



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

GILSON EDUARDO TARRENTO

**RETIFICAÇÃO POR CORTE INTERROMPIDO DO AÇO TEMPERADO ABNT
4340, COM REBOLO DE CBN, UTILIZANDO REFRIGERAÇÃO ABUNDANTE E
ALTA VELOCIDADE**

BAURU

Agosto – 2018

GILSON EDUARDO TARRENTO

**RETIFICAÇÃO POR CORTE INTERROMPIDO DO AÇO TEMPERADO ABNT
4340, COM REBOLO DE CBN, UTILIZANDO REFRIGERAÇÃO ABUNDANTE E
ALTA VELOCIDADE**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia da
UNESP – *Campus* de Bauru, para obtenção do título
de Doutor em Engenharia Mecânica. Área de
concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi

Coorientador: Prof. Dr. Luiz Eduardo de Angelo Sanchez

Coorientadora: Profa. Dra. Janaína Fracaro de Souza Gonçalves

BAURU

Agosto – 2018

Tarrento, Gilson Eduardo.

Retificação por corte interrompido do aço ABNT 4340, com rebolo de CBN, utilizando refrigeração abundante e alta velocidade / Gilson Eduardo Tarrento, 2018

123 f. : il.

Orientador: Eduardo Carlos Bianchi

Tese (Doutorado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2018

1. Corte interrompido. 2. Métodos de Refrigeração. 3. Rebolo de CBN 4. Retificação. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE GILSON EDUARDO TARRENTO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 03 dias do mês de agosto do ano de 2018, às 09:00 horas, no(a) Anfiteatro da Seção Técnica de Pós-graduação da FEB, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. JOAO EDUARDO GUARNETTI DOS SANTOS do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Doutor HAMILTON JOSÉ DE MELLO do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / UNESP - Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. ALESSANDRO ROGER RODRIGUES do(a) Engenharia Mecânica / USP - São Carlos, Prof. Dr. CARLOS ELIAS DA SILVA JUNIOR do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da TESE DE DOUTORADO de GILSON EDUARDO TARRENTO, intitulada **RETIFICAÇÃO DO AÇO TEMPERADO ABNT 4340 POR CORTE INTERROMPIDO, COM REBOLO DE CBN, UTILIZANDO REFRIGERAÇÃO ABUNDANTE E ALTA VELOCIDADE**. 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. JOAO EDUARDO GUARNETTI DOS SANTOS

Doutor HAMILTON JOSÉ DE MELLO

Prof. Dr. ALESSANDRO ROGER RODRIGUES

Prof. Dr. CARLOS ELIAS DA SILVA JUNIOR

Carlos Elias da Silva Junior.

PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

A BANCA EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DO ALUNO:
GILSON EDUARDO TARRENTO

DE: "RETIFICAÇÃO DO AÇO TEMPERADO ABNT 4340 POR CORTE INTERROMPIDO, COM REBOLO DE CBN, UTILIZANDO REFRIGERAÇÃO ABUNDANTE E ALTA VELOCIDADE"

PARA:

Retificação por corte interrompido do aço temperado
ABNT 4340 com rebole de CBN utilizando refrigera-
ção abundante e alta velocidade

Bauru, 03 de agosto de 2018.

Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi
orientador

Aos

Meus pais José (in memoriam) e Claudice

Minha esposa Vânia

Minha filha Mariana

Pelo amor, compreensão e apoio na conquista de mais este sonho,

Dedico

“Se vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes”

Isaac Newton

AGRADECIMENTOS

Sobretudo a DEUS, que me ilumina, me abençoa, zelando sempre pela minha vida, pela minha saúde e pelo bem estar da minha família e por ter me mantido sempre forte na fé e na crença de que seria possível realizar mais este sonho.

Aos meus pais, José Tarrento (*in memoriam*) e Claudice Maria Galvani Tarrento, pela minha educação, pela minha formação profissional e acima de tudo, por todos os exemplos e ensinamentos de humildade, perseverança, fé cristã, caráter e dignidade disseminados com muito amor e afeto ao longo de toda a minha vida.

À minha esposa Vânia Maria Portes de Souza Tarrento e a minha filha Mariana de Souza Tarrento, pelo estímulo e encorajamento os quais me serviram como fonte de inspiração ao compreenderem, com muito amor, os motivos do meu empenho e dedicação de tempo na pesquisa e desenvolvimento desta tese.

Ao meu prezado orientador Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi, por confiar, desde o início, na minha capacidade para a realização desta tese, pela excelente e competente orientação prestada durante o decorrer de toda esta pesquisa, pelo incentivo, pelos conhecimentos transmitidos, pela prontidão constante em ajudar e pela amizade.

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

À minha coorientadora Prof. Dra. Janaína Fracaro de Souza Gonçalves pelas recomendações.

Ao Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi, ao Prof. Dr. João Eduardo Guanetti dos Santos e ao Dr. Hamilton José de Mello por participarem como membros da banca do meu exame de qualificação, apontando informações técnicas relevantes e valorosas recomendações para a melhoria deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi, ao Prof. Dr. João Eduardo Guanetti dos Santos, ao Dr. Hamilton José de Mello, ao Prof. Dr. Alessandro Roger Rodrigues e ao Prof. Dr. Carlos Elias da Silva Junior pela participação como membros da banca de defesa da tese, contribuindo de forma excepcional com valorosos esclarecimentos para a finalização deste trabalho.

A todos os Professores Doutores do departamento de Engenharia Mecânica da FEB, em especial aos Professores Doutores Eduardo Carlos Bianchi, Luiz Eduardo de Angelo

Sanchez, Carlos Alberto Soufen, Gilberto de Magalhães Bento Gonçalves e Cesar Renato Foschini os quais eu tive a honra de cursar suas disciplinas durante o curso e manifesto a minha gratidão pelos relevantes conhecimentos transmitidos.

À Faculdade de Engenharia da Unesp campus de Bauru pela excelência no ensino superior e pela disponibilização dos recursos e dos Laboratórios de Usinagem por Abrasão (LUA) e de Materiais (LABMAT), para a realização desta pesquisa.

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

Aos amigos e alunos da FEB Luis Otávio Barreto de Sampaio Alves e José Claudio Lopes pelas importantes contribuições, pela dedicação e exemplo de companheirismo nas diversas etapas da realização deste trabalho.

A todos os colegas da pós-graduação pelo convívio agradável, em especial àqueles com os quais eu tive a satisfação da companhia, ao cursarmos as mesmas disciplinas.

A todos os funcionários técnico-administrativos, pelo apoio e serviços técnicos prestados, bem como pela cordialidade das informações transmitidas, em especial, Gustavo de Oliveira Rodrigues, Célia Cristina do Espírito Santo Graminha, Alessandra Karine dos Santos Contador e Larissa de Oliveira Marques,

Aos familiares e amigos que me apoiaram e contribuíram de uma forma ou de outra para a concretização deste trabalho.

RESUMO

Embora os processos de corte interrompido sejam comumente utilizados em operações de usinagem como torneamento, existe uma carência na literatura de trabalhos sobre a retificação de peças com geometria interrompida. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos dos impactos controlados entre o rebolo de CBN e as peças fabricadas com aço ABNT 4340, durante o processo de retificação por meio de corte interrompido variando-se a quantidade de rasgos da peça, utilizando 2 tipos diferentes de refrigeração (abundante e alta velocidade). Para a realização deste trabalho, foi utilizada uma retificadora cilíndrica CNC fabricada pela empresa Sulmecânica, modelo RUAP515H. O corpo de prova foi confeccionado com aço ABNT 4340 e o delineamento foi para aplicação do método de refrigeração abundante e otimizado por meio de alta velocidade (velocidade do jato de fluido igual à velocidade de corte), com 3 valores de velocidade de mergulho, sendo 0,25 mm/min., 0,50 mm/min. e 0,75 mm/min, sendo que para cada uma destas condições, foram utilizadas 4 diferentes geometrias, considerando peças com 0, 2, 6 e 12 ranhuras. Estabeleceu-se para cada condição de quantidade de ranhura da peça, um ensaio com 2 repetições para cada geometria, num total de 3 ensaios para cada condição ensaiada. Foi possível concluir que o aumento da velocidade de mergulho elevou a rugosidade e desvios de circularidade das peças, além de promover maior desgaste do rebolo. O aumento da velocidade de mergulho também elevou os níveis de emissão acústica, potência consumida e vibração da máquina. Para os corpos de prova com geometria interrompida, concluiu-se que as ranhuras contribuíram para a captura e transporte do fluido de corte para a área de contato, melhorando o sistema de refrigeração. Não foram constatadas evidências metalográficas que apontassem para ocorrência de danos microestruturais, causados por princípios térmicos ou mecânicos nas peças retificadas.

PALAVRAS-CHAVE: Corte interrompido, Métodos de refrigeração, Rebolo de CBN, Retificação.

ABSTRACT

Although interrupted cutting processes are commonly used in machining operations such as turning, there is a lack in the literature about studies on the grinding of parts with interrupted geometry. Thus, the objective of this thesis was to evaluate the effects of the controlled impact between the CBN grinding wheel and the workpiece during the grinding process by means of interrupted cutting by varying the number of grooves of the workpiece. For this investigation, a cylindrical CNC grinding machine of Sulmecânica company, model RUAP515H was used. The test workpiece was made with ABNT 4340 steel and the design was for the application of the abundant cooling method and optimized by means of high speed (fluid jet velocity equal to the cutting speed), with 3 values of feed-rate, being 0.25 mm/min, 0.50 mm/min and 0.75 mm/min, and for each of these conditions, 4 different geometries were used, considering pieces with 0, 2, 6 and 12 grooves. Two replicates for each geometry was set up for each grooves quantity condition of the part in a total of 3 tests for each condition tested. It was possible to conclude that the increase of the feed-rate raised the roughness and deviations of roundness of the pieces, besides promoting greater wear of the grinding wheel. Increased feed-rate also increased acoustic emission levels, power consumption and machine vibration. For the workpieces with interrupted geometry, it was concluded that the grooves contributed to the capture and transport of the cutting fluid to the contact area, improving the cooling system. No metallographic evidence was found to indicate microstructural damage caused by thermal or mechanical principles in the ground pieces.

KEYWORDS: Interrupted cutting, CBN grinding wheel, Cooling methods, Grinding.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVO e JUSTIFICATIVA	17
1.1.1 Objetivo	17
1.1.2 Justificativa	18
2 REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1 O processo de retificação	19
2.1.1 Retificação cilíndrica externa de mergulho	21
2.1.2 Parâmetros relacionados à operação de retificação	22
2.1.2.1 Comportamento da profundidade de corte (a)	22
2.1.2.2 Velocidade de mergulho (V_f)	23
2.1.2.3 Velocidade de corte (V_s)	24
2.1.2.4 Velocidade periférica da peça (V_w)	25
2.1.2.5 Comprimento de contato (l_c)	26
2.1.2.6 Diâmetro equivalente (d_e)	26
2.1.2.7 Espessura de corte equivalente (h_{eq})	27
2.2 Variáveis envolvidas no processo de retificação	27
2.2.1 Força tangencial de corte (F_t)	28
2.2.2 Rugosidade	30
2.2.3 Desgaste diametral do rebolo	32
2.2.4 Desvio de Circularidade	33
2.2.5 Monitoramento de sinais: emissão acústica, potência e vibração	36
2.3 Mecanismos de formação do cavaco em retificação	38
2.4 Aspectos relacionados aos danos térmicos	39
2.5 Definição de rebolo	41
2.5.1 Rebolo de nitreto de boro cúbico (CBN)	41
2.5.1.1 Mecanismo de desgaste do rebolo de CBN	44
2.6 Dressagem	45
2.6.1 Dressador conglomerado	46
2.7 Fluido de Corte	46
2.7.1 Sistema de refrigeração convencional	48
2.7.2 Sistema de refrigeração com alta velocidade	49
2.8 Usinagem com geometria interrompida	51
2.8.1 Retificação de peças com corte interrompido	52
2.8.2 Uso de rebolo de CBN com geometria interrompida	53
2.8.3 Efeitos da retificação de peças com geometria interrompida	54
2.9 Metalografia	56
2.9.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Microscopia óptica (MO)	56
2.9.1.1 Preparação das amostras para a realização das análises de MEV e MO	58
2.10 Microdureza	59
3 MATERIAIS E MÉTODOS	61
3.1 Parâmetros de entrada	61
3.1.1 Características e propriedades do fluido de corte	62
3.2 Equipamentos e materiais utilizados	62
3.2.1 Retificadora cilíndrica externa	62
3.2.1.1 Descrição do corpo de prova	64
3.2.1.2 Rebolo de CBN utilizado	66

3.2.1.3 Os tipos de sistemas de refrigeração utilizados.....	66
3.2.1.3.1 O sistema de refrigeração convencional ou abundante.....	66
3.2.1.3.2 O sistema de refrigeração por alta velocidade.....	67
3.3 Delineamento dos parâmetros de entrada e variáveis de saída.....	68
3.3.1 Delineamento dos ensaios.....	69
3.3.2 Preparação do corpo de prova para análise das variáveis de saída.....	70
3.3.3 Análise das variáveis de saída.....	71
3.3.3.1 Desvio de circularidade.....	71
3.3.3.2 Rugosidade.....	73
3.3.3.4 Emissão acústica, potência consumida e vibração.....	74
3.3.3.5 Microdureza.....	75
3.3.3.6 Microscopia óptica.....	76
3.3.3.7 Desgaste diametral do rebolo.....	79
3.3.3.8 Dressagem do rebolo.....	83
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	85
4.1 Rugosidade.....	85
4.2 Desvios de Circularidade.....	89
4.3 Desgaste diametral do rebolo.....	91
4.4 Emissão acústica.....	94
4.5 Potência de corte.....	97
4.6 Vibração.....	99
4.7 Microdureza.....	101
4.8 Microscopia Óptica.....	104
5. CONCLUSÕES.....	108
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	109
REFERÊNCIAS.....	110

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Parâmetros de entrada e variáveis de saída em processo de retificação.	20
Figura 2 - Retificação cilíndrica externa de mergulho.	22
Figura 3 - Processo de corte para um grão abrasivo.	29
Figura 4 - Processo de medição da rugosidade média.	30
Figura 5 - Sinal de vibração e imagem do perfil de circularidade.	34
Figura 6 - Características do rebolo.	35
Figura 7 - Diversas fontes de emissão acústica em retificação.	37
Figura 8 - Formação do cavaco por um grão abrasivo.	39
Figura 9 - Aspecto da elevação de temperatura em retificação cilíndrica externa de mergulho.	40
Figura 10 - Relação de dureza Knoop para alguns materiais.	42
Figura 11 - Mecanismos de desgaste do rebolo.	44
Figura 12 - Esquema de possíveis projetos de textura de rebolos.	48
Figura 13 - Formato do bocal de Webster.	50
Figura 14 - Comparativo entre o microscópio eletrônico de varredura e o microscópio óptico convencional.	58
Figura 15 - Retificadora cilíndrica CNC utilizada nos ensaios.	63
Figura 16 - Aspecto visual dos quatro diferentes tipos de corpos de prova utilizados nos ensaios.	65
Figura 17 - Aspecto visual do sistema de refrigeração convencional utilizado nos ensaios.	67
Figura 18 - Aspecto visual do sistema de refrigeração por alta velocidade utilizado nos ensaios.	68
Figura 19 - Matriz de ensaios para refrigeração convencional.	69
Figura 20 - Matriz de ensaios para refrigeração por alta velocidade.	70
Figura 21 - Medição de desvios de circularidade das peças retificadas.	72
Figura 22 - Seleção da área de ranhuras das peças para medição dos desvios de circularidade.	73
Figura 23 - Medição de rugosidade das peças retificadas.	74
Figura 24 - Sistema de aquisição de dados.	75
Figura 25 - Alocação da amostra na máquina de corte metalográfico.	76
Figura 26 - Etapas da preparação dos corpos de prova para metalografia.	77
Figura 27 - Politriz utilizada para polimento dos corpos de prova.	78
Figura 28 - Microscópio óptico utilizado no exame de metalografia.	79
Figura 29 - Aspecto visual dos desgastes do rebolo impressos no cilindro.	80
Figura 30 - Sistema utilizado para medição dos desgastes do rebolo.	81
Figura 31 - Marcas de impressões no cilindro dos desgastes do rebolo.	82
Figura 32 - Desenho esquemático das medições de desgaste do rebolo.	82
Figura 33 - Aspecto visual das operações de dressagem do rebolo.	84
Figura 34 - Interação entre velocidade de mergulho e rugosidade das peças retificadas com refrigeração convencional.	86
Figura 35 - Interação entre velocidade de mergulho e rugosidade das peças retificadas com refrigeração por alta velocidade.	86
Figura 36 - Interação entre velocidade de mergulho e desvio de circularidade das peças retificadas com refrigeração convencional.	89
Figura 37 - Interação entre velocidade de mergulho e desvio de circularidade das peças retificadas com refrigeração por alta velocidade.	90

Figura 38 - Interação entre velocidade de mergulho e desgaste do rebolo com refrigeração convencional.....	92
Figura 39 - Interação entre velocidade de mergulho e desgaste do rebolo com refrigeração por alta velocidade.	92
Figura 40 - Interação entre velocidade de mergulho e emissão acústica com refrigeração convencional.....	95
Figura 41 - Interação entre velocidade de mergulho e emissão acústica com refrigeração por alta velocidade.....	95
Figura 42 - Interação entre velocidade de mergulho e potência consumida com refrigeração convencional.....	97
Figura 43 - Interação entre velocidade de mergulho e potência consumida com refrigeração por alta velocidade.....	98
Figura 44 - Interação entre velocidade de mergulho e vibração com refrigeração convencional.....	100
Figura 45 - Interação entre velocidade de mergulho e vibração com refrigeração por alta velocidade.....	100
Figura 46 - Perfil de microdureza das peças retificadas com refrigeração convencional.	102
Figura 47 - Perfil de microdureza das peças retificadas com refrigeração por alta velocidade.....	103
Figura 48 - Microscopia óptica do corpo de prova retificado com refrigeração convencional.....	105
Figura 49 - Microscopia óptica do corpo de prova retificado com refrigeração por alta velocidade $V_f = 0,75$ mm/min.....	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades de alguns materiais abrasivos	43
Tabela 2 - Comparação dos parâmetros entre MO e MEV	57
Tabela 3 - Soluções usuais para o exame metalográfico em materiais ferrosos e aços.....	59
Tabela 4 - Comparação das variáveis de entrada entre diferentes tipos de refrigeração.....	63
Tabela 5 - Composição química do aço ABNT.....	64

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CBN	Nitreto de Boro Cúbico
CMC	Compósito de Matriz Cerâmica
CNC	Controle Numérico Computadorizado
EA	Emissão Acústica
L/min	Litros por minuto
LUA	Laboratório de Usinagem por Abrasão
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
mL	Mililitro
MO	Microscopia Óptica
MQL	Mínima Quantidade de Lubrificante
PCBN	Policristalino de Nitreto de Boro Cúbico
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
UNESP	Universidade Estadual Paulista

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

a	Profundidade de corte	[μm]
Al_2O_3	Óxido de alumínio	
C	Carbono	
$^{\circ}\text{C}$	Grau Celsius	
Cr	Cromo	
CuCl_2	Cloreto de cobre	
d_e	Diâmetro equivalente de corte	[mm]
d_s	Diâmetro externo do rebolo	[mm]
d_w	Diâmetro externo da peça	[mm]
EA	Emissão Acústica	[V]
F_n	Força normal de corte	[N]
F_t	Força tangencial de corte	[N]
H	Medida de resistência do material	
HCl	Ácido clorídrico	
h_{eq}	Espessura equivalente de corte	[μm]
HNO_3	Ácido nítrico	
HV	Dureza vickers	
KOH	Hidróxido de potássio	
H_2O	Água	
HRc	Dureza Rockwell (escala c)	
l_c	Comprimento de contato	[μm]
Mn	Manganês	
m/s	Metro por segundo	
mm	Milímetro	
mm/s	Milímetro por segundo	
Mo	Molibdênio	
MO	Microscopia Óptica	
MPa	Mega pascal	
Ni	Níquel	
n_s	Rotação do rebolo	[rpm]
n_w	Rotação da peça	[rpm]
P	Potência consumida	[W]
P máx.	Máximo de fósforo	
Q_w'	Taxa de remoção específica do material	[μm]
R_a	Rugosidade aritmética	[μm]
RPM	Rotações por minutos	
Si	Silício	
SiC	Carbeto de silício	
S máx.	Enxofre máximo	
u	Energia específica de retificação	[J/mm^3]
V	Volts	
V_f	Velocidade de mergulho	[mm/min]
V_s	Velocidade de corte	[m/s]
V_w	Velocidade periférica da peça	[m/s]
μm	Micrometro	

1 INTRODUÇÃO

Na retificação, a remoção do cavaco é realizada na superfície de contato entre a peça e uma ferramenta abrasiva denominada rebolo que atua em giros de alta velocidade, enquanto a peça gira em velocidade inferior. A retificação atribui à peça um melhor acabamento, além de melhoria na geometria e dimensões. No caso específico deste trabalho, a abordagem principal é com relação à retificação de peças com geometria interrompida e seus efeitos decorrentes, utilizando-se a aplicação do fluido de corte a elevadas velocidades; ou seja, a velocidade de saída do bocal é igual à velocidade de corte.

Alguns parâmetros de entrada devem ser estabelecidos para uma melhor eficiência nas operações de retificação, como as velocidades exercidas no processo, a escolha da ferramenta (rebolo) e o tipo de fluido de corte. Face a estas condições, várias pesquisas apontam para o uso de rebolos de nitreto de boro cúbico (CBN), dada as vantagens de suas propriedades como dureza, superando materiais como o óxido de alumínio e o carbetto de silício, porém inferior ao diamante.

De acordo com Alves (2005), o CBN trata-se de um material sintético, altamente resistente à temperatura devido a sua estabilidade sob pressão atmosférica, podendo chegar a até 2000°C.

Além disso, as partículas de CBN contribuem para uma maior dispersão de calor devido a alta condutividade térmica deste material, quando comparado com o óxido de alumínio, este com menor condutividade térmica, resultando em menores temperaturas na peça (WANG, 2008).

Ainda, segundo Alves (2005), outra característica do rebolo confeccionado de CBN é a possibilidade de trabalhar em altas velocidades de corte, permitindo a retirada de vários milímetros de material da peça por passe, o que confere a este tipo de rebolo a condição de operar com até o dobro da velocidade de corte dos rebolos convencionais.

Conforme Al-Zaharnah (2006), durante processo de corte descontínuo, a ferramenta, em alguns momentos, perde o contato com a peça e, neste instante, não ocorre a remoção de material da peça, possibilitando, segundo o autor, reduzir o efeito de vibração da ferramenta de corte.

Entende-se que o tempo de inatividade pode favorecer a redução de temperatura, pois Kountanya (2008) apontou que no processo de corte interrompido, a temperatura é inferior ao

corte contínuo, isto se justifica pelo fato de que, durante o corte interrompido, alternadamente, ocorrem os fenômenos de aquecimento (remoção do material) e resfriamento (sem remoção do material) e, desta forma, segundo o autor, o corte descontínuo contribui para a redução da temperatura devido aos períodos intercalados de resfriamento.

Embora os processos de corte interrompido sejam comumente utilizados em operações de usinagem como torneamento, existe uma carência na literatura de trabalhos sobre a retificação de peças com geometria interrompida. Desta forma torna-se fundamental uma pesquisa que possa contribuir para a avaliação dos choques mecânicos na interação entre o rebolo e a peça com geometria interrompida e seus efeitos nas variáveis de saída como circularidade, rugosidade, emissão acústica, microscopia ótica e desgaste diametral do rebolo.

1.1 OBJETIVO E JUSTIFICATIVA

1.1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos decorrentes da evolução gradativa dos choques mecânicos entre o rebolo de CBN e a peça durante o processo de retificação por meio de corte interrompido variando-se a quantidade de rasgos da peça, neste caso específico o aço ABNT 4340 temperado e revenido, variando-se também dois tipos diferentes de métodos de refrigeração, sendo o método convencional com o uso de 2 bocais padronizados e o método por alta velocidade por meio da aplicação do fluido de corte a elevadas velocidades; ou seja, a velocidade de saída do fluido do bocal é igual a velocidade de corte.

Assim, pôde-se verificar as condições resultantes do processo no que se refere aos parâmetros de desgaste do rebolo, erros de desvios de circularidade, rugosidade, emissão acústica, força de corte e integridade do material, indicando a ocorrência ou não de queima superficial do mesmo.

1.1.2 Justificativa

Embora o processo de retificação seja amplamente utilizado nas indústrias metal-mecânica, para operações de ajustes geométricos e qualidade no acabamento de peças, existe uma carência na literatura sobre pesquisas que tratam dos efeitos do processo de retificação por corte interrompido em função da retificação de peças com ranhuras. Conforme Pekelharing (1980), o processo de corte interrompido possui três características, sendo a entrada da ferramenta na peça, a saída da ferramenta e os carregamentos e descarregamentos cíclicos acompanhados por aquecimentos e arrefecimentos cíclicos, efeitos estes que podem provocar a redução da vida útil da ferramenta. Face a esta realidade, este trabalho se justifica pela oportunidade de se estudar os efeitos desencadeados em decorrência da retificação de peças com ranhuras, bem como pela oportunidade de se estudar melhores condições de usinagem para peças com este tipo de geometria, como por exemplo: engrenagens, cabeçotes de motores, virabrequins, contribuindo assim para a melhoria da produtividade durante as operações de retificação.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A seguir será apresentada a revisão de literatura tratando os fundamentos e conceitos principais relacionados às operações de retificação cilíndrica externa de mergulho, como o uso e desgaste de rebolo de CBN, as características da utilização de dois diferentes tipos de métodos de aplicação de fluido de corte, sendo convencional e por alta velocidade, dentre outros tópicos relacionados ao tema. Sobretudo, este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica, em especial, sobre a usinagem de peças com geometria interrompida e seus efeitos associados, considerando que este é o tema central do desenvolvimento deste trabalho.

2.1 O processo de retificação

De acordo com Saravanakumar et al. (2018), a retificação é um processo de fabricação utilizado para gerar um acabamento em superfícies planas. A retificação pode ser definida como um processo de usinagem de precisão, muito utilizado na fabricação de componentes que exigem tolerâncias finas, superfícies lisas e alta precisão geométrica para atender requisitos tecnológicos específicos (GUO e MALKIN, 2000; WINTER e HERRMANN, 2015).

Complementando, a retificação é uma condição tribológica que envolve contato, lubrificação e atrito, onde o conjunto peça-rebolo promove grande quantidade de calor na região de contato (GUIMARÃES et al., 2015).

Neste contexto, Silva (2015) apontou a necessidade da determinação dos parâmetros de entrada e saídas do processo de retificação, bem como a interação entre tais parâmetros. A Figura 1 apresenta as variáveis envolvidas no processo de retificação, bem como as relações entre elas.



Figura 1 - Parâmetros de entrada e variáveis de saída em processo de retificação.

Fonte: Adaptada de King e Hahn (1986), *apud* Souza (2009).

Devido às características deste processo de fabricação, durante a operação de retificação ocorre um atrito muito forte entre o rebolo e a peça.

Diante deste contexto, Mello et al. (2018) investigaram os efeitos decorrentes da retificação de peças com ranhuras, variando a velocidade de mergulho, onde concluíram que a geometria interrompida das peças influenciou no desgaste do rebolo, bem como nas variáveis de saídas de rugosidade e desvios de circularidade das peças retificadas.

Entretanto, segundo os autores, os resultados do experimento não evidenciaram ocorrências de danos térmicos nos corpos de prova. Provavelmente estes efeitos foram em decorrência da eficiência do sistema de refrigeração provocado pela própria geometria dos corpos de prova, pois, segundo Diniz e Oliveira (2008) as interrupções contribuem para reduzir a temperatura na área de contato, proporcionando um fluxo de ar através das ranhuras das peças.

E ainda, as ranhuras também contribuem para a captura e o transporte do fluido de corte para a área de contato, favorecendo a redução da temperatura na área de contato (KIRSCH E AURICH, 2014; LI E AXINTE, 2016).

2.1.1 Retificação cilíndrica externa de mergulho

Para facilitar o entendimento do presente trabalho, são apresentados alguns conceitos sobre o processo de retificação, bem como as equações que regem o processo e que são utilizadas na análise dos resultados.

De acordo com França (2009), o processo de retificação cilíndrica externa de mergulho está baseado na interação entre a profundidade de corte (a) correspondente com os parâmetros relacionados às dimensões da peça e da ferramenta, bem como com as velocidades e forças envolvidas durante o processo de retificação, sendo: o avanço da ferramenta, ou seja, o rebolo em direção a peça no tempo decorrido de uma volta da peça, a velocidade de corte (V_s) ou velocidade tangencial do rebolo, velocidade de mergulho (V_f), velocidade periférica da peça (V_w), diâmetro do rebolo (d_s), diâmetro da peça (d_w), força tangencial de corte (F_t), comprimento de contato (l_c) e força normal de corte (F_n). A correlação entre a interação destes parâmetros caracteriza a operação de retificação cilíndrica externa de mergulho.

A Figura 2 apresenta a interação dos parâmetros envolvidos na operação de retificação cilíndrica externa de mergulho.

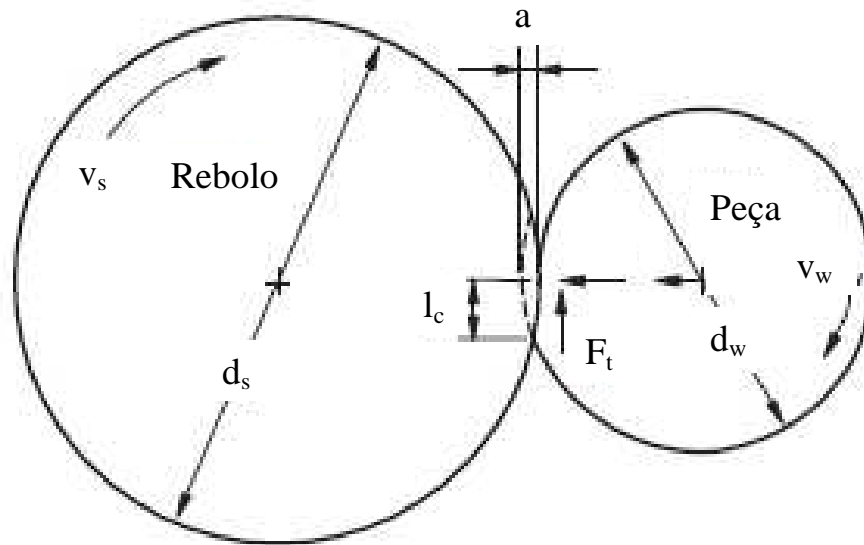


Figura 2 - Retificação cilíndrica externa de mergulho.

Fonte: Adaptada de Malkin e Guo (2008).

2.1.2 Parâmetros relacionados à operação de retificação

Durante a operação de retificação de peças, alguns parâmetros são observados e o estudo de seus efeitos possibilita compreender a eficiência dos resultados obtidos na interação entre as variáveis envolvidas e diferentes geometrias de peças.

2.1.2.1 Comportamento da profundidade de corte (a)

À medida que ocorre um aumento na profundidade de corte (a) o número de grãos ativos aumentam, fazendo com que cada grão abrasivo remova uma menor quantidade de material (BIANCHI et al., 1997).

Ainda, conforme Bianchi et al. (1997) com o aumento na profundidade de corte, os cavacos tendem a assumir um formato mais alongado e fino, provocando maior parcela de atrito e riscamento desde a formação do cavaco até a sua expulsão. Este efeito eleva a temperatura na área de contato com conseqüentes aumentos nos níveis de rugosidade da peça,

além da elevação dos níveis de emissão acústica e forças de corte, tanto a normal quanto a tangencial.

Damasceno (2010) realizou um trabalho de retificação do aço ABNT 4340 variando 3 diferentes profundidades de corte, sendo: 20 μm , 50 μm e 80 μm o que, segundo o autor, representam condições de acabamento, desbaste médio e desbaste mais severo. Também foram testados diferentes tipos métodos de lubri-refrigeração. O autor concluiu que os melhores resultados de rugosidade e desgaste diametral do rebolo foram obtidos por meio do método de refrigeração otimizado, já o método de refrigeração convencional apresentou resultados medianos em boa parte das variáveis de saída investigadas.

Já Liu et al. (2017) executaram ensaios de retificação com 4 diferentes níveis de aplicação de profundidade de corte sendo: 2 μm , 5 μm , 10 μm e 15 μm e verificaram níveis de rugosidade de 0,6 μm , 0,8 μm , 1,0 μm e 1,2 μm ; respectivamente.

De acordo com Rowe (2014), por meio da Equação 1 é possível dimensionar a profundidade de corte.

$$a = (\pi \cdot d_w \cdot V_f) / V_w \quad (1)$$

Onde:

a = profundidade de corte (μm)

d_w = diâmetro da peça (mm)

V_f = velocidade avanço (mm/min.)

V_w = velocidade da peça (mm/min.)

2.1.2.2 Velocidade de mergulho (V_f)

De acordo com Alves (2007), a velocidade de mergulho (V_f), também denominada de velocidade de avanço, interfere no acabamento da peça, pois, segundo o autor, a força tangencial de corte se eleva com o aumento da velocidade e avanço do rebolo. Com o aumento da velocidade de mergulho, diminui a qualidade da superfície retificada e o aumento

da rugosidade, bem como o da força de corte, decorre do aumento da espessura dos cavacos provocado pela elevação da taxa de retificação específica (SILVA,1999).

Colaborando, Ramanaiah et al. (2018), afirmam que a velocidade de avanço e a profundidade de corte são os parâmetros que exercem maior influência da deflexão e rugosidades das peças.

