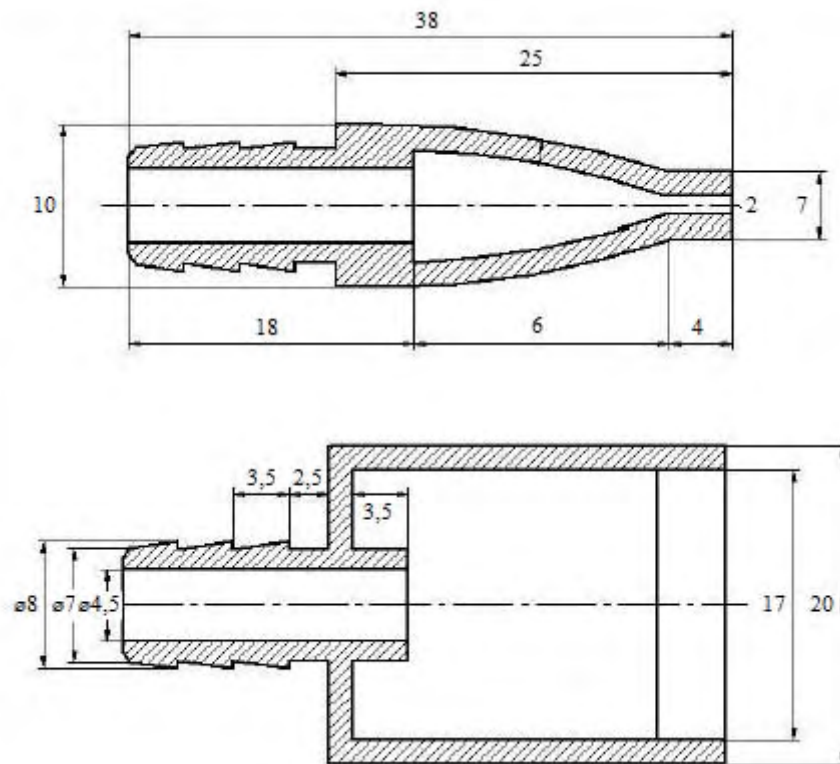


Figura 32 - Projeto do bocal para limpeza dos rebolos com ar comprimido (Dimensões em mm). (Oliveira *et al.* 2012).

O bocal de limpeza pode ser observado pela Figura 33.



Figura 33 - Bocal de limpeza.(Oliveira *et al.* 2012).

Já na Figura 34, observa-se a fixação dos bocais na máquina retificadora. No entanto, para maior eficiência da limpeza, utilizar-se-á um único bocal com o ângulo de 30°, optou-se por construir um sistema de ar comprimido independente, para não sobrecarregar um único compressor e ter maior eficiência e precisão nos resultados durante o desenvolvimento da pesquisa.



Figura 34 - Fixação dos bocais de limpeza na retificadora. (Oliveira *et al.* 2012)

O bocal será fixado na proteção de aço que existe em torno da ferramenta abrasiva. No bocal é acoplado o medidor de vazão e pressão para obter os parâmetros que serão importantes para a correta limpeza e remoção dos cavacos com óleo aderidos na superfície de corte do rebolo. Já na Figura 35, está representado o bocal de limpeza, bem como o conjunto de peças utilizadas na fixação e regulagem de posicionamento de cada bocal.

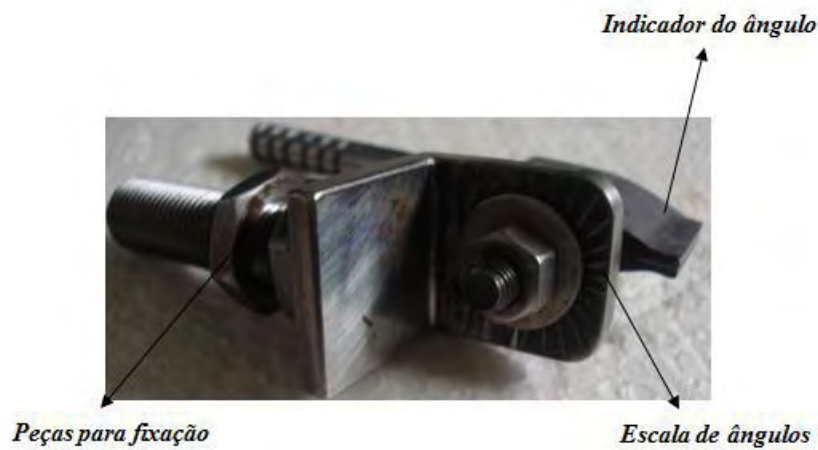


Figura 35 - Demonstração das partes funcionais do bocal para limpeza do rebolo (peças para fixação e sistema de leitura do ângulo de inclinação).(Oliveira *et al.* 2012).

4.1.10. Dispositivo de Limpeza

A idéia principal deste trabalho foi a construção de um dispositivo, com uma estrutura que pudesse controlar o contato ocorrido entre o rebolo e o bastão. Para isso foi construída uma base que permitiu além da fixação na estrutura da retificadora, um apoio linear para o deslizamento do bastão conforme a Figura 36 abaixo.

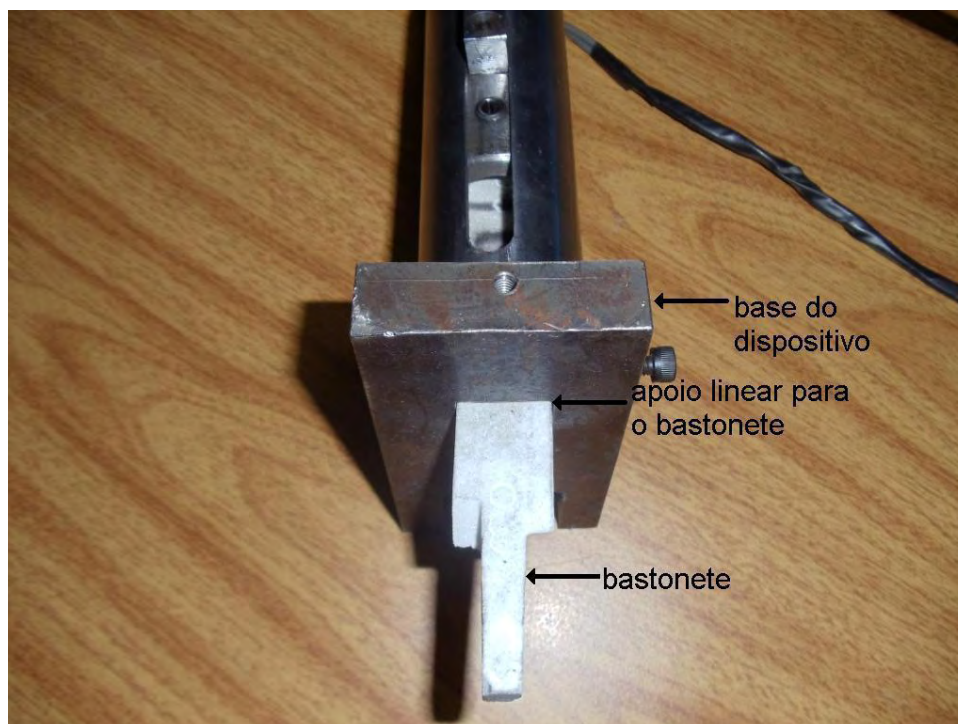


Figura 36 - Estrutura do dispositivo de limpeza projetado.

Para produzir de maneira efetiva o contato periódico entre o bastão e a região periférica do rebolo, foi inserido ao dispositivo um cilindro pneumático a fim de que ele produza um movimento perpendicular à ferramenta com velocidade e avanço controlados. Juntamente com o cilindro, desenvolveu-se um circuito eletro-pneumático para permitir o controle do tempo em que o bastão entra em contato com o rebolo, conforme a Figura 37.



Figura 37 - Dispositivo com o cilindro pneumático e circuito eletro-pneumático para permitir o controle do tempo.

Neste sistema o controle pode ser realizado através de um temporizador e sensores localizados no início e no fim de curso do cilindro. Esses sensores indicados na Figura 38 controlam o ciclo de funcionamento do pistão pneumático.

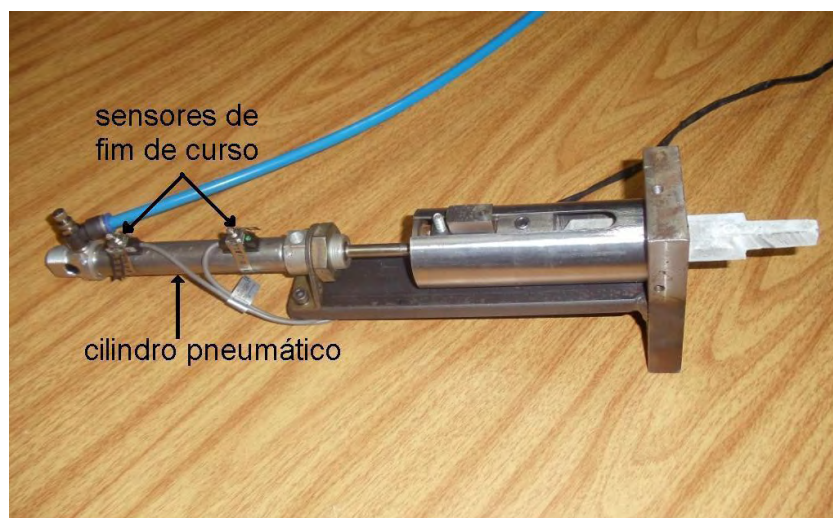


Figura 38 - Cilindro e sensores de início e fim de curso.

O problema encontrado nos testes iniciais ocorreu devido ao primeiro tipo de sensor escolhido para controlar o fim de curso do cilindro, e conseqüentemente o contato do bastão com o rebolo, se tornar incompatível devido ao excessivo desgaste do bastão. O tipo de sensor utilizado foi um sensor eletromagnético que precisa estar localizado ao final do curso do cilindro. Ao ser acionado, este sensor comanda o retorno do sistema. Com o desgaste excessivo, não foi possível controlar com precisão esta posição, já que a posição final do cilindro varia de maneira proporcional ao desgaste.

Portanto, para solucionar este problema, utilizou-se outro sensor do tipo óptico, a fim de captar com maior precisão, o contato periférico entre o bastão e o rebolo, conforme exemplifica o funcionamento na Figura 39.

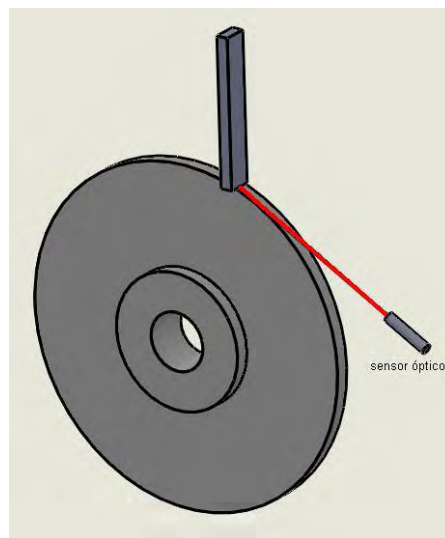


Figura 39 - Esquema de posicionamento do sensor.

Somente com este tipo de sensor na Figura 40 foi possível controlar com eficiência o posicionamento final do cilindro e do bastão possibilitando assim o funcionamento e controle do sistema eletro-pneumático.

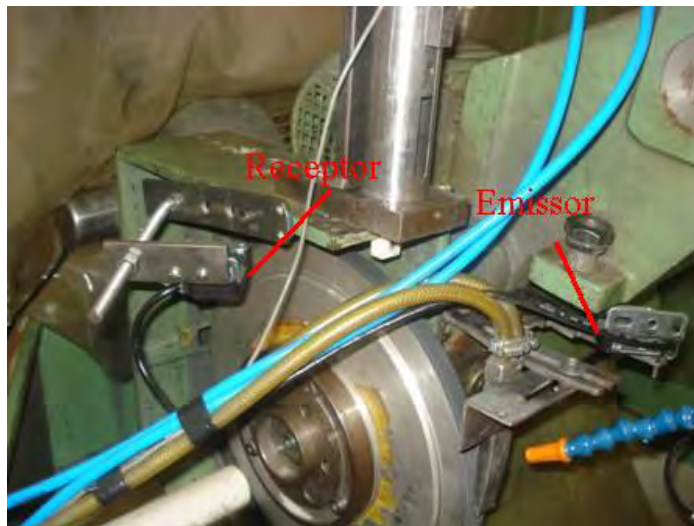


Figura 40 - Dispositivo instalado com os sensores posicionados.

Além disso, nesta posição, o sensor não teria seu funcionamento afetado, quando estivesse sujo, algo que influenciou na escolha do modelo. Portanto o sensor escolhido foi um sensor do tipo emissor e receptor com uma base de comando e regulagem que atendessem os parâmetros de precisão necessários.

Outra característica observada para o posicionamento do dispositivo foi a necessidade do bastão entrar em contato somente em uma parte do reboło. Isto foi necessário para ser comparada a diferença do desgaste do reboło com a região sem contato com o bastão conforme demonstra a Figura 41.



Figura 41 - Posição do bastão em relação ao reboło.

4.2. MÉTODOS

4.2.1. Aquisição de Dados

A aquisição dos dados foi realizada através de um computador com placa de aquisição de dados A/D e software LabVIEW versão 7.1 do fabricante National Instruments. Os parâmetros que serão coletados são: potência elétrica (Pelet) consumida pelo motor que acionava a ferramenta, rotação da ferramenta (n) e emissão acústica. Os valores são armazenados através do software na forma de tensão (V) para posterior manipulação dos dados através do MatLab.

Os dados de rotação e potência elétrica consumida gerados durante o processo de retificação são transmitidos à placa de aquisição de dados através de um circuito condicionador de sinais que possuía e entradas para o recebimento dos dados. Na Figura 42 é demonstrada a montagem dos equipamentos para a aquisição dos dados.



Figura 42 - Equipamentos para aquisição dos dados.

Para a manipulação e armazenamento dos dados há um programa no LabVIEW que fornece uma tela de apresentação para aquisição dos dados conforme Figura 43.

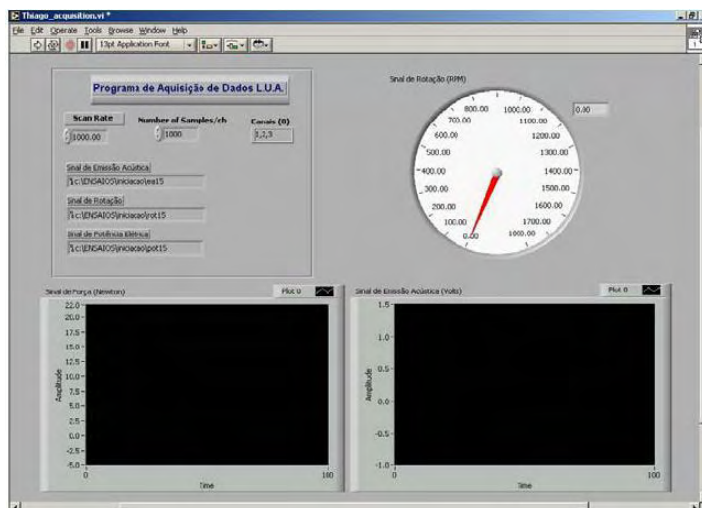


Figura 43 - Tela de apresentação do programa de aquisição de dados.

A programação no LabView 7.1 é feita em sub-rotinas, destacando-se:

- Entrada de dados físicos dos materiais ensaiados.
- Aquisição de dados em tempo real.
- Análise e disposição destes dados em gráficos, simultaneamente à aquisição dos dados.
- Apresentação dos resultados.
- Armazenamento dos dados de interesse em arquivos.

