

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

BRUNO AZEREDO PASSIGATTI

**EFEITOS DA VARIAÇÃO DA GRANULOMETRIA DE REBOLOS DE cBN E
PARÂMETROS DE CORTE SOBRE A QUALIDADE DA PEÇA NA RETIFICAÇÃO
CILÍNDRICA INTERNA DO AÇO 18CrNi8**

CURITIBA

2021

BRUNO AZEREDO PASSIGATTI

**EFEITOS DA VARIAÇÃO DA GRANULOMETRIA DE REBOLOS DE cBN E
PARÂMETROS DE CORTE SOBRE A QUALIDADE DA PEÇA NA RETIFICAÇÃO
CILÍNDRICA INTERNA DO AÇO 18CrNi8**

**Influence of cBN grinding wheel grain size at different workpiece rotations and
axial feed rate on the internal cylindrical grinding of 18CrNi8 steel**

Dissertação apresentada como requisito para
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Mecânica e de Materiais da Universidade Tecnológica
Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração:
Engenharia de Manufatura.

Orientador(a): Prof. Dr. Milton Luiz Polli

CURITIBA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



BRUNO AZEREDO PASSIGATTI

EFEITOS DA VARIAÇÃO DA GRANULOMETRIA DE REBOLOS DE CBN E PARÂMETROS DE CORTE SOBRE A QUALIDADE DA PEÇA NA RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA INTERNA DO AÇO 18CRN18

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Engenharia De Manufatura.

Data de aprovação: 27 de Agosto de 2021

Prof Milton Luiz Polli, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Fabio Antonio Xavier, Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina (Ufsc)

Prof Neri Volpato, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 27/08/2021.

Dedico este trabalho a minha mãe e ao meu pai, por todo amor, apoio e incentivo dado ao longo de toda minha formação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Milton Luiz Polli, pela orientação fornecida ao longo deste trabalho, pelas valiosas sugestões e ensinamentos transmitidos.

Ao Instituto Federal do Espírito Santo, campus Guarapari, pela minha liberação para que a conclusão deste trabalho fosse possível.

Aos meus colegas do PPGEM, em especial ao meu grande amigo Raynier Estrada pelo companheirismo ao longo de todo o curso.

A empresa parceira localizada em Curitiba pela grande oportunidade de realizar este estudo, por ceder todos os insumos e materiais necessários para execução desta pesquisa. Gratidão especial ao amigo Luciano Arantes pelo imenso apoio, pelas dicas e informações fornecidas e pelo valioso auxílio operacional durante a realização dos testes e medições.

Aos professores do PPGEM da UTFPR – Curitiba pelo conhecimento e ensinamento difundido durante as aulas e reuniões.

À minha família.

À Deus.

“Se você vai ter que conviver com você mesmo até o fim, se você vai ter que se aguentar até o fim, se você vai ser espectador de você mesmo até o fim, é melhor que se encante com o que faz.”

“Felicidade é aqui e agora.”

Clóvis de Barros Filho

RESUMO

PASSIGATTI, Bruno A. **Efeitos da variação da granulometria de rebolos de cBN e parâmetros de corte sobre a qualidade da peça na retificação cilíndrica interna do aço 18CrNi8**. 2021. 136 fls. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

A retificação cilíndrica interna de precisão é geralmente a última etapa de uma cadeia de processo de manufatura que envolve operações de usinagem. Assim, nesta fase do seu processamento as peças já possuem alto valor agregado tornando seu descarte por erros de fabricação ainda mais onerosos para as empresas. Sendo assim, as ferramentas adotadas nessas operações devem ser utilizadas com propriedades e parâmetros de corte que favoreçam o melhor desempenho do rebolo com o intuito de manter ou melhorar os padrões de qualidade das peças retificadas. Em vista disso, esta pesquisa tem por objetivo analisar os efeitos da granulometria de rebolos de cBN vitrificados (especificação 360 e 400) e da variação dos parâmetros de rotação da peça ($n_w = 1400, 1600$ e 1800 rpm) e da velocidade de avanço axial da ferramenta ($V_{fa} = 600, 800$ e 1000 mm/min) na retificação cilíndrica interna do aço DIN 18CrNi8 sobre a qualidade final da peça. Foram considerados aspectos como a qualidade dimensional do diâmetro, rugosidade da superfície e os erros geométricos de circularidade, retitude e paralelismo, além da observação do desgaste dos rebolos e da potência de retificação. De forma geral o rebolo com especificação de granulometria 400 apresentou melhores resultados para as saídas do processo em comparação com o de granulometria 360. Isto foi mais evidente nas condições mais severas dos ensaios ($n_w = 1800$ rpm e $V_{fa} = 1000$ mm/min).

Palavras-chave: Retificação Interna. Rebolo de cBN. Erros Geométricos.

ABSTRACT

PASSIGATTI, Bruno A. **Influence of cBN grinding wheel grain size at different workpiece rotations and axial feed rate on the internal cylindrical grinding of 18CrNi8 steel**. 2021. 136 fls. Dissertation (Master's degree) - Postgraduate Program in Mechanical and Materials Engineering, Federal Technological University of Paraná. Curitiba, 2021.

Precision internal cylindrical grinding operations is usually the last step in a manufacturing process that involves machining processes. At this stage, the parts already have high added value, making their disposal due to manufacturing errors even more costly for companies. Thus, the tools adopted in these operations must be used with properties and cutting parameters that favor the best cost/benefit ratio of the grinding wheel in order to maintain or improve the quality standards of the ground parts. In this context, this research aims to analyze the effects of the particle size of vitrified cBN grinding wheels (360 and 400 specification) and the variation of the workpiece rotation parameters workpiece rotation ($n_w = 1400, 1600$ e 1800 rpm) and axial feed rate of the tool ($V_{fa} = 600, 800$ e 1000 mm/min) in the internal cylindrical grinding of DIN 18CrNi8 steel on the final quality of the part. Aspects such as the dimensional quality of the diameter, surface roughness and geometric errors of circularity, straightness and parallelism were considered, in addition to the observation of grinding wheel wear and grinding power. In general rules, the grinding wheel with a 400 grain size specification presented better results for the process outputs compared to the 360 one. This was more evident in the more severe test conditions ($n_w = 1800$ rpm e $V_{fa} = 1000$ mm/min).

Keywords: Internal grinding. cBN grinding wheel. Geometric Errors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenho da seção transversal do bico injetor de combustível	24
Figura 2 - Bico injetor de combustível para motores a diesel	25
Figura 3 - Visão sistemática simplificada do processo de retificação.....	29
Figura 4 - Três tipos de ações das partículas abrasivas na retificação: (a) corte, (b) deformação, e (c) atrito sem remoção de material.	30
Figura 5 – Visão metodológica dos tipos de retificação cilíndrica interna: (a) retificação cilíndrica interna transversal. (b) retificação cilíndrica interna longitudinal.	34
Figura 6 - O princípio de retificação cilíndrica interna abordado nesta pesquisa.	36
Figura 7 - Metodologia de desgaste do rebolo na retificação cilíndrica interna longitudinal	37
Figura 8 - Estrutura típica de um rebolo de retificação.....	38
Figura 9 - Rebolo de cBN.....	42
Figura 10 - Diâmetro equivalente do rebolo.	54
Figura 11 - Condições de contato em operações de retificação.....	55
Figura 12 - Profundidade de corte.....	56
Figura 13 - Espessura de corte equivalente.	58
Figura 14 - Seção longitudinal do bico injetor de combustível com destaque para o diâmetro da guia.....	68
Figura 15 - Retificadora cilíndrica interna UVA U88 NMA.	70
Figura 16 - Rebolo de cBN (VBF 400 K 195 KCP3M VFPC).....	71
Figura 17 - Disco dressador diamantado	72
Figura 18 - O princípio de retificação cilíndrica interna empregado nesta pesquisa .	73
Figura 19 - Oscilação do rebolo no interior do furo durante a retificação	75
Figura 20 - Peças separadas para medição.....	77
Figura 21 – Centro de medição de forma e posição MarForm MFU 100.	78
Figura 22 - Sistema de medição 3D para forma e acabamento Alicona Infinite Focus SL.....	79
Figura 23 - Sistema de medição de diâmetro semiautomático de bancada	80
Figura 24 - Sistema de medição Rexroth XM21 IOT Gateway	81
Figura 25 - Microscópio eletrônico de varredura Quanta FEG 200.	81
Figura 26 - Gráficos da diferença média entre os diâmetros mínimos e máximos em relação a variação da velocidade de avanço axial da ferramenta – Intervalo de Confiança de 95%	83
Figura 27 - Gráficos da diferença média entre os diâmetros mínimos e máximos em relação a variação da rotação da peça – Intervalo de Confiança de 95%.....	85
Figura 28 - Medição de circularidade do rebolo de granulometria 400, $n_w = 1800$ rpm e $V_{fa} = 600$ mm/min (esquerda), e do rebolo de granulometria 360, $n_w = 1800$ rpm e $V_{fa} = 1000$ mm/min (direita)	88

Figura 29 - Gráficos das medições de circularidade em relação a variação da velocidade de avanço axial da ferramenta - Intervalo de Confiança de 95%	89
Figura 30 - Medição de paralelismo do rebolo de granulometria 400, rotação da peça em 1600 rpm e velocidade de avanço axial em 800 mm/min (ensaio 10).....	91
Figura 31 - Medição de paralelismo do rebolo de granulometria 360, rotação da peça em 1800 rpm e velocidade de avanço axial em 1000 mm/min (ensaio 8).....	92
Figura 32 - Gráficos das medições de paralelismo em relação a variação da rotação da peça - Intervalo de Confiança de 95%	93
Figura 33 - Gráfico das medições e tendências do erro de paralelismo em relação a variação velocidade de avanço axial da ferramenta para $n_w = 1800$ rpm - Intervalo de Confiança de 95%	95
Figura 34 - Gráficos das medições de retitude em relação a variação da velocidade de avanço axial da ferramenta - Intervalo de Confiança de 95%	97
Figura 35 - Gráficos das medições de rugosidade em relação a variação da rotação da peça - Intervalo de Confiança de 95%	99
Figura 36 - Gráficos das medições de assimetria (Ssk) em relação a variação da rotação da peça - Intervalo de Confiança de 95%.....	101
Figura 37 - Gráficos das medições de curtose (Sku) em relação a variação da velocidade de avanço axial da ferramenta - Intervalo de Confiança de 95%	103
Figura 38 - Gráficos das medições da potência de corte em relação a variação da velocidade de avanço axial da ferramenta - Intervalo de Confiança de 95%	106
Figura 39 - Estrutura do rebolo de cBN com especificação de granulometria 400 após a retificação da última peça do ensaio 13 ($n_w = 1400$ rpm e $V_{fa} = 800$ mm/min) - aumento de 600x.....	109
Figura 40 - Imagens no MEV do rebolo com especificação de granulometria 400 após a retificação da última peça do ensaio 11 ($n_w = 1600$ rpm e $V_{fa} = 1000$ mm/min) – aumento de 1000x.....	110
Figura 41 - Imagens no MEV do rebolo com especificação de granulometria 360 após a retificação da última peça do ensaio 8 ($n_w = 1800$ rpm e $V_{fa} = 1000$ mm/min) – aumento de 1000x.....	111
Figura 42 - Imagens no MEV do rebolo com especificação de granulometria 360 após a retificação da última peça do ensaio 7 ($n_w = 1800$ rpm e $V_{fa} = 800$ mm/min) – aumento de 1000x.....	112
Figura 43 - Imagens no MEV do rebolo com especificação de granulometria 400 após a retificação da última peça do ensaio 12 ($n_w = 1600$ rpm e $V_{fa} = 600$ mm/min) – aumento de 1000x.....	113

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Valores típicos de propriedades térmicas para abrasivos convencionais a temperatura ambiente.	45
Gráfico 2 - Gráfico de dureza e tenacidade à fratura dos principais abrasivos utilizados na retificação.	46
Gráfico 3 - Diagrama TTT para o aço DIN 18CrNi8.	69
Gráfico 4 - Gráfico de dispersão do diâmetro em relação ao alvo – Intervalo de Confiança de 95%	82
Gráfico 5 - Gráfico das medições de circularidade por ensaio - Intervalo de Confiança de 95%	87
Gráfico 6 - Gráfico das medições de paralelismo por ensaio - Intervalo de Confiança de 95%	91
Gráfico 7 - Gráfico das medições de retitude por ensaio - Intervalo de Confiança de 95%	96
Gráfico 8 - Curva de Abbot-Firestone.....	104
Gráfico 9 - Gráfico das medições de potência de corte - Intervalo de Confiança de 95%	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores típicos de propriedades térmicas para os superabrasivos a temperatura ambiente.	46
Tabela 2 - Principais propriedades do cBN.	50
Tabela 3 - Composição química do aço DIN 18CrNi8 em fração de massa (%).	69
Tabela 4 - Parâmetros de dressagem.....	72
Tabela 5 - Parâmetros de rotação.....	74
Tabela 6 - Parâmetros de oscilação axial do rebolo.....	75
Tabela 7 - Planejamento estatístico do experimento.....	76
Tabela 8 - Peças analisadas em cada parâmetro por ensaio.....	77

LISTA DE ABREVIATURAS

Dr.	Doutor
Eng.	Engenheiro
Esc.	Escola
PhD.	Philosophy Doctor
Prof.	Professor
Rev.	Revisão

LISTA DE SIGLAS

3D	Tridimensional
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
cBN	Nitreto Cúbico de Boro
CNC	Comando Numérico Computadorizado
hBN	Nitreto Hexagonal de Boro
HSG	High Speed Grinding / Retificação em Altas Velocidades
MQL	Mínima Quantidade de Lubrificante
NBR	Norma Brasileira de Regulamentação
PPGEM	Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais
TTT	Tempo-Temperatura-Transformação
USA	United States of America / Estados Unidos da América
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
JSA	Japanese Standards Association

LISTA DE ACRÔNIMOS

AISI	American Iron and Steel Institute
CAD	Computer Aided Design / Desenho Auxiliado por Computador
CAE	Computer Aided Engineering / Engenharia Auxiliada por Computador
CAM	Computer Aided Manufacturing / Manufatura Auxiliada por Computador
IFES	Instituto Federal do Espírito Santo
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
SAE	Society of Automotive Engineers
JIS	Japanese Industrial Standards
DIN	Deutsches Institut für Normung
ISO	International Organization for Standardization

LISTA DE UNIDADES

Å	Ângström
cm ³	centímetro cúbico
eV	elétron-volt
g	grama
g/cm ³	grama por centímetro cúbico
GPa	Giga Pascal
h	hora
HV	dureza Vickers
J	Joule
J/kg.K	Joule por quilograma por Kelvin
J/mm ³	Joule por milímetro cúbico
K	Kelvin
kg	quilograma
kg/m ³	quilograma por metro cúbico
kg/mm ²	quilograma por milímetro cúbico
Knoop	dureza Knoop
m	metro
m/s	metro por segundo
m ³	metro cúbico
min	minuto
mm	milímetro
mm/min	milímetro por minuto
mm ²	milímetro quadrado
mm ² /min	milímetro quadrado por minuto
mm ² /s	milímetro quadrado por segundo
mm ³	milímetro cúbico
mm ³ /J	milímetro cúbico por Joule
mm ³ /min	milímetro cúbico por minuto
mm ³ /s	milímetro cúbico por segundo

MPa	Mega Pascal
MPa. \sqrt{m}	Mega Pascal vezes metro elevado a meia potência
N	Newton
°C	grau Celsius
Pa	Pascal
rot	rotação
rpm	rotação por minuto
s	segundo
W	Watt
W/m.K	Watt por metro vezes Kelvin
Ω	Ohm
$\Omega.m$	Ohm vezes metro

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Parâmetro de rede	[Å]
a_e	Profundidade de corte	[mm]
b, a_p	Largura do contato de retificação	[mm]
d	Distância interatômica	[Å]
d_e, d_{eq}	Diâmetro equivalente	[mm]
d_s	Diâmetro do rebolo	[mm]
d_w	Diâmetro da peça	[mm]
E	Desempenho de retificação	[mm ³ /J]
F_t	Força tangencial de corte	[N]
G	Relação de retificação G	[-]
H, L	Graus de dureza de rebolo	[-]
h_{eq}	Espessura de corte equivalente	[mm]
l_g	Comprimento geométrico de contato	[mm]
n_s	Rotação do rebolo	[rpm]
n_w	Rotação da peça	[rpm]
P	Potência de corte	[W]
Q'_w	Taxa de remoção específica de material	[mm ² /min]
Q_w	Taxa de remoção de material	[mm ³ /min]
Sa	Rugosidade	[µm]
Sku	Curtose	[µm]
Ssk	Assimetria	[µm]
u, e_c	Energia específica de retificação	[J/mm ³]
V_f	Velocidade de avanço	[mm/min]
V_{fa}	Velocidade de avanço axial	[mm/min]
V_{fr}	Velocidade de avanço radial	[mm/min]
V_s	Velocidade de corte	[mm/min]
V_s	Volume de material desgastado do rebolo	[mm ³]
v_w	Velocidade periférica da peça	[mm/min]
V_w	Volume de material removido da peça	[mm ³]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	22
1.1 Objetivos.....	25
1.2 Estrutura do trabalho.....	26
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1 Retificação	27
2.1.1 Sistema Tribológico do Processo de Retificação	31
2.1.2 Retificação Interna	33
2.2 Rebolos.....	38
2.2.1 Partículas Abrasivos	44
2.2.2 Rebolo de cBN.....	47
<u>2.2.2.1 Rebolos segmentados de cBN.....</u>	<u>49</u>
<u>2.2.2.2 Propriedades do cBN</u>	<u>49</u>
2.3 Dressagem.....	50
2.4 Parâmetros e variáveis do processo de retificação.....	52
2.4.1 Diâmetro equivalente (d_e)	53
2.4.2 Comprimento geométrico de contato (l_g).....	54
2.4.3 Velocidade de corte (v_s).....	55
2.4.4 Velocidade periférica da peça (v_w).....	56
2.4.5 Profundidade de corte (a_e)	56
2.4.6 Taxa de remoção de material (Q_w)	57
2.4.7 Espessura de corte equivalente (h_{eq}).....	58
2.4.8 Relação G	59
2.4.9 Força tangencial de corte (F_t)	60
2.4.10 Potência de corte (P).....	60
2.4.11 Energia específica (u).....	61
2.5 Meios lubri-refrigerantes	62
2.6 Topografia 3D de superfícies	65

2.7 Oportunidade da pesquisa	67
3 MATERIAIS E MÉTODOS	68
3.1 Peça de trabalho	68
3.2 Material da peça	68
3.3 Retificadora cilíndrica interna	70
3.4 Escolha do rebolo	71
3.5 Parâmetros de dressagem	71
3.6 Fluido lubri-refrigerante	73
3.7 O experimento	73
3.7.1 Rotação da peça (n_w).....	74
3.7.2 Velocidade de avanço axial do rebolo (V_{fa}).....	74
3.7.3 Planejamento estatístico do experimento	75
3.8 Análises e medições	78
3.8.1 Sistema de medição de forma e posição	78
3.8.2 Sistema de medição ótica 3D	79
3.8.3 Sistema de medição de diâmetro semiautomático de bancada	79
3.8.4 Equipamento de medição de potência.....	80
3.8.5 Microscópio eletrônico de varredura (MEV).....	81
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	82
4.1 Qualidade dimensional do diâmetro	82
4.2 Erro geométrico	86
4.2.1 Circularidade.....	87
4.2.2 Paralelismo	90
4.2.3 Retitude	95
4.3 Análise topográfica da peça	98
4.3.1 Rugosidade (S_a).....	98
4.3.2 Assimetria (S_{sk}).....	101
4.3.3 Curtose (S_{ku}).....	103
4.4 Potência de retificação	105

4.5 Análise do desgaste dos rebolos	108
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	114
REFERÊNCIAS	116
APÊNDICE - Tabelas com a média dos valores medidos por parâmetro	128

1 INTRODUÇÃO

O processo de retificação é uma das operações de usinagem mais amplamente utilizadas na remoção de material para produção de componentes de precisão (AZIZI *et al.*, 2009). A retificação é um processo de usinagem abrasivo, no qual a remoção do material ocorre através da interação entre grãos abrasivos e a peça, e visa obter melhor qualidade do acabamento da superfície (BELENTANI *et al.*, 2013). Os rebolos são compostos por três elementos, as partículas abrasivas para contato e remoção do material, o espaço intergranular para o armazenamento do material removido e o fluxo do meio de lubri-refrigeração e o material ligante para reter o grão no rebolo (WEGENER *et al.*, 2011). Os abrasivos podem ser classificados em naturais, convencionais e superabrasivos. Neste último grupo, salienta-se o cBN (Nitreto Cúbico de Boro), que foi adotado na execução dos experimentos desta pesquisa.

Durante a retificação, cada grão remove um pequeno cavaco da superfície do material da peça, gerando assim um determinado acabamento da superfície, ademais, a retificação é geralmente considerada um processo de acabamento na fabricação de componentes com alta precisão geométrica, dimensional e qualidade da superfície (KOPAC & KRAJNIK, 2006 e CHEN *et al.*, 2002). Portanto, na maioria dos casos, é o último processo de uma sequência de operações de usinagem (DANESHI *et al.*, 2014 e FERNANDES *et al.*, 2018). O tipo de superfície a ser gerada, a cinemática da operação de usinagem, bem como a forma ou o perfil do rebolo, são aspectos que caracterizam os tipos de processo de retificação (TÖNSHOFF, 1992). Dentre eles, destaca-se nesta pesquisa a retificação cilíndrica interna

A retificação cilíndrica pode ser feita externa e internamente (POPOVA, 2015). Como regra geral, na retificação externa, dois corpos cilíndricos entram em contato um com o outro. O comprimento do contato neste caso é relativamente pequeno (TAWAKOLI *et al.*, 2007). No entanto, a retificação cilíndrica interna geralmente é operada com uma pequena ferramenta de retificação em um furo. Ferramentas de formato cilíndrico em um furo automaticamente produzem comprimentos de contato relativamente maiores. Esse fenômeno leva a uma temperatura mais alta na zona de contato, o que pode causar danos térmicos (HOLTERMANN *et al.*, 2013).

Os rebolos de cBN são uma opção industrialmente atraente e estável a longo prazo para ligas metálicas de difícil usinabilidade, devido a sua alta produtividade, alta confiabilidade e redução de danos térmicos à peça. Isso é combinado com um acabamento superior da superfície da peça e boa estabilidade química e mecânica. Para isso, a aplicação de superabrasivos e as crescentes demandas por maior produtividade e maior qualidade requerem a seleção ideal de parâmetros de corte para processos de retificação de alto desempenho, a fim de aproveitar todo o potencial desse processo de fabricação.

O desenvolvimento de abrasivos resistentes ao desgaste, máquinas e tecnologias de usinagem adequadas levou a um aumento considerável da eficiência do processo de retificação. As vantagens econômicas assim obtidas consolidam e ampliam a posição da tecnologia de retificação, sendo este processo um método de acabamento que define a qualidade.

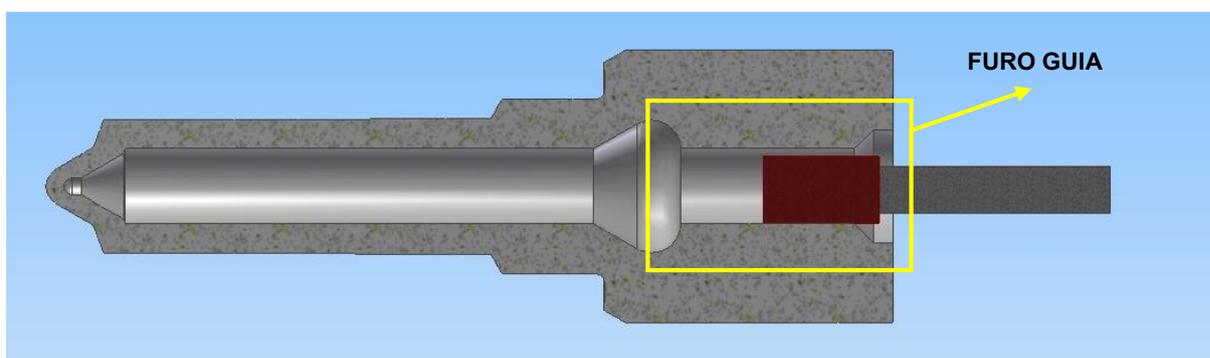
No entanto, apesar dos avanços no desenvolvimento de máquinas-ferramentas e da utilização de novas tecnologias na retificação interna, a melhora no desempenho deste processo ainda constitui-se um desafio. Suas peculiaridades, como a limitação do diâmetro do rebole pelo diâmetro do furo, a área de contato proporcionalmente grande entre a peça e a ferramenta, a dificuldade de entrega do meio lubri-refrigerante na zona de corte e a reduzida rigidez do sistema, principalmente da haste de montagem do rebole, limitam a aplicação das variáveis de entrada responsáveis pelos resultados positivos obtidos em outros processos de retificação. Com isso, observa-se que a retificação interna é um processo de fabricação muito complexo, com um grande número de parâmetros limitantes para a obtenção das características finais da peça, além da reprodutibilidade ser dificultada. De acordo com as exigências de qualidade, os parâmetros de configuração da máquina-ferramenta são determinados com a ajuda de testes de retificação, que consomem tempo e são caros. Além disso, na prática, o processo de retificação geralmente não é realizado nos limites que seriam tecnicamente possíveis para manter um certo nível de qualidade (JÜRGENHAKE, 1979 *apud* ANDRETTA, 2012).

Pela estrutura e complexidade dos mecanismos de controle, o processamento da retificação interna é mais complexo em comparação com a externa, uma vez que assume-se o controle não apenas do avanço radial, mas também da velocidade de avanço axial do rebole (V_{fa}). Além disso, exige gerenciamento de outros parâmetros com impacto significativo no próprio processo de retificação: o diâmetro (d_s) e as

demais dimensões do rebolo, a velocidade (V_s) e a rotação da peça (n_w), as características do rebolo (granulometria, tipo de grão abrasivo e tipo de ligante), entre outros (PEREVERZEV & AKINTSEVA, 2015). Dessa maneira, o estudo da influência desses parâmetros na retificação cilíndrica interna se torna cada vez mais uma alternativa de desenvolver as operações de modo a torná-las mais estáveis e com altos padrões de qualidade dimensional, geométrica e superficial.

Em virtude disso, o presente estudo analisa o processo de retificação cilíndrica interna do furo guia do bico injetor de combustível para motores a diesel fabricado em aço endurecido DIN 18CrNi8 cementado, temperado e revenido com dureza de 800 HV (Fig. 1). Para tal, é comparado o comportamento de duas especificações distintas de granulometrias do rebolo de cBN vitrificado (360 e 400) em diferentes velocidades de avanço axiais da ferramenta no interior do furo ($V_{fa} = 600, 800$ e 1000 mm/min) e de rotação da peça ($n_w = 1400, 1600$ e 1800 rpm). A análise é feita considerando-se a qualidade dimensional, erros geométricos e rugosidade das peças retificadas. Também são levados em conta a potência de retificação e o desgaste dos rebolos.

Figura 1 - Desenho da seção transversal do bico injetor de combustível



Fonte: Autor

O furo guia (Fig. 2) serve para orientar a trajetória da agulha, que oscila longitudinalmente no furo do bico injetor durante a admissão e escape no ciclo diesel (HOFFMANN *et al.*, 1997 *apud* ANDRETTA, 2012). As condições de operação do injetor demandam que a retificação interna do furo guia atenda à rígidas tolerâncias e exigências de qualidade da superfície, evitando assim os erros de posicionamento e problemas de estanqueidade que comprometeriam o desempenho do componente.

Figura 2 - Bico injetor de combustível para motores a diesel



Fonte: Empresa parceira

1.1 Objetivos

O principal objetivo desta pesquisa é analisar a influência da granulometria de rebolos de cBN vitrificados e dos parâmetros de rotação da peça (n_w) e a velocidade de avanço axial da ferramenta (V_{fa}) na retificação cilíndrica interna do aço DIN 18CrNi8. Foram considerados aspectos como a qualidade dimensional, rugosidade da superfície e os erros geométricos de circularidade, retitude e paralelismo, além da observação do desgaste dos rebolos e da potência de retificação.

Em vista disso, é possível elencar os seguintes objetivos específicos:

- Analisar a influência da granulometria dos rebolos, rotação da peça e velocidade de avanço axial sobre a qualidade dimensional da peça;
- Verificar os efeitos da granulometria do rebolo e dos parâmetros de rotação da peça e velocidade de avanço axial sobre a rugosidade, assimetria e curtose na superfície da peça retificada;
- Analisar os impactos da granulometria do rebolo e dos parâmetros de rotação da peça e velocidade de avanço axial sobre os erros geométricos de circularidade, retitude e paralelismo da peça;
- Verificar os efeitos da granulometria do rebolo, da rotação da peça e da velocidade de avanço axial do rebolo sobre a potência de retificação;
- Caracterizar o desgaste e constatar o tipo predominante nos rebolos utilizados nos experimentos.

1.2 Estrutura do trabalho

Esta dissertação está dividido em capítulos, cujos conteúdos são descritos abaixo.

Revisão bibliográfica: este capítulo refere-se ao estado da arte da pesquisa, na qual foram levantados os principais conceitos teóricos relacionados à retificação cilíndrica interna, bem como as principais características de aplicação do rebolo de cBN e suas condições de utilização.

Materiais e métodos: nesse capítulo é descrito o planejamento e o procedimento experimental dos ensaios, além dos materiais e equipamentos necessários para a execução deste estudo.

Resultados e discussões: neste capítulo é apresentado os resultados dos testes, ensaios e medições necessários para a conclusão da pesquisa.

Conclusões e Sugestões para trabalhos futuros: este capítulo relaciona as conclusões mais relevantes do estudo proposto e sugere oportunidades para futuras pesquisas.

Referências: lista de todas as referências bibliográficas utilizadas na elaboração deste projeto.

Apêndices: Apresentação das tabelas com todos os valores médios das medições dos parâmetros descritos no escopo deste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica com os principais assuntos que foram relevantes para o desenvolvimento deste trabalho, abordando os principais conceitos e fundamentos dos processos de retificação, principalmente os que envolvem a utilização de rebolos de cBN, retificação interna e controle da qualidade da superfície e geométrica de produtos metálicos oriundos deste processo.

2.1 Retificação

A retificação é um processo no qual a formação do cavaco se dá por meio do contato entre os grãos abrasivos e a peça (BELENTANI *et al.*, 2013). Diferentemente de outros processos que utilizam ferramentas com geometria definida, quando se adota uma referência macroscópica, os grãos abrasivos possuem arestas de corte irregulares e distribuídas aleatoriamente. Para MARINESCU *et al.* (2007), a retificação é geralmente empregada quando um ou mais dos seguintes fatores se aplicam: exigência de alta precisão, necessidade de alta taxa de remoção, e usinagem de materiais muito duros. Ainda que existam outros processos de usinagem, como o brunimento e a lapidação por exemplo, que são empregados em peças que exigem altos padrões de qualidade, de acordo com MALKIN & GUO (2008), tratando-se das operações de usinagem de alta precisão geométrica e dimensional, dificilmente outro processo consegue competir com a retificação.

O processo de retificação é geralmente considerado um processo de acabamento na fabricação de componentes com alta precisão geométrica e qualidade da superfície. Portanto, na maioria dos casos, é o último processo de uma sequência de operações de usinagem e a peça já possui um alto valor agregado quando se encontra nesta etapa, tornando sua rejeição muito cara (DANESHI *et al.*, 2014 e FERNANDES *et al.*, 2018). KLOCKE (2009) afirma que métodos de usinagem com arestas de corte geometricamente indefinidas são processos de precisão com os quais é possível obter uma qualidade da superfície e um grau de precisão muito altos, além disso, é possível obter altas taxas de remoção de material com métodos de retificação de alta eficiência que tornam possível a usinagem de grandes volumes de material.

Dentro do espectro dos processos de usinagem, a singularidade da retificação é encontrada em sua ferramenta de corte. Os rebolos e as ferramentas geralmente são compostos de dois materiais, pequenas partículas abrasivas chamadas grãos, que fazem o corte, e um agente de ligação mais suave para manter os inúmeros grãos abrasivos juntos em uma massa sólida (MALKIN & GUO, 2008). Um rebolo também possui na sua composição poros, além de grãos abrasivos e material de ligação citados anteriormente (CAI, 2004).

Um processo de retificação é traduzido pela remoção de material utilizando um rebolo, disposto por um grande número de grãos posicionados aleatoriamente, os grãos por sua vez penetram subsequentemente na peça para remover o material usinado (CHEN *et al.*, 2002). O corte ocorre na periferia ou na face do rebolo pois a retificação periférica é muito mais comum que a retificação radial (GROOVER, 2014).

Os processos abrasivos são a escolha natural para a usinagem de materiais muito duros (ROWE, 2014). Quando comparada com processos alternativos e até mesmo tradicionais, a retificação geralmente é o processo mais simples e mais barato para a usinagem desses tipos de materiais (ROWE, 2014 *apud* KLOCKE *et al.*, 2005).

Segundo BRINKSMEIER *et al.* (1999), a principal característica da retificação em relação aos demais processos de usinagem é a área de contato comparativamente grande entre a ferramenta e a peça, além do atrito entre os grãos abrasivos e a superfície da peça. Tal fato dificulta o fornecimento de fluido refrigerante nas regiões críticas de retificação, resultando em um alto risco de danos térmicos na camada da superfície da peça, como queima, tensões residuais e trincas, bem como no carregamento e desgaste prematuro do rebolo (BIANCHI *et al.*, 2000).

Para TÖNSHOFF (1992), o tipo de superfície a ser gerada, a cinemática da operação de usinagem, bem como a forma ou o perfil do rebolo, são propriedades que caracterizam os tipos de processo de retificação. Como resultado, observa-se a retificação de superfície, retificação cilíndrica e retificação de formas (ABNT NBR ISO 3002-1, 2013). Outro fator para subdividir diferentes processos de retificação é a posição da área de contato na própria peça, este critério é usado para distinguir entre retificação externa e interna por exemplo.

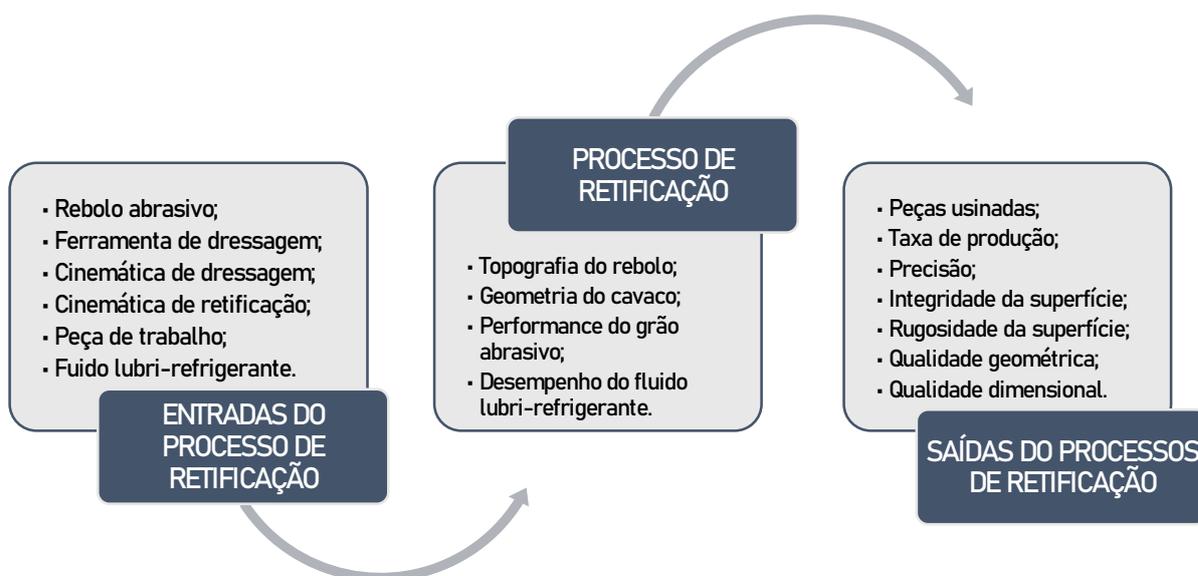
Nesta mesma perspectiva, SALJÉ (1982) faz uma classificação norteadada pelo processo e não somente pela forma da superfície usinada, assim como OLIVEIRA (2001), que acredita que a melhor forma de classificar e distinguir as diferentes operações de retificação é na adoção de critérios baseados no processo. Alguns

exemplos são a forma do perfil ativo do rebolo; a direção do movimento principal de avanço; o processo de corte contínuo ou descontínuo; e o sistema de fixação da peça. Já a norma DIN 8589 (1978) *apud* KLOCKE (2009) classifica o processo em tangencial de mergulho, tangencial de passagem, lateral de mergulho e lateral de passagem.