Na retificação de peças com geometria intermitente, Mello et al. (2018) evidenciaram aumento significativo nas variáveis de saída de elevação dos níveis de rugosidade, desvios de circularidade e desgaste do rebolo em decorrência da elevação da velocidade de mergulho.

Paknejad et al. (2017) investigaram os efeitos decorrentes do aumento da velocidade de mergulho em processo de retificação e evidenciaram maiores níveis de temperatura na medida em que aumentou a velocidade de mergulho. De acordo com os autores, com a redução da velocidade de mergulho o calor pode fluir para longe da zona de contato.

2.1.2.3 Velocidade de corte (V_s)

Alves (2007) descreveu que a velocidade de corte (V_s) ou velocidade periférica do rebolo pode ser observada por meio do deslocamento de um ponto na superfície de corte do rebolo em um certo espaço de tempo.

Diferentes velocidades de corte foram investigadas por Liu et al. (2017), onde pôde-se observar que com a retificação de peças a velocidade periférica do rebolo de 12,6 m/s, os níveis de rugosidade chegaram próximos de 1 μm . Já elevando a velocidade periférica do rebolo para 31,4 m/s os valores de rugosidade decresceram para valores próximos de 0,6 μm .

Conforme Graf (2004), *apud* Silva Neto (2012), a velocidade de corte pode ser definida por meio da Equação 2.

$$V_s = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60.1000} \quad (2)$$

Onde:

V_s = velocidade de corte (m/s)

d_s = diâmetro do rebolo (mm)

n_s = rotação do rebolo (RPM)

2.1.2.4 Velocidade periférica da peça (V_w)

Liu et al. (2017) observaram em ensaios de retificação que com o aumento da velocidade da peça, os níveis de rugosidade também se elevaram proporcionalmente.

Conforme Graf (2004), *apud* Biscioni (2010), A velocidade periférica da peça pode ser obtida por meio da Equação 3.

$$V_w = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_w}{60.1000} \quad (3)$$

Onde:

V_w = velocidade periférica da peça (m/s)

d_w = diâmetro da peça (mm)

n_w = rotação da peça (RPM)

2.1.2.5 Comprimento de contato (l_c)

O arco ou comprimento de contato (l_c) define a extensão do contato entre o rebolo e a peça durante o processo de retificação (ALVES, 2007).

Alves (2007) descreveu a Equação 4 para dimensionar o comprimento de contato.

$$l_c = (a \cdot d_e)^{1/2} \quad (4)$$

Onde:

l_c = comprimento de contato (mm)

a = profundidade de corte (mm)

d_e = diâmetro equivalente (mm)

2.1.2.6 Diâmetro equivalente (d_e)

Conforme Marinescu (2007) o diâmetro equivalente estabelece que a diferença de curvatura entre o rebolo e a peça interfere no comprimento de contato e, segundo o autor, pode ser obtido por meio da Equação 5.

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

Onde:

d_e = diâmetro equivalente (mm);

d_s = diâmetro do rebolo (mm);

d_w = diâmetro da peça (mm).

Com relação à simbologia \pm indicada na Equação 6, Silva (2015) esclareceu que o sinal “+” é utilizado para operações de retificação cilíndrica externa, enquanto que o sinal “_” é utilizado para operações de retificação interna.

2.1.2.7 Espessura de corte equivalente (h_{eq})

De acordo com Alves (2007), a espessura de corte equivalente pode ser obtida por meio da interação entre a taxa de remoção do material e a velocidade de corte, ou seja, velocidade do rebolo. A espessura equivalente do cavaco entre 0,5 e 10 micrometros, está associada a uma operação de retificação em alta velocidade (WANG, 2008).

A espessura equivalente de corte nas operações de retificação cilíndrica externa de mergulho pode ser obtida por meio da equação 6, descrita por Alves (2007).

$$h_{eq} = (\pi \cdot d_w \cdot V_f) / V_s \quad (6)$$

Onde:

h_{eq} = espessura equivalente de corte (μm)

V_s = velocidade de corte ou velocidade periférica do rebolo (m/s)

d_w = diâmetro da peça (mm)

V_f = velocidade de avanço (mm/min)

2.2 Variáveis envolvidas no processo de retificação

Algumas variáveis de saída estão diretamente relacionadas a operação de retificação cilíndrica externa de mergulho e devem ser avaliadas com o propósito de mensurar a eficiência do processo, bem como a qualidade da peça retificada. Dentre as variáveis de saída envolvidas destacam-se: (a) força tangencial de corte e energia específica de retificação (b)

desgaste diametral do rebolo (c) rugosidade (d) desvios de circularidade (e) emissão acústica (f) microscopia eletrônica de varredura e (g) microdureza.

2.2.1 Força tangencial de corte (F_t)

Para Silva (2015) pode-se entender a força tangencial de corte como uma resistência que o rebolo encontra para remover material da superfície da peça.

Liu et al. (2017) investigaram, com ensaios de retificação, os efeitos provocados com a interação de 16 combinações entre diferentes aplicações de força tangencial de corte (N), velocidade do rebolo (m/s), velocidade da peça (mm/s) e tamanhos de grão. Com base no estudo realizado, foi possível entender que fatores como o aumento do tamanho do grão durante a operação de retificação, a baixa velocidade do rebolo, e a elevação da velocidade da peça, tendem a aumentar a força tangencial de corte em operações de retificação.

É possível calcular a força tangencial de corte por meio da medição da potência de retificação, utilizando a equação 7 proposta por Marinescu (2007).

$$F_t = \frac{P}{V_s} \quad (7)$$

Onde:

F_t = Força tangencial (N)

P = Potência (W)

V_s = velocidade de corte (m/s)

Conforme Silva (2015), durante o corte, em decorrência da operação de retificação, o grão é impactado pela força tangencial (F_t), e também pela força normal (F_n), onde a intensidade destas forças estão relacionadas com a velocidade de corte (V_s) e também com o ângulo (α) de saída do grão em relação à superfície gerada. Na Figura 3, é possível observar a

interação das forças de retificação com o a área de contato do grão, no momento em que a peça é trabalhada.

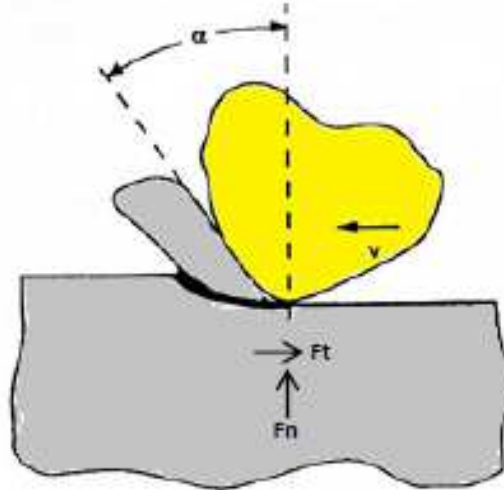


Figura 3 - Processo de corte para um grão abrasivo.

Fonte: Adaptado de Zhang (1993), *apud* Silva (2015).

Bianchi et al. (2006) ao estudarem a influência da dureza de discos abrasivos na eficiência do processo de corte a seco, constataram que o aumento da dureza da ferramenta de corte promoveu uma elevação da força tangencial de corte, bem como da relação G , devido a maior resistência ao desgaste da ferramenta favorecido pela união entre o grão e o ligante do compósito. A forma de um grão influencia na sua adesão ao ligante na sua capacidade abrasiva e na sua força mecânica (BAIDAKOVA e ORLOVA, 2017).

Brecher et al. (2015) apontaram que, em muitos casos, a força tangencial de corte possibilita obter conclusões à respeito das condições de desgaste da ferramenta.

Tais efeitos relacionados ao aumento da força tangencial de corte em processo de retificação puderam ser constatados nos resultados experimentais de He et al. (2015) onde observaram que o aumento da força tangencial de corte provocou maior calor de fricção na área de contato, o que aumentou o desgaste do rebolo e, os autores observaram também que tensão de compressão causada pelo atrito, acelerou o efeito de rachadura na ferramenta.

No trabalho de Catai (2004) foi possível observar que com o uso do sistema de refrigeração otimizado, ocorreu uma redução de 22% nas forças tangenciais de corte em comparação com o observado nas condições do processo de retificação com o uso do sistema de refrigeração convencional.

2.2.2 Rugosidade

De acordo com Marinescu (2007) a rugosidade (R_a) representa a média aritmética de todas as coordenadas de um perfil em uma linha média ao longo de uma trajetória de medição. A rugosidade da superfície é um requisito fundamental para a qualidade de muitos componentes industriais e também representa um parâmetro importante para descrever a usinabilidade de metais e ligas metálicas (D'ADDONA e RAYKAR, 2016).

E ainda, de acordo Chethan et al. (2018), a rugosidade representa um parâmetro significativo, pois pode influenciar na resistência à fadiga e na resistência ao atrito dos materiais usinados.

Na Figura 4 é possível observar o processo de medição de rugosidade média (R_a).

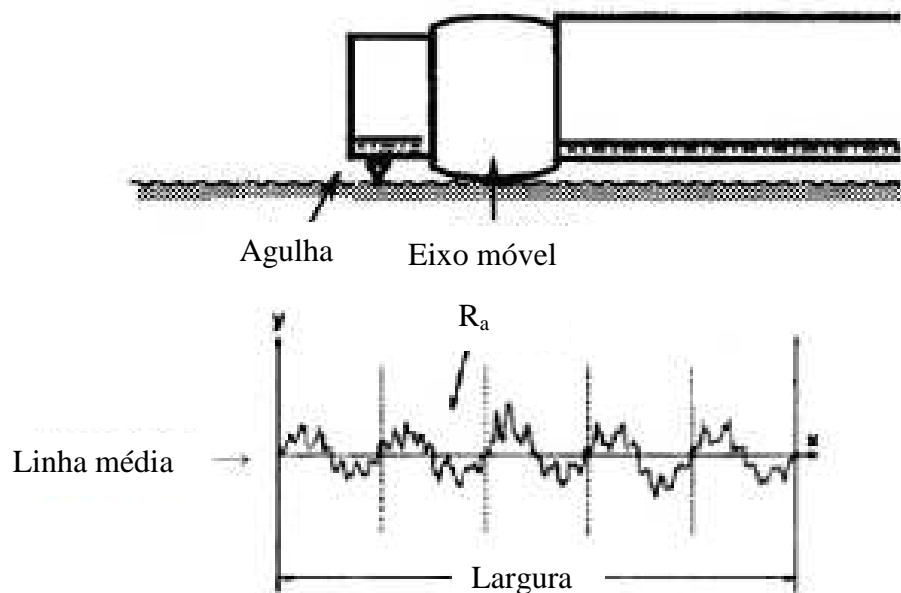


Figura 4 - Processo de medição da rugosidade média.

Fonte: Paula (2007).

Bianchi et al. (2001) estudaram os efeitos da rugosidade em ensaios de peças usinadas com diferentes tipos de rebolos, incluindo superabrasivo de CBN, variando a pressão e vazão do fluido de corte. Os resultados obtidos pelos autores apontaram que a aplicação do fluido de

corte com elevada pressão provocou um efeito de menor rugosidade nas peças ensaiadas, devido a condição de melhor lubrificação na área de corte. Os autores também puderam observar que o uso de rebolo superabrasivo de CBN, quando comparado ao uso de rebolo convencional, este também favoreceu melhores condições de rugosidade nas peças, devido ao fato de que este, por apresentar características de auto afiação dos grãos abrasivos, manteve o efeito de avivamento das arestas de corte e, por consequência, promoveu um melhor acabamento superficial ao reduzir o valor de rugosidade das peças ensaiadas.

Iceri et al. (2012) também estudaram os efeitos da rugosidade em operações de retificação e constataram que o material retificado com o sistema de refrigeração otimizado apresentou rugosidade de aproximadamente 0,2 μm inferior ao material usinado com o sistema de refrigeração convencional.

Ademais, os resultados dos ensaios de retificação de material com geometria interrompida realizados por Wang et al. (2017) apontaram que o calor gerado na área de contato elevou os níveis de rugosidade do corpo de prova, afetando a integridade superficial do material retificado.

Além do tipo sistema de lubri-refrigeração utilizado, outro fator que pode provocar elevação nos níveis de rugosidade no processo de retificação é o aumento da velocidade de mergulho.

Esta afirmativa pode ser comprovada com o estudo realizado por Tao et al. (2017) que, ao elevarem a velocidade de mergulho na retificação de um corpo de prova, constataram efeitos negativos de rugosidade na superfície das peças. Os autores concluíram que o aumento da taxa de avanço pode levar ao aumento de carga para cada grão abrasivo, provocando o seu desgaste, elevando assim a temperatura na área de contato com conseqüente comprometimento na qualidade superficial do material retificado.

Desta forma, segundo Kryukov e Kryukova (2017), entende-se que a integridade da estrutura dos grãos abrasivos permite manter o desempenho operacional necessário de rugosidade na superfície retificada, pois, de acordo com Saravanakumar (2018), a função do grão abrasivo é remover partículas microscópicas minúsculas para efeito de obtenção da mínima rugosidade superficial da peça retificada.

Neste sentido, Mello et al. (2018) investigaram, durante o processo de retificação de peças com geometria interrompida, os efeitos decorrentes do aumento da rugosidade em função da elevação da velocidade de mergulho, onde também constataram a relação entre o aumento da velocidade de mergulho e os níveis de acabamento superficial das peças

retificadas. De acordo com os autores, a geometria intermitente das peças provoca um choque mecânico na área de contato devido aos instantes de acoplamentos e desacoplamentos no conjunto peça-rebolo, provocando a fratura de grãos com conseqüente perda de argamassa, evidenciando, desta forma, a interação negativa entre a elevação da velocidade de mergulho com o aumento dos níveis rugosidade das peças com geometrias interrompidas, durante o processo de retificação.

2.2.3 Desgaste diametral do rebolo

Oikawa et al. (2011) comentaram que o desempenho e propriedades dos rebolos dependem de alguns fatores, tais como: material e tamanho do grão abrasivo, tipo do material aglomerante, da porosidade e também das propriedades do abrasivo.

Lima et al. (2013) apontaram que por meio da avaliação do desgaste diametral do rebolo é possível obter informações a respeito do desempenho do fluido de corte utilizado em operações de retificação. Tais efeitos foram observados por Oikawa et al. (2011) ao investigarem o desgaste do rebolo em operações de retificação variando dois diferentes tipos de aplicações de fluido refrigerante e três diferentes velocidades de avanço da ferramenta.

Da mesma forma, os resultados do processo de retificação obtidos no trabalho de Alves et al. (2010) mostraram que o sistema de refrigeração aplicado de forma otimizado, por meio de alta velocidade do jato, foi mais eficiente na redução do desgaste do rebolo, em relação à lubrificação por meio do sistema convencional.

Resultados semelhantes também foram descritos por Iceri et al. (2012) ao concluírem que o desgaste do rebolo com o uso do sistema de refrigeração convencional superou em 0,01 mm quando comparado com o desgaste da ferramenta submetida a retificação com o sistema de refrigeração otimizado, sob alta velocidade de aplicação do fluido.

2.2.4 Desvio de Circularidade

Alves (2005) descreveu que a circularidade é determinada por duas circunferências que tem o mesmo centro e raios diferentes, onde, conforme o autor, o centro dessas circunferências é representado por um ponto situado no eixo da peça. Para Te-Hsiu (2009), o erro de arredondamento pode ser compreendido como o espaço anular entre dois círculos concêntricos, que são o recurso de referência e círculo do recurso real.

De acordo com Malkin e Guo (2008) as vibrações da máquina-ferramenta influenciam na qualidade da peça retificada. Este efeito pôde ser observado por Rao e Wu (1981) ao realizar ensaios de retificação e constatar a influencia da vibração nos erros de circularidade das peças retificadas.

Complementando, Anjos et al. (2016) associaram o erro de circularidade com os possíveis danos térmicos ocorridos durante as operações, além da pressão e vazão do fluido de corte utilizado.

Desta forma, para efeito de ilustração, a Figura 5 reproduz a relação entre o comportamento gráfico dos sinais de aquisição de dados referentes a vibração de máquina com o perfil de circularidade da peça trabalhada.

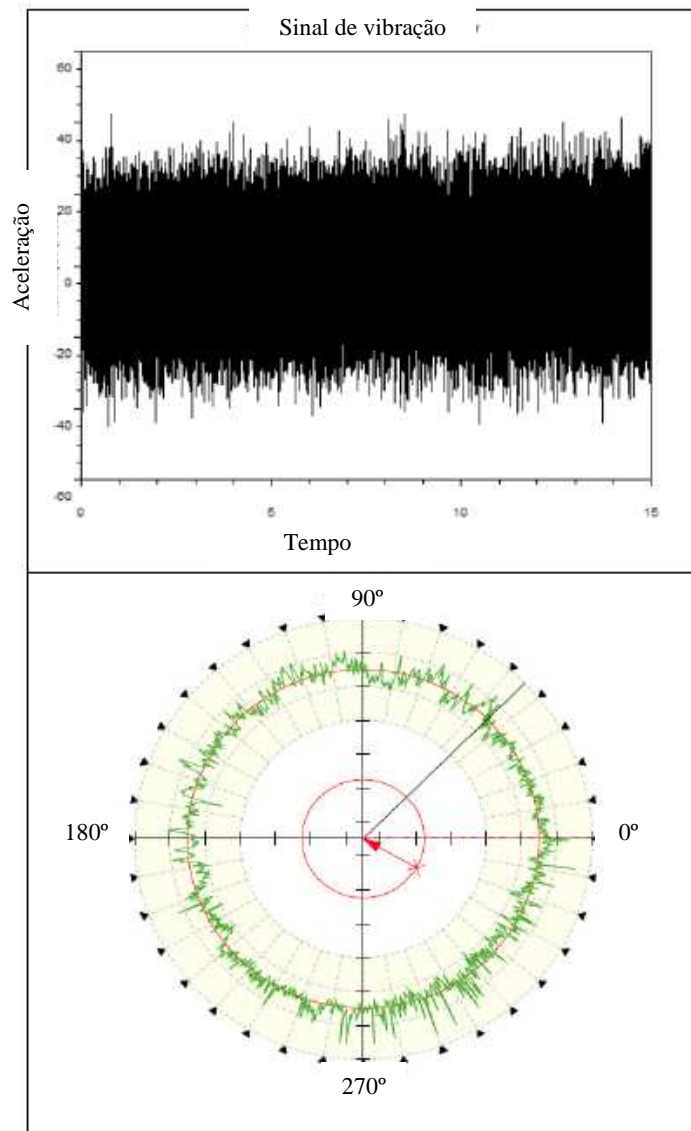


Figura 5 - Sinal de vibração e imagem do perfil de circularidade.

Fonte: Ventura (2008).

França (2005) apontou também desbalanceamento do rebolo como uma das causas para o desvio de circularidade de peças retificadas, efeito este provocado por uma massa ou concentração de massa que não é simetricamente distribuída em relação ao eixo de rotação do rebolo. Conforme o autor, o desbalanceamento de massa do rebolo tende a atritar a peça alternadamente, afetando o perfil geométrico da peça (Figura 6).

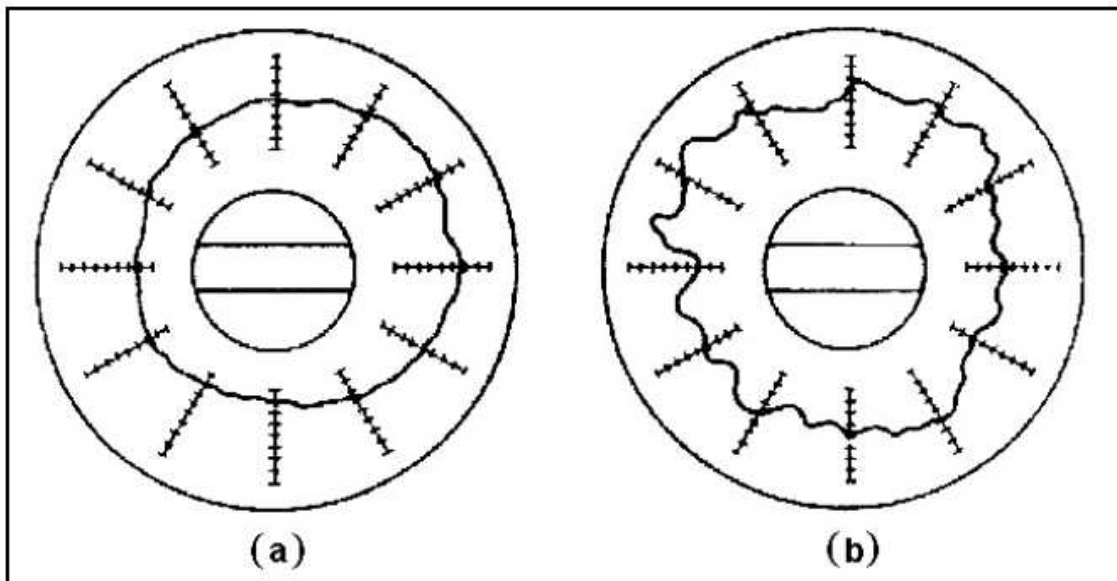


Figura 6 - Características do rebolo.

Legenda: (a) peça retificada com rebolo balanceado (b) peça retificada com rebolo desbalanceado.

Fonte: França (2005).

Alves et al. (2010) estudaram os efeitos dos desvios de circularidade em operação de retificação utilizando 3 diferentes sistemas de aplicação de fluido de corte, sendo convencional, MQL e otimizado, sob diferentes velocidades de aplicação do fluido de corte. Especificamente no sistema otimizado, o fluido de corte foi aplicado em velocidades que variaram de 15 m/s até 30 m/s. Os autores concluíram que o fluido de corte aplicado à velocidade de 30 m/s resultou em menores desvios de circularidade nas peças ensaiadas.

Já Rowe (2014) investigou os benefícios de aumentar a velocidade do rebolo em operação de retificação e observou melhores resultados de níveis de circularidade em peças retificadas com velocidade de 60 m/s em comparação com os resultados alcançados com velocidade de 30 m/s.

2.2.5 Monitoramento de sinais: emissão acústica, potência e vibração

Ilio et al. (2018) ressaltaram a importância do uso de sistema de monitoramento durante o processo de retificação, a fim de prever a ocorrência de falhas seja na operação de usinagem ou na máquina operatriz. Então, durante a realização dos ensaios experimentais deste trabalho, foram monitorados os níveis de sinais de emissão acústica, potência de máquina e vibração.

Conforme Wang (2008) a emissão acústica (EA) pode ser entendida como o movimento de ondas transientes de tensão geradas pela repentina liberação de energia de deformação, ou até mesmo pela própria energia decorrente do atrito provocado durante a operação de retificação. A emissão acústica está relacionada com a emissão de ondas de tensão elástica resultantes da deformação e fratura dos materiais (HASE et al, 2008).

Os sinais de emissão acústica dos ensaios experimentais de Webster et al. (1994), permitiram observar a existência de uma correlação entre a força normal e a condição de queima da peça trabalhada. Os sinais de emissão acústica gerados durante o processo de retificação refletem diretamente com o fluxo e as deformações ocorridas na peça trabalhada (JAYAKUMAR et al., 2005).

Já Bhuiyan et al. (2016), observaram em seus ensaios experimentais que amplitude do sinal de emissão acústica aumentou com desgaste da ferramenta e com o aumento da profundidade de corte, ou seja, com o aumento da taxa de remoção do material.

Os resultados experimentais de Dias et al. (2016) apontaram que os sinais de emissão acústica proporcionaram um diagnóstico durante o processo de retificação, não somente para a velocidade de corte quanto mas também para o desgaste do rebolo.

A Figura 7 ilustra as diversas fontes de emissão acústica em retificação.

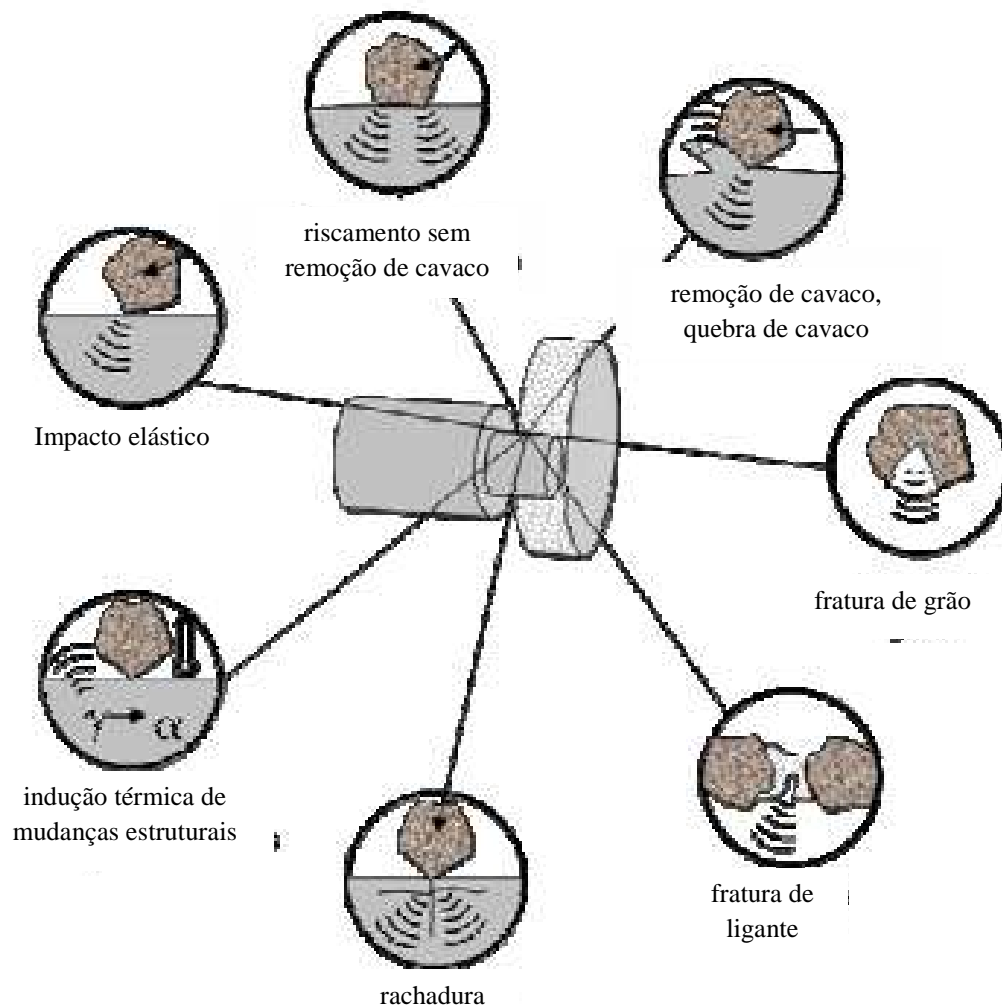


Figura 7 - Diversas fontes de emissão acústica em retificação.

Fonte: Karpuschewiski (2001) *apud* Wang (2008).

Com relação à potência de máquina exigida durante o processo de retificação, o trabalho de França (2009) demonstrou que quanto maior foi a velocidade de avanço, o que aumentou a taxa específica de remoção do material, maiores foram os níveis de potência consumida durante os ensaios de retificação. Desta forma, o autor observou uma tendência entre o aumento da taxa específica de remoção do material com as elevações da rugosidade e desvios de circularidade no processo de retificação.

De forma similar aos efeitos ocorridos com a potência de máquina, no trabalho de França (2009) é possível observar que a aceleração gradativa da vibração durante o processo

de retificação provocou uma tendência quase que linear de elevação dos níveis de rugosidade e desvios de circularidade dos corpos de prova.

Conceição Junior (2016) realizou um trabalho usando o monitoramento de sinais em processo de retificação onde pode constatar uma correlação entre a vibração e a integridade do corpo de prova, o que possibilitou observar que a rugosidade se eleva na mesma proporção que ocorre o aumento da vibração da máquina.

2.3 Mecanismos de formação do cavaco em retificação

De acordo com Malkin (1989), durante o processo de retificação, ocorre o contato do rebolo com a superfície da peça, com base nas condições físicas estabelecidas, formando desta forma, o cavaco por cisalhamento. Durante este processo, 3 diferentes fases são observadas, sendo: deformação elástica, deformação elástica/ plástica e deformação elástica/plástica, com formação de cavaco, nos estágios 1, 2 e 3; respectivamente.

De acordo com Nguyen e Butler (2005), existem dois fatores que exercem grande influência no processo de retificação, sendo a ferramenta de corte e a formação do cavaco.

De acordo com Klocke (2009) *apud* Oliveira (2011), a Figura 8 apresenta a dinâmica do mecanismo de formação de cavaco, onde, segundo o autor:

- ✓ Região I – ocorre apenas deformação elástica e atrito entre o grão abrasivo e a peça;
- ✓ Região II – ocorrem deformações: elástica e plástica e atrito entre o grão abrasivo e a peça;
- ✓ Região III – ocorrem deformações: elástica e plástica, o atrito entre grão abrasivo e peça e o sulcamento associado à formação de cavacos, nesta região é atingida a espessura de corte, contudo devido às deformações elásticas a espessura efetiva é ligeiramente menor.

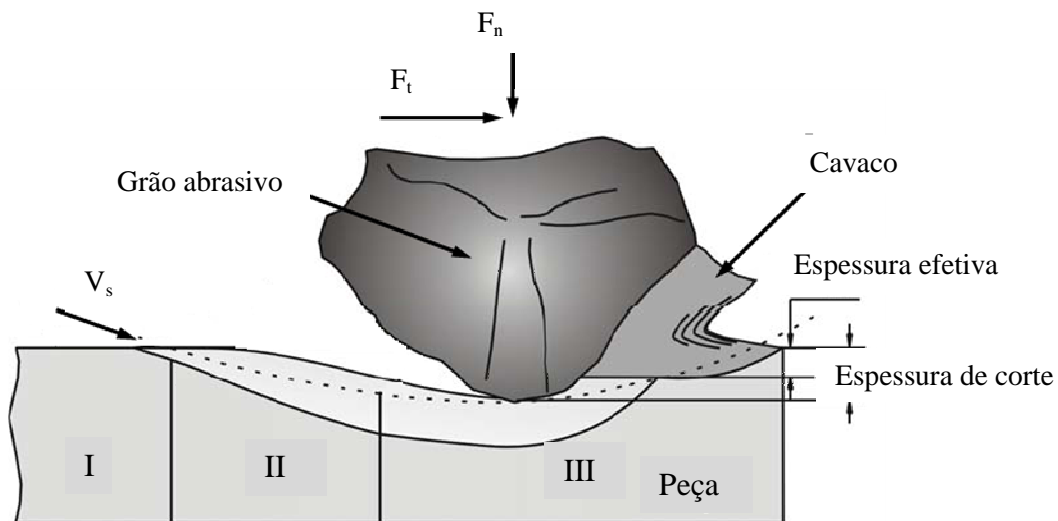


Figura 8 - Formação do cavaco por um grão abrasivo.

Fonte: Klocke (2009), *apud* Oliveira (2011).

De acordo com Anjos (2015) em processos de retificação com pequena profundidade de corte o grão irá deslizar na superfície, provocando apenas deformações elásticas, sem remoção do material.

Desta forma, entende-se que quando a profundidade de corte é muito baixa, o grão abrasivo não penetra no material da peça, mas apenas desliza sobre a sua superfície, provocando o efeito da deformação elástica no material da peça. Contudo, neste estágio, não ocorre ainda a remoção do material. Entretanto, na fase de deformação plástica a mudança do material torna-se permanente, provocando o escoamento do material, seguido da ação de cisalhamento e formação do cavaco.

2.4 Aspectos relacionados aos danos térmicos

De acordo com Oliveira (2011), a integridade superficial de uma peça retificada pode ser comprometida devido a zona termicamente afetada durante o corte, onde ocorre uma alta quantidade de energia concentrada na área de contato, podendo ocasionar efeitos negativos como nucleação e propagação de trincas.

Para Bianchi et al. (2000) a queima inicial da superfície da peça tende a promover o crescimento da adesão de partículas metálicas aos grãos abrasivos do rebolo, promovendo o aumento das forças de retificação, além de poder comprometer a geometria diametral do rebolo.

Ainda, de acordo com Malkin e Guo (2008), para efeito de entendimento da elevação de temperatura na zona de retificação, considere que a energia desprendida é dissipada ao longo do arco de contato (l_c) e a taxa de remoção (q_w) ocorre onde o fluxo de calor é distribuído uniformemente através da área de retificação. Na Figura 9 é possível observar este fenômeno.

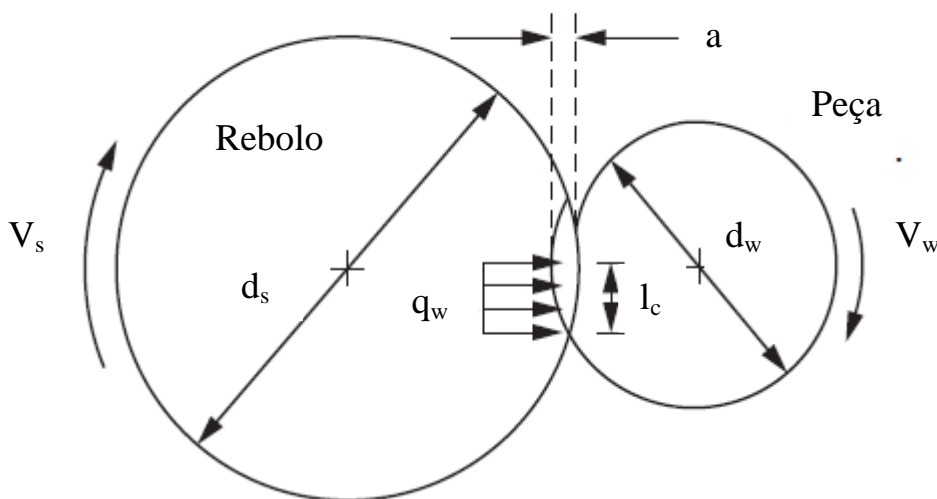


Figura 9 - Aspecto da elevação de temperatura em retificação cilíndrica externa de mergulho. Fonte: Adaptado de Malkin e Guo (2008).

