

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA E DE
MATERIAIS - PPGEM**

LUCIANO DE OLIVEIRA ARANTES

**DESEMPENHO DE REBOLOS DE SEED-ED-GEL E CBN NA RETIFICAÇÃO
CILÍNDRICA EXTERNA DE Mergulho EM ALTAS VELOCIDADES
PERIFÉRICAS NO AÇO 100Cr6**

CURITIBA

2019

LUCIANO DE OLIVEIRA ARANTES

**DESEMPENHO DE REBOLOS DE SEED-ED-GEL E CBN NA RETIFICAÇÃO
CILÍNDRICA EXTERNA DE Mergulho EM ALTAS VELOCIDADES
PERIFÉRICAS NO AÇO 100Cr6**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, área de Concentração em Engenharia de Manufatura, da Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação, do Campus de Curitiba, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Milton Polli, Dr. Eng.

CURITIBA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Arantes, Luciano de Oliveira

Desempenho de rebolos de Seeded Gel e CBN na retificação cilíndrica externa de mergulho em altas velocidades periféricas no aço 100Cr6 [recurso eletrônico] / Luciano de Oliveira Arantes. -- 2019.

1 arquivo texto (113 f.): PDF; 10,6 MB.

Modo de acesso: World Wide Web

Título extraído da tela de título (visualizado em 19 dez. 2019)

Texto em português com resumo em inglês

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Curitiba, 2019

Bibliografia: f. 101-104.

1. Engenharia mecânica - Dissertações. 2. Rebolos. 3. Abrasivos. 4. Retificação e polimento. 5. Superfície - Preparação. 6. Aço - Propriedades mecânicas - Ensaios. I. Polli, Milton Luiz. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais. III. Título.

CDD: Ed. 23 – 620.1

Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba

Bibliotecário: Adriano Lopes CRB-9/1429

TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº375

A Dissertação de Mestrado intitulada: **DESEMPENHO DE REBOLOS DE SEED-GEL E CBN NA RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA DE Mergulho em Altas Velocidades Periféricas no Aço 100Cr6**, defendida em sessão pública pelo Candidato **Luciano de Oliveira Arantes**, no dia 05 de dezembro de 2019, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração: Engenharia de Manufatura, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais – PPGEM.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Milton Luiz Polli Dr. Eng.- Presidente - UTFPR

Prof. Fred Lacerda Amorim Dr. Eng. - PUCPR

Prof. Paulo André de Camargo Beltrão Ph.D. - UTFPR

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Curitiba, 05 de dezembro de 2019

Dedico este trabalho primeiramente a Deus por iluminar meu caminho e me dar forças para seguir em frente, e à minha família pelo apoio em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento especial à minha esposa Marileize e filhas Ana Carolina e Ana Flávia pela compreensão nos momentos mais difíceis desta pesquisa, que souberam compreender a ausência e, mesmo assim, continuaram me incentivando para que eu chegasse até o final deste trabalho.

Ao professor Dr. Milton Luiz Polli, pelos esforços expendidos, orientação, paciência e dedicação durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores avaliadores, Tiago Cousseau e Paulo André Beltrão da UTFPR e Fred Amorim da PUCPR, pela imensa contribuição na avaliação deste trabalho, com participação construtiva para, em conjunto, contribuirmos para a ciência.

À Robert Bosch Curitiba, na pessoa dos Srs. Zequiel Stella, Guillermo Meister e Udo Wall, que acreditaram desde o início no potencial dos resultados e proporcionaram plenas condições para que este trabalho fosse executado.

À empresa Saint-Gobain Abrasivos aos departamentos de engenharia de vendas e engenharia de aplicação por disponibilizar recursos, como equipamento e pessoal de apoio para realização dos experimentos.

Aos colegas Moisés Santana, Marlon Cardoso e Gustavo Cercal pelo incentivo a iniciar este trabalho de pesquisa, a Daniel Eichenberger, Lino Oliveira, Maickson Laverde, Adilson Baldi, Sergio Anderson, Djalma Vilela e Rodolfo Longen com grande ajuda com a usinagem e medição das peças, a Marco Freitas com ajuda na sistemática e a Gustavo Mello que não mediu esforços com ajuda e apoio em todas as etapas desta pesquisa.

À equipe do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) pela dedicação e esforços na manutenção do programa de especialização, ao qual me proporcionou condições para chegar a este momento de coleta dos esforços empregados.

RESUMO

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. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

Empresas têm dificuldades para definir qual tipo de rebolo tem o melhor custo benefício em processos de retificação em altas velocidades periféricas em peças de elevada precisão dimensional e qualidade superficial. Esta pesquisa compara o desempenho de retificação de rebolos com abrasivos de seeded-gel e CBN em processo de retificação cilíndrica externa de mergulho no aço 100Cr6. Foram utilizadas combinações de taxas de remoção específicas de material e uma faixa de altas velocidades periféricas. A análise se baseou no desempenho de retificação, que considera a relação de retificação (razão do volume de material removido da peça pelo volume de desgaste do rebolo) e a energia específica de retificação. Também foram verificados os erros de formas geométricas como circularidade e retitude e realizada a caracterização da topografia da superfície retificada. Os resultados indicam que o rebolo com abrasivos de seeded-gel em certas condições apresenta melhor desempenho de retificação e menores erros de formas geométricas que o rebolo com abrasivos de CBN e pode ser uma alternativa viável para o processo.

Palavras-chave: Retificação. CBN. Seeded-gel. Desempenho de retificação. Energia de retificação.

ABSTRACT

ARANTES, Luciano de O. **The seeded-gel and CBN grinding wheel performance in the external cylindrical plunge grinding of 100Cr6 steel in high peripheral speeds**. 2019. Dissertation (Master in Engineering) – Post Graduation in Mechanical and Material Engineering Program, Federal University of Technology - Paraná, Curitiba, 2019.

Companies have challenges to define which type of grinding wheel has the best cost-benefit in processes at high peripheral speeds in parts of high dimensional accuracy and surface quality. This research compares the performance grinding wheels with abrasive of seeded-gel and CBN in the process of external cylindrical plunge grinding in 100Cr6 steel. It was used combinations of specific material removal rates and a range of high peripheral speed. The analysis was based on grinding performance, considering the grinding ratio (the volume of material removed from the part and grinding wheel wear volume) and specific grinding energy. As well as the geometric errors such as roundness, straightness, and grinding topography texture were verified. The results have shown that seeded-gel abrasives in certain conditions have better grinding performance and less geometric deviation than CBN abrasive grinding wheels and can be a possible process alternative.

Keywords: Grinding. CBN. Seeded-gel. Grinding performance. Grinding energy

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Propriedades do grão Óxido de Alumínio microcristalino sol-gel e CBN.....	54
Tabela 3.1 Composição química do aço 100Cr6 (60 a 62HRc)	62
Tabela 3.2 Características gerais dos rebolos.....	63
Tabela 3.3 Parâmetros de retífica.....	73
Tabela 3.4 Parâmetros de dressagem.....	74
Tabela 3.5 Sequência de experimentos.....	75
Tabela 3.6 Amostras para exame de erros de formas e textura.....	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Injetor CRIN.....	23
Figura 2.1 Relação entre os parâmetros de entrada e o resultado de trabalho.....	26
Figura 2.2 Retífica cilíndrica externa.....	27
Figura 2.3 Configuração de uma retifica cilíndrica externa de mergulho.	28
Figura 2.4 Retificação cilíndrica externa de mergulho reta e com ângulo.....	30
Figura 2.5 Relação da espessura do cavaco não deformado h_{cu} com as variáveis de entrada e condições de contato.....	32
Figura 2.6 Estática e Cinemática das arestas de corte.....	35
Figura 2.7 Zonas de deformações elástica e plástica na remoção de cavaco.....	36
Figura 2.8 A influência do atrito na profundidade de corte e eficiência da usinagem..	37
Figura 2.9 Interações na zona de retificação.....	38
Figura 2.10 Distribuição da energia na retificação.....	39
Figura 2.11 Tipos de desgastes de grãos e ligas.....	40
Figura 2.12 Rebolos: (a) convencional (inteiriço abrasivo) e (b) superabrasivo (dividido em suporte e abrasivo)	42
Figura 2.13 Composição dos rebolos vitrificados.....	43
Figura 2.14 Inovação Tecnológica Saint-Gobain Grão e Liga	47
Figura 2.15 Grãos eletrofundidos (a) Microcristalino (b) mecanismo de desgaste dos grãos e (c) imagens dos desgastes dos grãos microcristalinos.....	48
Figura 2.16 Comparação de microestrutura e propriedades de fratura do eletrofundido e microcristalino sol-gel sinterizado	49
Figura 2.17 Disco dressador rotativo.....	56
Figura 2.18 Sistema tribológico de retificação.....	58
Figura 2.19 Rugosidade S_a e R_a	60
Figura 2.20 Assimetria S_{sk}	60
Figura 2.21 Assimetria e Curtose por processos	61
Figura 2.22 Curtose S_{ku}	61
Figura 3.1 Fluxograma dos assuntos abordados neste trabalho	62
Figura 3.2 Peça de trabalho.....	63
Figura 3.3 Imagens dos rebolos - CBN “a” e seeded-gel “b”	64
Figura 3.4 Imagem do dispositivo dressador.....	64

Figura 3.5 Imagem do sistema de fixação da peça.....	65
Figura 3.6 Imagens do dispositivo eletromecânico da medição em processo	65
Figura 3.7 Imagem do controlador do balanceamento do rebolo.....	66
Figura 3.8 Imagem do bico de refrigeração da peça.....	66
Figura 3.9 Imagem da Retifica Cilíndrica Externa.....	67
Figura 3.10 Equipamento FIS (fornecedor Saint-Gobain)	67
Figura 3.11 Potência de retificação (Kw).....	68
Figura 3.12 Posição de medição de formas geométricas	68
Figura 3.13 Imagem do equipamento Alicona Infinite Focus SL.....	69
Figura 3.14 Posição da medição de textura da superfície	70
Figura 3.15 Imagem do filtro utilizado.....	70
Figura 3.16 Imagem da resolução vertical.....	70
Figura 3.17 Imagem do Z Mike.....	71
Figura 3.18 Medição ótica TECSART.....	72
Figura 3.19 Imagem do MEV, áreas 1 e 2	76
Figura 4.1 Comparação da textura das peças.....	85
Figura 4.2 Imagens rebolo de CBN, a) aumento de 100x e b) aumento de 1000x.....	85
Figura 4.3 Imagens rebolo de seeded-gel, a) aumento 100x e b) aumento 1000x.....	86
Figura 4.4 Imagens MEV rebolo CBN, a) 200x, b) e c) 1000x e d) 2000x	87
Figura 4.5 Imagens MEV rebolo seeded-gel, a)100x, b), c) e d) 1000x	88

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1 Campo de aplicação principal retificação de precisão de alta eficiência ...	34
Gráfico 2.2 Avaliação da relação G com o aumento da taxa de retificação Q'_w para rebolos compostos apenas grãos eletrofundidos e microcristalino sol-gel	51
Gráfico 2.3 Características físicas de alguns materiais.....	53
Gráfico 2.4 Relação da velocidade de dressagem.....	57
Gráfico 4.1 Desvios de Circularidade ($X \pm IC95\%$) (μm)	78
Gráfico 4.2 Desvios de retitude ($X \pm IC95\%$) (μm).....	79
Gráfico 4.3 Comparação de rugosidade S_a ($X \pm IC95\%$) (μm).....	80
Gráfico 4.4 Comparação de assimetria S_{sk} ($X \pm IC95\%$) (μm).....	82
Gráfico 4.5 Comparação de curtose S_{ku} ($X \pm IC95\%$) (μm).....	83
Gráfico 4.6 Curva de Abbott-Firestone para rebolos de CBN e seeded-gel	84
Gráfico 4.7 Comparação de relação G.....	90
Gráfico 4.8 Potência de retificação.....	92
Gráfico 4.9 Comparação da energia específica de retificação	94
Gráfico 4.10 Comparação dos desempenhos de retificação.....	96

LISTA DE SIGLAS

CBN	Cubic boron nitride
CNC	Computerised Numerical Control
CVD	Chemical Vapor Deposition
HRC	Unidade de dureza Rockwell na escala C
HSS	High Speed Steel
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
VDI	Verein Deutsche Ingenieure
MLR	Meio Lubri-refrigerante
MC-Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio Microcristalino
SG	Seeded-Gel ou Sol-Gel
XG	designação do grão abrasivo (Extra Sharp Grain)
TG	designação do grão abrasivo (Targa Grain)
NQ	designação do grão abrasivo (Norton Quantum)
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
CBN	Nitreto Cúbico de Boro
SiC	Carbeto de Silício
CD	Continuos Dressing
IC	Intervalo de confiança

LISTA DE ACRÔNIMOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior
DIN	Deutsches Institut für Normung
ISO	International Organization for Standardization
MEV	Microscópio Eletrônico por Varredura
SAE	Society of Automotive Engineers
PPGEM	Programa de Pós-Graduação em Eng ^a Mecânica e de Materiais
PUC-PR	Pontifícia Universidade Católica do Paraná
CRIN	Common Rail Injector
TEF	Technical Functions

LISTA DE ABREVIATURAS

Dr.	Doutor
Eng.	Engenheiro
et al.	e outros colaboradores
PhD	Doctor of Philosophy
Prof.	Professor
GMBH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung

LISTA DE UNIDADES

m	Metro
mm	Milímetro
min	Minuto
m/min	Metros por minuto
mm/volta	Milímetro por volta
m/s	Metros por segundo
mm/min	Milímetros por minuto
mm ³	Milímetros cúbico
N/mm	Newton por milímetro
mm ³ /mm.min	Milímetros cúbico por milímetro por minuto
mm ² /s	Milímetro quadrado por segundo
W	Watt
KW	Quilowatt
J	Joule
J/s	Joule por segundo
J/mm ³	Joule por milímetro cúbico
mm ³ /J	Milímetro cúbico por joule
rpm	Rotações por minuto
µm	Micrômetro
°C	Graus Celsius
%	Porcentagem
N	Newton
Nm	Newton metro
Knoop	Unidade de medida de dureza Knoop
Mpa	Mega Pascal
GPa	Giga Pascal
l/min	Litros por minuto

LISTA DE SÍMBOLOS (ABNT)

Alfabeto latino:

Símbolo	Unidade	Descrição
a_e	[mm]	Penetração de trabalho
$b_{s\ eff}$	[mm]	Largura efetiva do rebolo
b_s	[mm]	Largura do rebolo
d_w	[mm]	Diâmetro da peça
d_s	[mm]	Diâmetro do rebolo
d_{se}	[mm]	Diâmetro equivalente do rebolo
a	[mm]	Profundidade de corte
n_w	[rpm]	Rotação da peça
q_d	[-]	Relação de velocidades de dressagem
q	[-]	Relação de velocidades de retificação
v_s	[m/s]	Velocidade periférica do rebolo
v_r	[m/s]	Velocidade periférica do disco dressador
v_w	[m/s]	Velocidade periférica da peça
v_d	[mm/min]	Velocidade transversal do disco dressador
s_d	[mm/min]	Avanço do disco dressador
a_r, f_{rd}	[mm]	Profundidade de dressagem
f, v_{fr}	[mm/min]	Velocidade de avanço
h_{eq}	[μ m]	Espessura do cavaco
h_{cu}	[mm]	Espessura de cavaco não deformado
$h_{c\ eff}$	[mm]	Espessura efetiva do cavaco
k	[%]	Fator de proporcionalidade
v_c	[m/s]	Velocidade de corte
v_k	[mm ³]	Volume específico de grãos
$v_{k\ min}$	[mm ³]	Volume específico de grãos mínimo
$v_{k\ max}$	[mm ³]	Volume específico de grãos máximo
v_b	[mm ³]	Volume específico de liga
$v_{b\ min}$	[mm ³]	Volume específico de liga mínimo
$v_{b\ max}$	[mm ³]	Volume específico de liga máximo
v_p	[mm ³]	Volume específico de poros

G	[-]	Relação de retificação
V_w	[mm ³]	Volume de material retificado
V_s	[mm ³]	Volume de desgaste do rebolo
Q'_w	[mm ³ /mm.min]	Taxa de remoção específica de material
C_{stat}	[mm ⁻³]	Densidade estática dos gumes do rebolo
F_t, F_{ts}	[N/mm]	Força tangencial
F_n, F_{ns}	[N/mm]	Força normal
P	[KW; J/s]	Potência de retificação
V'_w	[mm ³ /s]	Taxa de remoção de material da peça
$L_{s,kin}$	[mm]	Distância dos gumes cinemáticos
$L_{s,stat}$	[mm]	Distância estática dos gumes estáticos
Q	[l/min]	Vazão do refrigerante
N	[-]	Número de amostras
G_i	[-]	Gumes
T_μ	[mm]	Profundidade de corte do grão
R_t	[μ m]	Rugosidade médio aritmético de área
S_a	[μ m]	Desvio médio aritmético de área
S_{sk}	[-]	Assimetria entre picos e vales de área
S_{ku}	[-]	Curtose, presença de picos e vales

Alfabeto grego:

Símbolo	Unidade	Descrição
α	[-]	Expoente constante experimental
β	[-]	Expoente constante experimental
γ	[-]	Expoente constante experimental
μ	[-]	Coefficiente de forças
η	[°]	Ângulo de ataque do grão abrasivo
\emptyset	[mm]	Diâmetro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
1.1 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1 RETIFICAÇÃO	25
2.1.1 Retificação Cilíndrica.....	27
2.1.1.1 Retificação cilíndrica externa de mergulho	28
2.2 PARÂMETROS DE PROCESSO.....	31
2.2.1 Penetração do gume	34
2.2.2 Distribuição de energia	38
2.3 REBOLOS	41
2.3.1 Rebolos convencionais.....	44
2.3.2 Rebolos superabrasivos	52
2.4 DISCOS DRESSADORES ROTATIVOS	55
2.5 MEIOS LUBRI-REFRIGERANTES	57
2.6 RUGOSIDADE S_a	59
2.7 ASSIMETRIA S_{sk}	60
2.8 CURTOSE S_{ku}	61
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	62
3.1 MATÉRIA-PRIMA.....	62
3.2 REBOLOS.....	63
3.3 DISCO DRESSADOR ROTATIVO.....	64
3.4 DISPOSITIVO DE FIXAÇÃO DA PEÇA	64
3.5 MEDIÇÃO EM PROCESSO.....	65
3.6 BALANCEADOR DO REBOLO.....	65
3.7 REFRIGERAÇÃO DA PEÇA	66
3.8 RETÍFICA CILÍNDRICA EXTERNA	66
3.9 DISPOSITIVO PARA OBTENÇÃO DE POTÊNCIA	67
3.10 MEDIÇÃO DE ERROS DE FORMAS GEOMÉTRICAS	68
3.11 MEDIÇÃO ÓTICA	69
3.12 MEDIÇÃO DIMENSIONAL.....	71
3.13 MICROSCÓPIO ÓTICO.....	71

3.14 MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV).....	72
3.15 PARÂMETROS DE RETIFICAÇÃO	73
3.16 PARÂMETROS DE DRESSAGEM	73
3.17 ESTRATÉGIA DOS TESTES.....	74
3.18 ESTRATÉGIA DE EXAME DAS AMOSTRAS.....	75
3.18.1 Estratégia de exame no MEV.....	76
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	77
4.1 ERROS GEOMÉTRICOS DA PEÇA	77
4.1.1 Circularidade.....	77
4.1.2 Retitude.....	79
4.2 CARACTERIZAÇÃO DA TOPOGRAFIA 3D DA PEÇA.....	80
4.2.1 Rugosidade Sa.....	80
4.2.2 Assimetria Ssk.....	81
4.2.3 Curtose Sku.....	82
4.2.4 Parâmetro funcional Sk	84
4.3 Análise MEV dos rebolos CBN e seeded-gel	85
4.4 RELAÇÃO G DE RETIFICAÇÃO	89
4.5 POTÊNCIA DE RETIFICAÇÃO.....	91
4.6 ENERGIA ESPECÍFICA DE RETIFICAÇÃO	93
4.7 DESEMPENHOS DE RETIFICAÇÃO	94
5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	97
5.1 CONCLUSÕES	97
5.1.1 Qualidade – Desvios de formas geométricas	97
5.1.2 Qualidade – Topografia da superfície	97
5.1.3 Desgastes abrasivos	98
5.1.4 Potência e energia específica de retificação	99
5.1.5 Desempenhos de retificação	99
5.2 TRABALHOS FUTUROS.....	100
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101
APÊNDICES.....	105

1 INTRODUÇÃO

Retificação é o processo de acabamento mais amplamente usado na indústria metal-mecânica para alcançar a integridade da superfície requerida e precisões dimensionais da peça (MALKIN; GUO, 2008). Os parâmetros de processo de retificação selecionados e a especificação correta do rebolo podem otimizar o contato, proporcionando maiores possibilidades de remoção de material (BIANCHI et al., 2002). Quando há a necessidade do desenvolvimento de um novo processo de retificação para peças pequenas, onde a qualidade das peças retificadas e o custo do rebolo são importantes, empresas têm dificuldades para definir o tipo de rebolo mais adequado, bem como as condições de usinagem quando seus equipamentos podem trabalhar com altas velocidades periféricas.