4.2.2. Força tangencial de corte

A força tangencial de corte é 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.

Para isso, utilizou-se um módulo eletrônico, denominado Curvopower (Figura 44), projetado e construído pelo grupo de pesquisa em usinagem por abrasão da Faculdade de Engenharia de Bauru sob a supervisão do Prof. Dr. Paulo Roberto de Aguiar, sendo utilizado para transformação dos valores de corrente elétrica e tensão em sinais de tensões compatíveis, para serem enviados a uma placa de aquisição de dados e manipulados pelo programa de aquisição de dados.

Módulo CurvoPower de aquisição da Força tangencial de corte



Figura 44 - Módulo de aquisição de dados.

4.2.3. Emissão acústica

A medição da emissão acústica foi feita com a utilização de um sistema de Emissão acústica, modelo DM12, marca Sensis, com um sensor fixo posicionado no cabeçote móvel da retificadora próximo do contra ponta, com o intuito de detectar as possíveis variações deste sinal e sua relação com as outras variáveis de saída. A figura Figura 45 mostra o sensor fixado no cabeçote móvel da retificadora.



Figura 45 - Sensor fixo posicionado no cabeçote móvel.

A Figura 46 ilustra o módulo Sensis DM42:



Figura 46 - Aparelho Sensis DM42.

4.2.4. Desvios de circularidade

A medição da circularidade foi obtida através da utilização de um medidor de circularidade, modelo Talyrond marca Taylor Hobson conforme Figura 47.

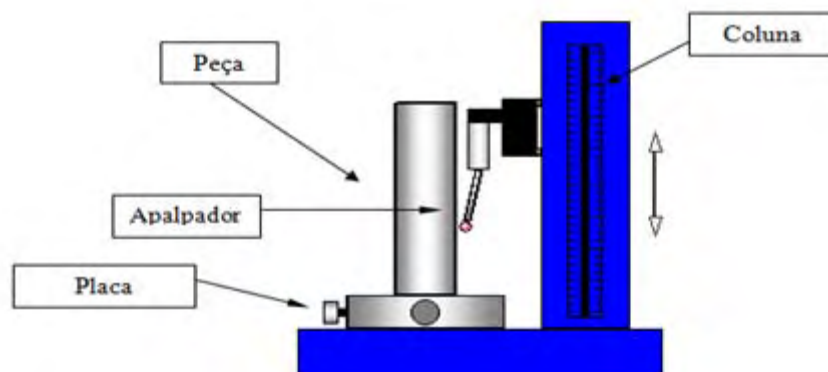


Figura 47 - Medição da circularidade da peça usinada.

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

4.2.5. Rugosidade

A captação da rugosidade foi obtida através de um rugosímetro Surtronic 3+, da marca Taylor Hobson, que faz a medição do parâmetro Ra demonstrado na Figura 48.



Figura 48 - Exemplo de operação de medição de rugosidade.

4.2.6. Desgaste diametral do rebolo

O desgaste diametral do rebolo é medido por meio do método de impressão do perfil do rebolo desgastado, em um corpo devidamente preparado para tal fim. O método consiste na retificação do corpo, retirando um volume fixo de material. Feito isso, os desníveis existentes entre as regiões gastas e não gastas do rebolo serão repassados ao corpo retificado, que serão medidos pelo rugosímetro, mais o software Talymap, da Taylor Hobson.

4.2.7. Microdureza

Há dois tipos de ensaios de microdureza que podem ser realizados, dependendo do tipo de edentador (penetrador) utilizado: Vickers ou Knoop. Foi utilizado neste trabalho o levantamento da microdureza Vickers.

Realizaram-se aplicações de diferentes cargas a fim de se definir a carga a ser aplicada nos ensaios de microdureza. Após a definição da carga realiza-se a aplicação durante 40s obtendo-se, desta maneira, a microdureza. A carga escolhida para a edentação, após ensaios preliminares, foi de 500g.

Em cada amostra, foram feitas cinco edentações ao longo da amostra, para a medição da microdureza. Estas edentações foram distanciadas a um valor específico e constante em relação à superfície, a fim de se construir uma curva de dureza em função da distância relativa essa superfície.

A distância de edentação deve ser maior ou igual ao dobro da maior diagonal formada pelo edentador Vicker, para que a marcação seguinte não sofra prejuízo pelo encruamento da superfície da marcação anterior. Deste modo, a distância entre uma marcação e outra foi definida em 70 μm .

O próprio microdurômetro Vicker transformava a dureza na escala Vickers para a escala RockwellC, a qual foi utilizada para a obtenção dos resultados. Na Figura 49 é demonstrado como foi realizada a medição de microdureza:

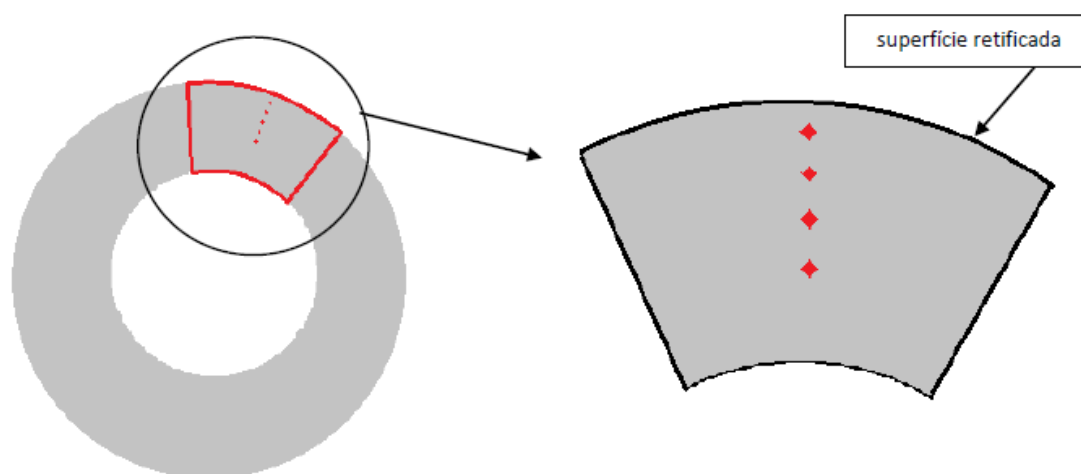


Figura 49 - Representação do corpo de prova com detalhe para metodologia utilizada no ensaio de microdureza.

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

4.2.8. Microscopia eletrônica de varredura – MEV

As análises de microestrutura (através da microscopia de varredura - MEV) foram realizadas por terceiros, no Centro de Pesquisa em Óptica e Fotônica, do Instituto de Física de São Carlos (IFSC), Universidade de São Paulo – USP,

necessitando apenas de uma devida preparação dos corpos de prova, incluindo o corte e a fixação dos corpos em uma resina, para a realização da análise. O objetivo para a realização dos ensaios de MEV é observar se houve alterações micro-estruturais no material devido às diferentes condições utilizadas nos ensaios realizados.

Após a realização de todos os ensaios, o segundo corpo de prova de cada ensaio foi usado para confeccionar as amostras para as análises de microscopia ótica e de microdureza. Para isto, o corpo de prova foi cortado numa máquina cut off, vagorosamente e com fluido de corte, para evitar danos térmicos na amostra. Este corte foi envolvido em uma resina e posteriormente lixado (usando as lixas 80, 120, 220, 320, 400, 500 e 600, sequencialmente) e então foi feito o polimento usando uma máquina politriz metalográfica com alumina de granulometria 1 μ m. A Figura 50 mostra uma das amostras.



Figura 50 - Amostra preparada para a análise de microdureza e microscopia.

As foto micrografias de MEV foram obtidas em um equipamento ZEISS LEO 440 (Cambridge, England) com detector OXFORD (model 7060), operando com feixe de elétrons de 20kV. Imagens obtidas com elétronretro espalhados foram obtidas utilizando o detector FOUR QUADRANT BACKSCATTERED ELECTRON DETECTOR TYPE 400. A Figura 51 mostra o equipamento de medição da microscopia eletrônica de varredura:

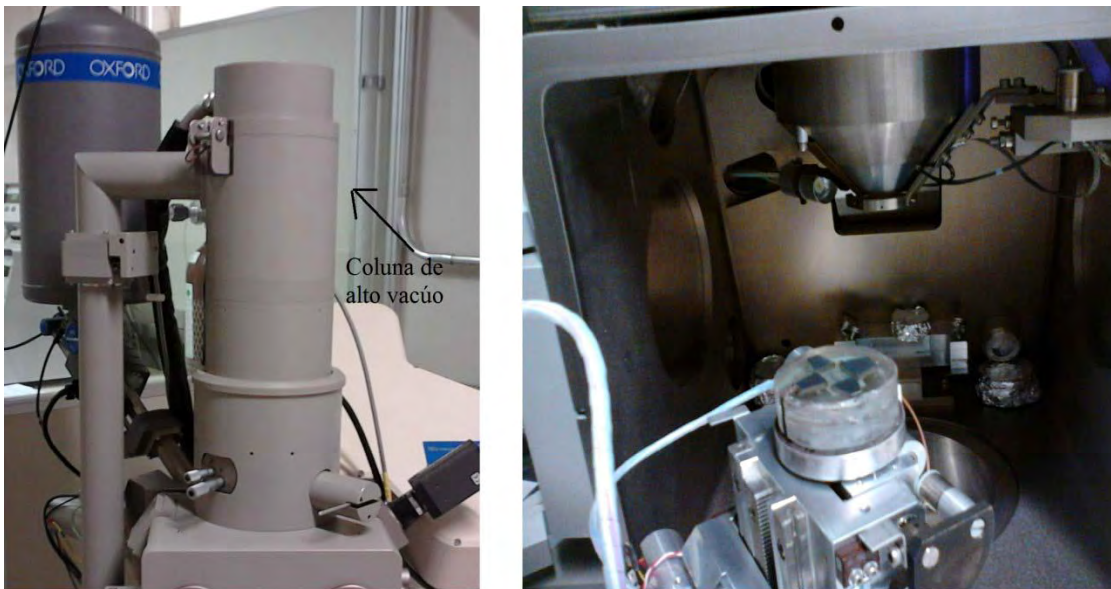


Figura 51 - Equipamento OXFORD para medição da microscopia eletrônica de varredura.

Dentro da coluna de alto vácuo, os elétrons gerados a partir de uma fonte de energia (filamento termiônico de tungstênio, por aplicação de corrente) são acelerados por uma diferença de potencial entre o catodo e o anodo de 1kV a 30 kV. O feixe gerado passa por lentes condensadoras que reduzem o seu diâmetro e por uma lente objetiva que o focaliza sobre a amostra. Logo acima da lente objetiva existem dois estágios de bobinas eletromagnéticas responsáveis pela varredura do feixe sobre a amostra.

O feixe interage com a região de incidência da amostra até uma profundidade que pode variar de $\sim 1\mu\text{m}$ a $\sim 6\mu\text{m}$, dependendo da natureza da amostra. Essa região é conhecida por volume de interação, o qual gera os sinais que são detectados e utilizados para a formação da imagem e para a microanálise.

4.2.9. Resultados do método de limpeza com ar comprimido utilizados como comparação neste trabalho.

Em seu trabalho, Oliveira *et al.* (2012) avaliou a aplicação do método MQL mais limpeza com ar comprimido, utilizando rebolo de CBN, retificando também de maneira cilíndrica, corpos de prova feitos de aço 4340 com dureza padrão igual as amostras utilizadas nesta proposta.

Sendo assim os resultados dos parâmetros de rugosidade média, erro de circularidade, potência na retificação, emissão acústica e desgaste do rebolo para a condição de MQL com limpeza por ar comprimido, foram retirados do trabalho publicado por este autor. Esta medida foi tomada, a fim de compararmos o método já testado por ele, com esta nova proposta de limpeza aqui apresentada.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados os resultados, para cada condição de retificação realizada, das variáveis de saída: potência de usinagem, emissão acústica, desgaste diametral. Para a análise da integridade superficial avaliou-se a microestrutura, circularidade, rugosidade e microdureza.

Foram realizados ensaios, para três velocidades diferentes (0,25, 0,50, 0,75 mm/min), utilizando refrigeração convencional, mínima quantidade de lubrificação e MQL com as limpezas: de ar comprimido, com o bloco de teflon, Bastão de óxido de alumínio granulometria 120 mesh, bastão de óxido de alumínio granulometria 150 mesh e bastão de carbeto de silício 150 mesh.

Ressalta-se que para as variáveis analisadas, mediante a construção de figuras no formato de barra, calcularam-se os respectivos desvios padrões.

5.1. Rugosidade

A Figura 52 apresenta os resultados obtidos para a rugosidade média Ra, referente à comparação entre as condições de lubri-refrigeração convencional e as condições utilizando a técnica do MQL. Os valores de rugosidade apresentados são médias de 5 medições de rugosidade em posições diferentes nos corpos de prova.

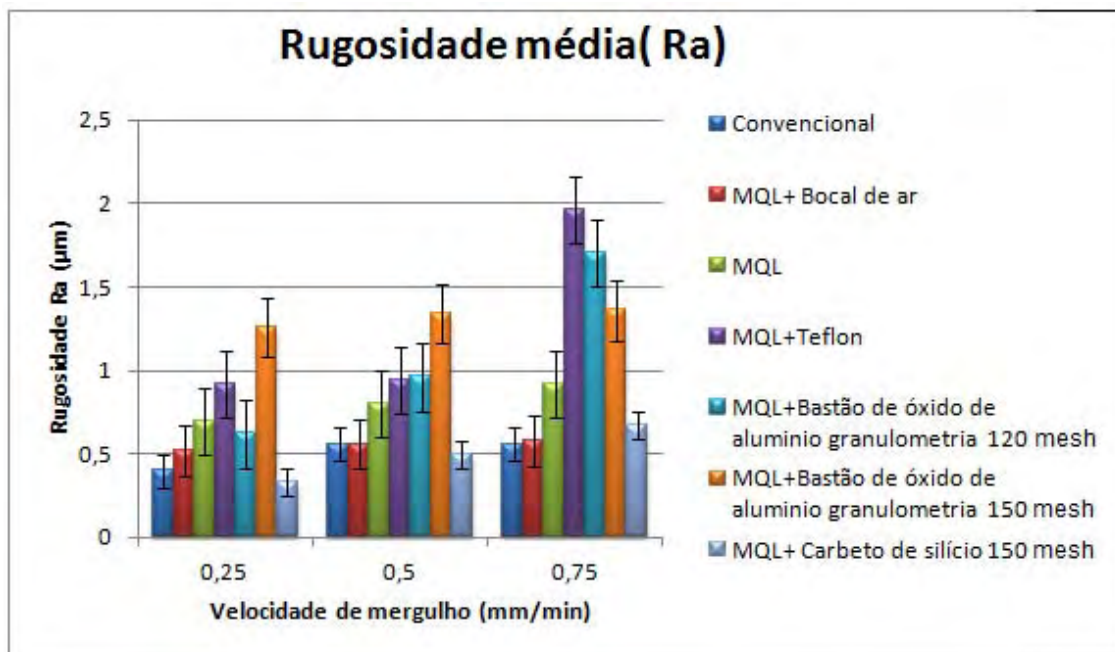


Figura 52 - Resultados de rugosidade para diferentes condições de lubri-refrigeração.

Pode-se observar que o melhor resultado de rugosidade foi obtido no método convencional. Segundo Attanasio *et al.* (2006), a condição convencional tem um maior fluxo de fluido e elimina os cavacos da zona de corte mais eficientemente. Sendo assim este método apresenta uma efetividade melhor que qualquer outro método quando se trata de refrigeração de rugosidade. Segundo Yoshimura *et al.* (2005), a eficiência da refrigeração é importante para a exatidão geométrica, dimensional e para a baixa rugosidade na peça.