Alves et al. (2008) analisaram por meio de exame de micrografia a incidência de danos térmicos em 30 corpos de prova retificados com rebolo de CBN utilizando o método de refrigeração otimizado em diferentes velocidades de mergulho, na faixa entre 0,25 e 2,00 mm/min. Os autores concluíram que para todas as velocidades de mergulho aplicadas, entre a faixa estabelecida, não ocorreram evidências de danos térmicos, trincas, microtrincas e mudanças de fases. Durante a operação de retificação, tanto as forças envolvidas, quanto a temperatura devem ser controladas para manter a usinagem estável e precisa (SHNEOR, 2018).

2.5 Definição de rebolo

Conforme Malkin e Guo (2008), o rebolo é uma ferramenta utilizada na operação de retificação de peças e são fabricados por meio de diversos tipos de grãos abrasivos e de diversos tamanhos, aglomerados por ligantes, fabricados nas categorias de rebolos “abrasivos convencionais” como, por exemplo, os produzidos com uso de óxido de alumínio ou os denominados de rebolos “superabrasivos”, estes produzidos com nitreto de boro cúbico. O rebolo é composto de grãos abrasivos, material ligante e poros (CAI e ROWE, 2004).

2.5.1 Rebolo de nitreto de boro cúbico (CBN)

Conforme Wang (2008), A empresa *General Electric* foi a pioneira na utilização de rebolos CBN no Brasil no final do ano de 1968. De acordo com Salmon (1992), *apud* Wang (2008), o grão de CBN apresenta uma coloração preta, sendo produzido por meio de um processo de sinterização sob alta temperatura (1650 °C) e elevada pressão (68.000 bar), mediante a estas condições de processo e por meio do uso de catalisador, a estrutura torna-se cristalina, assemelhando-se à estrutura do diamante. A resistência térmica do CBN é maior que à do diamante, permitindo que este composto trabalhe até 1900 °C (DESTRO et al., 2010).

O CBN apresenta várias vantagens em relação aos abrasivos convencionais. Dentre estas vantagens, destaca-se a dureza do CBN que supera outros materiais como o alumínio e o silício, sendo inferior na dureza somente para o diamante, conforme pode ser observado na Figura 10.

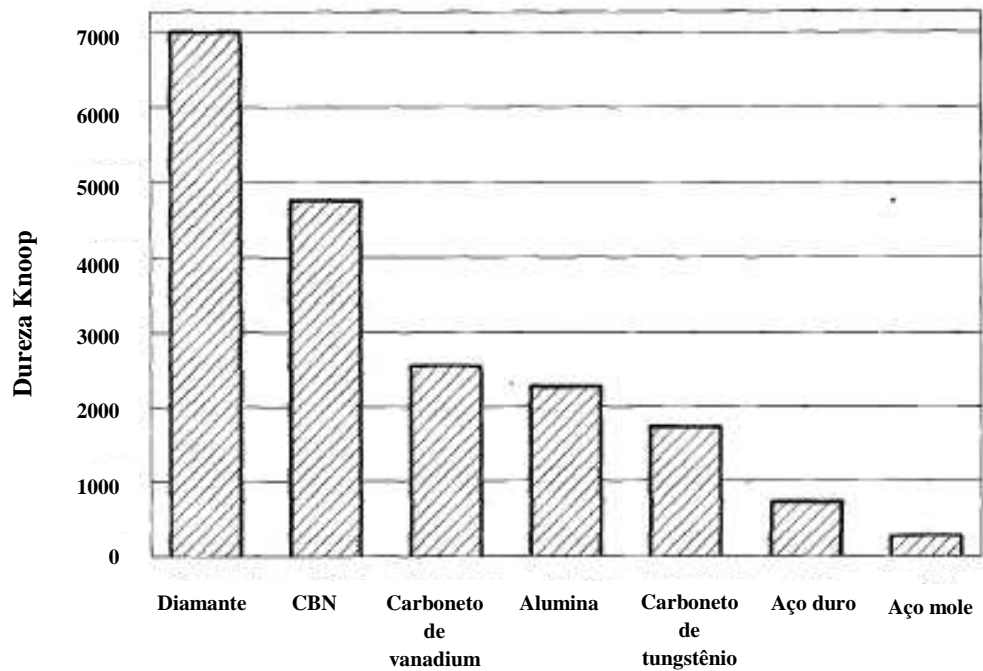


Figura 10 - Relação de dureza Knoop para alguns materiais.

Fonte: Glenn (1989) *apud* Basto (1999).

Para Jackson e Mills (2000), a evolução dos materiais de CBN está voltada para a produção de cristais de CBN com diversas morfologias. Na Tabela 1 é possível observar as propriedades de alguns materiais abrasivos comparados ao CBN.

Tabela 1 - Propriedades de alguns materiais abrasivos

	Óxido de Alumínio (Al₂O₃)	Carbeto de Silício (SiC)	Nitreto de Boro Cúbico (CBN)	Diamante (C)
Estrutura Cristalina	Hexagonal	Hexagonal	Cúbica	Cúbica
Densidade (g/mm ³)	3.98	3.22	3.48	3.52
Ponto de Fusão	~2040°C	~2830	~3700°C à 13 kbar (ponto triplo)	~3700°C à 130 kbar (ponto triplo)
Dureza Knoop (kg/mm ²)	2100	2400	4700	8000

Fonte: Malkin e Guo (2008), adaptado.

Para Kuffa et al. (2017), o rebolo de CBN apresenta vantagens significativas no que se refere às operações de retificação de alta eficiência. Os autores apontam que propriedades e características como a composição química do rebolo de CBN somada a sua alta estabilidade térmica e baixa taxa de desgaste o colocam como adequado para a retificação de materiais duros que seriam difíceis de usar com rebolos convencionais.

Bianchi et al. (2011) realizaram um estudo para avaliar os efeitos da agressividade superficial durante a retificação com rebolos de óxido de alumínio e CBN com ligantes de resínóide e vitrificado. Os autores concluíram que não houve diferença estatística significativa nos resultados de agressividade obtidos nos rebolos superabrasivos de CBN, o mesmo não ocorreu com o rebolo convencional que mostrou diferenças estatísticas significativas em relação ao valor de agressividade superficial.

Schuitek et al. (2001) constataram, em pesquisa realizada, ganhos expressivos em qualidade e produtividade na substituição de rebolos com abrasivos convencionais por rebolos de CBN. Tais incrementos em produtividade relacionam-se com aumento dos intervalos da necessidade de dressagens, com conseqüente redução dos tempos gastos com dressagens e com trocas de rebolos. Segundo os autores, este fato representou uma melhoria da produtividade de aproximadamente 25%.

2.5.1.1 Mecanismo de desgaste do rebolo de CBN

Ding et al. (2015) investigaram as causas de fratura de grãos em rebolos de CBN e concluíram que as tensões residuais induzidas por brasagem na área de junção do grão promovem o desgaste de macro-fratura do grão, enquanto que as tensões induzidas pelo contato na região do vértice do grão ocasionam o efeito da micro-fratura. A micro-fratura promove uma elevada concentração de abrasivo na superfície do rebolo, favorecendo o prolongamento da vida do mesmo; já a macro-fratura, como contém baixa concentração de grãos na superfície do rebolo, abrevia a vida do rebolo, porém gera menores forças de retificação (SILVA, 2004).

De acordo com Alves (2007), existem 3 mecanismos de desgaste do rebolo, sendo: desgaste por atrito, fratura dos grãos abrasivos e fratura do aglomerante. A Figura 11 apresenta os mecanismos de desgaste do rebolo supracitados.

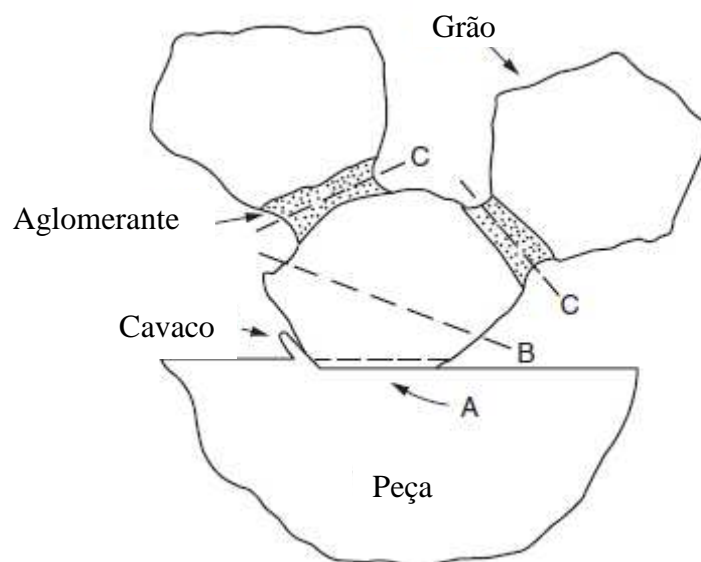


Figura 11 - Mecanismos de desgaste do rebolo.

Legenda: A - desgaste por atrito, B - fratura do grão abrasivo e C - fratura do aglomerante devido ao desgaste

Fonte: Malkin e Guo (2008).

De acordo com Malkin e Guo (2008), tanto o desgaste do rebolo por atrito, quanto a fratura do grão abrasivo, ambos os efeitos podem levar a auto-afiação do rebolo. Segundo o autor, a fratura do ligante provocará a redução da força de adesão com conseqüente desalojamento de grãos.

Complementando, Boaron e Weingaertner (2018) comentaram que, durante o processo de retificação, o desgaste do grão aumenta gradativamente com o tempo em função dos parâmetros de retificação, como por exemplo, a taxa específica de remoção do material.

Yu et al. (2017) realizaram uma pesquisa de retificação com o uso de rebolo de CBN e verificaram que durante a execução do processo os grãos maiores são eliminados rapidamente, desencadeando uma redistribuição de carga nos grãos vizinhos.

2.6 Dressagem

Conforme Malkin e Guo (2008), a dressagem consiste em processo de condicionamento da superfície do rebolo, de forma a contribuir para o processo de retificação. Entretanto, os rebolos superabrasivos de CBN possuem elevada capacidade de autoafiação, conseqüentemente, poderia ser realizada a remoção de maiores volumes de material sem a necessidade de tal operação (BIANCHI et al., 2011).

O processo de recuperação de rebolos por meio do procedimento da dressagem aponta para vários propósitos que, segundo Souza (2009) consistem em: obtenção de concentricidade da face de trabalho do rebolo com o eixo de rotação, perfilamento da face de trabalho do rebolo para uma operação de forma e arrancamento dos grãos abrasivos gastos para melhorar a agressividade da face de trabalho do rebolo. Como a topografia do rebolo muda continuamente, devido ao desgaste na operação de retificação, esta condição provoca efeitos diretos nos resultados obtidos (BOARON e WEINGAERTNER, 2018).

Alguns efeitos são considerados nas operações de dressagem. Oliveira et al. (1992) descreveram o microefeito como sendo aquele causado pela fratura das partículas dos abrasivos no momento em que novas arestas de corte surgem durante a operação de dressagem.

Conforme Leme (1999) o microefeito é provocado pela fratura do grão, efeito este, devido a formação de novos gumes que são gerados pelo dressador. Ainda, segundo o autor, a afiação destes novos gumes tem uma ligação direta com a fragilidade do grão.

2.6.1 Dressador conglomerado

Silva Neto (2012) destacou que o uso do dressador conglomerado apresenta a vantagem de que a velocidade da mesa não exerce influencia nos parâmetros de dressagem, o que facilita obter parâmetros de dressagem mais constantes. Esta vantagem não é obtida, por exemplo, com dressadores de ponta única.

Já Gonçalves Neto (2008), ressaltou que o dressador conglomerado, pelo fato de apresentar largura de dressagem maior em comparação aos dressadores de ponta única, possibilita maiores avanços durante as operações de dressagem de rebolos.

Castro et al. (2016) fizeram uso do dressador conglomerado em seu trabalho e constataram que este tipo de dressador gerou apenas microefeito de dressagem, ocasionando a fratura dos grãos abrasivos, gerando novas arestas de corte no rebolo. Ainda segundo os autores, o uso do dressador conglomerado não gerou macroefeito correspondente a rosca que seria gerada no rebolo, efeito este que poderia ter ocorrido por meio do uso de dressador de ponta única.

2.7 Fluido de Corte

Alves (2005) destacou a relevância do uso do fluido de corte e apontou que a falta de eficiência durante a lubrificação, bem como uma refrigeração ruim da interface rebolo-peça, tende a aumentar o número de afiações da ferramenta (perfilamento ou dressagem) e, como consequência, tem-se um maior desgaste do rebolo.

De acordo com Malkin e Guo (2008), durante o processo de retificação, o fluido de corte é utilizado para dois propósitos principais, sendo a lubrificação e a refrigeração na área de contato. Ainda, segundo os autores, a aplicação do fluido de corte contribui para preservar

a superfície do rebolo e reduzir o atrito, possibilitando assim resultados mais eficientes com menor consumo do grão abrasivo. Para Sanchez et al. (2012) é possível manter o desgaste da ferramenta sob controle por meio do uso da lubrificação e remoção do calor da zona de contato. Entretanto, cada tipo básico de fluido de corte apresenta característica, vantagens e limitações distintas (GONÇALVES NETO, 2008).

Diniz e Oliveira (2008) descreveram razões pelas quais a temperatura tende a ser reduzida em operações de usinagem de peças com geometria interrompida, onde, segundo os autores, (a) as ranhuras impedem a propagação de calor através da peça e (b) a rotação da peça promove um fluxo de ar através da superfície interrompida, favorecendo redução de temperatura tanto da ferramenta quanto na peça.

Kirsch e Aurich (2014) pesquisaram os efeitos da refrigeração no ensaio de retificação com diferentes tipos de topografias de rebolos, sendo: um com camada contínua e corpo inalterado, o segundo com camada segmentada e o terceiro composta por camada com 70 ranhuras. O objetivo dos autores foi o de investigar qual dos três tipos rebolos ensaiados poderia conduzir melhor fluxo de refrigerante na zona de contato. Os resultados experimentais deram conta que o líquido refrigerante foi capturado dentro das ranhuras do rebolo e tenderam a não escapar, o que pode favorecer a refrigeração em operação de retificação.

Li e Axinte (2016) analisaram diferentes texturas de geometrias interrompidas de rebolos (Figura 12) e seus efeitos associados à refrigeração na operação de retificação.

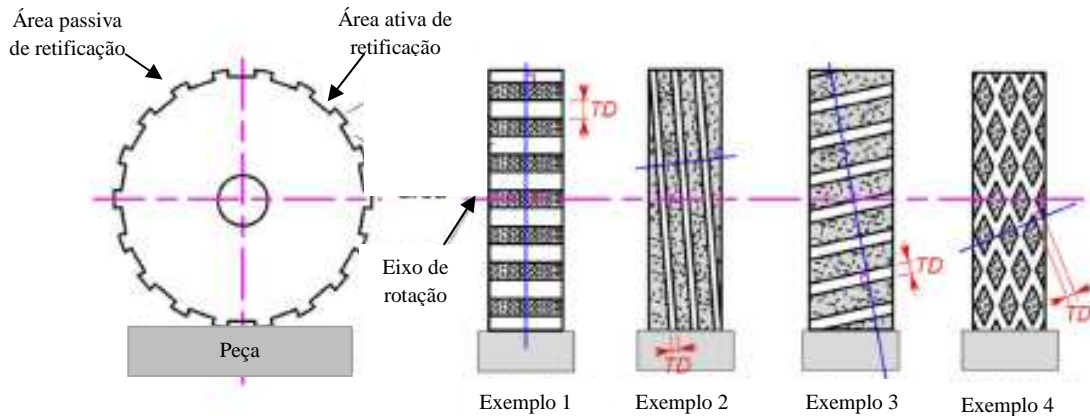


Figura 12 - Esquema de possíveis projetos de textura de rebolos

Fonte: Li e Axinte, (2016), adaptado.

Segundo os autores, a área ativa executa o processo de retificação da peça de modo intermitente, enquanto que a função da área passiva, durante o processo de retificação, é servir como um reservatório para o transporte do fluido para a zona de contato, favorecendo a eliminação do cavaco e, conseqüentemente, a melhoria da qualidade da peça usinada.

Desta forma entende-se que, durante o movimento de rotação da peça na operação de retificação, é possível que as ranhuras da geometria descontínua da peça também contribuam para a penetração e deslizamento do fluido de corte na área de contato, colaborando para a refrigeração e redução de temperatura durante a operação de retificação.

2.7.1 Sistema de refrigeração convencional

De acordo com Moussa et al. (2016), a análise de transferência de calor é fundamental para a previsão da temperatura em retificação, onde os parâmetros devem ser ajustados a fim de evitar danos térmicos a peça. Entretanto, a integridade superficial da peça não é influenciada somente pelos parâmetros escolhidos, mas também depende do fluxo de líquido de arrefecimento, onde em operação de retificação, este fluxo é dimensionado pelos bicos utilizados e seus parâmetros (KIRSCH e AURICH, 2014).

No caso específico de retificação com superabrasivos, Basto (1999) apontou a necessidade eficaz do fluido de corte, devido a altas taxas de remoção de material e necessidade de limpeza adequada dos poros do rebolo o que requer maiores pressões e velocidades de saída do jato pelos bocais de aplicação do fluido de corte, o que favorece a redução de calor na zona de corte.

2.7.2 Sistema de refrigeração com alta velocidade

Quando se trata de operação de retificação de peças, deve-se considerar as altas temperaturas inerentes ao processo. A zona de corte está sujeita a gradientes de temperatura a alta resistência mecânica (AYED et al., 2016).

Neste sentido, tendo em vista a necessidade de manter a temperatura em condições adequadas para a retificação de peças, o uso do fluido de corte é comumente utilizado. Entretanto, muito se tem discutido a respeito das vantagens para a otimização do uso do fluido de corte e uso da refrigeração por meio da alta velocidade do jato.

Iceri et al. (2012) descreveram que o uso otimizado do sistema de refrigeração está relacionado com aplicação do fluido de corte sob alta velocidade, com o jato localmente direcionado onde, de acordo com Destro et al. (2010), neste tipo de sistema de refrigeração, o fluido de corte é aplicado a uma velocidade semelhante à velocidade periférica do rebolo.

Neste sentido, Webster et al. (1994) desenvolveram um tipo de bocal otimizado que, devido ao seu alto nível de eficiência, tem sido utilizado com bastante frequência nos últimos anos em uma variedade de situações (OLIVEIRA, 2011).

A Figura 13 ilustra o formato do bocal de Webster.

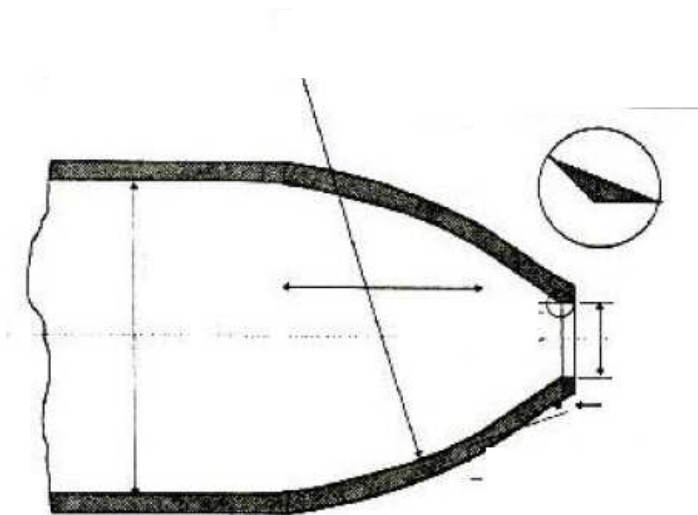


Figura 13 - Formato do bocal de Webster.

Fonte: Webster (1995) *apud* Bianchi et al.(2001)

Alguns pesquisadores estudaram os efeitos do uso da aplicação otimizada do fluido de corte em operação de retificação com diferentes espessuras no bico de saída do bocal.

Este é o caso de Monici et al. (2006) que reportaram em seu trabalho o uso de bicos arredondados de 5, 4 e 3 mm de diâmetro com aplicação do fluido sob alta pressão em retificação. Com o propósito de analisar a eficiência do processo do uso do bocal constrito, os autores realizaram os ensaios com a combinação de dois diferentes tipos de fluido de corte, sendo um com emulsão sintética de 5% e o outro com óleo puro e também utilizaram duas ferramentas abrasivas distintos sendo, um rebolo de óxido de alumínio e um rebolo superabrasivo de CBN. Com base no estudo realizado os autores concluíram que os resultados do uso de sistema de aplicação do fluido de forma otimizada foram superiores ao sistema de lubrificação convencional. Segundo os autores:

“Quanto maior a pressão do fluido de corte, maior é a possibilidade de alcançar bons valores de variáveis de saída, tais como: força tangencial de corte, energia específica, emissão acústica, rugosidade da superfície, tensão residual e desgaste da ferramenta”.

Debnath et al. (2016) utilizaram o fluido de corte com alta velocidade e constataram que este método promoveu uma redução de rugosidade na superfície das peças ensaiadas. Dahlman e Escursell (2004) também comprovaram melhores resultados na qualidade

superficial das peças ensaiadas com uso da refrigeração por meio do sistema otimizado de aplicação do fluido de corte.

Catai (2004) pesquisou os efeitos da variação de diferentes velocidades de aplicação do fluido de corte com o uso do sistema otimizado, com bocal arredondado, em operações de retificação, sendo: 30 m/s, 24 m/s, 18 m/s, e 12 m/s; onde foi possível observar que com velocidades de 30 m/s e 24 m/s foram evidenciados menores níveis de aquisição de emissão acústica detectados durante o processo de retificação, efeito este, segundo o autor, devido a inserção do fluido sob altas velocidades o que favoreceu a retirada do cavaco.

2.8 Usinagem com geometria interrompida

De acordo com Diniz et al. (2005), o torneamento de peças fabricadas com aços endurecidos, apresenta algumas limitações em função da fragilidade das ferramentas comumente utilizadas, as quais apresentam pouca resistência aos impactos provocados durante a usinagem, devido à geometria interrompida de um grande número de peças. Isto tem instigado os pesquisadores a investirem em estudos voltados para o aperfeiçoamento das ferramentas de forma a torná-las mais adequadas e resistentes para as operações de usinagem de peças segmentadas.

Este é o caso do trabalho desenvolvido por Oliveira et al. (2009) que verificaram os efeitos da usinagem do aço 4340 com geometria interrompida (4 e 8 ranhuras) utilizando dois tipos diferentes de ferramentas, sendo uma composta por nitreto de boro cúbico policristalino (PCBN) e a outra por cerâmica. Dentre outros itens, os autores concluíram que a rugosidade das peças usinadas com a ferramenta de cerâmica foi maior em relação às peças usinadas com PCBN efeito este, segundo os autores, provocado pelo maior desgaste na ponta de ferramenta de cerâmica, o que dificulta o uso deste tipo de material para a usinagem de aço temperado.

Resultados semelhantes foram relatados por Godoy e Diniz (2011) ao compararem os níveis de rugosidade de peças com geometria interrompida usinadas com ferramenta de CBN e ferramenta de cerâmica. Os autores concluíram que a ferramenta de CBN é adequada para o uso em operação de usinagem por corte interrompido.

2.8.1 Retificação de peças com corte interrompido

Conforme Pérez et al. (2008), um grande problema na operação de retificação é conseguir controlar o calor que é transferido para a peça, onde parte da energia desprendida durante a retificação é transformada em calor e transmitida para a peça, provocando danos térmicos, como por exemplo, deformações no material retificado.

Embora o controle de temperatura represente um parâmetro importante na operação de retificação, a literatura sobre temperatura transitória no corte interrompido de metal ainda é escassa em comparação com outras áreas de pesquisa em usinagem, mas, o que se sabe é que a forma do desgaste da ferramenta em cortes contínuos é diferente do corte interrompido (KOUNTANYA, 2008).

De acordo com Ventura et al. (2015), os aços endurecidos com superfícies interrompidas apresentam algumas limitações, devido ao fato de que, geralmente, as ferramentas usadas apresentam baixa tolerância contra as cargas típicas de corte interrompido.

Na busca da investigação deste problema, várias pesquisas despontam demonstrando possibilidades de aperfeiçoamento das ferramentas para uso em usinagem com geometria interrompida, o que pode favorecer a redução de danos térmicos, bem como a redução do consumo de energia, otimização do uso da ferramenta e melhoria no acabamento da peça. A intensidade elevada de energia na operação de retificação provoca danos na superfície da peça, como queima, camada branca e tensão residual (CAGGIANO e TETI, 2013).

Li e Axinte (2018) compararam os efeitos da utilização de 7 rebolos, sendo 1 deles com geometria convencional e o restante, ou seja, 6 rebolos com diferentes tipos de geometria interrompida, confeccionados com texturas distintas na superfície dos rebolos, como por exemplo, texturas projetadas com direções de ranhuras nos sentidos horizontais, inclinadas e em ziguezague. Após a realização dos ensaios, os autores constataram a eficácia das áreas passivas dos rebolos segmentados favorecendo tanto a temperatura durante as operações de retificação, quanto os níveis de rugosidade dos corpos de provas ensaiados, em comparação com os resultados obtidos com uso do rebole com geometria contínua.

Tawakoli e Azarhoushang (2011) investigaram os efeitos do uso de um rebole segmentado na operação de retificação de peças de compósito de matriz cerâmica (CMC) e compararam os resultados da retificação convencional com a retificação intermitente, utilizando rebolos com geometria contínua e geométrica interrompida, respectivamente. Com

base no estudo realizado, os autores concluíram que a macrotopografia do rebolo exerceu influencia direta na operação de retificação onde a segmentação do rebolo favoreceu a redução da força e temperatura melhorando a relação G. Embora, o rebolo segmentado tenha proporcionado os benefícios supracitados, os autores observaram que a retificação realizada com o rebolo com geometria contínua resultou em uma superfície com rugosidade mais reduzida, quando comparada com a rugosidade obtida com o uso do rebolo com geometria interrompida. De acordo com autores, este resultado pode ser explicado devido ao maior numero de aresta de corte e maior área de contato, ambos os efeitos favorecidos pela geometria contínua do rebolo.

Wójcik e Nadolny (2016) também estudaram os efeitos decorrentes das modificações da geometria do rebolo na operação de retificação. O trabalho realizado pelos autores consistiu na alteração da estrutura do rebolo com a formação de sulcos helicoidais na superfície ativa da ferramenta. Com o estudo realizado, dentre outros itens, os autores concluíram que a alteração na geometria do rebolo com a aplicação de ranhuras, no formato de parafuso, não ocasionou impactos negativos na superfície usinada.

No entanto, destaca-se que em processos de retificação já existem referências para o uso de rebolo com geometria interrompida, porém no caso de trabalhos de processos de retificação de peças com geometria interrompida, na literatura maiores informações foram encontradas nas pesquisas de Mello et al. (2015) e Mello et al. (2018) onde serviram como parâmetro para a discussão dos resultados obtidos no presente trabalho.

2.8.2 Uso de rebolo de CBN com geometria interrompida

Diniz et al. (2005) estudaram os efeitos do uso de duas ferramentas com diferentes teores de Nitreto de Boro Cúbico (CBN) na sua composição, uma com baixo teor e a outra com alto teor, sendo 60 % e 90 %, respectivamente. Os corpos de prova utilizados neste experimento apresentavam diferentes geometrias como: contínua e interrompida. Os autores concluíram que a ferramenta com baixo teor de CBN na sua composição mostrou-se mais resistente nas operações de usinagem das peças com geometria contínua, enquanto a ferramenta com alto teor de CBN apresentou uma resistência maior na usinagem de peças com geometria interrompida.

Godoy e Diniz (2011) comprovaram a superioridade da ferramenta de CBN em relação à cerâmica, tanto no corte contínuo quanto no corte interrompido, onde a taxa de desgaste de flanco da ferramenta de CBN foi muito menor do que a taxa de desgaste da cerâmica nas diferentes velocidades de corte utilizadas.

Ventura et al. (2015) estudaram o uso da ferramenta de CBN na usinagem de aço duro com geometria interrompida e constataram que dentro dos parâmetros de corte utilizados no trabalho, a alta tenacidade da ferramenta de CBN favoreceu a sua resistência ao desgaste. “Alta tenacidade implica em grãos abrasivos menos propícios à fragmentação quando de seu impacto com a peça a ser retificada” (VALARELLI et al., 2002).

Recentemente, o CBN recebeu uma considerável atenção como um material para ferramentas de corte e já se estabeleceu em muitas áreas de usinagem (SUGIHARA e ENOMOTO, 2015).

2.8.3 Efeitos da retificação de peças com geometria interrompida

Peças compostas por várias linhas retas ou superfícies curvas são amplamente aplicadas em vários tipos de componentes de máquinas, bem como em corte e estampagem de ferramentas (TSO e YANG, 1998). Tal afirmativa colabora para justificar a necessidade de intensificar estudos a respeito da retificação de peças com geometria interrompida, bem como os seus efeitos associados.

Desta forma, as pesquisas realizadas por Mello et al. (2015) e Mello et al. (2018) utilizando corpos de prova com ranhuras, contribuíram para um melhor entendimento dos efeitos dos parâmetros decorrentes da operação de retificação cilíndrica externa de mergulho em peças com geometria interrompida.

Os corpos de prova com geometria interrompida utilizados nos ensaios de Mello et al. (2015) foram produzidos com 2, 6 e 12 interrupções e retificados com 3 diferentes velocidades de mergulho, sendo: 0,25 mm/min, 0,50 mm/min e 0,75 mm/min. Já para os ensaios experimentais de Mello et al. (2018), os corpos de prova foram confeccionados com 0 ranhura (geometria contínua), 2, 6 e 12 interrupções. As pesquisas realizadas pelos autores permitiram constatar que a elevação da velocidade de mergulho tende a comprometer a integridade superficial da peça com o aumento da rugosidade R_a (μm).

O aumento da rugosidade em função do acréscimo da velocidade de mergulho já foi relatado por Alves et al. (2008), já que a taxa de remoção de material da peça é maior à medida que ocorre maior penetração do rebolo em direção a peça. Os autores concluíram que existem variações que demonstram um comportamento relacionado à velocidade de avanço, onde ocorre maior rugosidade em operações de retificação com maiores velocidades de avanço.

Onwuka e Hossein (2016) também pesquisaram os efeitos do aumento da rugosidade ao combinarem os parâmetros de profundidade e velocidade de corte na operação de retificação e obtiveram valores de rugosidade superficial (R_a) que variaram entre 130 nm e 320 nm para as condições de menor e maior velocidade de avanço, respectivamente. A rugosidade, geralmente, é considerada como um dos fatores mais importantes quando se está avaliando a qualidade da operação de retificação (JIANG et al., 2013).

Ainda, de acordo com D'addona e Raykar (2016), a rugosidade da superfície é determinante para diversos componentes industriais, representando um parâmetro determinante para descrever a usinabilidade de metais, bem como das ligas metálicas.

Mello et al. (2015) e Mello et al. (2018) constataram que, além da elevação da rugosidade, o aumento da velocidade de avanço em operação de retificação por corte interrompido também promoveu maiores desvio de circularidade. Os autores explicaram que o efeito da elevação da taxa de crescimento dos desvios de circularidade em função do aumento da velocidade de avanço do rebolo decorre pelo fato de que, ao aumentar a taxa de penetração do rebolo, a peça retificada é submetida a maiores taxas de compressão, intensificando a tensão residual e, conseqüentemente, os desvios de circularidade.

Nas pesquisas de retificação por corte interrompido de Mello et al. (2015) e Mello et al. (2018) foi possível observar que a elevação da velocidade de avanço provocou maiores níveis de desgastes do rebolo. Esta condição foi observada nas 3 diferentes formas de geometria interrompida das peças ensaiadas. Para este fenômeno, os autores explicaram que a interação entre o aumento da velocidade de mergulho do rebolo com a maior quantidade de ranhuras da geometria das peças provoca maiores impactos no rebolo e, conseqüentemente, maiores desgaste da ferramenta.

Conforme Jiang et al. (2013), o desgaste do rebolo representa um indicador importante para avaliar o tempo de vida da ferramenta, pois o desgaste elevado pode provocar danos térmicos ou outros defeitos na peça retificada. Uma considerável parcela da energia cinemática desprendida durante a operação de retificação é convertida em calor e a conversão

desta energia é significativamente influenciada pela topografia do rebolo então, deve-se considerar a distribuição e a forma das arestas de corte do rebolo (KLOCKE et al., 2016).

Desta forma, Haiyue Yu et al. (2016) estudaram os efeitos de desgaste de diferentes tipos de rebolos e observaram que o desgaste do rebolo é influenciado não somente pelo tipo de grão, mas também pela forma de distribuição dos grãos na estrutura do rebolo. Então, segundo os autores, rebolos que possuem lacunas regulares entre grãos possuem maior capacidade de expelir cavacos da zona de contato e também o fluido de corte tende a penetrar com maior facilidade na superfície retificada.

2.9 Metalografia

Oliveira (2011) descreveu que a distinção entre as duas grandes categorias de microscopia consiste no uso das principais fontes de radiação utilizadas, sendo: luz ou feixes de elétrons, tecnologias estas empregadas em microscopia óptica e microscopia eletrônica, respectivamente.