A retificação é notada como um dos mais complexos processos de usinagem, isso deve-se ao grande número de variáveis incorporadas a este procedimento (ALVES *et al.*, 2009). No planejamento de operações de retificação, é necessário definir as várias entradas e saídas e desenvolver relacionamentos entre elas (KING & HAHN, 1986).

Com foco nas interações de grãos abrasivos, a relação entre parâmetros influentes pode ser resumida como na Figura 3.

Figura 3 - Visão sistemática simplificada do processo de retificação



Fonte: Adaptado de CHEN *et al.* (2002) e CHEN & ROWE (1996)

Os fatores citados na primeira caixa de texto são as principais entradas de um processo de retificação e as saídas são listadas na terceira. O ambiente inclui a atmosfera, a estrutura da máquina e também a entrega de fluidos, os quais são muito importantes do ponto de vista da lubrificação.

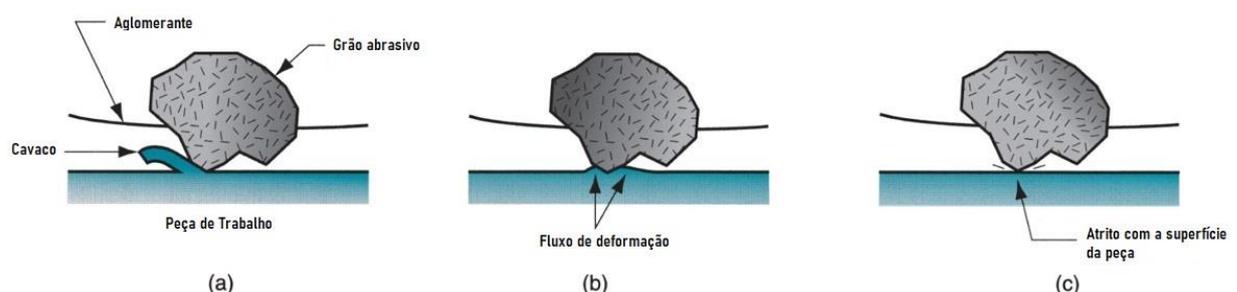
A interface peça-ferramenta na retificação, envolve remoção de material pelo contato entre um rebolo com uma topografia estruturada aleatoriamente com a peça (KOPAC & KRAJNIK, 2006). Tal fato justifica a nomenclatura dada ao processo, sendo este chamado de usinagem com arestas de corte geometricamente não definidas (DIN

8589, 1978). Cada partícula abrasiva remove um pequeno cavaco da superfície do material da peça, gerando assim um determinado acabamento da superfície. Para CHEN *et al.* (2002), o comportamento do sistema de retificação é fundamentado principalmente na qualificação das propriedades geométricas, cinemáticas, mecânicas, de energia e do material. O desempenho de um rebolo é geralmente avaliado por meio da medição de força, vibração, temperatura e rugosidade. O domínio global do processo de retificação começa com a análise da formação de cavaco por partículas abrasivas individuais, que conseqüentemente remete ao estudo do sistema tribológico da operação, da escolha do grão abrasivo e das características dos rebolos.

Segundo CHEN *et al.* (2002), as partículas abrasivas penetram subsequentemente na superfície para remover o material da peça, sendo que, o processo de remoção deste material alterna as etapas de corte, deformação e atrito sem remoção de material.

Devido às posições e orientações aleatórias das partículas abrasivas do rebolo, durante o processo de retificação as alturas dos grãos individuais não estão totalmente engajadas no corte real, pois alguns grãos não se projetam o suficiente na superfície da peça a fim de realizar o corte efetivo. Com isso, observa-se três tipos de ações das partículas abrasivas conforme ilustrado na Figura 4: (a) o corte, no qual os grãos são posicionados suficientemente profundos na superfície da peça de modo a formar um cavaco e remover o material, (b), o sulcamento ou deformação, em que o grão é projetado na peça, mas não o suficiente para efetivar o corte, em vez disso a superfície de trabalho é deformada e a energia é consumida, e (c) o atrito sem a remoção de qualquer material, na qual há contato do grão com a superfície, mas apenas ocorre a abrasão por atrito e consumo de energia (GROOVER, 2014).

Figura 4 - Três tipos de ações das partículas abrasivas na retificação: (a) corte, (b) deformação, e (c) atrito sem remoção de material



Fonte: Adaptado de GROOVER (2014)

As proporções de atrito, deformação e corte afetam todos os aspectos da retificação, incluindo as forças de retificação, desgaste das partículas abrasivas, temperaturas na retificação e textura da superfície da peça. Como consequência, o comportamento da retificação só pode ser explicado em termos da natureza do contato dos grãos e dos efeitos no desgaste dos grãos (ROWE, 2010).

Segundo MARINESCU *et al.* (2007), um processo de retificação é uma interação de fenômenos geométricos, cinemáticos e dinâmicos, físicos, químicos e tribológicos. Não é necessário entender completamente todas essas interações para obter um processo satisfatório, mas é necessário estar ciente dos fatores que podem influenciar o resultado e procurar determinar as melhores práticas para cada parte do sistema.

2.1.1 Sistema Tribológico do Processo de Retificação

A estrutura da tecnologia de processamento abrasivo pode ser investigada correlacionando o processo de usinagem com o conhecimento de atrito, desgaste e procedimentos de lubrificação. Tal situação define um específico sistema tribológico. Nesta seção serão abordados os componentes presentes em um típico tribossistema em operações de retificação e sua influência nos parâmetros e variáveis do processo.

Os elementos envolvidos no processo de retificação formam um complexo sistema tribológico. A superfície do material da peça estabelece uma intensa relação com o material abrasivo, o fluido e a atmosfera. O comportamento resultante do desgaste da superfície da peça e do rebolo está fortemente relacionado aos constituintes do material e à química que ocorre sob essas condições tribológicas (ROWE, 2014). A identificação do tribossistema do processo de retificação se faz necessária para descrever as interações mecânico-químicas que ocorrem sob contatos abrasivos e de atrito acrescidas de altas velocidades e altas temperaturas.

Para BRINKSMEIER *et al.* (1999), a estrutura de um sistema de retificação tribológica consiste em quatro elementos:

- O rebolo;
- A peça;
- O elemento interfacial, caracterizado pelo meio lubri-refrigerante;
- O meio circundante, geralmente o ar.

Esses elementos estruturais se distinguem por seus atributos tribologicamente relevantes, como características do material e de forma, bem como pelos parâmetros físicos, químicos e tecnológicos dos componentes do sistema.

As condições de atrito da interface, as características de fluxo do material e a velocidade de corte têm uma influência significativa na formação de cavacos. Portanto, uma descrição consistente do mecanismo de corte compreende relações complexas de penetração entre dois materiais duros, a mecânica elasto-plástica e aspectos da tribologia, que influenciam a cinemática e as condições de contato (KOPAC & KRAJNIK, 2006).

A função de um sistema tribológico de retificação é usinar materiais por remoção de material por meio de um mecanismo abrasivo. Em vista disso, MARINESCU (2004) afirma que as inter-relações entre os elementos do sistema determinam os processos tribológicos na área de contato, sendo que, os efeitos combinados desses processos possuem grande influência sobre o processo de retificação.

Os parâmetros de entrada determinam a carga mecânica e térmica de um sistema tribológico, que na retificação pode ser descrito pela natureza do movimento relativo das superfícies e pela velocidade, alta ou baixa, contínua ou oscilante. Além disso, eles também são descritos por características do processo, como força, temperatura, níveis de tensões e até mesmo frequências. Como ocorre na grande maioria dos métodos de processamento, as quantidades de entrada para o sistema tribológico durante a retificação são geralmente predefinidas, de modo que a conversão das funções do sistema depende principalmente da estrutura do sistema tribológico. A conversão dos parâmetros de entrada em saída ocorre por meio de processos tribológicos, durante os quais ocorrem perdas causadas por atrito e desgaste (CAMPBELL, 1993 *apud* BRINKSMEIER *et al.*, 1999).

2.1.2 Retificação Interna

Para POPOVA (2015) e D'YAKONOV (2014), a retificação interna é comumente usada para o acabamento de furos cilíndricos, cônicos e complexos, tanto na produção única quanto na produção em massa. Pode servir como estágio intermediário ou final na usinagem, com aumento da precisão dimensional e da forma do furo. O processo de retificação interna possui faixas de tolerância muito estreitas, tanto nas dimensões quanto nas características geométricas da peça (OH & SO, 2012).

A retificação cilíndrica, por exemplo, pode ser feita externa e internamente. No entanto, os ciclos automáticos de retificação interna são mais complexos do que a retificação externa em termos de estrutura e facilidade de controle (POPOVA, 2015). Como regra geral, na retificação externa, dois corpos cilíndricos entram em contato um com o outro. O comprimento do contato neste caso é relativamente pequeno. Todavia, a retificação cilíndrica interna geralmente é operada com uma pequena ferramenta de retificação em um furo. As ferramentas de retificação interna em um furo criam automaticamente comprimentos de contato relativamente maiores, esse fenômeno leva a uma temperatura mais alta na zona de contato, o que pode causar danos térmicos (TAWAKOLI *et al.*, 2007).

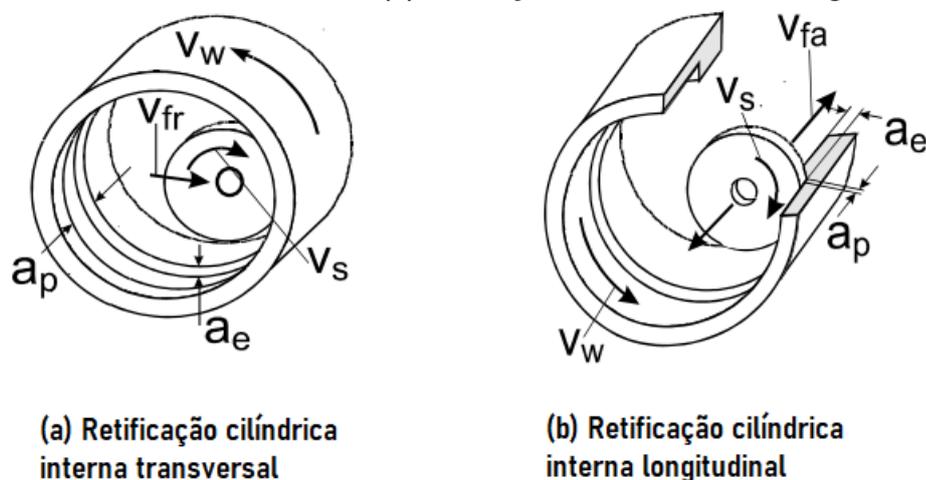
Pesquisadores como KLOCKE (2009) e ROWE (2014) afirmam que, como no caso da retificação cilíndrica externa, a retificação cilíndrica interna também é classificada como:

- Retificação periférica cilíndrica interna transversal (retificação por imersão);
- Retificação longitudinal periférica cilíndrica interna (retificação longitudinal).

A cinemática da retificação cilíndrica interna é idêntica à dos métodos de retificação cilíndrica externa. As equações derivadas para a taxa de remoção de material específica também são válidas aqui.

A visão metodológica dos tipos de retificação cilíndrica interna descritas por KLOCKE (2009) e ROWE (2014) são ilustradas na Figura 5.

Figura 5 – Visão metodológica dos tipos de retificação cilíndrica interna: (a) retificação cilíndrica interna transversal. (b) retificação cilíndrica interna longitudinal



Fonte: Adaptado de KLOCKE (2009)

Nas retificadoras internas convencionais, conforme descrito por HAHN (1964), o rebole é montado na extremidade livre de um eixo e alimentado radialmente em uma peça rotativa por uma lâmina transversal. Como nem o eixo do rebole nem o suporte de trabalho são perfeitamente rígidos, ocorrem deflexões à medida que a força de retificação aumenta.

Além de comprimentos de contato maiores, TAWAKOLI *et al.* (2007) também descrevem as seguintes desvantagens como resultado do processo de retificação interna convencional:

- Devido ao espaço limitado para os bicos, a condução de fluido refrigerante na zona de contato é bastante difícil.
- Podem ocorrer deflexões das ferramentas de retificação no processo de retificação profunda, o que causa imprecisão dimensional e baixos padrões de rugosidade da superfície. Por outro lado, a deflexão leva à redução da taxa de remoção de material e ao aumento do tempo do processo.

Na retificação interna, o diâmetro do rebole depende do diâmetro do furo que está sendo retificado. Com o aumento do diâmetro do rebole, sua área de contato com a peça aumenta e, conseqüentemente, a taxa de aquecimento aumenta. Ao mesmo tempo, pequenos rebolos operando em baixas velocidades sofrem desgaste significativo, uma vez que os grãos abrasivos individuais estão sob uma carga considerável. Portanto, o desempenho dos rebolos internos deve ser considerado em função da razão do diâmetro do rebole e o diâmetro da peça (VASKER, 1967 *apud* D'YAKONOV, 2014).

Pesquisadores como MARINESCU *et al.* (2007) consideram a retificação interna um sistema muito delicado, onde o principal ponto crítico é a montagem do rebolo, pois este sistema pode facilmente se desviar durante a retificação, causando problemas de conicidade e forma. As condições de retificação são impulsionadas principalmente pela rigidez do sistema e pelo nível da força normal de retificação.

Na retificação cilíndrica interna, os pequenos orifícios são submetidos ao processo de remoção de material, sendo que, as ferramentas de retificação possuem um diâmetro ainda menor que o furo. Rebolos operando em um furo causam maiores superfícies de contato ou comprimentos de contato entre a peça e a ferramenta. Tal fato, somado à insuficiente existência de fluido de lubri-refrigeração na zona de contato atrelado à falta de espaço suficiente para injeção do fluido, geram um alto volume de calor na zona de contato que por sua vez podem causar uma série de danos térmicos (HOLTERMANN *et al.*, 2013).

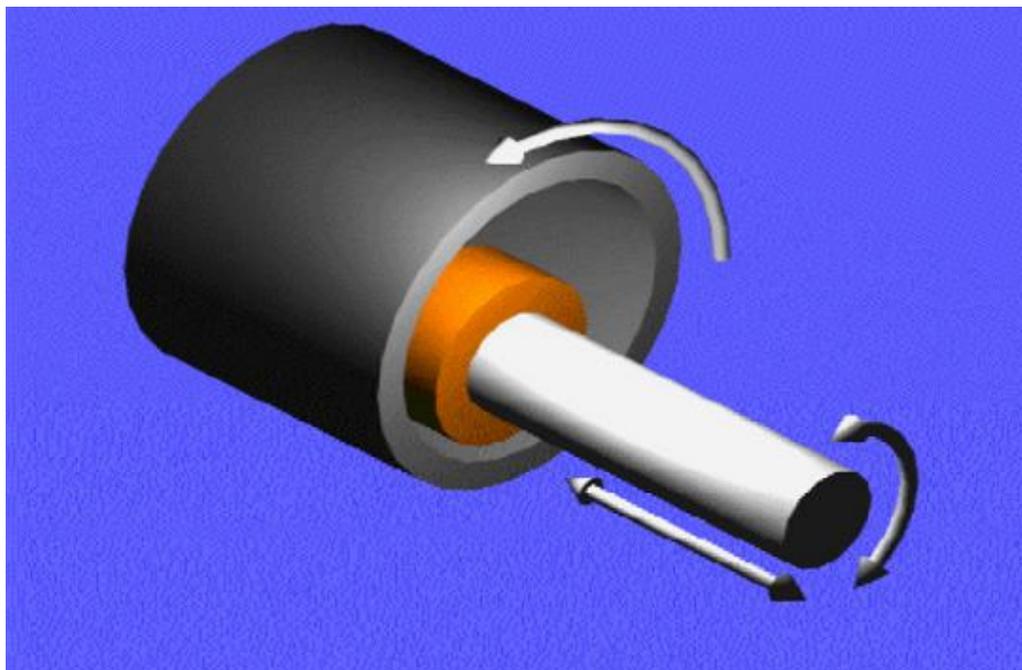
Na retificação interna, o eixo-ferramenta e a haste de fixação do rebolo constituem os pontos críticos, uma vez que sua rigidez equivalente é substancialmente menor que a destes componentes na retificação externa. Esta baixa rigidez se reflete no erro dimensional e de forma do furo produzido (ANDRETTA, 2012).

Ainda para TAWAKOLI *et al.* (2007), no processo de retificação interna, é necessário ter não apenas o movimento usual de corte e avanço do rebolo, mas também o movimento periférico e longitudinal de avanço. O movimento de avanço pode ser alcançado pela rotação da peça e/ou pela rotação periférica da ferramenta, já o movimento de avanço longitudinal é uma resultante do rebolo (Fig. 6). Além disso, em alguns casos, há a necessidade de se utilizar um eixo prolongador. Nestas situações, a ferramenta é fixada na extremidade do eixo e este é fixado na máquina, com isso, criam-se tensões de deflexão relativamente alta, especialmente quando o eixo é pouco rígido, muito longo ou possuir um diâmetro pequeno. A alta tensão resultante, a flexão elástica correspondente, e também a deformação elástica na extremidade livre da ferramenta levam à distorção da mesma no ponto de contato e isso pode causar imprecisão dimensional e inúmeros erros de forma.

Segundo a ATLANTIC GmbH, fabricante alemã de rebolos abrasivos, os tipos de grãos mais resistentes ao desgaste são predominantemente selecionados para o processo de retificação cilíndrica interna. Estes incluem nitreto cúbico de boro (cBN), óxido de alumínio sinterizado e diversos outros óxidos de alumínio. Ligantes

vitrificados e tamanhos de grãos que variam entre 54 e 180 são utilizados com mais frequência neste processo. O grau de dureza do rebolo entre **H** e **L** é normalmente selecionado como padrão para tais operações.

Figura 6 - O princípio de retificação cilíndrica interna abordado nesta pesquisa



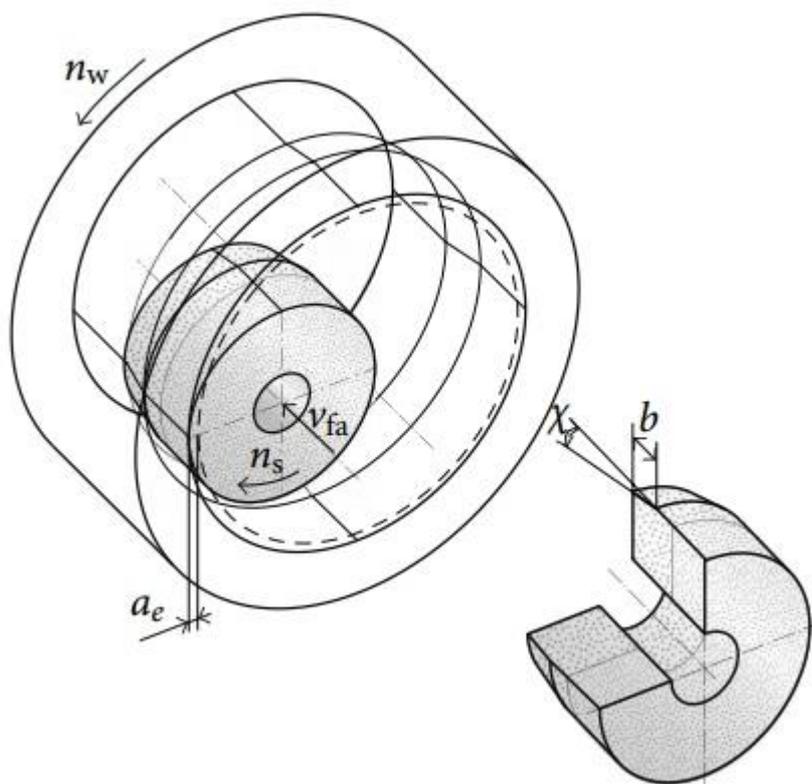
Fonte: TAWAKOLI, RASIFARD & RABIEY (2007)

Os parâmetros geométricos e dimensionais, como tolerâncias ou rugosidade, geralmente são determinados pelo projeto da peça e são fixos. Para atingir tais tolerâncias geométricas e precisão definida, parâmetros de retificação como profundidade de corte ou velocidade de avanço devem ser selecionados de tal maneira que as forças de retificação não excedam uma quantidade crítica que cause danos térmicos à peça (INASAKI, 1991).

No tocante as máquinas-ferramentas para retificação interna, estas devem dispor de altas velocidades de rotação, a fim de atingir a melhor eficiência de retificação necessária e a precisão requerida para o acabamento. No entanto, à medida que o diâmetro do furo se torna menor e a qualidade da superfície, dimensional e geométrica aumenta, as retificadoras convencionais não conseguem atender simultaneamente às demandas qualitativas e econômicas. Com isso, as novas tecnologias empregadas em máquinas para retificação interna tornam o custo da operação cada vez mais elevado, trazendo consigo a necessidade de otimizar os parâmetros e processos envolvidos (NOMURA *et al.*, 2005).

Além disso, durante a retificação cilíndrica interna o rebolo corta o material da peça com uma de suas bordas frontais, o que ocasiona um desgaste natural na superfície ativa de ataque do rebolo. O modelo de desgaste simples pressupõe que haja uma formação de desgaste diagonal nesta região. Porém, segundo NADOLNY & SŁOWIŃSKI (2011) a forma é curvilínea (Fig. 7) e depende principalmente da profundidade de corte (a_e), da velocidade de avanço axial (V_{fa}), da rotação da peça (n_w) bem como das características do rebolo.

Figura 7 - Metodologia de desgaste do rebolo na retificação cilíndrica interna longitudinal



Fonte: NADOLNY & SŁOWIŃSKI (2011)

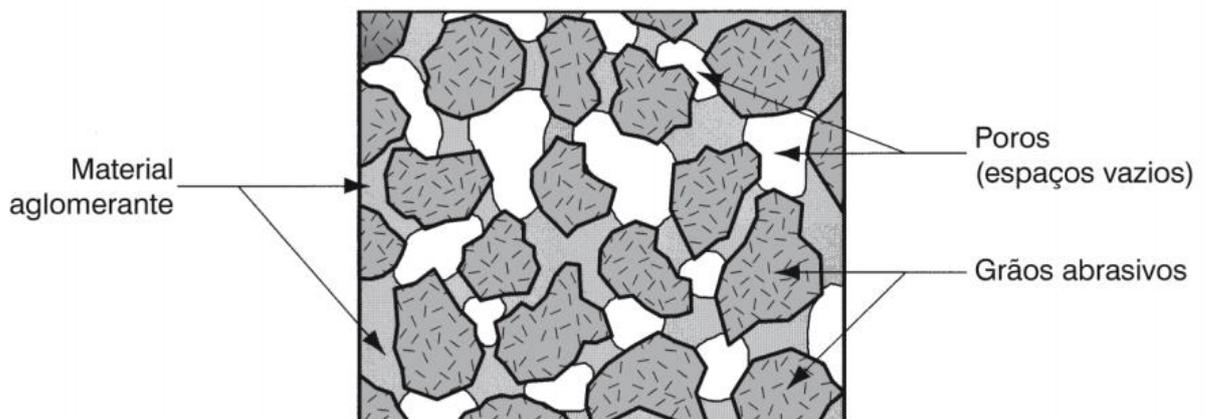
Em vista disto, a influência da velocidade de avanço axial do rebolo e da rotação da peça incidem direta e indiretamente na qualidade e integridade da superfície, nos erros de forma e dimensionais e no padrão de desgaste do rebolo.

2.2 Rebolos

As partículas abrasivas para contato e remoção do material, o espaço intergranular para o armazenamento do material removido e o fluxo do meio de lubri-refrigeração, bem como o material ligante para reter o grão compõem os três elementos do rebolo (WEGENER *et al.*, 2011). Este elemento ligante, também chamado de aglomerante, mantém as partículas no lugar e define a forma e a estrutura do rebolo. Este dois componentes e a maneira como são fabricados determinam o que GROOVER (2014) chama de cinco parâmetros básicos de um rebolo:

- Material abrasivo;
- Tamanho de grão;
- Material aglomerante;
- Dureza do rebolo;
- Estrutura do rebolo.

Figura 8 - Estrutura típica de um rebolo de retificação



Fonte: GROOVER (2014)

Segundo KLOCKE (2009), as propriedades essenciais de um rebolo podem ser ajustadas pela composição do ligante, pelas quantidades volumétricas dos componentes do ligante e pelo processo de fabricação.

Diferentes materiais abrasivos são apropriados para a retificação de inúmeros tipos de materiais. As propriedades gerais de um material abrasivo usado em rebolos incluem alta dureza, resistência ao desgaste, tenacidade e friabilidade. Dureza,

resistência ao desgaste e tenacidade são propriedades desejáveis para qualquer material de ferramenta de corte, porém, a friabilidade refere-se à capacidade do material abrasivo de fraturar quando o gume de corte do grão desgastar, expondo assim uma nova aresta afiada (GROOVER, 2014).

Para JACKSON & DAVIM (2011), os rebolos são projetados para suportar uma variedade de cargas durante o processo de usinagem. Para obter um alto desempenho de um rebolo, ele deve permanecer afiado e ter a capacidade de absorver um certo volume de material removido. Portanto, o rebolo deve ser poroso e deve suportar altas cargas de retificação que são colocadas nos grãos abrasivos e nas pontes de ligação que mantêm os grãos em posição. A natureza das propriedades do rebolo na interface entre o ligante e os grãos abrasivos é muito importante quando se considera como as forças são transmitidas para as pontes de ligação através da camada interfacial.

O aglomerante é o porta-ferramenta do sistema de rebolo. Como a maioria dos rebolos deve ter a capacidade de expor novos grãos para manter a superfície ativa de corte, os requisitos físicos das ligações entre o aglomerante e o grão abrasivo variam sob diferentes condições de trabalho. As ligações variam quanto à elasticidade, fragilidade, durabilidade, capacidade de resistir ao calor e à natureza da interface abrasiva da ligação (HAHN, 1987).

Os rebolos variam enormemente em *design*, de acordo com a finalidade para a qual o rebolo deve ser usado. Além da variedade de abrasivos, existe ainda uma variedade de elementos ligantes que podem ser empregados (MARINESCU *et al.*, 2007).

Quanto ao material aglomerante, existem três famílias principais: vitrificadas, resinóides e metálicas. Eles determinam a velocidade máxima de operação da ferramenta, bem como a resistência do rebolo (HAHN, 1987; KLOCKE, 2009; KOPAC & KRAJNIK, 2006; SALMON, 1992 E BIANCHI *et al.*, 1999 *apud* WANG, 2008).

- **Resinóides:** as resinas fenólicas e de poliamida são usadas na fabricação da maioria dos rebolos resinóides. Conseguem obter altas taxas de remoção de material, porém, são limitados quanto aos atributos ligados a manutenção da sua forma e vida útil.

- **Metálicas:** os aglomerantes metálicos possuem em sua composição bronze, cobalto, tungstênio, cobre, estanho, níquel e/ou ferro fundido. São extremamente duros e resistentes ao desgaste. Esta classe de ligante é obtida pela sinterização de pós metálicos ou pela deposição galvânica sobre um corpo até que se tenha uma espessura mínima suficiente para fixar os grãos abrasivos. Neste caso os grãos utilizados geralmente são superabrasivos (cBN ou diamante).
- **Vitrificadas:** rebolos vitrificados são essencialmente compostos por aglomerantes a base de vidro. São ligações relativamente frágeis e extremamente resistentes ao desgaste, além de possuírem boa estabilidade térmica.

Para MARINESCU *et al.* (2007), o ligante deve reter o abrasivo até que o desgaste o torne ineficiente como ferramenta de corte. Além disso, a porosidade do rebolo deve ser suficiente para o transporte de fluidos e a liberação de cavacos. Portanto, o rebolo deve ser projetado e fabricado de acordo com os requisitos específicos do processo como o material da peça e o regime da taxa de remoção.

Durante a vida útil de um rebolo, a ligação é desgastada e a superfície de retificação é regenerada. Esse fenômeno, quando ocorre durante o processo de retificação, é chamado de friabilidade, e em alguns casos, é artificialmente induzido pelo processo de dressagem, que caracteriza uma nova afiação ou um novo perfilamento do rebolo. Um fabricante de rebolos define o grau do rebolo pela quantidade de aderência em relação à quantidade de abrasivo no rebolo, ou seja, indica a resistência do rebolo em reter os grãos abrasivos durante o processo de corte. Um rebolo com mais aderência por partícula abrasiva normalmente terá uma ligação mais forte ou mais dura. O grau do rebolo é medido em uma escala que varia entre “macio” e “duro”, na qual rebolos macios são utilizados em aplicações que exigem baixas taxas de remoções de material e na retificação de materiais endurecidos. Já os rebolos duros são normalmente empregados para a obtenção de altas taxas de remoção de material (CAI *et al.*, 2003 e HAHN, 1987).

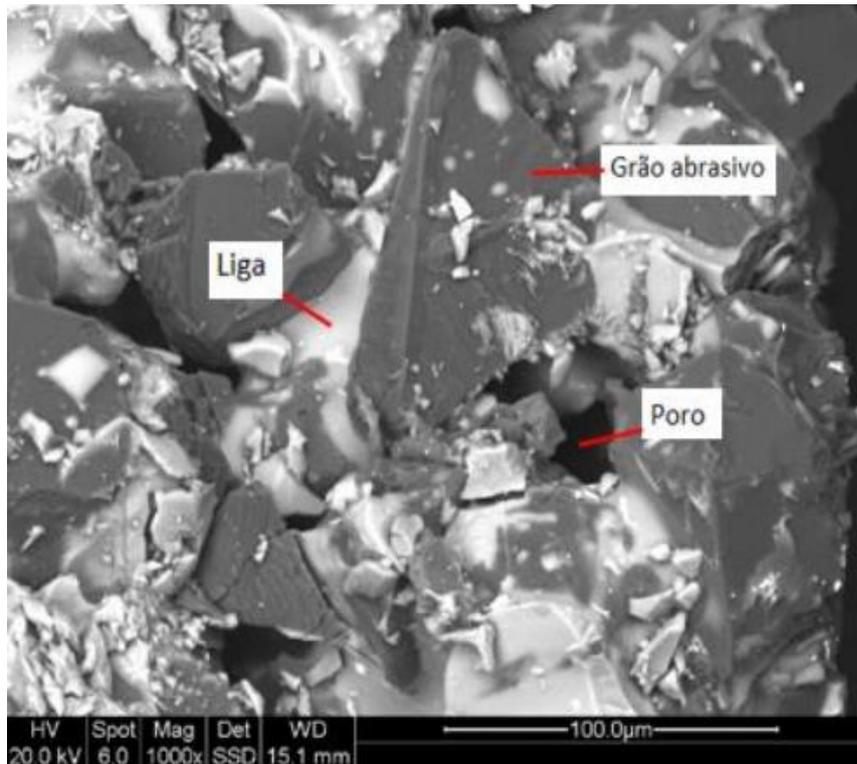
A distância entre os grãos abrasivos é ainda definida como a estrutura ou porosidade do rebolo. Em outras palavras, a estrutura do rebolo refere-se ao espaçamento relativo das partículas abrasivas no rebolo, e é medida em um intervalo que pode variar entre “aberta” e “fechada”. Uma estrutura aberta é aquela em que a

proporção de poros no volume total do rebolo é relativamente grande e a proporção de grãos abrasivos é relativamente pequena, isto é, existem mais espaços vazios (poros) e menos grãos por unidade de volume em um rebolo de estrutura aberta. Por outro lado, uma estrutura fechada ou densa é aquela em que a proporção de poros é relativamente pequena comparada a de grãos abrasivos. A porosidade ideal para uma dada operação é definida como um equilíbrio entre ter uma estrutura aberta o suficiente para permitir a liberação de cavacos e a introdução de líquido refrigerante no rebolo e uma estrutura fechada o suficiente para garantir partículas abrasivas suficientes para realizar o trabalho necessário (MARINESCU *et al.*, 2007; HAHN, 1987; GROOVER, 2014).

Um rebolo é descrito como afiado se remover um cavaco rapidamente a um nível de força baixo o suficiente para que a peça não seja excessivamente danificada termicamente. Um rebolo muito afiado pode gerar um acabamento da superfície muito áspero na peça, já um rebolo com menor protrusão de grãos tenderá a remover um cavaco mais lentamente e/ou consumir mais energia e gerar um acabamento mais suave. Tais afirmações são feitas por HAHN (1987) sem levar em consideração outros fatores que também influenciam nas características citadas, como fixação, vibração e parâmetros de trabalho.

Os rebolos também podem ser nomeados como rebolos convencionais ou rebolos superabrasivos. Os rebolos ditos convencionais são compostos partículas abrasivas de óxido de alumínio (Al_2O_3) eletrofundido ou microcristalino, ou de carbonetos de silício (SiC). Já os rebolos superabrasivos são fabricados com grãos de cBN (Fig. 9) ou diamante (WEGENER *et al.*, 2011).

Figura 9 - Rebolo de cBN



Fonte: ARANTES (2019)

Os grãos superabrasivos são muito mais caros do que os abrasivos convencionais mencionados anteriormente, assim, em regras gerais, a fabricação de rebolos superabrasivos também se torna mais cara do que a dos convencionais. Em virtude dos grãos superabrasivos utilizados na sua composição, tais rebolos exibem uma maior resistência ao desgaste e valores mais altos de resistência à ruptura do que no uso dos rebolos convencionais, assim podem alcançar maiores taxas de remoção de material, que é o que torna esses rebolos econômicos (KLOCKE, 2009 e GUO *et al.*, 1999).

Dado o alto número de possibilidades e combinações (tipo de grão abrasivo, ligante, grau, afiação, abertura, porosidade, etc.) para determinar a escolha correta de um rebolo para uma operação de retificação, o conhecimento sobre o processo deve ser minimamente claro para que o rebolo não seja subutilizado ou opere em condições extremas. Para HAHN (1987), sete fatores principais afetam o uso e a seleção de rebolos para uma determinada operação, são elas:

- O material da peça a ser retificada: o conhecimento da dureza, da composição química e da natureza da formação de cavacos de um material pode ajudar na seleção de um rebolo.
- Quantidade de material a ser removido e o acabamento necessário: um método simples de declarar esse fator é a diferença entre a peça antes e depois da retificação. Isso inclui o material a ser removido, dimensões a serem mantidas, acabamento e integridade da superfície requerida.
- A natureza do fluido lubri-refrigerante: Para os casos em que há necessidade de utilizar meios lubri-refrigerantes, estes são importantes em relação à capacidade de lubrificar, conduzir calor e transportar limalhas da superfície de retificação. Estas informações ajudam a determinar o grau do rebolo por exemplo.
- A velocidade de rotação do rebolo: um rebolo girando em alta velocidade tende a gerar um cavaco menor por rotação em comparação a um rebolo com rotação mais baixa, movendo-se nas mesmas taxas de avanço.
- A área de contato de retificação: em um determinado nível de carga, a área de contato de retificação, determina a força disponível para gerar um cavaco. Quanto maior a área de contato, menor a força disponível. Para grandes áreas de contato, são utilizados rebolos afiados e macios, já para pequenas áreas, abrasivos duráveis e rebolos relativamente duros são usados para resistir às forças durante a retificação.
- A severidade da operação: em algumas operações de retificação de precisão, o ciclo de retificação é interrompido, isso gera um impacto adicional ao que o rebolo de retificação deve suportar. Se esse impacto for severo, é necessário um abrasivo mais durável e um grau maior para evitar desgaste prematuro.
- Potência disponível para a retificação: Todas as outras variáveis sendo iguais e um sistema rígido sendo assumido, o aumento da potência de um sistema tende a causar mais calor e força sobre o rebolo, ocasionando mais desgaste. A remoção de potência de um sistema pode fazer com que o rebolo tenha a força disponível para gerar um cavaco insuficiente, podendo causar atrito, vibrações e até mesmo a ruptura catastrófica do rebolo.

Durante a vida útil do rebolo suas características mudarão significativamente, em virtude disto uma avaliação confiável de seu desempenho requer atenção às suas características ao longo do tempo. Portanto, as variáveis que caracterizam a operação do rebolo devem ser expressas em função do tempo (D'YAKONOV, 2014). Este assunto será abordado de forma mais detalhada nas próximas seções.

2.2.1 Partículas Abrasivos

Os grãos abrasivos são as ferramentas de corte ou os produtores de cavacos no rebolo. As características dos abrasivos que determinam sua eficiência na remoção do material são a dureza, estrutura e forma do grão, a friabilidade, a química do abrasivo e se o grão foi tratado ou revestido.