Hafenbraedl e Malkin (2001), apesar de o MQL promover lubrificação eficiente, redução da energia de retificação e da energia específica para um nível de comparação com os fluidos de corte (óleos solúveis) em situações não muito severas de usinagem, os valores de rugosidade alcançados não são relativamente bons devido à “borra” formada entupindo os poros do rebolo.

Sendo assim a condição MQL + ar comprimido obteve resultados satisfatórios, pois na velocidade de avanço de 0,50 mm/min os valores obtidos ficaram próximos ao método convencional. Esta melhora na rugosidade ocorreu pela efetividade do ar comprimido em retirar a borra de óleo da região periférica do rebolo.

Este fenômeno de limpeza promovido pelo ar comprimido é favorecido pela soma vetorial dos componentes da velocidade periférica do rebolo, e a do ar comprimido. Quando essa combinação de velocidades é apropriada, uma resultante transferirá maior quantidade de movimento à borra, promovendo sua maior eliminação.

Na aplicação testada para retirar a borra com a utilização dos bastões abrasivos, o método MQL + bastão de teflon, não apresentou melhora significativa da rugosidade. Isto ocorreu devido ao fato de que por ser um material facilmente usinado, quando o bastão de teflon entra em contato com o rebolo para realizar a limpeza, ele consegue retirar a borra de óleo com cavacos, mas ao mesmo tempo, seus resíduos ficam nos poros do rebolo, provocando assim um emplastramento prejudicando a retificação.

Na aplicação do MQL+ bastão de óxido de alumínio granulometria 120 na velocidade 0,25mm/min, se comparado em relação à condição do método tradicional de MQL, a rugosidade obteve valores próximos. Este resultado ocorreu devido ao óxido de alumínio ser eficiente na retirada da borra de óleo.

Porém, devido ao desgaste excessivo dos bastões de óxido de alumínio, não foi possível realizar o ensaio por um longo período. Dessa forma, com o aumento da velocidade de mergulho, o tempo em que o bastão permaneceu para retirar a borra, não foi suficiente para melhorar ainda mais a condição de usinagem desse método.

Esse mesmo fato ocorreu na condição MQL + Bastão de óxido de alumínio com granulometria 150, em todas as velocidades de mergulho, ao contrario do que se esperava esse óxido com granulometria mais fina pode ter tido grãos abrasivos incluídos nos poros do rebolo, o que promoveu um aumento na rugosidade em todas as velocidades.

A piora significativa que a aplicação dessa técnica obteve na qualidade superficial em relação às outras técnicas pode ser explicado pelo fato de que além de não tirar a “borra”, o bastão deixou muito resíduos na superfície do rebolo, pois é um abrasivo com boa friabilidade, e segundo Bianchi *et. al* (2006) quanto maior for sua friabilidade, maior é a facilidade em fraturá-lo, gerando assim muitos resíduos.

Sendo assim no geral, o melhor resultado de rugosidade foi obtido no método MQL com a limpeza de Carbeto de silício, pois esse material foi eficiente na retirada da borra de óleo dos poros do rebolo, e mesmo com a falta de efetividade do MQL em promover a refrigeração, essa limpeza diminuiu o atrito da superfície entre ferramenta e a peça melhorando este parâmetro analisado.

5.2. Erros de circularidade

A Figura 53 apresenta os valores dos desvios de circularidade.

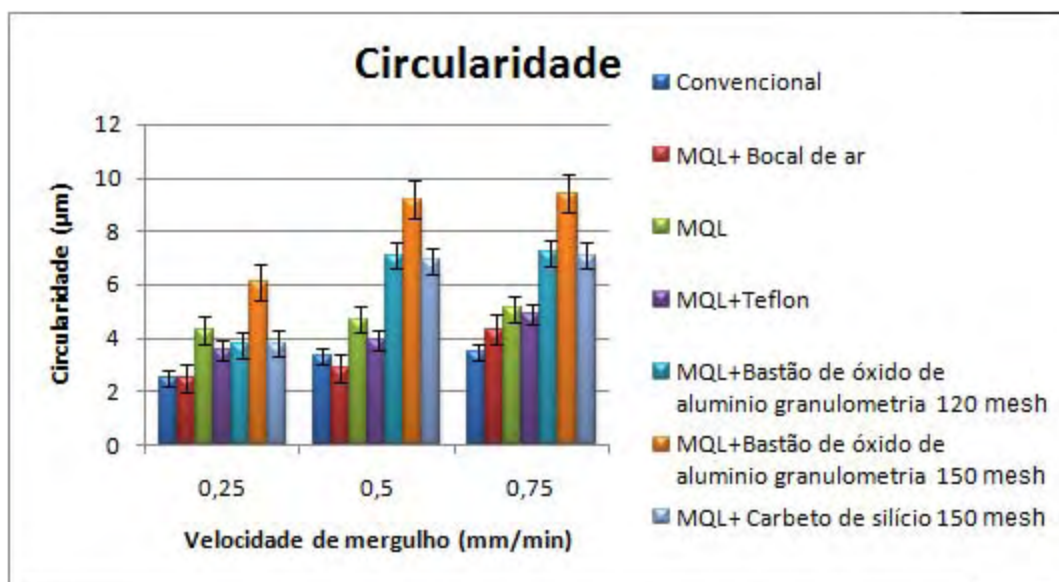


Figura 53 - Resultados de circularidade para diferentes condições de lubri-refrigeração.

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

Sendo assim a técnica de MQL com bocal de ar comprimido 30°, devido a ótima combinação vetorial das velocidades de incidência do ar comprimido e periférica do rebolo, e também sua capacidade de refrigeração e desobstrução dos poros do rebolo, similarmente ao método Convencional, não apresentou grandes diferenças nos resultados, e obtiveram os melhores valores de circularidades.

Na avaliação das técnicas de MQL, e MQL com os bastões na velocidade de 0,25 mm/min, estatisticamente não houve diferença nos valores, estes obtiveram resultados mais altos em relação às outras técnicas, isto acontece devido à formação da pasta de fluido com cavaco nesses métodos. A presença dessa pasta aumenta o atrito entre cavacos e a peça. Com isso, há maior geração de calor, proporcionando maiores erros de circularidade.

Já nas condições de MQL com Bastão de óxido de alumínio de granulometria 120 e 150 e carbeto de silício, obtiveram valores mais altos de circularidade, isso pode ser explicado pelo fato de que como o bastão de óxido de alumínio exercia contato periódico com o rebolo. Esta frequência de contato interferiu na circularidade da peça.

Ou seja, por conta do contato periódico do bastão com o rebolo, as condições de retificação se alternavam, quando o bastão tocava o rebolo, a eficiência de corte do rebolo aumentava. Sendo assim em um momento o rebolo retificava com mais eficiência e em outro momento não. Isto se agravou ainda mais devido ao tempo de usinagem utilizado neste ensaio.

O Bastão de óxido de alumínio com granulometria mais fina, foi ineficiente na retirada da "borra", portanto além de prejudicar a circularidade do material com a frequência de contato com o rebolo, o mesmo não retirou a mistura de cavaco e óleo da superfície do rebolo, o que aumentou o atrito, gerando mais calor. A soma desses fenômenos fez com que os valores dos erros de circularidade aumentassem muito para essa condição em todas as velocidades.

No caso do Carbeto de silício, mesmo ele sendo eficiente na limpeza dos poros do rebolo, isso não foi o suficiente para diminuir a circularidade da peça já que o fator mais influente foi o contato periódico com o rebolo. Portanto mesmo que o atrito seja menor nessa condição, o fato de ele ter esse contato alternado fez com que causasse erros de circularidade na peça.

5.3. Desgaste diametral do rebolo

A figura 54 mostra os resultados obtidos para o desgaste diametral do rebolo.

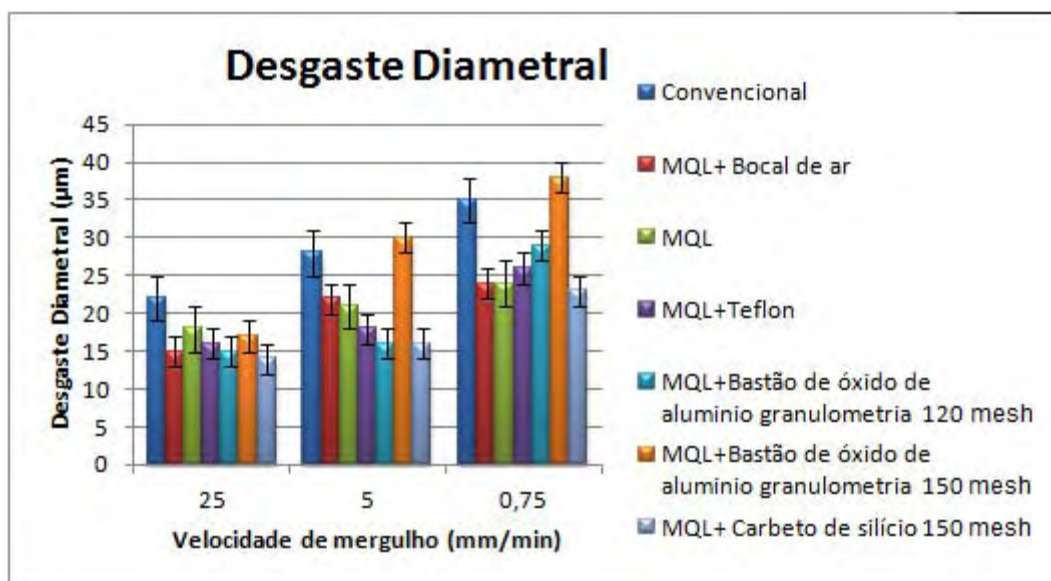


Figura 54 - Resultados de desgaste diametral do rebolo para as diferentes condições de lubri-refrigeração.

Segundo Malkin (1989), o desgaste diametral do rebolo é ocasionado pela deterioração térmica e da elevada sollicitação mecânica a que o rebolo é submetido. Portanto, quanto menor a dissipação térmica da região de corte, maior é a perda de resistência do ligante, conseqüentemente, maior o desgaste do rebolo.

De acordo com essa afirmação, é possível observar que a condição de lubri-refrigeração com MQL, onde ar e óleo são injetados à alta pressão na interface peça ferramenta, conseguiu bons resultados de desgaste, devido a sua capacidade de refrigerar e lubrificar com eficiência essa interface.

Os ensaios utilizando o bastão de teflon e de óxido de alumínio com granulometria 120 se comparados à condição de MQL, conseguiram alcançar valores de desgaste diametrais menores. Como o método utilizando os bastões mostrou ser eficiente na retirada da borra, a retificação foi facilitada, diminuindo os esforços de corte e conseqüentemente o desgaste da ferramenta.

Porém a condição com MQL mais a limpeza com o óxido de alumínio de granulometria mais fina, teve os piores resultados de desgastes se comparado às outras técnicas, isso ocorreu, pois essa condição foi a que obteve menor eficiência na retirada da “borra”, e, além disso, ainda deixava os próprios resíduos na superfície do rebolo,

com isso além de aumentar a temperatura da região de corte devido ao elevado atrito, aumentou a solicitação mecânica a que se submete o rebolo e os grãos tiveram que exercer mais esforços para a retirada de material. Portanto, como já dito acima o ligante tem maior perda de resistência com o aumento da temperatura e um alto desgaste devido a isso e aos elevados esforços.

O método de bocal de ar comprimido e o método com bastão de teflon, não forneceram diferença significativa de desgaste, mesmo que o bocal seja mais eficiente na retirada da borra, como comprovado nos resultados da rugosidade o teflon não foi tão eficiente, porém conseguiu retirar a borra o suficiente para diminuir os esforços de corte do rebolo, e assim não desgastá-lo tanto quanto com a técnica do ar comprimido.

Dentre os métodos analisados, além da técnica de limpeza com o bastão abrasivo de granulometria mais fina, a refrigeração convencional obteve maiores valores de desgaste para todas as velocidades de mergulho. Isso pode ser explicado uma vez que esse método não atinge a zona de corte de forma tão eficiente como o MQL e MQL com as limpezas, já que nestes o fluido é injetado em alta pressão na zona de corte.

Quando se usa o método convencional de lubri-refrigeração, a grande vazão de fluido gera turbulência no momento em que o fluido toca a peça e ou o rebolo, dificultando sua penetração na interface rebolo-peça.

Como sua penetração na interface é prejudicada, o fluido em abundância tem efeito refrigerante, pois retira calor da peça por condução, já que esta é abundantemente molhada pelo fluido.

Sendo assim, o maior desgaste diametral do rebolo foi obtido utilizando-se o método convencional de lubri-refrigeração. A decorrência deste resultado, devido à falta de lubrificação na interface rebolo-peça, que fez com que os esforços feitos pelos grãos fossem maiores, facilitando sua remoção.

5.4. Potência na retificação

Neste item são apresentados os resultados da potência de retificação (W) em função das condições de lubri-refrigeração utilizadas. Através da manipulação e conversão dos dados obtidos em tempo real de usinagem foi possível construir gráficos para as potências de corte, referentes à comparação entre o método convencional de lubri-refrigeração, técnica MQL tradicional e MQL com os diferentes tipos de limpeza. A figura 55 mostra os resultados para a potência de retificação.

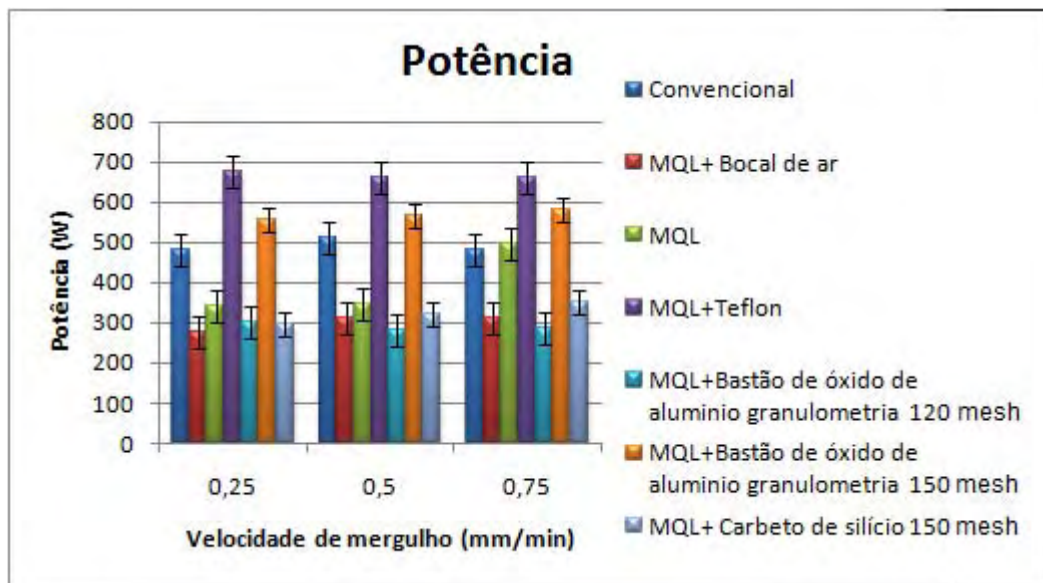


Figura 55 - Resultados de potência para as diferentes condições de lubri-refrigeração.

A condição de lubri-refrigeração com MQL sem limpeza foi um dos métodos que proporcionou resultados satisfatórios de potência de corte. Isso pode ser explicado pela capacidade de o MQL em vencer a barreira de ar formada ao redor do rebolo em movimento. O ar comprimido é então capaz de vencer essa barreira e introduzir o lubrificante na região de corte, mas ao mesmo tempo nenhum cavaco aderido ao poro do rebolo foi retirado e com isso, um número maior de partículas está atritando com a peça, necessitando uma potência maior.