2.9.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Microscopia óptica (MO)

De acordo com Dedavid et al. (2007), a microscopia eletrônica de varredura (MEV) apresenta grande versatilidade para a observação e análise das características das microestruturas dos materiais sólidos, dada a sua condição de alta resolução e a aparência tridimensional das imagens das amostras. Por meio do MEV é possível analisar o estado da superfície da peça, permitindo uma visão geral bem como a percepção de profundidade da mesma (BIANCHI et al., 2000).

“Enquanto a microscopia ótica se baseia na interação da luz (visível, principalmente) com a amostra, permitindo a observação de relevo, cor e polarização, principalmente, a microscopia eletrônica aproveita o grande número de fenômenos de interação entre elétrons e metais para extrair informações importantes de uma amostra” SILVA (2008).

O princípio do MEV está fundamentado no uso de um feixe de elétrons com o propósito de realizar uma varredura na superfície da amostra transmitindo o sinal do detector para uma tela catódica, onde o sinal da imagem é resultante da interação do feixe com a superfície da amostra e, o sinal captado pelo detector permite a observação (DEDAVID et al., 2007).

Na Tabela 2 é possível observar os principais parâmetros de comparação entre o Microscópio Óptico (MO) e o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

Tabela 2 - Comparação dos parâmetros entre MO e MEV

	MO	MEV
Resolução*	0,25	0,003
Aumento	2000 vezes	150.000 vezes
Profundidade do foco	Duas dimensões: largura e altura	Três dimensões: largura, altura e profundidade

*Quanto menor o valor numérico atribuído à resolução de um microscópio, maior a resolução do equipamento.

Fonte: Fernandes (2007).

A Figura 14 apresenta os elementos que compõem o microscópio eletrônico de varredura e o microscópio óptico convencional.

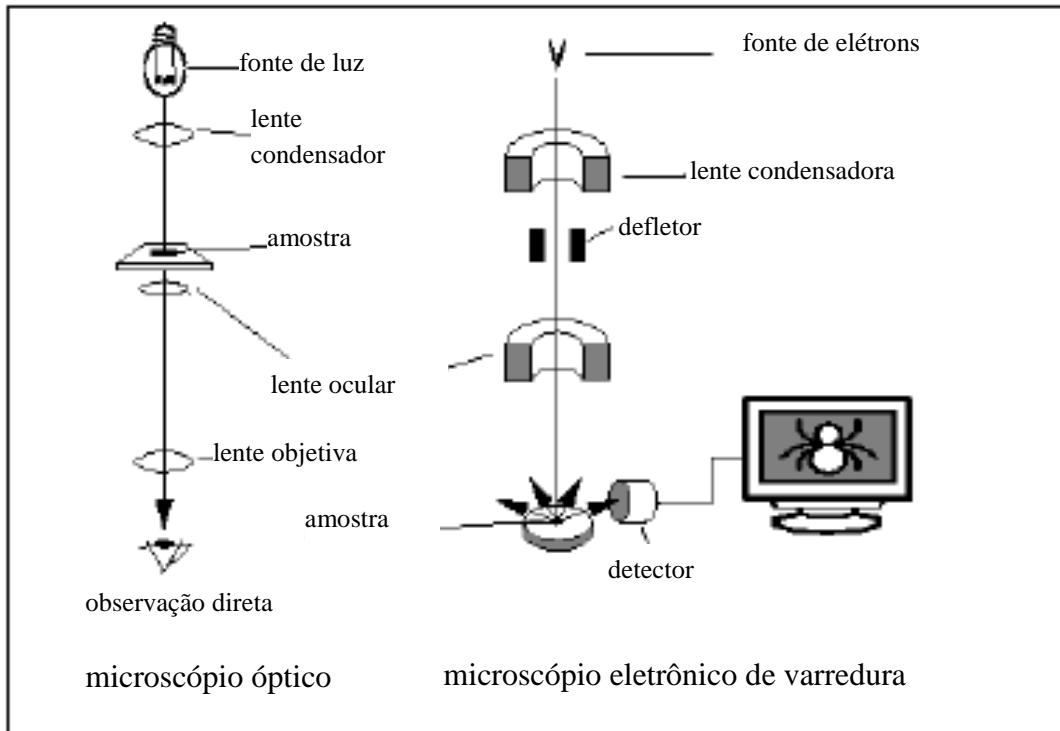


Figura 14 - Comparativo entre o microscópio eletrônico de varredura e o microscópio óptico convencional.

Fonte: Dedavid et al. (2007).

2.9.1.1 Preparação das amostras para a realização das análises de MEV e MO

Para Dedavid et al. (2007), as etapas básicas da preparação das amostras para a realização do MEV são compostas pela seleção das amostras, corte, embutimento, lixamento, polimento e ataque químico no corpo de prova. Silva et al. (2016) apontaram a norma ASTM (*American Society for Testing & Materials*) E3-01 para preparação de amostra para exame de metalografia.

A Tabela 3 apresenta as soluções comumente utilizadas para a realização de exame metalográfico.

Tabela 3 - Soluções usuais para o exame metalográfico em materiais ferrosos e aços

Material	Solução	Observações
Ferros e aços carbonos	HNO ₃ (2,0 mL) + etanol (100 mL)	Nital 2%; reativo por excelência para aços.
Ferros e aços carbonos	Ácido pícrico (4g) + etanol (100 mL)	Revela melhor as estruturas com carbeto, especialmente nos contornos de grão.
Ferro-aços inoxidáveis	HNO ₃ + HCl + H ₂ O (1:1:1)	Bom reagente de uso geral. Em aço inoxidável.
Ferro-aços inoxidáveis	CuCl ₂ (1,5 g) + HCl (100 mL) + Etanol (100 mL)	Reagente de Kalling 2; ataca ferrita rapidamente, austenita lentamente, não ataca carbeto.
Ferro-aços inoxidáveis	CuCl ₂ (5 g) + HCl (33 mL) + H ₂ O (33 mL) + Etanol (33 mL)	Reagente de Kalling 1; ataca fortemente a martensita.
Ferro-aços inoxidáveis	KOH (45 g) + H ₂ O (60 mL)	Ataque eletrolítico a 6 V; ataca apenas carbeto.

Fonte: Adaptado de Mannheimer, (2002); Metals Handbook, (1995) *apud* Dedavid et al. (2007).

2.10 Microdureza

De acordo com Alves (2007) a dureza pode ser definida como uma propriedade mecânica que avalia a resistência do material à uma carga que o conduz a uma deformação plástica. Conforme Suterio (2005), a dureza é obtida por meio de uma submissão de carga no indentador sobre a superfície da peça, onde o valor da dureza é o resultante do quociente entre o valor da carga pela área residual da indentação.

Conforme Paula (2007), a medida de resistência do material em relação à penetração do indentador é obtida pela equação (8).

$$H = \frac{P}{A_o} \quad (8)$$

Onde:

H = resistência do material

P = carga aplicada na indentação (kgf)

A_o = área projetada na indentação (mm²)

De acordo Gravalos et al. (2010), a norma ASTM (*American Society for Testing & Materials*) E 384-07 descreve o procedimento para a determinação da microdureza dos materiais por meio da realização de ensaios de micro-penetração executados com penetradores Knoop ou Vickers. Já, segundo Sokei et al. (2012) a norma ASTM (*American Society for Testing & Materials*) E 92, abrange, no seu escopo, a determinação da dureza Vickers de materiais metálicos usando forças aplicadas de 1 kgf a 120 kgf.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este item descreve os equipamentos e materiais que foram utilizados durante a realização dos ensaios, bem como a descrição dos procedimentos realizados e também parâmetros de entrada adotados para a execução dos experimentos. Neste item também são descritos os tipos de medições das variáveis de saída realizadas. Neste experimento, as variáveis de saídas avaliadas foram: rugosidade das peças, desvios de circularidade das peças e desgaste diametral do rebolo. Também, como variáveis de saídas, foram verificadas a integridade das superfícies das peças retificadas, por meio de medições de microdureza e microscopia óptica. A retificação dos corpos de provas foi conduzida no Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA) da Faculdade de Engenharia da UNESP, *campus* de Bauru/SP. As variáveis de saída como rugosidade, desvios de circularidade e desgaste diametral do rebolo, resultantes após a realização dos ensaios, foram medidas e avaliadas nos Laboratório de Usinagem por Abrasão da Faculdade de Engenharia da UNESP, *campus* de Bauru.

As análises de microdureza e microscopia ótica também foram realizadas na Faculdade de Engenharia da UNESP, *campus* de Bauru, estas conduzidas no Laboratório de Materiais.

3.1 Parâmetros de entrada

Para a realização desta pesquisa, foram utilizadas duas diferentes formas de aplicação do fluido de corte, sendo (a) o método convencional ou por jorro, com o uso de 2 bocais padronizados, comumente utilizados na retificadora Sulmecânica e (b) o método por refrigeração por alta velocidade, por meio de um bocal projetado com uma constrição na saída do fluido de corte, proporcionando uma maior aproximação do jato do fluido na área de corte, a velocidade de saída do fluido do bocal é igual à velocidade de corte do rebolo.

Utilizou-se 3 variações nas velocidades de mergulho do rebolo sobre as peças confeccionadas e 4 diferentes geometrias de peças retificadas. O rebolo utilizado foi um superabrasivo fabricado com grãos de CBN.

A seguir são apresentadas as características e propriedades dos parâmetros de entrada utilizados para a realização desta pesquisa.

3.1.1 Características e propriedades do fluido de corte

O fluido de corte utilizado foi o fabricado pela empresa Quimatic Tapmatic do tipo semissintético ME-1 na proporção de 01:30. Conforme informações dispostas no *site* do fabricante, este tipo de fluido contém aditivos anticorrosivos, bactericidas e antiespumantes, com densidade a 25 °C de 1,000 a 1,025 g/cm³.

3.2 Equipamentos e materiais utilizados

Nesta seção serão descritos os equipamentos e também os principais materiais utilizados para a elaboração dos ensaios, sendo: tipo de retificadora, a geometria dos corpos de prova, os sistemas de refrigeração e o tipo de rebolo utilizado.

3.2.1 Retificadora cilíndrica externa

Os experimentos foram realizados utilizando-se uma retificadora cilíndrica CNC de fabricação da empresa Sulmecânica, modelo RUAP515H com tecnologia de operação por comando numérico computadorizado CNC da Fagor para deslocamento do eixo “X”. Foram utilizados dois tipos de programas CNC para a realização dos ensaios, sendo um programa para a retificação dos corpos de provas e o outro para a impressão do desgaste do rebolo para posterior avaliação.

A Figura 15 demonstra o tipo de retificadora utilizada para a realização do experimento.

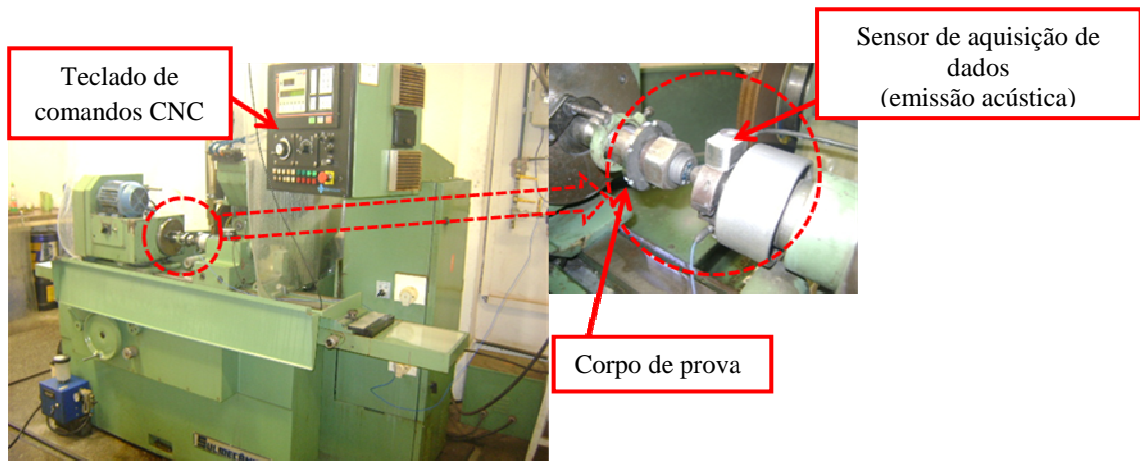


Figura 15 - Retificadora cilíndrica CNC utilizada nos ensaios

Os parâmetros de entrada do processo de retificação utilizados nos ensaios estão descritos na Tabela 4, considerando que o tempo de centelhamento foi estabelecido em 1,78 s em função de corresponder a uma rotação do corpo de prova.

Tabela 4 - Comparação das variáveis de entrada entre diferentes tipos de refrigeração

Parâmetro	Sistema de refrigeração	
	Convencional	Alta Velocidade
Velocidade de avanço (V_f)	0,25; 0,50 e 0,75 mm/min	0,25; 0,50 e 0,75 mm/min
Velocidade de corte (V_s)	30 m/s	30 m/s
Rotação da peça (n_w)	163 rpm	163 rpm
Tempo de centelhamento (<i>spark-out</i>)	1,78 s	1,78 s
Profundidade de dressagem (a_d)	40 passes de 2 μ m	40 passes de 2 μ m
Pressão de aplicação do fluido (MPa)	0,4 MPa	0,5 MPa
Vazão do fluido de corte	9 L/min	24 L/min
Velocidade do fluido de corte	2,4 m/s	30 m/s
Profundidade de usinagem (a)	40 passes de 0,1 mm	40 passes de 0,1 mm

3.2.1.1 Descrição do corpo de prova

O corpo de prova utilizado para os ensaios foi projetado utilizando-se o aço ABNT 4340, temperado e revenido, com dureza superficial média de 577 HV (Vickers), equivalente a 54 HRC (Rockwell, escala c). Trata-se de um material que apresenta características como resistência mecânica, resistência à fadiga e com boa tenacidade.

De acordo com Alves et al. (2011), as propriedades de resistência e tenacidade do aço ABNT 4340, são obtidas por meio do beneficiamento do tratamento de têmpera e revenimento.

A Tabela 5 apresenta a composição química do aço ABNT 4340.

Tabela 5 - Composição química do aço ABNT
Aço ABNT 4340

SAE	C	Mn	P	Si	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	Co
4340	0,4	0,77	0,026	0,30	0,011	0,81	1,17	0,22	0,016	0,18	0,04

Fonte: Callister (2010) *apud* Oliveira (2011).

Por se tratar da realização de ensaios com corte interrompido, o corpo de prova foi projetado com ranhuras na sua geometria. Foram projetados corpos de provas com 2, 6 e 12 ranhuras. Pode-se entender por ranhuras uma espécie de rebaixamento na geometria circular da peça. Desta forma, durante o processo de retificação, ao manter o contato com a peça girando, o rebolo tende a ser impactado pelos cantos do rebaixamento (ranhuras) da peça, podendo sofrer alterações em parâmetros de desvios de circularidade, rugosidade e desgaste diametral do rebolo, além da ocorrência de microtrincas. Para efeito de comparação, também foram projetados corpos de prova com geometria contínua, ou seja, sem ranhuras.

O corpo de prova foi confeccionado em formato de anel com as seguintes dimensões: diâmetro externo com 58 mm, diâmetro interno com 29,2 mm e espessura de 4,5 mm.

Para efeito de ilustração da geometria dos corpos de prova, a Figura 16 apresenta os quatro tipos diferentes de peças utilizadas nos ensaios.

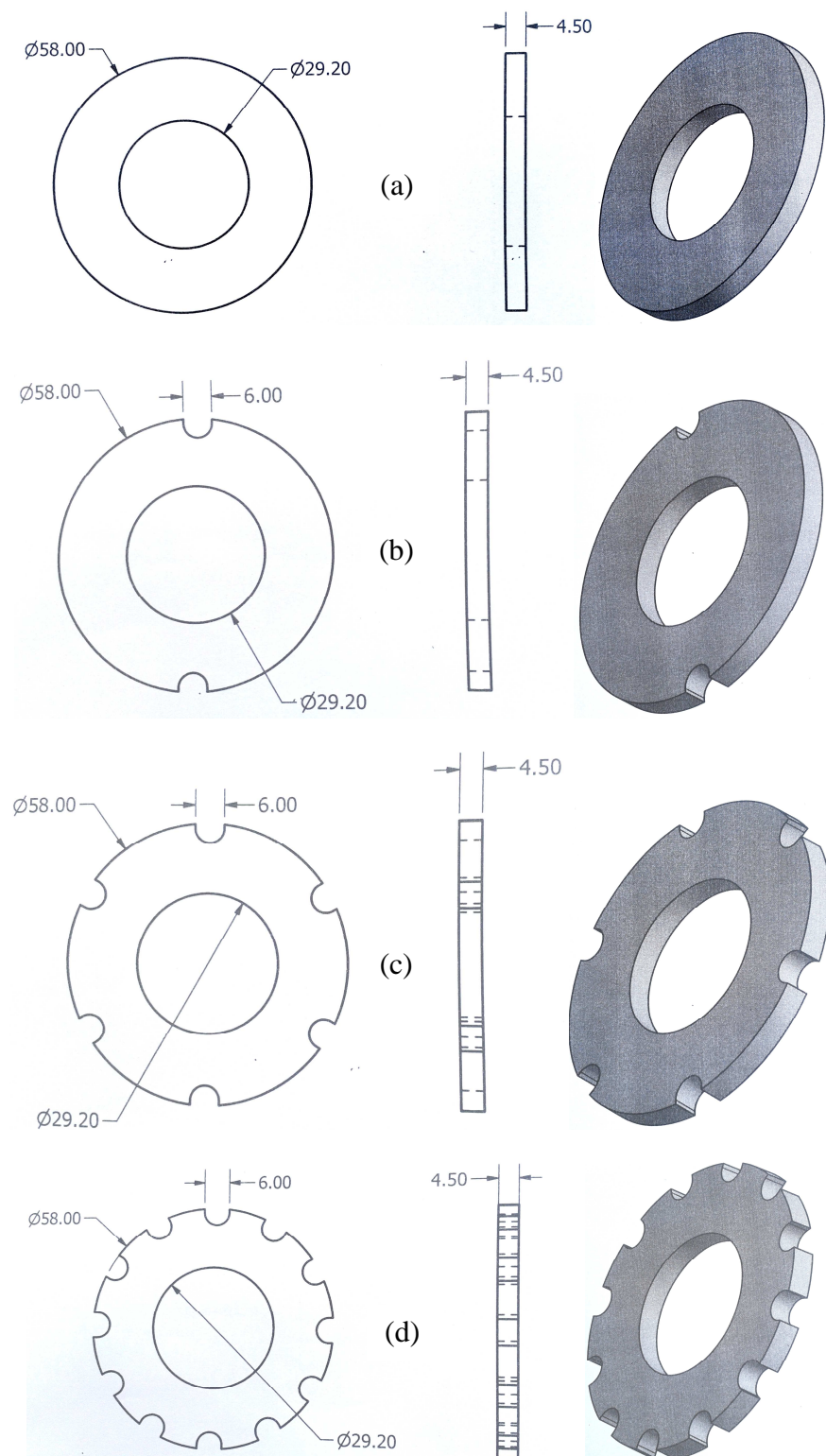


Figura 16 - Aspecto visual dos quatro diferentes tipos de corpos de prova utilizados nos ensaios.

Legenda: (a) geometria contínua, (b) 2 ranhuras, (c) 6 ranhuras e (d) 12 ranhuras.

3.2.1.2 Rebolo de CBN utilizado

Para a realização do experimento, 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 127 mm, dureza da liga Q, concentração 300 e granulometria entre 100 e 120 *mesh* classificado como granulometria fina (14A1350 x 15 x SNB151Q12VR2) fabricado pela empresa Nikkon Ferramentas de Corte Ltda.

3.2.1.3 Os tipos de sistemas de refrigeração utilizados

Para a realização do experimento, foram utilizados dois tipos de sistemas de refrigeração, sendo (a) refrigeração abundante, também denominada de refrigeração convencional ou por jorro e (b) refrigeração com alta velocidade por meio do jato otimizado do fluido.

3.2.1.3.1 O sistema de refrigeração convencional ou abundante

O sistema utilizado nos ensaios com a refrigeração convencional, consistiu no uso de um reservatório de fluido com capacidade de 100 litros, bomba de sucção, mangueiras específicas para uso de fluido de corte, 2 bocais aplicadores com cada um com 6,3 mm de diâmetro.

O fluido de corte foi aplicado a uma vazão de 9 L/min, com velocidade de 2,4 m/s e pressão de 0,4 MPa.

A Figura 17 demonstra o sistema de refrigeração convencional utilizado no experimento.

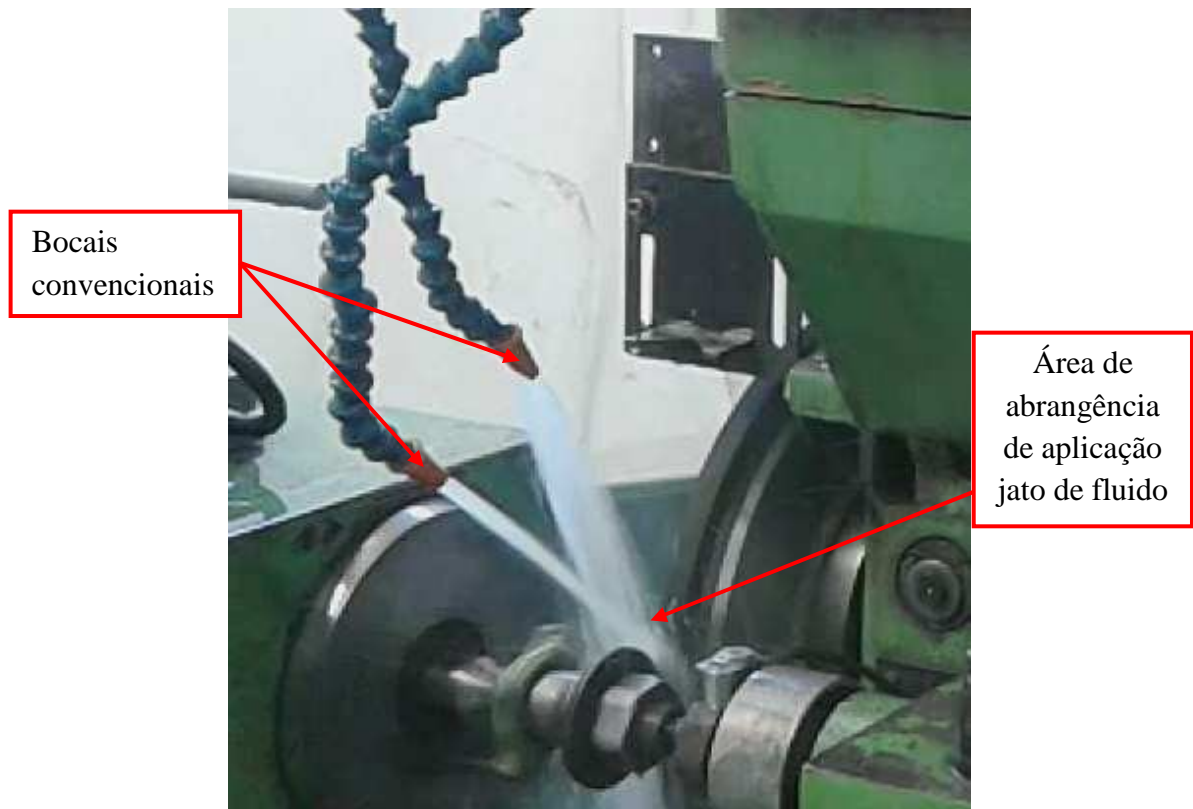


Figura 17 - Aspecto visual do sistema de refrigeração convencional utilizado nos ensaios

3.2.1.3.2 O sistema de refrigeração por alta velocidade

O sistema de refrigeração por alta velocidade foi composto por um reservatório de fluido com capacidade de 100 litros, bomba de sucção e um bocal otimizado circular com geometria constrita de 4 mm de diâmetro para saída do fluido de corte.

O fluido de corte foi aplicado a uma vazão de 24 L/min., com velocidade de 30 m/s (igual a velocidade de corte) sob a pressão de 0,5 MPa.

Na Figura 18 é possível observar o sistema de refrigeração por alta velocidade utilizado no experimento.

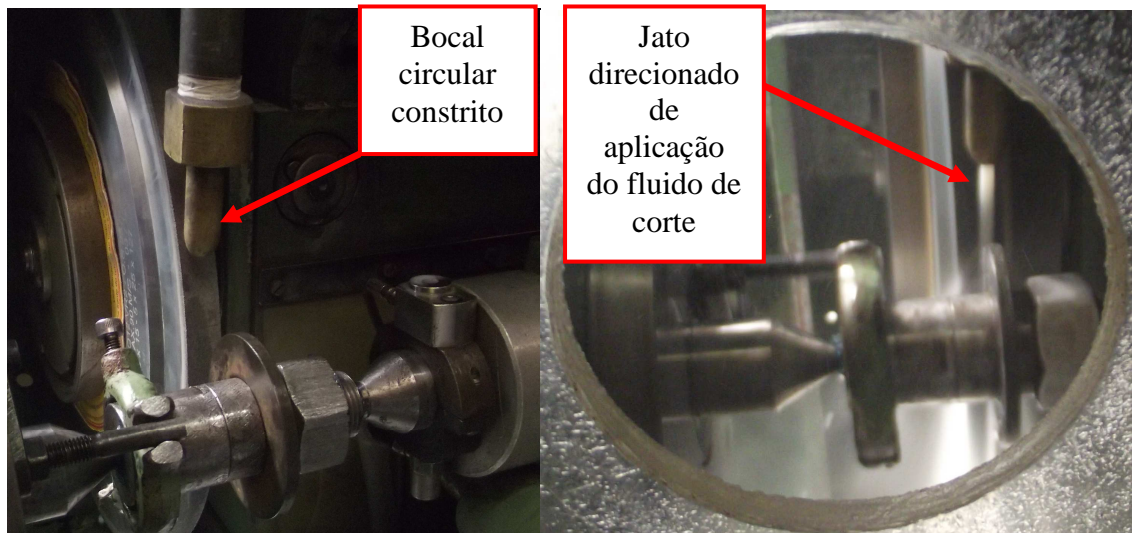


Figura 18 - Aspecto visual do sistema de refrigeração por alta velocidade utilizado nos ensaios

3.3 Delineamento dos parâmetros de entrada e variáveis de saída

A princípio foram definidas as variáveis de entradas e saídas necessárias para o processo de retificação, sendo:

- Parâmetros de entrada: velocidade de avanço, velocidade da peça, velocidade do rebolo, ponta do dressador, tempo de centelhamento, pressão de aplicação do fluido, vazão do fluido de corte e velocidade do fluido de corte.
- Variáveis de saída: desvios de circularidade, tolerância geométrica, acabamento, integridade superficial, desgaste do rebolo, vibração, emissão acústica e potência de máquina.

A rotação da peça em relação ao rebolo foi no sentido discordante.

3.3.1 Delineamento dos ensaios

Inicialmente, o delineamento do corpo de prova foi estabelecido para aplicação dos métodos de refrigeração abundante e alta velocidade, por meio de 3 valores de velocidade de mergulho – (V_f), sendo 0,25 mm/min, 0,50 mm/min e 0,75 mm/min onde, para cada uma destas condições de retificação, foram utilizadas 4 diferentes geometrias do corpo de prova, considerando peças com 0, 2, 6 e 12 ranhuras. Para cada condição de quantidade de ranhura da peça, foi estabelecido um ensaio com 2 repetições de ensaios para cada geometria da peça, num total de 3 ensaios para cada condição ensaiada. As Figuras 19 e 20 apresentam as matrizes de ensaios delineadas para este experimento.

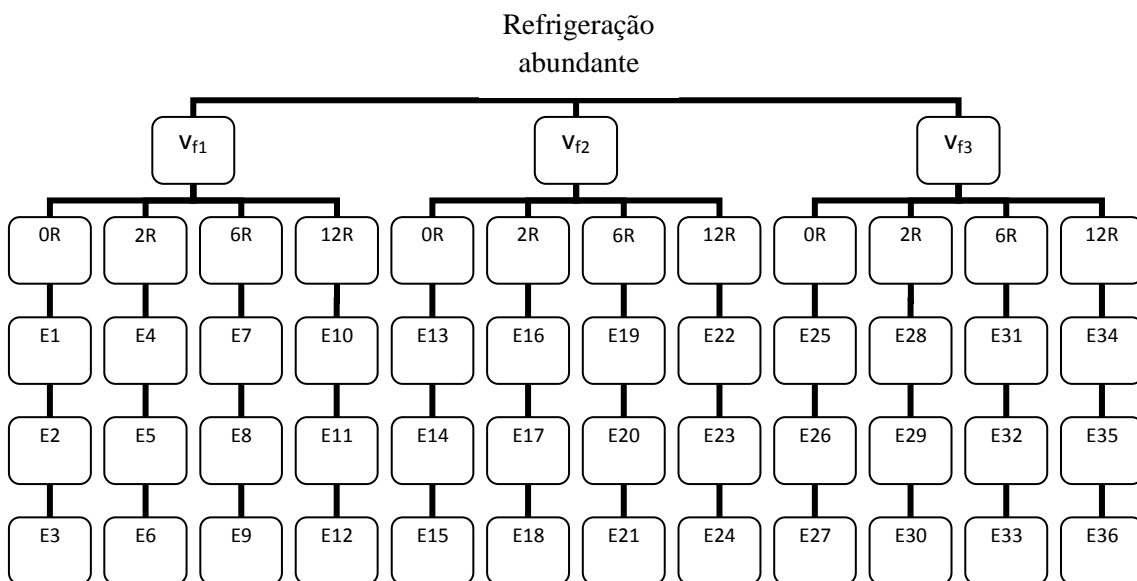


Figura 19 - Matriz de ensaios para refrigeração convencional.

Legenda: V_f – Valores de velocidade de mergulho; R – Ranhuras; E – Ensaio

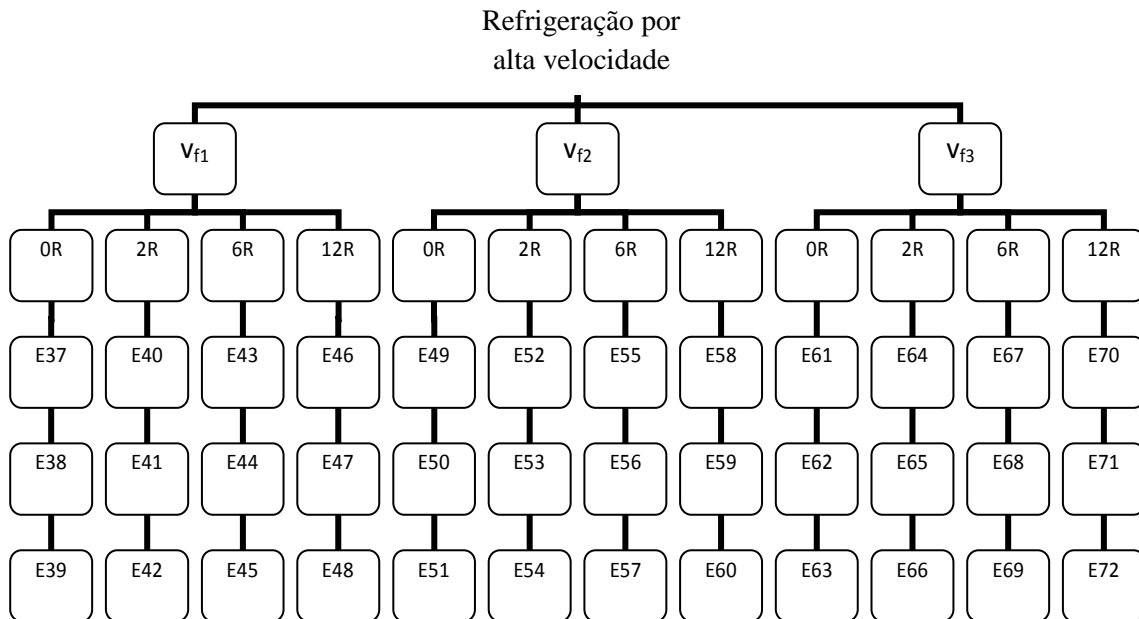


Figura 20 - Matriz de ensaios para refrigeração por alta velocidade.

Legenda: V_f – Valores de velocidade de mergulho; R – Ranhuras; E – Ensaio.

3.3.2 Preparação do corpo de prova para análise das variáveis de saída

Deve-se considerar que, ao finalizar a operação de retificação, algumas impurezas permanecem aderidas à superfície da peça como, por exemplo, partículas de cavaco e substâncias decorrentes do uso de fluido de corte. Tais impurezas, se não forem eliminadas, comprometem a precisão das medições das variáveis de saída, tendo em vista que os resultados obtidos são analisados em micrômetro.

Desta forma, após o ensaio de máquina, para eliminar as impurezas do corpo de prova, cada peça ensaiada foi submetida, seqüencialmente, à imersão em quatro diferentes recipientes dispostos em uma bancada, os quais continham um volume de, aproximadamente, 350 mL de diferentes substâncias capazes de eliminar as impurezas das peças. As substâncias contidas em cada recipiente foram: querosene, thinner, álcool etílico e álcool metílico, sendo que as peças foram submetidas à imersão nesta ordem, respectivamente.