Rebolos com abrasivos de alumina microcristalinos SG (sol-gel ou seeded-gel), representam um novo desenvolvimento na tecnologia de síntese abrasiva. O sol-gel é obtido a partir de um processo que transforma a bauxita em alumina num ambiente gelatinoso e o seeded-gel tem um processo semelhante porém utiliza sementes de alfa-alumina dispersas no gel que resulta na formação de cristais de alumina durante o processo de queima. A estrutura dos grãos abrasivos é orientada aleatoriamente e é formada por microcristais de alumina, com isto permite a microfratura dos grãos abrasivos, promovendo assim auto afiação e geração contínua de novas arestas de corte (KLOCKE, 2009).

Os grãos abrasivos microcristalinos estão em plena evolução, a cada desenvolvimento os grãos ficam mais friáveis, isto é, com maior capacidade de micro fraturas e de remoção de material (NORTON SAINT-GOBAIN, 2015).

Em condições de temperatura ambiente, o CBN apresenta-se como um dos materiais mais duros que se conhece. Comparando com o diamante sintético, o CBN possui uma maior estabilidade térmica (BERTALAN, 1997). Rebolos de CBN podem ser usados em velocidades periféricas superiores a 200 m/s, para a qual apresentam melhores resultados, outra vantagem do CBN é o fato de ser um excelente condutor de calor. Desta forma, durante o processo de retificação uma parcela significativa do calor gerado no processo é transferida para o grão abrasivo de CBN, ao invés de ser transferida ao componente usinado (LEME, 1999; MALKIN; GUO, 2008).

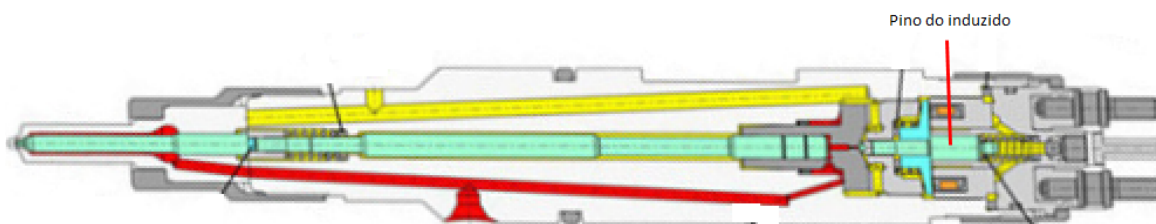
Diversos estudos objetivaram otimizar os processos comparando os rebolos com grãos convencionais de óxido de alumínio com grãos microcristalinos seeded-gel / sol-gel ou com grãos de CBN. Souza e Da Silva, (2019), Selvakumaran et al, (2018), e Smith, (1998), estudaram os desempenhos comparativos dos rebolos de alumina sol-gel e do rebolo de alumina branca pelo cálculo da força de corte, desgaste do rebolo e da relação de retificação (relação G). Selvakumaran et al, (2018) concluíram que o rebolo de sol-gel tem relação G superior em 20%, energia específica de retificação (U) inferior em 21%, acabamento das peças melhor em 27% e desempenho de retificação (E) melhor em 31% em relação aos grãos convencionais. De acordo com Webster e Tricard, 2004, abrasivos de óxido de alumínio sinterizado seeded-gel e sol-gel apresentam significativas vantagens comparados com os eletrofundidos, particularmente em termos de vida da ferramenta. Quando usados adequadamente, os abrasivos sinterizados também podem resultar em taxas de remoção volumétrica significativamente maiores, forças reduzidas e menor temperatura da superfície de trabalho durante a retificação. Starkov et al, 2014, realizaram investigações em laboratório e concluíram que na retificação plana de peças de aço endurecido 100Cr6 (HRC 60) com velocidade periférica de 30 m/s, os rebolos de sol-gel de alumina microcristalina têm a capacidade de corte próxima a das ferramentas de CBN, isto verificado onde todos os rebolos eram vitrificados e de mesmas dimensões e similares tamanhos de grãos, dureza e teor relativo de abrasivos.

Altas velocidades periféricas e baixas taxas de remoção de material podem resultar em menor impacto ambiental em função do desgaste do rebolo (MARINESCU et al., 2016). Em velocidades periféricas mais baixas o emprego de rebolo de sol-gel, apresenta vantagens em relação ao CBN, particularmente na facilidade da dressagem e no custo inicial do rebolo (ARAUJO, 2018). Entretanto, ainda não foram relatados estudos envolvendo comparações entre de rebolos de seeded-gel e de CBN em faixas de altas velocidades periféricas. Conforme Marinescu et al, (2016), valores a partir de 60 m/s são considerados altas velocidades periféricas e conforme Jackson e Mills, (2004) rebolos convencionais não podem alcançar 100 m/s.

Neste contexto, o presente trabalho analisou o processo de retificação cilíndrica externa de mergulho em altas velocidades periféricas comparando os desempenhos de um rebolo de seeded-gel com grãos microcristalinos de 4ª geração Norton Quantum (3NQ) e liga Vitrium3 com rebolo de CBN. Os experimentos foram

realizados em um ambiente industrial e o componente usinado foi o pino do induzido feito de aço 100Cr6, temperado a 62 HRc. Este faz parte de um conjunto conhecido como injetor CRIN (Common Rail Injector) para sistemas diesel (figura 1.1). Ele tem a função de injetar o óleo diesel em motores que utilizam este tipo de combustível.

Figura 1.1 Injetor CRIN



Fonte: Adaptado (Robert Bosch)

Foram empregadas as altas velocidades periféricas (v_s) de 60, 70 e 80 m/s, pois estão na faixa de aplicação de ambos os rebolos. Outra variável utilizada foi a taxa de remoção específica de material (Q'_w) sendo utilizados os valores no desbaste de 100, 150 e 200 mm³/mm.min, limites baseados em estudo de Bianchi et al, (2002).

Os critérios para análise envolveram o desempenho de retificação e a qualidade das peças retificadas. Foram avaliados os desvios geométricos (circularidade e retitude) e rugosidade do pino do induzido, os quais são parâmetros importantes para o bom funcionamento do conjunto. Também foi analisada a relação de retificação (G), que considera volume de material retirado da peça de trabalho e o desgaste de rebolos, a energia específica (U) e o desempenho de retificação (E). Estes estão relacionados com os custos de ferramental e a eficiência do processo.

1.1 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

O objetivo principal deste trabalho é apresentar a comparação de desempenho entre os rebolos seeded-gel e CBN, considerando volume de material removido da peça, desgaste de rebole e energia específica de retificação, bem como uma análise qualitativa do acabamento superficial e formas geométricas da peça na retificação cilíndrica externa de mergulho do aço 100Cr6 numa faixa de altas velocidades periféricas onde se é possível usar tanto o rebole de CBN quanto o de

seeded-gel. Esta comparação pode ajudar na decisão de qual o rebolo de melhor custo e benefício, em casos quando há a necessidade de desenvolver o processo de retificação de um novo componente.

As condições de retificação como velocidade periférica (v_s) e taxa de remoção específica de material (Q'_w) foram variadas a fim de se avaliar o comportamento da relação G (relação entre o volume de material usinado e o volume de desgaste do rebolo), potência de retificação, energia específica de retificação, acabamento superficial e desvios de formas geométricas.

Desta forma pretende-se gerar informações relevantes para a efetividade e custo da produção no desenvolvimento do processo de retificação de peças de pequenas dimensões em equipamentos que possam trabalhar com altas velocidades periféricas, em que a qualidade das peças retificadas e custo da manufatura são importantes.

Os objetivos específicos estão relacionados a seguir:

- a- Identificar os tipos de desgastes predominantes dos rebolos, para cálculo da relação de retificação G;
- b- Analisar a influência da velocidade periférica, taxa de remoção específica de material e tipo de rebolo nos erros geométricos e topografia da superfície da peça retificada (textura 3D);
- c- Determinar a relação de retificação G para os diferentes tipos de rebolos nas diferentes velocidades periféricas e taxas de remoção específicas de material, para o cálculo do desempenho da retificação;
- d- Analisar a influência dos tipos de rebolos, taxa de remoção específica de material e velocidade periférica na potência de retificação, energia específica de retificação e desempenho de retificação;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 RETIFICAÇÃO

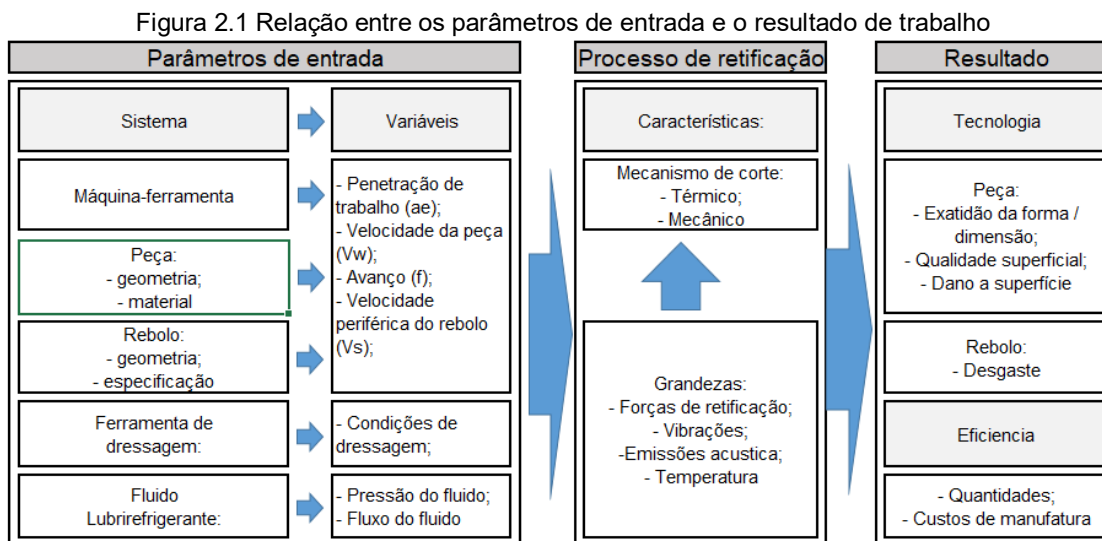
Retificação é o processo de usinagem que utiliza partículas duras como meio de corte. O processo de retificação e afiação de material provavelmente é o mais antigo existente, desde a pré-história o homem encontrou uma maneira de afiar suas ferramentas, a partir do modo de bater uma pedra contra a outra (MALKIN; GUO, 2008).

A retificação ocupa posição de destaque e é uma das mais importantes operações de usinagem empregadas na produção de peças com boa exatidão dimensional, formas geométricas e de bom acabamento superficial. Sua utilização é onde ocorre a interação da ferramenta para remover material em peças especiais para formar geometria desejada e propriedades superficiais que geralmente não poderiam ser obtidas por outros processos convencionais com geometria definida ou até mesmo por processos não convencionais de usinagem como por exemplo usinagem eletroquímica e eletroerosão (LINDSAY, 1987).

A retificação, única em fabricação de alguns componentes, já foi considerada como uma operação secundária de acabamento, porém de extrema importância, tem sido amplamente empregada em várias etapas de fabricação (SHAW, 1996). A possibilidade de usinagem de materiais duros e frágeis é uma das vantagens da retificação, mas esse processo não é isento de problemas. São comuns os danos térmicos na peça, as vibrações excessivas e desgaste prematuro da ferramenta abrasiva (MARINESCU et al., 2016).

O processo de retificação, basicamente, compreende operações nas quais a remoção de material por gume se dá na faixa de alguns micrometros, de forma que a interação dos gumes com o material da peça é bastante limitada. Isto ocorre devido as formas complexas dos gumes, sua orientação aleatória no ligante e à grande quantidade de gumes que atuam simultaneamente. A remoção de material é dada pela soma da remoção de cavacos. Apesar destas dificuldades, baseado em análises e testes, é possível entender melhor os processos físicos, mecânicos, térmicos, químicos e termoquímicos que descrevem a retificação e possibilitam otimizar o processo (KLOCKE, 2009).

O resultado do trabalho é verificado pelas características macro e micro geométricas da peça, a influência térmica sobre a mesma e também pelo consumo do rebolo e do fluido de corte. A figura 2.1 apresenta os parâmetros de entrada, de processo e resultados (KLOCKE, 2009).



Fonte: Adaptado de (KLOCKE, 2009)

Os parâmetros de entrada são divididos entre o sistema e as variáveis. O sistema é composto pelas características da peça, da máquina-ferramenta, do rebolo, do sistema dressador e do meio lubri-refrigerante. Já as variáveis são compostas pelos parâmetros de corte, pelas condições de dressagem e de lubri-refrigeração. As características de processo como temperatura, força, comportamento da ferramenta e emissão acústica dão auxílio importante na interpretação dos resultados, que são adquiridas por meio de medições durante a retificação. Estas características impactam substancialmente no resultado de trabalho (KLOCKE, 2009).

Na retificação, a peça é colocada em contato com a ferramenta, enquanto gira, sendo que a peça pode apresentar ou não movimento próprio de rotação ou translação. Deste modo, dispõe-se de um número significativo de possíveis métodos de retificação. A norma DIN 8589 - classifica seis possíveis variações do processo de retificação (MARINESCU et al., 2016):


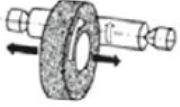

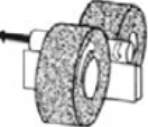
1. Retificação plana;
2. Retificação cilíndrica;
3. Retificação de rosca;

4. Retificação de engrenagens;
5. Retificação de geração de perfil;
6. Retificação de forma.

2.1.1 Retificação cilíndrica

A retificação cilíndrica externa é usada principalmente para usinagem de peças que giram no sentido concordante ou discordante com o rebole, é subdividida pelo tipo de posicionamento da peça e direção do avanço principal conforme mostra a figura 2.2 (KLOCKE, 2009).

Figura 2.2 Retífica cilíndrica externa

<p>Retificação cilíndrica externa periférica de mergulho</p> 		<p>Retificação cilíndrica externa periférica longitudinal</p> 	<p>Orientação do eixo de trabalho</p>
 <p>Retificação centerless de mergulho</p>		 <p>Retificação centerless de passagem</p>	
<p>Principal direção de avanço normal para a superfície usinada</p>		<p>Principal direção de avanço paralelo para a superfície usinada</p>	

Fonte: Adaptado de (KLOCKE, 2009)

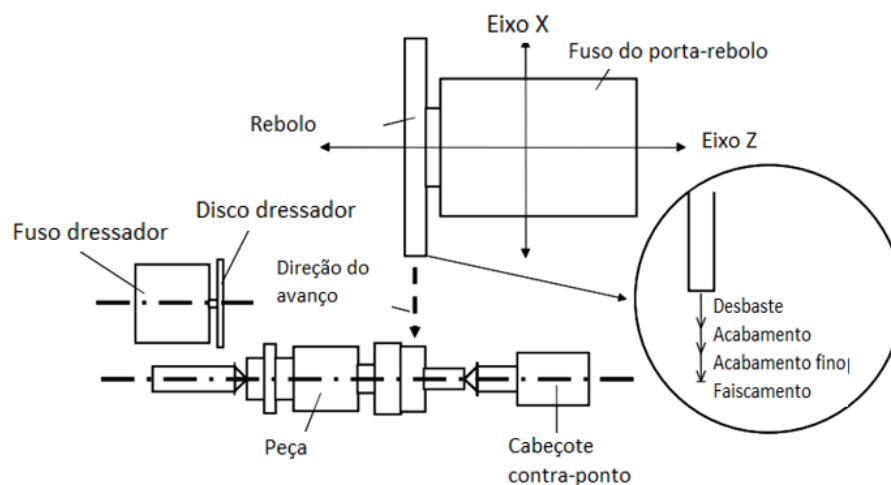
Considerando o caso de retificação cilíndrica externa entre centros, a peça é presa entre pontos de centragem e impulsiona por meio de um dispositivo arrastador que rotaciona, fazendo-a girar. Na retificação centerless, a peça de trabalho é posicionada sobre uma régua de apoio e conduzida por um rebole de arraste, se os avanços são ortogonais ou tangenciais à superfície produzida é a característica distintiva entre mergulho periférico cilíndrico externo (retificação em mergulho) e retificação longitudinal (retificação em passagem) (KLOCKE, 2009).