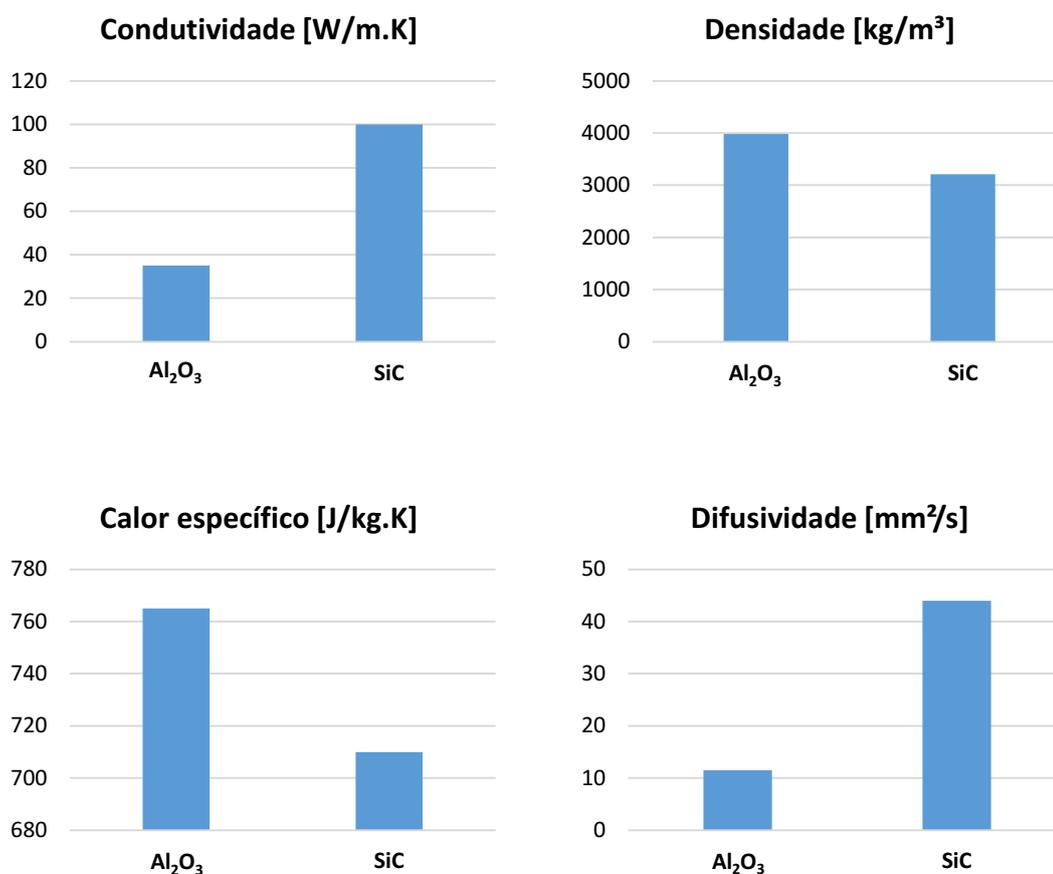
Para HAHN (1987), os abrasivos utilizados no processo de retificação podem ser subdivididos em três grupos: abrasivos naturais, abrasivos convencionais e superabrasivos. Abrasivos naturais, como garnet, sílex e óxido de ferro normalmente não são usados em rebolos, eles não possuem durabilidade suficiente para suportar as pressões do processo de retificação. Esses abrasivos ainda são usados em algumas aplicações abrasivas revestidas ou em jateamento abrasivo, nas quais pressões muito leves e abrasivos de baixo custo são úteis. Os abrasivos convencionais são o óxido de alumínio (Al_2O_3) e o carboneto de silício (SiC). Pequenas adições de outros elementos, como óxido de titânio (TiO_2) e óxido de zircônio (ZrO_2), tendem a aumentar a tenacidade dos abrasivos convencionais, porém reduzem a dureza (ROWE, 2010).

Os superabrasivos são diamante e o nitreto cúbico de boro (cBN). O diamante está disponível como abrasivo natural extraído e como abrasivo sintético, porém o alto custo e a disponibilidade limitada de diamantes naturais estimularam a conversão para diamantes artificiais ou sintéticos. O diamante é usado para retificar carbonetos, cerâmica, vidro e outros materiais refratários (HAMDI *et al.*, 2003). Os rebolos de cBN são naturalmente mais estáveis termicamente que os de diamante, além disso os rebolos de cBN com ligações vitrificadas podem ser empregados em operações de retificação que atingem uma temperatura ainda mais alta e, portanto, uma gama muito maior de ligações vítreas pode ser considerada para sua fabricação. Embora as ligações vitrificadas sejam ocasionalmente usadas com diamante, elas se tornaram

comumente usadas com cBN para retificação de precisão de materiais metálicos (MALKIN & GUO, 2008). As características e os aspectos do rebolo de cBN serão revisados de forma mais detalhada na próxima seção.

O Gráfico 1 destaca algumas propriedades mecânicas e térmicas dos abrasivos convencionais e dos superabrasivos.

Gráfico 1 - Valores típicos de propriedades térmicas para abrasivos convencionais a temperatura ambiente



*Valores para óxido de alumínio com 96% de pureza.

**Valores para o carboneto de silício sinterizado.

Fonte: Adaptado de ROWE (2010) e ASM Handbooks *apud* CALLISTER & RETHWISCH (2016)

A divisão entre abrasivos convencionais e superabrasivos é embasado em uma diferença drástica na dureza dos grãos, levando a características muito diferentes de desgaste do rebolo e de estratégias de retificação. A divisão também é fundada no custo, os rebolos fabricados com superabrasivos costumam ser bem mais caros (MARINESCU *et al.*, 2007).

Tabela 1 - Valores das propriedades térmicas para os superabrasivos a temperatura ambiente

Superabrasivo	Condutividade [W/m.K]	Densidade [kg/m ³]	Calor específico [J/kg.K]	Difusividade [mm ² /s]
cBN	240-1300	3480	506	136-738
Diamante	600-2000	3520	511	333-1110

*Valores considerados para o diamante sintético.

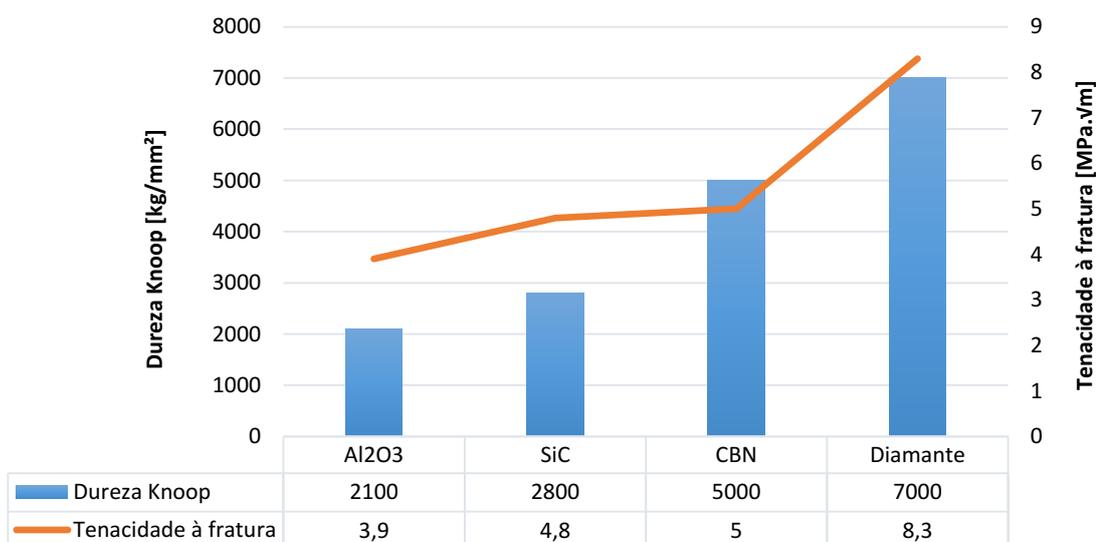
Fonte: ROWE (2010)

Segundo KLOCKE (2009), a remoção do material no processo de retificação é causada pela interação do grão abrasivo com a superfície da peça. Para isso, as seguintes premissas são exigidas do material abrasivo:

- Um alto grau de dureza e resistência, a fim de facilitar a formação de cavacos e manter a aresta de corte por um período mais longo.
- Elevada resistência térmica, para que o grão possa suportar tanto as altas temperaturas de usinagem quanto as rápidas mudanças de temperatura.
- Resistência química, a fim de evitar a síntese de reações químicas ao interagir com o ar, o fluido lubrificante ou o material da peça. Tais reações podem mitigar o desempenho do abrasivo.

O Gráfico 2 ilustra um comparativo entre a dureza e a tenacidade à fratura dos principais abrasivos utilizados nas operações de retificação.

Gráfico 2 - Gráfico de dureza e tenacidade à fratura dos principais abrasivos utilizados na retificação



Fonte: Adaptado de ROWE (2010); CHAGAS (2012) e ASM Handbooks *apud* CALLISTER & RETHWISCH (2016)

Além disso, DING *et al.* (2017) destacam que os rebolos de cBN empregados na retificação com altas velocidades e na retificação de alta eficiência geralmente estão sujeitos a requisitos especiais em relação à resistência à fratura e ao desgaste; ao mesmo tempo, boas características de amortecimento, alta rigidez e boa condutividade térmica também são desejáveis.

O tamanho do grão das partículas abrasivas, conhecido também como granulometria, é de extrema importância, pois auxilia na determinação do acabamento da superfície e da taxa de remoção de material. Pequenas partículas abrasivas produzem melhores acabamentos, enquanto as maiores permitem maiores taxas de remoção de material. Assim, ao selecionar o tamanho do grão abrasivo, a escolha deve ser pautada entre esses dois objetivos. A seleção do tamanho do grão também depende, de certa forma, da dureza do material a ser retificado, pois materiais mais duros exigem menores grãos para cortar de forma eficaz, enquanto materiais mais macios requerem maiores tamanhos de grão.

Na especificação da granulometria, menores tamanhos de grão possuem um número maior na especificação do rebolo, enquanto maiores tamanhos possuem um número menor. Isso deve-se ao procedimento de medição chamado malhas de peneiras, na qual peneiras grossas possuem números pequenos e permitem a passagem de grãos maiores (GROOVER, 2014).

2.2.2 Rebolo de cBN

Como apresentado, o nitreto cúbico de boro (cBN), juntamente com o diamante, são denominados de superabrasivos. Estes, como o próprio nome indica, são abrasivos mais duros, mais resistentes ao desgaste e com uma vida útil mais longa quando aplicados de maneira adequada (KOPAC & KRAJNIK, 2006). O cBN é um abrasivo sintético usado comumente na retificação de materiais ferrosos, principalmente aços endurecidos. Comparado ao diamante, o cBN é mais resistente a impactos, ao calor e é quimicamente menos ativo (WANG, 2018). Como resultado, o cBN pode retificar peças que envolvam corte interrompido, materiais que geram cavacos mais longos e componentes que são reativos quimicamente a outras ferramentas de corte (HAHN, 1987).

Conforme relatado por AZIZI *et al.* (2009), os rebolos de cBN podem ser uma boa alternativa na retificação de superligas e ligas endurecidas devido à sua alta resistência ao desgaste e boa característica térmica durante o processo. Os benefícios da dureza do cBN só podem ser alcançados através da aplicação simultânea de métodos e condições de dressagem apropriados. O rebolo de cBN vitrificado, por exemplo, é amplamente aceito devido à alta relação custo-benefício de retificação. Isto se deve principalmente à maior vida útil do rebolo, melhor acabamento da superfície, facilidade de preparação e retenção de forma, e a capacidade de resistir bem as altas temperaturas do processo de retificação (JACKSON *et al.*, 2001).

Para TÖNSHOFF (1992), o cBN como abrasivo se destaca por várias vantagens tecnológicas. Em comparação com os abrasivos convencionais, é acima de tudo excepcionalmente resistente ao desgaste. Como resultado, taxas mais altas de remoção de material podem ser alcançadas e a necessidade de dressagem ocorre com muito menos frequência. Outra característica deste abrasivo é o risco comparativamente baixo de danos térmicos, comparado ao diamante, o único material conhecido com maior dureza, o cBN oferece a vantagem de uma estabilidade térmica ainda maior. A formação de carbonetos a partir do carbono no diamante é uma forma de desgaste químico e ocorre sobretudo com ferro, mas também é possível observá-lo com o cromo, vanádio e tungstênio. Assim, o cBN é o abrasivo mais indicado para o processamento de metais com alto teor de elementos de liga. Embora ofereça as vantagens descritas, o cBN, assim como o diamante, apresentam a desvantagem de serem caros (HERMAN & KRZOS, 2009).

Pesquisadores como KUFFA *et al.* (2017) e SHIUTEK *et al.* (2001) *apud* TARRENTO (2018) constataram em seus experimentos 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. Constataram ainda que 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.

2.2.2.1 Rebolos segmentados de cBN

Os rebolos segmentados são identificados pela presença de canais ou ranhuras equidistantes ao longo da superfície. A fabricação de rebolos segmentados para HSG (*High Speed Grinding*) consiste geralmente em uma ligação epóxi de um anel de segmentos de cBN vitrificados em uma estrutura de aço (JACKSON & DAVIM, 2011; MARINESCU *et al.*, 2007).

O design segmentado proporciona ao rebolo um certo alívio da tensão, atuando como juntas de dilatação, além de facilitar o escoamento do fluido lubrificante, evitando, por exemplo, o empastamento de fluido e cavaco no interior de pequenos furos durante a retificação cilíndrica interna.

2.2.2.2 Propriedades do cBN

Segundo CHAGAS (2012), o cBN é um material sintético produzido por meio da transformação catalítica do hBN (Nitreto Hexagonal de Boro), mediante alta pressão estática e elevada temperatura, transformando a estrutura hexagonal em uma estrutura cúbica altamente ordenada com dureza e propriedades térmicas melhoradas.

Cristais de cBN podem variar a cor, do âmbar ao marrom escuro e preto, dependendo da natureza do catalizador-solvente. Sua estrutura cristalina é similar ao diamante, exceto por constituir ligações covalentes entre B-N em substituição ao C-C o que faz do cBN menos reativo em altas temperaturas. Átomos de N no cristal de cBN têm cinco elétrons de valência, dois deles formam par estável na superfície, deixando os outros livres para realizarem ligações com os três únicos elétrons de valência do B. A quantidade reduzida de elétrons livres na superfície do cBN também o torna menos reativo em altas temperaturas. No diamante um ou dois elétrons de cada átomo de C da superfície têm tendência a reagir com o ferro, cobalto, níquel ou oxigênio a altas temperaturas.

O sistema de deslizamento de discordâncias no cBN é $\langle 110 \rangle \{111\}$.

A Tabela 2 lista algumas das principais propriedades do cBN.

Tabela 2 - Principais propriedades do cBN

PROPRIEDADE	UNIDADE	cBN
Estrutura	-	Cúbica
Célula unitária (Parâmetros de rede)	Å	a = 3,615
Distancia interatômica	Å	d = 1,57
Densidade	g/cm ³	3,48
Principais dopantes	-	B, S, Si, Al, P, Be
Ponto de fusão	°C	≈ 3.700
Dureza Knoop	kg/mm ²	4700
Tenacidade à fratura	MPa.√m	5
Coef. expansão térmica	°C	4,8
Conduvidade térmica	W/m.k	200 - 1300
Módulo de elasticidade	GPa	850
Estabilidade a oxidação	°C	1200 - 1300
Resistividade elétrica	Ω.m	10 ⁶ - 10 ⁸
Grafitização	°C	> 1500
Gap de energia	eV	6,1 - 6,6

Fonte: Adaptado de CHAGAS (2012)

Durante esta pesquisa observou-se alguns nomes comerciais para o cBN, na qual incluem o Borazon, Amborite, Amber, Elbor e Cubonite.

2.3 Dressagem

O desempenho das operações de retificação é influenciado por diversos fatores, dentre os quais o processo de dressagem é o mais significativo. É através deste processo que é produzida a topografia do rebolo, que por sua vez, afeta diretamente as forças de retificação, a qualidade da superfície da peça e o desgaste do rebolo (DANESHI *et al.*, 2014). Em outras palavras, dressagem é o nome dado ao processo de condicionamento da superfície do rebolo, a fim de remodelá-lo quando ele perder sua forma original e sua capacidade de corte devido ao desgaste ou até mesmo pela adesão na peça (SHAW, 1996). Isso gerará uma topografia satisfatória do rebolo, que tem um impacto significativo na força de retificação, energia, temperaturas, desgaste do rebolo e acabamento da superfície (XUE *et al.*, 2002).

Os seguintes termos podem ser associados às operações de condicionamento inicial de rebolos superabrasivos (HITCHINER, 1999 *apud* SILVA, 2004):

- *Truing* (Perfilamento): possibilita a criação de uma periferia geometricamente corrigida no rebolo. Adequando os erros de forma e a concentricidade e, caso seja demandado, criando um perfil específico no rebolo;
- *Conditioning* (Condicionamento): expõe os grãos abrasivos do rebolo por intermédio da remoção do material aglomerante;
- *Dressing* (Dressagem): nome dado as operações simultâneas de condicionamento e perfilamento da superfície ativa do rebolo.

É sabido que o processo de retificação consiste na remoção do material da peça por contato com os grãos abrasivos de um rebolo. Portanto, entender e controlar a influência desta topografia é vital para otimizar a retificação de componentes, reduzindo custos relativos ao consumo de ferramentas e tempos de ciclo do processo (PALMER *et al.*, 2018).

Segundo JACKSON & DAVIM (2011), durante a retificação parte do material a ser cortado pode ser compactado e aderido ao espaço entre os grãos. Esse fenômeno, chamado de carregamento do rebolo, leva a uma redução do espaço necessário para a formação do cavaco, o que pode diminuir a capacidade de corte do rebolo. Com o processo de dressagem, os cavacos carregados, os grãos soltos e os resíduos de ligação são removidos da superfície do rebolo. Nomes como afiação ou limpeza também podem ser sinônimos de dressagem quando tratamos de operações que envolvam rebolos abrasivos para processos de retificação.

Todas as ferramentas de dressagem sacrificam a vida útil das partículas abrasivas, a fim de obter uma forma limpa e uma superfície abrasiva afiada. Em muitos casos, os grãos são restaurados pela ação da dressagem antes mesmo do início da retificação, pois podem trazer consigo inúmeros erros dimensionais e de forma, principalmente tratando-se de processos que envolvam tolerâncias muito pequenas. Idealmente, os objetivos da dressagem são executados com o mínimo de danos aos grãos abrasivos, selecionando cuidadosamente as melhores condições de trabalho (ROWE, 2010).

Para OLIVEIRA (2001), as ferramentas de dressagem são divididas de acordo com seu princípio de atuação cinemática em dois grupos principais: dressadores estáticos e dressadores rotativos. Os dressadores estáticos não se movimentam na

direção da velocidade tangencial do rebolo durante a afiação, enquanto que os rotativos, além do movimento de translação, também giram quando em contato com o rebolo. Existem também operações que têm como objetivo somente aumentar a agressividade da superfície de corte do rebolo, conhecido como condicionamento. O jato abrasivo é um exemplo deste tipo de operação, onde não se corrige a forma da superfície ativa nem a concentricidade da mesma.

PALMER *et al.* (2018) destacam ainda que existem três parâmetros principais na dressagem rotativa que controlam a topografia de um rebolo: taxa de avanço, razão de velocidade e direção de rotação.

No grupo dos dressadores estáticos tem-se dois tipos básicos de ferramenta: as de ponta única e as conglomeradas. As de ponta única são constituídas de um corpo, ou suporte, onde é fixado um diamante de ponta única. Nas conglomeradas, também chamadas de ferramentas de múltiplos pontos, diversos diamantes são posicionados em uma liga metálica que caracterizam o dressador, como por exemplo o bastão, o disco e o rolo dressador.

O rolo dressador e o disco dressador são basicamente as duas ferramentas rotativas existentes e estendem o princípio de dressagem conglomerada ou de múltiplos pontos, espalhando os diamantes do dressador pela periferia de um rolo ou disco, nestes casos, o efeito da dressagem é compartilhado por muitos pontos de diamante, obtendo-se uma taxa de desgaste muito menor do que com outros tipos de ferramenta. As ferramentas de dressagem de princípio rotativo principalmente os discos dressadores, são particularmente empregadas em rebolos para retificação interna, pois seu perfil de atuação é bastante uniforme (OLIVEIRA, 2001 e ROWE, 2010).

2.4 Parâmetros e variáveis do processo de retificação

Nesta seção serão destacados os principais parâmetros e variáveis associados ao processo de retificação. Esses parâmetros, a princípio, são geralmente atrelados com o rebolo e sua vida útil, tempo de ciclo e qualidade final requerida à peça.

2.4.1 Diâmetro equivalente (d_e)

O processo de retificação é afetado pelo diâmetro equivalente do rebolo (d_e). O diâmetro efetivo na retificação interna é muito maior do que na retificação externa, mesmo que os rebolos empregados em retificadoras internas sejam normalmente muito menores que as externas. Diâmetro equivalente é definido como o diâmetro do rebolo que fornece a mesma condição de contato que na retificação de superfície plana. O diâmetro equivalente é nortado pela curvatura relativa das duas superfícies em contato (MARINESCU *et al.*, 2007).

Em síntese, o parâmetro d_e ou d_{eq} corresponde ao diâmetro do rebolo na retificação de superfície, na qual as condições de contato seriam as mesmas do método selecionado (KLOCKE, 2009). O diâmetro equivalente do rebolo é, de certa forma, uma medida diametral do arco de contato entre a peça e o rebolo (ROWE, 2014).

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

Onde:

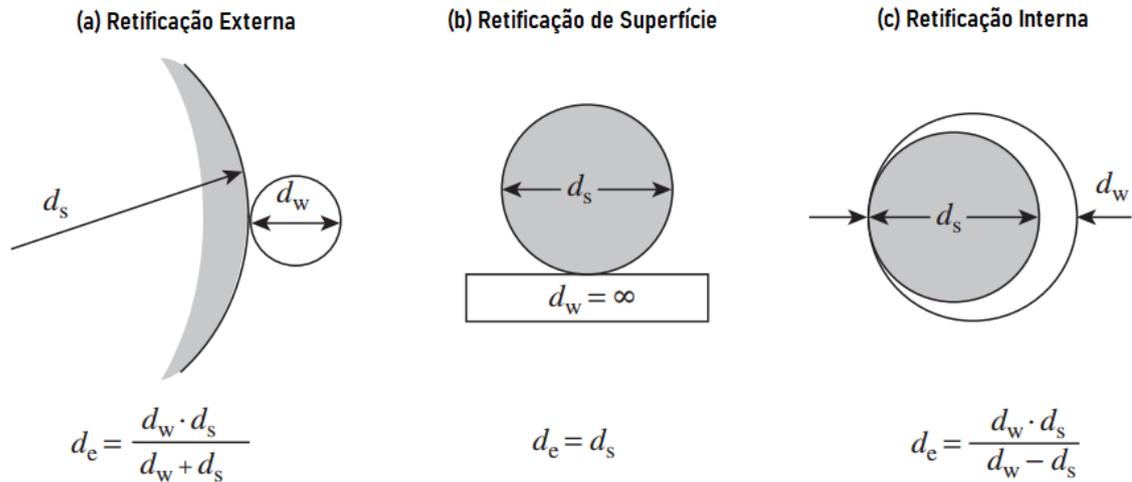
d_e = diâmetro equivalente [mm];

d_w = diâmetro da peça [mm];

d_s = diâmetro do rebolo [mm].

No denominador da equação, o sinal positivo é válido para retificação externa e negativo para retificação cilíndrica interna, na retificação plana d_w assume o valor infinito (Fig. 10). Quanto maior o diâmetro equivalente, maior será o comprimento geométrico de contato, ocasionando um aumento da força normal e do desgaste. Devido à conformidade entre peça e rebolo na retificação cilíndrica interna, tal situação é facilmente observada (MARINESCU *et al.*, 2007; KLOCKE, 2009 e ROWE, 2014).

Figura 10 - Diâmetro equivalente do rebolo



Fonte: Adaptado de ROWE, 2014

2.4.2 Comprimento geométrico de contato (l_g)

O comprimento geométrico de contato l_g descreve com alta aproximação o arco de contato entre a ferramenta e a peça, ou seja, define a extensão de contato entre o rebolo e a peça durante a operação de retificação. Este contato é maior na retificação cilíndrica interna e menor na externa conforme ilustrado na Figura 11.

O equacionamento envolve, além do diâmetro equivalente do rebolo (d_e), também a profundidade de corte da ferramenta (a_e) (MARINESCU *et al.*, 2007; KLOCKE, 2009 e ROWE, 2014).

$$l_g = \sqrt{a_e \cdot d_e} \quad (2)$$

Onde:

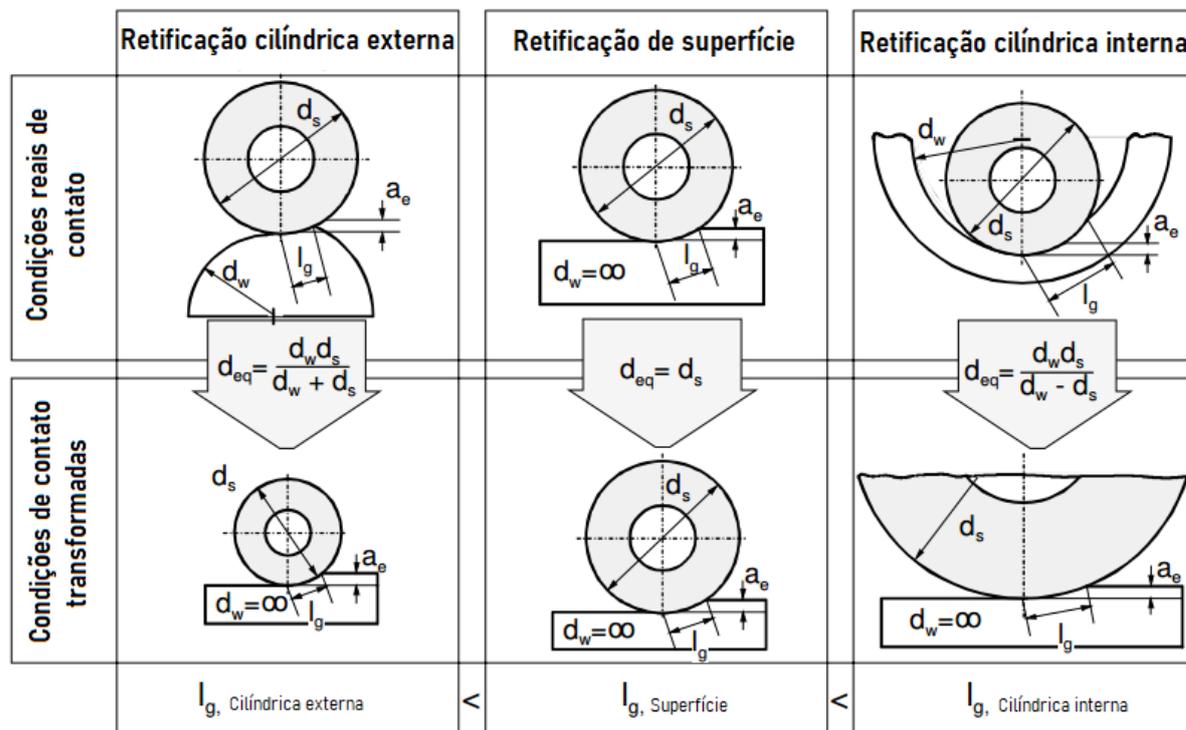
l_g = comprimento geométrico de contato [mm];

a_e = profundidade de corte [mm];

d_e = diâmetro equivalente [mm].

Esta expressão é válida para retificação interna, externa e de superfície plana. Nos três casos são desconsiderados as deformações da peça e do rebolo.

Figura 11 - Condições de contato em operações de retificação



Fonte: Adaptado de KLOCKE (2009)

2.4.3 Velocidade de corte (v_s)

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 e é descrita como:

$$v_s = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{1000} \quad (3)$$

Onde:

v_s = velocidade de corte [mm/min];

d_s = diâmetro do rebolo [mm];

n_s = rotação do rebolo [rpm].

2.4.4 Velocidade periférica da peça (v_w)

A velocidade periférica da peça é calculada de forma similar a velocidade de corte, porém, neste caso, os parâmetros de rotação e diâmetro são inerentes a peça.

$$v_w = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_w}{1000} \quad (4)$$

Onde:

v_w = velocidade periférica da peça [mm/min];

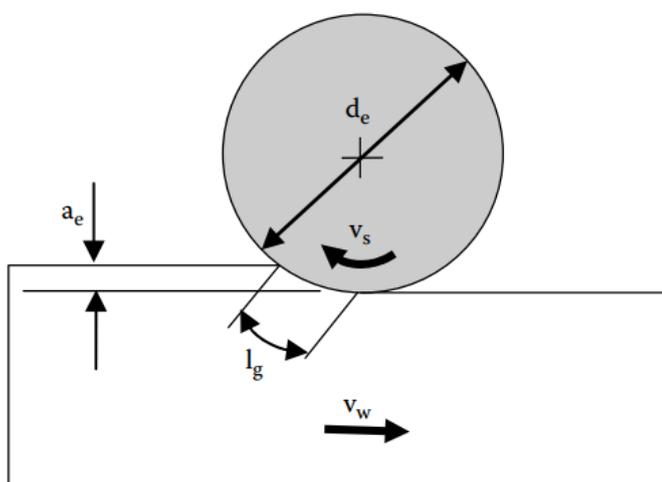
d_w = diâmetro da peça [mm];

n_w = rotação da peça [rpm].

2.4.5 Profundidade de corte (a_e)

A profundidade real de corte (a_e) no início da retificação é menor do que o esperado devido aos desvios da máquina e do sistema, a deflexão do rebolo, além da própria aproximação gradativa até a profundidade estabelecida pela programação. Com alimentação uniforme, a profundidade de corte e as deflexões aumentam constantemente (MARINESCU *et al.*, 2007; KLOCKE, 2009 e ROWE, 2014).

Figura 12 - Profundidade de corte



Fonte: MARINESCU *et al.* (2007)

O valor constante da profundidade real de corte é dada pela equação 5 abaixo:

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

Onde:

a_e = profundidade de corte [mm];

v_f = velocidade de avanço [mm/min];

n_w = rotação da peça [rpm];

d_w = diâmetro da peça [mm];

v_w = velocidade da peça [mm/min].

2.4.6 Taxa de remoção de material (Q_w)

Para MARINESCU *et al.* (2007), a taxa de remoção de material é definida como o volume de material removido por unidade de tempo, correspondendo assim ao quociente diferencial de remoção e tempo de material. A taxa de material removido da peça é dada por:

$$Q_w = a_e \cdot b \cdot v_w \quad (6)$$

Onde:

Q_w = taxa de remoção de material [mm³/min];

a_e = profundidade de corte [mm];

b = largura do contato de retificação [mm];

v_w = velocidade da peça [mm/min].

A alta taxa de remoção aumenta o volume de material removido por cada ação abrasiva da partícula abrasiva, isso significa que as forças sobre as partículas aumentam e estas podem ser mais facilmente retiradas da superfície do rebolo.

É mais útil avaliar a eficiência geral da remoção de material considerando uma taxa de remoção específica, sendo que, a taxa de remoção específica é a taxa de remoção por unidade de largura de contato do rebolo. A taxa de remoção de material

por milímetros de largura do contato de retificação é amplamente denominada Q'_w e é fornecida por (MARINESCU *et al.*, 2007; KLOCKE, 2009 e ROWE, 2010):

$$Q'_w = \frac{Q_w}{b} = a_e \cdot v_w \quad (7)$$

Onde:

Q'_w = taxa de remoção específica de material [mm^2/min];

Q_w = taxa de remoção de material [mm^3/min];

b = largura do contato de retificação [mm];

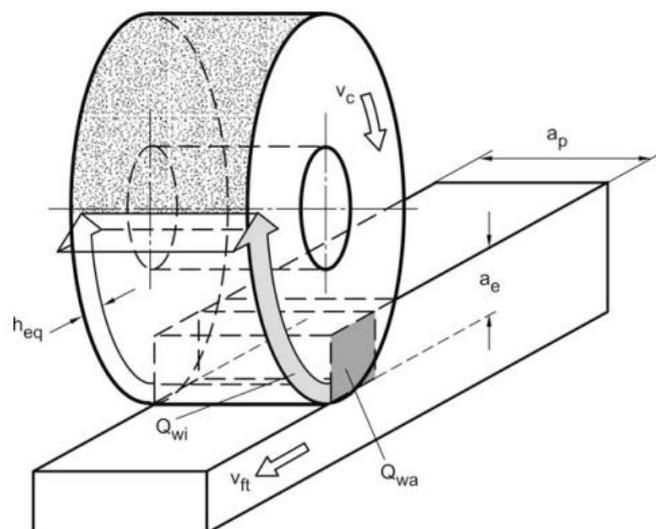
a_e = profundidade de corte [mm];

v_w = velocidade da peça [mm/min].

2.4.7 Espessura de corte equivalente (h_{eq})

A espessura equivalente de corte é uma medida comumente usada da profundidade de penetração das partículas abrasivas na peça e está mais intimamente relacionada à severidade das forças sobre os grãos do que à profundidade de corte em si (MARINESCU *et al.*, 2007).

Figura 13 - Espessura de corte equivalente



Fonte: KÖHLER (2014)

Pode ser visualizado como a espessura de material removido na direção da velocidade do rebolo e não leva em consideração o número de arestas de corte ativas no rebolo ou a conformidade do contato, conforme demonstrado na Figura 13, e segundo pesquisadores como MALKIN & GUO (2008), MARINESCU *et al.* (2007), KLOCKE (2009) e ROWE (2014) é expressa matematicamente pela equação 9:

$$h_{eq} = a_e \cdot \frac{v_w}{v_s} \quad (8)$$

Onde:

h_{eq} = espessura de corte equivalente [mm];

a_e = profundidade de corte [mm];

v_w = velocidade da peça [mm/min];

v_s = velocidade de corte [mm/min].

2.4.8 Relação G

A relação de retificação G é um parâmetro popular para descrever a vida útil da ferramenta e é definida como a razão entre o volume de material removido da peça usinada e o volume de desgaste do rebolo (KLOCKE, 2009).

A proporção de retificação é uma medida da adequação de um abrasivo para uma operação de retificação específica. A razão de retificação G é definida como (MALKIN & GUO, 2008; MARINESCU *et al.*, 2007; KLOCKE, 2009 e ROWE, 2014):

$$G = \frac{V_w}{V_s} \quad (9)$$

Onde:

G = relação de retificação G [adimensional];

V_w = volume de material removido da peça [mm³];

V_s = volume de material desgastado do rebolo [mm³].

Materiais endurecidos e operações de corte interrompidas tendem a reduzir a taxa de retificação. Por exemplo, na retificação de precisão com materiais de boa usinabilidade, uma relação G na casa das centenas ou milhares pode ser alcançada. No entanto, para um material de difícil usinagem que opera sob condições adversas, a relação G pode cair facilmente para a casa das dezenas (ROWE, 2014). Com isso, conclui-se que esta relação caracteriza o desgaste de um rebolo sob determinadas condições de trabalho. Se o desgaste do rebolo for grande, a relação G é pequena, e, se o desgaste do rebolo for pequeno, conseqüentemente a relação G é alta (MALKIN & GUO, 2008; MARINESCU *et al.*, 2007).

2.4.9 Força tangencial de corte (F_t)

Para MALKIN & GUO (2008), a componente de força tangencial à superfície do rebolo pode ser calculada pela medição da potência de corte utilizando a equação abaixo:

$$F_t = \frac{P}{v_s} \quad (10)$$

Onde:

F_t = força tangencial [N];

P = potência de corte [W];

v_s = velocidade da corte [m/s];

2.4.10 Potência de corte (P)

As forças atuantes no processo de retificação são de extrema importância para a determinação da potência de corte ou potência de retificação. Além disso, para MACHADO (2009), as forças influenciam na qualidade dimensional e geométrica da peça, bem como sua rugosidade, o desgaste do rebolo e o tempo de retificação. A força de retificação pode ser decomposta em uma componente normal e outra tangencial à superfície que está sendo retificada, entretanto, por se tratar de uma situação na qual se tem apenas a condição de escorregamento, a força tangencial pode ser facilmente obtida quando se conhece a força normal e o coeficiente de atrito entre o rebolo e a peça, ou ainda a partir da potência de retificação. Conhecendo-se

a força tangencial e as velocidades do rebolo e da peça, é possível determinar a potência de retificação por meio da equação 11:

$$P = F_t \cdot (v_s \pm v_w) \quad (11)$$

Onde:

P = potência de corte [W];

F_t = força tangencial [N];

v_s = velocidade da corte [m/s];

v_w = velocidade de peça [m/s].

O sinal positivo é empregado no caso de retificação discordante e negativo para a operação concordante, todavia, devido ao fato de v_w ser muito inferior a v_s , a equação da potência de corte e comumente encontrada da seguinte forma (ROWE, 2014 e MACHADO, 2009):

$$P = F_t \cdot v_s \quad (12)$$

Onde:

P = potência de corte [W];

F_t = força tangencial [N];

v_s = velocidade da corte [m/s].

2.4.11 Energia específica (u)

A energia específica é amplamente utilizada como parâmetro empírico na retificação, como uma medida do efeito combinado das condições de retificação, da eficiência de corte do rebolo e da facilidade de retificação. Energia específica u é simplesmente a potência de corte P dividida pela taxa de remoção de material Q_w , e é expresso em joules por milímetro cúbico de material removido (J/mm^3).