Todas as peças ensaiadas foram submetidas ao processo de limpeza, onde, em cada recipiente, ficavam imersas por, aproximadamente, um minuto. Para não manter o contato manual com as peças a fim de evitar distorções nas medições e análises, a transposição das

mesmas, entre os recipientes, foi realizada com o uso de gancho de metal. À medida que as peças eram retiradas dos vasilhames as mesmas eram limpas por pincéis, sendo utilizado quatro deles, um para cada diferente recipiente, com o propósito de expelir as micro-partículas e substâncias ainda aderentes na peça. Ao finalizar a limpeza de cada peça, utilizou-se um secador de mão para secar todo corpo de prova e submetê-lo a análise das variáveis de saída.

3.3.3 Análise das variáveis de saída

Ao final do experimento, foram avaliadas as variáveis de saída a fim de discutir e interpretar os resultados obtidos. A discussão foi mantida à luz da literatura, tendo com base a pesquisa em artigos e trabalhos científicos que contribuíram para a compreensão dos resultados. As variáveis de saídas avaliadas foram: (a) desvios de circularidade (b) rugosidade (c) emissão acústica (d) microscopia óptica e (e) desgaste diametral do rebolo.

3.3.3.1 Desvio de circularidade

Para França (2005) os fatores que influenciam os desvios de circularidade de peça estão diretamente relacionados com as próprias condições de retificação, bem como os danos térmicos, as solicitações mecânicas, e também com a pressão e a vazão de fluido de corte utilizado.

Para a mensuração do desvio de circularidade no corpo de prova dos ensaios experimentais, foi utilizada uma máquina da marca Taylor Hobson, modelo Talyrond 31 c, projetada para operações de controle de tolerâncias geométricas e de forma, disposta no Laboratório de Usinagem por Abrasão da Faculdade de Engenharia da Unesp, *campus* de Bauru/SP.

Para a medição dos desvios de circularidade, as peças foram alocadas e fixadas na base giratória da máquina e foi utilizado um apalpador com a ponta confeccionada com rubi, o qual foi encostado na superfície retificada das peças. Em seguida, máquina foi acionada

para realizar o movimento giratório das peças, possibilitando que o apalpador coletasse os valores dos desvios de circularidade.

Foram realizadas 3 medições (Figura 21) em diferentes posições, em ângulo de 120° de distância uma da outra, na região retificada de cada uma das três peças retificadas em cada ensaio.

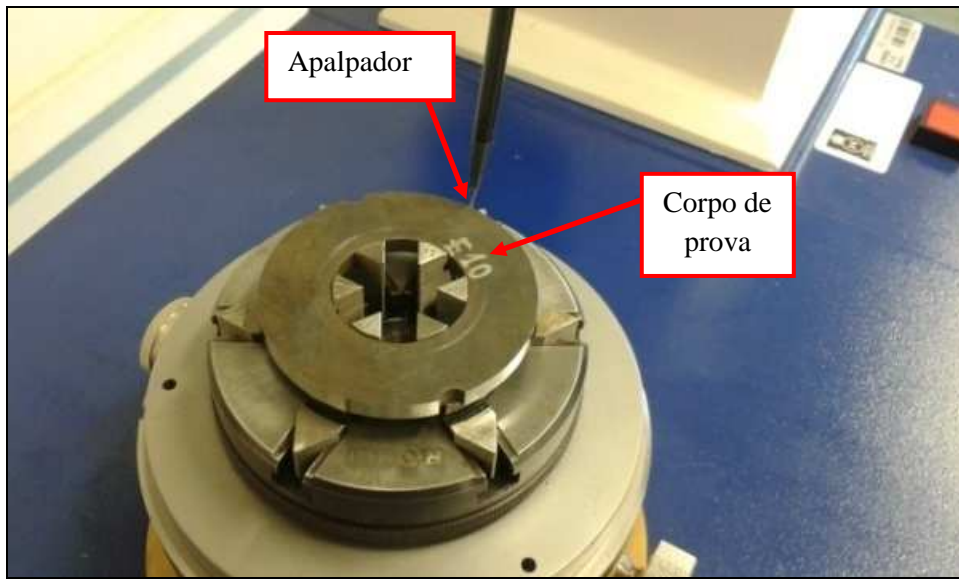


Figura 21 - Medição de desvios de circularidade das peças retificadas.

Os dados coletados foram registrados em um *software* integrado ao circularímetro e que compõe o sistema de medição, onde as informações dos resultados dos desvios de circularidade eram transmitidas em um monitor para efeito de análise e tratamento dos resultados.

Destaca-se que para realizar as medições nos corpos de prova com geometria interrompida, utilizou um recurso do *software* que permitia selecionar virtualmente a região da ranhura (Figura 22) e anular esta área, de forma que leitura de medição dos desvios de circularidade pudesse estimar, na totalidade, o diâmetro externo do corpo de prova.

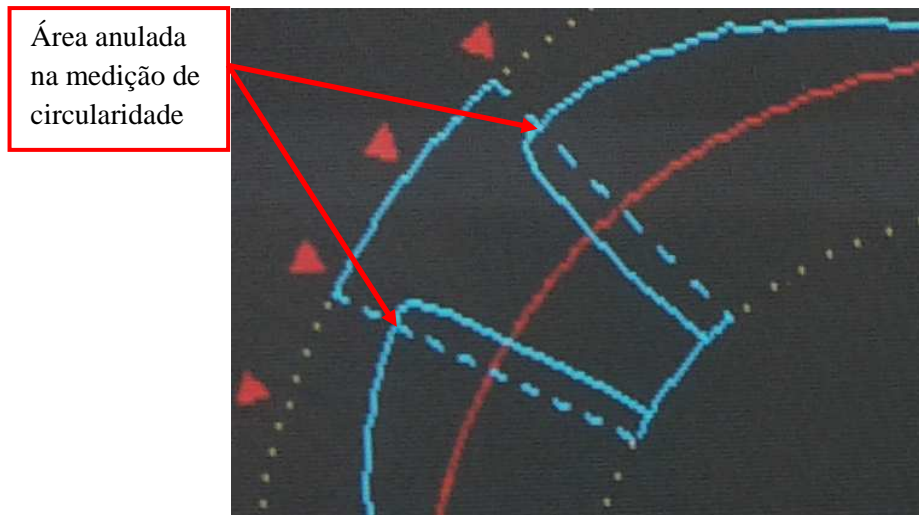


Figura 22 - Seleção da área de ranhuras das peças para medição dos desvios de circularidade.

3.3.3.2 Rugosidade

De acordo com Colaco e Medeiros (2014), a rugosidade é definida como um erro micro-geométrico disposto na superfície da peça representada por pequenas saliências e reentrâncias. A medição da rugosidade geralmente é realizada por um equipamento de precisão denominado de rugosímetro.

A mensuração da rugosidade das peças resultantes dos ensaios também foi realizada no Laboratório de Usinagem por Abrasão da Faculdade de Engenharia da Unesp, *campus* de Bauru/SP, onde foi analisado o parâmetro de rugosidade média (R_a) por meio de um rugosímetro modelo Surtronic³⁺, fabricado pela empresa Taylor Robson. Em conjunto com rugosímetro foi utilizado o software TalyProfile, versão Lite 3.1.4, também fabricado pela empresa Taylor Robson.

A medição de rugosidade foi realizada perpendicular à superfície de retificação. Para efeito de melhor fixação da peça, a mesma foi acoplada a um cilindro e este posicionado em um prisma em formato de “V” (Figura 23).

Ajustou-se o rugosímetro para que a medição fosse realizada com um comprimento de amostragem 0,25 mm. Foram realizadas três medições em diferentes posições na região retificada de cada uma das peças retificadas.

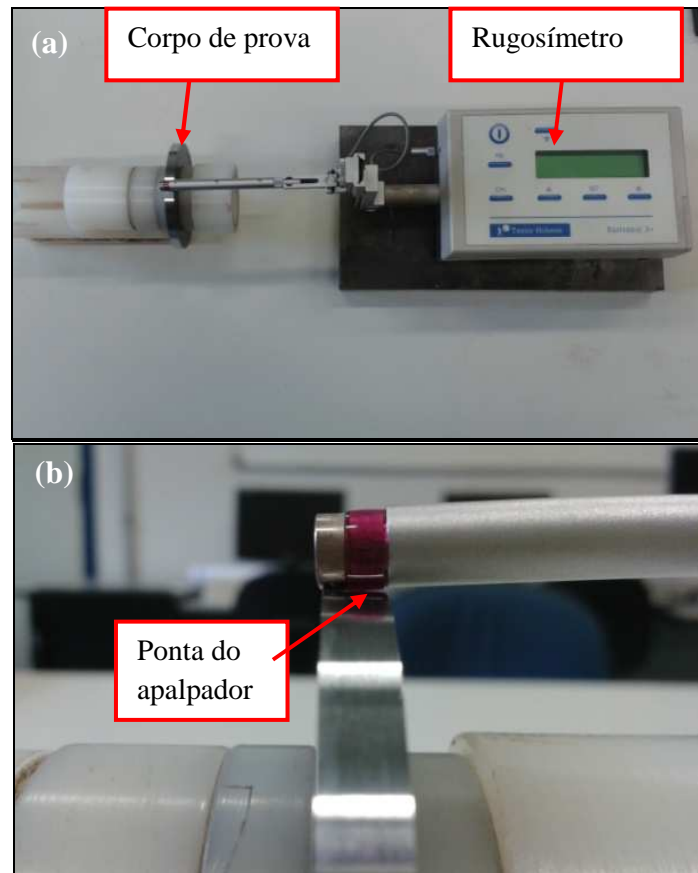


Figura 23 - Medição de rugosidade das peças retificadas.

Legenda: (a) aspecto geral do sistema de medição da rugosidade (b) contato entre a ponta do apalpador e a área retificada da peça.

3.3.3.4 Emissão acústica, potência consumida e vibração

Conforme Dias (2013), o sinal de emissão acústica é resultante de ondas de tensão provocadas pela rápida liberação de energia de deformação de um material, como por exemplo, fratura do ligante ou grãos de um rebolo. Então, para Silva Neto (2012), na maioria das vezes, a emissão acústica está relacionada com a interação entre o grão do rebolo e a superfície do material.

Neste experimento, durante a realização dos ensaios, as medições da emissão acústica, potência consumida da máquina e vibração foram realizadas por meio da implantação de um sistema de monitoramento da marca *Sensis*, modelo DM12 (Figura 24) alocado com um sensor acústico no cabeçote móvel da máquina, próximo ao contraponto, a fim de captar

possíveis variações de sinal. De acordo com Alves (2007), o módulo de emissão acústica (EA) transforma as variações de emissão acústica em tensões elétricas e as transfere até a placa de aquisição instalada no microcomputador.

Os dados coletados referentes à emissão acústica e potência consumida já na forma de tensão elétrica foram posteriormente avaliados por meio do *software* MatLab e os resultados foram estruturados em gráficos de colunas.

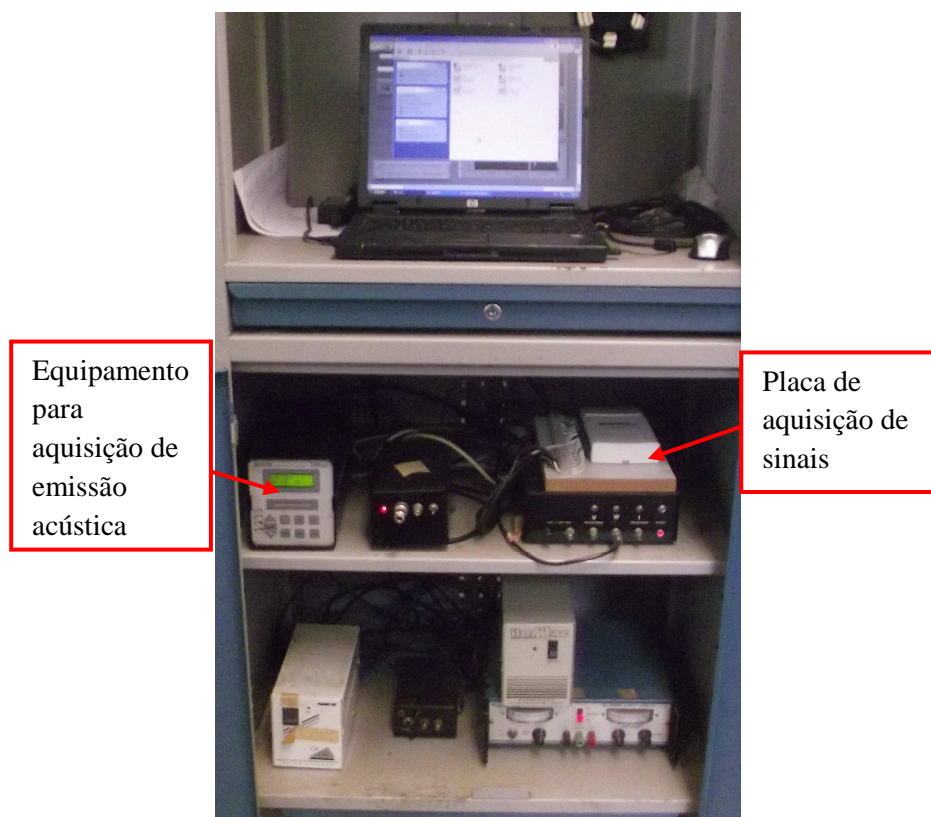


Figura 24 - Sistema de aquisição de dados

3.3.3.5 Microdureza

Para a realização do ensaio de microdureza, foi utilizado um equipamento da marca Mitutoyo, modelo HM 211. A análise de microdureza foi realizada na escala Vickers.

Utilizou-se uma carga de 200 g, por proporcionar melhor visualização das diagonais impressas do indentador, favorecendo maior precisão nas medições. Os ensaios de

microdureza foram conduzidos com 3 séries em cada amostra e, em cada série, foram realizadas 5 medições de microdureza, ensaiadas a uma distância mínima de duas vezes e meia (2,5x) o comprimento da maior diagonal impressa pelo indentedor.

3.3.3.6 Microscopia óptica

Desta forma, por meio da análise de microscopia, é possível analisar as solicitações mecânicas e térmicas ocorridas na peça durante o processo e, por consequência, analisar a sua integridade superficial (SILVA NETO, 2012).

O exame de microscopia óptica foi realizado no laboratório de materiais da Faculdade de Engenharia da UNESP, *campus* de Bauru, com o propósito de detectar as possíveis ocorrências de microtrincas e danos térmicos.

Para a realização do exame de microscopia óptica, foi adotada a metodologia proposta por Dedavid et al. (2007), onde algumas peças retificadas nos ensaios foram cortadas utilizando-se uma máquina de corte metalográfico (Figura 25).



Figura 25 - Alocação da amostra na máquina de corte metalográfico

Optou-se por selecionar, preparar e submeter aos exames metalográficos e de dureza os corpos de prova retificados com a velocidade de mergulho $V_f = 0,75$ mm/min. O motivo desta seleção foi que, caso tais amostras retificadas sob as condições mais severas não apresentassem indícios de danos ou trincas, as demais, que foram retificadas com condições mais estáveis, também poderiam não apresentar algum tipo de danificação.

Em seguida, a amostra foi preparada para a realização do embutimento com o uso de baquelite como material de revestimento. Após o embutimento das peças, as mesmas foram lixadas, utilizando-se uma lixadeira manual, com uma série de lixas d'água de diferentes granulometrias, obedecendo a seqüência onde procedeu-se a partir da mais grossa para a mais fina, sendo granulometrias de: 80, 120, 220, 320, 400, 500, 600, 1000, 1200 e 1500. A operação de lixamento prosseguiu até a condição de remoção total dos resíduos de baquelite.

Na Figura 26, é possível visualizar algumas etapas adotadas para a realização da microscopia óptica.

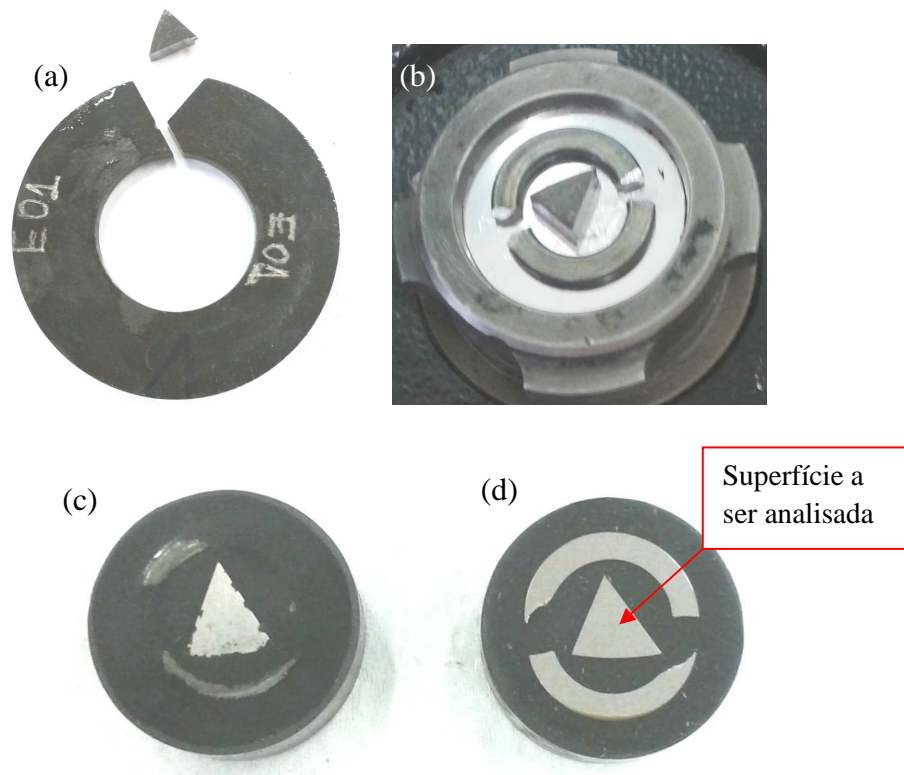


Figura 26 - Etapas da preparação dos corpos de prova para metalografia.

Legenda: (a) retirada da amostra (b) preparação para embutimento (c) antes do lixamento e (d) após o lixamento.

Após a finalização do lixamento, seguiu-se com o polimento das amostras, utilizando-se uma politriz metalográfica com alumina de granulometria de $1\ \mu\text{m}$ (Figura 27).



Figura 27 - Politriz utilizada para polimento dos corpos de prova.

O equipamento foi acionado e as amostras foram colocadas em contato com a plataforma que executava movimentos giratórios, por, aproximadamente, 3 minutos. Durante a execução da operação de polimento tomou-se o cuidado de deslizar a peça, em movimentos circulares, por toda a área da plataforma giratória.

Em seguida, as amostras foram submetidas ao ataque químico com o uso de Nital 2%, com o propósito de revelar a microestrutura das peças retificadas. A micrografia foi realizada no microscópio óptico da marca Olympus modelo BX 51, equipado com uma câmera digital da marca Leica, modelo EC-3, (Figura 28) disposto no laboratório da Faculdade de Engenharia da Unesp *campus* de Bauru.



Figura 28 - Microscópio óptico utilizado no exame de metalografia.

3.3.3.7 Desgaste diametral do rebolo

Durante os ensaios de retificação dos corpos de prova, mediu-se, alternadamente, o desgaste diametral do rebolo. Para a realização deste procedimento foi utilizado um cilindro de aço SAE 1020 alocado na retificadora. Após a instalação deste cilindro, foi acionada uma rotina CNC já programada da máquina para realizar a interação entre o cilindro de impressão e o rebolo, gerando as condições necessárias no corpo de prova para que a avaliação do desgaste do rebolo fosse mensurada.

A marcação do desgaste do rebolo foi possível tendo em vista que, durante a retificação das peças, a largura total do rebolo não foi utilizada, o que promoveu um degrau no rebolo. Esse degrau, durante o processo de marcação, promovia um desnível no cilindro possibilitando a impressão do desgaste do rebolo no cilindro, destacando as regiões desgastadas e não desgastadas do rebolo (Figura 29).



Figura 29 - Aspecto visual dos desgastes do rebolo impressos no cilindro.

Os cilindros, que foram marcados com a impressão dos desgastes do rebolo, foram posicionados sobre um prisma e com uso de um apalpador foram realizadas as medições de desgaste resultando em valores de desgaste radial e diametral do rebolo.

Cada marca observada na Figura 29 é relativa a um ensaio, onde é possível verificar quatro marcas, ou seja, neste corpo de prova tem-se a impressão do desgaste do rebolo de quatro ensaios realizados.

Com o propósito de realizar a medição de desgaste do rebolo, foi utilizado um instrumento de aferição digital, fabricado pela Tesa Swiss Made, modelo TT60, o qual estava conectado a um apalpador mecânico, suportado em uma régua graduada. Considerando que a régua era articulável, foi possível realizar movimentos verticais para ajustes da ponta do apalpador na superfície do cilindro nas regiões de impressão de desgastes do rebolo.

Para o posicionamento e fixação do cilindro de impressão do desgaste do rebolo, foi utilizado um suporte com formato em V sobre uma mesa coordenada, da marca Nikon, que permitia movimentação em duas direções controladas, fazendo-se o uso de manivelas de precisão micrométrica. A Figura 30 reproduz o sistema utilizado para as medições de desgastes do rebolo.



Figura 30 - Sistema utilizado para medição dos desgastes do rebolo.

O procedimento utilizado para a marcação do desgaste do rebolo consistiu na marcação de três pontos de medição no centro de cada marca, distantes a 120° um do outro onde, cada marca representa um ensaio.

Em cada ponto, foi realizada uma medição e, após a medição dos três pontos do mesmo ensaio, foi obtida e passou a ser considerada a média aritmética das medições, observado o desvio padrão das medições do referido ensaio.

As medições seguiram a seguinte sistemática, onde a impressão do rebolo no cilindro gerou dois tipos de superfícies, sendo (a) em alto relevo, este referente ao desgaste sofrido pelo rebolo e (b) em baixo relevo, a qual é referente a superfície do rebolo onde não houve ensaio. A marca relativa ao desgaste ficava disposta entre duas superfícies referentes a superfície não desgastada do rebolo (Figura 31).

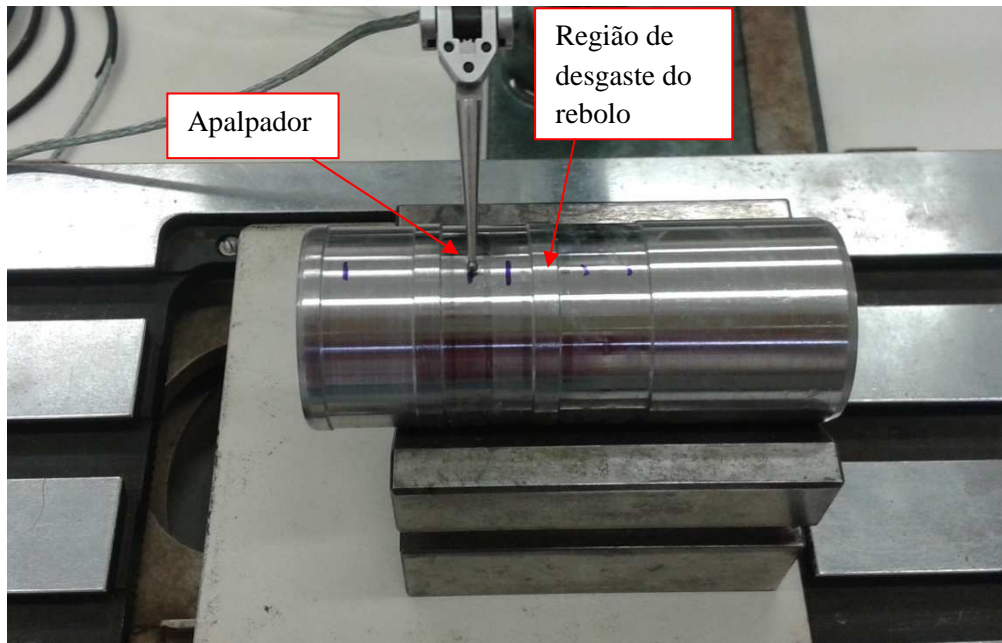


Figura 31 - Marcas de impressões no cilindro dos desgastes do rebolo.

A Figura 32, proposta por Ferrari (2015), contribui para um melhor entendimento das condições de medições do desgaste do rebolo.

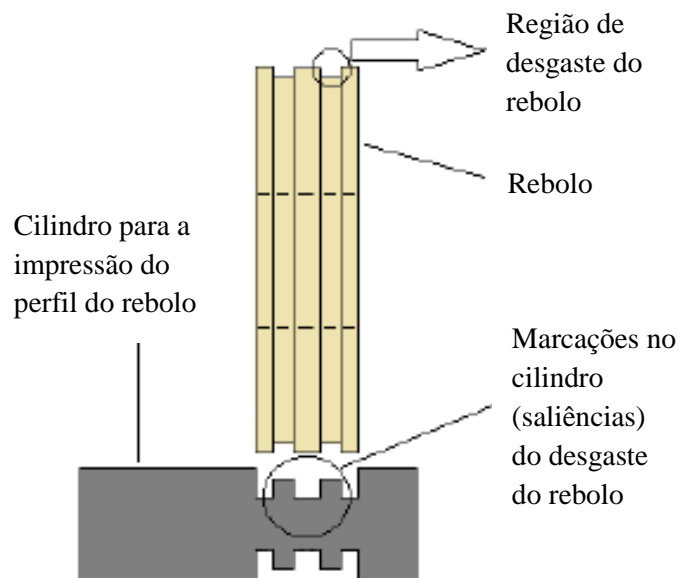


Figura 32 - Desenho esquemático das medições de desgaste do rebolo.

Fonte: Ferrari (2015).

Com base nesta condição, para o cálculo do desgaste do rebolo, foi necessário obter a altura deste degrau formado no cilindro. Para obter este valor, o procedimento adotado foi, para cada ponto medido, posicionava-se o apalpador neste ponto, o valor de referência era descrito no equipamento digital, o qual era anotado em uma planilha eletrônica. Em seguida, deslocava-se a mesa coordenada longitudinalmente, de forma a colocar o apalpador em uma das superfícies do cilindro onde não se localizava a marca em alto relevo. Registrava-se este valor e o mesmo procedimento era realizado para a outra superfície não desgastada.

Após os registros destes valores, calculava-se a diferença entre o valor no centro e o valor das superfícies não desgastadas e, em seguida, calculava-se a média destes valores, obtendo para cada ponto, o valor médio do desgaste referente a cada ensaio.

3.3.3.8 Dressagem do rebolo

Durante a realização dos ensaios as operações de dressagem do rebolo superabrasivo de CBN foram realizadas com a utilização de dressador do tipo conglomerado. O procedimento para dressagem do rebolo era realizado após a retificação de cada duas peças, considerando que, devido a largura do rebolo, era possível retificar duas peças, uma após a outra, a cada lado do rebolo.

Após cada dupla de peças retificadas, eram realizadas as operações de dressagem do rebolo fazendo uso de 40 passes, totalizando 2 μm a cada operação de dressagem. A velocidade utilizada para a dressagem do rebolo foi de 100 mm/min.

Na Figura 33 é possível visualizar a instalação para o processo e dressagem do rebolo de CBN.

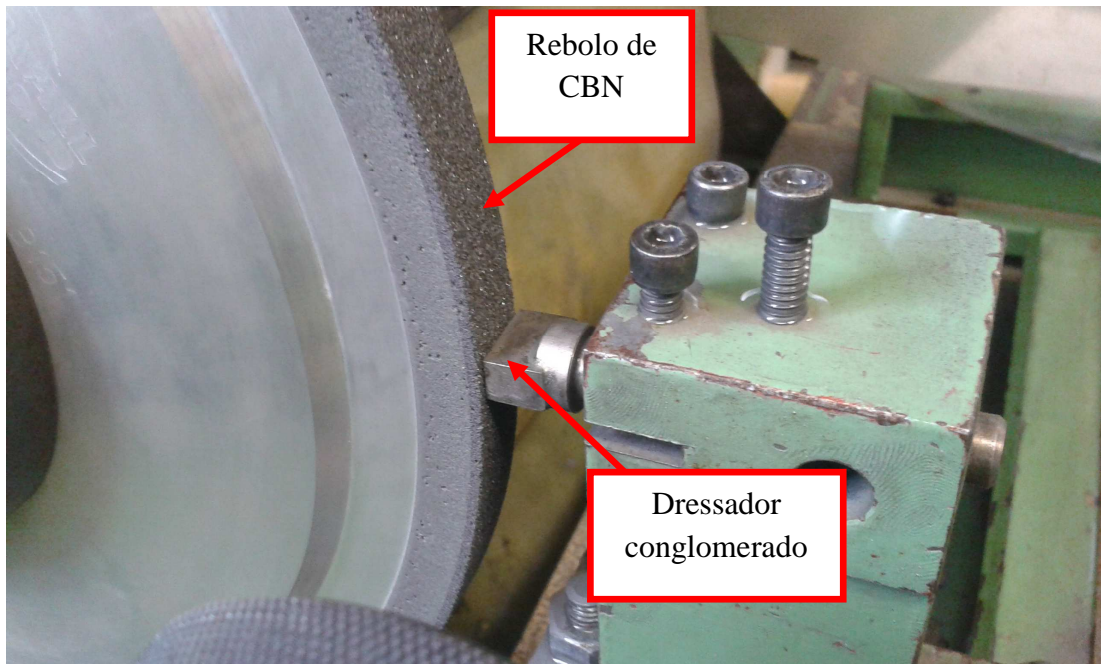


Figura 33 - Aspecto visual das operações de dressagem do rebolo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão descritos os resultados obtidos das variáveis de saída para cada condição de retificação realizada, sendo: rugosidade, desvios de circularidade, desgaste diametral do rebolo, microdureza e metalografia por meio do exame de microscopia óptica.

Conforme descrito nos procedimentos experimentais, foram realizadas duas diferentes condições de retificação variando-se os tipos de sistemas de lubri-refrigeração, sendo o convencional ou abundante e o otimizado ou por alta velocidade. Para ambas as situações foi utilizado um rebolo de CBN com ligante vitrificado. Nas duas condições de retificação variou-se também três diferentes velocidades de mergulho, sendo: 0,25 mm/min; 0,50 mm/min e 0,75 mm/min

Os resultados das variáveis de saída foram descritos em gráficos de colunas, os quais foram elaborados com base nas médias das medições dos ensaios.

4.1 Rugosidade

As Figuras 34 e 35 apresentam os resultados obtidos para a rugosidade média (R_a) das peças ensaiadas, na interação entre a geometria dos corpos de prova com a variação da velocidade de mergulho, com uso da refrigeração convencional e por alta velocidade, respectivamente.

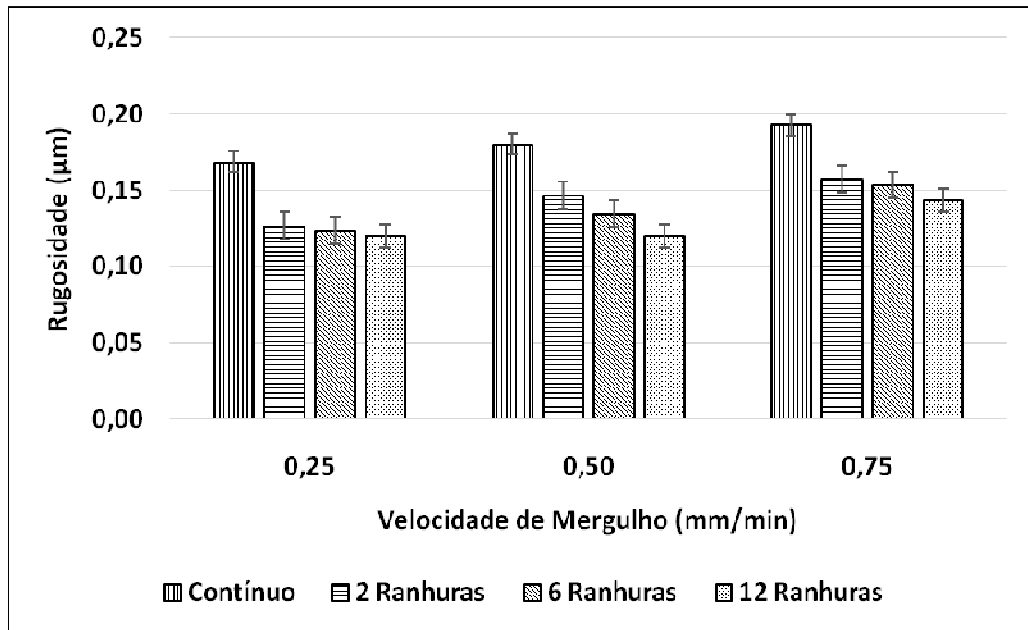


Figura 34 - Interação entre velocidade de mergulho e rugosidade das peças retificadas com refrigeração convencional.

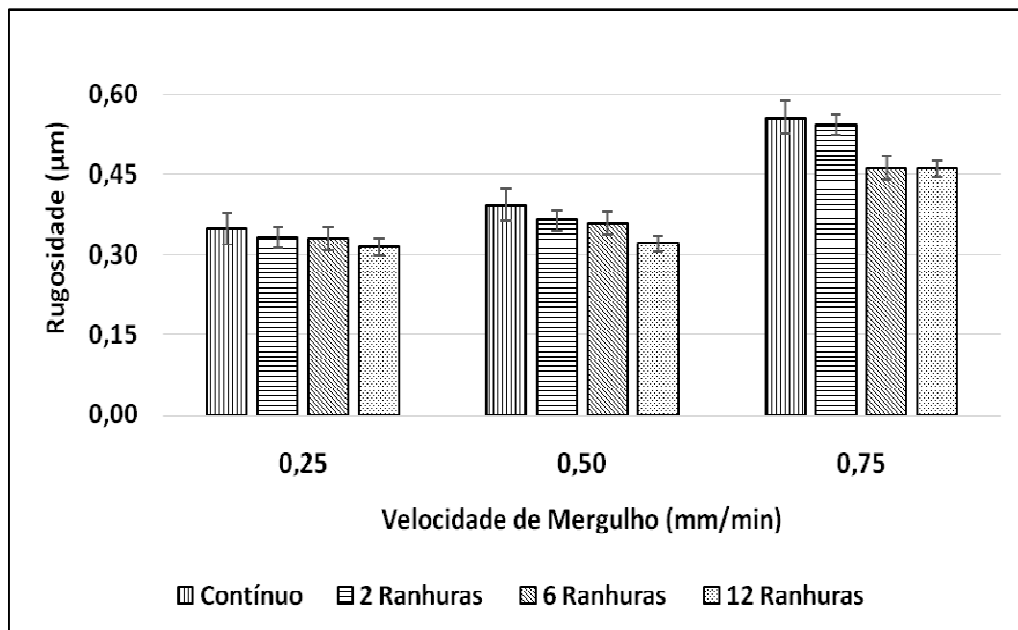


Figura 35 - Interação entre velocidade de mergulho e rugosidade das peças retificadas com refrigeração por alta velocidade.