2.1.1.1 Retificação cilíndrica externa de mergulho

A figura 2.3 mostra os principais componentes numa retificação cilíndrica externa de mergulho, com fixação entre pontas, sendo uma das pontas retrátil para proporcionar a retirada da peça. Com a peça montada, a ferramenta abrasiva rotativa mergulha radialmente contra a peça. Na indústria automobilística é muito usado na retificação de virabrequim, eixos de comando de motores, elementos de bomba injetora, bicos injetores e diversas outras peças com canais (KLOCKE, 2009).

O avanço pode ser subdividido em várias fases do processo, que são distinguidas pelo fato de que, a cada fase adicional, há um material específico com menor taxa de remoção (normalmente denominados avanços de desbaste, de acabamento e de acabamento fino). Os erros de forma atribuíveis a deformações causadas por forças de usinagem, podem ser parcialmente balanceados (SHAW, 1996).

Figura 2.3 Configuração de uma retificação cilíndrica externa de mergulho



Fonte: Adaptado (KLOCKE, 2009)

Diminuindo a taxa de usinagem no final do processo pode-se melhorar a qualidade da superfície. Para garantir a qualidade na produção de lotes, um dispositivo de medição é freqüentemente empregado, que mede a peça de trabalho nas direções "x" (diâmetro) e "z" (ombro) antes ou durante a retificação, a fim de, por exemplo, determinar posição da superfície do cilindro para a face com aproximação rápida. Ao fazer isso, a medida de segurança radial pode ser reduzida, reduzindo a

distância de aproximação entre rebolo e peça, o que economiza tempo e também diminui o risco de colisão (KLOCKE, 2009).

Os desvios de formas geométricas que se obtêm na retificação cilíndrica externa de mergulho são principalmente em função da velocidade de avanço com que a peça é retificada. Para que atinja os valores de tolerâncias requeridas em projeto, o movimento de avanço deve ser ajustado no final do percurso com um tempo de espera antes do retorno, ou também pode ser considerado como velocidade de avanço final nula. A redução final da velocidade de avanço é denominada de fim de faiscamento. Além de melhorar as formas geométricas com a redução da taxa de retificação no final do processo, também é reduzida a rugosidade e a influência térmica na superfície (KLOCKE, 2009).

Desvios de circularidade devem ser mantidos sob certas tolerâncias especialmente no caso de eixos, virabrequins e rolamentos de rolos, altos valores podem levar a ruídos excessivos, vibrações e falhas nos componentes (SINGH; KUMAR; GOYAL., 2014).

Na retificação cilíndrica de mergulho para que a remoção de material ocorra de forma simétrica, os movimentos de rotação do rebolo e da peça são necessários. A velocidade periférica do rebolo e da peça são definidas em função das características do rebolo, da peça e do resultado de trabalho desejado. Os sentidos das velocidades periféricas do rebolo e da peça podem ser concordantes ou discordantes, dependendo da aplicação. O movimento do rebolo é essencial para a conclusão do processo, influenciada pela taxa de remoção específica de material (Q'_w) (equação 2.1). A velocidade de avanço do rebolo define a taxa de retificação, que decorre da rotação da peça e da penetração de trabalho (KLOCKE, 2009; MARINESCU et al., 2016).

$$Q'_w = \pi \cdot d_w \cdot v_{fr} \text{ [mm}^2/\text{s]} \quad (2.1)$$

onde:

d_w = diametro da peça [mm]

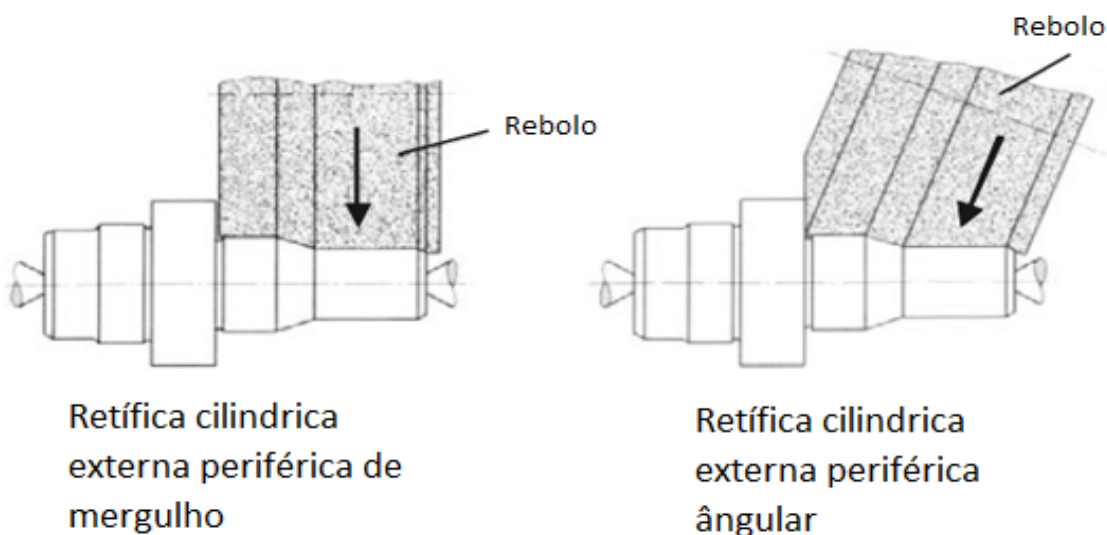
v_{fr} = velocidade de avanço [mm/s];

Uma variante da retificação de mergulho reta é a retificação de mergulho angular, onde o avanço do cabeçote se dá em um determinado ângulo de inclinação.

Podendo retificar ombros planos (faces) e cilindros (diâmetros), por meio de uma retificação angular do rebolo, figura 2.4. Com este método de fabricação, há vantagens claras de tempo em comparação com a retificação direta em mergulho (KLOCKE, 2009).

A inclinação do rebolo em retificação também reduz o risco de dano estrutural térmico da peça pois a taxa de remoção é menor. Em motores de combustão interna as vantagens são mais evidentes na fabricação do eixo de comando com várias combinações de diâmetros e ângulos, usinados com um ou vários rebolos. Diferenças de velocidades de corte, que aparecem na retificação reta da usinagem, podem ser balanceadas, definindo o rebolo em um ângulo (KLOCKE, 2009).

Figura 2.4 Retificação cilíndrica externa de mergulho reta e com ângulo



Fonte: Adaptado de (KLOCKE, 2009)

O monitoramento da retificação cilíndrica é vantajoso na otimização das condições de processo, melhorando o controle de processo, produzindo peças de alta qualidade. O sensor avança antes da retificação de acabamento e de acabamento fino da peça e este monitora o diâmetro, controlando o material removido e em alguns casos as velocidades de avanço. Manter a precisão dimensional pode ser um desafio em várias aplicações de precisão onde fusos hidrostáticos e pequenas profundidades de corte são comuns (COUEY et al., 2005).

2.2 PARÂMETROS DE PROCESSO

Os parâmetros de processos de retificação a princípio, são geralmente associados com a vida do rebolo, tempo de ciclo e qualidade final. A espessura do cavaco não deformado h_{cu} é dependente da densidade estática dos gumes do rebolo – C_{stat} e das variáveis geométricas e cinemáticas do processo, onde o v_w é a velocidade da peça, v_s é a velocidade (periférica) de corte, a é a profundidade de corte, e d_{se} é o diâmetro equivalente do rebolo. Esta dependência é descrita pela função exponencial, expressa na Equação 2.2 (KÖNIG, 1989).

$$h_{cu} = k [1/ C_{stat}]^{\alpha} [v_w/ v_s]^{\beta} [a/ d_{se}]^{\gamma} \quad (2.2)$$

Na Equação 2.2, k é um fator de proporcionalidade e os índices α , β , γ são expoentes constantes experimentais, que assumem valores entre zero e um. O comprimento de contato $b_{s\ eff}$, indicado na figura 2.5, é calculado a partir da Equação 2.3 (KÖNIG, 1989).

$$b_{s\ eff} = [a \cdot d_{se}]^{1/2} \quad (2.3)$$

Nas Equações 2.2 e 2.3, o diâmetro equivalente d_{se} é um parâmetro que está relacionado às condições de contato entre rebolo e peça, indicando o diâmetro que o rebolo utilizado na retificação cilíndrica deveria ter para proporcionar a mesma geometria de corte quando utilizado na retificação plana. O diâmetro equivalente é dado pela Equação 2.4 (KÖNIG, 1989).

$$d_{se} = [d_w \cdot d_s] / [d_w \pm d_s] \quad (2.4)$$

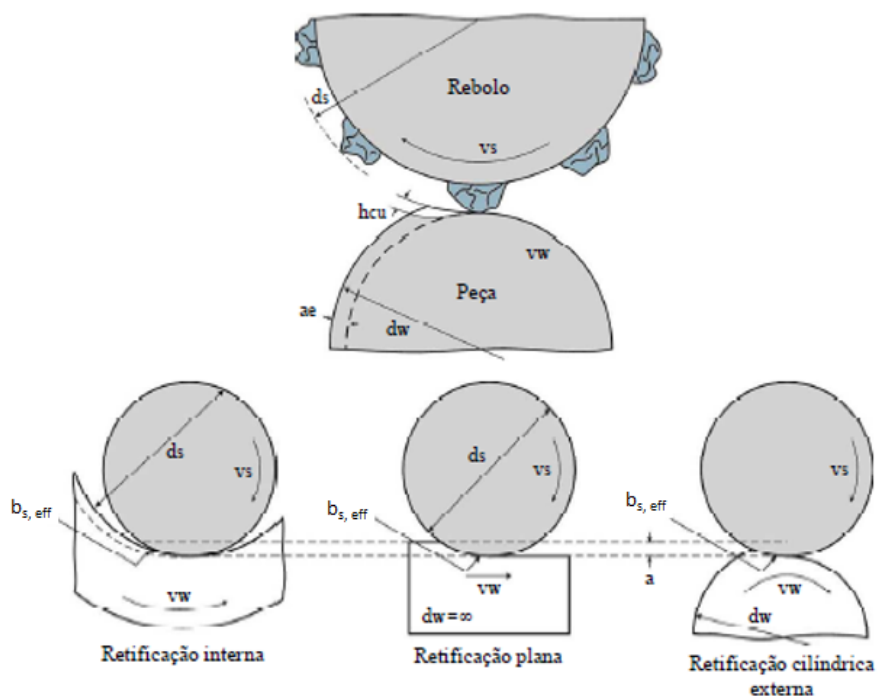
Na Equação 2.4, o sinal positivo é empregado para calcular o d_{se} na retificação cilíndrica externa - $d_{se} < d_s$. O sinal negativo, por sua vez, é utilizado para a retificação cilíndrica interna - $d_{se} > d_s$. Na retificação plana o diâmetro equivalente é igual ao diâmetro do rebolo.

Potência de corte é o produto da força tangencial (F_t) e a velocidade de corte (v_s) e é a energia necessária para a formação de cavacos (Equação 2.5) e o coeficiente de forças (μ) está relacionado com a Força tangencial e a Força Normal (Equação 2.6) (KÖNIG, 1989).

$$P = F_t \cdot v_s \quad (2.5)$$

$$\mu = F_t / F_n \quad (2.6)$$

Figura 2.5 Relação da espessura do cavaco não deformado h_{cu} com as variáveis de entrada e condições de contato



Fonte: Adaptado de (KÖNIG, 1989).

A relação G é definida como a razão entre o volume de material retificado (V_w) e o desgaste volumétrico do rebolo (V_s). A equação 2.7 apresenta esta relação que caracteriza o desgaste de um rebolo em condições de trabalho determinadas.

$$G = V_w / V_s \quad (2.7)$$

A fim de determinar os efeitos dos parâmetros do processo na retificação cilíndrica de mergulho à seco com os rebolos de CBN, Tawakoli et al, (2012) concluíram que:

1- As forças de retificação e a área específica diminuem a energia de retificação com a redução da camada de contato;

2- Os danos térmicos são visíveis na retificação à seco onde há 100% da camada de contato com taxas de remoção de material acima de 6 mm³/mm.s;

3- Energia específica de retificação são menores para todas as taxas de remoção de material quando se tem 25% da camada de contato à seco, comparando com 100% de camada de contato à seco ou com refrigeração;

4- Os valores de rugosidade das peças de trabalho com perfil do rebolo especial onde retificam vários diâmetros e ombros são mais elevados do que aqueles com rebolo normal, somente um diâmetro. A rugosidade da peça, no entanto, pode ser muito reduzida pelo tempo do faiscamento (TAWAKOLI et al., 2012).

Energia específica de retificação U (J/mm³) é a energia requerida para remover uma unidade de volume de material por uma unidade de tempo de retificação. É um dos mais importantes índices e é dado pela equação 2.8 (GHOSH; CHATTOPADHYAY; PAUL, 2008; KUMAR; SALONITIS, 2015; SELVAKUMARAN et al., 2018; SMITH, 1998).

$$U = P / V'_w \quad (2.8)$$

onde:

$$P = \text{Potência de retificação (J/s)} \quad V'_w = \text{taxa de remoção de material (mm}^3\text{/s)}$$

Para isto deve se considerar que V'_w (mm³/s), volume de material removido pelo tempo de retificação, conforme equação 2.9 e que Q' (mm³/mm.s), taxa de remoção específica de material conforme equação 2.10.

$$V'_w = V_w / t_c \quad (2.9)$$

$$Q' = V'_w / b_{s, \text{eff}} \quad (2.10)$$

onde:

t_c = tempo de corte (s)

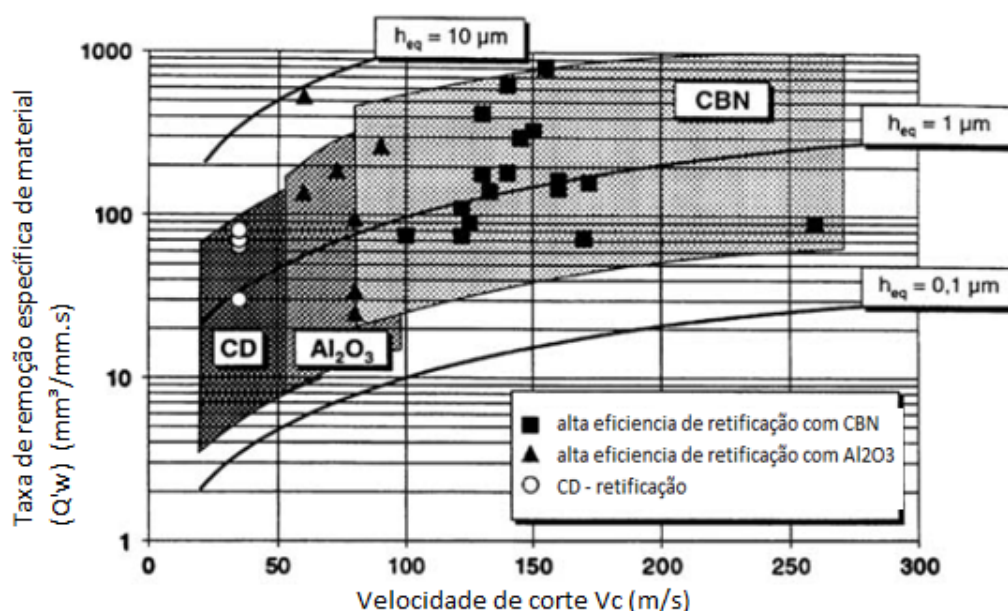
Desempenho de retificação E (mm³/J) é a relação G de retificação dividida pela energia específica de retificação U (SELVAKUMARAN et al., 2018; SMITH, 1998). O desempenho da retificação pode ser otimizado pelo aumento da relação G ou pela redução da energia específica, conforme equação 2.11.

$$E = G / U \quad (2.11)$$

Taxas de remoção de material altas resultam em elevado aumento na produtividade para usinagem de componentes. Cavacos de espessura entre 0,5 e 10 μm foram alcançados em aplicações industriais e estão mostradas no gráfico 2.1 as características da retificação de alta velocidade (JACKSON; MILLS, 2004).

Para alcançar um alto desempenho de um rebolo deve acontecer o dressamento constante do rebolo e ele deve ter a capacidade de absorver um alto volume de cavacos de metal. Portanto, o rebolo deve ser poroso e deve ser capaz de suportar altas cargas de retificação que são colocadas nos grãos abrasivos e nas pontes de ligações que seguram os grãos abrasivos na posição (HECKER; NACIONAL; PAMPA, 2003; JACKSON; MILLS, 2004).

Gráfico 2.1 Campo de aplicação principal para retificação de precisão de alta eficiência



Fonte: Adaptado de (JACKSON; MILLS, 2004).

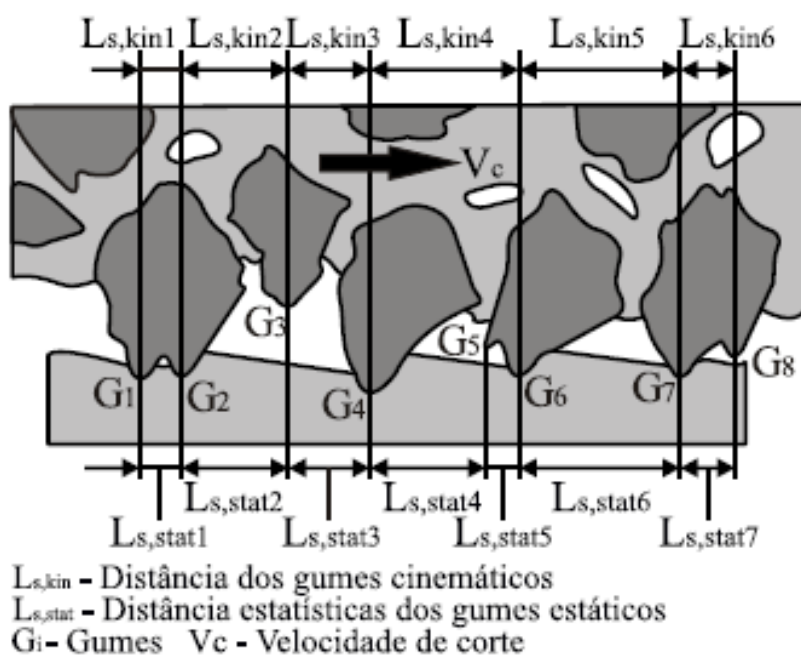
2.2.1 Penetração do gume

Para a formação de um cavaco, os grãos abrasivos devem ser mais duros do que o material a ser usinado. Materiais abrasivos cristalinos e quebradiços são usados neste caso. Os grãos se fragmentam durante o esmagamento causado pelo processo

de produção e os fragmentos por sua vez possuem uma forma irregular com cantos e arestas afiados. Materiais abrasivos naturais ou sintéticos que já tenham a forma desejada em seu estado bruto também são usados (LEME, 1999).