Em resumo, a energia de retificação necessária para remover um determinado volume de material é uma medida da eficiência de remoção de material pelo rebolo e, de certa forma, da eficiência do sistema de retificação. A energia específica, representada pelas letras u ou e_c , é dada por:

$$u = \frac{P}{Q_w} \quad (13)$$

Onde:

u = energia específica de retificação [J/mm³];

P = potência de corte [W];

Q_w = taxa de remoção de material [mm³/s].

A baixa energia específica implica na remoção eficiente do material por grãos abrasivos afiados. A alta energia específica implica em uma remoção menos eficiente, onde o contato por atrito predomina sobre a remoção de cavacos. Para fins de monitoramento do processo, a energia específica é obtida a partir da potência de retificação medida por unidade de largura de contato entre a peça e o rebolo (MALKIN & GUO, 2008; MARINESCU *et al.*, 2007; KLOCKE, 2009 e ROWE, 2014).

2.5 Meios lubri-refrigerantes

No processo de retificação, devido às arestas de corte geometricamente indefinidas, há uma grande quantidade de calor causada por diferentes mecanismos de cisalhamento, atrito e deformação, que são parcialmente dissipados pelos cavacos, o restante pode levar a uma considerável carga térmica e até mesmo queima da peça e também da própria ferramenta. A redução do acúmulo de calor e o resfriamento adequado durante a retificação são de imensa importância (TAWAKOLI *et al.*, 2007).

A maioria das operações de retificação é realizada com o auxílio de um fluido de corte. Os fluidos de retificação são geralmente considerados como tendo duas funções principais: lubrificação e resfriamento, e por vezes são chamados de fluidos lubri-refrigerantes. Estes fluidos também podem ajudar a manter a superfície limpa e fornecer proteção contra corrosão para superfícies recém usinadas. Na dinâmica de lubrificação o rebolo rotativo adota uma função similar a de uma bomba para transportar parte do fluido aplicado através da zona de retificação (MALKIN & GUO, 2008; CAMPBELL, 1995 e EBBRELL *et al.*, 2000).

A maioria dos fluidos de retificação pode ser categorizada como óleos puros ou como óleos solúveis. Os óleos puros para retificação são fluidos à base de óleo mineral com adição de materiais graxos para lubrificação e molhabilidade, e geralmente enxofre e/ou cloro para redução adicional do desgaste. Os óleos solúveis são fluidos à base de água contendo emulsões de óleo e vários outros ingredientes que podem incluir materiais gordurosos, sabões, enxofre e cloreto para lubrificação, surfactantes para umedecimento e detergência e para evitar espumas, inibidores de ferrugem, condicionadores de água e germicidas (MALKIN & GUO. 2008).

Além de requisitos básicos como boa lubrificação, bom desempenho de resfriamento e lavagem e alta proteção contra corrosão, os fluidos de retificação devem possuir outras condições, que MARINESCU *et al.* (2007) chamam de requisitos secundários dos fluidos de retificação. Dentre elas destacam-se a operação econômica e eficiente, estabilidade operacional e proteção ambiental. É imprescindível também que os fluidos de retificação sejam compatíveis com a saúde ambiental e humana, além de serem confiáveis na operação. Alguns requisitos adicionais dos fluidos de retificação citados por MARINESCU *et al.* (2007) são:

- Deve ser facilmente filtrado e reciclado;
- O filme residual deve ser facilmente removido da peça, do rebolo e da máquina;
- Fornecer transporte de partículas sólidas para remoção de cavacos;
- Inibir a formação de espuma e névoa;
- Apresentar baixa inflamabilidade;
- Apresentar boa compatibilidade com os materiais do sistema de máquinas-ferramenta.

Para MONICI *et al.* (2006) a tendência mundial é produzir peças cada vez mais sofisticadas, com altas tolerâncias geométricas, dimensionais e de acabamento da superfície, a baixo custo e sem poluir o meio ambiente. Assim, a aplicação eficiente de fluido de corte na região de corte é crucial. O fluido de corte beneficia o setor industrial de várias maneiras, mas é frequentemente utilizado incorretamente, gerando perdas substanciais. A lubrificação e o resfriamento dependem da entrada efetiva de fluido na região de corte entre a peça e a ferramenta, o que permite reduzir grandes volumes de fluido.

Pesquisadores como MARINESCU *et al.* (2007) relatam que a seleção de um fluido de retificação é de importância crucial para a obtenção de condições favoráveis de resfriamento e lubrificação. Tipo, óleo base, aditivos e concentração do fluido são importantes para a eficiência do resfriamento e lubrificação. Os requisitos de refrigeração e lubrificação são atendidos de diferentes maneiras por cada fluido específico. Dependendo das condições de contato no processo, as propriedades de resfriamento e lubrificação do fluido de retificação aplicado têm um impacto substancial no processo e no resultado do trabalho (FUSSE *et al.*, 2004).

A aplicação adequada de fluidos de corte tem sido usada por ser eficaz na redução dos efeitos térmicos e das elevadas temperaturas da superfície usinada. Quando utilizados em operações de retificação, os fluidos lubri-refrigerantes podem ser chamados de fluidos de retificação, sendo que, as principais funções exercidas por estes fluidos são a redução do atrito, a remoção dos cavacos, a redução da temperatura na superfície e a remoção do calor gerado no próprio processo (GROOVER, 2014).

Segundo ROWE (2010), o cBN é frequentemente usado com óleo integral puro como fluido de retificação. Devido à reatividade da água com o óxido da superfície nos grãos de cBN, os líquidos à base de água levam a taxas de desgaste mais altas do que o óleo puro. Apesar disso, o cBN é frequentemente empregado com líquidos à base de água, com uma alta proporção de óleo, o que diminui a reatividade. HAHN (1987) afirma ainda que os fluidos refrigerantes de alta lubrificação também aumentam a capacidade do cBN de cortar metal e que o óleo direto em grandes quantidades pode melhorar a vida útil do rebolo.

A eficiência da lubrificação e do resfriamento não é determinada apenas pelas propriedades físicas e químicas do fluido lubri-refrigerante, mas também pelo método de fornece-lo no espaço de corte durante a retificação.

Para um suprimento eficiente da área de contato com o lubrificante de resfriamento, a taxa de volume do fluido, a velocidade de descarga e a construção e posição do bico do lubri-refrigerante são importantes para a eficiência da lubrificação (KLOCKE, 2009).

2.6 Topografia 3D de superfícies

Embora a medição 2D seja usada para medir e caracterizar superfícies há muitos anos, este método de representação tem certas limitações e desvantagens. A principal desvantagem é que uma superfície que está em contato com outra superfície irá interagir em três dimensões em vez de duas dimensões. Isso significa que uma medição 2D pode não estar dando uma representação precisa das características de uma superfície. A representação 3D de uma superfície fornecerá mais informações em relação ao desgaste, atrito, lubrificação, vedação e até mesmo propriedades de rolamento de uma superfície. A análise topográfica 3D também permite aprofundar os estudos tribológicos da peça (SHIZHU & PING, 2012 e BHUSHAN, 2013).

Em geral, os parâmetros de amplitude 3D seguem as mesmas definições e princípios de suas correspondências em 2D, no entanto, todos os parâmetros 3D são definidos em uma área de amostragem, o que não é o mesmo para a maioria dos parâmetros 2D, que são definidos ao longo do comprimento de avaliação que consiste em vários comprimentos de amostragem (*cut-off*) (SHIZHU & PING, 2012).

É inevitável que, ao tentar descrever um perfil por um único número, algumas informações importantes sobre a topografia da superfície sejam perdidas. R_a e R_q , por exemplo, não fornecem informações sobre as formas ou espaçamento das irregularidades da superfície e não fornecem nenhuma indicação da probabilidade de encontrar alturas de superfície dentro de certos limites. Para uma descrição mais completa da topografia da superfície, são necessárias informações sobre a distribuição de probabilidade das alturas da superfície e a distribuição espacial dos picos e vales na superfície (BHUSHAN, 2013).

Para isso, HUTCHINGS & SHIPWAY (2017) demonstram que a necessidade de um método de descrição da distribuição das alturas da superfície é atendida pela definição de uma função de densidade de amplitude, cujo valor, para qualquer altura "z", é proporcional à probabilidade de encontrar um ponto na superfície da altura acima da linha média. Um perfil simétrico, como uma curva senoidal, leva a uma curva de densidade de amplitude que é simétrica em relação à posição da linha média. A assimetria do perfil da superfície leva à distorção da função de densidade de amplitude, que, portanto contém algumas informações sobre as formas das irregularidades da superfície, bem como sua extensão vertical. A forma da curva de densidade de amplitude pode ser descrita por sua assimetria, que por sua vez fornece

uma medida de sua assimetria, e curtose uma medida da saliência do pico da curva de distribuição.

O valor de Ssk é dominado pelas alturas mais distantes da linha média e pode ser negativo ou positivo. Uma distribuição simétrica de alturas em torno da linha média resultará em uma assimetria de zero. Picos altos e vales relativamente rasos levam a uma assimetria positiva, embora a maioria das alturas da superfície se encontre abaixo da linha média.

Também segundo HUTCHINGS & SHIPWAY (2017), uma distribuição de probabilidade gaussiana tem um valor de assimetria zero e uma curtose de 3,0. Um valor de curtose maior que 3,0 indica uma curva de distribuição ampla e plana que pode ser descrita como relacionada a uma superfície pontiaguda, enquanto uma curtose inferior corresponde a uma distribuição de pico mais estreito que pode ser descrita como relacionada a uma superfície mais acidentada. Muitas superfícies, especialmente aquelas resultantes de processos de desgaste em vez de usinagem deliberada, têm distribuições de altura próximas de Gauss. Algumas combinações de processo de usinagem e material, no entanto, podem levar a distribuições consideravelmente não gaussianas.

Outra função às vezes usada em estudos tribológicos e topográficos, além de estar intimamente relacionada à função de densidade de amplitude é a curva de relação de suporte, ou curva de Abbot-Firestone (Gráfico 8), que representa a fração de pontos em uma superfície acima de uma altura especificada em relação à linha média. Esta função pode ser compreendida imaginando uma linha reta, representando o perfil de uma superfície plana idealmente lisa, sendo levada lentamente para baixo em direção ao perfil da superfície sob investigação. Quando o plano toca pela primeira vez a superfície em um ponto, a proporção do rolamento é zero. À medida que a linha é movida mais para baixo, o comprimento sobre o qual ela intercepta o perfil da superfície aumenta e, portanto, a relação de rolamento aumenta. Finalmente, quando a linha atinge o fundo do vale mais profundo no perfil da superfície, a relação de apoio atinge 100%. A curva da relação de apoio é um gráfico da relação de apoio em relação à altura da superfície, e é a integral da função de densidade de amplitude.

2.7 Oportunidade da pesquisa

Em consonância com pesquisadores como ANDRETTA (2012), BIANCHI *et al.* (2000), CAI & ROWE (2004), CHEN *et al.* (2002), D'YAKONOV (2004), DANESHI *et al.* (2014), FERNANDES *et al.* (2018), GUO *et al.* (1999), HERMAN & KRZOS (2009), INASAKI (1991), LAVINE *et al.* (1989), OH & SO (2012), POPOVA (2015), TAWAKOLI *et al.* (2007), TÖNSHOFF *et al.* (1995), WANG (2008) e ZHEJUN *et al.* (1989), esta pesquisa também abordou um estudo sobre a influência das condições e metodologias de corte no processo de retificação interna.

Contudo, tal estudo se difere ao analisar o erro dimensional de diâmetro e os erros geométricos de circularidade, paralelismo e retitude como parâmetros de desempenho de rebolos segmentados de CBN vitrificados na retificação cilíndrica interna de bicos injetores de combustível fabricados em aço DIN 18CrNi8. Este tipo de estudo não foi observado em nenhum dos trabalhos publicados.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

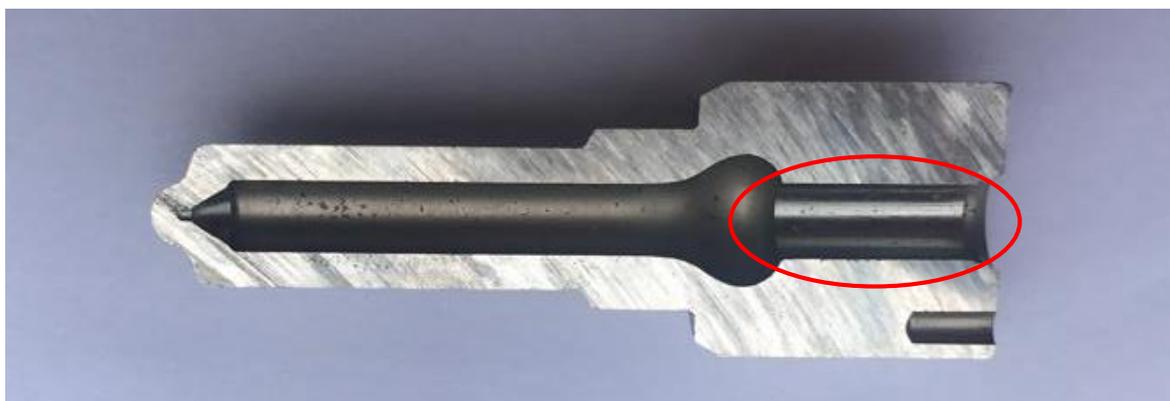
Serão apresentados os principais aparatos, equipamentos, sistemas de medição e métodos experimentais responsáveis pela aquisição de dados durante o processo e pós-processo das peças retificadas bem como das ferramentas utilizadas, que permitem avaliar o desempenho dos rebolos por meio dos desvios de formas geométricas e das dimensões do diâmetro do furo.

3.1 Peça de trabalho

A peça de trabalho é um bico injetor de combustível para motores a diesel cuja matéria-prima é o aço DIN 18CrNi8. A Figura 14 apresenta a seção longitudinal do bico injetor de combustível com destaque para o diâmetro da guia, na qual indica a região onde ocorreram as operações de retificação cilíndrica interna analisadas por este trabalho.

O furo possui diâmetro nominal 4,00 mm e comprimento de 9,40 mm.

Figura 14 - Seção longitudinal do bico injetor de combustível com destaque para o diâmetro da guia



Fonte: Empresa parceira

3.2 Material da peça

O material da peça é o aço DIN 18CrNi8, uma liga com alto teor de cromo e níquel, projetado como matéria-prima de elementos de máquinas que exigem alta resistência a cargas variáveis, fadiga, resistência ao impacto e ductilidade do núcleo.

A composição química percentual do material da peça é detalhado na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição química do aço DIN 18CrNi8 em fração de massa (%)

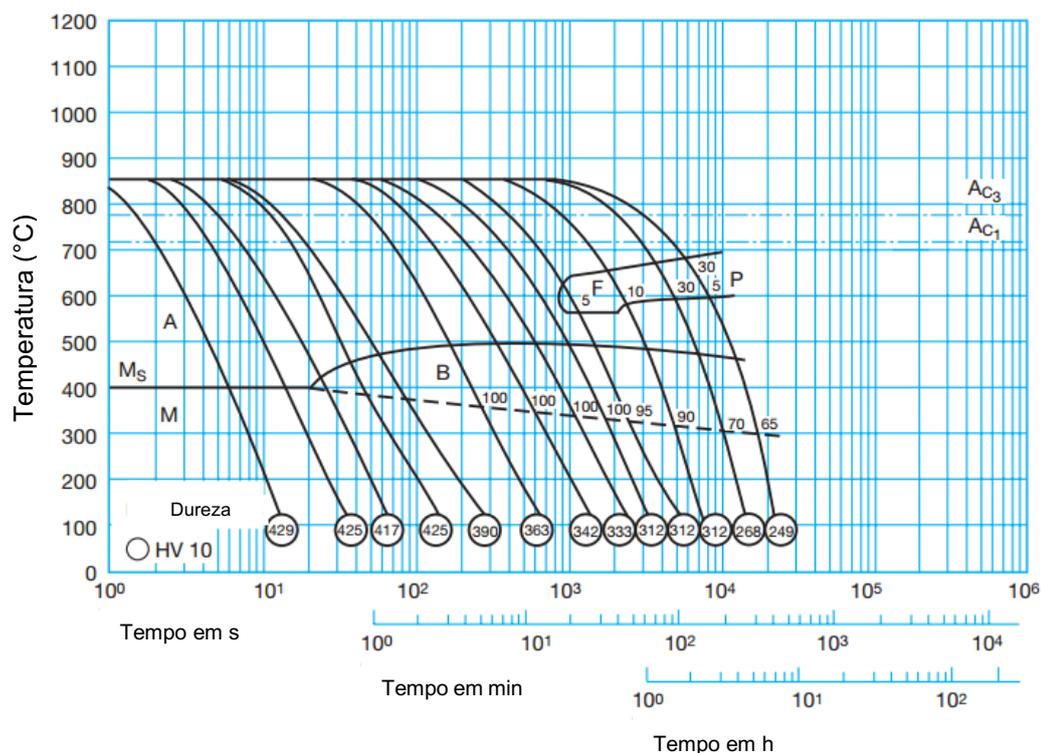
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0,13 – 0,22	≤ 0,20	0,36 – 0,64	≤ 0,030	≤ 0,040	1,74 – 2,16	1,75 – 2,15

Fonte: Empresa parceira

As aplicações da liga também incluem a manufatura de componentes com solicitações de trabalho que exigem alta tenacidade e resistência do núcleo, como engrenagens, virabrequins e eixos pesados na construção de aeronaves e caminhões.

Conforme mostrado na Gráfico 3, o aço 18CrNi8 pode atingir valores de dureza em torno de 400 HV no resfriamento contínuo. Contudo, no caso específico deste estudo, todas as amostras são constituídas de aço DIN 18CrNi8 cementado, temperado e revenido com dureza de 800 HV (BILHA, 2015).

Gráfico 3 - Diagrama TTT para o aço DIN 18CrNi8



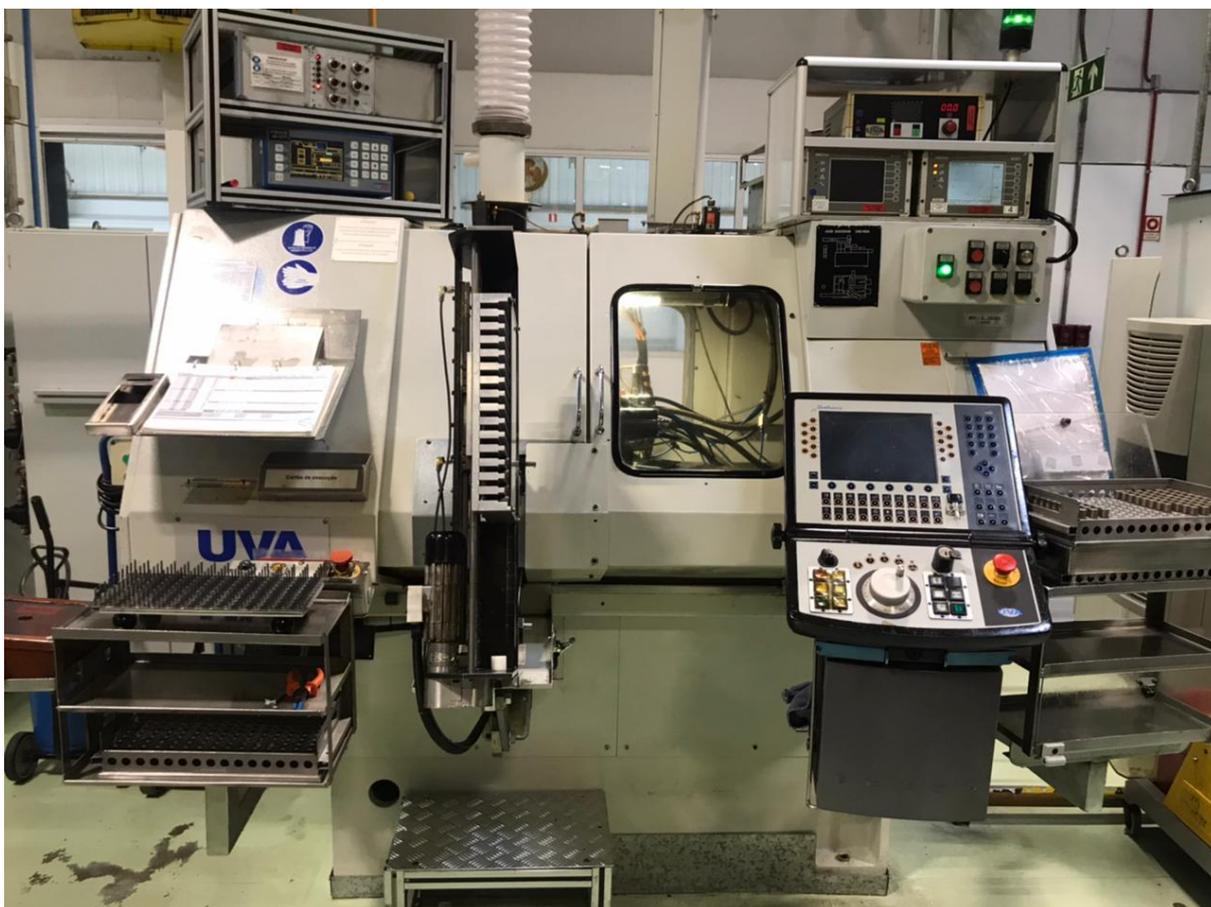
Fonte: Case-hardening steels - EDELSTAHL WITTEN-KREFELD GMBH

3.3 Retificadora cilíndrica interna

A retificadora cilíndrica interna utilizada neste estudo é a UVA U88 NMA (Fig. 15), da UVA LIDKÖPING, uma empresa sueca que desenvolve soluções para retificação de precisão.

A máquina está equipada com uma unidade de indexação carregando duas estações de trabalho, o que oferece a capacidade de retificar simultaneamente duas superfícies diferentes em dois componentes, no caso, guia e sede de um bico de injeção de combustível, e alternar automaticamente os componentes entre as duas operações de retificação.

Figura 15 - Retificadora cilíndrica interna UVA U88 NMA



Fonte: Empresa parceira

3.4 Escolha do rebolo

Foram utilizados 18 rebolos de cBN com ligante vitrificado segmentados de 3 canais e diferentes especificações de granulometrias (360 e 400) com 3,60 mm de diâmetro e 9,00 mm de comprimento fornecidos pela empresa japonesa *Asahi Diamond*, sendo eles:

- 1- VBF 360 K 195 KCP3M VFCP (9 rebolos) – Tamanho da partícula: 45 μm ;
- 2- VBF 400 K 195 KCP3M VFCP (9 rebolos) – Tamanho da partícula: 38 μm .

Esta especificação está em conformidade com as normas JIS (*Japanese Industrial Standards*) R 6211-3:2003, JIS B 4051:2008 e JIS R 6004:2020. Normas japonesas gerenciadas pela JSA (*Japanese Standards Association*).

A Figura 16 ilustra o rebolo adotado nesta pesquisa.

Figura 16 - Rebolo de cBN (VBF 400 K 195 KCP3M VFCP)



Fonte: Empresa parceira

3.5 Parâmetros de dressagem

Um disco dressador diamantado (Fig. 17) foi utilizado no acondicionamento do rebolo de cBN em intervalos de 16 peças retificadas, ou seja, a cada 16 peças usinadas o rebolo era dressado. A dressagem foi feita em processo com um sistema indexado na própria retificadora.

A Tabela 4 mostra os parâmetros de dressagem que foram adotados. Alguns dados foram omitidos para garantir o sigilo empresarial das operações de produção e usinagem da empresa parceira.

Tabela 4 - Parâmetros de dressagem

PARÂMETRO	VALORES	UNIDADE
Intervalo de dressagem	16	peças
Profundidade de dressagem	baixa	mm
Rotação do dressador	Em torno de 2000	rpm
Sentido de rotação do dressador	anti-horário	-
Velocidade de dressagem	Em torno de 500	mm/min

Fonte: Empresa parceira (adaptado)

A escolha dos parâmetros de dressagem seguiram as normas e padrões da empresa pois não faziam parte do escopo deste estudo.

O disco dressador possui 52 mm de diâmetro externo, 42 mm de diâmetro interno e 6 mm de espessura.

Figura 17 - Disco dressador diamantado



Fonte: Empresa parceira

3.6 Fluido lubri-refrigerante

O fluido lubri-refrigerante adotado durante a operação de retificação foi o óleo integral ECOCUT HFN 5B da *Fuchs Lubrificantes*. Segundo o fabricante, o fluido gera pouca névoa de óleo e apresenta baixa perda de evaporação. Possui viscosidade cinemática de 4 mm²/s a 40°C, densidade de 0,83g/ml a 15°C e ponto de fulgor de 136°C.

O fluido é injetado no furo através de um canal com 0,8 mm de diâmetro que se estende da haste de prolongamento e fixação até a face axial do rebolo.

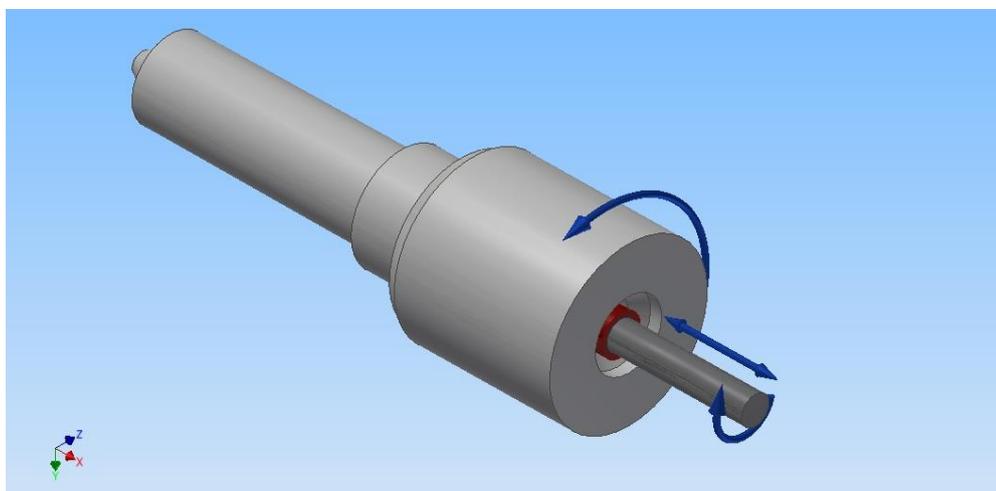
Em virtude das pequenas dimensões deste canal, a vazão do fluido durante a retificação foi de 0,25 litros por minuto.

3.7 O experimento

Para avaliar o desempenho de rebolos de cBN vitrificados com duas especificações distintas de granulometria em diferentes parâmetros de rotação da peça e de velocidades de avanço axiais da ferramenta na retificação cilíndrica interna do aço 18CrNi8, planejou-se fazer os experimentos de retificação na operação de acabamento do diâmetro de guia de um bico injetor de combustível, peça desta pesquisa, cujo sobremetal usinado foi de 0,1 mm.

A Figura 18 ilustra a cinemática de retificação abordada neste experimento.

Figura 18 - O princípio de retificação cilíndrica interna empregado nesta pesquisa



Fonte: Autor

Além disso, para efeito de comparação entre os rebolos foram considerados aspectos como qualidade dimensional do diâmetro, potência de retificação, rugosidade da superfície e os erros geométricos de circularidade, retitude e paralelismo, além do estudo do mecanismo de desgaste dos rebolos.

3.7.1 Rotação da peça (n_w)

O movimento de avanço radial pode ser alcançado pela rotação da peça e pela rotação periférica da ferramenta, no caso, um corte discordante envolvendo peça e reboło. Nos experimentos, manteve-se a rotação do reboło fixa em 80000 rpm e analisou-se o desempenho da ferramenta em três rotações diferentes da peça, sendo elas 1400, 1600 e 1800 rpm.

A Tabela 5 exibe os parâmetros de rotação propostos pelo estudo.

Tabela 5 - Parâmetros de rotação

PARÂMETRO	VALORES PROPOSTOS	UNIDADE
Rotação do fuso (reboło)	80.000	rpm
Sentido de rotação do fuso	horário	-
Rotação da placa	1400/1600/1800	rpm
Sentido de rotação da placa	anti-horário	-

Fonte: Empresa parceira (adaptado)

3.7.2 Velocidade de avanço axial do reboło (V_{fa})

Conforme descrito e explicado no levantamento bibliográfico, o movimento periférico e longitudinal de avanço do reboło, chamado neste estudo de velocidade de avanço axial do reboło, é um parâmetro de influência sobre os erros geométricos e dimensionais da peça retificada. Com isso, o escopo do experimento desta pesquisa visou variar este parâmetro em três valores distintos (600, 800 e 1000 mm/min), a escolha destes valores se deu por uma decisão conjunta entre o autor e a equipe de desenvolvimento de processos especiais de usinagem com geometria indefinida da empresa parceira, que levaram em consideração experiências anteriores e as limitações da máquina.

A Tabela 6 exibe os parâmetros da velocidade de avanço axial da ferramenta propostos pelo estudo no experimento.

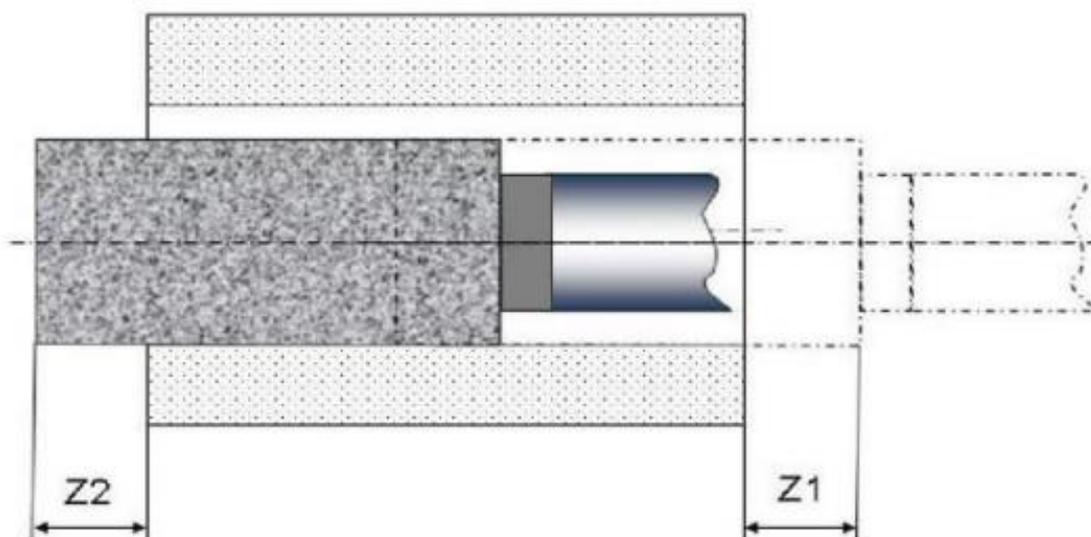
Tabela 6 - Parâmetros de oscilação axial do rebolo

PARÂMETRO	VALORES PROPOSTOS	UNIDADE
Velocidade de avanço axial (V_{fa})	600/800/1000	mm/min
Distância de oscilação Z1	$2,6 \pm 0,4$	mm
Distância de oscilação Z2	$-2,6 \pm 0,4$	mm

Fonte: Empresa parceira (adaptado)

A cinemática de oscilação axial do rebolo no interior do furo durante a operação de retificação ocorre conforme exemplificado pela Figura 19.

Figura 19 - Oscilação do rebolo no interior do furo durante a retificação



Fonte: Empresa parceira (adaptado)

3.7.3 Planejamento estatístico do experimento

Tendo em vista a realização desta pesquisa, foram retificadas 576 peças ao longo de 18 ensaios sendo 32 peças por ensaio. O planejamento estatístico se deu por um fatorial completo e as condições de usinagem de cada teste são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Planejamento estatístico do experimento

EXPERIMENTO	ESPECIFICAÇÃO DE GRANULOMETRIA	ROTAÇÃO DA PEÇA (rpm)	VELOCIDADE DE AVANÇO AXIAL (mm/min)
1	360	1600	800
2	360	1600	1000
3	360	1600	600
4	360	1400	800
5	360	1400	1000
6	360	1400	600
7	360	1800	800
8	360	1800	1000
9	360	1800	600
10	400	1600	800
11	400	1600	1000
12	400	1600	600
13	400	1400	800
14	400	1400	1000
15	400	1400	600
16	400	1800	800
17	400	1800	1000
18	400	1800	600

Fonte: Autor

Para a composição estatística das medições de diâmetro, rugosidade e dos erros geométricos de circularidade, paralelismo e retitude foi adotado um intervalo de confiança de 95% com base na distribuição Gaussiana. Já a análise de probabilidade estatística dos valores de potência de corte foram pautados na distribuição *t de student* com um intervalo de confiança também de 95%.

Para a aquisição dos parâmetros geométricos e de rugosidade foram medidas 6 peças por ensaio, sendo elas as peças 1,9,16,17,24 e 32, totalizando 108 peças analisadas. Nos valores do diâmetro foram medidas 12 peças, sendo elas as peças 1, 2, 3,14, 15, 16, 17, 18, 19, 30, 31 e 32, totalizando 216 peças.

A Tabela 8 exemplifica as peças analisadas por ensaio.

Tabela 8 - Peças analisadas em cada parâmetro por ensaio

PARÂMETRO	PEÇAS ANALISADAS	QUANTIDADE TOTAL
Diâmetro	1 2 3 14 15 16 17 18 19 30 31 32	216
Circularidade	1 9 16 17 24 32	108
Paralelismo	1 9 16 17 24 32	108
Retitude	1 9 16 17 24 32	108
Rugosidade (S_a)	1 9 16 17 24 32	108
Assimetria (S_{sk})	1 9 16 17 24 32	108
Curvatura (S_{ku})	1 9 16 17 24 32	108

Fonte: Autor

Para fins de ilustração, as peças segregadas para posterior medição são demonstradas na Figura 20.

Figura 20 - Peças separadas para medição



Fonte: Empresa parceira

3.8 Análises e medições

Neste estudo, foram utilizados alguns equipamentos e sistemas de medição para análise e composição dos resultados. Nessa seção destacam-se os referidos equipamentos e em que situação foram empregados. Os sistemas citados foram disponibilizados pela empresa parceira onde foram realizados os ensaios desta pesquisa.

3.8.1 Sistema de medição de forma e posição

Para as medições dos erros de formas geométricas de circularidade, paralelismo e retitude, foi utilizado o sistema de medição de forma e posição MarForm MFU100 da Mahr, conforme ilustrado na Figura 21.

Figura 21 – Centro de medição de forma e posição MarForm MFU 100



Fonte: MAHR. Disponível em: <<https://metrology.mahr.com/de/produkte/artikel/5440160-referenz-formmessenzentrum-marform-mfu-100>>. Acesso em 30 de junho de 2020

3.8.2 Sistema de medição ótica 3D

As medições dos parâmetros da topografia da peça, como a rugosidade, assimetria e curtose, foram realizadas através de um sistema de medição ótica 3D (tridimensional) Alicona Infinite Focus SL (Fig. 22).