Nas Figuras 34 e 35, é possível observar que o aumento da velocidade de mergulho (mm/min) interfere na qualidade do acabamento da peça trabalhada, devido ao aumento da rugosidade (μm). Este efeito é observado tanto para os corpos de provas com geometria contínua quanto para os corpos de prova utilizados nos ensaios com os diferentes tipos de interrupções nas geometrias, nos dois diferentes tipos de sistemas de refrigeração utilizados.

Resultados semelhantes foram observados por Mello et al. (2015) em ensaios de retificação ao utilizarem corpos de prova com geometria interrompida, com 2, 6 e 12 ranhuras. De acordo com Alves et al. (2008), com o aumento da velocidade de mergulho a taxa de remoção de material da peça é maior, o que torna o processo mais severo.

O aumento da rugosidade em função da elevação da velocidade mergulho observado nas Figuras 34 e 35 é explicado com base no trabalho de Mello et al. (2018), onde obtiveram os mesmos resultados em retificação de material com geometria interrompida devido aos choques mecânicos do rebolo nos cantos das peças com ranhuras.

No entanto, ressalta-se que os resultados apresentados nas Figuras 34 e 35 foram obtidos por meio da retificação de peças com o uso de um rebolo superabrasivo de CBN, enquanto que nas pesquisas anteriormente realizadas, o tipo de rebolo utilizado foi de óxido de alumínio.

Os resultados dos ensaios experimentais de Alves et al. (2008) também demonstraram aumentos de rugosidade em função do acréscimo da velocidade de mergulho. Em velocidades de mergulho mais baixa, o calor flui para longe da zona de contato (PAKNEJAD et al., 2017).

Complementando, Tao et al. (2017) também associam o aumento da taxa de mergulho à elevação dos níveis de rugosidade das peças retificadas, devido ao efeito de sobrecarga imposta a cada abrasivo provocando o aumento da temperatura na interface peça-rebolo. A velocidade de avanço exerce grande influência na deflexão e rugosidade das peças (RAMANAIAH, 2018).

Ainda, nas Figuras 34 e 35, nota-se que, para as três diferentes condições de velocidade de mergulho, maiores valores de rugosidade foram constatados para os corpos de prova com geometria contínua. Este fenômeno ocorreu devido a uma menor eficiência do fluxo de fluido de corte na área de contato durante a retificação dos corpos de prova com este tipo de geometria.

Tal efeito é explicado com base nos resultados experimentais de Kirsch e Aurich (2014) que, ao compararem os efeitos do fluxo de fluido de corte em operação de retificação, neste caso, com uso de um rebolo de superfície inalterada com outro rebolo com ranhuras,

observaram que o líquido refrigerante foi retido e conduzido pelas ranhuras do rebolo, o que pode ter favorecido a refrigeração do processo. Colaborando, Li e Axinte (2016) concluíram que a função da ranhura é servir como reservatório para o transporte do fluxo de fluido de corte para a área de contato, favorecendo a redução da rugosidade. As ranhuras impedem a propagação de calor através da peça e a rotação da peça promove um fluxo de ar através da superfície interrompida, favorecendo redução de temperatura tanto da ferramenta quanto na peça (DINIZ e OLIVEIRA, 2008).

Desta forma, entende-se que, durante a realização dos ensaios, o movimento de rotação da peça na operação de retificação, com os corpos de prova com geometria descontínua, as ranhuras contribuíram para a penetração e deslizamento do fluido de corte na área de contato, colaborando para a uma melhor refrigeração do processo, efeito este não ocorrido com os corpos de prova com geometria contínua, o que ajuda a explicar os maiores índices de rugosidade das peças com geometria contínua demonstrados nas Figuras 34 e 35.

Entretanto, embora os resultados dos corpos de prova ensaiados com os dois diferentes sistemas de refrigeração apresentem similitudes nas tendências de comportamento na interação entre velocidade de mergulho e geometria das peças, nota-se que os níveis de rugosidade das peças retificadas com refrigeração por alta velocidade (Figura 35) superaram os níveis de rugosidade das peças retificadas com refrigeração convencional (Figura 34).

Este fenômeno é explicado em função dos elevados índices de vibração da máquina (Figura 45) ocorridos durante os ensaios com o uso da refrigeração por alta velocidade.

Sousa et al. (2011) ao pesquisarem dois diferentes métodos de refrigeração em operações de retificação, descreveram que a vibração provoca uma diminuição considerável na qualidade superficial da peça.

França (2009), Conceição Junior (2016) e Yuvaraju e Nanda (2018) também observaram elevação dos níveis de rugosidade em corpos de prova em função da aceleração gradativa da vibração em processo de retificação.

Desta forma, entende-se que a intensidade do jato de fluido direcionado diretamente para a área de contato rebolo-peça provocou níveis consideráveis de vibrações na máquina elevando os níveis de rugosidade das peças retificadas com refrigeração por alta velocidade, efeito este constatado nas quatro diferentes geometrias dos corpos de prova.

4.2 Desvios de Circularidade

As Figuras 36 e 37 apresentam os resultados obtidos para os desvios de circularidade das peças ensaiadas, na interação entre a geometria dos corpos de prova com a variação da velocidade de mergulho, com uso da refrigeração convencional e por alta velocidade, respectivamente.

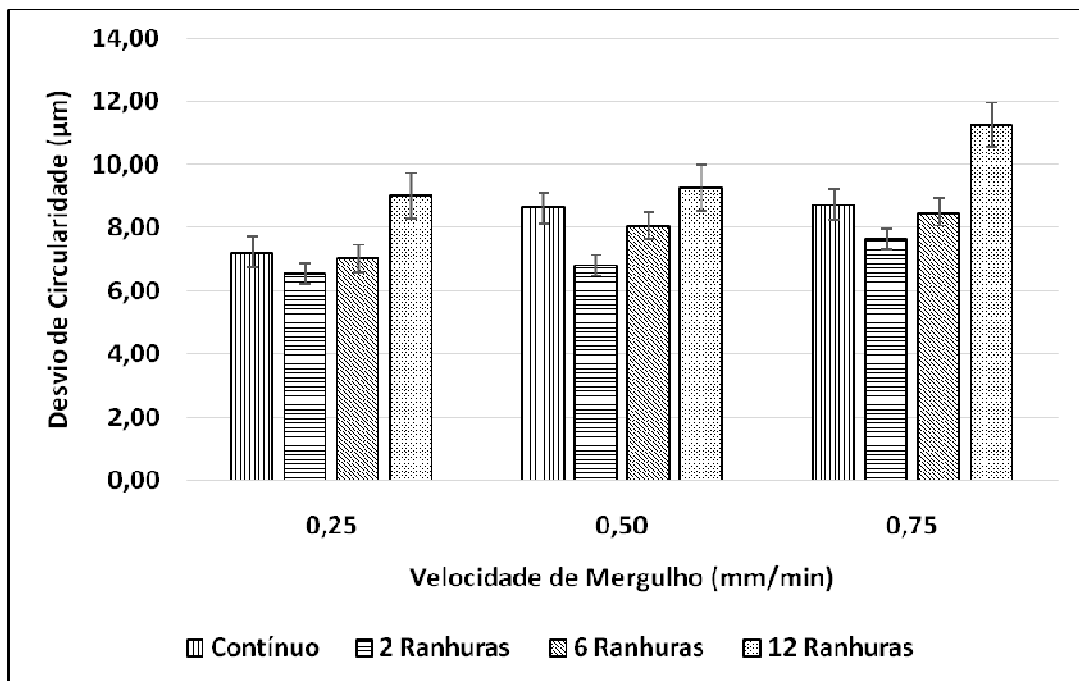


Figura 36 - Interação entre velocidade de mergulho e desvio de circularidade das peças retificadas com refrigeração convencional.

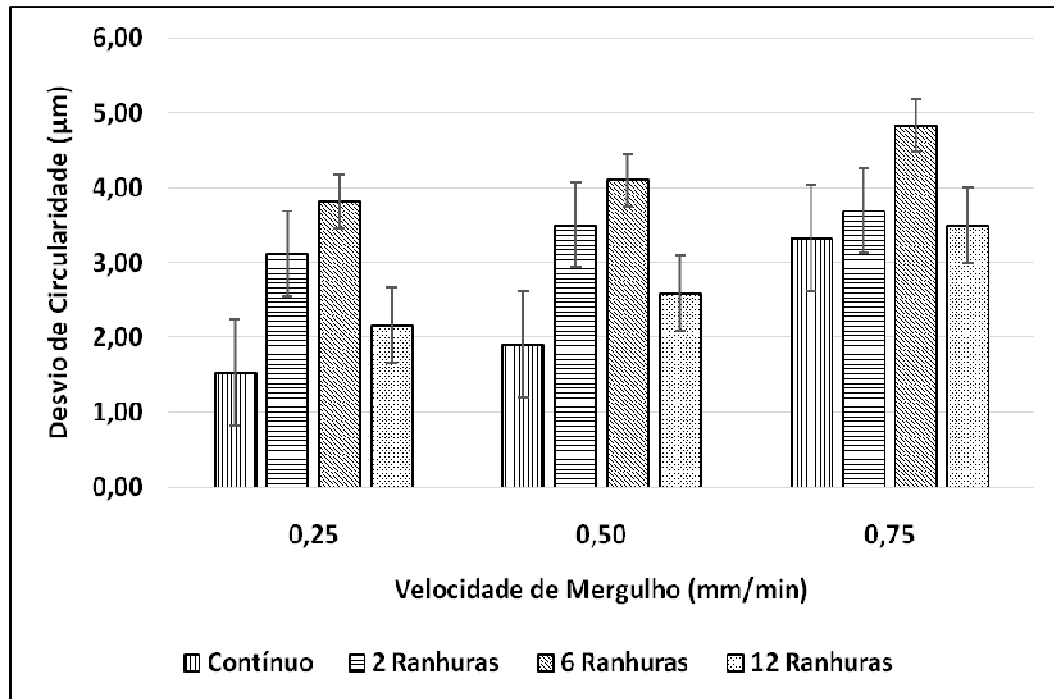


Figura 37 - Interação entre velocidade de mergulho e desvio de circularidade das peças retificadas com refrigeração por alta velocidade.

Comparando os resultados das Figuras 36 e 37 nota-se menores níveis desvios de circularidade nas peças retificadas com o uso do fluido de corte sob alta velocidade. Resultados semelhantes também foram obtidos no trabalho de Alves et al. (2010) ao comprovarem a superioridade da aplicação do fluido de corte sob alta velocidade em relação ao sistema convencional. Os autores concluíram que para maiores velocidades de aplicação de fluido de corte, menores níveis de desvios de circularidade foram constatados. Este efeito é explicado devido ao fato de que o direcionamento do jato na área de contato contribui para a expulsão do cavaco e melhoria da refrigeração, diminuindo a temperatura na interface peça-rebolo, favorecendo a redução dos níveis de desvios de circularidade do material retificado.

É possível observar na Figuras 36 uma tendência de aumento do desvio de circularidade (μm) em função da elevação da velocidade de mergulho. Resultados semelhantes foram obtidos no trabalho de Mello et al. (2015), neste caso fazendo uso de rebolo de óxido alumínio, onde os autores justificaram que os desvios de circularidade ocorreram em função do aumento da velocidade de avanço do rebolo devido ao fato de que, ao aumentar a taxa de penetração do rebolo, a peça retificada é submetida a maiores taxas de

compressão, intensificando a tensão residual e, conseqüentemente, promove a tendência de desvios de circularidade.

Já na Figura 37, nota-se que os resultados de desvios de circularidade dos corpos de prova retificados com refrigeração por alta velocidade seguiram a mesma tendência observada nos corpos de prova que foram retificados por meio da refrigeração convencional. Ou seja, o aumento da velocidade de mergulho influenciou no desvio de circularidade nas quatro diferentes geometrias de peças ensaiadas.

Analisando de forma mais específica os resultados apresentados na Figura 37, nota-se que na interação entre as três diferentes velocidades de mergulho aplicadas com as quatro diferentes geometrias de peças ensaiadas tem-se realmente uma tendência de aumento de desvio de circularidade para as peças com geometria contínua, 2 ranhuras e 6 ranhuras.

Entretanto, ainda na Figura 37, observa-se que para as peças com geometria de 12 ranhuras, o fenômeno de captura e transporte do fluido para a área de contato na interface rebolo-peça favoreceu os níveis de redução de desvio de circularidade, fenômeno este observado nas três diferentes velocidades de mergulho. Efeitos semelhantes sobre a eficiência das ranhuras na condução do fluido de corte foram relatados por Li e Axinte (2016) e Li e Axinte (2018).

Mello et al. (2018) realizaram um estudo de retificação de peças com geometria interrompida, variando a velocidade de mergulho, utilizando um rebolo de óxido de alumínio por meio de refrigeração otimizada onde observaram maiores níveis de desvios de circularidade nas peças com ranhuras em relação às peças retificadas com geometria contínua, efeito este, segundo os autores, ocasionado em decorrência da elevação do nível de oscilação da máquina-ferramenta, onde, conforme Marinescu et al. (2007), este evento é resultante das tensões alternadas de impacto do rebolo com peças com geometria interrompida.

4.3 Desgaste diametral do rebolo

O desgaste diametral do rebolo (μm) foi medido em função das diferentes geometrias dos corpos de prova e das três diferentes velocidades de mergulho (mm/min) utilizadas nos ensaios. Os resultados foram demonstrados nas Figuras 38 e 39.

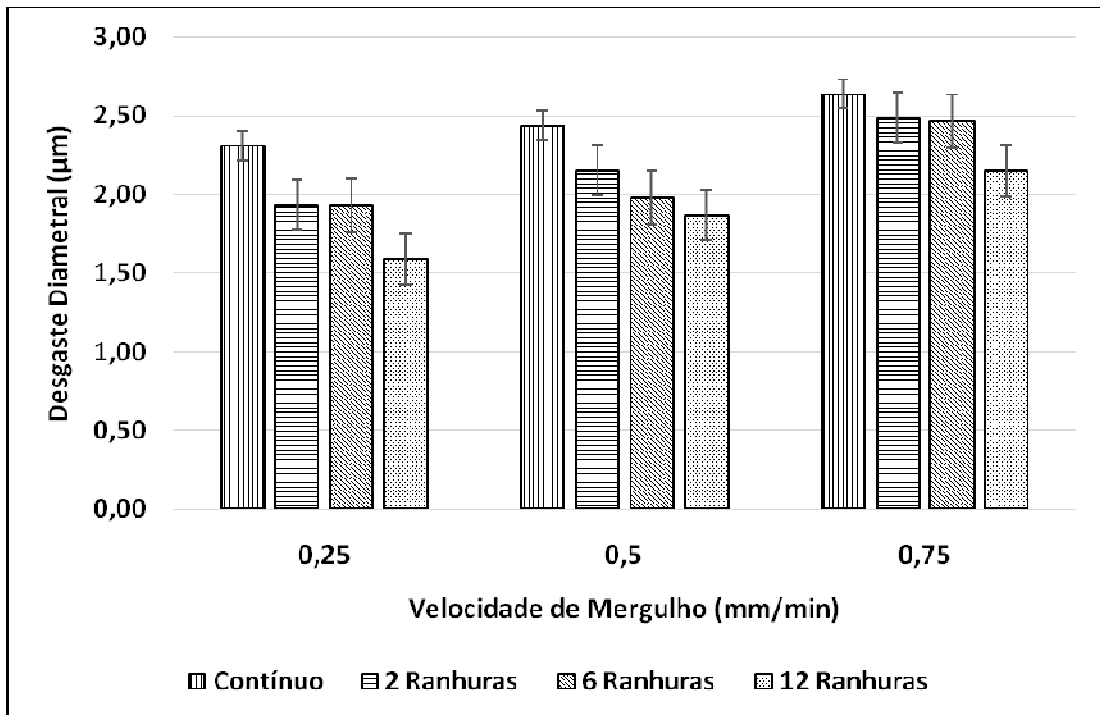


Figura 38 - Interação entre velocidade de mergulho e desgaste do rebolo com refrigeração convencional.

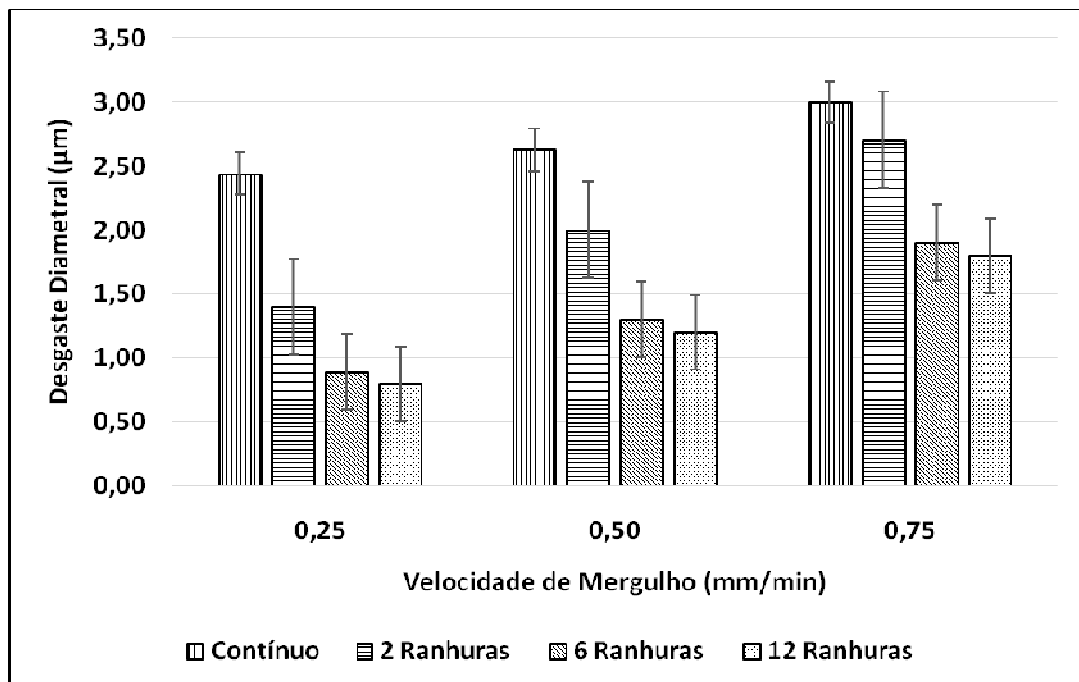


Figura 39 - Interação entre velocidade de mergulho e desgaste do rebolo com refrigeração por alta velocidade.

Nas Figuras 38 e 39, nota-se que o aumento da velocidade de mergulho apresentou uma interação negativa em relação ao desgaste do rebolo, ou seja, à medida que elevou-se a velocidade de mergulho ocorreu uma tendência de aumento do desgaste diametral do rebolo em todas as diferentes geometrias dos corpos de prova. Resultados semelhantes foram descritos por Winter et al. (2015) ao avaliarem o desgaste de rebolo de CBN em operação de retificação com diferentes velocidades de mergulho, os autores observaram similitudes entre o aumento da velocidade de mergulho com o desgaste da ferramenta, efeito este, apontado pelos autores, devido a maior taxa de remoção do material nestas condições.

Complementando, o estudo realizado por Mello et al. (2018) também evidenciou que o aumento na velocidade de mergulho provocou elevação nos níveis de desgaste do rebolo. Segundo os autores, a explicação consiste na intensidade dos choques mecânicos ocorridos entre os grãos do rebolo e a superfície da peça retificada.

Palmer et al. (2018) observaram, em processo de retificação, relações significativas entre o aumento da velocidade de avanço com a elevação dos níveis de desgaste do rebolo.

Já, para os corpos de prova com 12 interrupções, notas-se, nas Figuras 38 e 39, uma tendência, nas três diferentes velocidades de mergulho, de redução do desgaste diametral do rebolo em relação aos corpos de prova com 6 e 2 interrupções, bem como para os corpos de prova com geometria contínua. Este efeito está relacionado com a hipótese de que a maior quantidade de ranhuras pode ter favorecido as condições de refrigeração da operação de retificação, efeito este observado por Li e Axinte (2016), que concluíram que as ranhuras contribuem para o transporte de fluido de corte para a área de contato com conseqüente redução da temperatura.

Nos ensaios com corpos de prova com 12 ranhuras, além da redução da temperatura, a captura e transporte de fluido pelas ranhuras favoreceram a expulsão do cavaco na área de contato levando a uma redução do desgaste diametral do rebolo. Além do mais, o aumento da quantidade de ranhuras promoveu menores níveis de remoção do volume do material.

Já os maiores valores de desgaste diametral do rebolo, foram obtidos em corpos de prova com geometria contínua. Esta condição foi observada nas três diferentes velocidades de mergulho utilizadas nos ensaios, bem como nos dois diferentes tipos de refrigeração aplicados. Este efeito é explicado em função do atrito constante provocado na interação entre peça e ferramenta, levando a um desgaste maior do rebolo. Esta condição não ocorreu nos corpos de prova com ranhuras em sua geometria. Embora os impactos do rebolo nas quinas das peças segmentadas provoquem o desgaste da ferramenta, o que se constatou, neste

experimento, é que o atrito constante entre a ferramenta e a peça com geometria contínua foi superior, promovendo maior desgaste diametral do rebolo.

Nas Figuras 38 e 39, observa-se um comportamento de elevação do desgaste do rebolo em função do aumento da velocidade de mergulho. Nota-se também uma tendência de redução considerável dos níveis de desgaste do rebolo na medida em que aumentasse a quantidade de ranhuras das peças, em especial com o sistema de refrigeração por alta velocidade, o que demonstra a eficiência do uso da refrigeração otimizada com o jato direcionado na zona de contato e a sua superioridade em relação ao sistema de refrigeração abundante no processo retificação, no que se refere ao melhor aproveitamento do rebolo e menores níveis de desgaste da ferramenta.

De uma forma geral, por meio das Figuras 38 e 39, notas-se níveis inferiores de desgaste diametral do rebolo com o uso da refrigeração por alta velocidade onde, para este efeito, Alves et al. (2010) explicaram a eficiência da refrigeração do sistema otimizado nas operações de retificação de peças, pois segundo os autores, as altas velocidades envolvidas no processo de refrigeração contribuem para a entrada do lubrificante na área de contato no conjunto peça-rebolo, diminuindo o atrito da peça com a ferramenta.

4.4 Emissão acústica

As Figuras 40 e 41 apresentam os resultados obtidos para a emissão acústica (EA) das peças ensaiadas, na interação entre a geometria dos corpos de prova com a variação da velocidade de mergulho, com refrigeração convencional e alta velocidade, respectivamente.

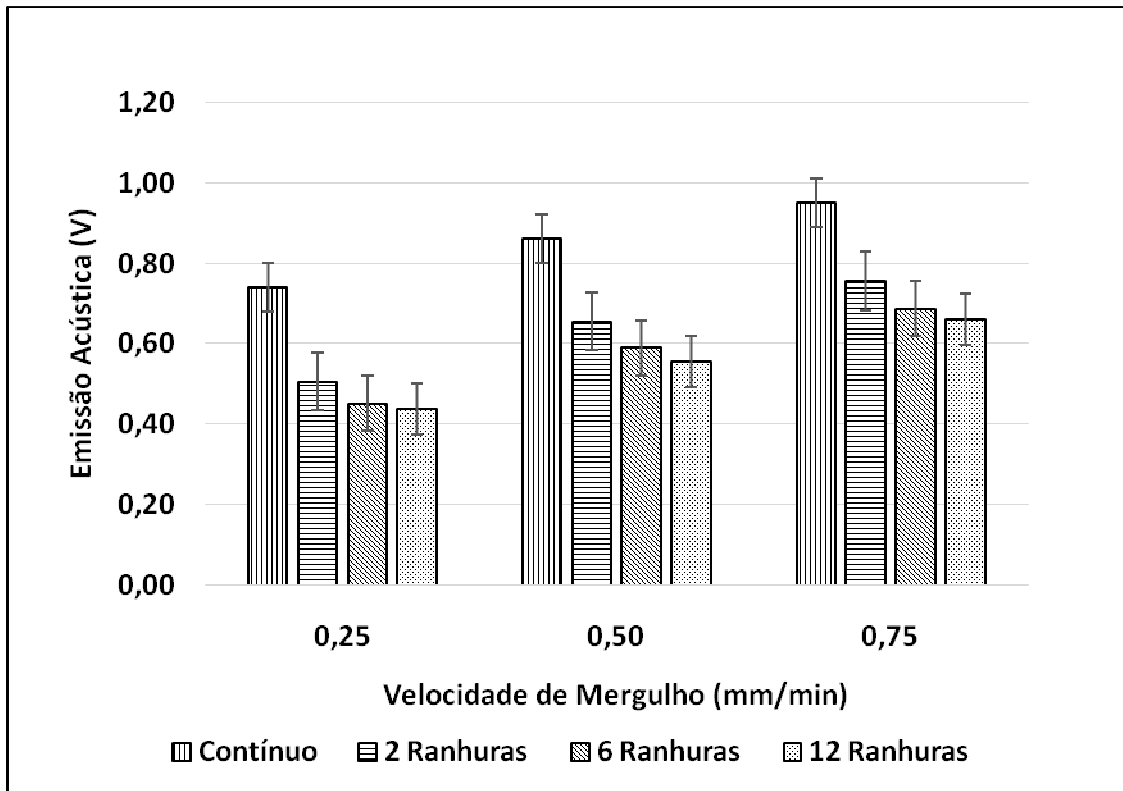


Figura 40 - Interação entre velocidade de mergulho e emissão acústica com refrigeração convencional.

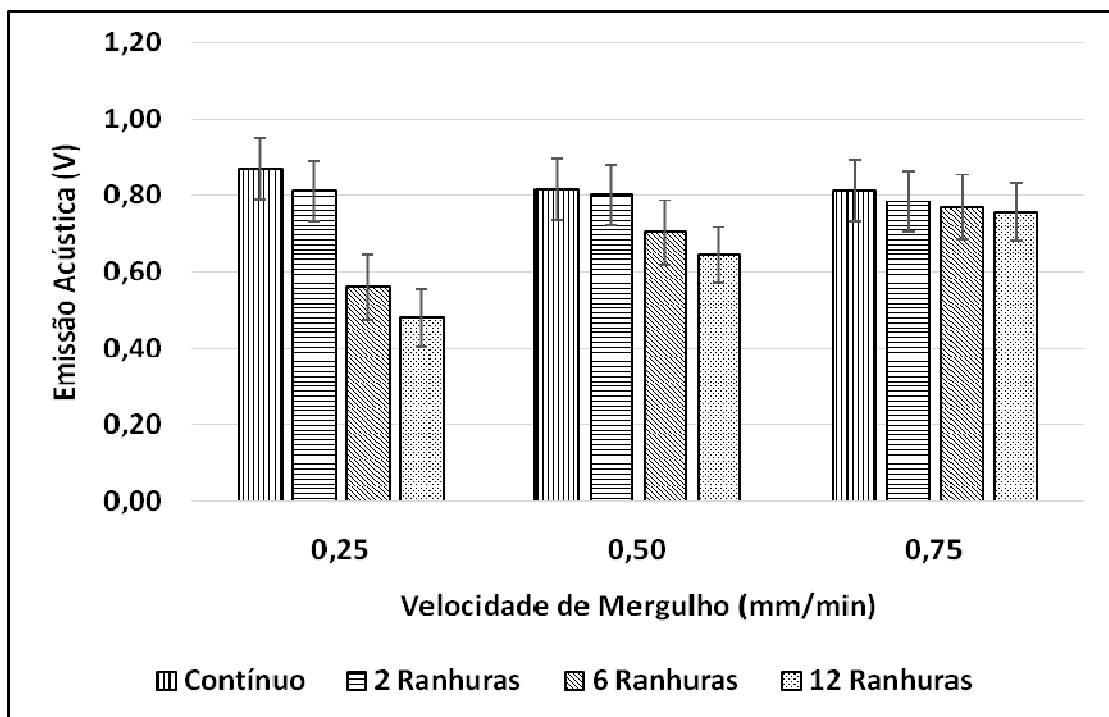


Figura 41 - Interação entre velocidade de mergulho e emissão acústica com refrigeração por alta velocidade.

Nota-se nas Figuras 40 e 41 que o aumento na velocidade de mergulho exerce influência na elevação do nível de emissão acústica. Para Moia et al. (2015), à medida que o material é usinado, a estrutura dos grãos abrasivos do rebolo muda rapidamente, provocando um efeito direto nos níveis de emissão acústica, o que reflete na remoção do material da peça. Complementando, de acordo com Jayakumar et al. (2005), existe uma relação direta entre os sinais de emissão acústica emitidos durante o processo de retificação com as deformações geradas na peça trabalhada. Na Figura 36 é possível observar este efeito.

Bhuiyan et al. (2016) realizaram uma pesquisa experimental e constataram que amplitude do sinal de emissão acústica aumentou diretamente com desgaste da ferramenta e com o aumento da profundidade de usinagem, ou seja, com o aumento da taxa de remoção do material. À medida que ocorre um aumento na profundidade de usinagem, a temperatura se eleva, bem como ocorre um aumento do nível de emissão acústica (BIANCHI et al., 1997).

Nas três diferentes velocidades de mergulhos analisadas, nota-se maiores valores de emissão acústica nos corpos de prova com geometria contínua. Já nos corpos de prova com geometria interrompida, observa-se uma tendência de redução dos níveis de emissão acústica à medida que se aumenta a quantidade de ranhuras dos corpos de prova. Com base na pesquisa de Li e Axinte (2016), a explicação deste efeito é devido a maior eficiência do sistema de refrigeração na medida em que se aumenta a quantidade de ranhuras.

Por fim, constatou-se que os resultados de emissão acústica para os ensaios com refrigeração com alta velocidade mantiveram a mesma tendência dos resultados obtidos por meio da refrigeração convencional. Ou seja, comprovou-se que a relação de influência do aumento da velocidade de mergulho na elevação dos níveis de emissão acústica é a mesma para os dois diferentes tipos de sistemas de refrigeração adotados nos ensaios.

Resultados semelhantes foram relatados por Alves et al. (2009) ao estudarem os níveis de emissão acústica em ensaios de retificação com o uso dos sistemas de lubrificação convencional e otimizado. Os autores observaram que não ocorreram grandes variações nos níveis de emissão acústica, e consideraram que este efeito ocorreu em função da eficiência dos dois sistemas de refrigeração em manter a condição de afiação do rebolo durante a operação de retificação.

4.5 Potência de corte

As Figuras 42 e 43 apresentam os resultados obtidos para a potência de corte consumida no processo de retificação, na interação entre a geometria dos corpos de prova com a variação da velocidade de mergulho, com uso de sistemas de refrigeração convencional e alta velocidade, respectivamente.

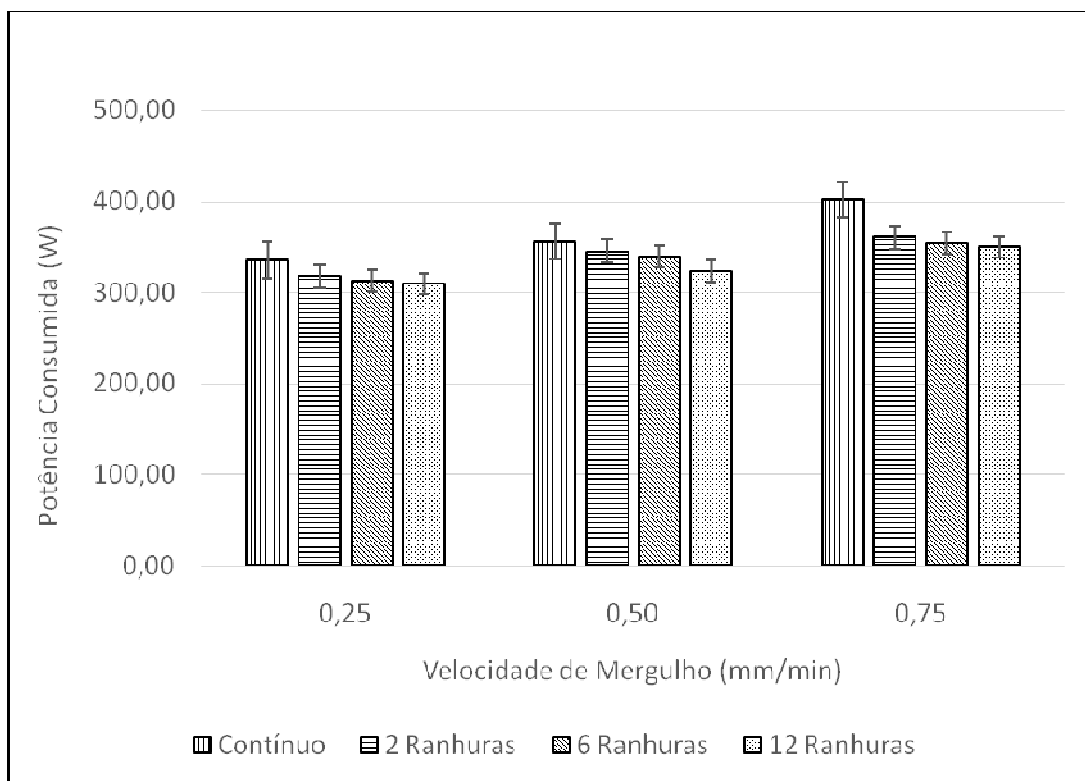


Figura 42 - Interação entre velocidade de mergulho e potência consumida com refrigeração convencional.