Nota-se que a condição de MQL com Bocal de ar juntamente com a técnica de MQL com o bastão de óxido de alumínio com granulometria 120 exigiu menor potência de corte, no caso do bocal de ar isso ocorreu em função de que esse método permite retirar com eficiência os a borra de cavaco com óleo dos poros do

rebolo, o que diminuiu o atrito entre partículas no rebolo e a peça, diminuindo assim a potência de corte.

A técnica de MQL com a limpeza utilizando o bastão de óxido de alumínio com granulometria mais grossa também permitiu obter menores valores de potência de corte, isso se deve ao fato de que nesse caso, os cavacos não foram removidos tão eficientemente quanto nas outras condições. Assim, não houve conseqüentemente, uma força muito grande de reação no rebolo para a retirada dos cavacos, o que também não originou uma componente tangencial contrária à rotação do rebolo, não aumentando, assim, a potência de corte.

Além disso, ele permite durante a usinagem, avivar as arestas de corte do rebolo, assim o rebolo realiza menor força de corte e conseqüentemente menor potência.

Já o método convencional apresentou resultados relativamente bem maiores do que o método do MQL tradicional e MQL com as limpezas, exceto com o Teflon, o bastão abrasivo com granulometria 150 e o novo material de limpeza, carbetto de silício.

O fato de este método fornecer abundantemente fluido sem pressão faz com que, como já citado, ele não atinja efetivamente a zona de corte. Dessa forma exige-se mais da ferramenta, pois deve ser vencida uma maior resistência ao atrito na interface do rebolo com a peça, gerando, portanto, maiores valores de potência de retificação.

Há que se lembrar também neste ponto, que o método de lubri-refrigeração convencional foi aquele que mais eficientemente limpou os poros do rebolo dos cavacos, assim é criada uma maior força de reação no rebolo, reduzindo a rugosidade, mas ao mesmo tempo essa reação irá gerar uma componente tangencial maior contrária à rotação do rebolo, aumentando, assim, a potência de usinagem.

O MQL com o teflon e com o bastão abrasivo de granulometria mais fina foram os que mais exigiram potência de corte, pois estes materiais entupiram a ferramenta com seus próprios resíduos, exigindo mais da ferramenta como explicado, gerando maior potência de corte.

O fato do bastão de óxido de alumínio com granulometria 150 permitiu menor potência de corte que o teflon, pode ser explicado a capacidade de este material avivar as arestas de corte dos grãos do rebolo, exigindo menor força de corte do mesmo.

5.5. Emissão acústica

Na Figura 56 são mostrados os resultados de emissão acústica (RMS) em Volts (V) e são apresentados em função das condições de lubri-refrigeração.

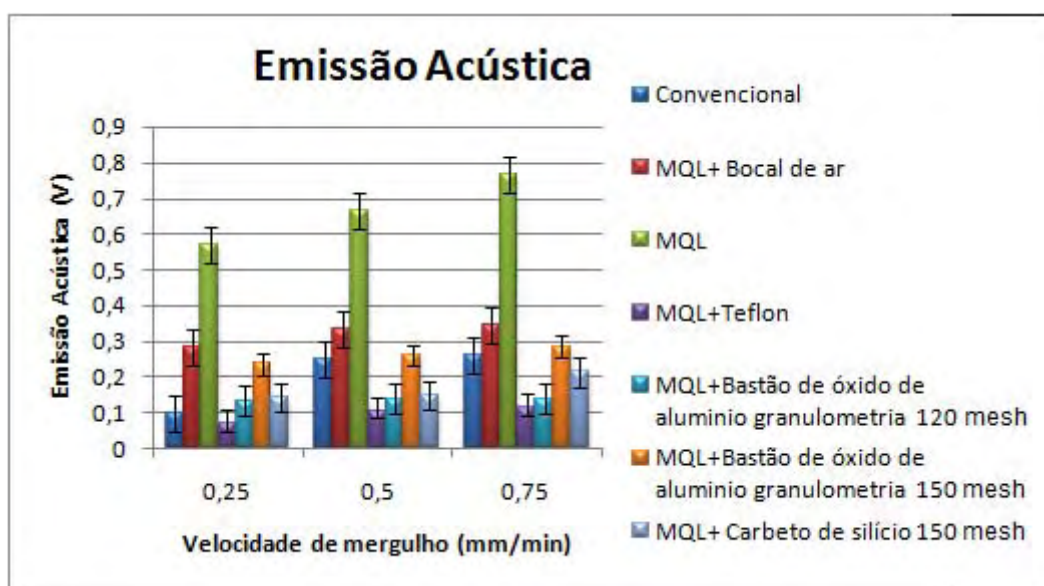


Figura 56 - Resultados de emissão acústica para as diferentes condições de lubri-refrigeração.

Dentre os métodos analisados, o que possui geralmente menor quantidade de cavaco na zona de corte é o convencional, pois não há a formação da pasta de fluido com cavaco. Por isso, para esse método obtêm-se resultados bons, porém não foi tão eficiente quanto aos métodos de limpeza com os bastões.

Como se pode observar, os resultados de emissão acústica não seguiram a tendência dos outros resultados, pois as técnicas de MQL com o bloco de teflon e os bastões abrasivos, permitiu valores inferiores de emissão acústica.

Esse comportamento ocorreu, pois quanto mais cavacos são retirados do poro da ferramenta abrasiva, menor o atrito com a peça sendo retificada e menores serão os defeitos nessa peça, bem como o ruído gerado, conseqüentemente menor a emissão acústica da usinagem.

Pode-se observar que a condição de limpeza com o novo material de limpeza, (óxido de alumínio com granulometria mais fina) obteve bons resultados se comparado com o método de MQL sem limpeza, e bocal de ar comprimido, pois se consegue retirar um pouco da "borra" e avivar as arestas de corte, o que diminui a emissão de ruídos. Porém seus resultados foram maiores que os outros métodos de limpeza e o convencional, seguindo a tendência dos outros resultados, devido a sua ineficiência em relação a essas técnicas em retirar a mistura da superfície.

O método de MQL sem limpeza obteve os maiores valores de emissão, pois como esperado, essa técnica não consegue retirar os cavacos dos poros do rebolo, aumentando os ruídos gerados.

A condição de limpeza com o carbeto de silício conseguiu resultados semelhantes ao óxido de alumínio, isso porque o mesmo conseguiu limpar com eficiência os poros do rebolo diminuindo os ruídos de atrito, mas esse material gerava mais ruídos que os outros materiais durante o contato com o rebolo, o que aumentou a emissão acústica.

A técnica de limpeza com ar comprimido obteve resultados intermediários aos outros, pois essa técnica também é eficiente na retirada dos cavacos, mas seu sistema gera mais ruídos que os outros métodos de limpeza.

5.6. Microscopia óptica e microdureza

A análise da microestrutura foi feita com o intuito de se verificar a ocorrência de danos térmicos e comparar as superfícies retificadas com a superfície de um corpo de prova não retificado.

Quando a superfície da peça sendo retificada é exposta a altas temperaturas por tempo suficiente, alterações microestruturais podem ocorrer. E nesse aspecto as condições de lubri-refrigeração junto com o material da ferramenta exercem papel de fundamental importância no controle das temperaturas e dissipação do calor.

Os corpos de prova foram preparados devidamente e sua análise foi realizada com microscopia óptica com capacidade de ampliação de até 1000 vezes. Porém, em virtude do abaulamento da superfície, ocasionado por falha durante o processo de lixamento, a ampliação mais adequada para o estudo foi de 500 vezes e 200 vezes, suficiente para detectar qualquer alteração na superfície.

5.6.1. Corpo de prova não retificado

O corpo de prova apresentado na microscopia não foi retificado, mas apenas torneado, temperado e depois revenido.

Observar-se nessa microscopia não há áreas onde tenham ocorrido fases diferentes (revenimento ou queima). Esta microscopia caracteriza uma referência para a superfície da peça após ocorrer a retificação.

Além disso, pela análise da microscopia não se verifica que há alterações subsuperficiais. A quantidade de calor e de deformação plástica gerado nos processos de torneamento, têmpera e revenimento não foram suficientes para produzir alterações significativas na microestrutura do material. Esse corpo de prova demonstrado na Figura 57 apresenta microdureza média de 59 HRc.

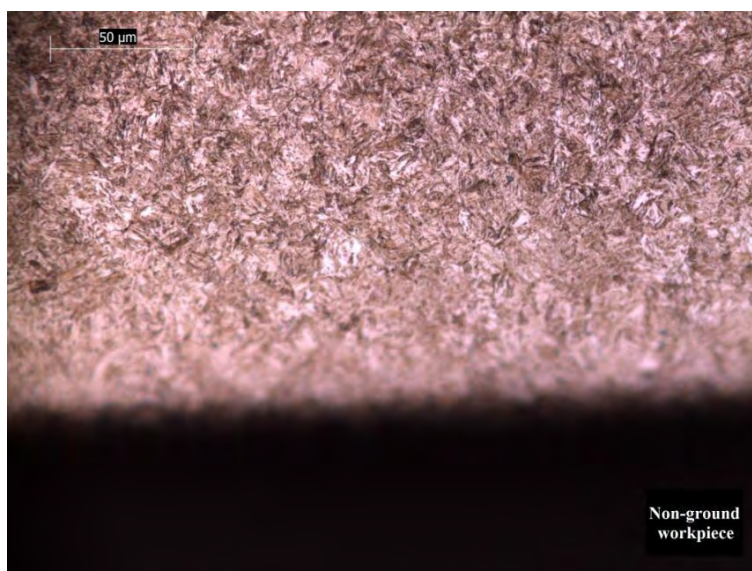


Figura 57 - Microscopia de um corpo de prova não retificado(ampliação de 500 vezes).

5.6.2. Ensaios com o método de lubri-refrigeração convencional

A Figura 58 mostra os resultados de microscopia óptica dos ensaios com o método de lubri-refrigeração convencional.

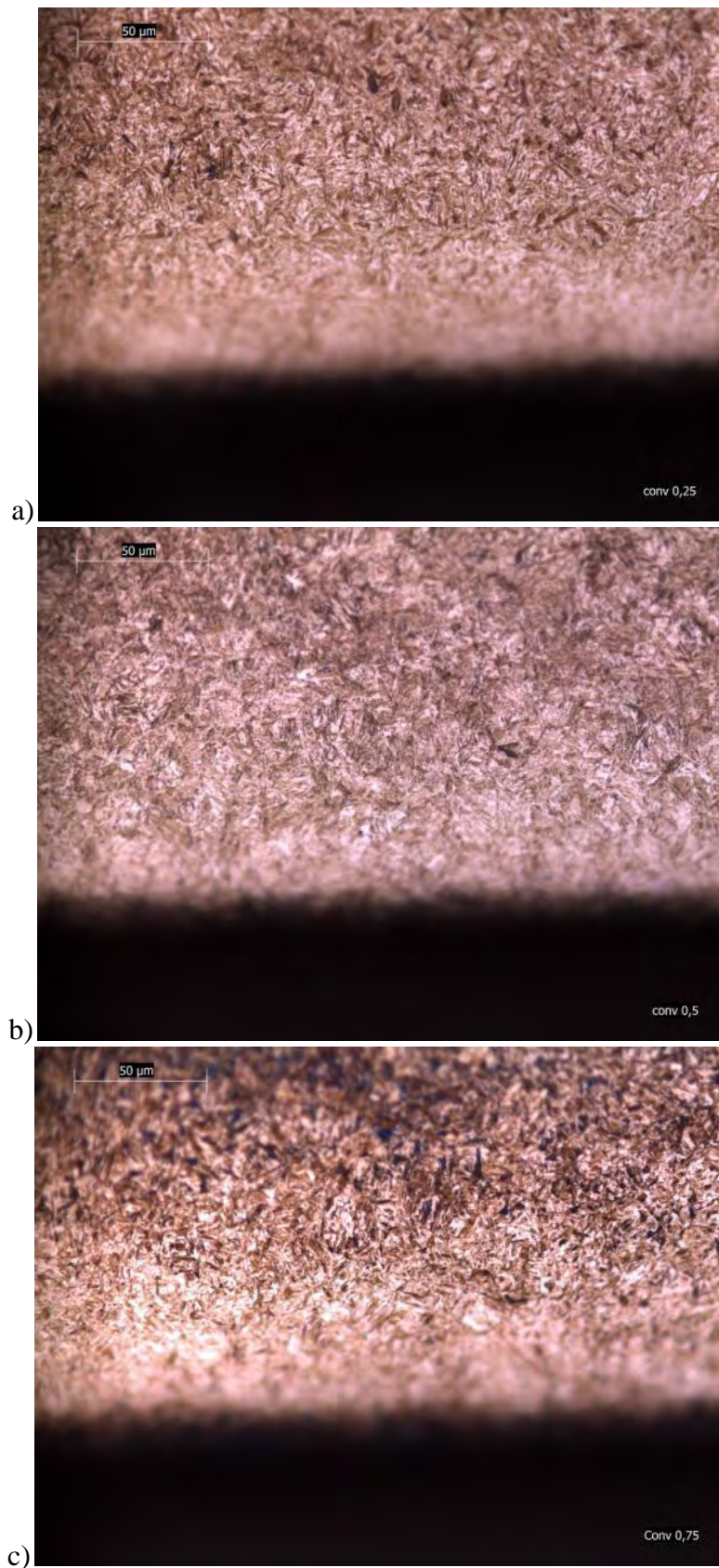


Figura 58 - Microscopia para os ensaios com lubri-refrigeração convencional (ampliação de 500 vezes). a) velocidade 0,25mm/min. b) velocidade de 0,50 mm/min. c) velocidade de 0,75mm/min.

Observa-se que não houve a queima superficial na usinagem do corpo de prova. O resultado do ensaio de microdureza para a condição convencional foi 61,9, 58 e 60,7 HRc, respectivamente, para as velocidades de 0,25, 0,50 e 0,75 mm/min, relativamente próximo ao resultado de microdureza para o corpo de prova sem retificação (59HRc). Isso ainda evidencia que não houve a queima superficial e com isso, a integridade superficial do corpo de prova foi mantida.

Deve-se ressaltar que essa sombra escura abaixo da superfície retificada acontece devido ao abaulamento causado durante o lixamento.

5.6.3. Ensaio com o método de lubri-refrigeração de MQL sem limpeza

A Figura 59 mostra os resultados de microscopia óptica dos ensaios com o método de lubri-refrigeração de MQL sem limpeza.