Figura 22 - Sistema de medição 3D para forma e acabamento Alicona Infinite Focus SL



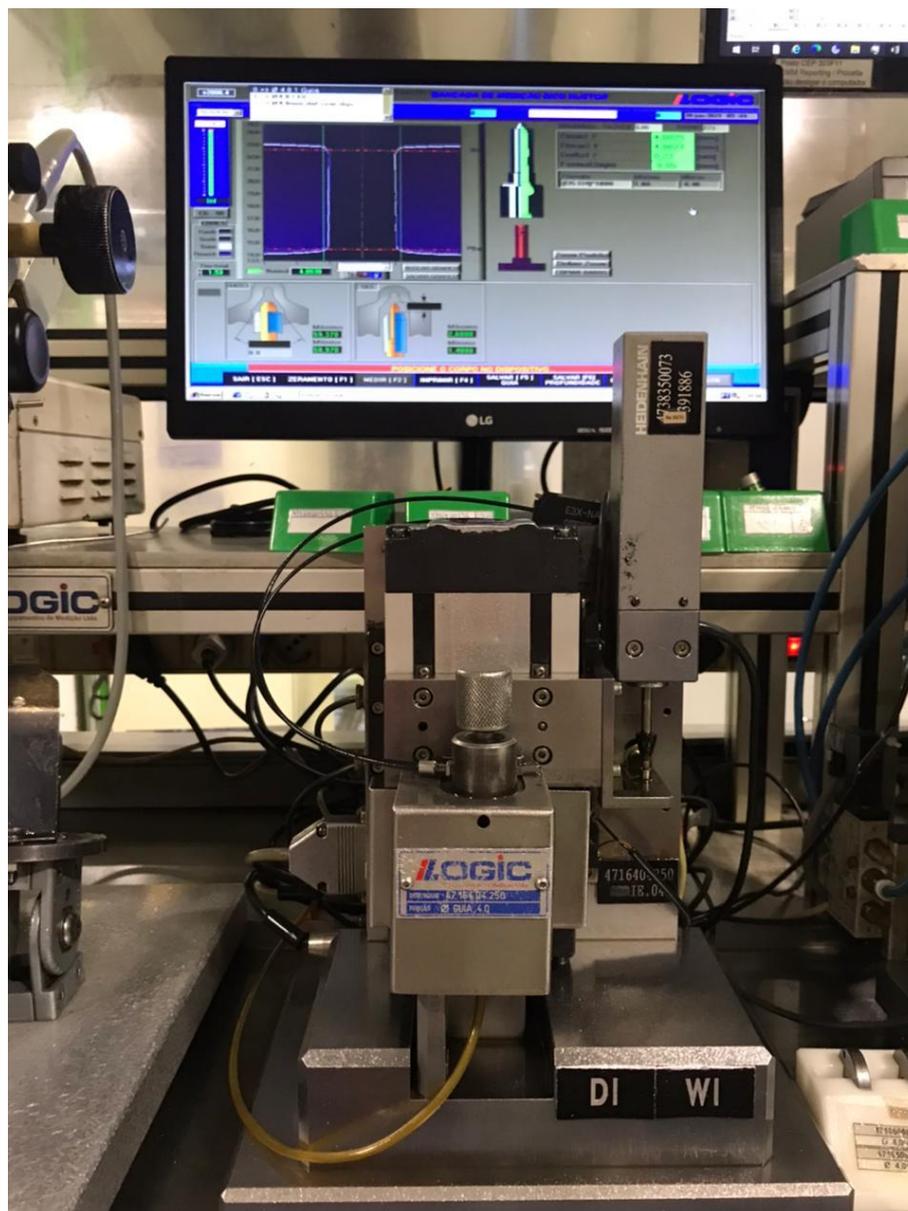
Fonte: BRUKER ALICONA. Disponível em: <https://www.alicon.com/en/products/infinitefocussl>. Acesso em 30 de junho de 2020

3.8.3 Sistema de medição de diâmetro semiautomático de bancada

Para a composição dos resultados dimensionais do diâmetro foi utilizado um sistema de medição de diâmetro semiautomático de bancada da Logic Equipamentos de Medição com resolução de 0,0001 mm e faixa de medição de 3,5000-4,5000 mm. O princípio de medição baseia-se no uso de um transdutor para medição de deslocamento linear (LVDT).

A Figura 23 ilustra o equipamento.

Figura 23 - Sistema de medição de diâmetro semiautomático de bancada



Fonte: Empresa parceira

3.8.4 Equipamento de medição de potência

Para aquisição dos valores da potência de corte consumida foram utilizados o sistema de medição Rexroth XM21 IOT Gateway e um cartão de aquisição de dados de energia. O equipamento foi conectado ao motor de acionamento dos cabeçotes da placa e do fuso.

A Figura 24 exhibe o equipamento utilizado.

Figura 24 - Sistema de medição Rexroth XM21 IOT Gateway



Fonte: BOSCH REXROTH XM21 IOT GATEWAY. Disponível em: <https://www.boschrexroth.com/en/xc/products/product-groups/electric-drives-and-controls/news/software-iot-gateway/index>. Acesso em 15 de abril de 2021

3.8.5 Microscópio eletrônico de varredura (MEV)

Para a avaliação das condições dos rebolos de cBN após os experimentos foi utilizado o MEV FEI Quanta 200 (Fig. 25) para a obtenção das imagens a fim de analisar e discutir os possíveis mecanismos de desgaste ocorridos na superfície do rebolo.

Figura 25 - Microscópio eletrônico de varredura Quanta FEG 200



Fonte: THERMO FISHER SCIENTIFIC. Disponível em: <https://www.fei.com/products/sem/quanta-sem/#gsc.tab=0>. Acesso em 30 de junho de 2020

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

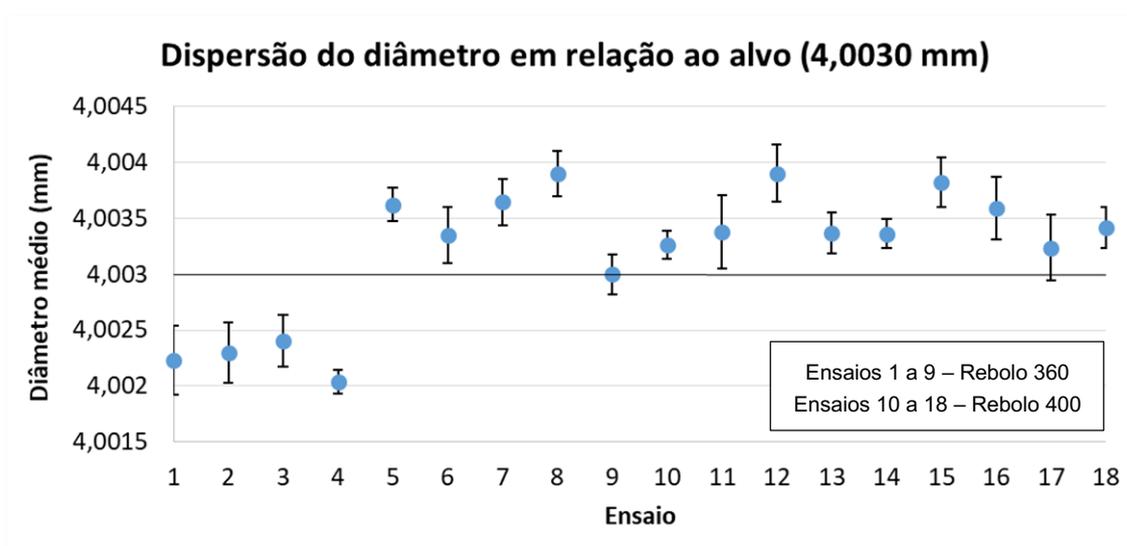
Neste capítulo são apresentados os resultados das análises e medições das peças e rebolos ensaiados.

4.1 Qualidade dimensional do diâmetro

Quanto às medições do diâmetro, considera-se o melhor resultado o experimento que apresentar a média dos diâmetros mínimos e máximos mais próximas do alvo de 4,0030 mm. Neste sentido, o ensaio 9 (rebolo com especificação de granulometria 360, $n_w = 1800$ rpm e $V_{fa} = 600$ mm/min) exibiu o melhor resultado obtendo média exatamente igual ao alvo. Os valores mais distantes foram encontrados no ensaio 4 (rebolo com especificação de granulometria 360, $n_w = 1400$ rpm $V_{fa} = 800$ mm/min), com média de diâmetro de 4,0020 mm (Gráfico 4).

Nota-se também que todos os ensaios com o rebolo com especificação 400 (ensaios 10 ao 18) demonstraram valores acima do alvo.

Gráfico 4 - Gráfico de dispersão do diâmetro em relação ao alvo – Intervalo de Confiança de 95%



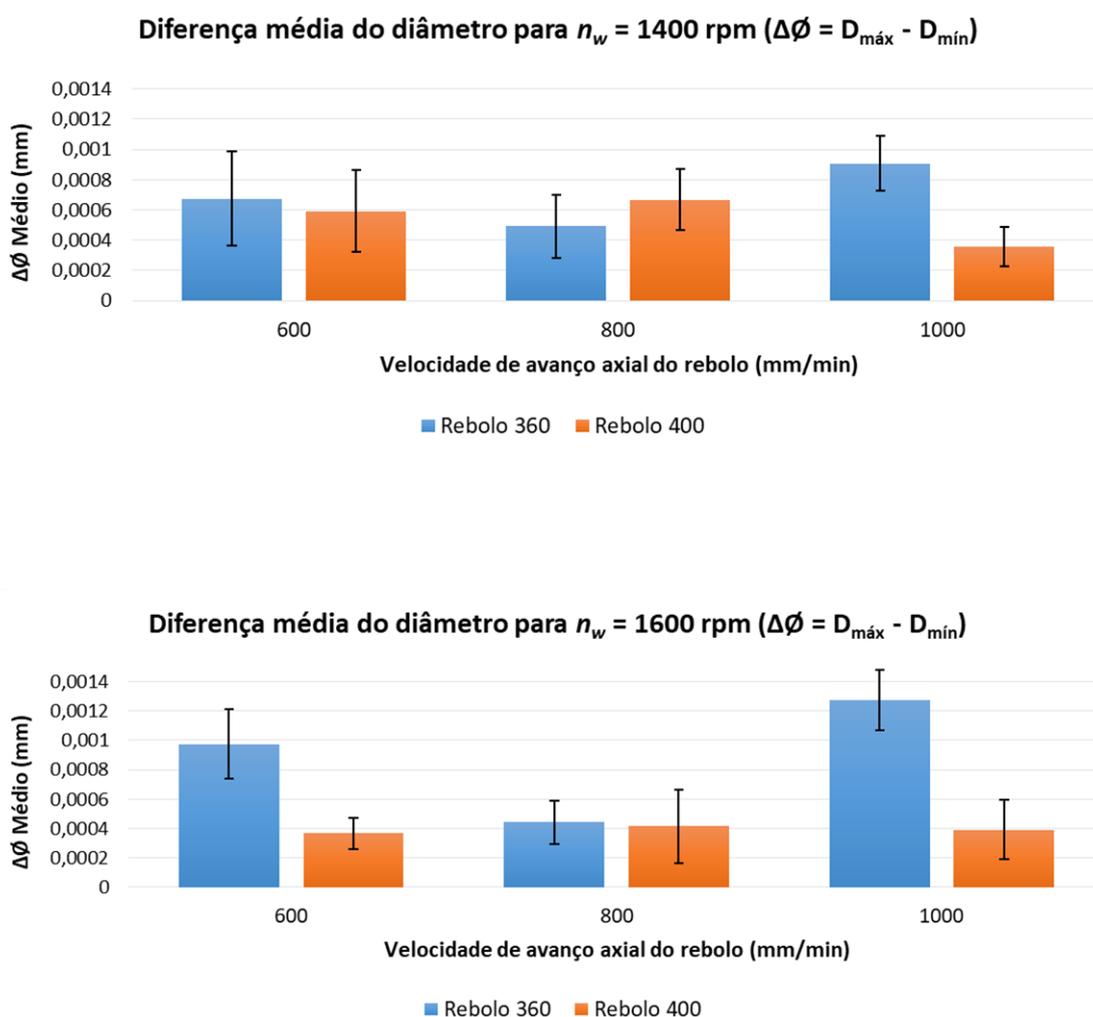
Fonte: Autor

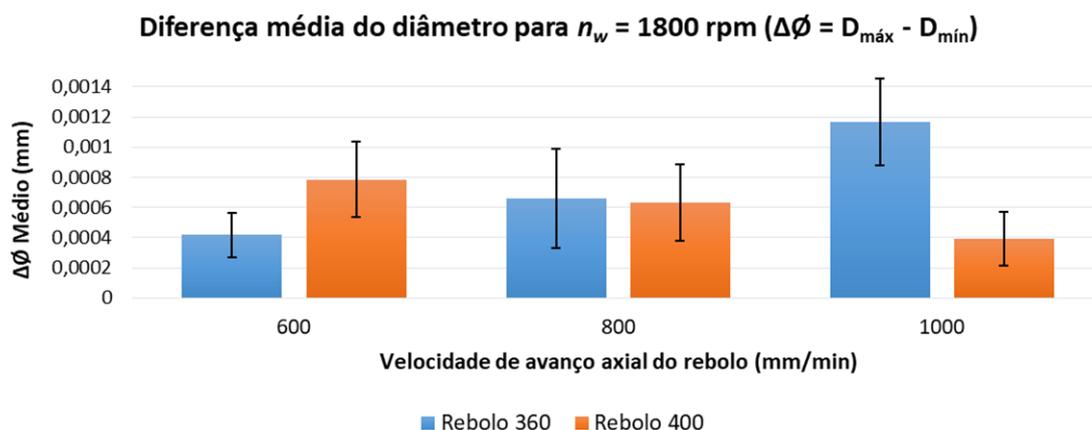
Em relação a diferença média dos diâmetros máximos e mínimos destaca-se um bom resultado quando este retratar valores mais próximos de zero.

Embora o ensaio que gerou peças com o diâmetro mais próximo do alvo estabelecido tenha sido com o rebolo de granulometria 360, este ocorreu de forma isolada e não garantiu necessariamente bons resultados da diferença entre o diâmetro mínimo e máximo de cada peça, independentemente da variação da velocidade de avanço axial da ferramenta e da rotação da peça. Diferentemente do rebolo de granulometria 400 que denotou os melhores resultados para este caso. Além disso, o rebolo com especificação de granulometria 360 também exibiu o resultado mais afastado do alvo no ensaio 4.

Os gráficos da Figura 26 exibem a diferença média entre os diâmetros mínimos e máximos medidos em função da velocidade de avanço axial do rebolo.

Figura 26 - Gráficos da diferença média entre os diâmetros mínimos e máximos em relação a variação da velocidade de avanço axial da ferramenta – Intervalo de Confiança de 95%





Fonte: Autor

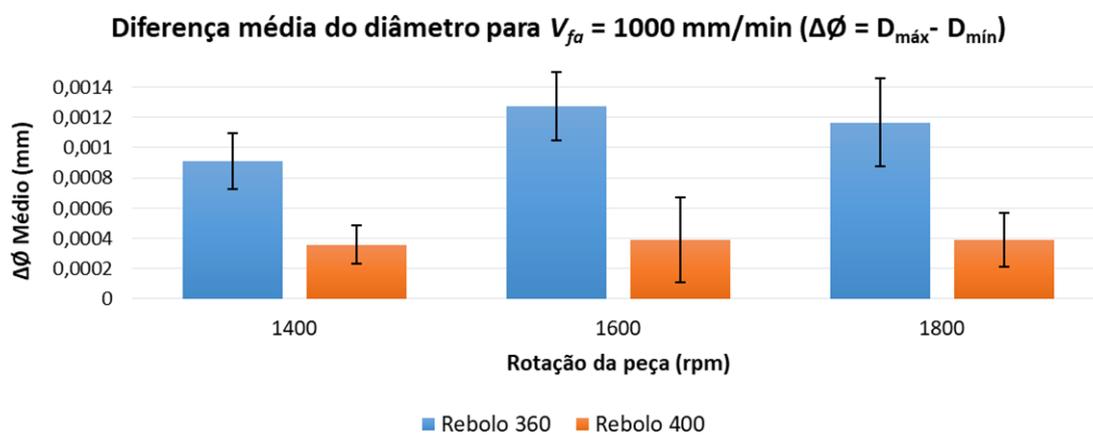
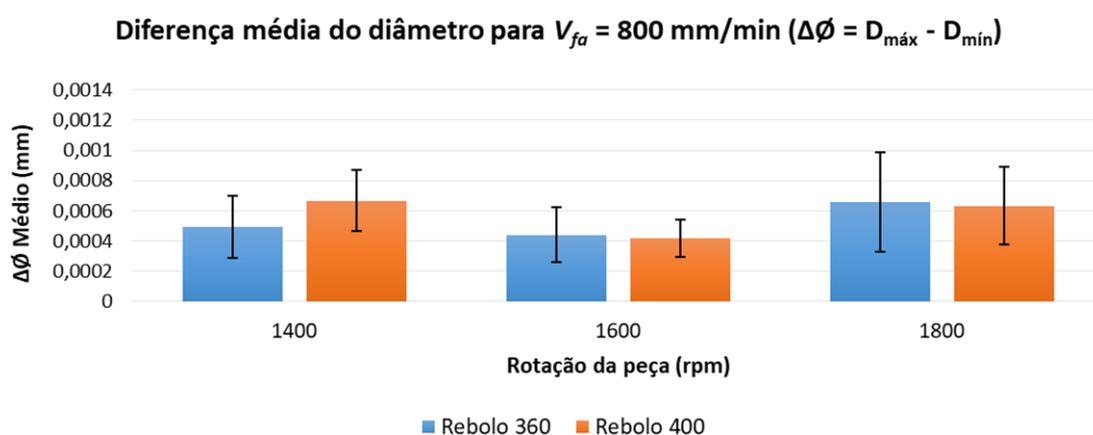
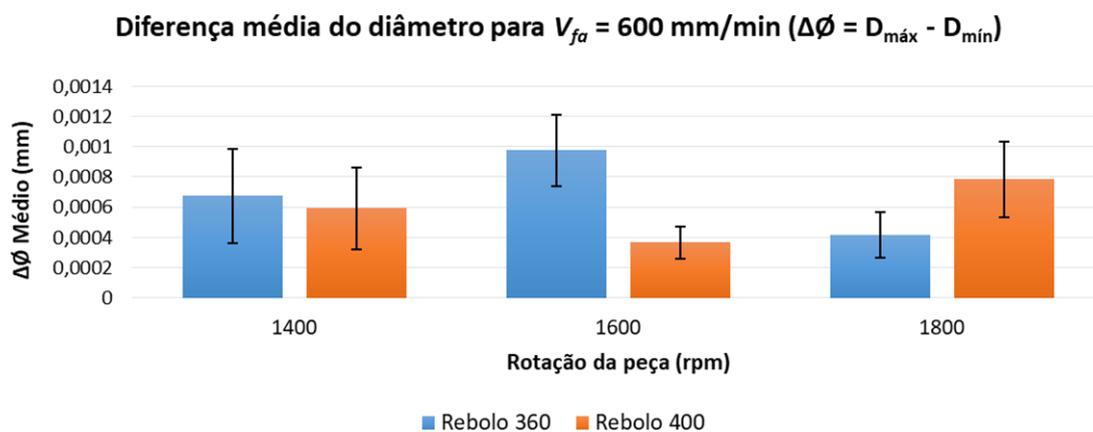
Neste caso, analisando a variação da velocidade de avanço axial da ferramenta, observou-se que o rebolo com granulometria 400 apresentou os melhores resultados do estudo a 1000 mm/min com a peça girando a 1400 rpm e retornou valores mais estáveis quando utilizado com a peça em 1600 rpm. O pior resultado foi encontrado no rebolo de granulometria 360 a 1000 mm/min. Notou-se também que em todas as rotações ensaiadas, ao passar de 800 mm/min para 1000 mm/min, as ferramentas obtiveram desempenhos antagônicos. Enquanto o rebolo de granulometria 360 piorou significativamente seu resultado, o de 400 melhorou.

O aumento da velocidade de avanço axial do rebolo no interior do furo durante a retificação impulsiona um aumento da flexão e deformação elástica do sistema de fixação e prolongamento da ferramenta, o que pode ocasionar desvios na qualidade dimensional. Tal comportamento é notado no rebolo com granulometria 360 e também descrita no estudo de TAWAKOLI *et al.* (2007). Contudo, observou-se que tamanhos de grãos comparativamente menores, como no rebolo com especificação de granulometria 400, não só mitigaram esses efeitos como melhoraram a qualidade dimensional do diâmetro.

De maneira geral, o rebolo de granulometria 400 apresentou melhor desempenho quando variada a velocidade de avanço axial da ferramenta e fixada a rotação da peça, sendo os melhores valores em 1000 mm/min.

Os valores da diferença média entre os diâmetros mínimos e máximos em relação a variação da rotação da peça são elucidados nos gráficos da Figura 27.

Figura 27 - Gráficos da diferença média entre os diâmetros mínimos e máximos em relação a variação da rotação da peça – Intervalo de Confiança de 95%



Fonte: Autor

Quando se observa a mudança de rotação da peça, é possível perceber variações pouco significativas entre os rebolos testados quando se adota uma velocidade de avanço axial da ferramenta fixa em 800 mm/min ou 1000 mm/min. Já em 600 mm/min, observa-se um ponto de inflexão em 1600 rpm em ambos rebolos e alterações relativamente mais significativas da diferença média do diâmetro.

O rebolo com granulometria 400 apresenta peças com uma melhor qualidade dimensional em velocidades de avanço axiais maiores, além de manter resultados mais estáveis com a variação da rotação da peça. Isso deve-se ao tamanho do grão abrasivo ser menor e por consequência a estrutura da ferramenta ser comparativamente mais fechada, ocasionando maior estabilidade dimensional e geométrica da própria superfície ativa do rebolo.

4.2 Erro geométrico

Inúmeros fatores influenciam diretamente nos erros de forma geométrica no processo de retificação interna, por exemplo, a rigidez do sistema (placa, fuso, peça, rebolo, haste de prolongamento do rebolo, sistemas de fixação e etc.), as características do rebolo (tipo de ligante, tipo de grão abrasivo, estrutura, granulometria, geometria e etc.), o tipo de material a ser usinado (estrutura cristalina, composição química e etc.) e os parâmetros e condições de usinagem (rotação, velocidade de corte, velocidade de avanço axial, centelhamento, profundidade de corte e etc.) (KWAK, 2005).

Contudo, conforme descrito no estudo de ANDRETTA (2012), na retificação interna, o eixo-ferramenta e a haste de fixação do rebolo constituem os pontos críticos, uma vez que sua rigidez equivalente é substancialmente menor que a destes componentes na retificação externa. Esta baixa rigidez se reflete no erro dimensional e geométrico do furo produzido.

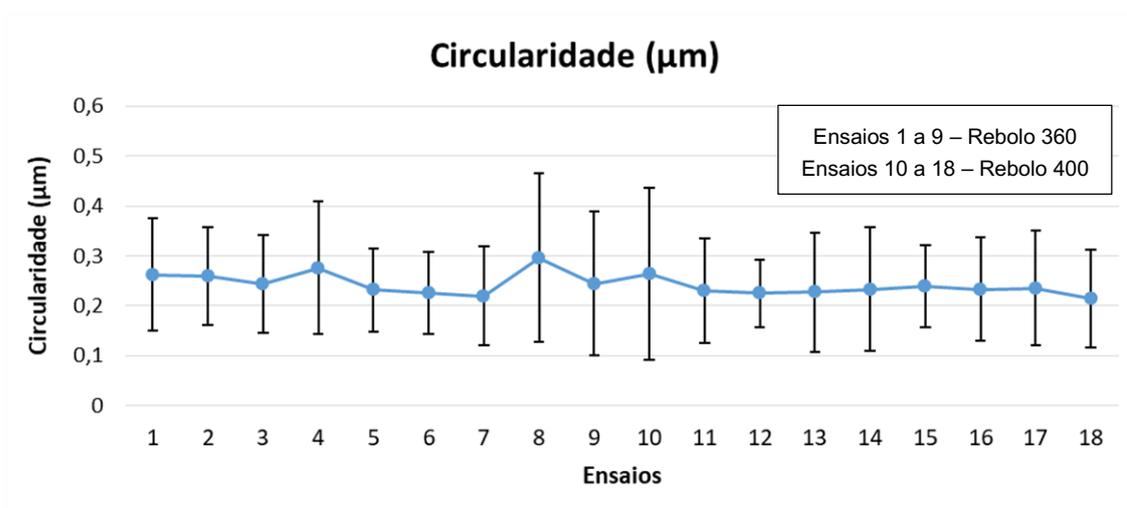
Neste tópico serão abordados os resultados da análise dos erros geométricos de circularidade, paralelismo e retitude.

4.2.1 Circularidade

Uma das maneiras de definir o erro de circularidade é analisá-lo como a zona de tolerância delimitada pela distância radial entre dois círculos concêntricos coplanares, separados pela distância mínima possível entre eles e contendo todos os pontos de medição no perfil dado (DIAS *et al.*, 2009 e SHAW, 1996). Além disso, para JEDRZEJEWSKI & MODRZYCKI (1997) *apud* SOUZA *et al.* (2004), o erro de circularidade pode ser entendido como qualquer divergência entre a peça construída e a peça teoricamente exigida com a tolerância especificada.

A circularidade foi medida em três pontos distintos ao longo do furo guia com esfera de prova de diâmetro 0,8000 mm e força de 0,04 N. A tolerância de circularidade estabelecida pelo projeto foi de 0,8 μm . Os valores das medições de circularidade são expostos no Gráfico 5.

Gráfico 5 - Gráfico das medições de circularidade por ensaio - Intervalo de Confiança de 95%



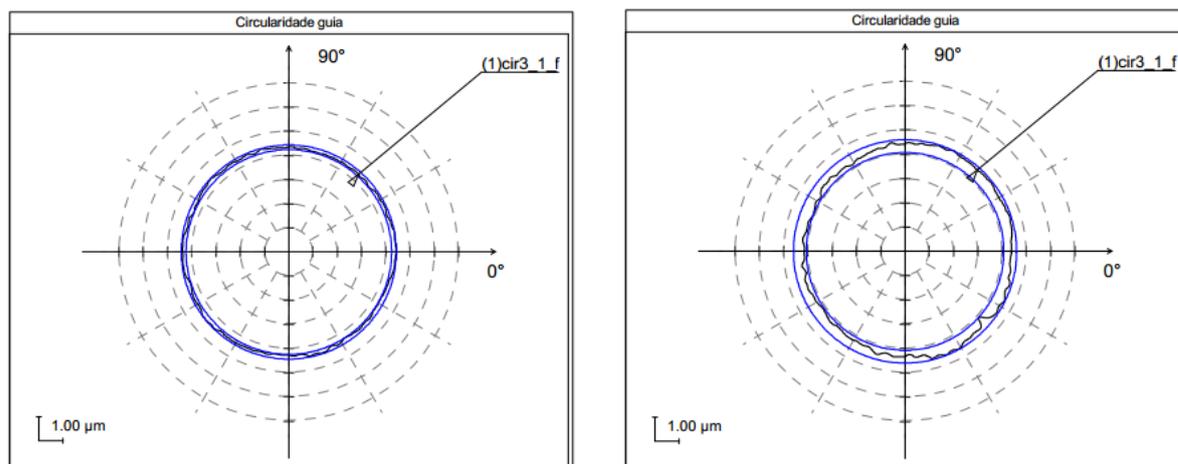
Fonte: Autor

Levando em consideração os parâmetros de rotação da peça e da velocidade de avanço axial do rebolo os testes obtiveram bons resultados de circularidade para ambas granulometrias, sendo que a diferença entre o melhor e o pior resultado foi de apenas 0,08 μm . Observa-se que o ensaio 18 (rebolo com especificação de granulometria 400, $n_w = 1800$ rpm e $V_{fa} = 600$ mm/min) apresentou a menor média, diferente do ensaio 8 (rebolo com especificação de granulometria 360, $n_w = 1800$ rpm

e $V_{fa} = 1000$ mm/min) que demonstrou valores ligeiramente mais elevados. Em contrapartida, os resultados não apresentaram diferença estatística entre eles.

A Figura 28 ilustra o resultado da medição para o menor valor encontrado (ensaio 18) e também para o maior (ensaio 8).

Figura 28 - Medição de circularidade do rebolo de granulometria 400, $n_w = 1800$ rpm e $V_{fa} = 600$ mm/min (esquerda), e do rebolo de granulometria 360, $n_w = 1800$ rpm e $V_{fa} = 1000$ mm/min (direita)



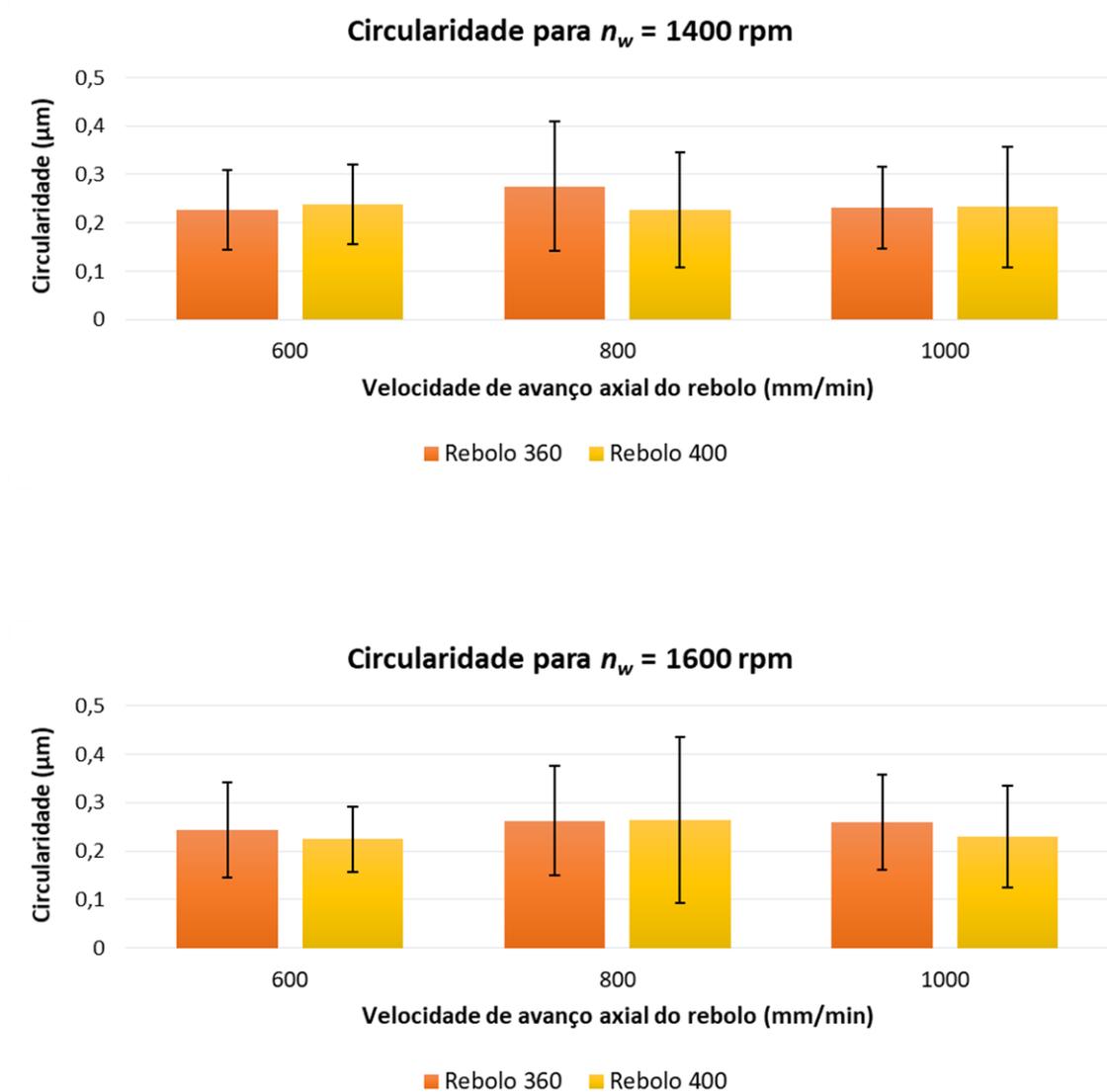
Fonte: Empresa parceira

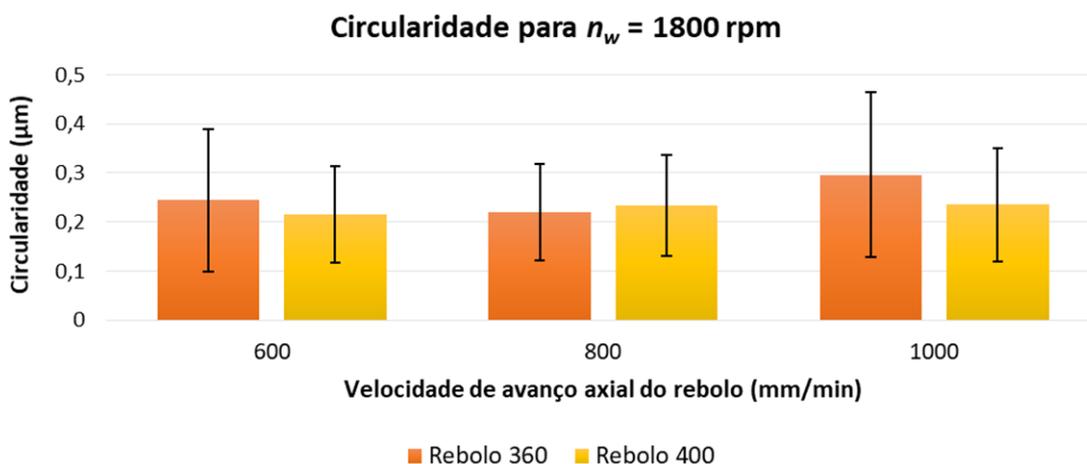
É extremamente importante para o processo de retificação que os valores de circularidade atendam às especificações do projeto. Os valores obtidos no processo de retificação estão relacionados às condições escolhidas, aos distúrbios da máquina e à fixação da peça (WANG, 2008). Todavia, o erro geométrico de circularidade obteve alterações pouco relevantes com as variações de rotação e velocidade de avanço axial propostas neste trabalho. Assim, observando os resultados e intervalos de confiança obtidos, é admissível afirmar que, as condições de retificação escolhidas bem como o emprego dos diferentes rebolos deste estudo não exerceram influência significativa sobre o erro geométrico de circularidade nas peças retificadas.

Ainda que não seja o objeto de estudo desta pesquisa, o uso do óleo integral pode ter influenciado nos erros de circularidade, pois os bons resultados encontrados também vão ao encontro com o estudo de SOUZA *et al.* (2004) sobre o tipo de fluido de corte segundo os pesquisadores, o uso de óleo integral permite a redução dos erros de circularidade e desgaste diametral do rebolo devido ao seu maior poder lubrificante, reduzindo o atrito e a geração de calor na zona de retificação.

A Figura 29 mostra os gráficos com a composição média dos valores de circularidade medidos no decorrer dos ensaios. Tais gráficos ilustram os resultados de cada rebolo estudado em virtude da variação da velocidade de avanço axial da ferramenta.

Figura 29 - Gráficos das medições de circularidade em relação a variação da velocidade de avanço axial da ferramenta - Intervalo de Confiança de 95%





Fonte: Autor

SINGH *et al.* (2014) constataram que o tamanho do grão abrasivo é o parâmetro de maior influência no erro de circularidade na retificação cilíndrica do aço AISI 4140. Contudo, nas condições de trabalho deste estudo, no aço 18CrNi8 este não foi um parâmetro expressivo.

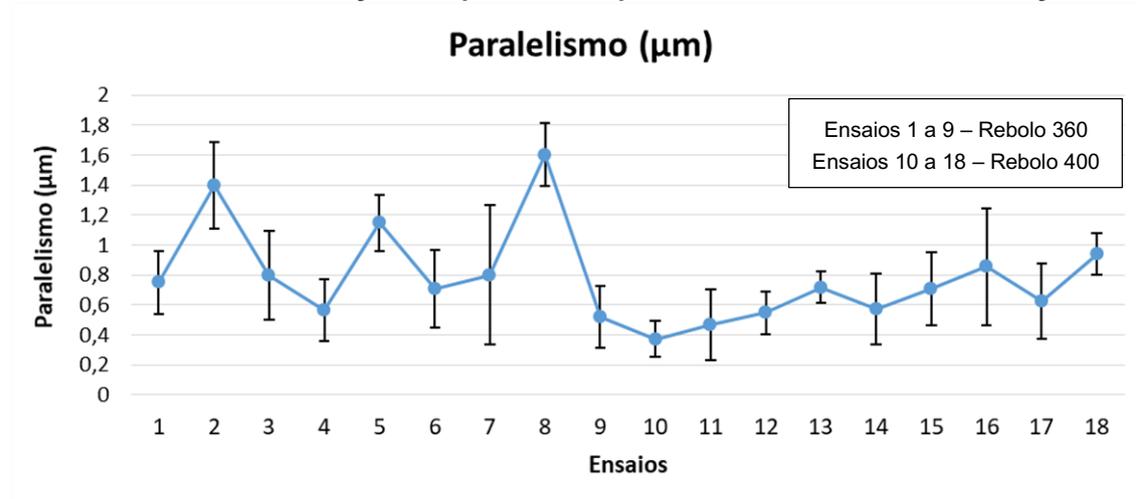
De forma geral os erros de circularidade não obedeceram tendências nem apresentaram valores discrepantes nos diferentes rebolos e faixa de parâmetros analisada, principalmente quando se observa os valores de intervalos de confiança calculados.

4.2.2 Paralelismo

Paralelismo é a condição de uma linha ou superfície ser equidistante em todos os seus pontos de um eixo ou plano de referência, em outras palavras, paralelismo é a condição de um eixo, ser equidistante ao longo de seu comprimento de um ou mais planos de referência ou de um eixo de referência (COGORNIO, 2006).

Foram realizadas duas medições de paralelismo por peça ($0^\circ/180^\circ$ e $90^\circ/270^\circ$) com esfera de prova de diâmetro 0,8000 mm e força de 0,04 N. No Gráfico 6 é possível observar os resultados encontrados nas medições de paralelismo por ensaio.