A protusão dos grãos abrasivos em relação ao ligante é variável, então, apenas partes dos grãos (salientes na superfície) penetram na peça durante o processo de usinagem, causando a remoção de material. Deste modo são chamados de arestas de corte cinemáticas. O conceito de arestas de corte estáticas é usado quando a distribuição de ponta no componente é descrito sem considerar o processo de usinagem, figura 2.6 (KLOCKE, 2009).

Figura 2.6 Estática e Cinemática das arestas de corte



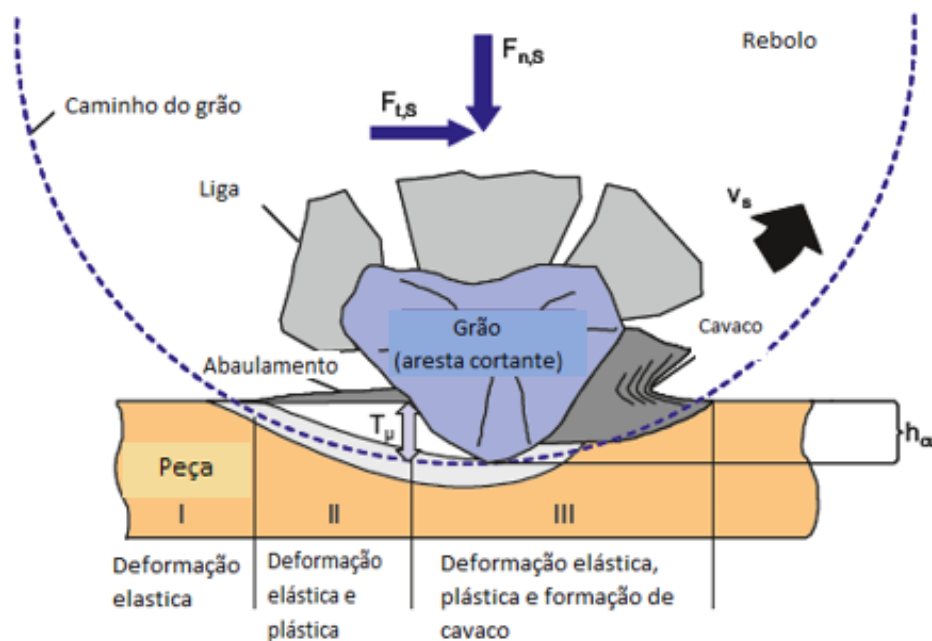
Fonte: Adaptado de (KLOCKE, 2009).

No caso de algumas operações de retificação, afiação e retificação abrasiva com grãos ligados, a penetração do grão está ligada à força. Neste caso o grão permanece relativamente fixo e penetra na peça de trabalho em um caminho predeterminado pelo movimento relativo entre a ferramenta e a peça de trabalho, conforme a figura 2.7. A penetração da ponta do grão é, portanto, condicionalmente rastreada. Este princípio de funcionamento pode ser encontrado na maioria dos métodos de usinagem com geometria de corte não definidas, o grão penetra na peça

de trabalho sobre um caminho plano e, após a fase de deformação elástica, desencadeia a deformação plástica do material da peça (KLOCKE, 2009).

Devido à forma da aresta de corte, os gumes penetram em uma trajetória quase plana na superfície da peça, de modo que não há cavacos formado inicialmente. O material da peça de trabalho é meramente deslocado para o lado, formando elevações ou flui por baixo da aresta de corte (KLOCKE, 2009).

Figura 2.7 Zonas de deformações elástica e plástica na remoção de cavaco



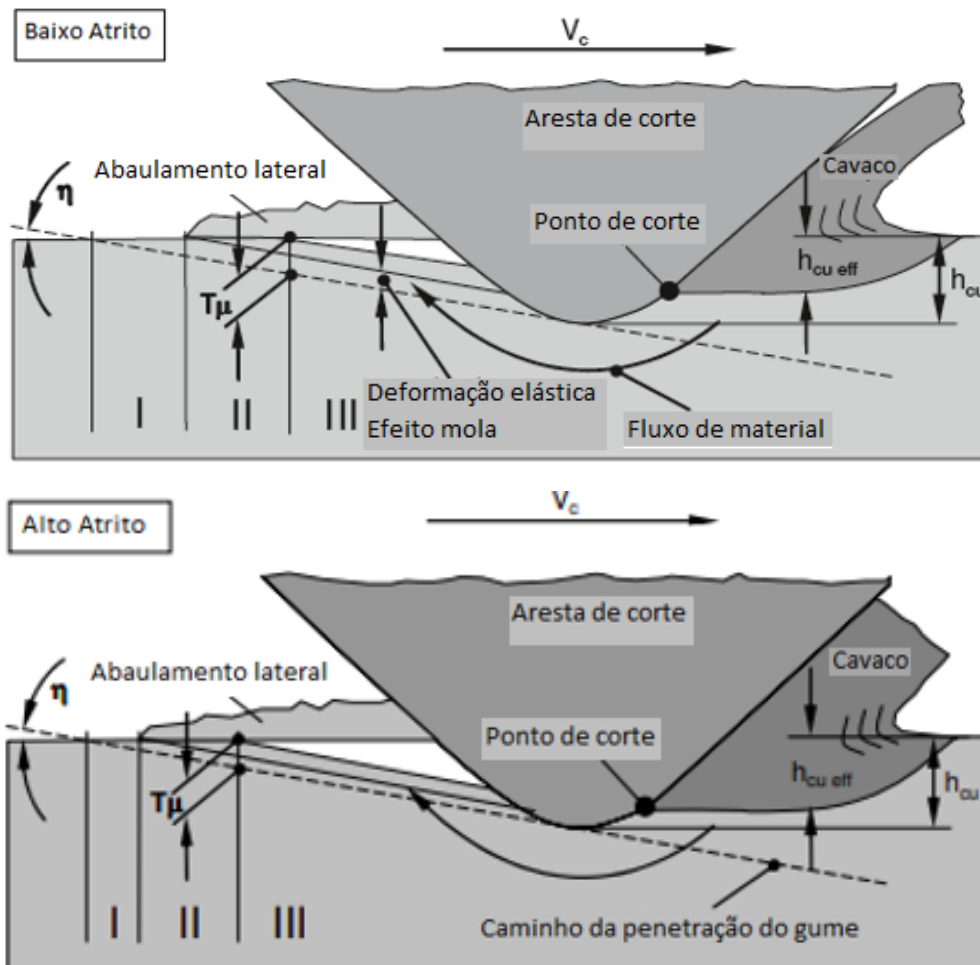
Fonte: Adaptado de (KLOCKE, 2009)

Quando a aresta de corte penetra profundamente na peça de trabalho até que a espessura do cavaco h_{cu} seja correspondente à profundidade de corte do grão T_μ , inicia a formação do cavaco, processos de deformação e formação de cavacos aparecem simultaneamente. Será decisivo para a eficácia da remoção de material apenas o quanto da espessura do cavaco h_{cu} é realmente produzida e, portanto, quão grande é a espessura efetiva do cavaco h_{cueff} . A formação de cavacos e o h_{cueff} e o T_μ são influenciados em grande parte pelas condições de atrito na aresta de corte (KLOCKE, 2009; MARINESCU et al., 2016).

Para a compreensão da influência do atrito na penetração de ponta do grão, são apresentadas as diferenças do baixo e alto atrito na figura 2.8. A formação de cavacos com lubri-refrigeração com óleo ou emulsões é resultante da influência do

atrito na profundidade de corte do grão e da eficiência da remoção do material. Com o aumento da lubrificação, a profundidade de corte de grãos aumenta e há deformação plástica de material mais duradoura e, portanto, mais forte (KLOCKE, 2009; MARINESCU et al., 2016).

Figura 2.8 A influência do atrito na profundidade de corte e na eficiência de usinagem



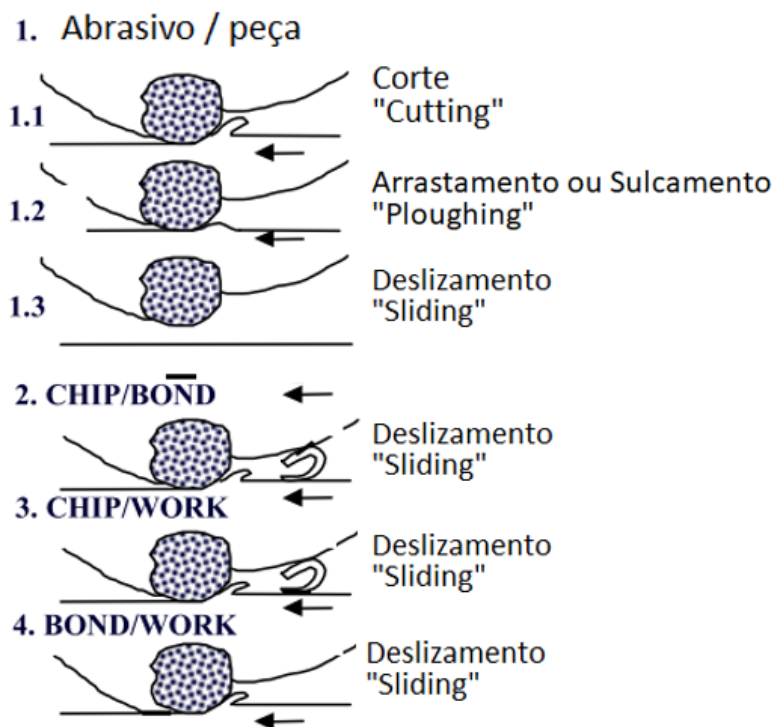
Fonte: Adaptado (KLOCKE, 2009)

Interações na zona de retificação durante o processamento do acabamento abrasivo, o rebolo entra em contato com a superfície da peça. Esse contato é imposto sob um conjunto de condições (parâmetros de operação) influenciadas pelas características do rebolo, do material de trabalho e da máquina operatriz envolvida. Tal contato (interações) entre o rebolo e a peça pode ser caracterizado como mostrado na figura 2.9:

1. Abrasivo / Interface de trabalho
 - 1.1 Corte (remoção de cavacos)
 - 1.2 Arrastamento (deslocamento lateral de material)
 - 1.3 Deslizamento (atrito)
2. Interface Cavaco / Liga (atrito)
3. Cavaco / Peça (atrito)
4. Liga / Peça (atrito)

Esses conjuntos de interações microscópicas são influenciados pelos parâmetros de entrada do sistema de acabamento abrasivo e, por sua vez, influenciam os parâmetros de saída do sistema de acabamento abrasivo.

Figura 2.9 Interações na zona de retificação



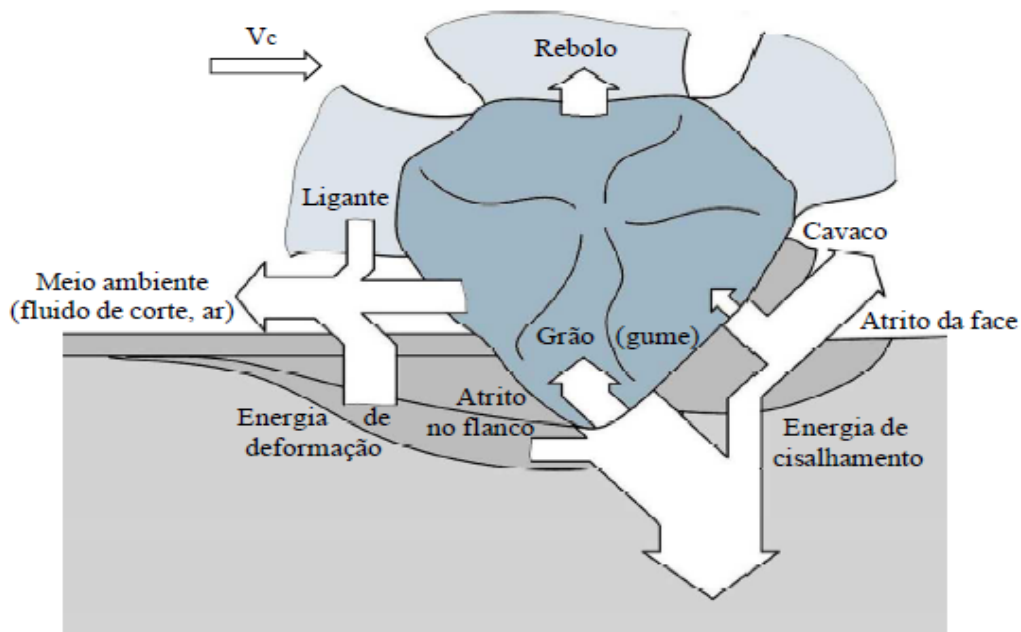
Fonte: Adaptado (WEBSTER; TRICARD, 2004)

2.2.2 Distribuição de energia

Basicamente a energia mecânica introduzida no processo é transformada em calor em quatro regiões. A energia de maior parcela é transformada em energia térmica pela deformação plástica na superfície da peça de trabalho e pelo atrito no

flanco dos gumes. Parte da energia é transformada em calor em decorrência do atrito do ligante sobre a superfície da peça. A figura 2.10 ilustra a distribuição da energia nas regiões distintas (KÖNIG, 1989).

Figura 2.10 Distribuição da energia na retificação



Fonte: Adaptado de (KÖNIG, 1989).

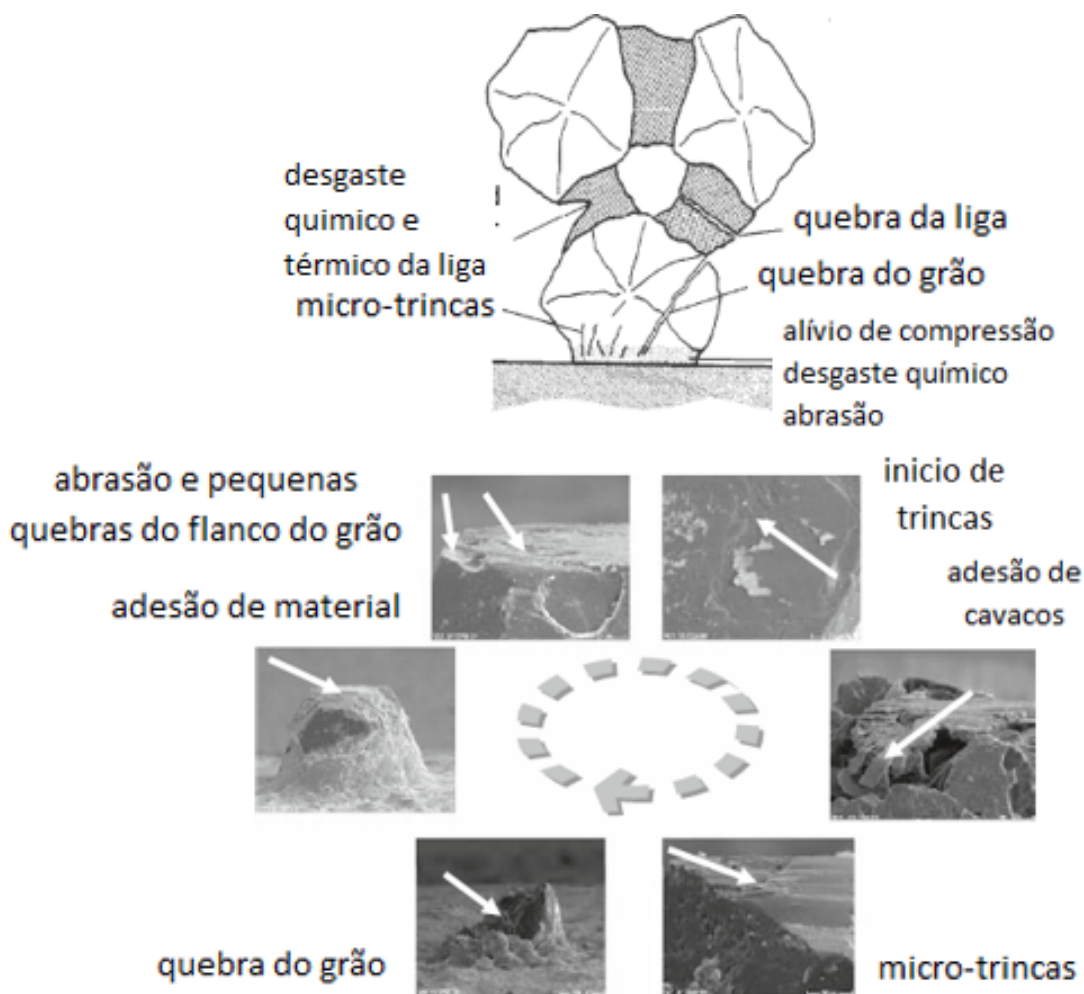
A peça de trabalho e a ferramenta estão sujeitas a altas temperaturas e pressões na zona de contato. O resultado disso é o desgaste microscópico do grão e da ligação apresentado na figura 2.11. O desgaste começa nas camadas cristalinas que se encontram perto da superfície do grão. Em extremas pressões e temperaturas iniciam processos de oxidação e difusão, que diminuem a resistência à abrasão do material do grão. Esta camada é removida por abrasão e novas camadas cristalinas são constantemente expostas ao desgaste (KLOCKE, 2009).

Por meio de reações triboquímicas na superfície do grão, a resistência mecânica do grão pode mudar, intensificando o desgaste, muitas vezes devido ao líquido de refrigeração. Além disso, o estresse alternado mecânico e térmico pode levar à fadiga da ligação. Em pontos de ruptura, que existem em muitos corpos sólidos e flancos dos grãos, como impurezas e diferenças de dureza, fazem com que trincas por fadiga apareçam. Estas trincas podem levar à desintegração da superfície, bem

como a separação de partículas de grãos individuais ou iniciar a formação de outras trincas que fazem com que seções inteiras de grãos se quebrem (KLOCKE, 2009; SHAW, 1996).

Em muitos casos, o desgaste do grão é a causa indireta do desgaste das ligas, uma vez que ocorre o facetamento da aresta de corte do grão, devido a uma superfície de atrito aumentada, há um aumento na força de corte no grão individual e, assim, a sobrecarga mecânica do vínculo entre grão e liga abrasiva. Grãos inteiros ou seções de grãos podem sair da ligação. O vínculo pode também acontecer por influências químicas, mecânicas ou térmicas. Tais causas de desgaste devem ser consideradas no planejamento do processo e particularmente a escolha das especificações do rebolo (KLOCKE, 2009; NORTON SAINT-GOBAIN, 2015; SHAW, 1996).