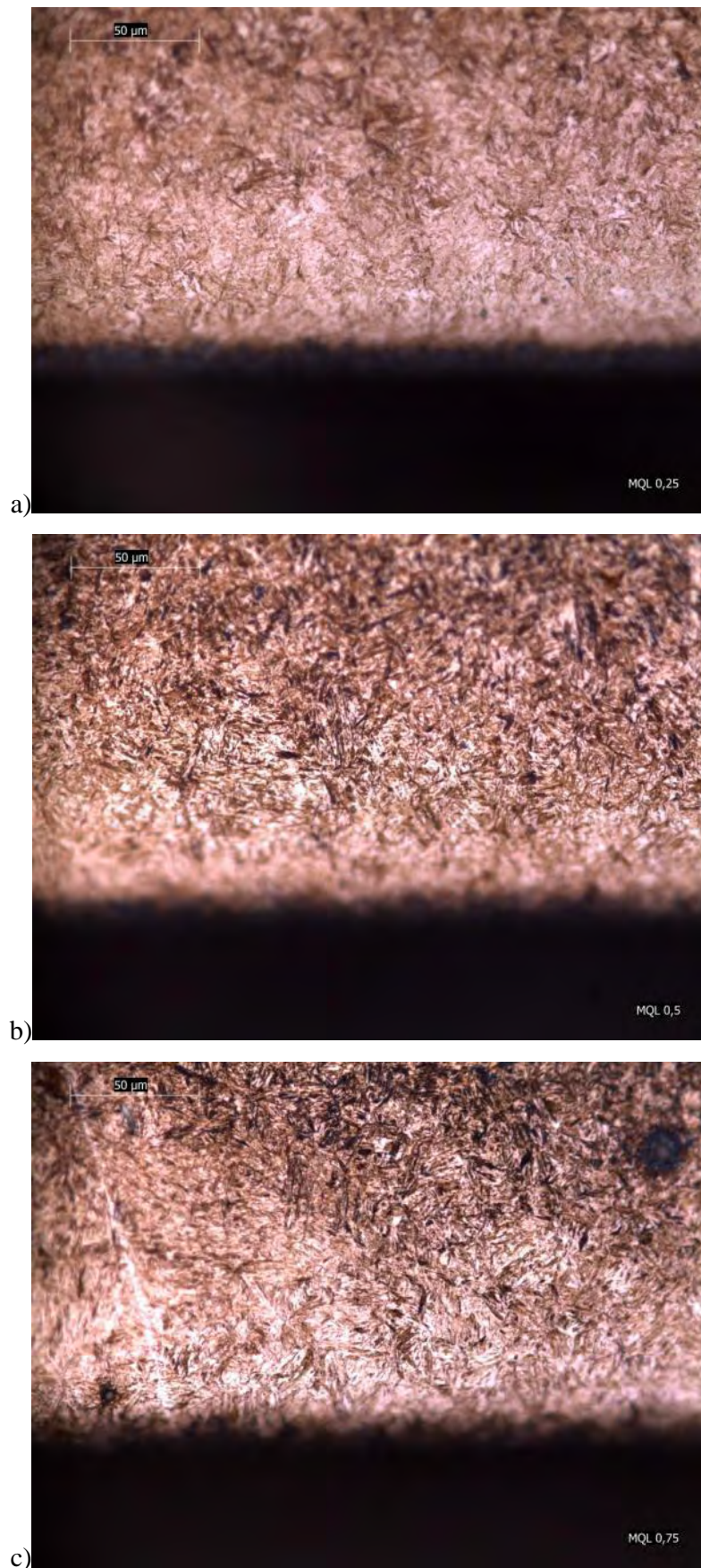


Figura 59 - Microscopia para os ensaios com lubri-refrigeração de MQL sem limpeza (ampliação de 500 vezes). a) velocidade 0,25mm/min. b) velocidade de 0,50 mm/min. c) velocidade de 0,75mm/min.

Nota-se que não houve a queima superficial na usinagem do corpo de prova nesta condição. O resultado do ensaio de microdureza para a condição MQL tradicional foi 57, 57,2 e 56 HRc, respectivamente, para as velocidades de 0,25, 0,50 e 0,75 mm/min.

Apesar de não ser nítida a queima superficial ou evidências de uma modificação estrutural, as microdurezas são menores que as obtidas com o método convencional e também para o corpo de prova sem usar. Nessa condição a retificação atingiu um pouco mais a integridade superficial do corpo de prova, mas não ao ponto de causar a queima. O que pode ter ocorrido, é um leve revenimento, em função do aquecimento do material e da taxa de resfriamento, causando assim perda da dureza superficial.

5.6.4. Ensaio com o método de lubri-refrigeração de MQL com limpeza de ar comprimido

A figura 60 mostra os resultados de microscopia óptica dos ensaios com a o método de lubri-refrigeração de MQL com limpeza de ar comprimido.

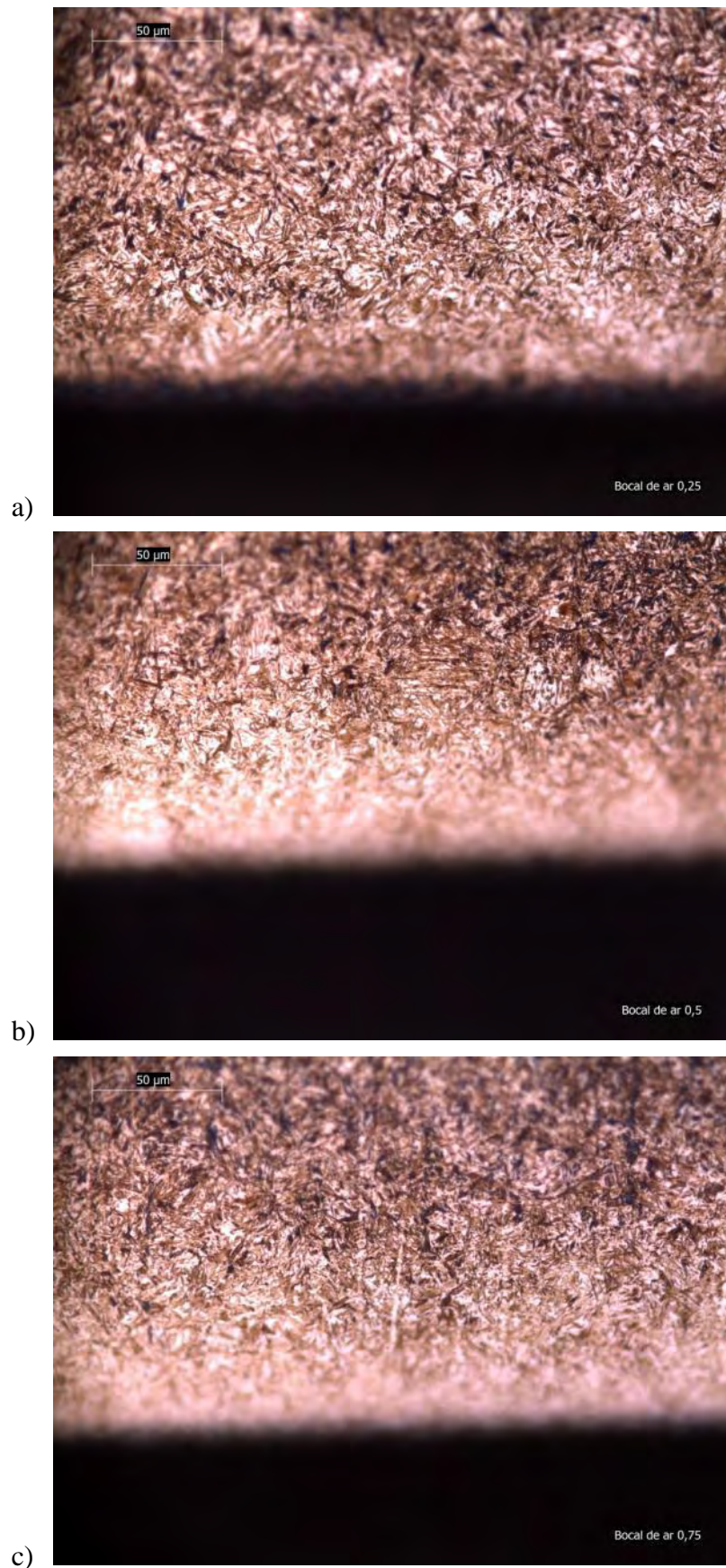


Figura 60 - Microscopia para os ensaios com lubri-refrigeração de MQL com limpeza de bocal de ar comprimido (ampliação de 500 vezes). velocidade 0,25mm/min. b) velocidade de 0,50 mm/min. c) velocidade de 0,75mm/min.

O resultado de microdureza para este ensaio foi 60,9, 60,2 e 60,3 HRc, respectivamente, para as velocidades de 0,25, 0,50 e 0,75 mm/min. Esse resultado mostra que não houve queima superficial visível, pois as microdurezas obtidas estão relativamente próximas ao corpo de prova sem ser retificado.

5.6.5. Ensaio com o método de lubri-refrigeração de MQL e limpeza com o Bloco de teflon.

A figura 61 mostra os resultados de microscopia dos ensaios com a o método de lubri-refrigeração de MQL com limpeza com o Bloco de teflon.

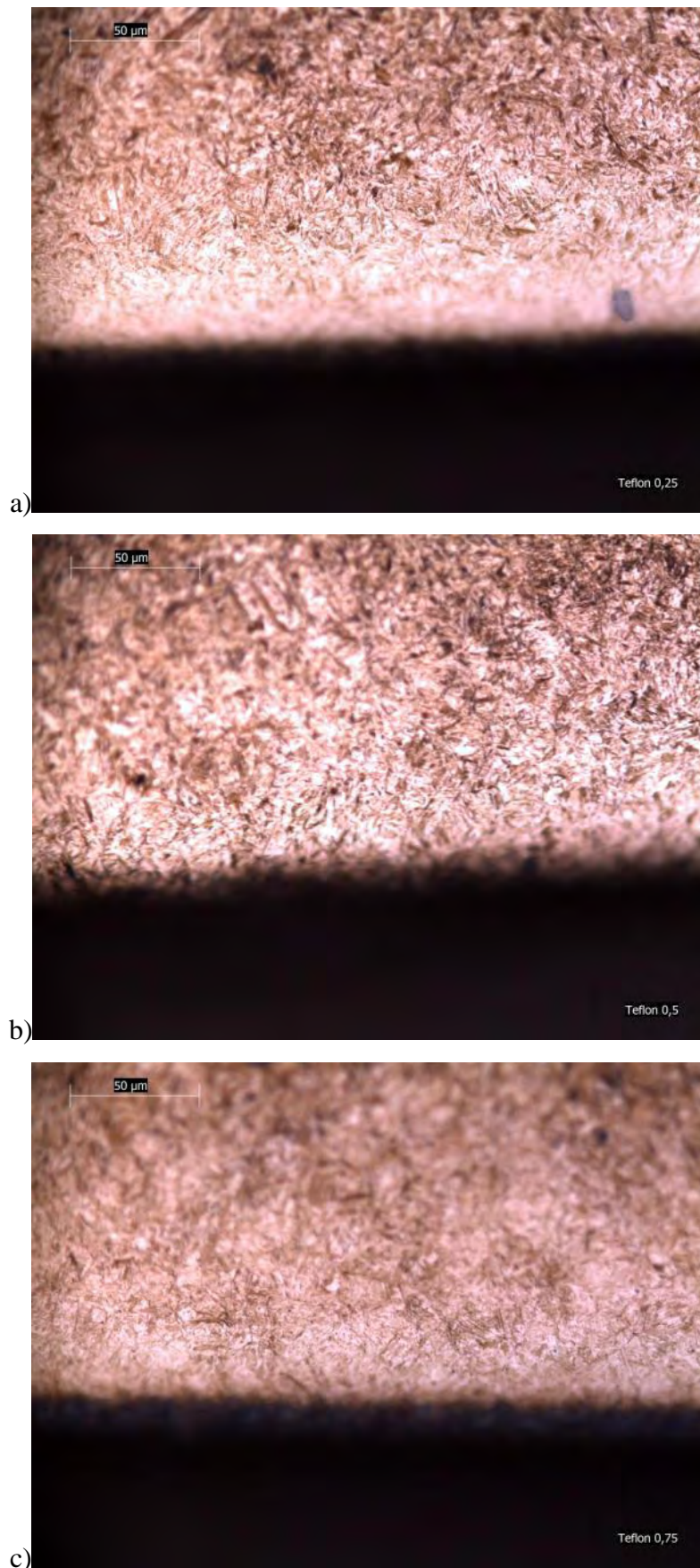


Figura 61 - Microscopia para os ensaios com lubri-refrigeração de MQL com limpeza com um bloco de teflon (ampliação de 500 vezes). a) velocidade de 0,25mm/min. b) velocidade de 0,50 mm/min. c) velocidade de 0,75mm/min.

O resultado do ensaio de microdureza para esta condição foi 61, 59,6 e 64,2 HRc, respectivamente, para as velocidades de 0,25, 0,50 e 0,75 mm/min, relativamente próximo ao resultado de microdureza para o corpo de prova sem retificação (59 HRc). Isso mostra que não houve a queima superficial e com isso, a integridade superficial do corpo de prova foi mantida.

Porém para a velocidade de 0,75mm/min o que se pode observar é uma alteração considerável na dureza. Esta ocorrência pode ser devido à uma geração de calor em excesso, provocada pelos resíduos do teflon que permaneceram na superfície do rebolo. Com isso o aumento da dureza foi ocasionado por uma re-têmpera do material, a qual é consequência da re-austenitização da mesma, seguida de martensita revenida, pois se alcançou temperatura de austenitização.

Mesmo havendo remoção dos cavacos aderidos nos poros do rebolo, o aumento do número de partículas em choque com a superfície da peça, promoveu este efeito na estrutura do material.

5.6.6. Ensaio com o método de lubri-refrigeração de MQL e limpeza com o bastão de óxido de alumínio com granulometria 120

A Figura 62 mostra os resultados de microscopia dos ensaios com o método de lubri-refrigeração de MQL com limpeza com o bastão de óxido de alumínio com granulometria 120.

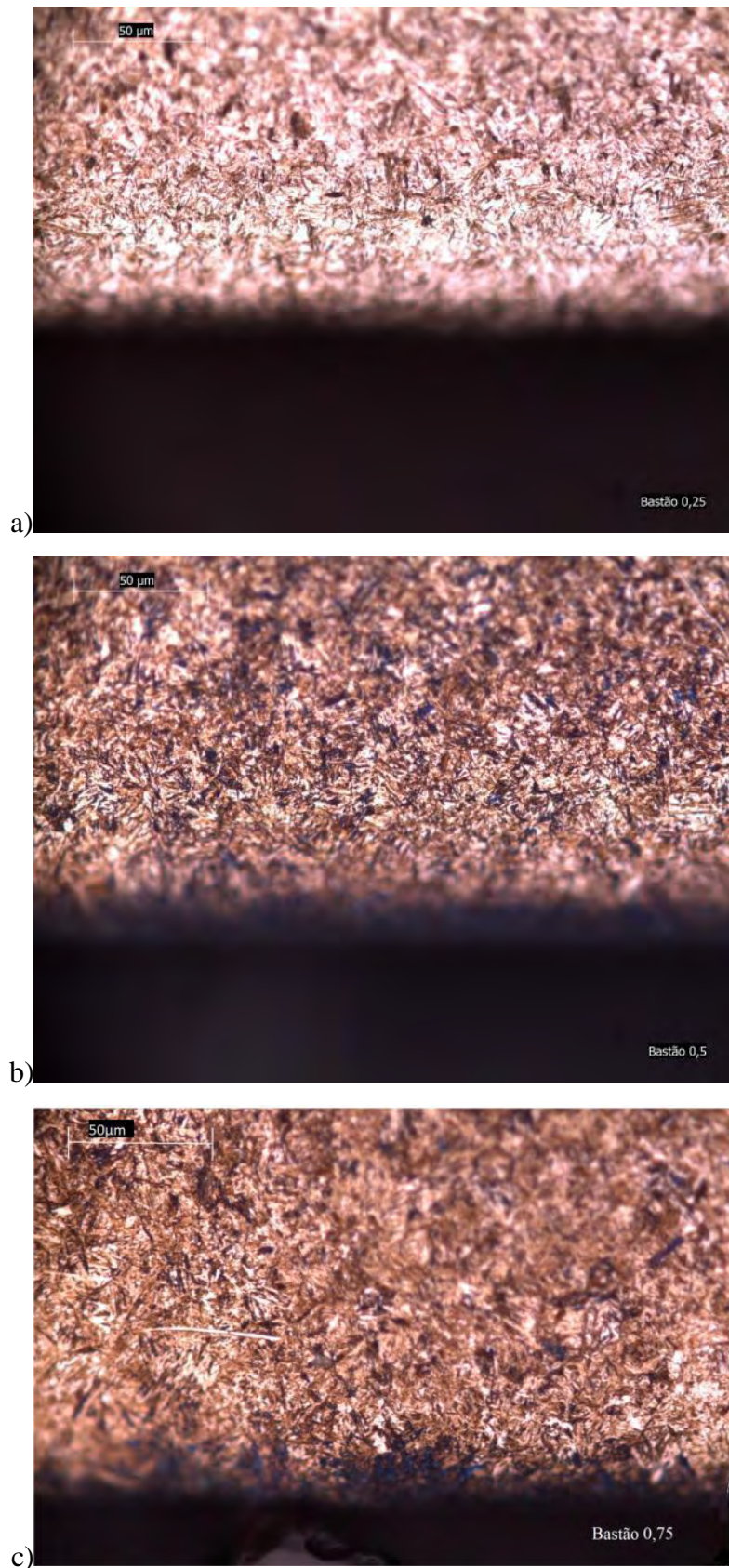


Figura 62 -Microscopia para os ensaios com lubri-refrigeração de MQL com limpeza com um bastão de óxido de alumínio com granulometria 120 (ampliação de 500 vezes). a) velocidade 0,25mm/min. b) velocidade de 0,50 mm/min. c) velocidade de 0,75mm/min.