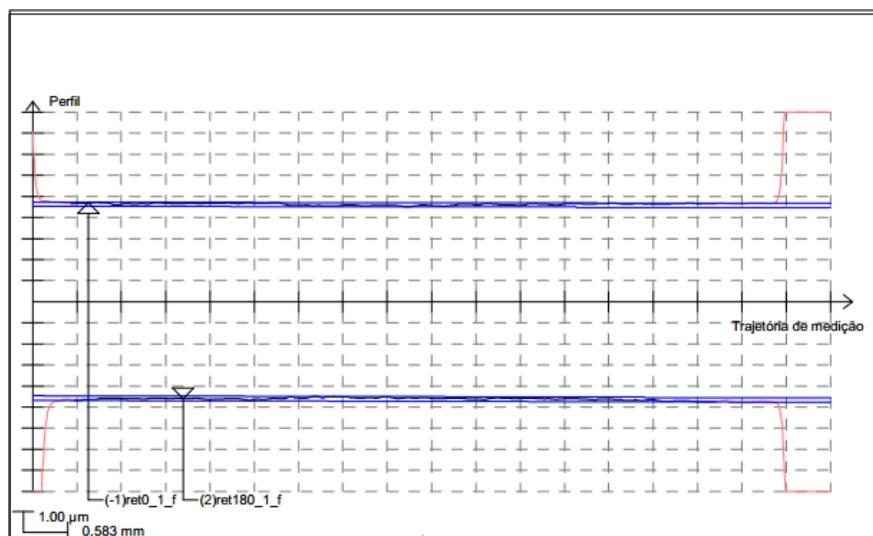
Gráfico 6 - Gráfico das medições de paralelismo por ensaio - Intervalo de Confiança de 95%



Fonte: Autor

Diferentemente do erro de circularidade, as medições do erro de paralelismo apresentaram divergências significativas ao longo dos testes. O Gráfico 6 permite observar que os ensaios com o rebolo de granulometria 400 obtiveram valores mais estáveis de paralelismo, enquanto o rebolo 360 apontou valores com diferenças significativas com a variação dos parâmetros. A melhor situação ocorreu no ensaio 10 (rebolo com granulometria 400, $n_w = 1600$ rpm e $V_{fa} = 800$ mm/min) e a pior no ensaio 8 (rebolo com granulometria 360, $n_w = 1800$ rpm e $V_{fa} = 1000$ mm/min). A Figura 30 mostra o melhor resultado de paralelismo medido.

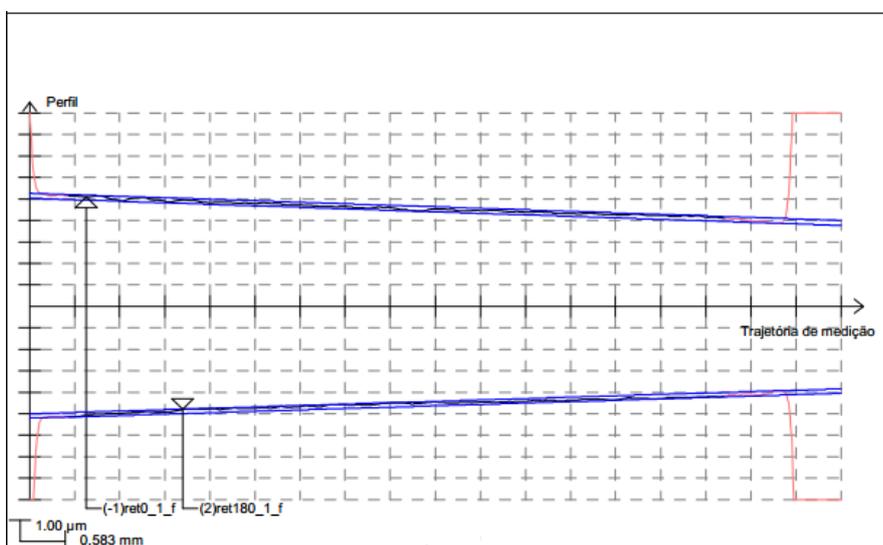
Figura 30 - Medição de paralelismo do rebolo de granulometria 400, rotação da peça em 1600 rpm e velocidade de avanço axial em 800 mm/min (ensaio 10)



Fonte: Empresa parceira

Os valores mais altos foram encontrados no rebolo 360 com velocidades axiais de 1000 mm/min. Nesta velocidade o rebolo de granulometria 400 obteve peças com valores de erro de paralelismo quase três vezes menores. Com a peça girando a 1800 rpm os rebolos demonstraram resultados contrários com o aumento da velocidade de avanço axial da ferramenta, enquanto o rebolo 400 mitigou o erro, o rebolo 360 além de agravar, retornou valores mais altos de intervalos de confiança. O pior resultado é ilustrado na Figura 31.

Figura 31 - Medição de paralelismo do rebolo de granulometria 360, rotação da peça em 1800 rpm e velocidade de avanço axial em 1000 mm/min (ensaio 8)



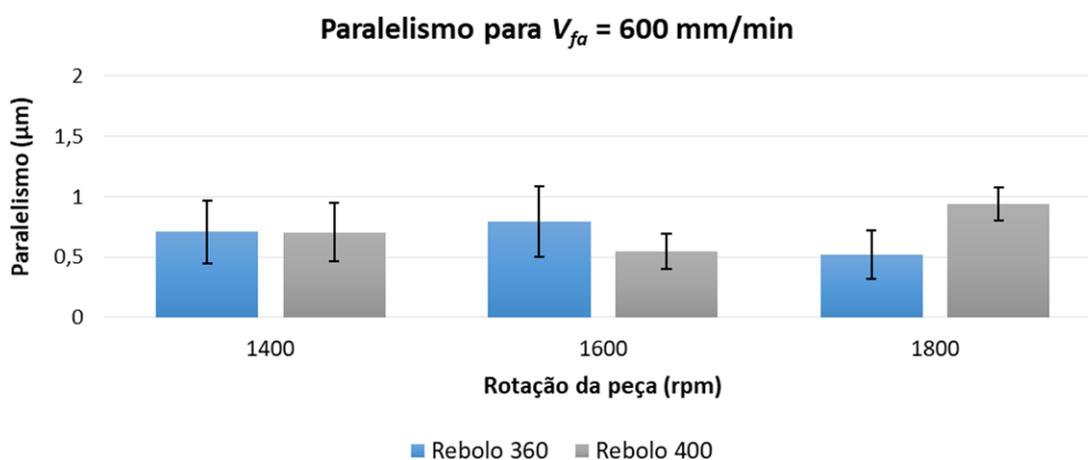
Fonte: Empresa parceira

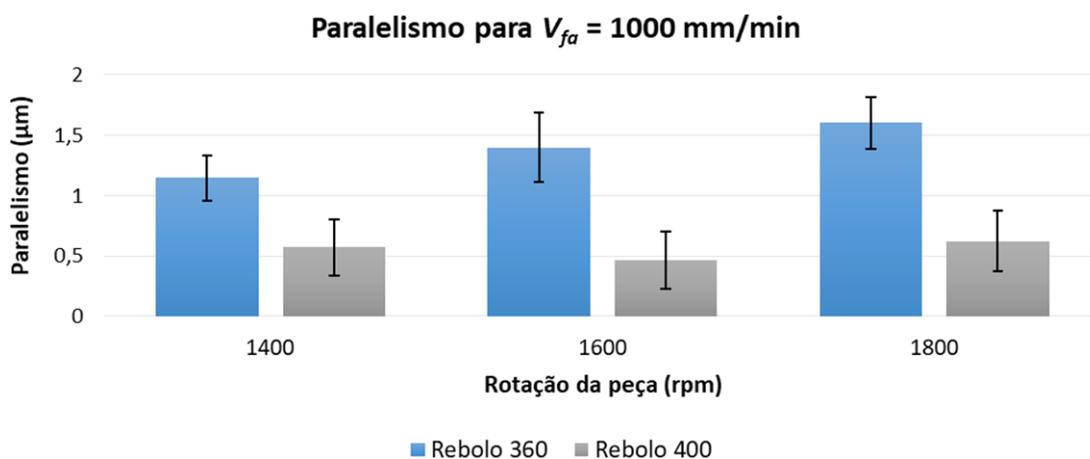
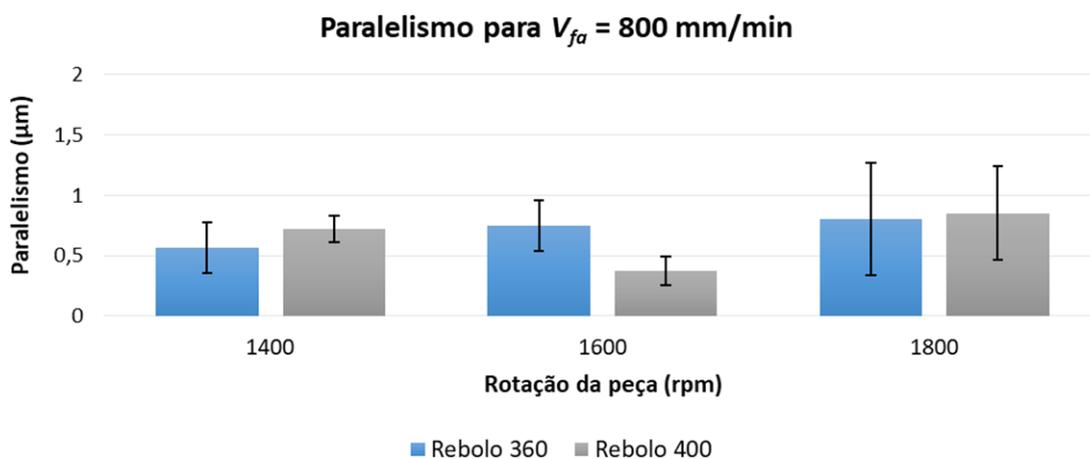
Os três piores resultados foram os dos ensaios 8, 2 e 5. Todos com o rebolo de granulometria 360 com velocidade de avanço axial da ferramenta em 1000 mm/min. Assim, presume-se que na retificação cilíndrica interna de pequenos furos, rebolos com especificação de granulometrias menores tendem a aumentar o erro geométrico de paralelismo quando empregados em velocidades de avanço axiais mais altas. Isso ocorre pelo fato do rebolo 360 ter tamanhos de grãos comparativamente maiores o que permite maiores taxas de remoção de material em detrimento de se obter melhores acabamentos. Tal fato, somado a valores mais altos da velocidade de avanço axial da própria ferramenta, pode impossibilitar o rebolo usinar de forma eficaz ao longo de todo o furo, pois a deformação elástica oriunda da componente normal da força de retificação é acentuada nesse tipo de condição, principalmente no dispositivo de fixação e prolongamento do rebolo. Tal situação também é descrita nos estudos de ANDRETTA (2012).

Além disso, pesquisadores como CHI *et al.* (2004) observaram que o calor gerado durante a operação de retificação faz com que a deformação da superfície da peça seja convexa. Conseqüentemente, na superfície da peça permanece um erro geométrico como forma côncava após o resfriamento, podendo influenciar diretamente no paralelismo. Ademais, KWAK (2005) aponta que o erro geométrico é afetado não apenas pelo aspecto térmico da zona de contato entre a peça e o rebolo e seu respectivo resfriamento, mas também pela baixa rigidez do sistema de retificação que pode ocasionar pequenas deflexões do conjunto.

Os gráficos da Figura 32 apresentam os valores do erro de paralelismo encontrados nos ensaios dos rebolos em relação a mudança da rotação da peça para diferentes velocidades de avanço axiais da ferramenta. Em 800 e 1000 mm/min de avanço axial é possível visualizar que o aumento da rotação da peça gerou uma tendência de aumento linear nos desvios de paralelismo no rebolo de granulometria 360, em contrapartida o rebolo de granulometria 400 apresentou valores muito mais baixos e estáveis ao longo dos testes.

Figura 32 - Gráficos das medições de paralelismo em relação a variação da rotação da peça - Intervalo de Confiança de 95%

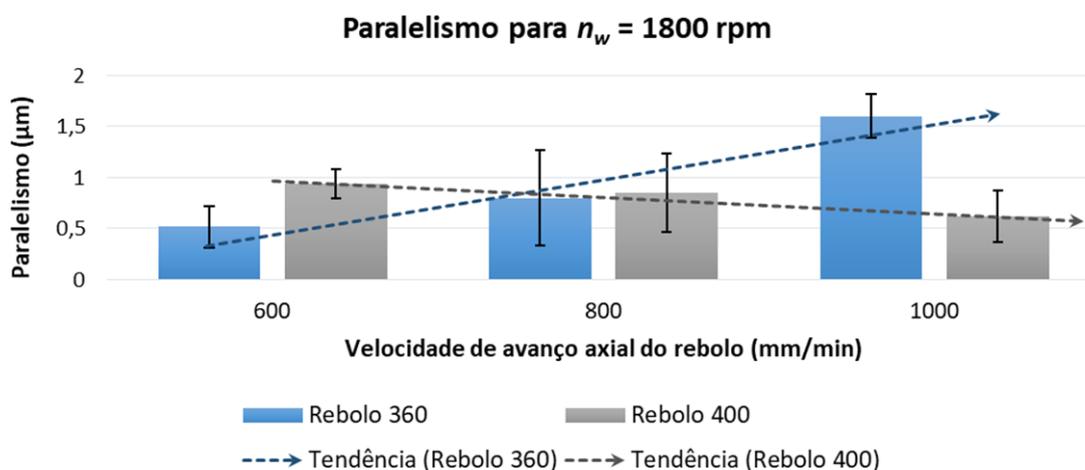




Fonte: Autor

Ilustrando o gráfico em função do aumento da velocidade de avanço axial da ferramenta (Fig. 33), é possível observar uma tendência de aumento linear no erro geométrico de paralelismo com o parâmetro mais alto de rotação da peça em 1800 rpm para o rebolo com especificação de granulometria 360. Nesta mesma situação, o rebolo com especificação de granulometria 400 apresentou tendência de redução nos valores do erro de paralelismo.

Figura 33 - Gráfico das medições e tendências do erro de paralelismo em relação a variação velocidade de avanço axial da ferramenta para $n_w = 1800$ rpm - Intervalo de Confiança de 95%



Fonte: Autor

Os melhores resultados de paralelismo foram encontrados no rebolo de granulometria 400 com a peça a 1600 rpm, nesta condição os valores se mantiveram mais estáveis com o aumento da velocidade de avanço axial do rebolo.

Com isso, nota-se que o erro de paralelismo, nas condições ensaiadas, sofreu maior influência do rebolo com granulometria 360, principalmente quando utilizado em maiores velocidades de avanço axiais da ferramenta e/ou rotações da peça.

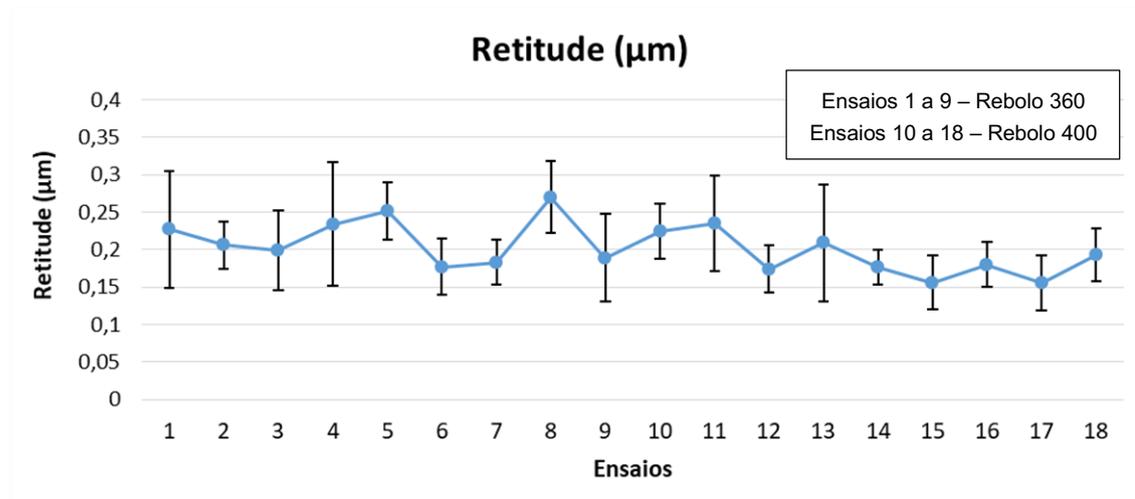
4.2.3 Retitude

A norma ABNT NBR 6409:1997 caracteriza e classifica os desvios de retitude, que é definida como a condição em que um elemento de linha em uma superfície, uma linha mediana ou um elemento de linha de um plano mediano é verdadeiramente uma linha reta (COGORNO, 2006). Como a construção de uma linha perfeitamente reta é impossível no espectro da usinagem, os valores do erro geométrico de retitude são dados pela tolerância de retitude que é definida por dois planos ou retas paralelas que envolvam o perfil real e tenham uma certa distância mínima. O erro de retitude é limitado pela tolerância de paralelismo, contudo a tolerância de retitude não limita os erros de paralelismo.

A retitude foi medida em linhas localizadas em quatro posições distintas na peça conforme referência da máquina, sendo a $0^{\circ}/90^{\circ}/180^{\circ}/270^{\circ}$.

O Gráfico 7 exibe a média dos valores dos erros de retitude encontrados ao longo das medições de cada ensaio.

Gráfico 7 - Gráfico das medições de retitude por ensaio - Intervalo de Confiança de 95%



Fonte: Autor

No gráfico é possível observar que as médias dos valores de retitude se mantiveram em uma faixa relativamente estável, cujos limites se estendem entre 0,15 e 0,25 μm .

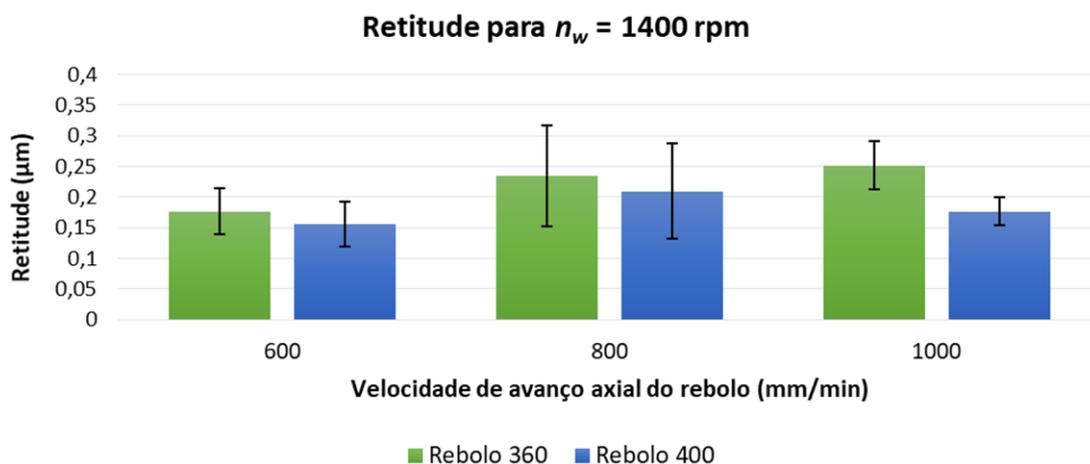
O erro de retitude medido foi muito inferior a 1 μm . Valores baixos também foram encontrados nos ensaios de ARANTES & POLLI (2019). Uma das explicações possíveis é o fato do intervalo de dressagem ter sido pequeno, em vista disto, as peças mantiveram o perfil.

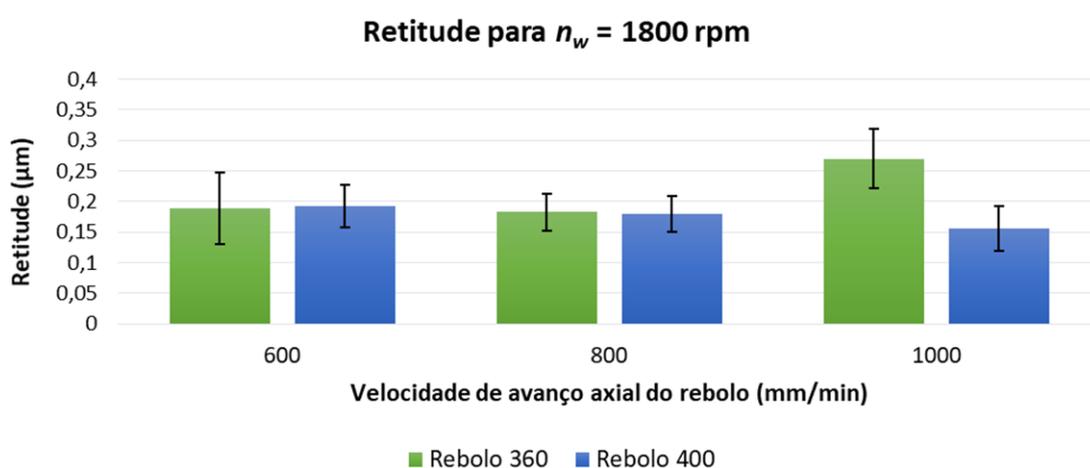
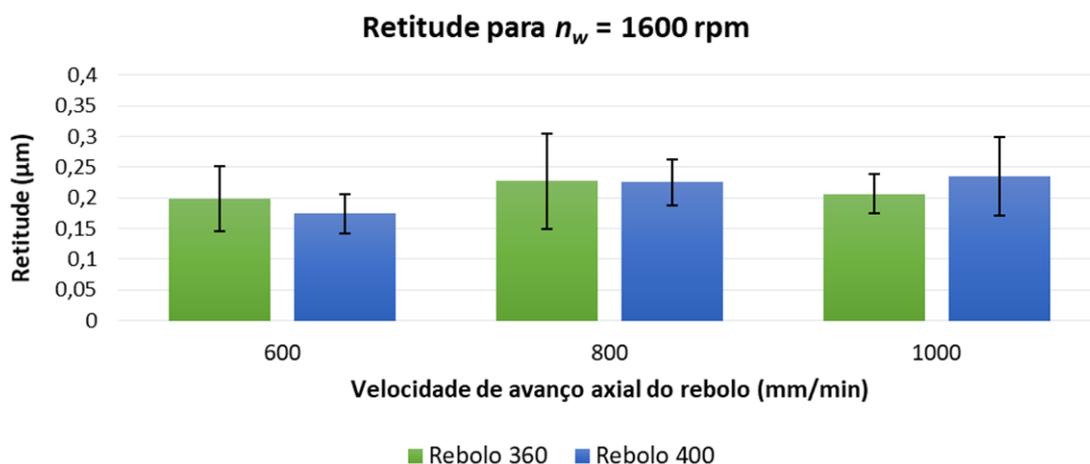
Os valores mais baixos para o erro geométrico de retitude foram notados nas medições do ensaio 17 (rebolo com granulometria 400, velocidade de avanço axial da ferramenta em 1000 mm/min e rotação da peça em 1800 rpm) seguido dos ensaios 15, 12 e 6. Entretanto, assim como nos erros de circularidade e paralelismo, os valores mais altos de retitude foram os do ensaio 8 (rebolo com granulometria 360, $n_w = 1800$ rpm e $V_{fa} = 1000$ mm/min). Nota-se que as mesmas condições e parâmetros de velocidade de avanço axial da ferramenta e de rotação da peça, que por sinal foram as mais severas dessa pesquisa, retornaram desempenhos antagônicos quando empregado rebolos diferentes. Neste caso o rebolo com a granulometria 400 obteve

os melhores valores enquanto o de granulometria 360 os piores. Com isso, é possível afirmar que na faixa testada, rebolos com tamanhos de grãos comparativamente maiores retornam valores mais altos de erro geométrico de retitude se adotados com parâmetros mais elevados de velocidades de avanço axiais da ferramenta e de rotação da peça em operações de retificação interna de pequenos furos.

Os gráficos da Figura 34 demonstram os resultados das medições do erro geométrico de retitude em função da variação da velocidade de avanço axial da ferramenta. Eles permitem observar que o comportamento do rebolo no que tange ao erro geométrico em questão se manteve em relativa estabilidade quando empregado em baixas velocidades de avanço axiais do rebolo (600 e 800 mm/min). Em contrapartida, tanto na menor quanto na maior rotação estudada a velocidade de avanço axial do rebolo em 1000 mm/min apresentou divergência significativa entre os rebolos analisados, sendo o rebolo com especificação de granulometria 400 os valores mais baixos.

Figura 34 - Gráficos das medições de retitude em relação a variação da velocidade de avanço axial da ferramenta - Intervalo de Confiança de 95%





Fonte: Autor

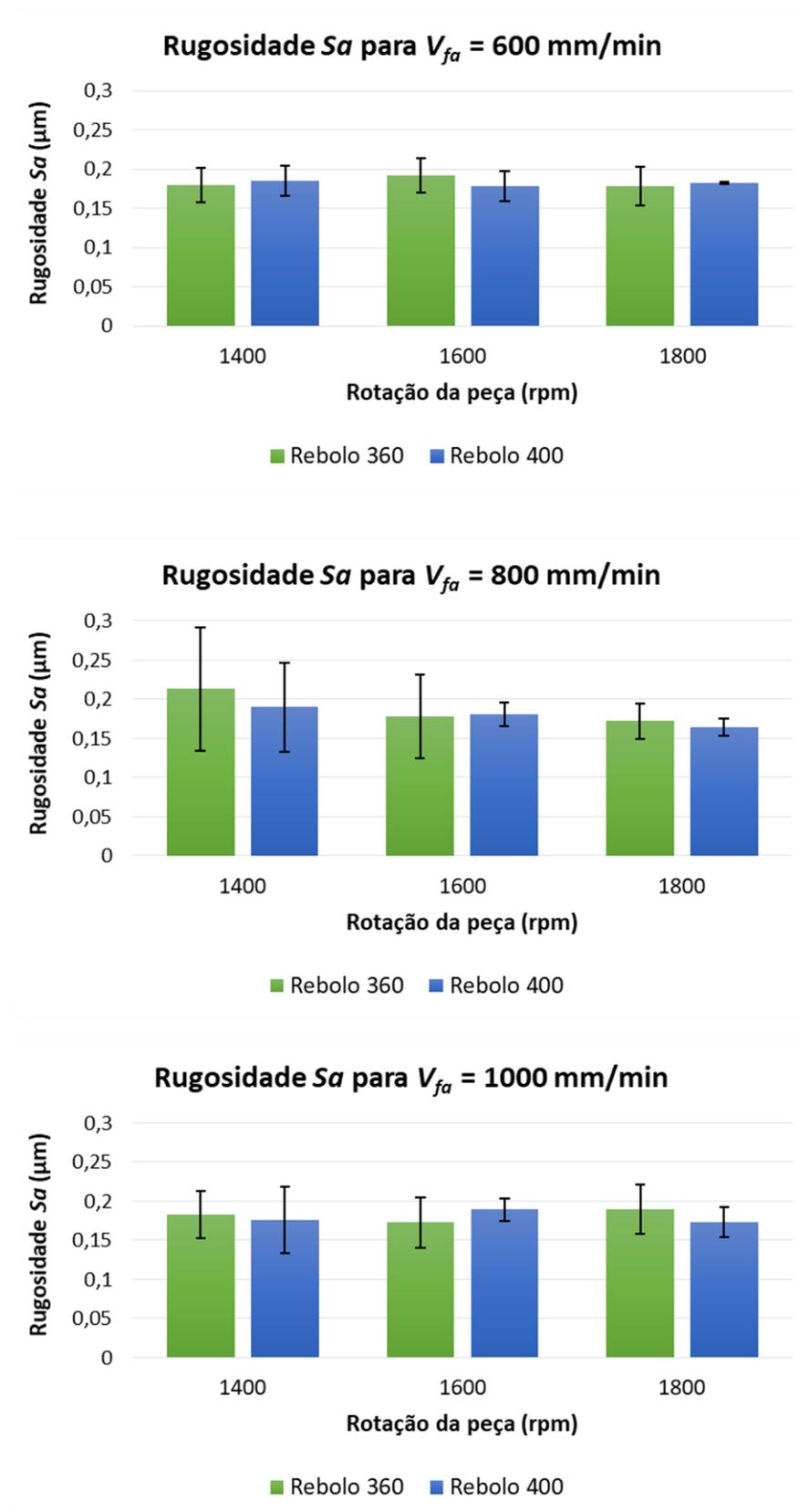
4.3 Análise topográfica da peça

Nesta pesquisa foram analisados a rugosidade (**Sa**), a assimetria (**Ssk**) e a curtose (**Sku**) no estudo topográfico da peça em uma área de medição de 1 mm². O filtro utilizado foi o Gaussiano para superfícies planas inclinadas ISO 16610-61. A resolução vertical foi de < 40 nm e a lateral de 2,94 µm.

4.3.1 Rugosidade (Sa)

Os valores de rugosidade (**Sa**) encontrados nas medições são ilustrados nos gráficos da Figura 35 em relação à variação da rotação da peça.

Figura 35 - Gráficos das medições de rugosidade em relação a variação da rotação da peça - Intervalo de Confiança de 95%



Fonte: Autor

O aumento da rotação demonstrou uma leve tendência de diminuir os valores de rugosidade quando empregada com velocidade de avanço axial do rebolo em 800 mm/min. Uma possível explicação é que quando a velocidade periférica aumenta, a espessura dos cavacos diminui, tornando mais fácil para os cavacos penetrarem nos poros do rebolo e não danificando a superfície usinada. Além disso, de acordo com DING *et al.* (2017), o material da superfície da peça é removido uniformemente em cavacos menores gerando riscos rasos, como resultado a rugosidade da superfície é melhorada.

Nas demais velocidades de avanço axiais analisadas, a rugosidade obteve variação pouco significativa e se manteve na faixa entre 0,15 e 0,2 μm . Isto deve-se ao próprio rebolo de cBN. Sua alta dureza de grão, estabilidade térmica e química e boa condutividade térmica contribuíram para um melhor acabamento da superfície. Valores baixos de rugosidade também foram encontrados em rebolos de cBN no estudo de ARANTES & POLLI (2020), no qual as comparam com rebolos convencionais na retificação de peças em aço endurecido.

Nota-se que o ensaio 16 (rebolo com granulometria 400, $n_w = 1800$ rpm e $V_{fa} = 800$ mm/min) obteve os valores mais baixos de rugosidade seguido pelo ensaio 7 (rebolo com granulometria 360, $n_w = 1800$ rpm e $V_{fa} = 800$ mm/min). Ou seja, independentemente da granulometria adotada, a combinação dos parâmetros de velocidade de avanço axial da ferramenta em 800 mm/min e rotação da peça em 1800 rpm mostraram um bom efeito combinado quando analisados na ótica da rugosidade. Porém, é sabido e também notado neste estudo que rebolos com tamanho de grão menores tendem a produzir melhores acabamentos superficiais.

Os valores mais altos foram encontrados no ensaio 4 (rebolo com granulometria 360, $n_w = 1400$ rpm e $V_{fa} = 800$ mm/min).

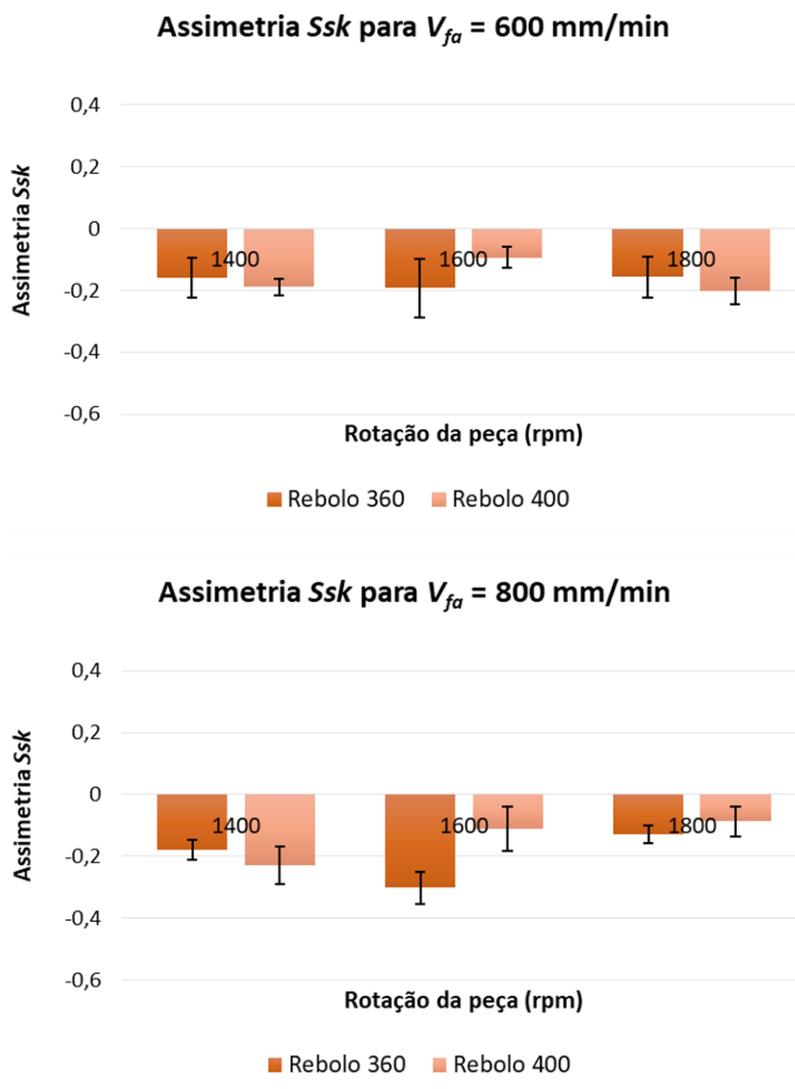
Quando analisada em função da velocidade de avanço axial da ferramenta, a rugosidade não demonstrou tendências ou padrões. Com isso, pode-se afirmar que, independentemente da granulometria empregada, a variação da velocidade de avanço axial do rebolo no interior do furo durante as operações de retificação não exerceu influência significativa sobre os valores de rugosidade se estudado de forma isolada.

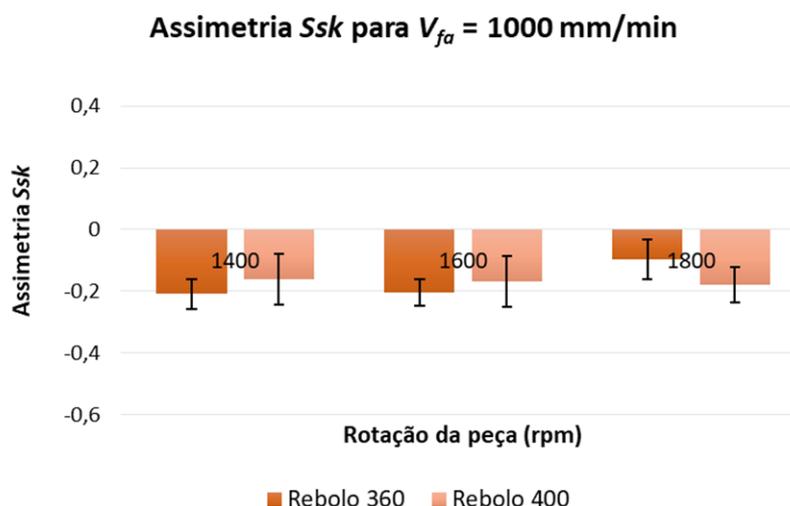
4.3.2 Assimetria (S_{sk})

Como descrito por BHUSHAN (2013), assimetria é uma medida do afastamento de uma curva de distribuição da simetria, em outras palavras, o parâmetro S_{sk} é usado para verificar a forma geral dos picos de rugosidade e expressa o desvio do eixo simétrico de uma dada curva de distribuição. Quando a assimetria de uma distribuição é igual a zero é considerada normal ou simétrica. Em vista disso, a assimetria de uma distribuição não simétrica pode ser positiva quando a superfície apresentar mais picos ou negativa se apresentar mais vales.

Os gráficos da Figura 36 mostram os valores da assimetria em função da rotação da peça.

Figura 36 - Gráficos das medições de assimetria (S_{sk}) em relação a variação da rotação da peça - Intervalo de Confiança de 95%





Fonte: Autor

Os valores mais próximos de uma distribuição normal, ou seja, próximos de zero, foram os encontrados no ensaio 16 seguido do ensaio 12. Ambos com o rebolo com especificação de granulometria 400. Os valores mais distantes de zero foram os do ensaio 1 (rebolo com granulometria 360, $n_w = 1600$ rpm e $V_{fa} = 800$ mm/min) caracterizado por valores negativos, isto é, predominância de vales.

Segundo CHANG & JENG (2013), este comportamento era esperado, pois em seu estudo concluíram que uma assimetria negativa é frequentemente o resultado de acabamento de superfície de precisão, além disso, ajuda a reduzir o número de asperezas deformadas plasticamente. Ademais, de acordo com KUNDRAK *et al.* (2008), a assimetria das superfícies retificadas tende a ser negativa e as superfícies torneadas do aço endurecido tendem a ter uma assimetria bastante positiva.