Figura 2.11 Tipos de desgastes de grãos e ligas



Fonte: Adaptado de (KLOCKE, 2009)

2.3 REBOLOS

Rebolos e segmentos se enquadram na categoria geral de "ferramentas abrasivas aglutinadas". Tais ferramentas consistem em grãos abrasivos duros, que fazem o corte, realizada em uma matriz de ligação mais fraca. Dependendo do particular tipo da liga, o espaço entre as partículas abrasivas só pode ser parcialmente preenchido, deixando lacunas (poros), ou completamente preenchido com aglutinante. Além do material abrasivo e liga, materiais de enchimento e de auxílio à retificação também podem ser adicionados. As características e o desempenho de ferramentas abrasivas ligadas dependem da refrigeração, da morfologia, do tipo de material do grão abrasivo, do tamanho do grão, da ligação do material, das propriedades do abrasivo, liga e dos poros (KLOCKE, 2009).

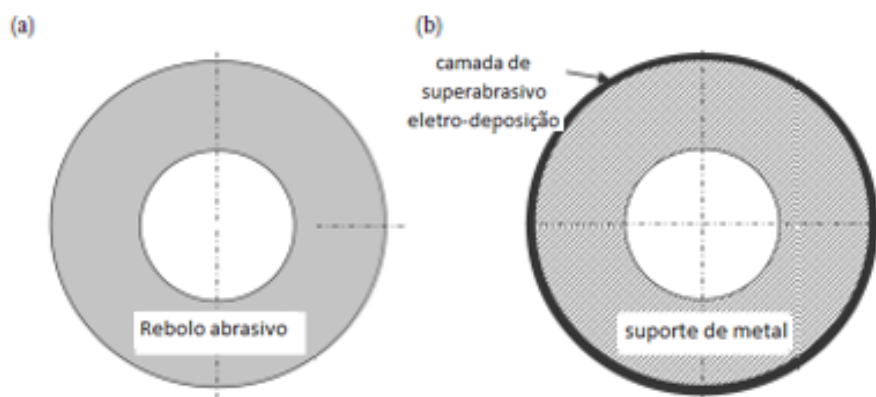
Os rebolos são feitos de vários tipos de grãos em uma ampla gama de tamanhos, em conjunto com muitos materiais e composições de ligas. Rebolos convencionais contêm óxido de alumínio e se dividem em eletrofundidos (Al_2O_3), microcristalinos (MC- Al_2O_3 , também chamado do sol-gel ou seeded-gel), ou abrasivo de carboneto de silício com ligas vitrificadas ou resinóides e superabrasivos que podem conter diamantes ou abrasivos de nitreto cúbico de boro (CBN) que podem ser produzidos com ligas vitrificadas, de resina ou metálicas (WEGENER et al., 2011).

Nos rebolos de ligas vitrificadas, os poros estão distribuídos uniformemente na estrutura do rebolo, devido aos processos de fabricação. Para se obter uma maior resistência mecânica, os rebolos com ligas metálicas sinterizadas e resinóides (aplicados aos superabrasivos) são fabricados com pouca porosidade. A protusão dos grãos deve ser obtida durante o processo de fabricação do rebolo (WEGENER et al., 2011).

Os materiais abrasivos ligados podem ser utilizados na fabricação de rebolos inteiriços ou ainda aplicados sobre um suporte (corpo base) para baixar o custo de fabricação, dependendo do tipo de abrasivo, conforme apresenta a figura 2.12.

Grãos abrasivos utilizados nos rebolos devem ser compostos de materiais cristalinos, com dureza superior à do material a ser usinado. Tais materiais são frágeis e o processo de retificação faz a ruptura dos grãos ocorrer de forma geométrica aleatória, com cantos vivos, que irão atuar como gumes do grão abrasivo.

Figura 2.12 - Rebolos: (a) convencional (inteiriço abrasivo) e (b) superabrasivo (dividido em suporte e abrasivo)



Fonte: Adaptado de (MARINESCU et al., 2016)

As características necessárias do material abrasivo são (KÖNIG, 1989):

1. Elevada dureza: faz com que a remoção do material ocorra significativamente na peça;
2. Estabilidade térmica: faz com que o grão possa resistir às temperaturas alternantes que ocorrem durante o processo de fabricação.
3. Estabilidade química: durante pressões e temperaturas elevadas, o grão não sofra alterações químicas ao interagir com o ar, material da peça e meio lubri-refrigerante.
4. Boa condutividade térmica: necessário para reduzir a quantidade de calor transferido à peça durante o processo de retificação e assim evitar danos térmicos na superfície das peças.

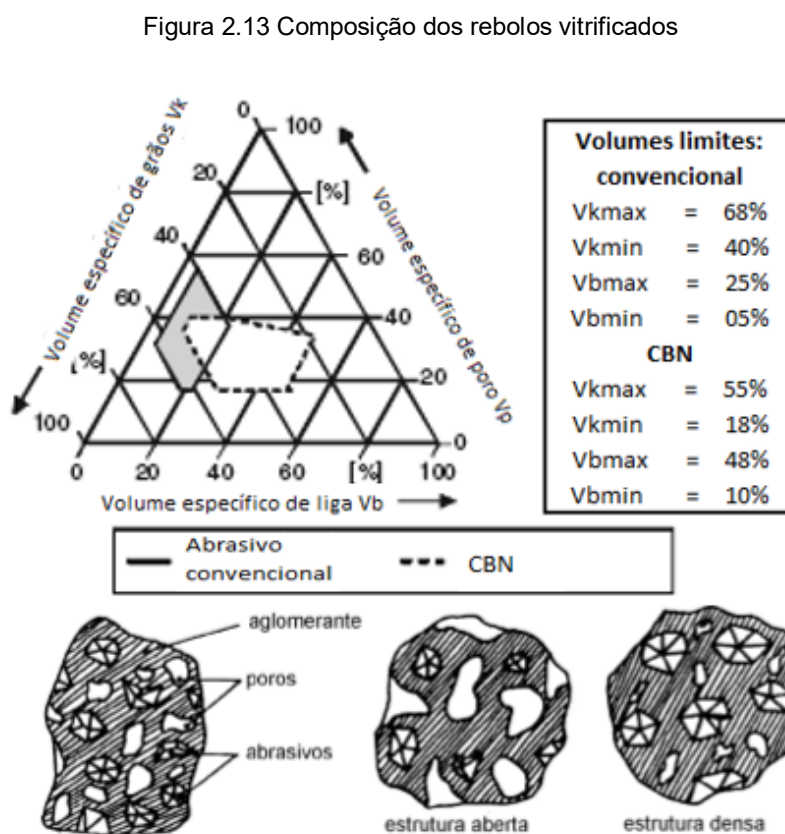
As ligas têm a função primária de manter os grãos abrasivos ligados entre si. São responsáveis pela transmissão da força motriz ao local de ação do grão abrasivo. Para se conseguir um bom rendimento do rebolo, este deve estar constantemente afiado e possuir capacidade de absorver um volume elevado de cavacos. O rebolo deve ser poroso e deve suportar as cargas elevadas da retificação que são aplicadas nos grãos abrasivos e nas pontes de ligante que seguram os grãos abrasivos (KÖNIG, 1989).

A função de juntar os grãos abrasivos ligados entre si é atingida quando a liga satisfaz as seguintes exigências (KÖNIG, 1989):

1. O material da liga deve ser suficientemente resistente;
2. A liga forma pontes entre grãos com seção transversal suficientemente grandes;
3. Entre grão abrasivo e a liga deve existir uma energia de ligação suficientemente elevada para garantir a fixação do grão.

A divisão entre rebolos convencionais e superabrasivos é baseada na diferença entre dureza dos diferentes grãos, a qual determina os parâmetros de usinagem e as características de desgaste do rebole. A divisão leva em consideração o custo do rebole, uma vez que rebolos fabricados com grãos superabrasivos são geralmente mais caros (MARINESCU et al., 2016).

A composição volumétrica de rebolos, considerando os volumes das três fases constituintes apresentam variação entre os rebolos convencionais e os superabrasivos, figura 2.13. No gráfico, são identificadas as regiões de composição volumétrica de grãos, poros e liga das ferramentas, enfatizando as diferenças de características entre os rebolos convencionais (KLOCKE, 2009).



Fonte: Adaptado de (KLOCKE, 2009).

No processo de retificação, carregamentos mecânicos, térmicos e químicos atuam sobre o rebolo. Os micro desgastes são os resultados destes carregamentos, que se refere ao desgaste dos grãos (fratura ou achatamento), fratura da liga e remoção do grão para fora da estrutura do rebolo (KLOCKE, 2009).

Nos carregamentos sobre os grãos, esforços sobre os mesmos atingem um valor limite de resistência, fazendo com que apareçam as fraturas, criando-se novos gumes. O mesmo fenômeno de fratura ocorre sobre o ligante. A medida que a taxa de retificação é aumentada, os valores limites são atingidos mais cedo e a frequência dos micro desgastes aumentam. Este aumento da taxa de retificação faz com que o macro desgaste, que se refere à deterioração da macro geometria (perfil, dimensão), torne-se mais significativo. Ao se usar rebolos convencionais com taxa de retificação elevada, predomina-se os mecanismos de macro desgastes e para taxas menores os mecanismos de micro desgastes (DENKENA et al., 2015; WEGENER et al., 2011).

2.3.1 Rebolos convencionais

O material abrasivo mais utilizado nos processos de geometria não-definida é o óxido de alumínio, incluindo a retificação, devido à abundância da matéria-prima. A produção anual é de aproximadamente 2,3 milhões de toneladas considerando todos os tipos de grãos de óxido de alumínio. São classificados pelas suas colorações decorrente da presença de outros elementos como óxido de cromo, óxido de zircônio entre outros (ARAUJO, 2018; SULLIVAN, 2000).

A estrutura de rebolos convencionais é representada pela composição volumétrica em relação ao percentual de grãos, porosidade e ligante. Estas variáveis possuem influência direta sobre a elasticidade e a dureza do rebolo (BERTALAN, 1997).

A obtenção de grãos abrasivos com características controladas tornou-se necessária devido às exigências da atividade industrial. As pesquisas neste âmbito tiveram os primeiros sucessos com o carboneto de silício e do óxido de alumínio, que são os materiais abrasivos utilizados em rebolos convencionais (LINKE, 2016).

O carboneto de silício é obtido indiretamente por meio de reação química de sílica pura com coque em fornos elétricos. Este tipo de abrasivo apresenta maior dureza que os óxidos de alumínio, sendo mais quebradiço. É empregado na

retificação de materiais de baixa resistência à tração, porém, de elevada dureza, como vidros, porcelanas, ferros fundidos (tratados ou não superficialmente), plásticos, alumínio e carbonetos (metal duro). Estes abrasivos podem ser reconhecidos pela sua coloração: pretos e/ou verdes, sendo esse último empregado nas afiações de ferramentas de metal duro; por serem mais duros que os pretos e não alteram a constituição do metal duro (KÖNIG, 1989).

Dependendo do tipo de fabricação do óxido de alumínio, ele pode ser classificado em fundido ou sinterizado. Obtêm-se a partir do mineral bauxita por um processo que apresenta-se em duas qualidades, segundo o critério de pureza atingida na sua elaboração e de sua friabilidade (MALKIN; GUO, 2008):

Os ligantes que compõem um rebolo convencional podem ser cerâmicos, resinóides ou de borracha. Os ligantes cerâmicos ou vitrificados são os mais comuns na fabricação de rebolos. Estas ligas são misturas de materiais como caulim, argilas brancas e vermelhas, quartzo em pó, feldspato e fundentes. Os fundentes contêm silicatos de boro e monóxido de magnésio, com o objetivo de baixar a temperatura de queima dos rebolos, poupando tempo e combustível no aquecimento dos fornos de sinterização. As principais características destas ligas são a agressividade da ferramenta em função da estrutura porosa, elevado módulo de elasticidade, fragilidade e suscetibilidade a impactos, resistência a temperatura, resistência química a óleo, água, fluido de corte e ácidos (KÖNIG, 1989).

A ação robusta da liga vitrificada requer menos material na matriz do que o das ligas com resina ou das metálicas, para reter os cristais superabrasivos. Outra vantagem resultante da estrutura porosa dos rebolos com liga vitrificada é o maior fluxo de fluido lubri-refrigerante através dos poros entre os grãos (JACKSON; MILLS, 2004; ROWE, 2014; SEVERIANO, 2002).

Na fabricação de rebolos abrasivos as ligas resinóides são muito empregadas e são obtidas através da prensagem a quente de resinas. Devido ao fato de poder se deteriorar e perder a sua capacidade de retenção de grãos em temperaturas de trabalho acima de 250 °C, as ligas resinóides são menos duras e proporcionam ao processo de retificação uma redução nas forças de corte. Outra característica das ligas resinóides é que podem resistir às cargas de choque. Em contrapartida, estas ligas são mais suscetíveis ao ataque químico (KÖNIG, 1989).

As ligas resinóides são orgânicas, fabricadas por pressão à quente com temperaturas relativamente baixas e apresentam características não agressivas de corte, baixa resistência a temperatura e estrutura uniforme. As ligas leves não são necessariamente prensadas, mas apenas misturadas na forma líquida com abrasivo e levada à cura. Concepções sobre classe e estrutura são muito diferentes dos ligantes vitrificados. Ligas resinóides são divididas em três classes segundo a sua resistência à temperatura. Esses são: plásticos, resinas fenólicas e resinas poliamídicas (MARINESCU et al., 2016).

O óxido de alumínio microcristalino, necessita de um processo especial de fabricação (sol-gel), responsável pelas suas características únicas. Um sol-gel com processo um pouco diferente usa partículas de "sementes" de alfa-alumina dispersas no gel que resulta na formação de cristais de alumina submicrométricas durante o processo de queima, seeded-gel (LINKE, 2016; MALKIN; GUO, 2008).

Os abrasivos de alumina microcristalinos SG (sol-gel ou seeded-gel), representam um desenvolvimento mais recente na tecnologia de síntese abrasiva. O produto final consiste em grãos abrasivos com estrutura orientada aleatoriamente compreendendo microcristais de alumina que são menores de 5 μm e, em alguns casos, menores de 1 μm de tamanho. Isso é muito bom na estrutura policristalina, pois permite a microfratura do grãos abrasivos, promovendo assim auto afiação e geração contínua de novas arestas de corte (KLOCKE, 2009).

O emprego de grãos microcristalinos na fabricação de rebolos, no início do seu desenvolvimento, eram integralmente fabricados sem misturas de grãos. Porém, devido à sua resistência à fratura elevada e ao aumento do número de gumes ativos, a força de corte aumentava significativamente, inviabilizando o processo. Desenvolvimentos posteriores iniciaram uma tendência de empregar misturas com outros tipos de grãos de óxido de alumínio para equilibrar as características de desgaste dos grãos e reduzir custos de processo (KLOCKE; KÖNIG, 2005).

A principal característica da alumina microcristalina é que tem os grãos na forma de um conglomerado sinterizado de cristais finos medindo no máximo 1 μm , permitindo que o grão se fracture, surgindo novas arestas afiadas. A estrutura microcristalina de um grão SG (sol-gel ou seeded-gel) confere-lhe uma força de até três vezes maior em comparação com o grão de alumina branca eletrofundido (STARKOV et al., 2014).

Os benefícios permitem que as ferramentas de alumina microcristalina sejam usadas com vantagem em operações de retificação plana em peças perfiladas de aços de alta dureza. Investigações em laboratório revelaram que na retificação plana de peças de aço endurecido 100Cr6 (HRC 60) com velocidade periférica de 30 m/s, os rebolos de sol-gel de alumina microcristalina têm a capacidade de corte próxima a das ferramentas de CBN, isto verificado onde todos os rebolos vitrificados do mesmo tamanho padrão testado tinham quase o mesmo tamanho de grão, dureza e teor relativo de abrasivo (STARKOV et al., 2014).

A figura 2.14 apresenta a inovação tecnológica dos produtos Norton (Saint-Gobain), dos grãos abrasivos seeded-gel e liga. Por volta de 1980 a Saint-Gobain lançou no mercado o grão SG (seeded-gel), em 1985 o grão XG (Extra Sharp Grain), em 1995 o grão TG (Targa Grain) e em 2009 o grão NQ (Norton Quantum), este com tecnologia de grão cerâmico auto afiável de alto rendimento e em 2015 a liga abrasiva Vitrium 3, com até 20% maior taxa de remoção e 15% menor potência utilizada (NORTON SAINT-GOBAIN, 2015).

Figura 2.14 Inovação Tecnológica Saint-Gobain Grão e Liga



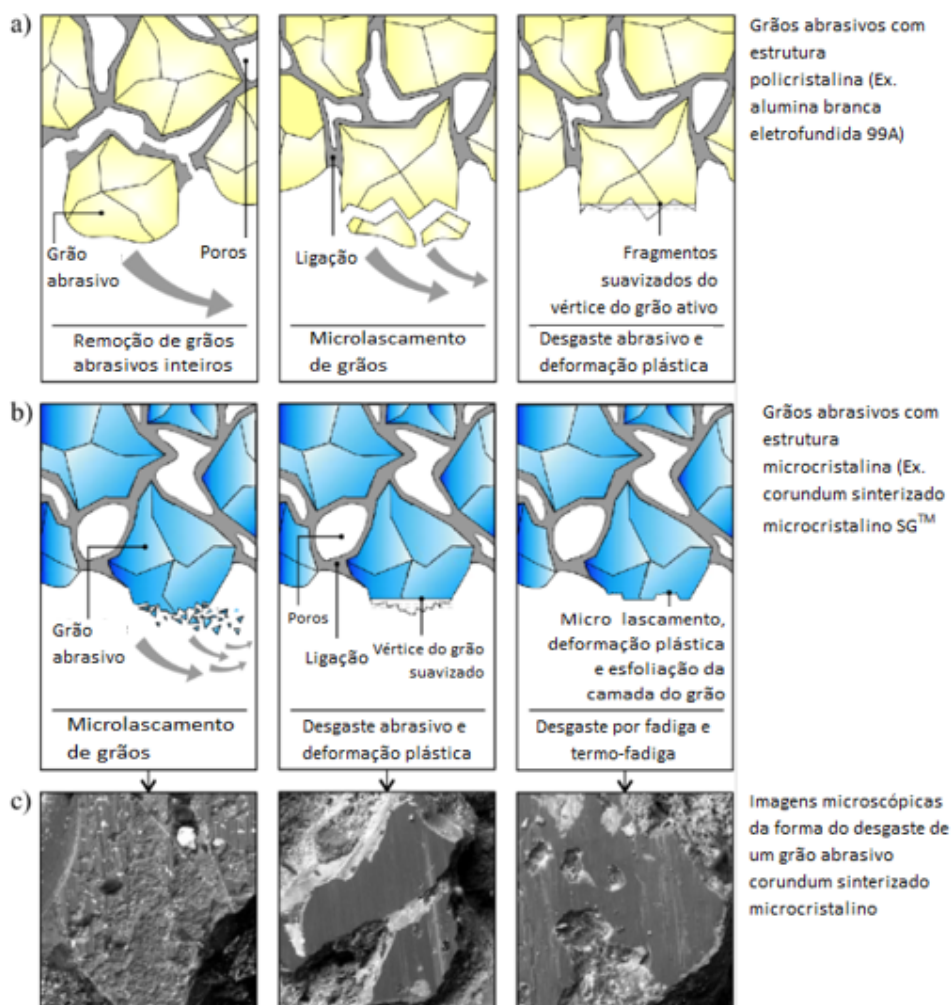
Fonte: adaptada de (NORTON SAINT-GOBAIN, 2015)

Abrasivos de sol-sel ou seeded-sel apresentam vantagens significativas em relação ao eletrofundido, particularmente em termos de vida e são de menor custo de aquisição que os superabrasivos. Quando usados corretamente podem resultar em maiores taxas de remoção volumétrica, forças reduzidas e temperatura de superfície de trabalho mais baixa durante a retificação, podendo ser frequentemente uma

alternativa viável ao invés do CBN, particularmente no custo inicial dos rebolos (WEBSTER; TRICARD, 2004).