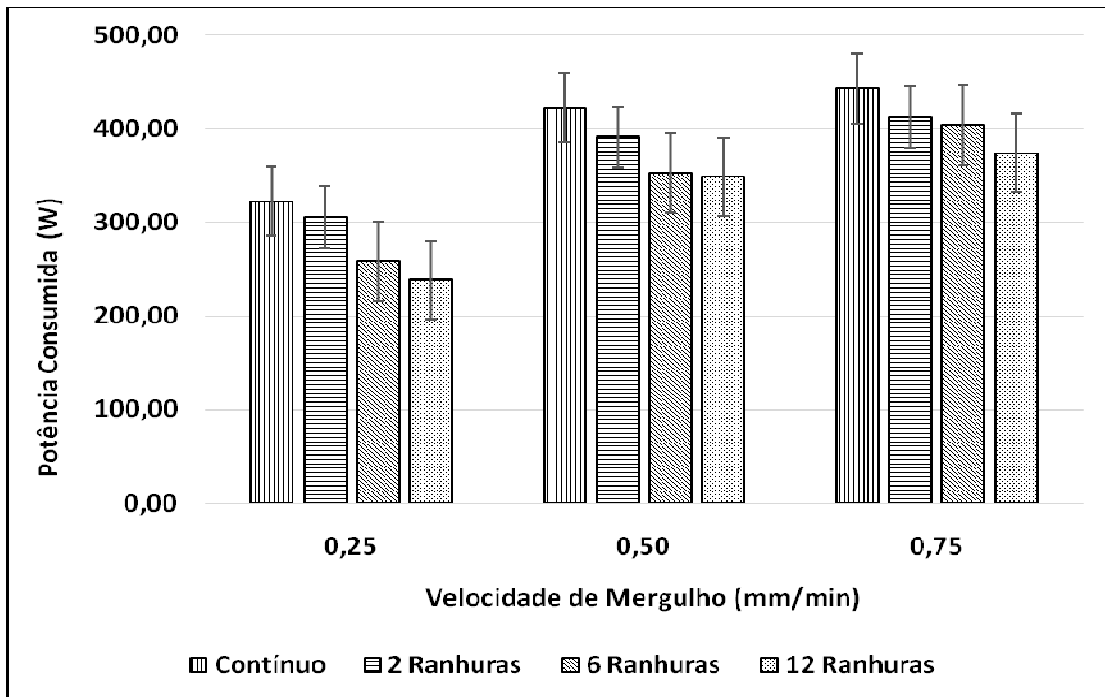


Figura 43 - Interação entre velocidade de mergulho e potência consumida com refrigeração por alta velocidade.

Conforme observado nas Figuras 42 e 43, de forma similar ao que ocorreu com os resultados de emissão acústica, a potência consumida também aumentou na medida em que se elevou a velocidade de mergulho. No trabalho de retificação de Palmer et al. (2018) foram observados efeitos semelhantes.

De acordo com Sun et al. (2015), as forças de retificação tendem a aumentar em proporção direta com a profundidade de usinagem e, desta forma, entende-se que a potência consumida aumentará, devido a maiores esforços exigidos pela máquina.

A potência consumida durante a operação de retificação foi maior para os corpos de prova com geometria contínua, e esta tendência é observada para as três diferentes velocidades de mergulho utilizadas durante os ensaios, nos dois diferentes tipos de sistemas de refrigeração adotados nos ensaios. Este fenômeno ocorreu devido ao atrito constante entre o rebolo e a ferramenta. Efeito este não ocorrido para os corpos de prova com geometria interrompida, onde se observa que existe uma tendência de redução da potência consumida na medida em que se aumenta a quantidade de ranhuras das peças. A base para a explicação desta tendência consiste no fato de que, durante a operação de retificação, as ranhuras das

peças proporcionam um breve período de inatividade na área de contato, o que, de certa forma, promove alívios instantâneos na interação rebolo-peça, favorecendo súbitas reduções de potência consumida. Logo, quanto maior a quantidade de ranhuras, menor será a potência consumida durante as operações de retificação. Este fenômeno fica mais evidente quando se observa na Figura 43, uma redução significativa na potência consumida durante a retificação dos corpos de prova com geometria de 6 e 12 ranhuras com velocidade de mergulho de 0,25 mm/min.

Ademais, considerando que, conforme Li e Axinte (2016), as ranhuras favorecem o sistema de refrigeração, então, entende-se que as ranhuras favoreceram a redução da temperatura e do atrito o que contribuiu para a redução da potência consumida, em especial com o uso de refrigeração por alta velocidade.

4.6 Vibração

As Figuras 44 e 45 ilustram os resultados obtidos para a vibração no processo de retificação, na interação entre a geometria dos corpos de prova com a variação da velocidade de mergulho, com uso de sistemas de refrigeração convencional e alta velocidade, respectivamente.

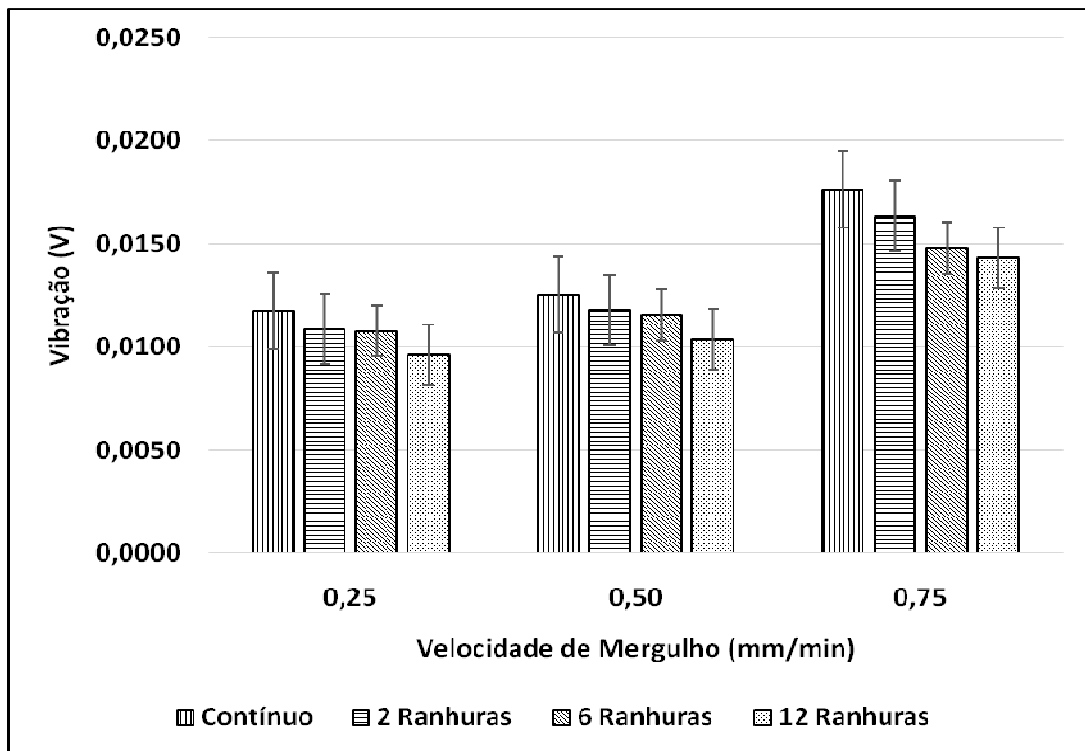


Figura 44 - Interação entre velocidade de mergulho e vibração com refrigeração convencional.

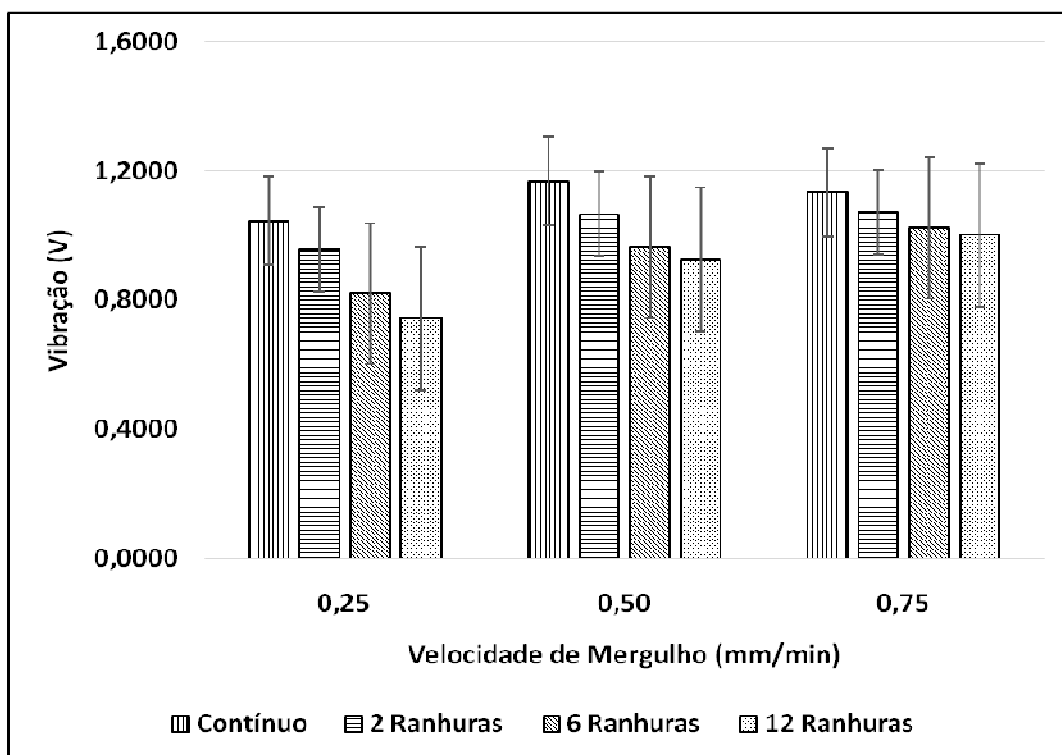


Figura 45 - Interação entre velocidade de mergulho e vibração com refrigeração por alta velocidade.

Nas Figuras 44 e 45, é possível observar que tanto para os corpos de prova com geometria contínua quanto para os corpos de prova com geometria interrompida, ocorreu um aumento da vibração à medida que se elevou a velocidade de mergulho. Resultados semelhantes também foram constatados no trabalho de Conceição Junior (2016), onde o autor concluiu que vibração é diretamente proporcional ao aumento da severidade do processo de retificação.

Já com relação aos corpos de prova segmentados, o que se observa é que, da mesma forma que ocorreu com resultados de emissão acústica e potência, houve uma tendência de redução dos níveis de vibração na medida em que aumentou a quantidade de ranhuras. Efeito este observado nas três diferentes velocidades de mergulho adotadas nos ensaios. Desta forma, entende-se que o efeito do alívio do atrito, provocado pelos instantes de inatividade na relação peça-rebolo devido à geometria interrompida das peças, somado à melhor eficiência do sistema de transporte de fluido pelas ranhuras, contribuíram para a redução da vibração no processo de retificação.

Entretanto, é notável a diferença expressiva dos níveis de vibração (V) registrados durante as operações de retificação com os dois diferentes sistemas de refrigeração utilizados nos ensaios. Os elevados índices de vibração observados durante a retificação sob refrigeração por alta velocidade indicam os efeitos provocados pela intensidade do jato de fluido de corte direcionado diretamente para a área de contato do conjunto rebolo-peça.

Colaborando, Lin et al. (2018), também constataram em ensaios de retificação de peças que a alta rotação causa a vibração na interface peça-rebolo, o que provoca ruídos de sinal.

4.7 Microdureza

Nas Figuras 46 e 47 é possível comparar os resultados dos perfis de microdureza para cada geometria dos corpos de prova ensaiados, em função das diferentes velocidades de mergulho aplicadas durante os ensaios.

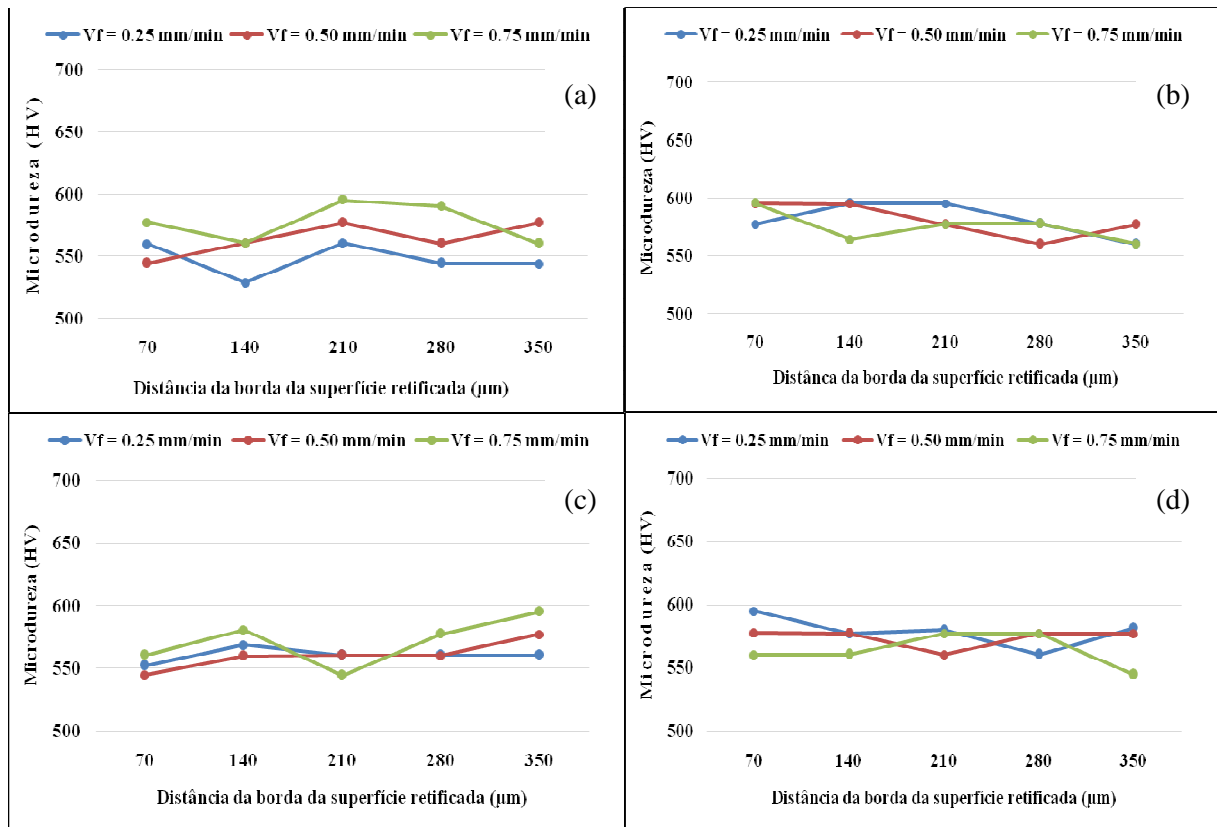


Figura 46 - Perfil de microdureza das peças retificadas com refrigeração convencional.

Legenda: (a) geometria contínua (b) 2 ranhuras (c) 6 ranhuras e (d) 12 ranhuras

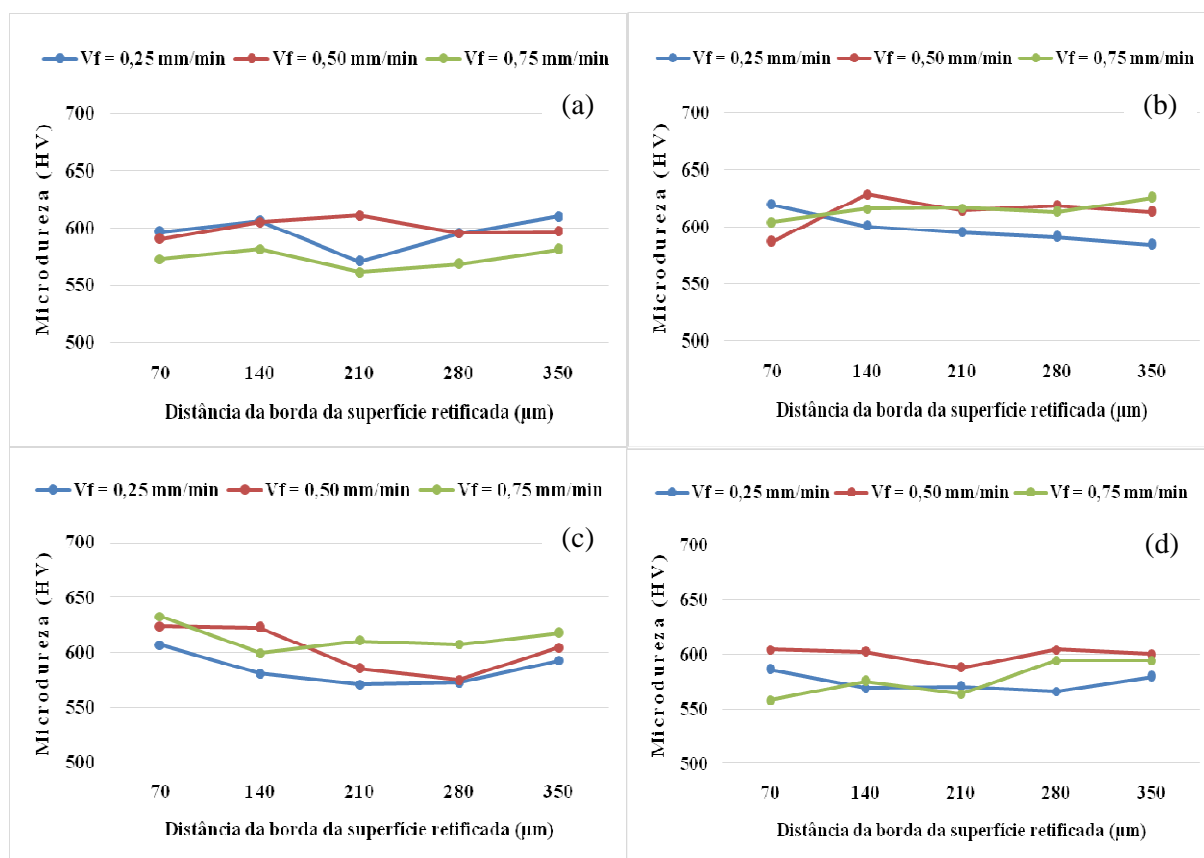


Figura 47 - Perfil de microdureza das peças retificadas com refrigeração por alta velocidade. Legenda: (a) geometria contínua (b) 2 ranhuras (c) 6 ranhuras e (d) 12 ranhuras.

Nas Figuras 46 e 47, é possível verificar que, para os quatro diferentes tipos de geometrias utilizadas nesta pesquisa, os perfis de microdureza não apresentaram alterações expressivas na medida em que o indentador se distanciou da borda. Este efeito é observado também nas três diferentes variações de velocidade de mergulho aplicadas nos ensaios. Convergindo com os resultados desta pesquisa, Silva (2014), em seu trabalho, ao variar três diferentes velocidades de mergulho, sendo 0,25 mm/min, 0,50 mm/min. e 0,75 mm/min., também verificou dispersões pequenas nos resultados de microdureza onde considerou tais dispersões como sendo típicas de medições de microdureza.

Desta forma, considerando que, de uma forma geral, as variações de dureza mantiveram-se próximas a dureza do material anterior à retificação, considera-se que as dispersões verificadas não foram suficientes para afirmar que o material sofreu mudanças estruturais da superfície retificada. Efeito este constatado nas três diferentes velocidades de mergulho e nas quatro diferentes geometrias dos corpos de prova.

Kumar et al. (2011) comentaram que, como o processo de retificação gera calor excessivo na área de contato, o efeito da elevação de temperatura seguido de um arrefecimento rápido pelo fluido de corte induz a uma deformação plástica do material, ao longo da superfície da peça retificada, afetando as condições de microdureza. As temperaturas de retificação, em alguns casos, podem superar a temperatura do revenimento anterior à retificação provocando uma redução de dureza na superfície retificada (OLIVEIRA, 2011).

Neste caso, tendo em vista os níveis de variações de microdureza observadas nas Figuras 46 e 47, entende-se que as condições e parâmetros adotados nos ensaios, incluindo o sistema de refrigeração, favoreceram a integridade da propriedade de dureza das peças retificadas.

4.8 Microscopia Óptica

As Figuras 48 e 49 apresentam os resultados obtidos por meio da microscopia óptica após os ensaios de retificação do corpo de prova com diferentes geometrias sob a velocidade de mergulho de 0,75 mm/min.

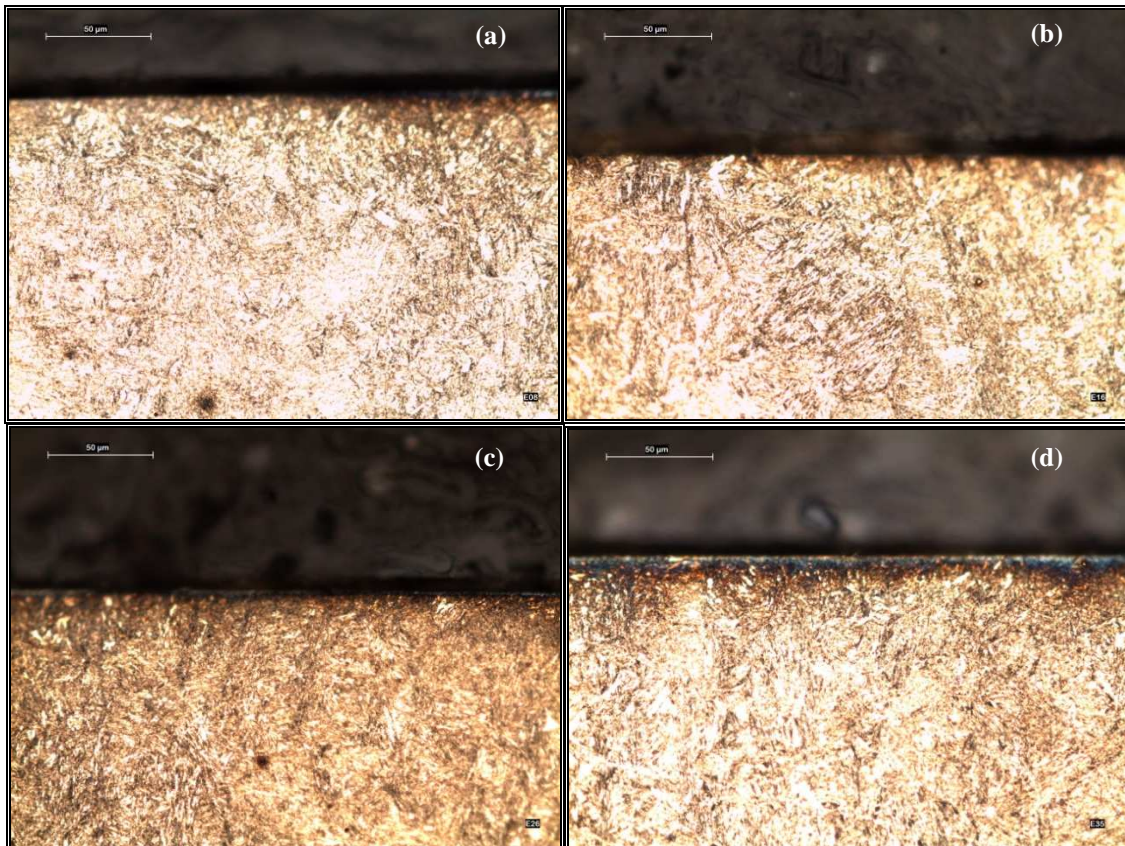


Figura 48 - Microscopia óptica do corpo de prova retificado com refrigeração convencional

$V_f = 0,75 \text{ mm/min}$

Legenda: (a) geometria contínua (b) 2 ranhuras (c) 6 ranhuras e (d) 12 ranhuras

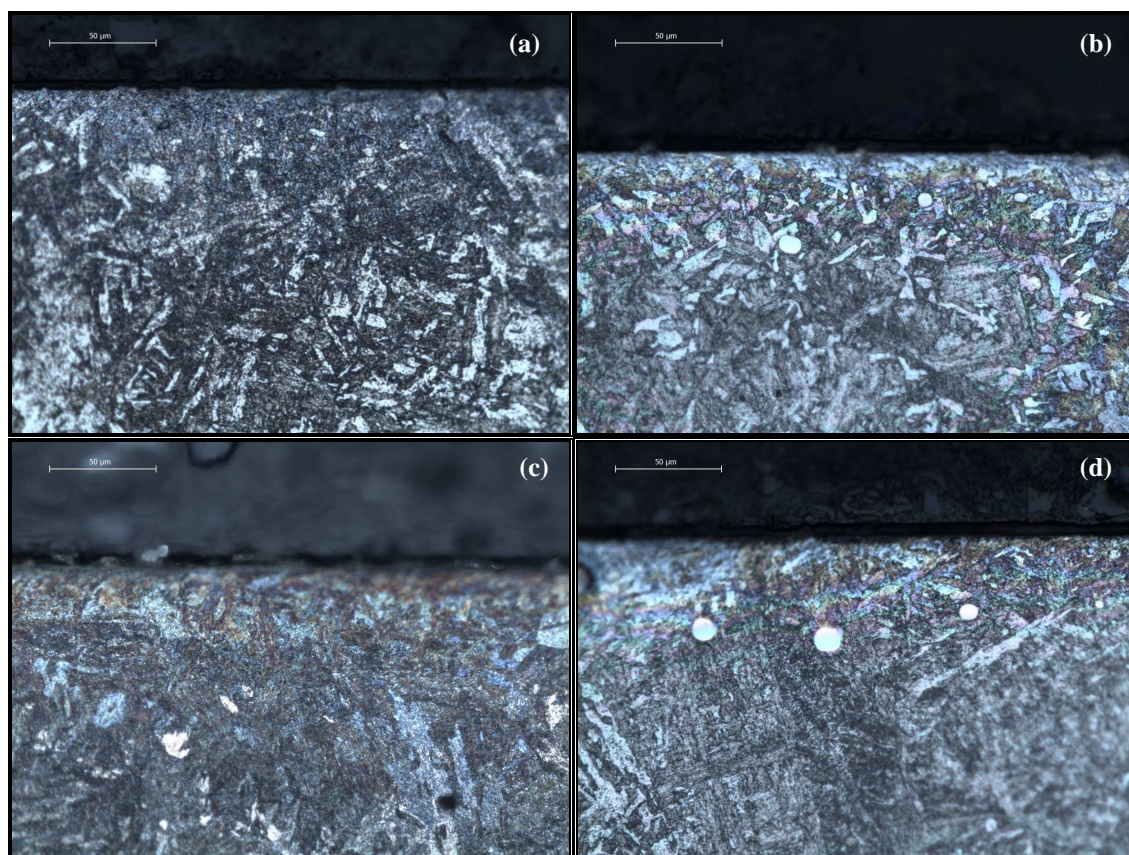


Figura 49 - Microscopia óptica do corpo de prova retificado com refrigeração por alta velocidade $V_f = 0,75$ mm/min

Legenda: (a) geometria contínua (b) 2 ranhuras (c) 6 ranhuras e (d) 12 ranhuras

Observa-se nas Figuras 48 e 49, nota-se que não ocorreram danos térmicos na superfície das peças retificadas, o que contribui para a qualidade microestrutural, bem como para a resistência mecânica do material usinado, independentemente do tipo de geometria (contínua ou interrompida) e da quantidade de ranhuras. “Evidências metalúrgicas e medições de microdureza indicam que o limite para o início da queima visível coincide com o limite de temperatura para o início da austenitização do material” (BIANCHI, et al., 2000).

Logo, durante a operação de retificação, como a superfície da peça é exposta a altas temperaturas por tempo suficiente, alterações microestruturais podem ocorrer, efeito este que pode ser amenizado com condições adequadas de lubri-refrigeração (SILVA, 2014).

Complementando, Jermolajev et al. (2016) ao investigarem a relação entre o tempo de operação de retificação com a temperatura decorrente do processo, demonstraram, em uma figura esquemática e também com imagens de microscopia óptica, que a interação entre estas

duas variáveis resulta na modificação microestrutural do material na zona de contato. Um dos tipos mais comuns de danos térmicos no processo de retificação é a queima da peça (PAULA, 2007).

Ressalta-se que as micrografias demonstradas nas Figuras 48 e 49 são resultantes das condições de maior severidade aplicadas durante os ensaios ($V_f = 0,75$ mm/min), isto para os quatro diferentes tipos de geometria do corpo de prova. Desta forma, entende-se que, se nestas condições mais severas as amostras não sofreram danos térmicos e nem trincas, em condições mais amenas estes fenômenos também não ocorreriam.

Colaborando com os resultados obtidos nesta pesquisa, Mello et al. (2018) ao investigarem os efeitos resultantes da retificação de peças com geometria interrompida com a variação de 3 diferentes velocidades de mergulho, também constataram, por meio de análises de micrografias, que não ocorreram danos térmicos na estrutura da peça retificada, o que evidencia que a temperatura na área de contato não foi excessiva, fato este que converge e contribui para explicar os resultados obtidos neste trabalho, embora ressaltando que os ensaios desta pesquisa foram realizados com a utilização de rebolo de CBN, enquanto que os resultados descritos no trabalho de Mello et al. (2018), foram obtidos por meio do uso de rebolo de óxido de alumínio.

Desta forma, entende-se que os resultados positivos de integridade física das peças usinadas, constados pelo exame de microscopia óptica, se devem pela relação do conjunto rebolo-peça utilizada nos ensaios, bem como pela eficiência dos 2 tipos de sistemas de refrigeração adotados nos ensaios, o que contribuiu para evitar, na área de corte durante a operação de retificação, a ocorrência de danos térmicos na microestrutura superficial das peças retificadas.

5. CONCLUSÕES

Esta pesquisa possibilitou estudar os efeitos decorrentes da retificação com uso de rebolo de CBN em peças com geometria contínua e interrompida, variando diferentes velocidades de mergulho e dois tipos de sistemas de refrigeração. Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- O aumento da velocidade de mergulho elevou a rugosidade (R_a) das peças retificadas, efeito este observado nas quatro diferentes geometrias pesquisadas, fato ocorrido tanto com o sistema de refrigeração convencional quanto por sistema de refrigeração por alta velocidade.

- Com o uso do sistema de refrigeração por alta velocidade, as 12 ranhuras dos corpos de prova favoreceram a redução dos níveis de desvios de circularidade da peças. Entretanto, com uso do sistema de refrigeração abundante, foi observado o efeito contrário, ou seja, as 12 ranhuras elevaram os níveis de desvios de circularidade das peças.

- Observou-se que nas 3 diferentes velocidades de mergulho, o aumento da quantidade de ranhuras favoreceu a redução do desgaste do rebolo, em especial com o uso da refrigeração por alta velocidade.

- O aumento da velocidade de mergulho provocou elevação dos níveis de emissão acústica, potência e vibração da máquina. Já o aumento da quantidade de ranhuras das peças contribuiu para a redução dos referidos níveis. Este efeito foi constatado nos 2 diferentes tipos de refrigeração utilizados.

- Tanto o sistema de refrigeração abundante, quanto o sistema de refrigeração por alta velocidade foram eficientes para manter a integridade microestrutural das peças, sem ocorrências de trincas e danos térmicos.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o propósito de reforçar as evidências dos efeitos do processo de retificação de peças com geometria interrompida, algumas sugestões são apresentadas:

- Verificar o comportamento das variáveis de saída de peças com geometria interrompida como rugosidade, desvios de circularidade bem como desgaste diametral do rebolo na retificação sob aplicação de alta pressão do fluido de corte.
- Investigar os efeitos resultantes da retificação de peças com geometria interrompida com o uso de outros tipos de retificadoras, como por exemplo, *centerless* e plana.
- Investigar os efeitos resultantes da retificação de peças com geometria interrompida fabricadas com outros tipos de materiais, como por exemplo, cerâmicas e compósitos.

REFERÊNCIAS

ALVES, M. C. de S. **Análise da influência da velocidade de mergulho na retificação de aços endurecidos utilizando refrigeração otimizada**. 2005. 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) Faculdade de Engenharia de Bauru – UNESP, Bauru, SP. 2005. Disponível em: <<http://acervodigital.unesp.br/handle/123456789/50504>>. Acesso em 29 mai 2014.

ALVES, M. C. de S. **Influência dos métodos de lubri-refrigeração na retificação do aço ABNT 4340 usando rebolo de CBN**. 2007. 177 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Materiais) Faculdade de Ciências de Bauru – UNESP, Bauru, SP. 2007. Disponível em: <http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/100911/alves_mcs_dr_bauru.pdf?sequence=1>. Acesso em 12 mar. 2016.

ALVES, M. C.S.; BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R. Influência da lubrificação na qualidade superficial de metais retificados. **Revista Escola de Minas**. vol.64. n.4, pp. 505-512. Ouro Preto, MG, 2011. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/pdf/564/56421349017.pdf>>. Acesso em 28 fev 2018.