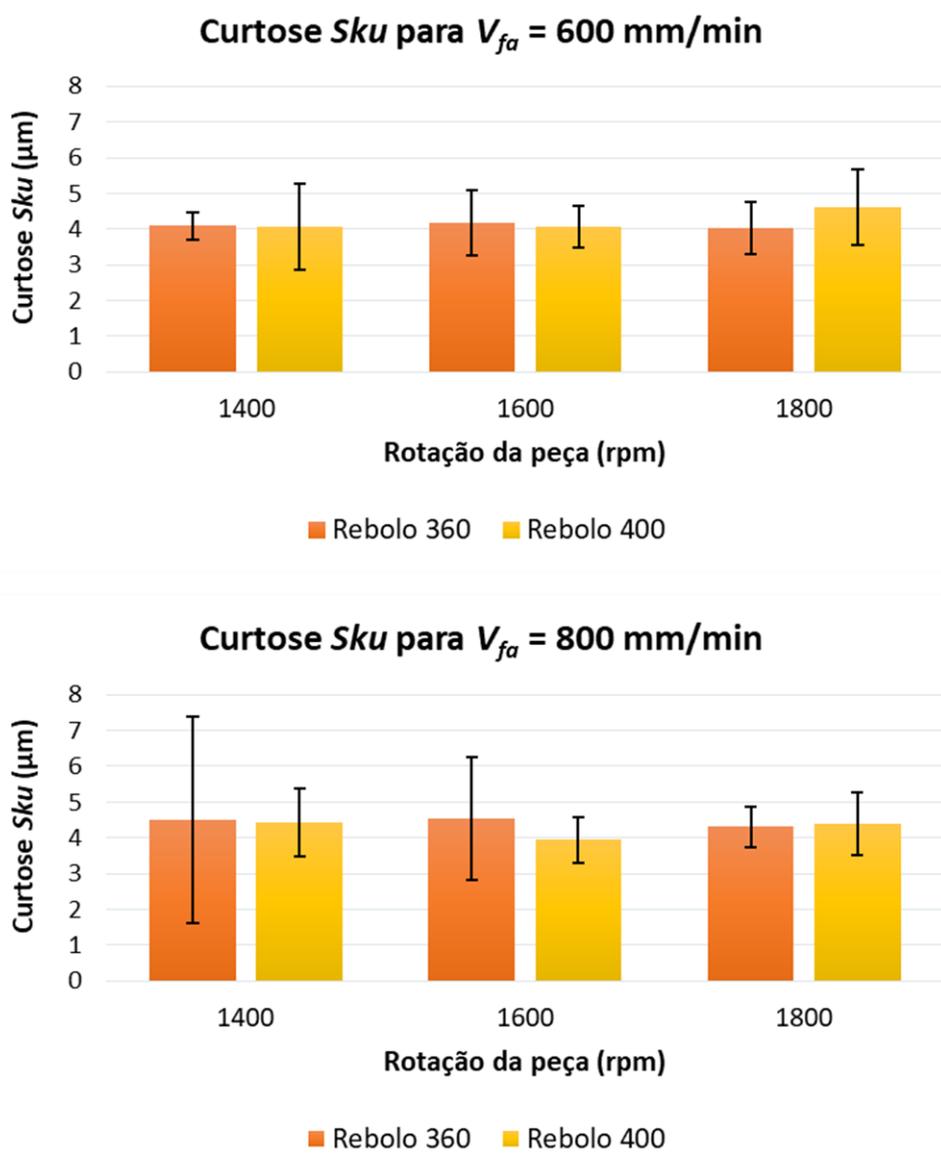
Ao analisar os gráficos, é possível observar uma leve tendência de aumento de vales na caracterização da superfície quando aumentada a velocidade de avanço axial da ferramenta no rebolo 360 com a peça em 1400 rpm, e no rebolo 400 com a peça girando em 1600 rpm. Neste caso, com o aumento de vales é possível minimizar o atrito. SEDLAČEK *et al.* (2017) relataram que superfícies de aço endurecido com alto teor de cromo e dureza similar a do aço 18CrNi8 com valores S_{sk} negativos tendem a reduzir o atrito, mesmo em rugosidades superficiais médias mais altas.

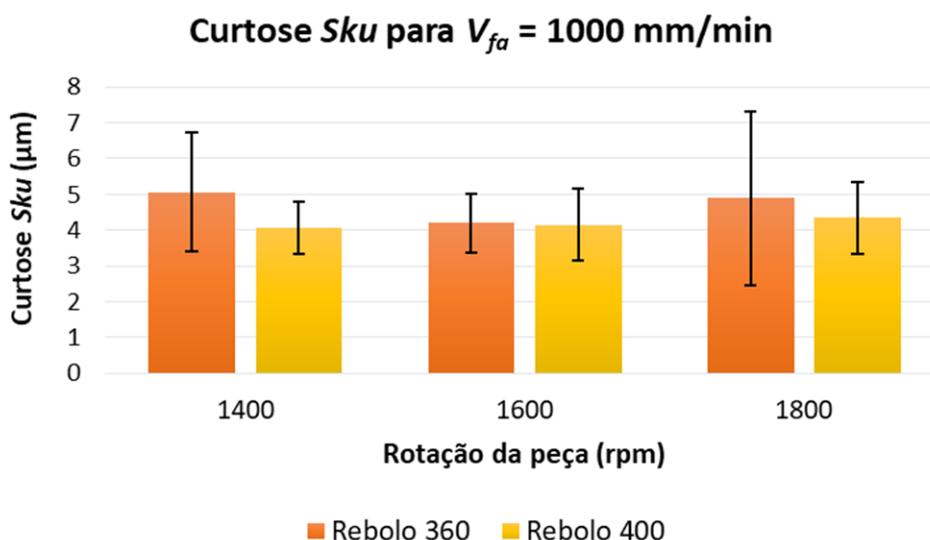
Observa-se também uma tendência no aumento de picos na caracterização da superfície quando aumentada a rotação da peça no rebolo com granulometria 400 com velocidade de avanço axial em 800 mm/min, e no rebolo 360 quando empregado com velocidade de avanço axial de 1000 mm/min.

4.3.3 Curtose (Sk_u)

Curtose pode ser definida como uma medida da saliência em uma curva de distribuição, isto é, ela mostra a nitidez de uma curva de distribuição. A curtose da distribuição padrão de Gauss é igual a 3 e é considerada normal, sendo que, quando $Sk_u < 3$ diz-se que a distribuição é platicurtose, enquanto se o parâmetro $Sk_u > 3$, é chamada de leptocurtose (SHIZHU & PING, 2012). Os valores obtidos para curtose Sk_u estão apresentados nos gráficos da Figura 37 em função da rotação da peça em diferentes velocidades de avanço axiais da ferramenta.

Figura 37 - Gráficos das medições de curtose (Sk_u) em relação a variação da velocidade de avanço axial da ferramenta - Intervalo de Confiança de 95%



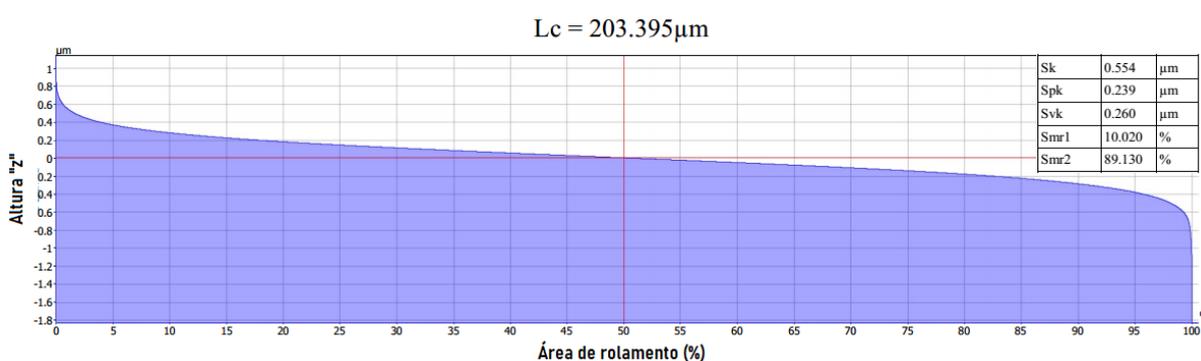


Fonte: Autor

Para todos os ensaios mostrados a distribuição se caracterizou como leptocurtose, nos estudos de ARANTES (2019) também foram encontrados valores similares em peças provenientes da retificação cilíndrica externa utilizando rebolos de cBN. Isso deve-se ao perfil de corte do rebolo e das características do grão abrasivo.

Para fins de ilustração, o Gráfico 8 mostra a curva de Abbot-Firestone para o ensaio 10 (rebolo com granulometria 400, velocidade de avanço axial da ferramenta em 800 mm/min e rotação da peça em 1600 rpm).

Gráfico 8 - Curva de Abbot-Firestone



Fonte: Autor

O parâmetro Sk é formado pelas alturas de rugosidades que não são consideradas vales nem picos, as quais são a base que suporta o desgaste mecânico das peças em contato. Neste caso, observa-se que a profundidade média dos vales abaixo da rugosidade do núcleo (Svk) é sutilmente maior que a altura média dos picos

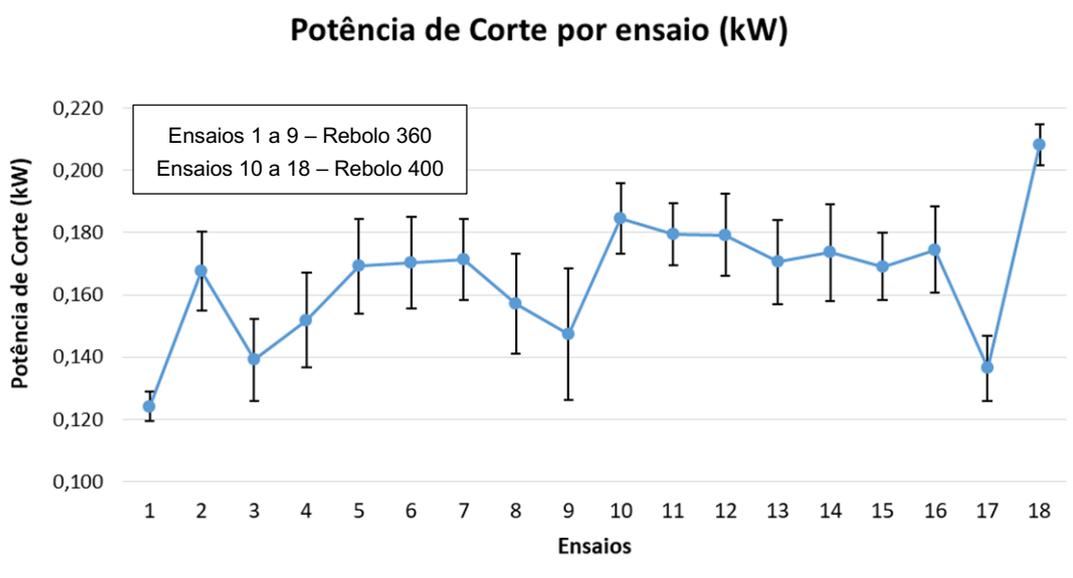
acima da rugosidade do núcleo (Spk). Segundo ARANTES (2019), isto deve-se ao perfil de corte caracterizado pela protrusão das partículas abrasivas de cBN.

4.4 Potência de retificação

A potência de retificação é um parâmetro que pode ser usado para monitorar variações no processo de retificação. A potência de retificação é proporcional à força tangencial de retificação e se relaciona bem com outros parâmetros de retificação, principalmente com a rugosidade da superfície (CHEN *et al.*, 1999).

Assim como nos experimentos feitos por GUO *et al.* (2007) e KWAK *et al.* (2006), a potência de retificação foi obtida através da inferência direta da potência elétrica consumida durante o processo de retificação por meio de um sistema de medição acoplado à retificadora no cabo do motor de acionamento da placa e do fuso. A aquisição de dados consistia em três estágios: o estágio ocioso sem contato entre o rebolo e a peça, no qual embora não houvesse contato, a força foi usada para girar a placa e o rebolo; o estágio de contato entre o rebolo e a peça; e o estágio de dressagem. Por conveniência, neste estudo, a potência de retificação, foi definida como a soma da potência consumida durante o estágio ocioso e o estágio de contato entre a peça e o rebolo, excluindo-se a potência consumida na dressagem. O Gráfico 9 exibe a média dos valores obtidos de potência de corte por ensaio.

Gráfico 9 - Gráfico das medições de potência de corte - Intervalo de Confiança de 95%



Fonte: Autor

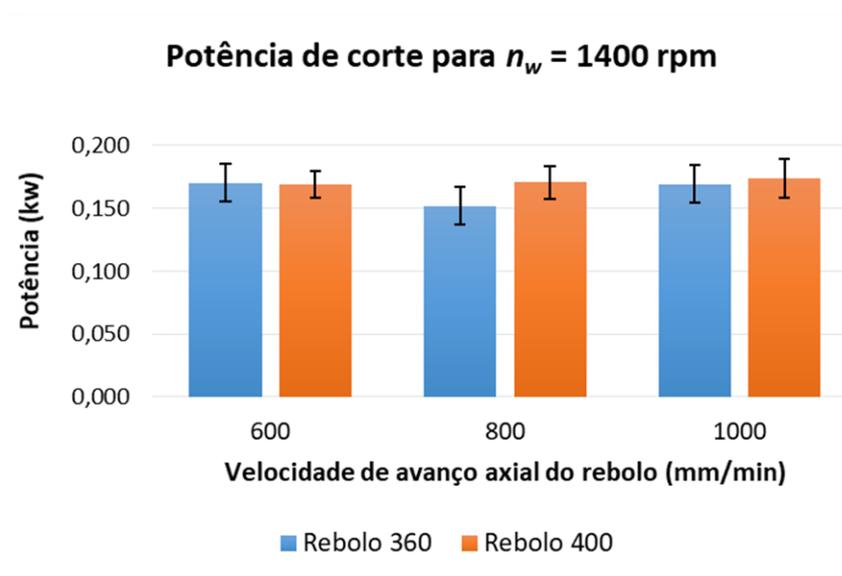
Em termos de consumo de potência durante a retificação, o rebolo com especificação de granulometria 400 foi o que obteve valores mais altos.

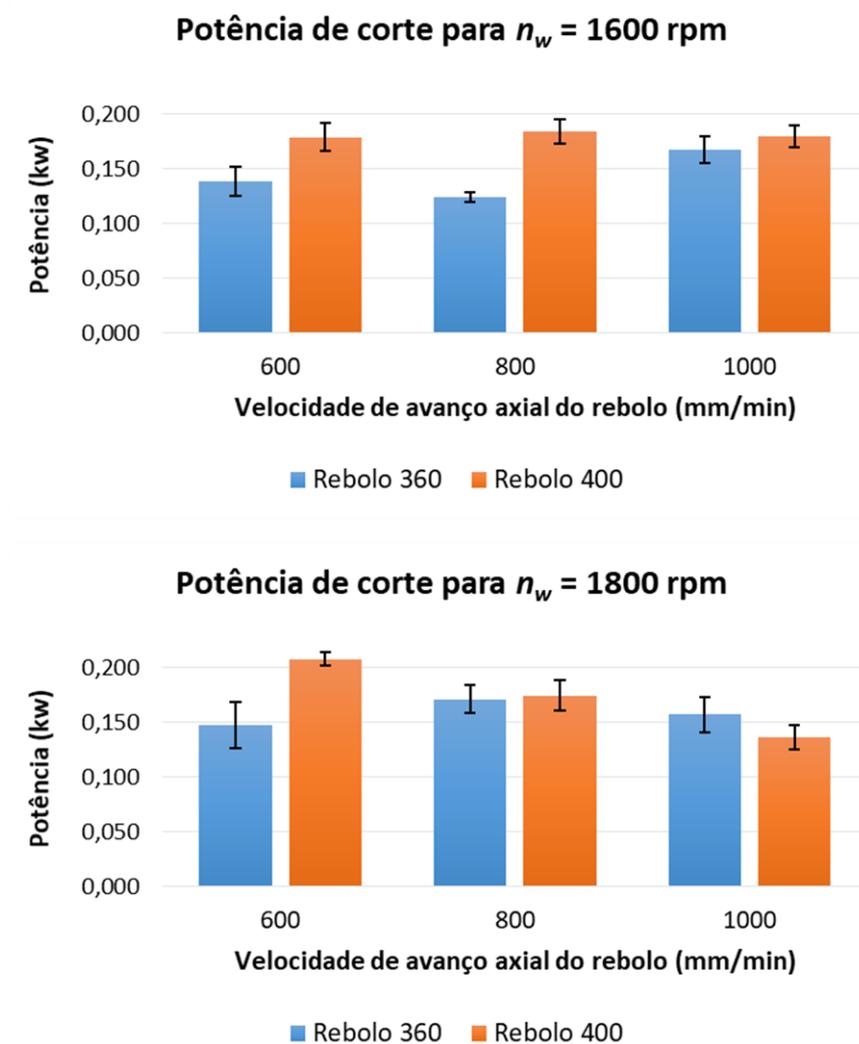
Segundo DAI *et al.* (2018), com o aumento do volume de material removido por unidade de tempo a potência de retificação aumenta. Para os pesquisadores, tal fato é principalmente ocasionado devido à pressão aumentada na zona de contato entre a peça e a ferramenta quando a velocidade do rebolo de cBN se torna muito mais alta, o que faz com que mais energia seja consumida.

No estudo de KWAK *et al.* (2006), a potência de retificação consumida durante o processo de retificação externa aumentou com o aumento da velocidade da peça e da velocidade transversal do rebolo. Assim como mostrado nos gráficos da Figura 38, os resultados dos ensaios não demonstraram o mesmo padrão para o aumento da rotação da peça e da velocidade de avanço axial do rebolo na retificação interna.

Os valores da potência de corte consumida em função da rotação da peça para diferentes velocidades de avanço axiais da ferramenta são listadas nos gráficos da Figura 38.

Figura 38 - Gráficos das medições da potência de corte em relação a variação da velocidade de avanço axial da ferramenta - Intervalo de Confiança de 95%





Fonte: Autor

Ao analisar os gráficos da Figura 38 nota-se que em 1400 rpm os rebolos demonstraram consumo similar de potência independentemente da velocidade de avanço axial adotada, contudo em 1600 e 1800 rpm são notórias algumas diferenças no consumo de potência entre os rebolos pesquisados. Além disso, o rebolo 400 apresentou tendência de redução da potência consumida com a peça em 1800 rpm quando aumentado a velocidade de avanço axial da ferramenta.

Nos gráficos também é possível observar uma leve tendência de diminuição da potência no rebolo com granulometria 400 quando fixado 1800 rpm na peça e aumentado os valores da velocidade de avanço axial da ferramenta. Por outro lado, nas rotações de 1400 e 1600 rpm a variação de avanço axial da ferramenta exerceu pouca influência no consumo de potência medido.

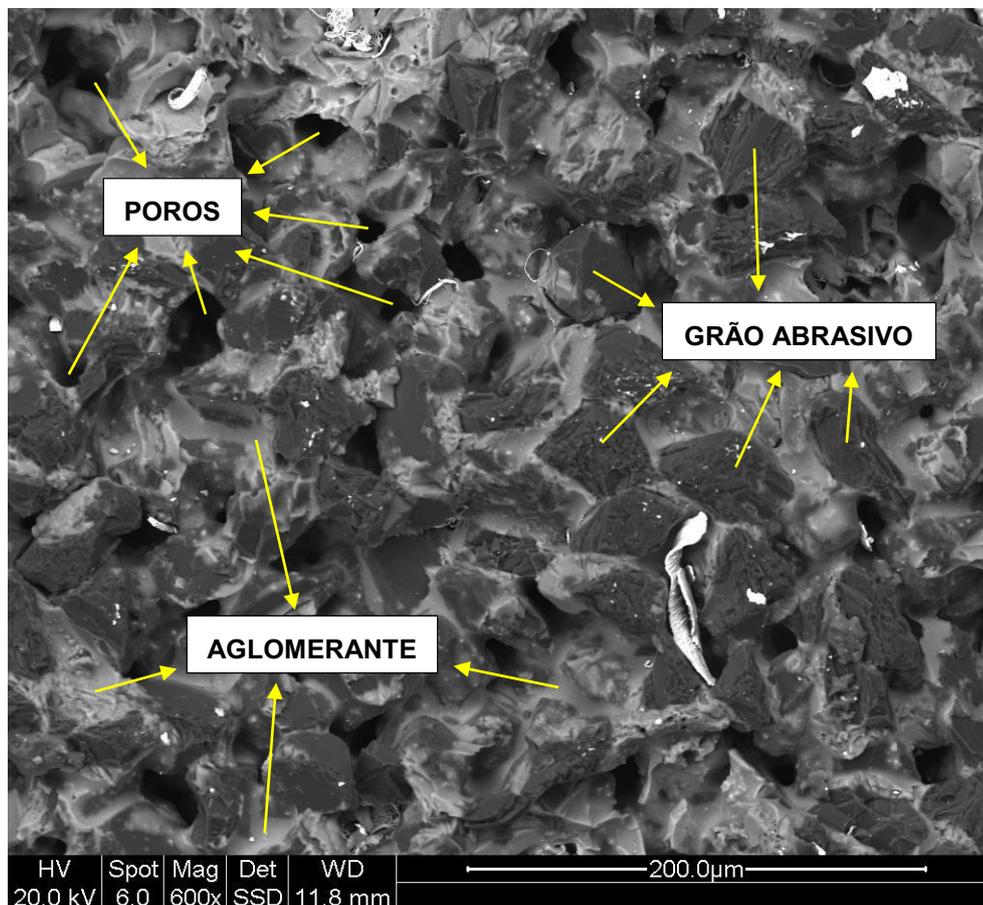
A combinação da maior rotação da peça (1800 rpm) com a menor velocidade de avanço axial da ferramenta (600 mm/min) no rebolo de granulometria 400, culminou no maior consumo de potência. Em contrapartida, no rebolo de granulometria 360 as altas rotações da peça reduzem o consumo de potência. O tamanho do grão abrasivo exerce influência na potência de retificação consumida, tamanhos de grãos comparativamente maiores como os do rebolo 360 apresentam um sistema tribológico oportuno para menores valores de potência. Isso se deve a menor área real de contato entre o rebolo e a peça.

A relação entre tamanho de grão e potência de retificação também foi encontrada no estudo de CHEN *et al.* (1999). Os autores concluíram que o consumo de energia também é influenciado pelo tamanho dos cavacos, sendo que, quanto menor for o cavaco, mais energia é necessária para a mesma quantidade de remoção de material. Este é o chamado efeito de tamanho. Quando o número de arestas de corte na superfície do rebolo aumenta, o tamanho do cavaco diminui e as proporções de corte e de energia de deslizamento são alteradas. Isso faz com que os grãos pareçam relativamente cegos em termos de força e potência de retificação. Portanto, espera-se que a força e a potência de retificação aumentem devido ao efeito do tamanho.

4.5 Análise do desgaste dos rebolos

A Figura 39 ilustra a estrutura do rebolo de cBN em uma imagem feita pelo MEV. Tanto para o rebolo com especificação de granulometria 360 quanto para o com especificação 400, os poros são caracterizados pela cor preta, os grãos abrasivos pela cor cinza escuro e o aglomerante pelo cinza mais esbranquiçado. Notadamente a proporção de grãos abrasivos é consideravelmente maior que a de poros e de material aglomerante.

Figura 39 - Estrutura do rebolo de cBN com especificação de granulometria 400 após a retificação da última peça do ensaio 13 ($n_w = 1400$ rpm e $V_{fa} = 800$ mm/min) - aumento de 600x



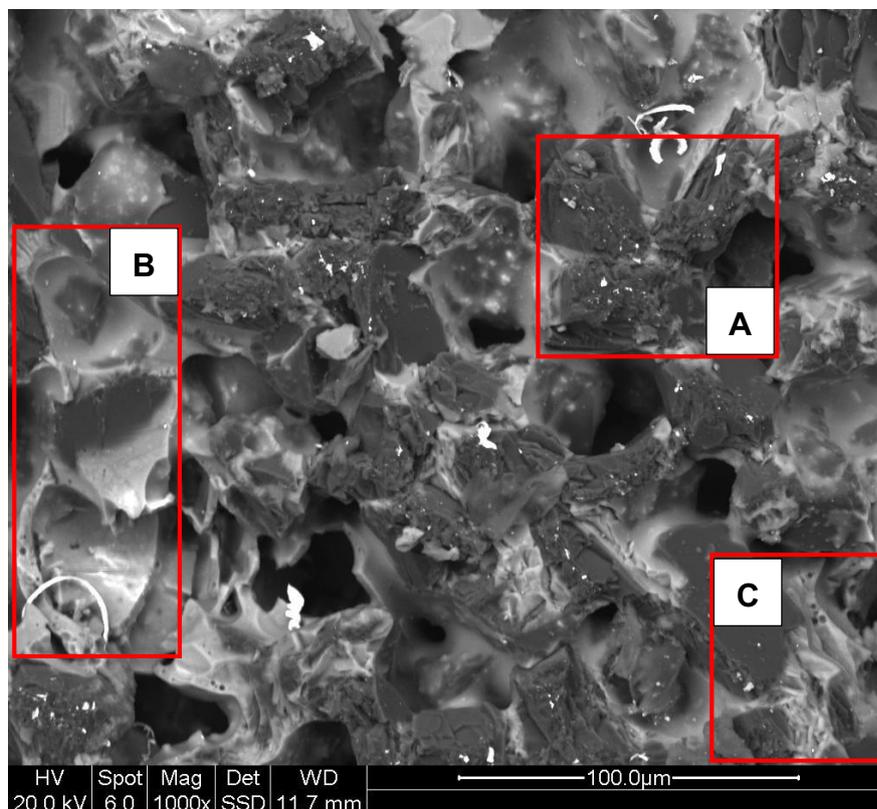
Fonte: Empresa parceira

A análise no microscópio eletrônico de varredura dos rebolos utilizados nos ensaios de retificação visa observar e discutir os mecanismos de desgaste ocorridos e se há ou não presença de material da peça impregnado na estrutura do rebolo.

Tais informações permitem realizar inferências sobre a influência dos parâmetros de corte adotados nos diferentes rebolos nas saídas medidas após as operações de retificação.

Três mecanismos de desgaste que contribuem para o desgaste do rebolo são identificados na Figura 40 e descritos como: fratura de grãos abrasivos devido a cargas de choque mecânico e térmico (A); fratura na interface entre o grão abrasivo e a ponte de ligação (B); fratura de pontes de ligação (C). Os três mecanismos de desgaste foram encontrados em ambos rebolos ensaiados, contudo, a fratura das partículas abrasivas de cBN foi prevaiente em todos os testes.

Figura 40 - Imagens no MEV do rebolo com especificação de granulometria 400 após a retificação da última peça do ensaio 11 ($n_w = 1600$ rpm e $V_{fa} = 1000$ mm/min) – aumento de 1000x

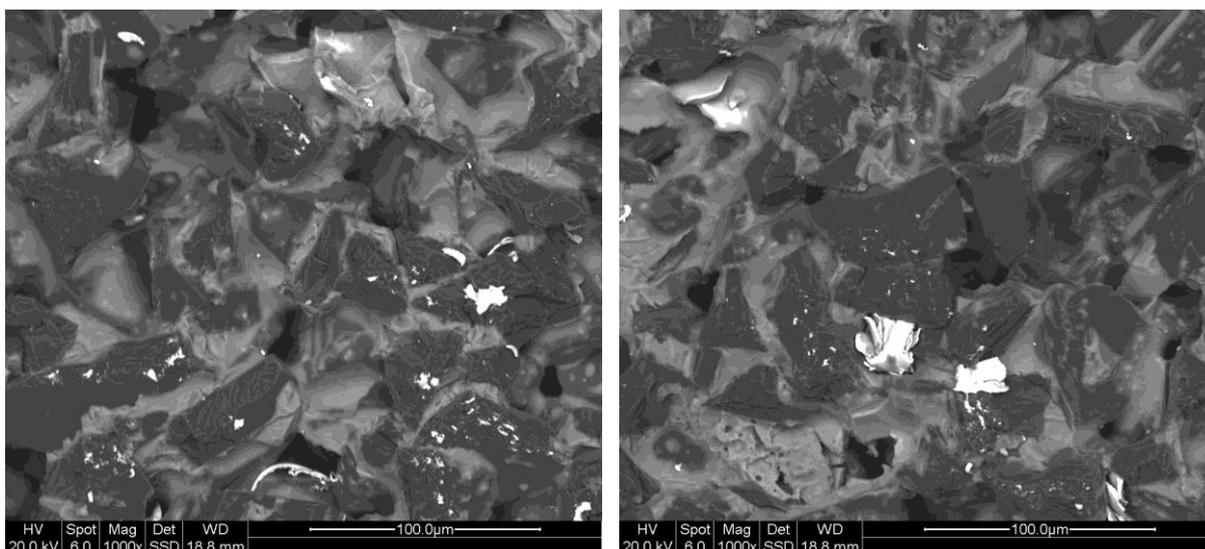


Fonte: Empresa parceira

Na Figura 41 é possível observar que no processo de retificação ocorreu predominantemente o desgaste por fratura de grãos, ou seja, os grãos abrasivos sofreram desgaste pelo próprio corte. Este mecanismo de desgaste é esperado para o rebolo estudado quando empregado em condições favoráveis, pois denota a friabilidade do rebolo de cBN, isto é, a capacidade do material abrasivo de fraturar quando o gume de corte do grão se desgastar, expondo assim um novo gume afiado (LOPES *et al.*, 2019). Os rebolos com baixa friabilidade tendem a ficar opacos. Os grãos então começam a deslizar sobre a superfície da peça, aumentando o atrito, o que produz vibrações e calor excessivos que podem eventualmente danificar tanto a peça quanto a ferramenta. Por outro lado, grãos com alta friabilidade se desgastam muito rapidamente, encurtando a vida útil das ferramentas, aumentando os custos operacionais (STEPHENSON & AGAPIOU, 2016). Tal situação corrobora com o estudo de HERMAN & KRZOS (2009), no qual concluem que o processo de retificação deve ser realizado sob as condições do chamado desgaste de resistência,

possibilitando que os rebolos sejam autoafiados. Como descrito anteriormente, o processo de autoafiação depende do nível de cargas termomecânicas no processo de retificação e do mecanismo de desgaste dos grãos abrasivos ativos.

Figura 41 - Imagens no MEV do rebolo com especificação de granulometria 360 após a retificação da última peça do ensaio 8 ($n_w = 1800$ rpm e $V_{fa} = 1000$ mm/min) – aumento de 1000x

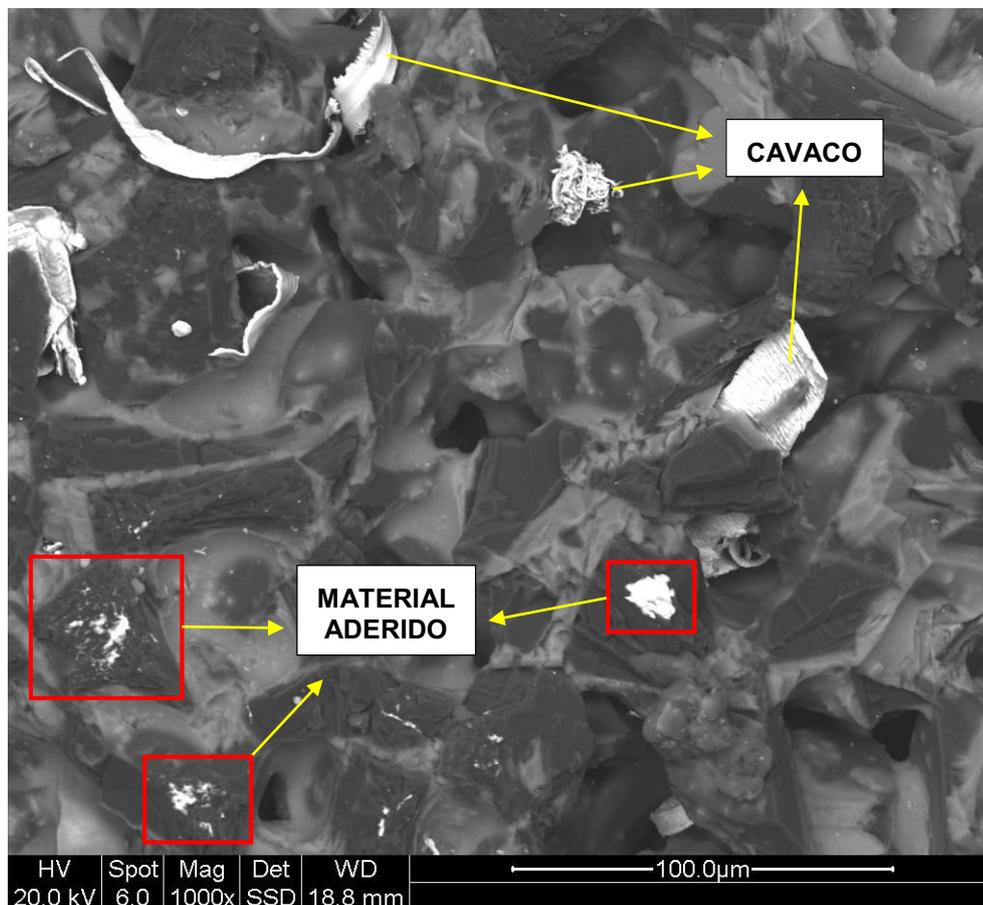


Fonte: Empresa parceira

Assim como nos experimentos das pesquisas de WANG (2018) e JACKSON (2007), a fratura ou lascamento do grão de cBN foi impulsionado principalmente pelas tensões de tração durante as operações de retificação. Todavia, a Figura 41 mostra também resquícios de material da peça impregnados no rebolo. Isso deve-se à deformação plástica do material de base somado ao seu arrastamento durante o processo de corte. Este cenário também foi notado por BILHA (2015) no estudo do rebolo de cBN na retificação interna do mesmo aço. Alguns poucos cavacos permeados nos poros do rebolo são aceitáveis para o processo de retificação cilíndrica interna, visto que material removido da peça pode não ser totalmente removido do furo e do próprio rebolo pelo sistema de lubri-refrigeração. Em contrapartida, o material aderido no grão abrasivo caracteriza desgaste por fadiga do cBN, traduzido principalmente pelo arrastamento de material mencionado anteriormente.

A Figura 42 exemplifica e ilustra os cavacos e o material da peça aderido no rebolo após a operação de retificação.

Figura 42 - Imagens no MEV do rebolo com especificação de granulometria 360 após a retificação da última peça do ensaio 7 ($n_w = 1800$ rpm e $V_{fa} = 800$ mm/min) – aumento de 1000x



Fonte: Empresa parceira

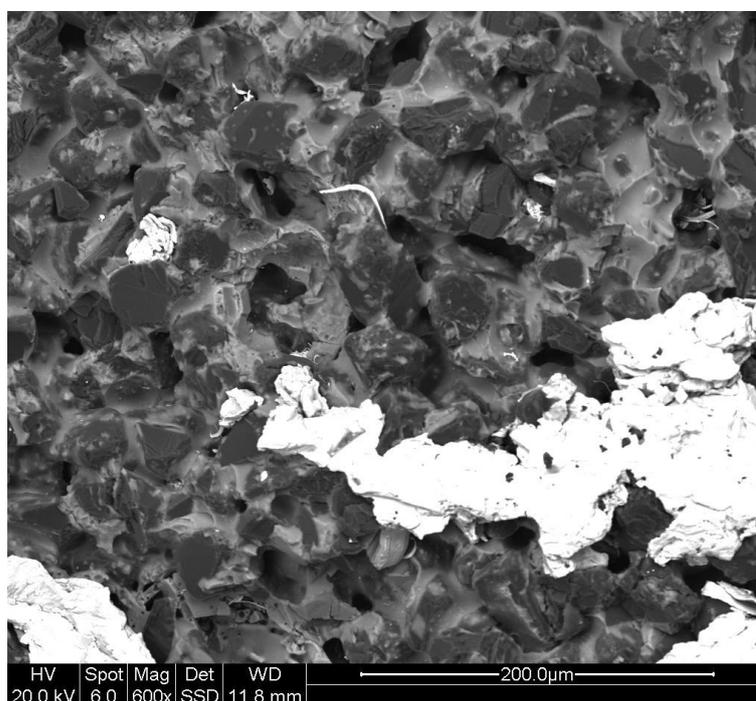
A forma dos cavacos identificados na Fig. 42 caracterizam um corte dúctil, o que não é comum para uma liga endurecida. Assim, assume-se que tal situação denota uma condição de corte muito boa pois, mesmo com a alta dureza do material, a escolha dos parâmetros e dos métodos de retificação favoreceram a formação deste tipo de cavaco.

Os rebolos de cBN utilizados nesse estudo possuem uma estrutura muito fechada, ou seja, a proporção de poros em relação a quantidade de aglomerante e grãos abrasivos é muito pequena. Isso deve-se ao fato do rebolo ter dimensões muito pequenas e ter que garantir partículas abrasivas suficientes para realizar o trabalho solicitado no processo, além de entregar peças retificadas com valores baixos de rugosidade e erros geométricos. Com isso, a estrutura não é aberta o suficiente para permitir a liberação completa dos cavacos e a introdução eficaz de fluido lubrificante no rebolo. Essa situação acaba exigindo mais atenção à escolha do tipo

e da metodologia de aplicação deste fluido, pois essa condição em procedimentos de retificação cilíndrica interna de furos com pequenas dimensões, por vezes, se torna o fator limitante do processo.