Os processos de desgaste (lascamento) de grãos de óxido de alumina poli e microcristalinos podem ser comparados, abaixo na figura 2.15. No caso dos grãos eletrofundidos (figura 2.15 a), com o aumento da força atuante sobre o grão, ocorrem lascamentos de partes maiores devido à propagação das fraturas segundo os planos de clivagem, enquanto que no grão microcristalino a propagação de trincas se dá nas suas interfaces de sinterização entre os micro grãos, fazendo com que os grãos mantenham suas formas por mais tempo (figura 2.15b) (JACKSON; MILLS, 2004; NADOLNY, 2014).

Figura 2.15 Grãos eletrofundidos (a) Microcristalino (b) mecanismo de desgaste dos grãos e (c) imagens dos desgastes dos grãos microcristalinos

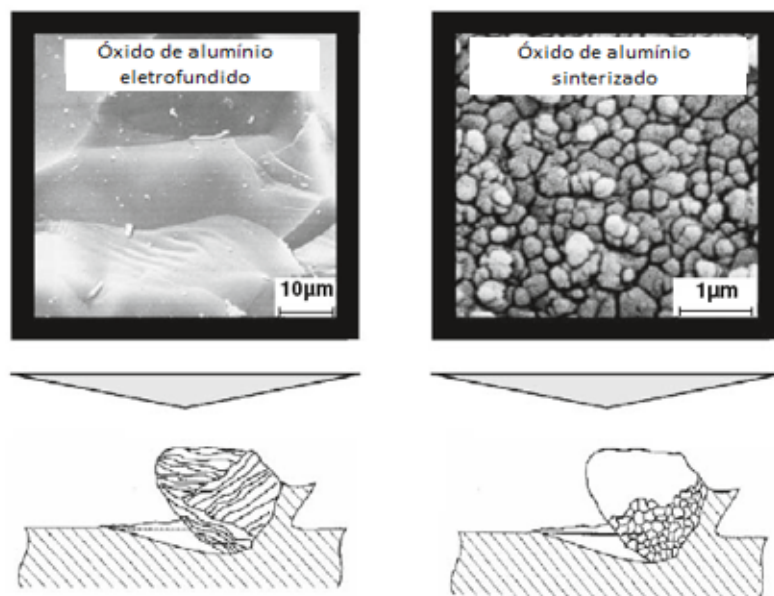


Fonte: Adaptado de (NADOLNY, 2014)

Verifica-se nos grãos microcristalinos que se têm a predominância de micro desgastes com carregamentos térmicos ou mecânicos e uma frequência maior de renovação dos gumes dentro do grão. Estas características permitem que o processo de retificação consiga menores desgastes radiais de rebolos e maiores taxas de retificação. O processo de grãos sinterizados microcristalinos sendo desgastados são possíveis de serem observados nas imagens microscópicas (figura 2.15c) após retificação cilíndrica interna em aço 100Cr6 (NADOLNY, 2014).

A estrutura do grão microcristalino resulta em um comportamento mais favorável de fratura para o processo de retificação comparado com grão convencional eletrofundido. Grãos eletrofundidos possuem planos de fraturas, nos quais partículas relativamente grandes se desprendem, sob tensão, figura 2.16. Devido à sua estrutura microcristalina o seeded-gel não possui esses planos de deslizamentos. Como resultado, apenas partículas relativamente pequenas se soltam e o grão mantém a aresta de corte (KLOCKE, 2009).

Figura 2.16 Comparação de microestrutura e propriedades de fratura do eletrofundido e microcristalino sol-gel sinterizado



Fonte: Adaptado (KLOCKE, 2009)

As propriedades térmicas mais cruciais de um material de grão são a sua condutividade térmica, ponto de amolecimento da pressão e ponto de fusão. A condutividade térmica é uma medida da capacidade de um material de equilibrar as

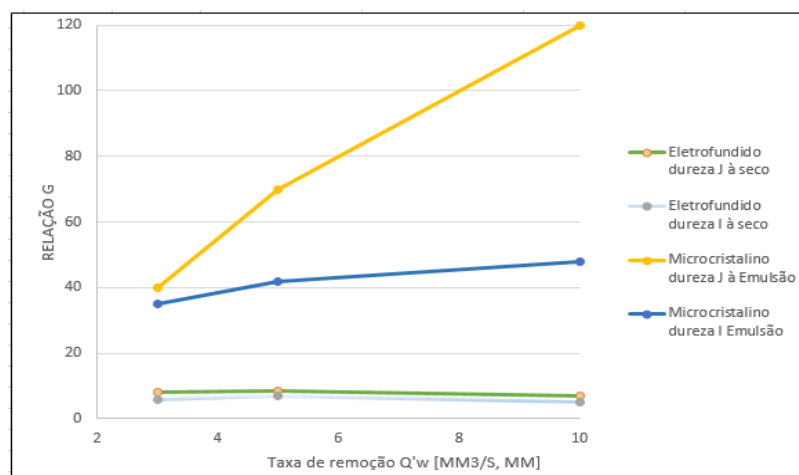
diferenças de temperatura, ou seja, para transferir a temperatura. Se for assumido que um grão individual é esticado com um fonte de calor puntiforme devido à formação de cavacos na sua aresta de corte, se a condutividade da temperatura for boa, o calor adicionado é distribuído rapidamente através do grão. Portanto, o aumento aplicado na temperatura atinge o equilíbrio rapidamente (KLOCKE, 2009).

Para comparar os desempenhos de rebolos, calcula-se índices como força de retificação, energia específica de retificação, rugosidade superficial e relação G com base em trabalho experimental e os resultados obtidos indicam que o rebolo de grãos microcristalinos tem uma performance melhor que os rebolos de grãos eletrofundidos (ERANKI; XIAO; MALKIN, 1992; SELVAKUMARAN et al., 2018).

Foi estabelecido por Lindsay, (1989), que a relação G (relação entre o volume de material removido da peça pelo volume de desgaste do rebolo) para rebolos com composições de grãos microcristalinos para a retificação de aços endurecidos em ensaios entre desgaste radial tem um aumento considerável de 5 a 17,5 vezes dependendo da taxa de retificação comparados com grãos eletrofundidos. Com base em experimentos num processo de retificação plana com rebolo de diâmetro 175 mm e velocidade periférica de 55 m/s. O gráfico 2.2 mostra a taxa de remoção de material Q'_w ($\text{mm}^3/\text{mm.s}$, mm) para os rebolos de óxido de alumínio branco eletrofundido e microcristalino na retificação a seco do aço 100Cr6 com dureza 65 HRc. A relação G se apresentou melhor para os rebolos de dureza J e demonstra que o rebolo de grãos microcristalinos sol-gel teve melhor resultado que o eletrofundido no caso I de 467-1011% e no J de 363-1614%.

Altas velocidades de corte e baixas taxas de remoção de material levam a um baixo impacto ambiental global, devido ao menor desgaste da ferramenta. As velocidades periféricas de retificação com rebolos vitrificados aumentaram significativamente, na década de 1980 a velocidade de 60 m/s foi considerada como de alta velocidade. Nos anos de 1990 tornou se comum na produção retificadoras com velocidades periféricas de 80 m/s, nos anos 2000 a retificação com velocidades periféricas de 120 m/s esteve em evidência e também pôde-se observar máquinas trabalhando até com velocidades periféricas superiores a 200 m/s na indústria para retificar ferro fundido (WINTER et al., 2015) (MARINESCU et al., 2016).

Gráfico 2.2 Avaliação da relação G com o aumento da taxa de retificação Q'_w para rebolos compostos apenas grãos de eletrofundidos e de microcristalino sol-gel



Fonte: Adaptado de, (LINDSAY, 1989).

No que diz respeito à seleção de rebolo vitrificado em aplicações em altas taxas de remoção de material, aconselha-se usar abrasivos microcristalinos sol-gel. Ao contrário, em baixas taxas de remoção de material deve se continuar a usar o óxido de alumínio. Para determinadas aplicações intermediárias, os abrasivos monocristalinos podem ser vantajosos (JACKSON; MILLS, 2000).

As forças de corte inferiores do grão microcristalino em comparação com as do eletrofundido podem ser atribuídas à formação de óxido líquido na fase de deformação plástica na interface de grão, pois os grãos eletrofundidos exibem fraturas transcristalinas ao longo de planos de clivagem quando submetidos a forças. As arestas de clivagem afiadas fornecem pouco espaço para a formação de planos de carregamento de forças e é caracterizado por um linear aumento de desgaste com o aumento da força de retificação (MAYER et al., 2006).

Os efeitos das forças tangenciais e normais para os rebolos de grãos eletrofundidos e microcristalinos devem ser considerados, pois, quando a velocidade de corte aumenta, ocorre uma redução nas forças tangencial e normal. Isto pode ser atribuído ao fato de que o cavaco não deformado reduz nas maiores velocidades de corte. É observado que as forças de retificação aumentam com o aumento da profundidade de corte radial (SELVAKUMARAN et al., 2018).

No caso dos rebolos de grãos microcristalinos as forças se apresentam mais baixas que nos de grãos eletrofundidos devido ao tamanho muito pequeno do cristal

de sol-gel que tem alta capacidade de micro fraturar-se (alta friabilidade) e dureza mais elevada, que contribuem para a redução de forças atuantes (SELVAKUMARAN et al., 2018). O desgaste dos grãos microcristalinos estão relacionados com o sistema de refrigeração durante o processo de retificação (MANIMARAN; KUMAR, 2013; SELVAKUMARAN et al., 2018).

A morfologia dos cavacos bem como a condição da superfície do rebolo antes e após a retificação permite formular conclusões plausíveis sobre o efeito dos fenômenos de desgaste em rebolos com grãos abrasivos sol-gel na retificação do aço 100Cr6 (NADOLNY; KAP, 2016).

2.3.2 Rebolos superabrasivos

Os materiais utilizados para a fabricação deste tipo de rebolo são o nitreto cúbico de boro (CBN) ou diamante, de material abrasivo sintético o CBN satisfaz as características de um abrasivo de maneira quase ideal. O CBN é obtido através da transformação alotrópica do nitreto de boro hexagonal, mediante elevadas temperaturas e pressões. A alta dureza do grão de CBN, juntamente com sua extrema resistência ao desgaste, capacidade térmica e estabilidade química, permitiu que a tecnologia de retificação de peças metálicas fosse levada a um passo à frente em relação a sua situação convencional (LEME, 1999; MALKIN; GUO, 2008).

Em condições de temperatura ambiente, o CBN apresenta-se como um dos materiais mais duros que se conhece. Comparando com o diamante sintético o CBN possui uma maior estabilidade térmica, uma vez que a queda da dureza do diamante com a temperatura é tão brusca a partir dos 500 °C, que em 800 °C ela é inferior à do CBN sob a mesma temperatura (BERTALAN, 1997).

Rebolos de CBN permitem o uso de velocidades periféricas em aplicações industriais superiores a 200 m/s, para a qual apresentam melhores resultados. Outra vantagem do CBN é o fato de ser um excelente condutor de calor. Em processo de retificação uma parcela significativa do calor gerado no processo é transferida para o abrasivo e para a ferramenta, ao invés de ser transferida ao componente usinado. Assim, é interessante salientar que somente em torno de 20% da energia total gerada é transferida como calor para a peça de trabalho (LEME, 1999; MALKIN; GUO, 2008). A retificação com CBN é empregada atualmente para a usinagem de aços-

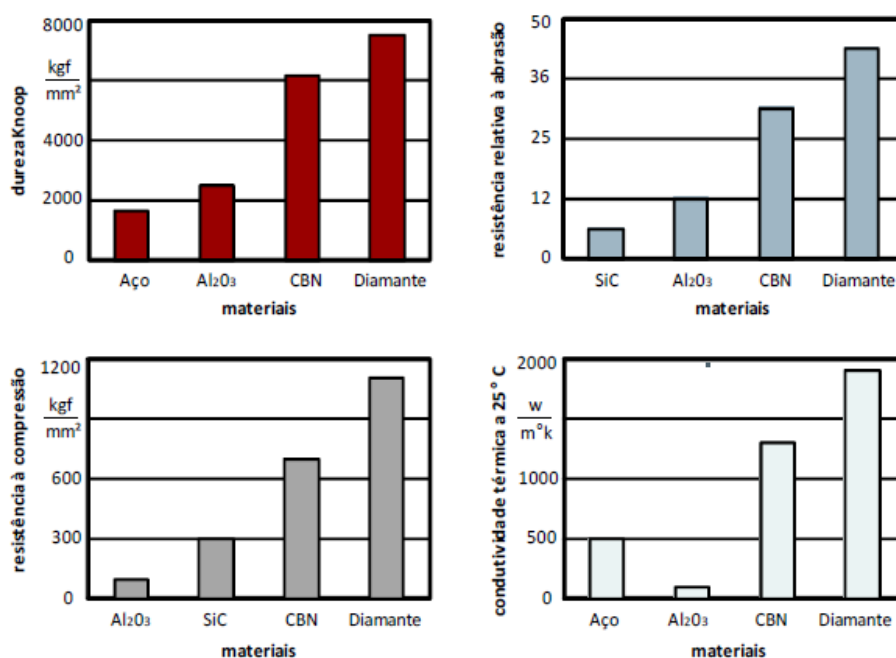
ferramentas e aplicada mais extensivamente a outros materiais ferrosos e ligas aeronáuticas (MALKIN; GUO, 2008).

Diamante é a forma alotrópica cristalina do carbono, com estrutura cúbica compacta na forma tetraédrica, a qual apresenta fortes ligações entre os seus cristais. Tal forma cristalina é instável e passa espontaneamente para a forma hexagonal grafita quando submetido a temperaturas elevadas (KÖNIG, 1989).

Diamante natural se forma em condições de pressão extremas e em temperaturas elevadas, durante um longo período de tempo. Aproximadamente 80% dos diamantes naturais são empregados na indústria. Já o diamante sintético pode ser obtido pela transformação alotrópica do elemento carbono, através da ação de um catalisador sob alta pressão e temperatura (LEME, 1999).

Entre as propriedades mais relevantes do diamante sintético como material abrasivo, deve-se citar a sua dureza extrema que não é atingida por nenhum outro material. O gráfico 2.3 apresenta características de alguns materiais, a dureza Knoop do diamante atinge valores de $K100 = 7000$, duas vezes maior que o óxido de alumínio e o carboneto de silício. A grafitização do diamante inicia-se a partir de $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ e sua oxidação após $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$, o que limita a aplicação do diamante em materiais ferrosos.

Gráfico 2.3 Características físicas de alguns materiais



Fonte: Adaptado de (BENINI, 2011).

As ligas empregadas nos rebolos superabrasivos podem ser resinóides, vitrificadas ou metálicas (KÖNIG, 1989).

Ligas metálicas subdividem-se em ligas sinterizadas e as eletro-depositadas. Ligas sinterizadas são predominantemente feitos de níquel. As ligas metálicas utilizadas com superabrasivos são as mais resistentes ao calor, quando comparadas às ligas de resina, e mais resistentes ao impacto, quando comparadas as ligas vitrificadas (KÖNIG, 1989).

As ligas sinterizadas tem um processo de fabricação a partir do pó metálico que é misturado com os grãos abrasivos. A sinterização ocorre em fornos elétricos com atmosfera levemente redutora em temperaturas que atingem até 800 °C. Após este processo, ocorre a fase de compactação em prensas hidráulicas (LEME, 1999).

Retificação utilizando rebolos de CBN a altas velocidades pode reduzir sensivelmente os custos de produção quando comparados com rebolos convencionais (JACKSON et al., 2001).

Na tabela 2.1 é possível observar as propriedades dos grãos microcristalinos sol-gel e CBN (MALKIN; GUO, 2008).

Tabela 2.1 Propriedades do grão Óxido de Alumínio microcristalino sol-gel e CBN

Nome	Oxido de Alumínio Microcristalino sinterizado (Seeded-gel)	Nitreto Cubico de Boro (CBN)
Composição Química	Al ₂ O ₃ 95 - 99% MgO/Fe ₂ O ₃ 0 - 5%	B ~43,6% N ~56,4%
Tamanho do Grão	<1µm	de ~10µm (Monocristalino) até <1µm (Microcristalino)
Forma	Protuso, bastante afiado	Irregular, bastante afiado
Densidade	3,87g/cm ³	3,48g/cm ³
Dureza Knoop	21,5 Gpa	42 - 54 Gpa
Ductibilidade	3,7 MPa m ^{1/2}	-
Tenacidade a fratura	3,5 - 4,3 MPam ^{1/2}	3,7 MPam ^{1/2}
Coeficiente de atrito	0,19	0,19
Coeficiente de condução térmica	27 - 35 W/mK	240 - 1300 W/mK

Fonte: Adaptado de (MALKIN; GUO, 2008).

Considerando a liga metálica eletro-depositada, normalmente de níquel, serve para a fixação de apenas uma camada de grãos abrasivos. A ancoragem dos grãos fica tão firme que estes podem até ficar 70% expostos, o que possibilita espaços maiores para alocação de cavacos e agressividade da ferramenta. O processo possibilita a fabricação de ferramentas com perfis complicados através da confecção do corpo com o perfil desejado e posterior cobertura com grãos de CBN (LEME, 1999; MARINESCU et al., 2016).