ALVES, M. C. S.; BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R. de. **Influência da velocidade de avanço do rebolo nos danos de aços endurecidos retificados**. Matéria (Rio J.) vol.13 n.4 Rio de Janeiro 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762008000400009>. Acesso em: 14 jul 2016.

ALVES, M. C. S.; BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R. de. Influência da lubri-refrigeração otimizada e mínima quantidade de lubrificação com bocais aplicadores inovadores nos esforços de corte e na qualidade de peças de aços endurecidos. In: V CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, COBEF, 2009. **Anais eletrônicos ... Minas Gerais MG**. Disponível em: <<http://www.abcm.org.br/anais/cobef/2009/busca/artigos/012005186.pdf>>. Acesso em 20 fev 2018.

ALVES, M. C. S.; BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R. Influência das técnicas de mínima quantidade de lubrificante, refrigeração otimizada e refrigeração convencional na qualidade de peças produzidas com aços endurecidos no processo de retificação. **Ingeniare. Revista chilena de ingeniería**, vol.18 n.2, 2010, pp. 228-234, 2010. Disponível em: <<https://scielo.conicyt.cl/pdf/ingeniare/v18n2/art09.pdf>>. Acesso em 19 fev 2018.

ALVES, M. C. S.; BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R. de.; CATAI, R. E. Influência na qualidade final de metais retificados através da variação da velocidade de mergulho. **Metalurgia e Materiais**. Pages 65 – 71. 2009. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/54/S0370-44672009000100010.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 11 jun 2017.

AL-ZAHARNAH, I. T. Suppressing vibrations of machining processes in both feed and radial directions using an optimal control strategy: The case of interrupted cutting. **Journal of Materials Processing Technology**. vol. 172. Pages 305-310. 2006.

ANJOS, M. A. dos. **Estudo experimental do uso de rebolos convencionais na usinagem do aço VP-50 utilizado na retificação cilíndrica, por meio de diferentes métodos de lubri-refrigeração**. 2015. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - Unesp. Faculdade de Engenharia de Bauru, Bauru, SP. 2015.

ANJOS, M. A. dos; BIANCHI, E. C.; MELLO, H. J. de.; AGUIAR, P. R. de.; ESTAMBASSE, E. C.; HILDBRANDT, R. A. Estudo experimental do uso de rebolos convencionais na usinagem do aço VP-50 utilizado na retificação cilíndrica, por meio de diferentes métodos de lubrirrefrigeração. **Revista Matéria**. ISSN 1517-7076 artigo 11689, pp. 169-184, 2016. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/rmat/v21n1/1517-7076-rmat-21-01-00169.pdf>>. Acesso em: 29 set 2016.

AYED, Y.; ROBERT, C.; GERMAIN, G.; AMMAR, A. Development of a numerical model for the understanding of the chip formation in high-pressure water-jet assisted machining. **Finite Elements in Analysis and Design** 108. Pages 1-8. 2016.

BASTO, F. M. S. **Retificação cilíndrica externa para diferentes condicionamentos do rebolo de nitreto de boro cúbico**. 1999. 174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, SC. 1999. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/80508>>. Acesso em 02 ago. 2016.

BAIDAKOVA, N. V.; ORLOVA, T. N. Influence of abrasive grain geometrical characteristics on the grinding quality. International conference on industrial engineering, ICIE. **Procedia Engineering**. v.206. Pages 194–199. 2017.

BIANCHI, E. C.; FERNANDES, O. C.; MOGAMI, O.; SILVA JUNIOR, E. C.; VALARELLI, I. D. Análise do comportamento de rebolos convencionais na retificação de aços frágeis e dúcteis. **RBCM Journal of the Braz. Soc. Mechanical Sciences**. vol. XIX. n.3. Pages 410-425. 1997.

BIANCHI, E. C.; MONICI, R. D.; SILVA da, E. J.; AGUIAR, P. R.; VALARELLI, I. D. D. Análise do Comportamento da Microestrutura de Materiais Endurecidos Retificados com Rebolos de CBN. **Materials Research**, vol. 3, no. 4, Pages 147-154. 2000. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/mr/v3n4/v3n4a09.pdf>>. Acesso em 04 ago. 2016.

BIANCHI, E. C.; MONICI, R. D.; SIQUEIRA JUNIOR de, E. N.; AGUIAR de, P. R. Análise da influência da pressão e vazão de fluido de corte no processo de retificação com rebolos convencionais e superabrasivos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO COBEF, 1, 2001. **Anais eletrônicos ...** Curitiba PR. Disponível em: < <http://www.abcm.org.br/pt/wp-content/anais/cobef/2001/tcob053.pdf>>. Acesso em 24 abr. 2014.

BIANCHI, E. C.; MONICI, R. D.; NETO, L. D. AGUIAR de, A. R.; GUERMANDI, L. G. Estudo comparativo entre a agressividade superficial obtida na retificação com rebolos de óxido de alumínio e CBN, fabricados com ligantes resinóides e vitrificados. **Cerâmica**, v.57, 2011, p. 431-437. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ce/v57n344/10.pdf>>. Acesso em 02 jun 2014.

BIANCHI, E. C.; MONICI, R. D.; SILVA da., E. J.; AGUIAR de., P. R.; VALARELLI, I., D. Estudo da influência da vazão e pressão do fluido de corte no processo de retificação. **Revista Ciência & Tecnologia**, v.8, n.18, 2001, p. 79-85. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Bianchi_Carlos/publication/238104039>. Acesso em 20 jun 2017.

BIANCHI, E. C.; SILVA, E. J.; FRANÇA, T. V.; SILVA JUNIOR, C. E.; VALARELLI, I. D. Influência da Dureza dos Discos Abrasivos no Corte de Materiais Dúcteis. **Revista Matéria**, v. 11, n. 1, pp. 24 – 29, 2006. ISSN 1517-7076. Disponível em: <<http://repositorio.unesp.br/handle/11449/8944>>. Acesso em: 31 ago 2016.

BISCIONI, R. P. B. **Comparação entre métodos convencional e bocal modificado de aplicação de fluido de corte no processo de retificação cilíndrica interna**. 2010. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” – UNESP. Bauru, SP. 2010.

BHUIYAN, M.S.H.; CHOUDHURY, I. A.; DAHARI, M.; NUKMAN, Y.; DAWAL, S. Z. Application of acoustic emission sensor to investigate the frequency of tool wear and plastic deformation in tool condition monitoring. **Measurement** **92**. Pages 208–217. 2016.

BOARON, A.; WEINGAERTNER, W. L. Dynamic in-process characterization method based on acoustic emission for topographic assessment of conventional grinding wheels. **Wear**. v. 406. Pages 218–229. 2018.

BRECHER, C.; BRUMM, M. HÜBNER, F. Approach for the calculation of cutting forces in generating gear grinding. 9th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering - CIRP ICME '14. **Procedia CIRP** **33**. Pages 287-292. 2015.

CAGGIANO, A.; TETI, R. CBN Grinding Performance Improvement in Aircraft Engine Components Manufacture. 2nd CIRP Global Web Conference. **Procedia CIRP** **9**. Pages 109-114. 2013.

CAI, R.; ROWE, W. B. Assessment of vitrified CBN wheels for precision grinding. **International Journal of Machine Tools & Manufacture** **44**. Pages 1391-1402. 2004.

CASTRO, L. N. de; BIANCHI, E. C.; ANDRADRE, R. B.; MELLO, H. J. de.; AGUIAR, P. R.; GONÇALVES NETO, L.M. Análise de diferentes métodos de lubri-refrigeração no processo de refrigeração cilíndrica do aço ABNT 52100 com rebolo de carbetto de silício com liga resinóide. **Revista Matéria**. v 21, n.03, pp. 691-750. 2016. ISSN1517-7076. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rmat/v21n3/1517-7076-rmat-21-03-00691.pdf>>. Acesso em: 12 jun 2017.

CATAI, R. E. **Otimização das condições de refrigeração/lubrificação no processo de retificação cilíndrica de mergulho**. 2004. 178 f. Tese (Engenharia Mecânica). Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - Unesp. Escola de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, SP. 2004. Disponível em: <https://alsafi.ead.unesp.br/bitstream/handle/11449/105369/catai_re_dr_guara.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 10 mar 2018.

CHETHAN, Y. D.; RAVINDRA, H. V.; GOWDA, W. T. K. Machined surface monitoring in turning using histogram analysis by machine vision. **Materials Today: Proceedings**. v.5. Pages 7775–7781. 2018.

COLACO, G. A.; MEDEIROS, M. D. I. Análise da influência dos parâmetros de usinagem sobre a rugosidade no torneamento cilíndrico externo em corte a seco e com abundância de fluido de corte. XXXIV Encontro nacional de engenharia de produção. **ENEGETP**. Curitiba. PR. 2014. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegetp2014_TN_STO_196_109_23480.pdf>. Acesso em: 20 abr 2018.

CONCEIÇÃO JR., P. O. **Sinais de vibração no monitoramento do processo de retificação plana de cerâmicas avançadas**. 2016. 120 f. Dissertação (Engenharia Elétrica). Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - Unesp. Escola de Engenharia de Bauru, Bauru, SP. 2016. Disponível em: <http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/136392/conceicaojunior_po_me_bauru.pdf?sequence=3&isAllowed=y>. Acesso em: 03 out 2016.

D'ADDONA, D. M.; RAYKAR, S. J. Analysis of surface roughness in hard turning using wiper insert geometry. **Procedia CIRP** **41**. Pages 841-846. 2016.

DAHLMAN, P.; ESCURSELL, M. High-pressure jet-assisted cooling: a new possibility for near net shape turning of decarburized steel. **International Journal of Machine Tools & Manufacture** **44**. Pages 109-115. 2004.

DAMASCENO, F. R. **Análise da profundidade de corte e de diferentes métodos de lubri-refrigeração na retificação plana de aço ABNT 4340**. 2010. 165 f. Dissertação (Engenharia mecânica). Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - Unesp. Escola de Engenharia de Bauru, Bauru, SP. 2010. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/96486/damasceno_rf_me_bauru.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Acesso em: 22 fev 2018.

DEBNATH, S.; REDDY, M. M.; YI, Q. S. Influence of cutting fluid conditions and cutting parameters on surface roughness and tool wear in turning process using Taguchi method. **Measurement** **78**. Pages 111-119. 2016.

DESTRO, R. S.; DAMASCENO, R. F.; OIKAWA, M. H.; SOUSA e, R. M.; CANARIN, R. C.; AGUIAR de. P. R.; ALVES, M. C. S.; BIANCHI, E. C. Análise de métodos de utilização de fluidos de corte na retificação plana de aço. VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. **CONEM**. Campina Grande, PB. 2010. Disponível em: <<http://www.abcm.org.br/anais/conem/2010/PDF/CON10-0432.pdf>>. Acesso em: 07 ago. 2016.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura aplicações e preparações de amostra: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores**. Ed. EDIPUCRS, Porto Alegre, RS. 2007. 60p. Disponível em: <<http://bibliodigital.unijui.edu.br:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/1447/Microscopia%20eletr%C3%B4nica%20de%20varredura.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 14 jun 2017.

DIAS, E. A. **Monitoramento da dressagem no processo de retificação centerless utilizando emissão acústica**. 2013. 196 f. Dissertação (Engenharia Mecânica). Universidade Federal de São João Del Rei. UFSJ. MG. 2013. Disponível em: <<https://www.ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ppmec/Everaldo%20Dias.pdf>>. Acesso em: 20 mai 2018.

DIAS, E. A.; PEREIRA, F. B.; RIBEIRO FILHO, S. L. M.; BRANDÃO, L. C. Monitoring of through-feed centreless grinding processes with acoustic emission signals. **Measurement** **94**. Pages 71–79. 2016.

DING, W.; ZHU, Y.; ZHANG, L.; XU, J.; FU, Y. LIU, W. Y.; YANG, C. Stress characteristics and fracture wear of brazed CBN grains in monolayer grinding wheels. **Wear** **332-333**. Pages 800-809. 2015.

DINIZ, A. E.; OLIVEIRA de., A. J. Hard turning of interrupted surfaces using CBN tools. **Journal of Materials Processing Technology** **195**. Pages 275-281. 2008

DINIZ, A. E.; GOMES, D. M.; BRAGHINI JR., A. Turning of hardened steel with interrupted and semi-interrupted cutting. **Journal of Materials Processing Technology**. Pages 240-248. 2005.

FERNANDES, U. B. de.; **Análise de métodos de lubri-refrigeração aplicados no processo de retificação cilíndrica interna de mergulho em aços endurecidos**. 2007. 163 f. Tese (Doutorado em Ciência de Tecnologia de Materiais). Faculdade de Ciências de Bauru – UNESP, Bauru, SP. 2007.

FERRARI, C. **Análise comparativa dos métodos MQL, MQL/água e convencional na retificação cilíndrica do aço ABNT 52100, com rebolo de óxido de alumínio**. 2015. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia de Bauru – UNESP, Bauru, SP. 2015.

FRANÇA, T. V. **Estudo da predição da circularidade e rugosidade de peças retificadas utilizando as redes neurais artificiais**. 2005. 190 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) Faculdade de Engenharia de Bauru – UNESP, Bauru, SP. 2005.

FRANÇA, T. V. **Estudo das vibrações em peças de baixa rigidez no processo de retificação cilíndrica externa de alta velocidade utilizando rebolo de CBN**. 2009. 184 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP, São Carlos, SP. 2009.

GODOY de, V. A. A.; DINIZ, A. E. Turning of interrupted and continuous hardened steel surfaces using ceramic and CBN cutting tools. **Journal of Materials Processing Technology**. Pages 1014–1025. 2011.

GONÇALVES NETO. L. M. **Estudo das correlações dos parâmetros e fenômenos do processo de retificação centerlles de passagem com a circularidade da peça**. 2008. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade de Taubaté – UNITAU, Taubaté, SP. 2008. Disponível em: <http://www.bdtd.unitau.br/tesdesimplificado/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=357>. Acesso em 09 abr. 2014.

GRAVALOS, T. M.; MARTINS, M.; DINIZ, A. E.; MEI, P. R. Influência da rugosidade na resistência à corrosão por pite em peças torneadas de aço inoxidável superaustenítico. **Revista Escola de Minas**. vol. 63. n.1. Pages 77-82. 2010.

GUIMARÃES, C.; MARQUES, A.; BIANCHI, E. C.; FONSECA, M. P. C.; SILVA, R. B. da. Avaliação da rugosidade (Ra) e da micro-dureza do aço VP 100 após retificação com técnica MQL em várias vazões. In.: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 8, 2015, **Anais eletrônicos ...** Salvador, BA. Disponível em: <<http://www.cobef.com.br/anais/PDFS/COF-2015-0066.PDF>>. Acesso em 27 out 2016.

GUO, C.; MALKIN, S. Energy Partition and Cooling During Grinding. **Journal of Manufacturing Processes** vol. 2. n.3. Pages 151-157. 2000.

HASE, A.; WADA, M.; MISHINA, H. The relationship between acoustic emissions and wear particles for repeated dry rubbing. **Wear** **265**. Pages 831–839. 2008.

HAIYUE YU, A. N.; YUSHAN LU, B.; WANG, J. Study on wear of the grinding wheel with an abrasive phyllotactic pattern. **Wear** **358-359**. Pages 89-96. 2016.

HE, C. G.; HUANG, Y. B. MA, L.; GUO, W. J.; WANG, N.; LIU, Q. Y. ZHU, M. H. Experimental investigation on the effect of tangential force on wear and rolling contact fatigue behaviors of wheel material. **Tribology International** **92**. Pages 307-316.2015.

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

ILIO, D. A.; PAOLETTI, A.; SFARRA, S. Monitoring of MMCs grinding process by means of IR thermography. **Procedia Manufacturing**. v.19. Pages 95-102. 2018.

JACKSON, M. J.; MILLS, B. Materials selection applied to vitrified alumina & CBN grinding wheels. **Journal of Materials Processing Technology**. vol. 108, Issue 1. Pages 114–124. 2000. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013600008293>>. Acesso em 05 jun 2014.

JAYAKUMAR, T.; MUKHOPADHYAY, C. K.; VENUGOPAL, S.; MANNAN, S. L. RAJ, B. A review of the application of acoustic emission techniques for monitoring forming and grinding processes. **Journal of Materials Processing Technology** **159**. Pages 48–61. 2005.

JERMOLAJEV, S.; EPP, J.; HEINZEL, C; BRINKSMEIER E. Material modifications caused by thermal and mechanical load during grinding. 3rd CIRP Conference on Surface Integrity (CIRP CSI). **Procedia CIRP** **45**. Pages 43 – 46. 2016.

JIANG, J. L.; GE, P. Q.; BI, W. B.; ZHANG, L.; WANG, D. X.; ZHANG, Y. 2D/3D ground surface topography modeling considering dressing and wear effects in grinding process. **International Journal of Machine Tools & Manufacture** **74**. Pages 29-40. 2013.

KLOCKE, F.; WROBEL, C.; RASIM, M.; MATTFELD, F. Approach of characterization of the grinding wheel topography as a contribution to the energy modelling of grinding processes. **Procedia CIRP** **46**. 7th HPC 2016 – CIRP Conference on High Performance Cutting. Pages 631-635. 2016.

KIRSCH, B.; AURICH, J. C. Influence of the macro-topography of grinding wheels on the cooling efficiency and the surface integrity. 2nd CIRP 2nd CIRP Conference on Surface Integrity (CSI). **Procedia CIRP** **13**. Pages 8-12. 2014.

KOUNTANYA, R. Cutting tool temperatures in interrupted cutting_The effect of feed-direction modulation. **Journal of Manufacturing Processes**. Pages 47-55. 2008.

KRYUKOV, S. A.; KRYUKOVA, A. S. International Conference on Industrial Engineering, ICIE. **Procedia Engineering** **206**. Pages 204-209. 2017.

KUFFA, M.; KUSTER, F.; WENEGER, K. Comparison of lubrication conditions for grinding of mild steel with electroplated CBN wheel. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**. v.18. Pages 53–59. 2017.

KUMAR, S.; YADAV, M.; AGRAWAL, P.; KHAN, M. Z.; VASHITA, M. Assessment of microhardness profile in grinding using barkhausen noise technique at various analysis parameters. **ISRN Materials Science**. vol.211. 2011. Disponível em: <<https://www.hindawi.com/journals/isrn/2011/525078/>>. Acesso em: 20 mai 2018.

LEME, S. P. L. **Dressamento por toque de rebolos de CBN**. 1999. 181 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, SC. 1999. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/81079>>. Acesso em 18 ago. 2016.

LI, H. N.; AXINTE, D. Textured grinding wheels: A review. **International Journal of Machine Tools & Manufacture** v.109. Pages 8-35. 2016.

LI, H. N.; AXINTE, D. On the inverse design of discontinuous abrasive surface to lower friction-induced temperature in grinding: An example of engineered abrasive tools. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. v.132. Pages 50–63. 2018.

LIN, B.; ZHOU, K.; GUO, J.; LIU, Q. Y.; WANG, W. J. Influence of grinding parameters on surface temperature and burn behaviors of grinding rail. **Tribology International**. v.122. Pages 151–162. 2018.

LIMA, H. V.; SILVA da., L. R. CALADO, C. R.; MARCELINO, L. I. O. de.; ÁVILA, R. F. de.; OLIVEIRA, F. A.; GUIMARÃES, P. P.; DUARTE, J. B. MOREIRA, M. R. Avaliação do desempenho do fluido de corte comercial e recuperado no processo de retificação. In.: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 7, 2013, **Anais eletrônicos** ... Penedo, Itatiaia, RJ. Disponível em: <<http://www.abcm.org.br/app/webroot/anais/cobef/2013/PDFS/COBEF2013-0121.PDF>>. Acesso em: 11 jun 2017.

LIU, W. DENG, A. SHANG, Y. WAN, L. Effects of grinding parameters on surface quality in silicon nitride grinding. **Ceramics International** **43**. Pages 1571-1577. 2017.

MARINESCU, I. D.; HITCHINER, M.; UHLMANN, E.; ROWE, W. B. INASAKI, I.; **Handbook of Machining with Grinding Wheels**. 1st ed., Boca Raton, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2007. 629p.

MALKIN, S. “Grinding Mechanisms e Grinding Temperatures and Thermal Damage”, In: **Malkin, S. Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives**, 1 Ed, Chichester, Ellis Horwood Limited, pp.108-171, 1989.

MALKIN S. e GUO C. **Grinding Technology - Theory and Applications of Machining with Abrasives** - Second Edition, New York: Industrial Press, 2008. 387p.

MELLO de., H. J.; MELLO de., D. R. BIANCHI, E. C.; AGUIAR de., P. R., D’ADONNA, D. M. Grinding of AISI 4340 steel with interrupted cutting by aluminum oxide grinding wheel. **Mechanic and Energy**. Ouro Preto/MG. Pages 229-238. 2015.

MELLO de., H. J.; MELLO de., D. R.; RODRIGUEZ, L. R.; LOPES, J. C.; SILVA da, R. B.; SANCHEZ, L. E. A; HILDEBRANDT, R. A.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. Contribution to cylindrical grinding of interrupted surfaces of hardened steel with medium grit wheel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v.95. Pages 4049-4057. 2018.

MOIA, D. F. G.; THOMAZELLA, I. H.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C.; MARTINS, C. H. R.; MARCHI, M. Tool condition monitoring of aluminum oxide grinding wheel in dressing operation using acoustic emission and neural networks. **Journal Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.** **37**. Pages 627–640. 2015.

MONICI, R. D.; BIANCHI, E. C.; CATAI, R. E. AGUIAR de.; P. R. Analysis of the different forms of application and types of cutting fluid used in plunge cylindrical grinding using conventional and superabrasive CBN grinding wheels. **International Journal of Machine Tools & Manufacture** **46**. Pages 122-131. 2006.

MOUSSA, T.; GARNIER, B.; PELAY, U.; FAVENNEC, Y. PEERHOSSAINI, H. Heat transfer at the grinding interface between glass plate and sintered diamond wheel. **International Journal of Thermal Sciences** **107**. Pages 89-95. 2016.

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

ONWUKA, G. K.; HOSSEIN, A. E. Surface roughness in ultra-high precision grinding of **BK7**. **Procedia CIRP** **45**. Pages 143-146. 2016.

OIKAWA, M. H.; BIANCHI, E. C.; DESTRO, R. M.; SOUSA, R. M.; CANARIM, R. C.; ALVES, M. C. S.; AGUIAR, P. R. Cerâmicas avançadas no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho utilizando a técnica da mínima quantidade de lubrificação (MQL) com rebolos diamantados. **Revista Matéria**. Rio de Janeiro, v. 16, n. 1, PP 560-573. 2011. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rmat/v16n1/03.pdf>>. Acesso em: 15 jun 2016.

OLIVEIRA, D. de J. **Aprimoramento da técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL) no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho de aços endurecidos**. 2011. 97 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) Faculdade de Ciências de Bauru – UNESP, Bauru, SP. 2011.

OLIVEIRA de. A. J.; DINIZ, A. E.; URSOLINO, D. J. Hard turning in continuous and interrupted cut with PCBN and whisker-reinforced cutting tools. **Journal of Materials Processing Technology** 209. Pages 5262-5270. 2009.

OLIVEIRA, J. F. G.; PURQUERIO, B. M.; COELHO, R. T.; BIANCHI, E. C. Grinding process dominance by means of the dressing operation. **Proceedings of the Twenty-Ninth International Matador Conference**. Pages 547-550. 1992.

PAKNEJAD, M.; ABDULLAH, A.; AZARHOUSHANG, B. Effects of high power ultrasonic vibration on temperature distribution of workpiece in dry creep feed up grinding. **Ultrasonics - Sonochemistry** **39**. Pages 392-402. 2017.

PALMER, J.; HASSAN, G.; NOVVIC, D. CURTIS, D. An experimental study of the effects of dressing parameters on the topography of grinding wheels during roller dressing. **Journal of Manufacturing Processes**. Vol. 31. Pages 348–355. 2018.

PAULA DE, W. **Análise de superfícies de peças retificadas com o uso de redes neurais artificiais**. 2007. 168 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologias de Materiais) Faculdade de Ciências de Bauru – UNESP, Bauru, SP. 2007. Disponível em: <<http://repositorio.unesp.br/handle/11449/88508>>. Acesso em: 02 set. 2016.

PÉREZ, J.; HOYAS, S.; SKURATOV, D. L.; RAVIS, YU. L.; SELEZNEVA, I. A.; FERNÁNDEZ DE CÓRDOBA, P.; URCHUEGUIA, J. F. Heat transfer analysis of intermittent grinding processes. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. Pages 4132–4138. 2008.

PEKELHARING, A. J. Cutting tool damage in interrupted cutting. **Wear**. vol.62. Pages 37-48. 1980. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0043164880900356>>. Acesso em: 02 dez 2017.

RAMANAIAH, B. V.; MANIKANTA, B.; RAVI SANKAR, M.; MALHOTRA, M.; GAJRANI, K. K. Experimental Study of Deflection and Surface Roughness in Thin Wall Machining of Aluminum Alloy. **Materials Today: Proceedings**.v.5. Pages 3745–3754. 2018.

RAO, S. B.; WU, S. M. A quantitative analysis of roundness error in cylindrical chuck grinding. **International Journal of Machine Tool Design and Research**. Vol. 21. Pages 41-48. 1981.

ROWE, W. B. **Principles of modern grinding technology** - Second edition. Elsevier. 2014. 444p.

ROWE, W. B. Rounding and stability in centreless grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. Pages 1-10. 2014

SANCHEZ, L. E. A. de.; PALMA, G. L.; MARINESCU, I.; MODOLO, D. L. NALON, L. J.; SANTOS, A. E. Effect of different methods of cutting fluid application on turning of a difficult-to-machine steel (SAE EV-8). **Journal of Engineering Manufacture** **227 (2)**. Pages 220-234. 2012.

SARAVANAKUMAR, A.; DHANABAL, S.; JAYANAND, E.; LOGESHWARAN, P. Analysis of Process Parameters in Surface Grinding Process. **Materials Today: Proceedings**. v.5. Pages 8131–8137. 2018.

SCHUITEK, A. J.; SEVERIANO, A. C.; BELLOS, N. L. Otimização de processo de retificação utilizando rebolos de CBN. In.: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO COBEF, 1, 2001. **Anais eletrônicos ...** Curitiba, PR. Disponível em: <<http://www.abcm.org.br/pt/wp-content/anais/cobef/2001/tcob159.pdf>>. Acesso em: 02 jun 2014.

SHNEOR, Y. Reconfigurable machine tool: CNC machine for milling, grinding and polishing. 15th Global Conference on Sustainable Manufacturing. **Procedia Manufacturing**. v.21. Pages 221–227. 2018.

SILVA, A. L. V. C. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. Editora Blucher 4ª edição. São Paulo, 2008. 652p.

SILVA, J. D.; MAGALHÃES, C. H. X.; FARIA, G. L. de.; GODEFROID, L. B. Influência da taxa de deformação sobre o comportamento mecânico em tração do aço inoxidável UNS S32304. 16º Encontro nacional de estudantes de engenharia metalúrgica, de materiais e de minas – ENEMET. 2016. **Anais eletrônicos ...** Rio de Janeiro, RJ. 2016.

SILVA da, E. J. **Análise de estratégias de retificação de virabrequins automotivos forjados utilizando rebolos de CBN vitrificados em altas velocidades.** 2004. 178 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo – USP, São Carlos, SP. 2004. Disponível em: <www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18135/tde.../Tese_Silva_Eraldo_Jannone.pdf>. Acesso em: 07 ago. 2016.

SILVA da, S. P. **Contribuição para modelagem da operação de retificação cilíndrica externa de mergulho.** 2015. 198 f. Tese (Doutorado em Ciências) Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo – USP, São Carlos, SP. 2015. Disponível em: <www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18145/tde-18082015-210657/.../Tese.pdf>. Acesso em 14 jun 2016.

SILVA da, J. C. L. **Retificação externa cilíndrica de mergulho do aço 100Cr6 com rebolo 38 a 120 MVS.** 1999. 162 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, SC. 1999. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/80506>>. Acesso em 12 jun 2016.

SILVA NETO da, J. F. **Estudo experimental da remoção, por jato de ar comprimido, de detritos na superfície de corte de rebolo diamantado durante a retificação da alumina refrigerada pela técnica MQL.** 2012. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” – UNESP. Faculdade de Engenharia de Bauru, Bauru, SP. 2012.

SILVA, T. da. **Um sistema com um bloco de teflon e um bastão abrasivo para limpeza da superfície de corte de rebolos.** 2014. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” – UNESP. Faculdade de Engenharia de Bauru, Bauru, SP. 2014.

SOKEI, C. R.; GERLIN NETO, V.; BRIGUENTE, C. A.; OROZCO, E. P.; MANOEL, P. A. F.; VENTRELLA, V. A.; TOKIMATSU, R. C. Avaliação da integridade de trilhos ferroviários soldados por caldeamento. 20º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. CBECIMAT. 2012. **Anais eletrônicos ...** Joinville, SC. Disponível em: <<http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/maprotec/cbecimat2012c.pdf>>. Acesso em 30 mai 2018.

SOUSA, R. M.; IRECI, D. M.; DESTRO, R. S.; OIKAWA, M. H.; BIANCHI, E. C.; AGUAI de.; P. R.; FORTULAN, C. A. Retificação de cerâmica de alumina relacionada com diferentes técnicas de lubri-refrigeração: convencional e mínima quantidade de lubrificação. **Cerâmica** Vol.57. Páginas 76 – 84. 2011. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0366-69132011000100010&script=sci_abstract&tlng=pt>. Acesso em: 20 jun 2017.

SOUZA, A. G. O. **Monitoramento da dressagem no processo de retificação.** 2009. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia da UNESP, Bauru, 2009. Disponível em: <http://www.athena.biblioteca.unesp.br/exlibris/bd/bba/33004056080P8/2009/souza_ago_me_bauru.pdf>. Acesso em 24 abr. 2014.

SUGIHARA, T.; ENOMOTO, T. High Speed Machining of Inconel 718 Focusing on Tool Surface Topography of CBN Tool. **Procedia Manufacturing** Vol. 1, Pages 675–682. 2015.

SUN, L.; YANG, S.; YANG, L.; ZHAO, P.; WU, P.; JIANG, Z. A new model of grinding forces prediction for machining brittle and hard materials. 13th CIRP conference on Computer Aided Tolerancing. **Procedia CIRP** 27. Pages 192 – 197. 2015.

SUTERIO, R. **Medição de tensões residuais por indentação associada à holografia eletrônica**. 2005. 169 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis. 2005.

TAO, Z.; YAOYAO, S.; LAAKSO, S.; JINMING, Z. Investigation of the effect of grinding parameters on surface quality in grinding of TC4 titanium alloy. **Procedia Manufacturing** 11. Pages 2131-2138. 2017.

TAWAKOLI, T.; AZARHOUSHANG, B. Intermittent grinding of ceramic matrix composites (CMCs) utilizing a developed segmented wheel. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. Pages 112–119. 2011.

TE-HSIU, S. Applying particle swarm optimization algorithm to roundness measurement. **Expert Systems with Applications** 36. Pages 3428–3438. 2009.

TSO, P. L.; YANG, S. Y. The compensation of geometrical errors on forming grinding. **Journal of Materials Processing Technology** 73. Pages 82-88. 1998.

VALARELLI, I. DE D.; BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R. MONICI, R. D. Estudo comparativo do desempenho de rebolos com grãos superabrasivos e convencionais submetidos a diversas condições de usinagem. **II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**. João Pessoa, PB. 2002.

VENTURA, C. E. H. **Análise da relação entre a formação do cavaco, vibração da ferramenta e desvio de forma no processo de torneamento**. 2008. 76 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, 2008. Disponível em: <http://sites.poli.usp.br/d/pme2600/2008/Trabalhos%20finais/TCC_056_2008.pdf>. Acesso em: 16 set 2016.

VENTURA, C. E. H.; KÖHLER, J.; DENKENA, B. Influence of cutting edge geometry on tool wear performance in interrupted hard turning. **Journal of Manufacturing Processes** 19. Pages 129-134. 2015.

WANG, J. P. **Avaliação da retificação com rebolo CBN vitrificado aplicada em ligas de alto desempenho**. 2008. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, USP, São Carlos, 2008. Disponível em: < <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18145/tde-19012011-103534/pt-br.php>>. Acesso em 29 mai 2014.

WANG, Y.; LIU, Y; CHU, X. HE, Y, ZHANG, W.; Calculation model for surface roughness of face gears by disc wheel grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture** **123**. Pages 76-88. 2017.

WEBSTER, J.; MARINESCU, I.; BENNETT, R. Acoustic emission for process control and monitoring of surface Integrity during grinding. **Annals of the CIRP** vol. 43. Pages 299-304. 1994.

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

WINTER, M.; IBBOTSON, S.; KARA, S.; HERRMANN, C. Life cycle assessment of cubic boron nitride grinding wheels. **Journal of Cleaner Production** **107**. Pages 707-721. 2015.

WÓJCIK, R.; NADOLNY, K. The effect of the grinding wheel modification on the state of the workpiece surface layer after internal cylindrical grinding of steel C45. **Journal of Process Mechanical Engineering**. Pages 1-12. 2016.

YU, T.; BASTAWROS, A. F.; CHANDRA, A. Experimental and modeling characterization of wear and life expectancy of electroplated CBN grinding wheels. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. v.121. Pages 70–80. 2017.

YUVARAJU, B. A. G.; NANDA, B. K. Prediction of vibration amplitude and surface roughness in boring operation by response surface methodology. **Materials Today: Proceedings**. vol.5. Pages 6906–6915. 2018.