Não houve alteração estrutural nestas peças. Mas apresentou-se um pequeno aumento nas durezas, já que os valores obtidos nestas condições foram 62,5; 61 e 62 HRc. Esta ocorrência justifica-se pelas condições severas de temperaturas a que foram submetidas.

O bastão de óxido de alumínio foi eficiente na retirada dos cavacos, porém deixou resíduos na zona de corte, promovendo maior atrito da peça com essas partículas na superfície do rebolo e aumentando o calor gerado no processo.

5.6.7. Ensaio com o método de lubri-refrigeração de MQL e limpeza com o bastão de óxido de alumínio com granulometria 150.

A figura 63 mostra os resultados de microscopia dos ensaios com a o método de lubri-refrigeração de MQL com limpeza com o bastão de óxido de alumínio com granulometria 150.

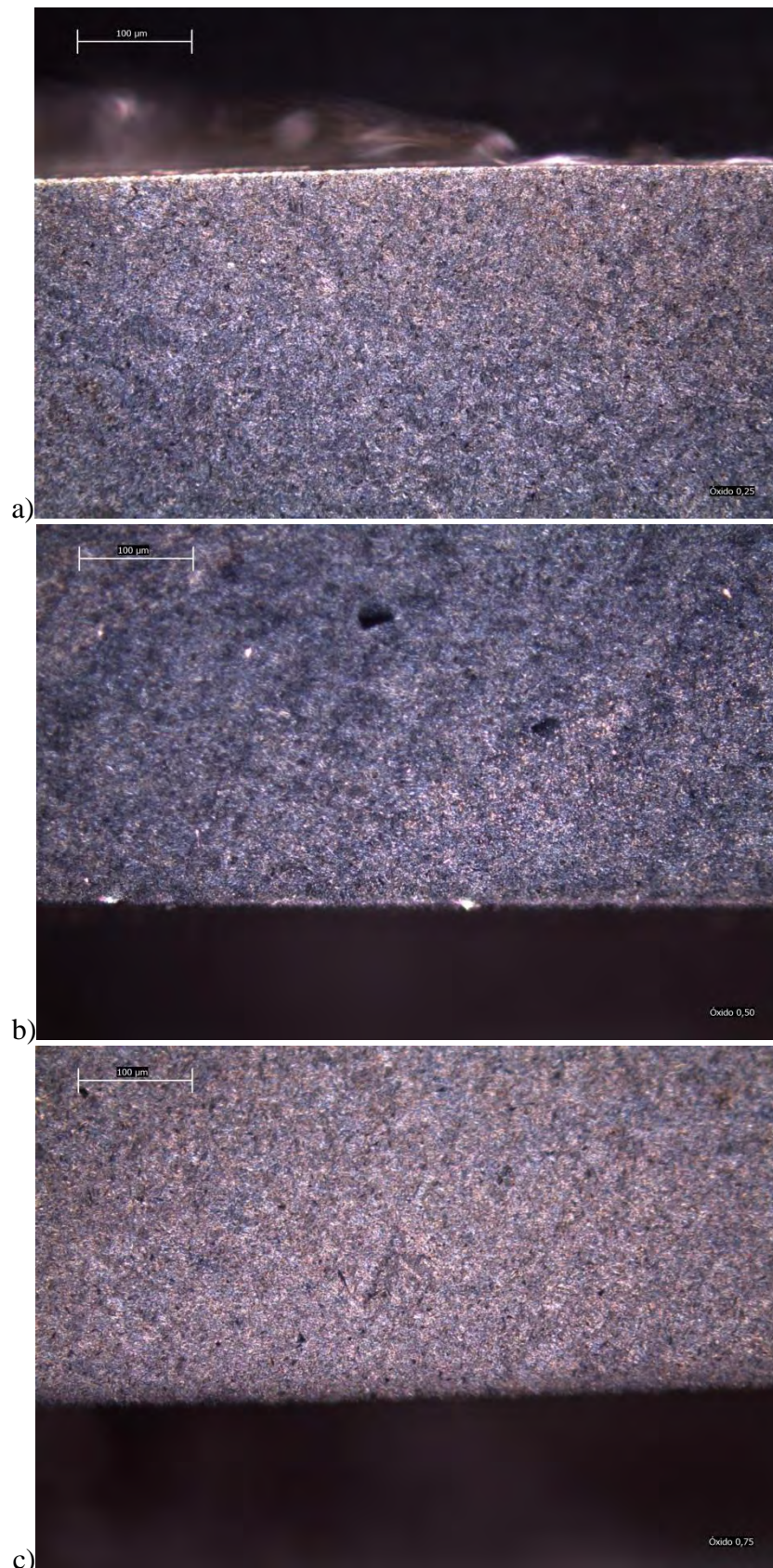


Figura 63 - Microscopia para os ensaios com lubri-refrigeração de MQL com limpeza com um bastão de óxido de alumínio com granulometria 150 (ampliação de 200 vezes). a) velocidade 0,25mm/min. b) velocidade de 0,50 mm/min. c) velocidade de 0,75mm/min.

Observa-se que não houve a queima superficial na usinagem do corpo de prova. O resultado do ensaio de microdureza para a condição convencional foi 57,2, 62,3 e 60,4 HRc, respectivamente, para as velocidades de 0,25, 0,50 e 0,75 mm/min, relativamente próximo ao resultado de microdureza para o corpo de prova sem retificação (59 HRc).

Com a microdureza da condição na velocidade 0,50mm/min podemos concluir que houve condição similar ao bastão com granulometria 150, onde os resíduos deixados no rebolo promoveram o aumento da temperatura na região de corte e conseqüentemente da dureza.

5.6.8. Ensaio com o método de lubri-refrigeração de MQL e limpeza com o carvão de silício

A Figura 64 mostra os resultados de microscopia dos ensaios com a o método de lubri-refrigeração de MQL com o novo material de limpeza: carvão de silício.

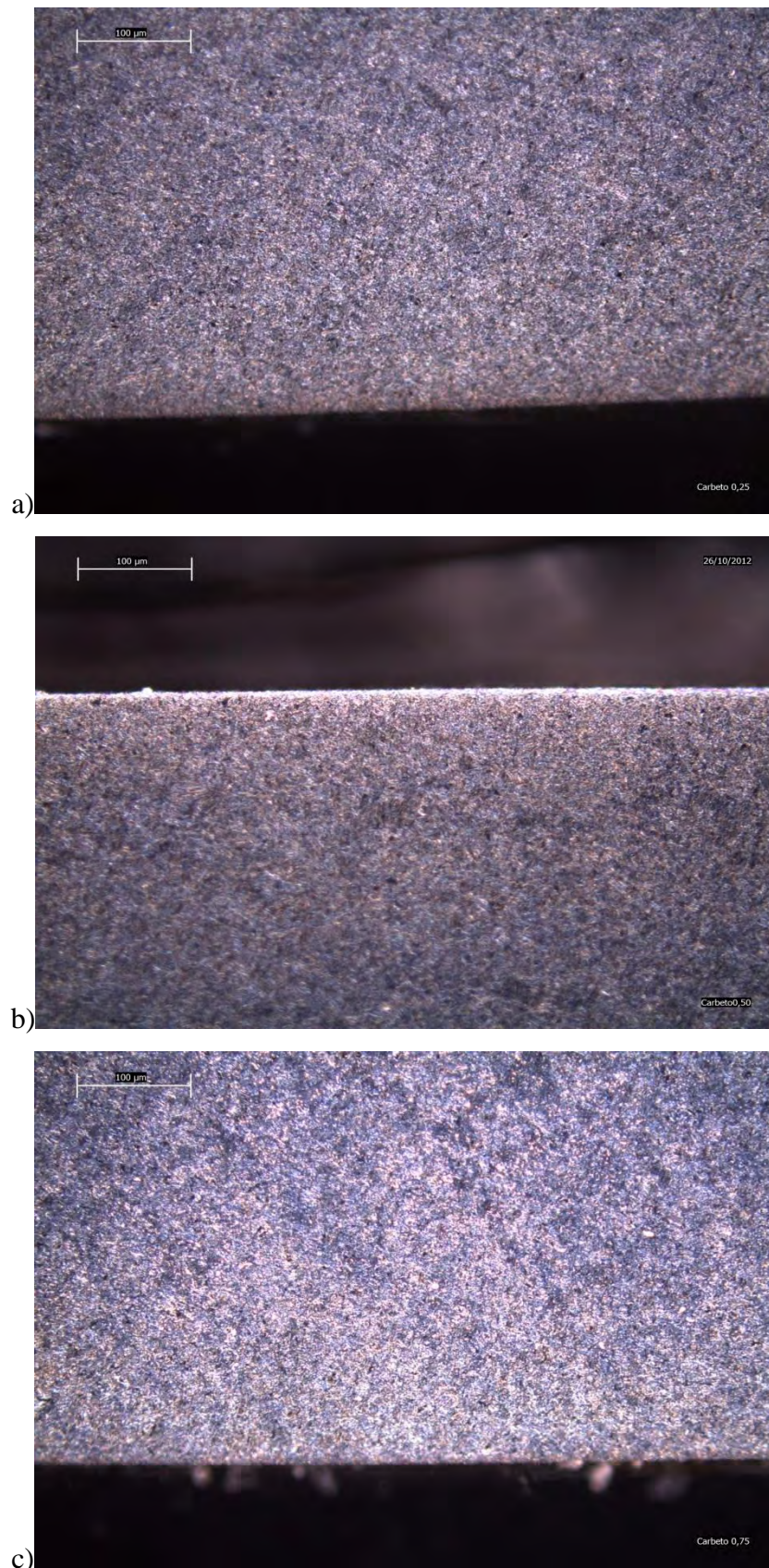


Figura 64 - Microscopia para os ensaios com lubri-refrigeração de MQL com limpeza com carbeto de silício (ampliação de 200 vezes). a) velocidade 0,25mm/min. b) velocidade de 0,50 mm/min. c) velocidade de 0,75mm/min.

Observa-se que não houve a queima superficial na usinagem do corpo de prova. O resultado do ensaio de microdureza para a condição convencional foi 60; 60,3 e 60,5 HRc, respectivamente, para as velocidades de 0,25, 0,50 e 0,75 mm/min, relativamente próximo ao resultado de microdureza para o corpo de prova sem retificação (59 HRc).

5.7. Microscopia Eletrônica de varredura

O MEV é uma poderosa técnica de avaliação microestrutural, pois possibilita análises do estado de superfícies e noção de profundidade, tornando-se uma análise essencial uma vez que, segundo Alves *et al.* (2005), a integridade superficial de uma peça é de extrema importância.

Danos causados à superfície de um material podem afetá-lo significativamente, causando alterações na resistência ao desgaste, nucleação e propagação de trincas e aceleração do processo de fadiga da peça. Lembrando que a integridade superficial de uma peça é afetada principalmente pela temperatura oriunda do processo de retificação, podendo causar danos térmicos na peça (Alves *et al.*, 2011)

A seguir, na Figura 65 e Figura 66, serão mostradas as imagens de MEV dos ensaios da condição analisada de MQL com limpeza de bastão de óxido de alumínio com granulometria 150 e carbetto de silício, para as velocidades de 0,25, 0,5 e 0,75 mm/min.

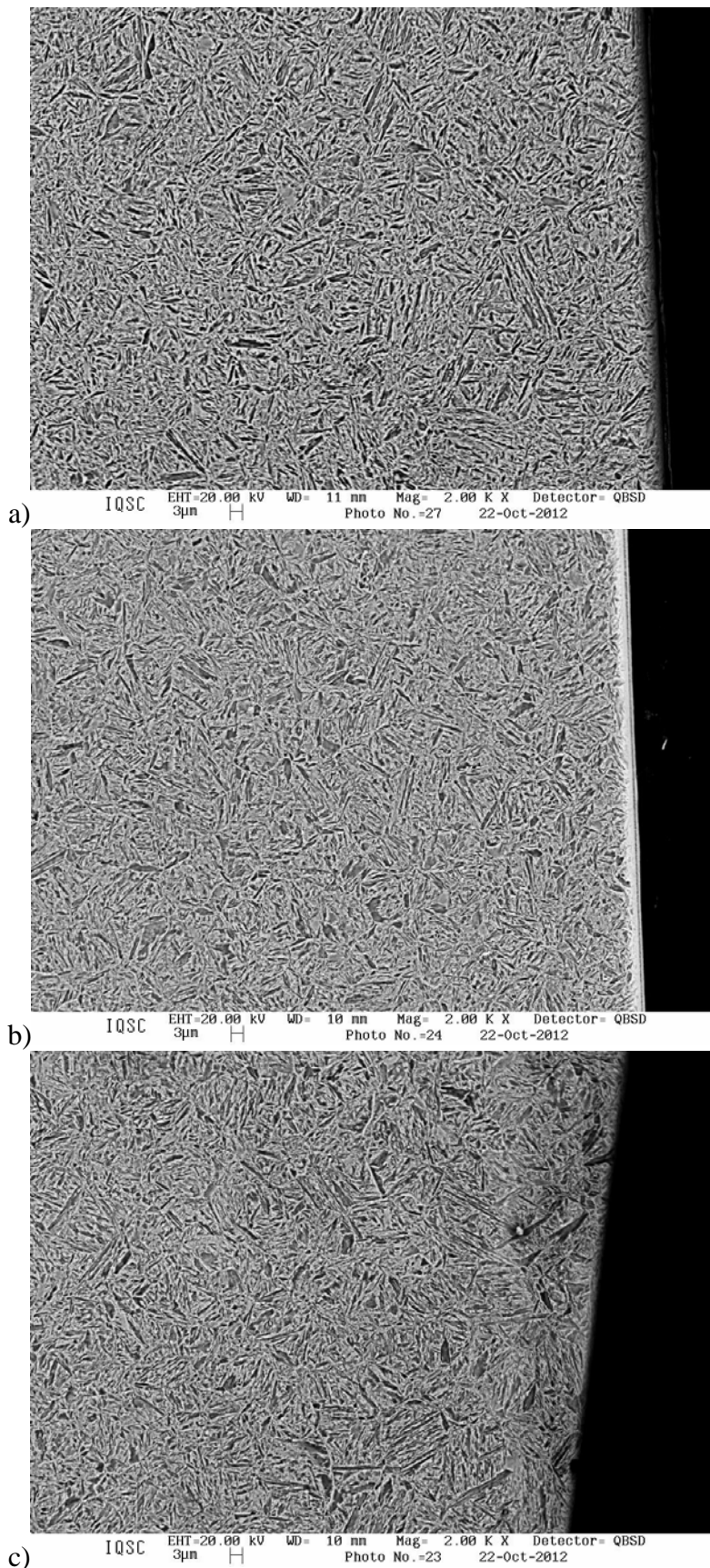


Figura 65 - Microscopia eletrônica de varredura para os ensaios com lubri-refrigeração de MQL com limpeza com um bastão de óxido de alumínio com granulometria 150 (ampliação de 2000 vezes). a) velocidade 0,25mm/min. b) velocidade de 0,50 mm/min. c) velocidade de 0,75 mm/min.