Há dois benefícios térmicos efetivos dos abrasivos de CBN comparados aos abrasivos convencionais, primeiramente eles retificam com uma mais baixa energia específica e isto permite maiores taxas de remoção e também a condutividade térmica do CBN fornece para os grãos transferência de calor durante a retificação (UPADHYAYA; MALKIN, 2004).

Conforme estudo de Bianchi et al., (2001), concluíram que mesmo sendo a capacidade de corte dos rebolos superabrasivos de CBN superior, quando comparada aos rebolos convencionais, eles não podem ser aplicados a todas as operações de retificação, como exemplo em máquinas que retificam lotes pequenos de peças com diferentes tipos de perfis, o tempo de troca do rebolo ou dressagem de um novo perfil se torna inviável.

2.4 DISCOS DRESSADORES ROTATIVOS

Rebolos de CBN vitrificados são muito mais fáceis de serem perfilados que os rebolos resinóides colados de CBN. Este tem sido um fator importante que leva à sua utilização generalizada no lugar de rebolos de óxido de alumínio convencionais em produção. O método preferido para a dressagem de rebolos de CBN vitrificados é usando um disco de diamante rotativo fino, conforme ilustrado na figura 2.17. O disco dressador rotativo tem normalmente de 100 a 150 mm de diâmetro e de 2 a 3 mm de espessura com um composto de uma camada de diamante na sua periferia, que é produzido por eletro-deposição, deposição química de vapor (CVD), galvanoplastia ou brasagem (MALKIN; GUO, 2008). O disco dressador é rotativo com uma velocidade v_r na mesma direção (+) ou direção oposta (-) da velocidade do rebolo. É dada uma velocidade axial transversal v_d , correspondente ao avanço s_d por rotação do rebolo, dada pela equação 2.12. A fim de dressar uma profundidade a_r (f_{rd}) da superfície do

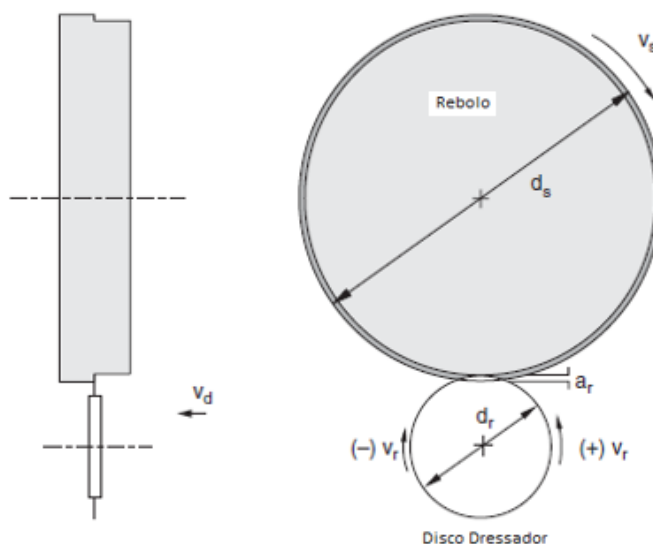
rebolo. Condições típicas de dressagem utilizam relações de velocidades v_r / v_s de valores entre 0,4 e 0,6 na mesma direção (MALKIN; GUO, 2008).

$$S_d = \pi \cdot d_s \cdot v_d / v_s \quad (2.12)$$

Uma variável importante na dressagem com ferramentas de dressagem rotativas é a relação de velocidade q_d , definida como a relação entre a velocidade periférica do disco dressador e a velocidade periférica do rebolo, como mostra a equação 2.13, para concordante o valor é positivo e para discordante o valor é negativo (MALKIN; GUO, 2008).

$$q_d = v_r / v_s \quad (2.13)$$

Figura 2.17 Disco dressador rotativo



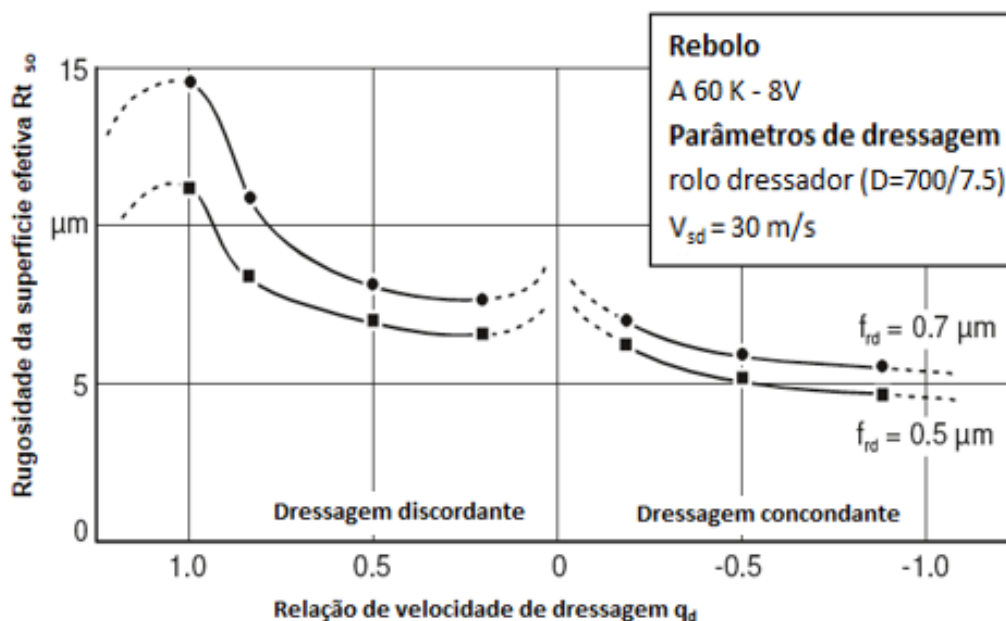
Fonte: Adaptado de (MALKIN; GUO, 2008).

A partir da superposição do rolo de dressagem e do rebolo, os diamantes de dressagem descrevem, grosseiramente, o perfil do rebolo. A relação do movimento pode ser concordante ou discordante. Com o aumento ou a redução da velocidade periférica do dressador se tem o incremento ou a redução respectivamente da relação de velocidade de dressagem, figura 2.20. Dressagem com baixa relação de velocidades e alta sobreposição da dressagem causa microfaturas dos grãos. A

relação de velocidade q_d exerce influência considerável na superfície efetiva rugosidade do rebolo (AZIZI; REZAEI; RAHIMI, 2010).

A relação de velocidade de dressagem superior produz menos asperezas do rebolo enquanto para baixa relação de velocidade crescente (para $q_d = +1$) leva para uma topografia de rebolos cada vez mais grossa. Esta relação é representada no gráfico 2.4 para profundidades de dressagem f_{rd} de $0,5 \mu\text{m}$ e $0,7 \mu\text{m}$ (KLOCKE, 2009).

Gráfico 2.4 Relação da velocidade de dressagem



Fonte: Adaptado (KLOCKE, 2009)

2.5 FLUIDOS DE LUBRI-REFRIGERAÇÃO

Os processos de corte e atrito envolvidos na retificação geram grandes fluxos de calor, que só podem ser removidos em pequenas quantidades de cavacos e, assim, podem levar a um estresse térmico considerável na peça de trabalho e na ferramenta. Na retificação, o lubri-refrigerante deve cumprir as tarefas primárias e secundárias, as duas funções principais são (KLOCKE, 2009):

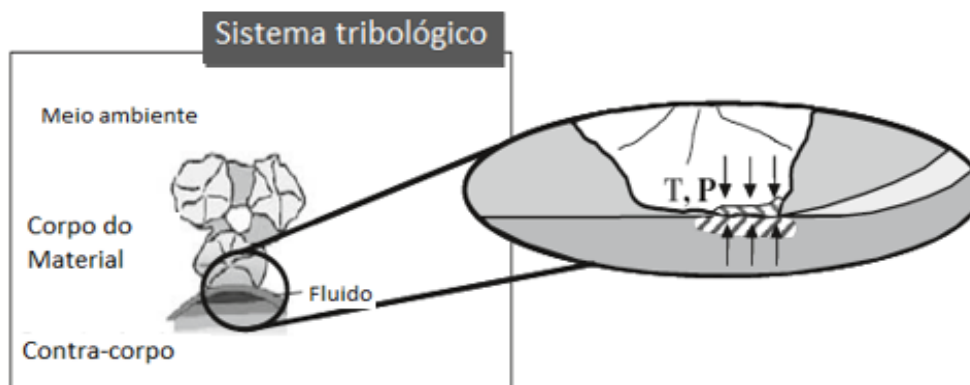
1. Redução do atrito entre o grão abrasivo e a peça de trabalho e entre o ligante e a peça formando um filme de lubrificação estável;
2. Resfriamento da zona de contato e da superfície da peça de trabalho absorvendo e transportando calor.

Funções secundárias específicas incluem:

1. Limpeza do rebolo e da peça de trabalho;
2. Transporte de cavacos do local de usinagem;
3. Aumento da resistência à corrosão tanto para a máquina quanto para o material da peça de trabalho.

No processo de retificação, todos os componentes envolvidos, material do grão, como o corpo, o material da peça de trabalho como o contra corpo, lubri-refrigerante como a substância intermediária e ar como o meio ambiente, formam um sistema tribológico, figura 2.18. Assim, a fim de otimizar a lubri-refrigeração do sistema, todos os componentes envolvidos, bem como a carga e a pressão devem ser considerados (KLOCKE, 2009).

Figura 2.18 Sistema tribológico de retificação



Fonte: Adaptado (KLOCKE, 2009)

Além de resfriar o processo, o lubri-refrigerante também tem a função de alterar as condições de atrito entre o material do grão e o material da peça, trazendo vantagens, e assim, diminuindo o desgaste do rebolo em geral. As propriedades físicas e químicas dos lubri-refrigerantes determinam sua eficácia em contato tribológico (KLOCKE, 2009). Estudo de Souza et al., 2004, concluíram que o uso de óleo integral em processos com rebolo de CBN reduz os valores de desvios de circularidade e da taxa de desgaste do rebolo devido a sua alta capacidade de lubrificação, da redução do atrito e do aquecimento na zona de retificação.

Ao reagir com o lubri-refrigerante no contato podem surgir camadas intermediárias que podem ajudar a separar as superfícies e reduzir o atrito. O lubri-

refrigerante tem assim uma influência essencial na condição de atrito entre o corpo e seu contra corpo e, portanto, também afeta o processo de formação de cavaco e desgaste do rebolo (KLOCKE, 2009).

Óleos usados como lubri-refrigerantes podem levar a formação considerável de névoa de óleo, especialmente em altas velocidades de corte (KLOCKE, 2009).

Considerando apenas os fatores ajustáveis (rebolos e fluidos para metais) a relação G foi melhorada significativamente usando rebolos com maior concentração de grãos microcristalinos sol-gel alumina ou usando emulsão sintética contendo extrema pressão de lubrificação. A energia específica foi reduzida significativamente pela interação de rebolos microcristalinos sol-gel e emulsão sintética contendo lubrificantes de extrema pressão. Usando ambos em uma retífica com rigidez, uma condição de retificação foi alcançado que anteriormente era pensado possível apenas com rebolo superabrasivo muito duro e óleo de corte não diluído (YOON; KRUEGER, 1999).

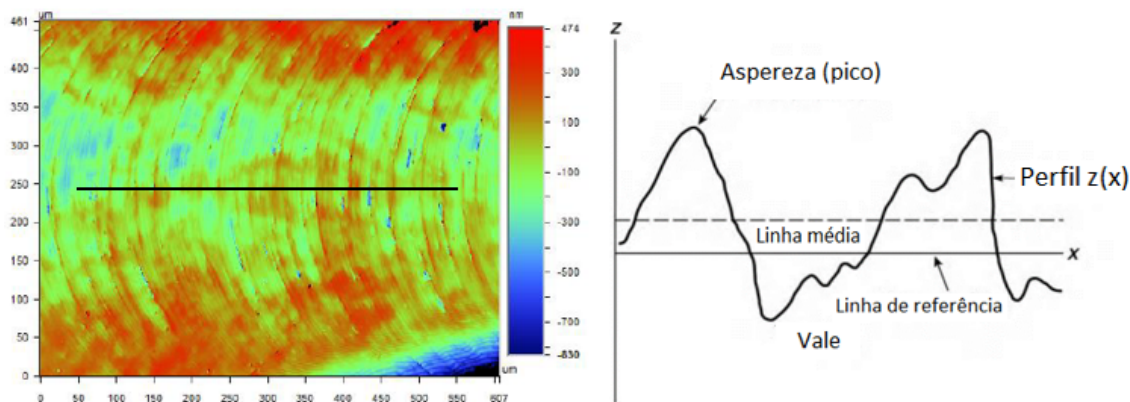
Na retificação a seco ocorreu elevada temperatura causada pela abrasão dos grãos do rebolo na superfície da peça. A temperatura na zona de contato foi diminuída como resultado da aplicação de refrigerante (NADOLNY, 2012).

O tipo de refrigeração e velocidades periféricas diferentes utilizadas durante a retificação tem efeitos no acabamento da superfície, nas forças de retificação, na micro dureza da superfície e na tensão residual da peça (BEN FATHALLAH et al., 2009)

2.6 RUGOSIDADE Sa

Geralmente a qualidade de uma superfície usinada é classificada apenas em termos do parâmetro de rugosidade. Os valores podem ser expressos por Sa. O parâmetro Sa consiste na média aritmética de todas as coordenadas de um perfil, dentro de um período de amostragens e depois de filtrados os desvios de forma, dentro de uma região (medição 3D). O Ra é o parâmetro semelhante porém em medição 2D (BHARAT BHUSHAN, 2013). Conforme a figura 2.19.

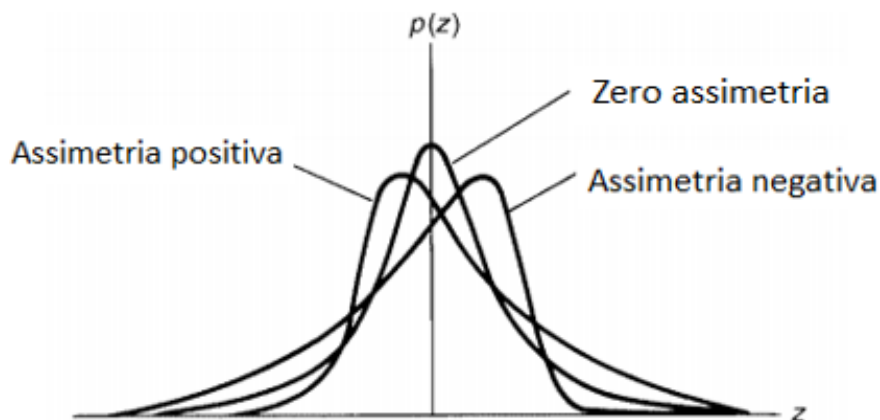
Figura 2.19 Rugosidade Sa e Ra



Fonte: Adaptado (BHARAT BHUSHAN, 2013)

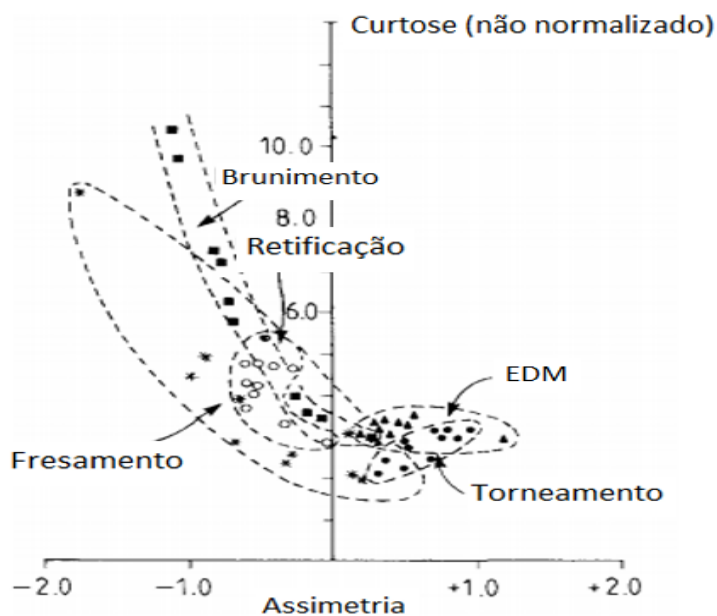
2.7 ASSIMETRIA S_{sk}

Assimetria é um parâmetro útil na definição de variáveis com uma propagação assimétrica e representa o grau de simetria da função densidade, isto é, representa a assimetria da superfície em comparação com uma distribuição ideal (BHARAT BHUSHAN, 2013). Utilizada para monitorar os tipos de desgaste, para $S_{sk} > 0$ predominância de picos e para $S_{sk} < 0$ predominância de vales, indicação conforme figura 2.20. Os típicos resultados de desenvolvimento dos vários tipos de processos de fabricação são mostrados na figura 2.21 para assimetria e curtose.

Figura 2.20 Assimetria S_{sk} 

Fonte: adaptado (BHARAT BHUSHAN, 2013)

Figura 2.21 Assimetria e Curtose por processos

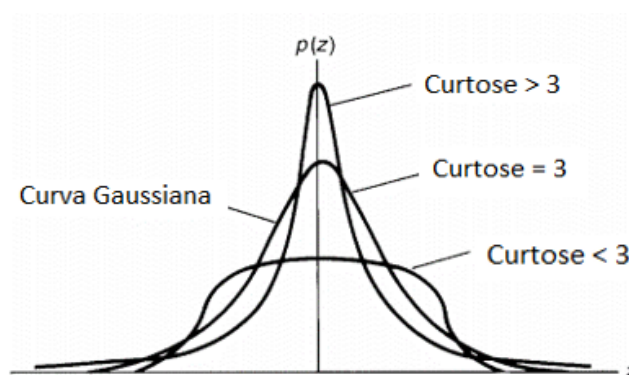


Fonte: adaptado (BHARAT BHUSHAN, 2013)

2.8 CURTOSE Sku

Representa o desvio padrão da superfície em comparação com uma distribuição ideal. Permite avaliação ainda mais rápida do desgaste (por ser sensível a picos e vales que fogem da média – expoente 4), $Sku > 3$ presença de picos e vales excessivamente altos e $Sku < 3$ falta de picos e vales (BHARAT BHUSHAN, 2013). Conforme mostra a figura 2.22.