Durante a operação de retificação no interior do furo, o material removido da peça que não é retirado do ambiente de usinagem pelo fluido pode aderir a superfície do rebolo (Fig. 43) diminuindo sua eficiência, refletindo principalmente na qualidade da superfície da peça, este efeito é chamado de empastamento.

Figura 43 - Imagens no MEV do rebolo com especificação de granulometria 400 após a retificação da última peça do ensaio 12 ($n_w = 1600$ rpm e $V_{fa} = 600$ mm/min) – aumento de 1000x



Fonte: Empresa parceira

O desgaste observado nos rebolos não interferiu de forma significativa nos resultados dos ensaios propostos pelo escopo desta pesquisa. Isso deve-se a alta frequência de dressagem adotada durante os testes de retificação. Tal fato tende a mitigar os efeitos do desgaste do rebolo sobre os parâmetros estudados.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista a realização da análise experimental referente à influência da granulometria de rebolos de cBN vitrificados em diferentes rotações da peça (n_w) e velocidades de avanço axiais (V_{fa}) na retificação cilíndrica interna do aço 18CrNi8, e seguindo a metodologia apresentada bem como os resultados expostos, é possível concluir que:

- O rebolo com especificação de granulometria 400 apresentou peças com resultados dimensionais mais estáveis com a variação dos parâmetros propostos pela pesquisa. Além disso, obteve melhor qualidade dimensional do diâmetro em velocidades de avanço axiais maiores.
- O erro geométrico de circularidade teve alterações pouco relevantes em ambas especificações de granulometria analisadas, independentemente das diferentes combinações de rotações da peça e velocidades de avanço axiais do rebolo adotadas pelo escopo desta pesquisa. Ademais, os ensaios do erro de circularidade retornaram valores de intervalo de confiança que impossibilitaram associar diferenças estatísticas entre os resultados dos rebolos.
- O rebolo com especificação de granulometria 360 demonstrou tendência de aumento do erro de paralelismo tanto com o aumento da rotação da peça quanto com o da velocidade de avanço axial da ferramenta. Para as mesmas condições o rebolo com especificação 400 se mostrou estatisticamente estável, obtendo valores médios mais baixos.
- Para a combinação mais alta entre a rotação da peça e a velocidade de avanço axial do rebolo sugeridas pela pesquisa ($n_w = 1800$ rpm e $V_{fa} = 1000$ mm/min) o erro de retitude demonstrou a maior diferença entre as duas granulometrias estudadas, onde o rebolo com especificação de granulometria 400 obteve peças com resultados médios de retitude 58% menores que as peças oriundas da retificação realizada com o rebolo com especificação de granulometria 360. Nos resultados de retitude provenientes das demais variações de parâmetros propostos não houve diferenças estatísticas entre os rebolos.
- Os resultados de rugosidade, assimetria e curtose não apresentaram diferenças significativas para ambos os rebolos estudados bem como para as diferentes rotações da peça e velocidades de avanço axiais analisadas.

- A potência de corte foi mais elevada para a maioria dos ensaios com o rebolo com especificação de granulometria 400. Contudo, apresentou leve tendência de queda com o aumento da velocidade de avanço axial da ferramenta com a rotação da peça em 1800 rpm.
- Observou-se que o desgaste dos rebolos ocorreu predominantemente por fratura de grãos. Além disso, o desgaste não interferiu de forma significativa nos resultados devido à alta frequência de dressagem adotada durante os testes de retificação.
- No âmbito geral, o rebolo com especificação de granulometria 400 obteve melhores resultados e comportamento mais estável em comparação com o rebolo com especificação de granulometria 360.

Como oportunidades para trabalhos futuros são apresentadas as seguintes sugestões:

- Analisar a integridade da superfície e os danos térmicos após a retificação interna de bicos injetores de combustível para motores a diesel;
- Verificar a influência da frequência de dressagem sobre os erros geométricos das peças na retificação interna;
- Pesquisar a influência dos parâmetros de corte nas vibrações durante a retificação interna.

REFERÊNCIAS

ALVES, M. C. S.; Bianchi, E. C.; Aguiar, P. R. & Catai, R. E. Influência na qualidade final de metais retificados através da variação da velocidade de mergulho. Rem: **Rev. Esc. Minas [online]**. 2009, vol.62, n.1, pp.65-71. ISSN 0370-4467.

ANDRETTA, Jakson M. **Análise do erro de forma na retificação interna de assentos de bicos injetores**. 2012. 152 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2012.

ARANTES, L., Polli, M. (2019). Analysis of the geometric errors in external cylindrical grinding of 100cr6 steel with seeded-gel and cBN grinding wheels in high peripheral speeds. **25th ABCM International Congress of Mechanical Engineering**. October 20-25, 2019, Uberlândia, MG, Brazil.

ARANTES, L., Polli, M. (2020). Performance comparison of seeded-gel and cBN grinding wheels for cylindrical plunge grinding of 100Cr6 steel. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, 42:596.

ARANTES, Luciano de O. **Desempenho de rebolos de seeded-gel e cBN na retificação cilíndrica externa de mergulho em altas velocidades periféricas no aço 100Cr6**. 2019. 110 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Grandezas básicas em usinagem e retificação. Parte 1: Geometria da parte cortante das ferramentas de corte – Termos gerais, sistemas de referência, ângulos da ferramenta e de trabalho e quebra-cavacos ABNT (NBR ISO 3002-1)**. Rio de Janeiro: 2013, 70p.

ATLANTIC ABRASIVOS. Disponível em: <<https://www.atlantic-rebolos-abrasivos.pt/processos-de-retificacao/retificacao-cilindrica-interna/>>. Acesso em: 11 de jun. de 2020.

AZIZI, A., Rezaei, S. M., & Rahimi, A. (2009). Study on the rotary cup dressing of cBN grinding wheel and the grinding performance. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 47(9-12), 1053–1063.

BELENTANI, R. de M., Funes Júnior, H., Canarim, R. C., Diniz, A. E., Hassui, A., Aguiar, P. R., & Bianchi, E. C. (2013). Utilization of minimum quantity lubrication (MQL) with water in cBN grinding of steel. **Materials Research**, 17(1), 88–96.

BHUSHAN, B. **Introduction to tribology**. 2nd ed.; Hoboken, NJ: Wiley. 2013. ISBN 978-1-119-94453-9.10.1002/9781118403259

BIANCHI, E. C., Fernandes, O. C., Valarelli, I. D. D., Silva, E. J., Xavier, A. P., Spinelli, J. E., Neves, R. C., Monici R. D., Cagnin, A. R., Souza, G. F., Alves, A. S. A "Contribuição dos Rebolos Superabrasivos com Ligantes Resinóide e Vitrificado". **Máquinas e Metais**. Ano XXXV, No 398. Março de 1999. p. 88 - 113. ISSN - 0025-2700.

BIANCHI, E. C., Monici, R. D., Silva, E. J. da, Aguiar, P. R. de, & Valarelli, I. D. D. (2000). Análise do comportamento da microestrutura de materiais endurecidos retificados com rebolos de cBN. **Materials Research**, 3(4), 147–154.

BILHA, Vitor M. **Análise do processo de retificação interna aplicado à fabricação de bicos injetores diesel**. 2015. 155 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

BRINKSMEIER, E., Heinzl, C., & Wittmann, M. (1999). Friction, Cooling and Lubrication in Grinding. **CIRP Annals**, 48(2), 581–598.

CAI, R., & Rowe, W. B. (2004). Assessment of vitrified cBN wheels for precision grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, 44(12-13), 1391–1402.

CAI, R., Rowe, W. B., & Morgan, M. N. (2003). The Effect of Porosity on the Grinding Performance of Vitrified cBN Wheels. **Key Engineering Materials**, 238-239, 295–300.

CAMPBELL, J. D., Optimized coolant application. In: 1st International Machining and Grinding Conference, Technical Paper, MR95-211, **Society of Manufacturing Engineers**, 12- 14 September, Dearborn, Michigan, 1995, p. 895-904

CAMPBELL, J.D., 1993, An Investigation of the Grinding Fluid Film Boiling Limitation, **Transactions of the 5th International Grinding Conference**, Cincinnati, Ohio, USA, 26.-28. Oktober

CHAGAS, Shirlene. **Desenvolvimento de compósitos a base de nitreto cúbico de boro com matriz de nitreto de silício para produção de ferramentas**. 2012. 227 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes, 2012.

CHANG L, Jeng Y. (2013). Effects of negative skewness of surface roughness on the contact and lubrication of nominally flat metallic surfaces. **Journal of Engineering Tribology, Part J of the Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (IMEchE)** 227(6):559–569.

CHEN, X., & Brian Rowe, W. (1996). Analysis and simulation of the grinding process. Part II: Mechanics of grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, 36(8), 883–896.

CHEN, X., Rowe, W. B., & Cai, R. (2002). Precision grinding using cBN wheels. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, 42(5), 585–593.

CHEN, X., Rowe, W. B., Allanson, D. R., & Mills, B. (1999). A Grinding Power Model for Selection of Dressing and Grinding Conditions. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, 121(4), 632.

CHI, Long-Zhn; Lee, Sang-Jin; Park, Hoo-Myung; Oh, Sang-Lok; Ha, Man-Kyung. (2004). Effect of Change of Grinding Force on Geometric Error. **Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers**. Volume 3, Issue 2, Pages.10-17.

COGORNO G., **Geometric Dimensioning and Tolerancing for Mechanical Design: A Self-Teaching Guide to ANSI Y 14.5M1982 and ASME Y 14.5M1994 Standards**. 1st ed.; McGraw-Hill Mechanical Engineering. USA, 2006.

D'YAKONOV, A. A. (2014). Capabilities of internal-grinding wheels. **Russian Engineering Research**, 34(12), 781–784.

DAI, C.-W., Ding, W.-F., Zhu, Y.-J., Xu, J.-H., & Yu, H.-W. (2018). Grinding temperature and power consumption in high speed grinding of Inconel 718 nickel-based superalloy with a vitrified cBN wheel. **Precision Engineering**, 52, 192–200.

DANESHI, A., Jandaghi, N., & Tawakoli, T. (2014). Effect of Dressing on Internal Cylindrical Grinding. **Procedia CIRP**, 14, 37–41.

DIAS, Bruno J., José F. Meireles, Luís Matias, and Richard Alves (2009). Cylindrical parts circularity affectation by the grinding machine dynamic behaviour. **7th EUROMECH Solid Mechanics Conference**. Lisbon, Portugal. 1-7.

DIN 8589: **Fertigungsverfahren Spanen**, editor Deutscher Normenausschuss, Edition March 1978

DING W, Dai C, Yu T, Xu J, Fu Y. (2017) Grinding performance of textured monolayer cBN wheels: undeformed chip thickness nonuniformity modeling and ground surface topography prediction. **International Journal of Machine Tools and Manufacture** 122:66–80.

DING, W., Linke, B., Zhu, Y., Li, Z., Fu, Y., Su, H., & Xu, J. (2017). Review on monolayer cBN superabrasive wheels for grinding metallic materials. **Chinese Journal of Aeronautics**, 30(1), 109–134.

EBBRELL, S., Woolley, N., Tridimas, Y., Allanson, D., & Rowe, W. (2000). The effects of cutting fluid application methods on the grinding process. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, 40(2), 209–223.

EDELSTAHL WITTEN-KREFELD GMBH – CARBODUR Case-hardening steels.

FERNANDES, L. M., Lopes, J. C., Volpato, R. S., Diniz, A. E., de Oliveira, R. F. M., de Aguiar, P. R., Bianchi, E. C. (2018). Comparative analysis of two cBN grinding wheels performance in nodular cast iron plunge grinding. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 98(1-4), 237–249.

FUSSE, R. Y., França, T. V., Catai, R. E., Silva, L. R. da, Aguiar, P. R. de, & Bianchi, E. C. (2004). Analysis of the cutting fluid influence on the deep grinding process with a cBN grinding wheel. **Materials Research**, 7(3), 451–457.

GROOVER, Mikell. P. **Introdução aos Processos de Fabricação**. 1. ed. LTC, 2014. 758 p. ISBN: 9788521625193.

GUO, C., Shi, Z., Attia, H., & McIntosh, D. (2007). Power and Wheel Wear for Grinding Nickel Alloy with Plated cBN Wheels. **CIRP Annals**, 56(1), 343–346.

GUO, C., Wu, Y., Varghese, V., & Malkin, S. (1999). Temperatures and Energy Partition for Grinding with Vitrified cBN Wheels. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, 48(1), 247–250.

HAHN, R. S. (1964). Controlled-Force Grinding—A New Technique for Precision Internal Grinding. **Journal of Engineering for Industry**, 86(3), 287.

HAMDI, H., Dursapt, M., & Zahouani, H. (2003). Characterization of abrasive grain's behavior and wear mechanisms. **Wear**, 254(12), 1294–1298.

HERMAN, D., & Krzos, J. (2009). Influence of vitrified bond structure on radial wear of cBN grinding wheels. **Journal of Materials Processing Technology**, 209(14), 5377–5386.

HITCHINER, M.P., 1999, "Technological Advances in Creep Feed Grinding of Super alloys with cBN", **3rd International Machining and Grinding Conference SME**, Cincinnati, Ohio, October 4-7

HOFFMANN, K. - H., et al. Das Common Rail Einspritzsystem – **Einneues Kapitel der Dieseleinspritz - Technologie**. Motortechnische Zeitschrift, n. 10, p. 576-583. [S.I.], 1997.

HOLTERMANN, R., Schumann, S., Menzel, A., & Biermann, D. (2013). Modelling, simulation and experimental investigation of chip formation in internal traverse grinding. **Production Engineering**, 7(2-3), 251–263.

HUTCHINGS, I., Shipway, P., **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. Elsevier, 2017. ISBN: 978-0-08-100910-9

INASAKI, I. (1991). Monitoring and Optimization of Internal Grinding Process. **CIRP Annals**, 40(1), 359–362.

JACKSON, M. J., & DAVIM, J. P. (Eds.). (2011). **Machining with Abrasives**. Springer Science, LLC 2011.

JACKSON, M. J., Davis, C. J., Hitchiner, M. P., & Mills, B. (2001). High-speed grinding with cBN grinding wheels — applications and future technology. **Journal of Materials Processing Technology**, 110(1), 78–88.

JACKSON, MJ. (2007) Modelling of fracture wear in vitrified cBN grinding wheels. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**, 24:230–236

JAPANESE STANDARDS ASSOCIATION. **Abrasives, bonded abrasive products and coated abrasives -- Terms and marks (JIS R 6004:2010)**. Japan. 2010.

JAPANESE STANDARDS ASSOCIATION. **Bonded abrasive products - Dimensions - Part 3: Grinding wheels for internal cylindrical grinding (JIS R 6211-3:2003)**. Japan. 2020.

JAPANESE STANDARDS ASSOCIATION. **Recommendation of grinding wheels (JIS B 4051:2008)**. Japan. 2008.

JEDRZEJEWSKI J., Modrzycki W. (1997). Intelligent supervision of thermal deformations in high precision machine tools. **Proc. 32nd International Matador Conference**, Manchester, UK, 1997, pp. 457–462.

JÜRGENHAKE, B. Untersuchungen zur Technologie und Dynamik des Innenrundschleifens. Fertigungstechnische Berichte, Band 13 – Innenrundschleifen. **Hannover: Resch Verlag**, 1979.

KING, R. I. & Hahn, R. S., **Handbook of modern grinding technology**. 3. ed. New York: Chapman and Hall, 1986.

KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 2 – Grinding, honing, lapping**, (RWTH Edition); Translator A. Kuchle. Springer, 2009; ISBN 978-3-540-92258-2.

KLOCKE, F., Brinksmeier, E., & Weinert, K. (2005). Capability Profile of Hard Cutting and Grinding Processes. **CIRP Annals**, 54(2), 22–45.

KLOCKE, F., Engelhorn, R., Mayer, J., & Weirich, T. (2002). Micro-Analysis of the Contact Zone of Tribologically Loaded Second-Phase Reinforced Sol-Gel-Abrasives. **CIRP Annals**, 51(1), 245–250.

KÖHLER, J. (2014). Grinding Parameters. **CIRP Encyclopedia of Production Engineering**, 597–601.

KOPAC, J., & Krajnik, P. (2006). High-performance grinding—A review. **Journal of Materials Processing Technology**, 175(1-3), 278–284.

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.

KUNDRAK J., Gyani K., Bana V. (2008). Roughness of ground and hard-turned surfaces on the basis of 3D parameters. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 38:110–119.

KWAK, J.-S. (2005). Application of Taguchi and response surface methodologies for geometric error in surface grinding process. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, 45(3), 327–334.

KWAK, J.-S., Sim, S.-B., & Jeong, Y.-D. (2006). An analysis of grinding power and surface roughness in external cylindrical grinding of hardened SCM440 steel using the response surface method. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, 46(3-4), 304–312.

LAVINE, A. S., Malkin, S., & Jen, T. C. (1989). Thermal Aspects of Grinding with cBN Wheels. **CIRP Annals**, 38(1), 557–560.

LI, W., Winter, M., Kara, S., & Herrmann, C. (2012). Eco-efficiency of manufacturing processes: A grinding case. **CIRP Annals**, 61(1), 59–62.

LI, X., Naghdy, F., & Cook, C. (n.d.). Monitoring of wheel dressing operations for precision grinding. 2002 IEEE **International Conference on Industrial Technology**, 2002. IEEE ICIT '02.

LOPES, J. C., de Martini Fernandes, L., Domingues, B. B., Canarim, R. C., da Penha Cindra Fonseca, M., de Angelo Sanchez, L. E., ... Bianchi, E. C. (2019). Effect of cBN grain friability in hardened steel plunge grinding. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**.

MACHADO, A. R.; Abrão, A. M.; Coelho, R. T.; da Silva, M. B., 2009, **Teoria da Usinagem dos Materiais**, 1ª Edição, São Paulo: Editora Edgard Blücher, 371 pgs, ISBN 978-85-212-0452-7.

MALKIN, S.; Guo, C. **Grinding technology: theory and application of machining with abrasives**. Industrial Press Inc. 2^a ed. New York. 2008.

MARINESCU, I. D.; Hitchiner, M.; Uhlmann, E.E.; Brian Rowe, W.; Inasaki, I. **Handbook of machining with grinding wheels**, 1st ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2007.

MARINESCU, L.D., Rowe, W. B. Dimitrov, B. Inasaki, I., 2004. **Tribology of Abrasive Machining Processes**, Andrew William Editions, ISBN 0-8155-1490-5.

MONICI, R. D., Bianchi, E. C., Catai, R. E., & de Aguiar, P. R. (2006). 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 and Manufacture**, 46(2), 122–131.

NADOLNY, K. (2013). A review on single-pass grinding processes. **Journal of Central South University**, 20(6), 1502–1509.

NADOLNY, K., & Słowiński, B. (2011). The Effects of Wear upon the Axial Profile of a Grinding Wheel in the Construction of Innovative Grinding Wheels for Internal Cylindrical Grinding. **Advances in Tribology**, 2011, 1–11.

NOMURA, M., Wu, Y. B., Kato, M., & Kuriyagawa, T. (2005). Effects of Ultrasonic Vibration in Truing and Dressing of cBN Grinding Wheel Used for Internal Grinding of Small Holes. **Key Engineering Materials**, 291-292, 183–188.

OH, S. H., & So, B. (2012). Internal Grinding Characteristics with Ceramic and cBN in Nitriding Treated Steel. **Computer Applications for Modeling, Simulation, and Automobile**, 271–275.

OLIVEIRA, J. F. G., Silva, E. J., Guo, C., & Hashimoto, F. (2009). Industrial challenges in grinding. **CIRP Annals**, 58(2), 663–680.

OLIVEIRA, João F. G. **Tópicos avançados sobre o processo de retificação**. Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos (Departamento de Engenharia Mecânica), Laboratório de Máquinas Ferramentas, 2001. (Apostila).

PALMER, J., Curtis, D., Novovic, D., & Ghadbeigi, H. (2018). The Influence of Abrasive Grit Morphology on Wheel Topography and Grinding Performance. **Procedia CIRP**, 77, 239–242.

PEREVERZEV, P. P., & Akintseva, A. V. (2015). Automatic Cycles Multiparametric Optimization of Internal Grinding. **Procedia Engineering**, 129, 121–126.

POPOVA, A. V. (2015). Design of optimal internal-grinding cycles. **Russian Engineering Research**, 35(5), 378–380.

ROWE, W. B., **Modern Grinding Techniques**, Scrivener Publishing LLC. 2010. ISBN 978-0-470-88231-3.

ROWE, W. B., **Principles of Modern Grinding Technology**. Elsevier Inc. 2^a ed. Massachusetts. 2008. ISBN: 978-0-323-24271-4.

SALJÉ, E., Matsuo, T., & Lindsay, R. P. (1982). Transfer of Grinding Research Data for Different Operations in Grinding. **CIRP Annals**, 31(2), 519–527.

SALMON, S. C. **Modern grinding process technology**. McGraw-Hill, 1992, 225p.

SARAVANAKUMAR, A., Dhanabal, S., Jayanand, E., & Logeshwaran, P. (2018). Analysis of Process Parameters in Surface Grinding Process. **Materials Today: Proceedings**, 5(2), 8131–8137.

SEDLAČEK M., Gregorčič P., Podgornik B. (2017). Use of the roughness parameters Ssk and Sku to control friction—a method for designing surface texturing. **Tribology Transactions**. 60(2):260–266.

SELLGREN, Ulf. (2020). UVA U88 NMA grinding machine-Thermoelastic modeling and simulation.

SELVAKUMARAN, D., Arunachalam, N., Vijayaraghavan, L., & Balan, A. S. S. (2018). “Performance Comparison of Sol-gel with White Alumina Abrasives for Grinding of Super Duplex Stainless Steel (SDSS).” **Procedia Manufacturing**, 26, 1448–1458.

SHAW, Milton C., **Principles of Abrasive Processing**. Clarendon Press. Oxford. 1996. ISBN 0-19-859021-0.

SHI, Z., & Malkin, S. (2006). Wear of Electroplated cBN Grinding Wheels. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, 128(1), 110.

SHIZHU, W., Ping, H., **Principles of tribology**, John Wiley & Sons, Singapore. 2012. ISBN 978-1-118-0 6289-0

SILVA, E. J., Bianchi, E. C., de Oliveira, J. F. G., & de Aguiar, P. R. (2003). Evaluation of grinding fluids in the grinding of a martensitic valve steel with cBN and alumina abrasives. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: **Journal of Engineering Manufacture**, 217(8), 1047–1055.

SILVA, Eraldo J. **Análise de estratégias de retificação de virabrequins automotivos forjados utilizando rebolos de cBN vitrificados em altas velocidades**. 2004. 178 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2004.

SINGH, T., Kumar P. and Khushdeep Goyal K. (2014). Optimization of Process Parameters for Minimum Out-of-Roundness of Cylindrical Grinding of Heat Treated AISI 4140 Steel. **American Journal of Mechanical Engineering**, v. 2.2, p. 34- 40.

SMITH, P. L. A killer combination for ideal grinding conditions. **American Machinist**, p. 1 –11, 1998.

SOUZA, C. N. de, Catai, R. E., Aguiar, P. R. de, Salgado, M. H., & Bianchi, E. C. (2004). Analysis of diametrical wear of grinding wheel and roundness errors in the machining of steel VC 131. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, 26(2).

STEPHENSON, DA., Agapiou JS. (2016). Metal cutting theory and practice. **CRC Press**, Taylor & Francis Group.

TARRENTO, Eraldo J. **Retificação por corte interrompido do aço temperado ABNT 4340, com rebole de cBN, utilizando refrigeração abundante e alta velocidade**. 2018. 124 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista. Bauru, 2018.

TAWAKOLI, T., Heisel, U., Lee, D. H., & Daneshi, A. (2012). An Experimental Investigation on the Characteristics of Cylindrical Plunge Dry Grinding with Structured cBN Wheels. **Procedia CIRP**, 1, 399–403.

TAWAKOLI, T., Rasifard, A., & Rabiey, M. (2007). High-efficiency internal cylindrical grinding with a new kinematic. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, 47(5), 729–733.

TIAN, L., Fu, Y., Xu, J., Li, H., & Ding, W. (2015). The influence of speed on material removal mechanism in high speed grinding with single grit. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, 89, 192–201.

TÖNSHOFF, H. K., Peters, J., Inasaki, I., & Paul, T. (1992). Modelling and Simulation of Grinding Processes. **CIRP Annals**, 41(2), 677–688.

TÖNSHOFF, H. K., Rohr, G., & Althaus, P. G. (1980). Process Control in Internal Grinding. **CIRP Annals**, 29(1), 207–211.

TÖNSHOFF, H. K., Wobker, H.-G., & Brunner, G. (1995). cBN Grinding with Small Wheels. **CIRP Annals**, 44(1), 311–316.

UPADHYAYA, R. P., & Malkin, S. (2004). Thermal Aspects of Grinding With Electroplated cBN Wheels. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, 126(1), 107.

VAKSER, D.B., **Vnutrennee shlifovanie (Internal Grinding)**, Leningrad: Mashinostroenie, 1967.

WANG, J., Yu, T., Ding, W., Fu, Y., & Bastawros, A. F. (2018). Wear evolution and stress distribution of single cBN superabrasive grain in high-speed grinding. **Precision Engineering**.

WANG, Jen. P. **Avaliação da retificação com rebolo de cBN vitrificado aplicada em ligas de alto desempenho**. 2008. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2008.

WARNECKE, G., & Zitt, U. (1998). Kinematic Simulation for Analyzing and Predicting High-Performance Grinding Processes. **CIRP Annals**, 47(1), 265–270.

WEGENER, K., Hoffmeister, H.-W., Karpuschewski, B., Kuster, F., Hahmann, W.-C., & Rabiey, M. (2011). Conditioning and monitoring of grinding wheels. **CIRP Annals**, 60(2), 757–777.

YU, T., Bastawros, A. F., & Chandra, A. (2017). Experimental and modeling characterization of wear and life expectancy of electroplated cBN grinding wheels. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, 121, 70–80.

ZAHEDI, A., & Azarhoushang, B. (2017). Microstructuring strategies of cBN grinding wheels. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 91(9-12), 3925–3932.

ZAHEDI, A., Tawakoli, T., Azarhoushang, B., & Akbari, J. (2014). Picosecond laser treatment of metal-bonded cBN and diamond superabrasive surfaces. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 76(5-8), 1479–1491.

ZHEJUN, Y., Zhonghui, H., & Kobayashi, A. (1989). Surface Integrity of Grinding of Bearing Steel GCr15 with cBN Wheels. **CIRP Annals**, 38(1), 553–556.

APÊNDICE – Tabelas com a média dos valores medidos por parâmetro

TABELA COM A MÉDIA DOS VALORES DE DIÂMETRO

DIÂMETRO				
ENSAIO	ESPECIFICAÇÃO DE GRANULOMETRIA	ROTAÇÃO DA PEÇA (rpm)	VELOCIDADE DE AVANÇO AXIAL DO REBOLO (mm/min)	MÉDIA (mm)
1	Rebolo 360	1600	800	0,000441667
2	Rebolo 360	1600	1000	0,001275
3	Rebolo 360	1600	600	0,000975
4	Rebolo 360	1400	800	0,000491667
5	Rebolo 360	1400	1000	0,000908333
6	Rebolo 360	1400	600	0,000675
7	Rebolo 360	1800	800	0,000658333
8	Rebolo 360	1800	1000	0,001166667
9	Rebolo 360	1800	600	0,000416667
10	Rebolo 400	1600	800	0,000416667
11	Rebolo 400	1600	1000	0,000391667
12	Rebolo 400	1600	600	0,000366667
13	Rebolo 400	1400	800	0,000666667
14	Rebolo 400	1400	1000	0,000358333
15	Rebolo 400	1400	600	0,000591667
16	Rebolo 400	1800	800	0,000633333
17	Rebolo 400	1800	1000	0,000391667
18	Rebolo 400	1800	600	0,000783333

TABELA COM A MÉDIA DOS VALORES DE CIRCULARIDADE

CIRCULARIDADE				
ENSAIO	ESPECIFICAÇÃO DE GRANULOMETRIA	ROTAÇÃO DA PEÇA (rpm)	VELOCIDADE DE AVANÇO AXIAL DO REBOLO (mm/min)	MÉDIA (mm)
1	Rebolo 360	1600	800	0,26216667
2	Rebolo 360	1600	1000	0,25927778
3	Rebolo 360	1600	600	0,24438889
4	Rebolo 360	1400	800	0,27572222
5	Rebolo 360	1400	1000	0,23122222
6	Rebolo 360	1400	600	0,22572222
7	Rebolo 360	1800	800	0,21983333
8	Rebolo 360	1800	1000	0,29638889
9	Rebolo 360	1800	600	0,24405556
10	Rebolo 400	1600	800	0,26355556
11	Rebolo 400	1600	1000	0,23027778
12	Rebolo 400	1600	600	0,22466667
13	Rebolo 400	1400	800	0,22677778
14	Rebolo 400	1400	1000	0,23288889
15	Rebolo 400	1400	600	0,23861111
16	Rebolo 400	1800	800	0,23294444
17	Rebolo 400	1800	1000	0,23561111
18	Rebolo 400	1800	600	0,21461111

TABELA COM A MÉDIA DOS VALORES DE PARALELISMO

PARALELISMO				
ENSAIO	ESPECIFICAÇÃO DE GRANULOMETRIA	ROTAÇÃO DA PEÇA (rpm)	VELOCIDADE DE AVANÇO AXIAL DO REBOLO (mm/min)	MÉDIA (mm)
1	Rebolo 360	1600	800	0,75080667
2	Rebolo 360	1600	1000	1,40025167
3	Rebolo 360	1600	600	0,79405333
4	Rebolo 360	1400	800	0,56494583
5	Rebolo 360	1400	1000	1,146875
6	Rebolo 360	1400	600	0,70694
7	Rebolo 360	1800	800	0,80039083
8	Rebolo 360	1800	1000	1,60266
9	Rebolo 360	1800	600	0,51933667
10	Rebolo 400	1600	800	0,37204833
11	Rebolo 400	1600	1000	0,46706
12	Rebolo 400	1600	600	0,54585917
13	Rebolo 400	1400	800	0,71809333
14	Rebolo 400	1400	1000	0,5704575
15	Rebolo 400	1400	600	0,7058725
16	Rebolo 400	1800	800	0,85334917
17	Rebolo 400	1800	1000	0,62240833
18	Rebolo 400	1800	600	0,93968333

TABELA COM A MÉDIA DOS VALORES DE RETITUDE

RETITUDE				
ENSAIO	ESPECIFICAÇÃO DE GRANULOMETRIA	ROTAÇÃO DA PEÇA (rpm)	VELOCIDADE DE AVANÇO AXIAL DO REBOLO (mm/min)	MÉDIA (mm)
1	Rebolo 360	1600	800	0,2268333
2	Rebolo 360	1600	1000	0,2062083
3	Rebolo 360	1600	600	0,1988333
4	Rebolo 360	1400	800	0,23425
5	Rebolo 360	1400	1000	0,25175
6	Rebolo 360	1400	600	0,1766667
7	Rebolo 360	1800	800	0,183125
8	Rebolo 360	1800	1000	0,26975
9	Rebolo 360	1800	600	0,1890417
10	Rebolo 400	1600	800	0,225125
11	Rebolo 400	1600	1000	0,2351667
12	Rebolo 400	1600	600	0,173875
13	Rebolo 400	1400	800	0,2089583
14	Rebolo 400	1400	1000	0,1768333
15	Rebolo 400	1400	600	0,1562917
16	Rebolo 400	1800	800	0,179625
17	Rebolo 400	1800	1000	0,1559167
18	Rebolo 400	1800	600	0,1926667

TABELA COM A MÉDIA DOS VALORES DE RUGOSIDADE

RUGOSIDADE (S_a)				
ENSAIO	ESPECIFICAÇÃO DE GRANULOMETRIA	ROTAÇÃO DA PEÇA (rpm)	VELOCIDADE DE AVANÇO AXIAL DO REBOLO (mm/min)	MÉDIA (μm)
1	Rebolo 360	1600	800	0,027215192
2	Rebolo 360	1600	1000	0,016337584
3	Rebolo 360	1600	600	0,01132843
4	Rebolo 360	1400	800	0,04012792
5	Rebolo 360	1400	1000	0,015392098
6	Rebolo 360	1400	600	0,011030261
7	Rebolo 360	1800	800	0,011575837
8	Rebolo 360	1800	1000	0,015840349
9	Rebolo 360	1800	600	0,012579746
10	Rebolo 400	1600	800	0,00783156
11	Rebolo 400	1600	1000	0,007325754
12	Rebolo 400	1600	600	0,010016653
13	Rebolo 400	1400	800	0,028790913
14	Rebolo 400	1400	1000	0,021494185
15	Rebolo 400	1400	600	0,009626353
16	Rebolo 400	1800	800	0,005560276
17	Rebolo 400	1800	1000	0,009746794
18	Rebolo 400	1800	600	0,000816497

TABELA COM A MÉDIA DOS VALORES DE ASSIMETRIA

ASSIMETRIA (<i>Ssk</i>)				
ENSAIO	ESPECIFICAÇÃO DE GRANULOMETRIA	ROTAÇÃO DA PEÇA (rpm)	VELOCIDADE DE AVANÇO AXIAL DO REBOLO (mm/min)	MÉDIA
1	Rebolo 360	1600	800	-0,303
2	Rebolo 360	1600	1000	-0,20425
3	Rebolo 360	1600	600	-0,19275
4	Rebolo 360	1400	800	-0,181
5	Rebolo 360	1400	1000	-0,209
6	Rebolo 360	1400	600	-0,15925
7	Rebolo 360	1800	800	-0,12875
8	Rebolo 360	1800	1000	-0,0955
9	Rebolo 360	1800	600	-0,15675
10	Rebolo 400	1600	800	-0,11175
11	Rebolo 400	1600	1000	-0,168333
12	Rebolo 400	1600	600	-0,093667
13	Rebolo 400	1400	800	-0,22925
14	Rebolo 400	1400	1000	-0,16175
15	Rebolo 400	1400	600	-0,18875
16	Rebolo 400	1800	800	-0,0875
17	Rebolo 400	1800	1000	-0,18
18	Rebolo 400	1800	600	-0,20175

TABELA COM A MÉDIA DOS VALORES DE CURTOSE

CURTOSE (<i>Sku</i>)				
ENSAIO	ESPECIFICAÇÃO DE GRANULOMETRIA	ROTAÇÃO DA PEÇA (rpm)	VELOCIDADE DE AVANÇO AXIAL DO REBOLO (mm/min)	MÉDIA (μm)
1	Rebolo 360	1600	800	0,882414868
2	Rebolo 360	1600	1000	0,411923435
3	Rebolo 360	1600	600	0,466367076
4	Rebolo 360	1400	800	1,477697618
5	Rebolo 360	1400	1000	0,846046246
6	Rebolo 360	1400	600	0,193959403
7	Rebolo 360	1800	800	0,294159821
8	Rebolo 360	1800	1000	1,232785295
9	Rebolo 360	1800	600	0,369860672
10	Rebolo 400	1600	800	0,325672637
11	Rebolo 400	1600	1000	0,512157528
12	Rebolo 400	1600	600	0,297718547
13	Rebolo 400	1400	800	0,483917607
14	Rebolo 400	1400	1000	0,365298508
15	Rebolo 400	1400	600	0,615923697
16	Rebolo 400	1800	800	0,45574408
17	Rebolo 400	1800	1000	0,517472946
18	Rebolo 400	1800	600	0,537982342

TABELA COM A MÉDIA DOS VALORES DE POTÊNCIA DE CORTE

POTÊNCIA DE CORTE				
ENSAIO	ESPECIFICAÇÃO DE GRANULOMETRIA	ROTAÇÃO DA PEÇA (rpm)	VELOCIDADE DE AVANÇO AXIAL DO REBOLO (mm/min)	MÉDIA (kW)
1	Rebolo 360	1600	800	0,124
2	Rebolo 360	1600	1000	0,168
3	Rebolo 360	1600	600	0,139
4	Rebolo 360	1400	800	0,152
5	Rebolo 360	1400	1000	0,169
6	Rebolo 360	1400	600	0,170
7	Rebolo 360	1800	800	0,171
8	Rebolo 360	1800	1000	0,157
9	Rebolo 360	1800	600	0,147
10	Rebolo 400	1600	800	0,184
11	Rebolo 400	1600	1000	0,180
12	Rebolo 400	1600	600	0,179
13	Rebolo 400	1400	800	0,171
14	Rebolo 400	1400	1000	0,174
15	Rebolo 400	1400	600	0,169
16	Rebolo 400	1800	800	0,174
17	Rebolo 400	1800	1000	0,136
18	Rebolo 400	1800	600	0,208