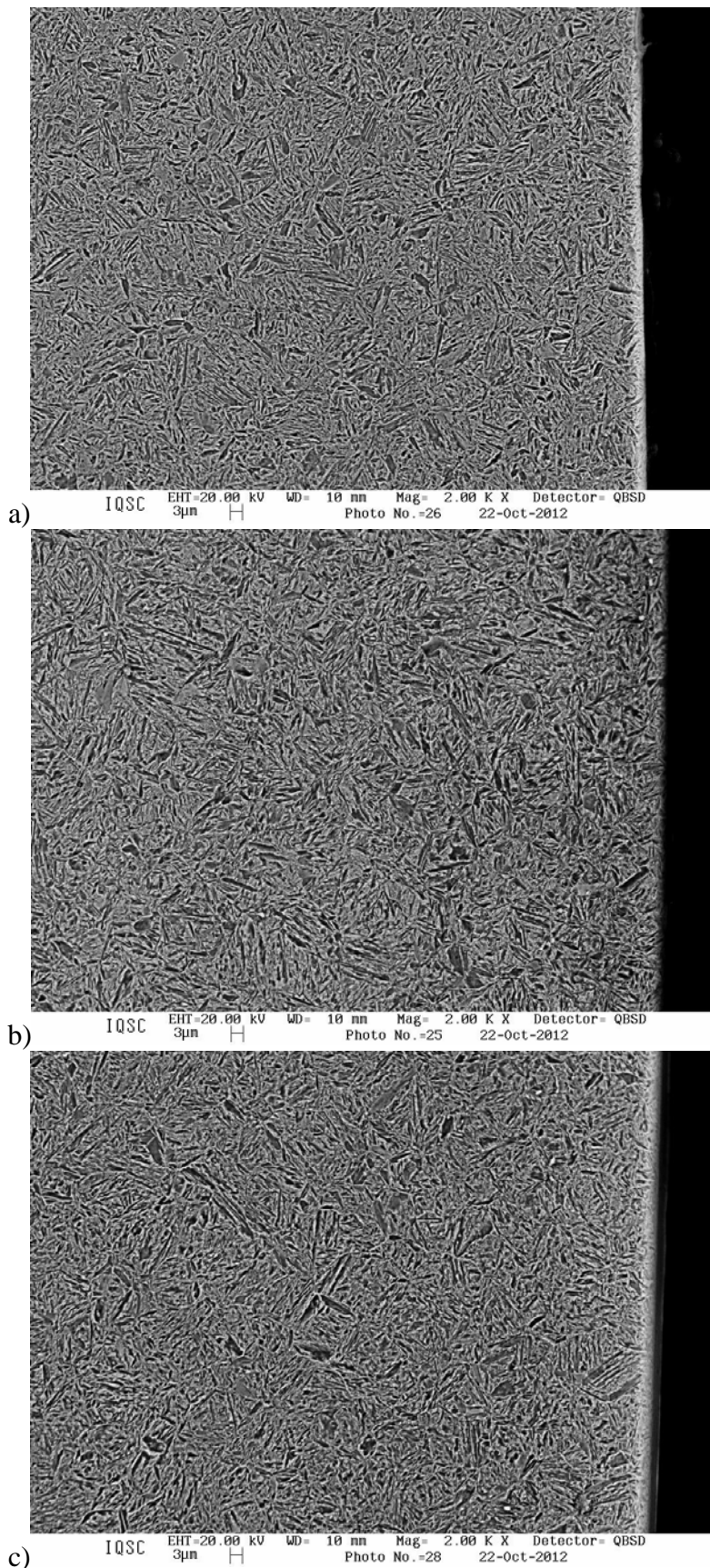


Figura 66 - Microscopia eletrônica de varredura para os ensaios com lubri-refrigeração de MQL com limpeza com carbeto de silício (ampliação de 2000 vezes). a) velocidade 0,25mm/min. b) velocidade de 0,50 mm/min. c) velocidade de 0,75mm/min.

Observar-se nas microscopias o não aparecimento de trincas. Não há também áreas onde tenham ocorrido fases diferentes (revenimento ou queima). Além disso, essas microscopias não apresentam alterações subsuperficiais.

A quantidade de calor e de deformação plástica em que a peça foi submetida durante a retificação não foi suficiente para produzir alterações significativas na microestrutura do material. Apesar de algumas dessas peças terem sua microdureza diminuída ou aumentada, isso evidencia que nessas situações a retificação atingiu um pouco mais a integridade superficial do corpo de prova, mas não ao ponto de causar a queima superficial.

5.8. Microdureza

A análise de microdureza é complementar à análise de micrografia do material, e para melhor observação, os resultados foram divididos em três gráficos. As Figuras 67, 68 e 69 mostram estes resultados.

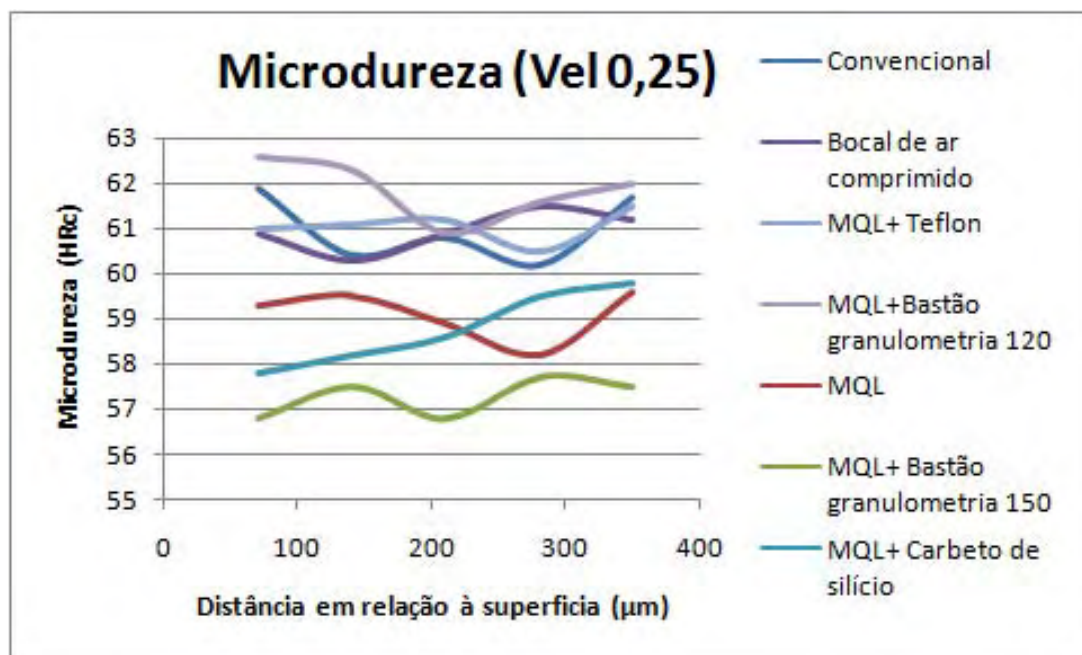


Figura 67 - Resultados de microdureza para todas as técnicas com velocidade de mergulho 0,25mm/min.

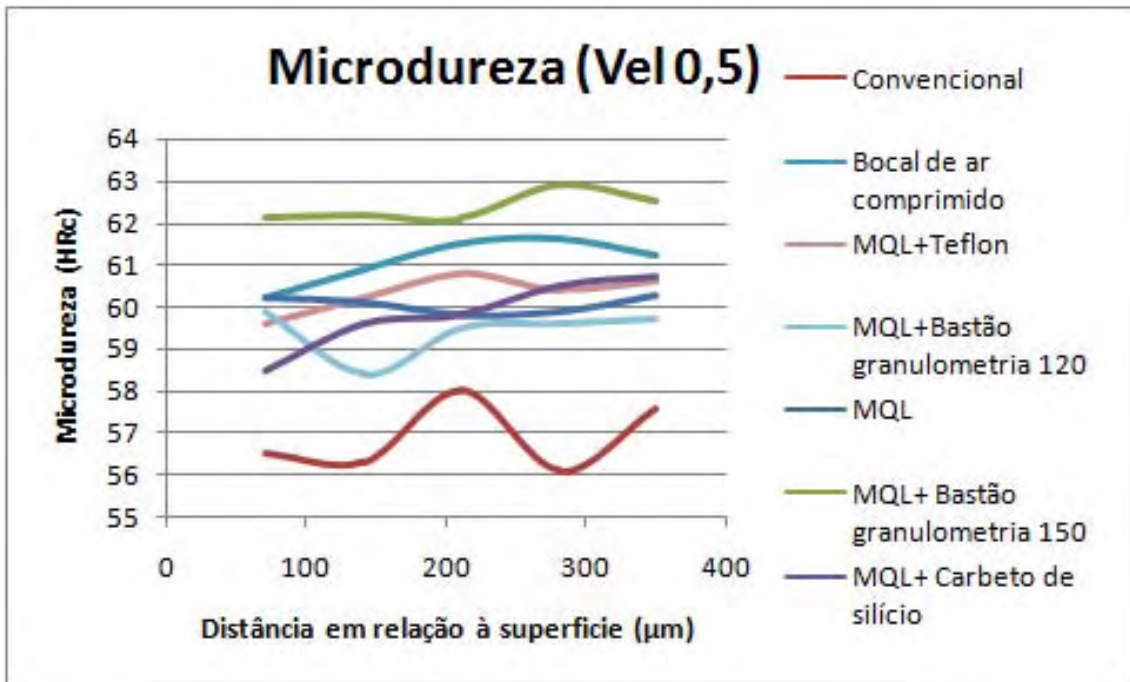


Figura 68 - Resultados de microdureza para todas as técnicas com velocidade de mergulho 0,50mm/min.

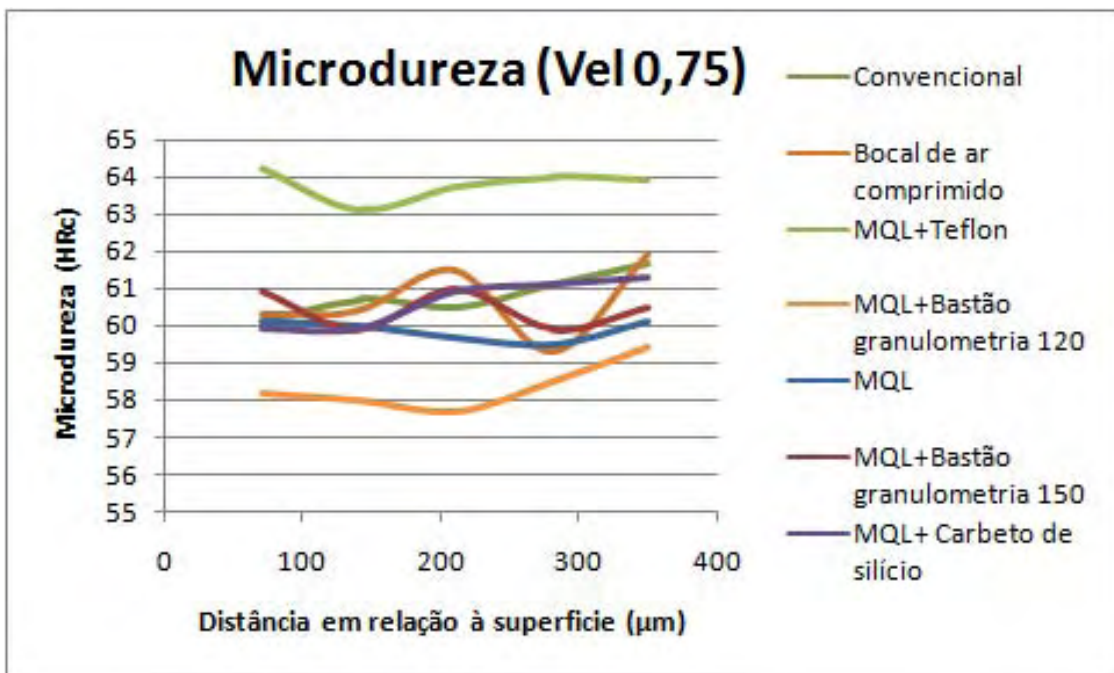


Figura 69 - Resultados de microdureza para todas as técnicas com velocidade de mergulho 0,75mm/min.

O fabricante informa que a dureza média dos corpos de prova fornecidos é de 59HRc. As amostras analisadas não apresentaram variações muito significativas em relação a essa microdureza.

Os casos que mais merecem observação quanto a variação de microdureza para baixo são as condições com o Bastão de óxido com granulometria 150 na velocidade de 0,25 mm/min e a condição de refrigeração convencional na velocidade de 0,50mm/min. Com os valores obtidos, podemos levantar a hipótese das peças terem sofrido um revenimento devido a temperatura alcançada na retificação e a taxa de resfriamento desses corpos de prova, ocasionando perda de dureza superficial.

Já as condições com o Bastão de óxido com granulometria 120, bastão de óxido com granulometria 150 e o bloco de teflon, nas velocidades 0,25 mm/min, 0,50 mm/min e 0,75mm/min respectivamente, tiveram sua dureza aumentada na superfície e em profundidade. Nesse caso, há um acréscimo na dureza da superfície da peça. Na microscopia óptica não está nítido a queima superficial, mas essas alterações de microdureza elevadas podem ser apenas variações referentes ao processo de tempera inicial dos corpos de provas.

Como observado nas figuras as microdurezas das demais técnicas não variaram significativamente. As diferenças entre as leituras encontradas nesses corpos em relação ao corpo de prova não retificado se devem ao fato de se tratarem de peças diferentes, e a dispersão encontrada em todos os resultados é típica de medições de microdureza e, portanto, atende as tolerâncias especificadas nos projetos. Da mesma forma a condição de limpeza com o carbeto de silício não obteve diferenças estaticamente consideráveis.

Portanto no geral para todas as velocidades e métodos testados a microdureza variou muito pouco em relação a do corpo de prova não retificado. O que comprova, complementando a microscopia que não houve queimas ou alterações superficiais significativas em nenhum método testado.

5.9. Comparativo entre os materiais dos bastões utilizados para a limpeza.

De acordo com os resultados obtidos é possível exemplificar através de uma tabela (Tabela 3), quais os materiais dos bastões de limpeza, foram melhores nos respectivos parâmetros analisados neste trabalho.

Tabela 3 – Comparativo entre os bastões utilizados no método MQL + limpeza com bastões, nas velocidades 0,25mm/min.; 0,50mm/min.; e 0,75mm/min.

Comparativo entre os bastões utilizados na limpeza com MQL Velocidade 0,25mm/min.				
Parâmetros	Ótimo	Bom	Médio	Ruim
Rugosidade	Carbeto de silício	Óxido de alumínio 120	Teflon	Óxido de Alumínio 150
Circularidade	Teflon	Carbeto de silício	Óxido de alumínio 120	Óxido de Alumínio 150
Desgaste Diametral	Carbeto de silício	Óxido de alumínio 120	Teflon	Óxido de Alumínio 150
Potência	Óxido de alumínio 120	Carbeto de silício	Óxido de Alumínio 150	Teflon
Emissão Acústica	Teflon	Óxido de alumínio 120	Carbeto de silício	Óxido de Alumínio 150
Velocidade 0,50mm/min.				
Parâmetros	Ótimo	Bom	Médio	Ruim
Rugosidade	Carbeto de silício	Teflon	Óxido de alumínio 120	Óxido de Alumínio 150
Circularidade	Teflon	Carbeto de silício	Óxido de alumínio 120	Óxido de Alumínio 150
Desgaste Diametral	Carbeto de silício	Óxido de alumínio 120	Teflon	Óxido de Alumínio 150
Potência	Óxido de alumínio 120	Carbeto de silício	Óxido de Alumínio 150	Teflon
Emissão Acústica	Teflon	Óxido de alumínio 120	Carbeto de silício	Óxido de Alumínio 150
Velocidade 0,75 mm/min.				
Parâmetros	Ótimo	Bom	Médio	Ruim
Rugosidade	Carbeto de silício	Óxido de Alumínio 150	Óxido de alumínio 120	Teflon
Circularidade	Teflon	Carbeto de silício	Óxido de alumínio 120	Óxido de Alumínio 150
Desgaste Diametral	Carbeto de silício	Teflon	Óxido de alumínio 120	Óxido de Alumínio 150
Potência	Óxido de alumínio 120	Carbeto de silício	Óxido de Alumínio 150	Teflon
Emissão Acústica	Teflon	Óxido de alumínio 120	Carbeto de silício	Óxido de Alumínio 150

6. CONCLUSÕES

Baseado nos resultados obtidos neste trabalho pode-se concluir que a utilização deste dispositivo de limpeza juntamente com a técnica do MQL obteve bons resultados. Destacando-se as conclusões:

- No geral todos os bastões de limpeza se mostraram eficientes na remoção da borra e desentupimento do rebolo. Os resultados obtidos na Emissão acústica de todos os bastões testados demonstraram valores menores se comparado ao método MQL sem limpeza. Isso comprova a eficiência em retirar cavacos da região periférica do rebolo.

- Em algumas condições, os resultados obtidos com a aplicação dos bastões abrasivos, demonstraram ser superiores aos obtidos com a técnica de MQL tradicional.

- Os resultados obtidos com o bastão de carbeto de silício, comprovaram que é o melhor material abrasivo para promover a limpeza dentre os testados. Sendo assim este material na condição de avanço 0,25mm/min. obteve rugosidade média igual ao método convencional.

- Os materiais com características similares ao Teflon, por deixarem resíduos nos poros do rebolo, acabam prejudicando a eficiência do processo. Isso pode ser observado no ensaio de potencia de retificação já que nestes resultados observou aumento deste parâmetro, o que é ruim para o processo de retificação.

7. PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

- Para trabalhos futuros, tendo como base as características dos materiais já testados neste trabalho, poderão ser testados bastões com composições diferentes a fim de se encontrar um material que possa promover a limpeza, sem promover o empastamento dos poros do rebolo.

- Outro aspecto que pode ser trabalhado, é o período e a frequência, em que os bastões abrasivos entram em contato com o rebolo. Isto poderia melhorar os parâmetros de circularidade apresentados nos resultados deste trabalho.

REFERÊNCIAS

AGARWAL, S., VENKATESWARARAO, P. **Predictive modeling of force and power based on a new analytical undeformed chip thickness model in ceramic grinding.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2013, p. 68–78.

AGARWAL, S., VENKATESWARARAO, P. **Predictive modeling of undeformed chip thickness in ceramic grinding.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2012, p. 59–68.

ALVES, M. **Análise da influência da velocidade de mergulho na retificação de aços endurecidos utilizando refrigeração otimizada.** Bauru: Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, 2005. 167 f. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Industrial).

ALVES, M., BIANCHI, E., AGUIAR, P. **Influência da lubrificação na qualidade superficial de metais retificados.** Metalurgia e materiais, 2011, p. 505-512.

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

BALDO, E. D. **Redução do ciclo de retificação cilíndrica de mergulho com auxílio da emissão acústica.** Dissertação de Mestrado - UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, 1994, p. 86.

BERTALAN, C. **Retificação com Rebolos de Nitreto de Boro Cúbico em Máquinas-Ferramentas Convencionais.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R.; SERNI, P. J. A.; DOTTO, F. R. L. **“In-process grinding monitoring through acoustic emission”.** Journal of Brazilian Society of Mechanic Science & Engineering. Vol.28, No.1, 2006, p. 118-124,.

BIGERELLE, M., HAGEGE, B., MANSORI, M. E.; **Mechanical modelling of micro-scale abrasion in superfinish belt grinding,** Tribology International 41 992– 001, 2008.

BLINKOWSKI K., **Coolants and lubricants: part 1—the truth,** Manufacturing Engineering March. 1993, p. 90–96.

BRINKSMEIER, E., BROCKHOFF, T. **Utilization of Grinding Heat as a New Heat Treatment Process.** Annals of the CIRP, vol. 45, 1996, p. 283-286.

BRINKSMEIER, E.; HEINZEL, C.; WITTMAN, M. **“Friction, cooling and lubrication in grinding”.** CIRP Annals. Vol. 48, No.2, 1999, p. 581-598.

BROOKES, C. A. **Diamond in perspective: a review of mechanical properties of natural diamond.** Diamond and related materials. Vol. I, 2010, p. 13-17.

CAMERON, A. and WARKETIN, R.B., **“An investigation of the effects of wheel cleaning parameters in creepfeed grinding”,** International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 08, 2009, p. 50-65.

CAMERON, A., BAUER, R., WARKENTIN, A. **An investigation of the effects of wheel cleaning parameters in creep-feed grinding.** International Journal of Machine Tools and Manufacture 50, 2010, p. 126–130..

CHOI, T. J.; SUBRAHMANYA, N.; LI, H.; SHIN, Y. C. **Generalized practical models of cylindrical plunge grinding processes.** International Journal of Machine Tools & manufacture: Design, Research and Application. Vol. 48, 2008, p.61-72.

DEMETER, E.C., HOCKENBERGER, M.J.; **The application of tool path compensation for the reduction of clamping-induced geometric error.** International Journal of Production Research, nº 35, v.12, 1997.

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

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais.** Artiber Editora Ltda, Campinas, SP, Brasil, 2ª Edição, 2000, p.225-244.

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais.** Artiber Editora Ltda, Campinas, SP, Brasil, 4ª Edição, 2003, p.230-248.

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

NETO, J. FERNANDES, . **Estudo experimental da remoção, por jato de ar comprimido, de detritos na superfície de corte de rebolo diamantado durante a retificação da alumina refrigerada pela técnica mql.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual Paulista – Unesp, Bauru, SP, Brasil, 2009.

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

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, 2007, p.343-346.

HADAD, M., SADEGHI, B. **Minimum quantity lubrication-MQL turning of AISI 4140 steel alloy.** Journal of Cleaner Production, 2013, p. 1-12.

HAFENBRAEDL, D. and MALKIN, S.,**Tecnologia Ambientalmente Correta para Retificação Cilíndrica Interna,** Revista Máquinas & Metais, Vol. 37, 2001, p. 40-55.

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., WU, X.J.; **Grinding force and power modeling based on chip thickness Analysis,** International Journal Advanced Manufacture Technologic 33, 2007, p. 449–459.

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, fevereiro 1998, p. 22-38.

HUANG, H. **Machining characteristics and surface integrity of yttria stabilized tetragonal zircônia in high speed deep grinding.** Materials Science and Engineering A345, 2003, p. 155-163.

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

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

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

JING, Y., ZHONG-NING, Z., JIAN-CHUN, C., XIANG-XIONG, L., **Architectural Acoustics and Noise: Healthcare Acoustics.** J. Acoust. Soc. Am., Vol. 131, No. 4, Pt. 2, April 2012.

KING, R. I., HAHN, R. S., **Handbook of modern technology.** 3a Ed., Cap.6, 1992, p.119-167.

KLOCKE, F., EISENBLÄTTER, G. **Dry Cutting.** Annals of the CIRP, Vol. 46, No.2, 1997, p. 519-526.

KLOCKE, F.; BECK, T.; EISENBLÄTTER, G.; LUNG, D. **Minimal quantity lubrication (MQL) – motivation, fundamentals.** 12th International Colloquium Industrial and Automotive Lubrication, Technische Akademie Esslingen, 2000.

KONIG W., ARCISZEWSKI, A.; **Continuous dressing—dressing conditions determine material removal rates and workpiece quality,** Ann. CIRP 37, 1988, p. 303–307.

KOPAC J., KRAJNIK P.; **High-performance grinding – A Review.** Journal of Materials Processing Technology, Vol 175, 2006, p. 278-284.

KRAMER, N. **In-Process Identification of Material-Properties by Acoustic Emission Signals.** CIRP Annals - Manufacturing Technology, v.56, 2007, p. 331-334.

KRAR, S. F., RATTERMAN, E. **Superabrasives: Grinding and Machining With CBN and Diamond.** Mcgraw-Hill, Inc., Usa. 1990.

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, E. S.; 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, 2001, p. 937-951.

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

LI, X., RONG, Y., **Framework of grinding process modeling and simulation based on microscopic interaction analysis.** Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2011, p. 471–478.

LIANG, S.X. **Grinding of ceramics: mechanisms, forces and coolant evaluation.** 113 f. Dissertação (Mestrado) – University of Connecticut, Estados Unidos, 1992.

LIAO, Y. S.; LUO, S. Y.; YANG, T. H. **A thermal model of the wet grinding process.** Journal of Materials Processing Technology, nº 101, 2000, p. 137-145.

LINKE, B., DORNFELD, D. **Application of axiomatic design principles to identify more sustainable strategies for grinding.** Journal of Manufacturing Systems, 2012, p. 412– 419.

MACHADO, A. R.; DINIZ, A. E. **Vantagens e desvantagens do uso (ou não) de fluidos de corte,** In: Congresso Usinagem 2000, São Paulo – SP, 2000.

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

MALKIN, S. **Grinding Technology: theory and applications of machining with abrasives.** 2 ed. Industrial Press, 2008.

MARINESCU, I. D.; HITCHINER, M.; UHLMANN, E.; ROWE, W.B.; INASAKI, I. **Handbook of Machining with Grinding Wheels.** CRC Press. New York, 2007.

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

MARINESCU, I.; TÖNSHOFF, H.K.; INASAKI, I. **Handbook of Ceramic Grinding and Polishing,** New Jersey. Noyes Publications, Cap.2, 1998.

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

MONICI, R. D. **Análise da aplicação de vazões reduzidas de fluidos de corte na retificação de aços endurecidos.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual Paulista – Unesp, Bauru, SP, Brasil, 2003.

NGUYEN, T., ZHANG, C. **Realisation of grinding-hardening in work pieces of curved surfaces—Part 1: Plunge cylindrical grinding.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2011, p. 309–319.

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 45, 2005, p. 1321–1328.

NOVASKI, O., DÖRR, J. **Usinagem quase a seco.** Revista Máquinas & Metais, Ano.XXXVI, nº 406, nov. 1999, p. 34-41.

OBIKAWA T., KAMATA Y., SHINOZUKA, J. **High-speed grooving with applying MQL,** International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006) 1854–1861 Ohio, 1999, p. 13-32.

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

OLIVEIRA, J., SILVA, E., GUO, C. HASHIMOTO F. **Industrial challenges in grinding.** CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2009, p. 663–680.

PARK, K., OLORTEGUI-YUME, J., YOON, M., KWON, P. **A study on droplets and their distribution for minimum quantity lubrication (MQL).** International Journal of Ferramentas e fabricação de máquinas. v. 50, 2010, p. 824-833

PAWLAK, Z., KLAMECKI, E. B., RAUCKYTE, T.; SHPENKPV, P. G.; KOKOWSKI, A. **The Tribochemical and Micellar Aspects of Cutting Fluids.** Tribology International, 38,1, 2004.

PEREIRA, M.; NETO, J.; GUERMANDI, L.; AGUIAR, P.; EDUARDO, A.; BIANCHI, E. **Utilização de jatos de ar comprimido para otimizar a técnica da mínima quantidade de lubrificante na retificação de materiais cerâmicos.** In: 6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, , Caxias do Sul-RS. v. CD-ROM. 2011, p.1-11

RAHIM, E., SASAHARA, H. **A study of the effect of palm oil as MQL lubricant on high speed drilling of titanium alloys.** Tribology International, 2011, p. 309–317.

RAHMAN, M., ASAD, A.B.M.A., MASAKI, T., SALEH, T., WONG, Y.S. **A multiprocess machine tool for compound micromachining,** International Journal of Machine Tools & Manufacture. Vol. 50, 2010, p. 344–356.

RAMESH, K., YIN, L., SPOWAGE, A., HUANG, H., PICKERING, P., VANCOILLE, E. **Influence of microstructure on ultraprecision grinding of cemented carbides,** International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, p. 533–543.

RANGAWALA, S., DORNFELD, D. **A study of acoustic emission generated during orthogonal metal cutting, I: energy analysis.** International Journal of Mechanical Science. 33, 1991, p. 471-487.

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

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

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 44, 2009, p. 487-500.

SALMON, S.C. **Modern grinding process technology.** 1 ed. New York; McGraw-Hill, 1992, p. 224.

SHAJI, S., RADHAKRISHNAN, V. **Analysis of process parameters in surface grinding with graphite as lubricant based on the Taguchi method,** Journal of Materials Processing Technology 141, 2003, p. 51-59.

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

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.

SINGH V., VENKATESWARARAO, P., GHOSH, P. **Development of specific grinding energy model.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2012, p. 1-13.

SINOT, O., CHEVRIEB, P. and PADILHA, P., **Experimental Simulation of the Efficiency of High Speed Grinding Wheel Cleaning,** International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 46, p. 170-175, 2006.

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

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

STANFORD, M., LISTER, P.M. **Future role of metalworking fluids,** Industrial Lubrication Tribology, Vol. 54, No.1, 2007, p. 11-19.

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

TAWAKOLI, T.,HADAD M.J.,SADEGHI M.H, **Investigation on minimum quantity lubricant-MQL grinding of 100Cr6 hardened steel using different abrasive and coolant-lubricant types.** International Journal of Machine Tools & Manufacture 50, 2010, p. 698–708.

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

TAWAKOLI, T., REINECKE, H., VESALI, A. **An Experimental Study on the Dynamic Behavior of Grinding Wheels in High Efficiency Deep Grinding.** ScienceDirect. 2012, p. 382 – 387.

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, 2010, p. 521–531.

WANG, C.M., CARGILL, G.S., CHAN, H.M., HARMER, M.P. **Structure of Y and Zr Segregated Grain Boundaries in Alumina.** Interface Science 8, 243–255, 2000.

WEBSTER, J. A., **Coolant Calculus: Directing coolant into the right place at the right speed, in the right quantity.** Cutting Tool Technology, Vol 60-2, 2008, p. 58-66.

WEBSTER, J. **Selection of coolant type and application technique in grinding.** Supergrind,1995, p.205-218.

WEBSTER, J., DONG, W.P., LINDSAY, R.; **Raw Acoustic Emission Signal Analysis of Grinding Process,** Annals of the CIRP Vol. 45/7/7996,1996.

WEBSTER, J., TRICARD, M., **Innovations in abrasive products for precision grinding.** CIRP Annals – Manufacturing Technology, 2004, p. 597–617.

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, 2005, p. 723-741.

YUEMING, L., ANDREW, W., ROBERT, B., YADONG G. **Investigation of different grain shapes and dressing to predict surface roughness in grinding using kinematic simulations.** Precision Engineering, 2013, p. 758– 764.

ZHANG, X, BIN, L., HUI, X. **Validation of an analytical model for grinding temperatures in surface grinding by cup wheel with numerical and experimental results.** International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, p. 29 – 42.