Figura 2.22 Curtose Sku



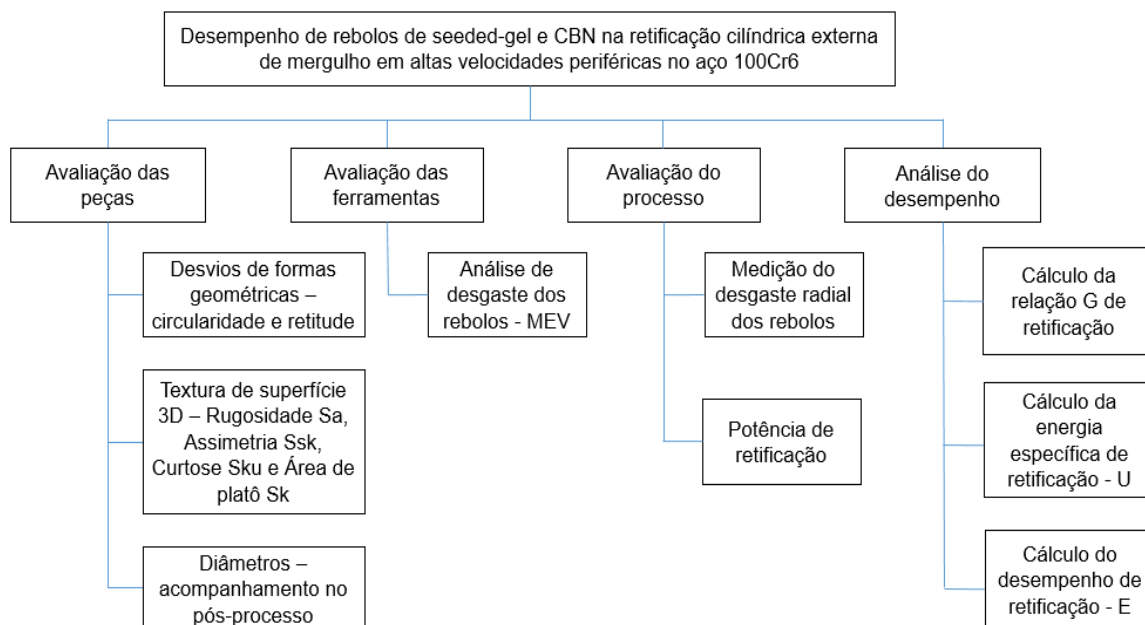
Fonte: adaptado (BHARAT BHUSHAN, 2013)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Serão apresentados os principais aparatos e métodos experimentais responsáveis para a aquisição de dados durante processo e pós-processo, que permite avaliar o desempenho dos rebolos e os desvios de formas geométricas. Na figura 3.1 está o fluxograma dos assuntos abordados neste trabalho.

Os experimentos foram realizados no ambiente fabril da empresa Robert Bosch planta de Curitiba.

Figura 3.1 Fluxograma dos assuntos abordados neste trabalho



Fonte: autor

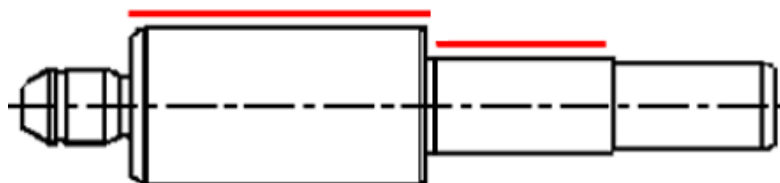
3.1 MATÉRIA-PRIMA

O aço 100Cr6 é muito usado para pequenos e médios componentes de rolamentos, regularmente usado para outros componentes de máquinas e de sistemas de injeção que requerem alta resistência à tração e alta dureza. Os elementos do material estão apresentados na Tabela 2. Os experimentos foram conduzidos com este material, com amostras tendo dois diferentes diâmetros retificados $\varnothing 4,82 \times 8,9$ mm e $\varnothing 2,92 \times 6,1$ mm, somando 15 mm de comprimento retificado num total de 23,5 mm. Na figura 3.2 estão indicados com linha vermelha o local a ser retificado.

Tabela 3.1 Composição química do aço 100Cr6 (60 a 62HRc) - DIN 100Cr6 (1.3505), AISI 52100

Elemento	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V	Outros
Wt (%)	0,98-1,10	0,25-0,45	0,025	0,025	0,15-0,35	-	1,30-1,60	1,30-1,60	-	-

Figura 3.2 Peça de trabalho



Fonte: Adaptado (autor)

3.2 REBOLOS

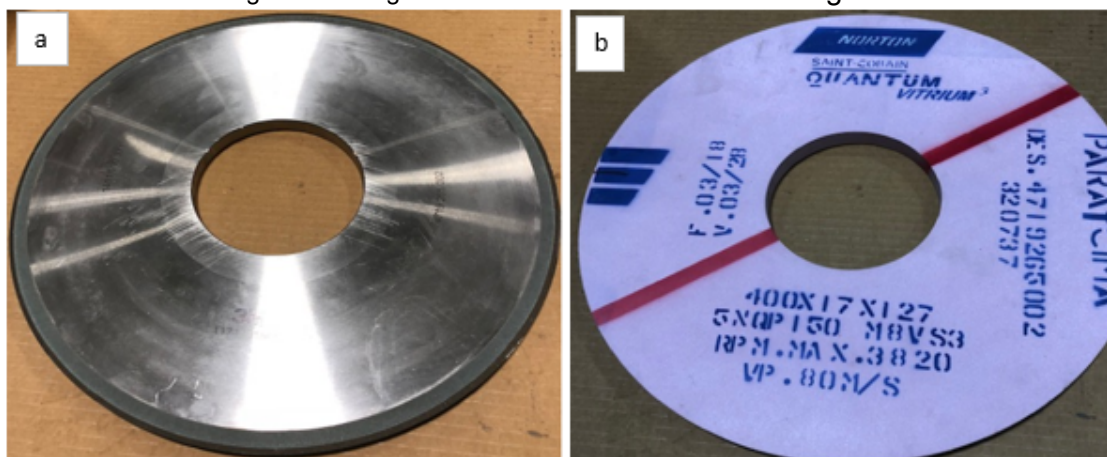
Os testes ocorreram com dois tipos de rebolos, seeded-gel alumina e CBN. As especificações estão na tabela 3.2. A figura 3.3a mostra o rebolo de CBN que foi produzido pela empresa Wendt GmbH em dois diferentes componentes, corpo de aço e camada abrasiva de 8 mm de largura e a figura 3.23b mostra o rebolo de seeded-gel com grão quantum e liga vitrium3 do fornecedor Saint-Gobain Abrasivos. A escolha do rebolo de CBN foi devido a este ser o utilizado na linha de produção desde o desenvolvimento do processo pelo fabricante da máquina e o rebolo de seeded-gel foi definido com base em aplicações na mesma empresa.

Tabela 3.2 Características gerais dos rebolos

Nome	Rebolo "Seeded-gel"	Rebolo "CBN"
Fornecedor	Saint-gobain 5NQP150M8VS3	Wendt J13X.000.012-M64- VR150N/20/T-127
Especificação técnica		
Tamanho de grãos	70 a 91 μm	65 a 85 μm
Composição	50% grãos 25A 50% grãos SG (5NQP)	100% grãos J13X
Tipo de rebolo	Rebolo reto	
Dimensões	Diâmetro externo 400mm Diâmetro interno 127mm Espessura 17mm	

Fonte: Adaptado (autor)

Figura 3.3 Imagens dos rebolos - CBN "a" e seeded-gel "b"



Fonte: Adaptado (autor)

3.3 DISCO DRESSADOR ROTATIVO

O sistema de dressagem com fuso e disco dressador conforme figura 3.4 são do fornecedor Dr. Kaiser, com possibilidade de rotação de até 15000 rpm.

Figura 3.4 Imagem do dispositivo dressador

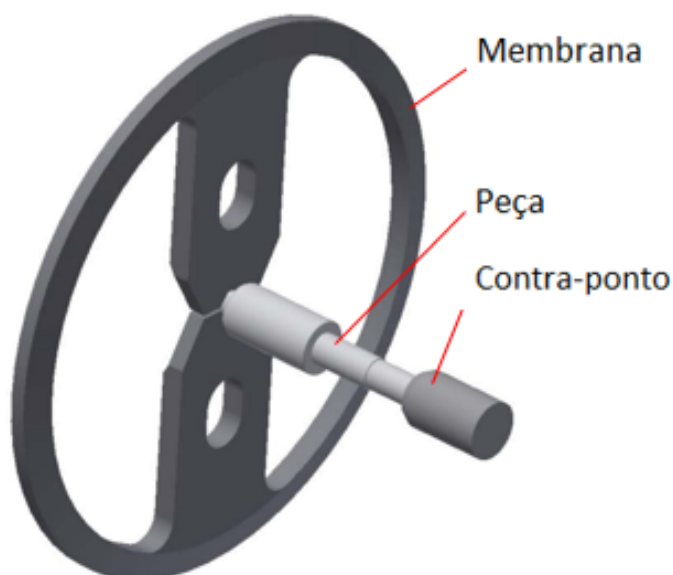


Fonte: Adaptado (Dr.KAISER, 2019)

3.4 DISPOSITIVO DE FIXAÇÃO DA PEÇA

O sistema de fixação da peça é composto de uma membrana de fixação no lado do cabeçote porta-peça e um contraponto móvel, conforme mostra a figura 3.5.

Figura 3.5 Imagem do sistema de fixação da peça



Fonte: Adaptado (autor)

3.5 MEDIÇÃO EM PROCESSO

O sistema processador e indicador da medição em processo é o ES400 da Movomatic e utiliza como apalpador na peça de trabalho o TMP91, conforme mostra a figura 3.6.

Figura 3.6 Imagens do dispositivo eletrônico e eletromecânico da medição em processo

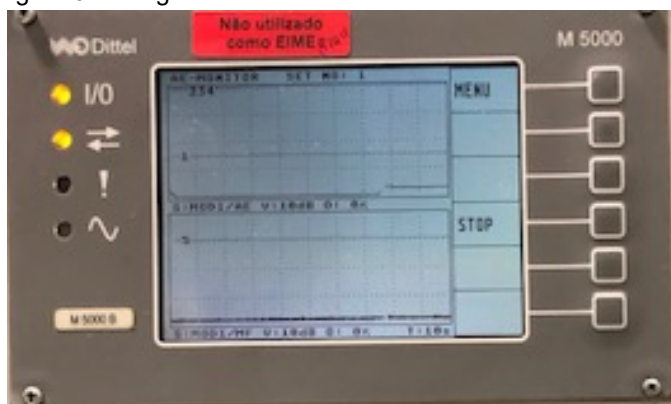


Fonte: Adaptado (autor)

3.6 BALANCEADOR DE REBOLO

O dispositivo M5000 do fornecedor Dittel que controla o balanceamento automático do rebole e também controla o nível de ruído durante a retífica e dressagem, conforme mostra a figura 3.7.

Figura 3.7 Imagem do controlador do balanceamento do rebolo



Fonte: Adaptado (autor)

3.7 REFRIGERAÇÃO DA PEÇA

A refrigeração da peça foi feita com o óleo integral ECOCUT HFN 5B do fornecedor Fuchs e o tipo do bico de refrigeração é o “bico de pato” conforme mostra a figura 3.8, fixado no cabeçote porta peça para os experimentos com rebolo de seeded-gel e CBN. A pressão da rede é de 8 bar e a vazão de óleo de 20 litros / minuto.

Figura 3.8 Imagem do tipo bico de refrigeração da peça



Fonte: Adaptado (GRINDAIX GMBH, 2019)

3.8 RETÍFICA CILÍNDRICA EXTERNA

Os experimentos foram executados utilizando uma Retífica Cilíndrica Externa marca Bahmueller modelo XPRO-HGS com comando CNC 840D da Siemens, sistema de alimentação automático e velocidade periférica do porta rebolo de até 120

m/s (figura 3.9). Este equipamento é utilizado para a fabricação do pino do induzido, componente do injetor “CRIN”.

Figura 3.9. Imagem da Retifica Cilíndrica Externa



Fonte: Adaptado (autor)

3.9 DISPOSITIVO PARA OBTENÇÃO DA POTÊNCIA DE RETIFICAÇÃO

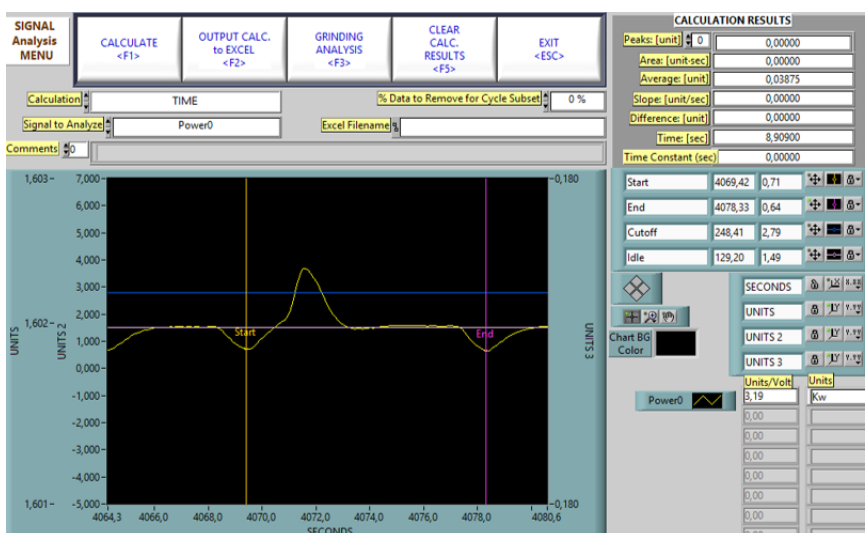
Para gravação dos valores de potência (Kw) no processo de retificação foi utilizado o equipamento FIS (Field Instrumentation System), conectado ao motor de acionamento do rebolo. Este equipamento também controlou o movimento do cabeçote porta-rebolo durante a retificação e está apresentado na figura 3.10 e onde é possível observar cada um dos ciclos de retificação monitorados, conforme figura 3.11.

Figura 3.10 Equipamento FIS (fornecedor Saint-Gobain)



Fonte: Adaptado (NORTON SAINT-GOBAIN, 2015)

Figura 3.11 Potência de retificação (KW)



Fonte: Adaptado (autor)

3.10 MEDIÇÃO DE ERROS DE FORMAS GEOMETRICAS

Para as medições dos erros de formas geométricas, desvios de circularidade e retitude, foi utilizado o equipamento de medição MFU100 da Mahr. Foram examinadas as circularidades no meio e nas extremidades no diâmetro 4,7mm (figura 3.12a) e a retitude em 4 posições distanciadas a cada 90°, conforme apresentado na figura 3.12b. Para ajuste do equipamento foram utilizadas as seguintes condições: - apalpador de esfera diâmetro 0,5mm; - filtro polar 50 UPR e Gauss 50%; - filtro linear 0,8mm e Gauss 50%; - Intervalo polar 0,1°; - intervalo linear 0,005mm; - método de avaliação Polar MZC e Linear MZS.

Figura 3.12 Posição de medição de formas geométricas



Fonte: Adaptado (autor)

3.11 MEDIÇÃO ÓTICA 3D

Para as medições dos parâmetros de rugosidade foi utilizado um sistema de medição ótica 3D Alicona Infinite Focus SL (figura 3.13). Foram realizadas as medições de topografia 3D e anisotropia da textura dos componentes retificados. Foram avaliados os parâmetros de altura S_a , de amplitude e forma S_{sk} e S_{ku} e funcional S_k que está relacionado a quantidade de rugosidades que forma o “platô”, numa área de $1000\ \mu\text{m}$ por $500\ \mu\text{m}$, conforme mostra a figura 3.14.

Por meio de variação de foco do instrumento, é possível realizar o escaneamento de toda superfície do componente. Assim cria-se um modelo 3D por meio da sobreposição dos planos de dados coletados durante a medição. Com base no modelo gerado, extrai-se informações como forma, rugosidade, anisotropia de textura e entre outros. A amplitude de superfícies que podem ser medidas é quase ilimitada, garantidas pelo foco do feixe de luz. Para assegurar medições com resoluções adequadas, o instrumento possui 4 opções de ampliações (5 x, 10 x, 20 x e 50 x). Para uma magnificação de 50x, é factível adquirir rugosidade menores que $R_a\ 0,03\ \mu\text{m}$. Foi usada a ampliação de 20x e a área definida por $1000\ \mu\text{m} \times 500\ \mu\text{m}$ com resolução vertical 40nm (BRUKER ALICONA, 2019).

Figura 3.13 Imagem do equipamento Alicona Infinite Focus SL



Fonte: Adaptado (autor)

Figura 3.14 Posição de medição de textura da superfície



Fonte: Adaptado (autor)

O Lc 800 μm foi o filtro utilizado com o objetivo de eliminar a parte da ondulação para que o valor do perfil de rugosidade obtido seja o mais correto. A figura 3.15 mostra o comprimento do perfil utilizado, o Ra mínimo e o Ra máximo. Entretanto foi utilizado o parâmetro Sa, por ser mais confiável pois é um parâmetro tridimensional. A figura 3.16 mostra a resolução vertical quando se utiliza a objetiva com aumento de 20 vezes, definições conforme a norma ASME B46.1-2002 e demais informações conforme ISO 11562.

Figura 3.15 Imagem do filtro utilizado

Ra min	Ra max	Lc	Profile length
-	0.02 μm	80 μm	0.4mm
0.02 μm	0.1 μm	250 μm	1.25mm
0.1 μm	2 μm	800 μm	4mm
2 μm	10 μm	2500 μm	12.5mm
10 μm	80 μm	8000 μm	40mm

Fonte: Adaptado (autor)

Figura 3.16 Imagem da resolução vertical

Ra	$\sim R_z$	Vertical Resolution	Objective
5 μm	30 μm	$\leq 2\mu\text{m}$	5x*, 10x, 20x, 50x, 100x
1 μm	6 μm	$\leq 400\text{nm}$	10x, 20x, 50x, 100x
0.5 μm	3 μm	$\leq 200\text{nm}$	10x*, 20x, 50x, 100x
0.1 μm	0.6 μm	$\leq 40\text{nm}$	20x*, 50x, 100x
0.05 μm	0.3 μm	$\leq 20\text{nm}$	50x*, 100x

Fonte: Adaptado (autor)

3.12 MEDIÇÃO DIMENSIONAL

Para o acompanhamento da medição de diâmetros foi utilizado o equipamento Z-Mike 1200 com sistema de leitura à laser (figura 3.17). Este equipamento possui alto desempenho para utilização em laboratório ou na fabricação, de alta precisão e repetibilidade.

Figura 3.17 Imagem do Z Mike

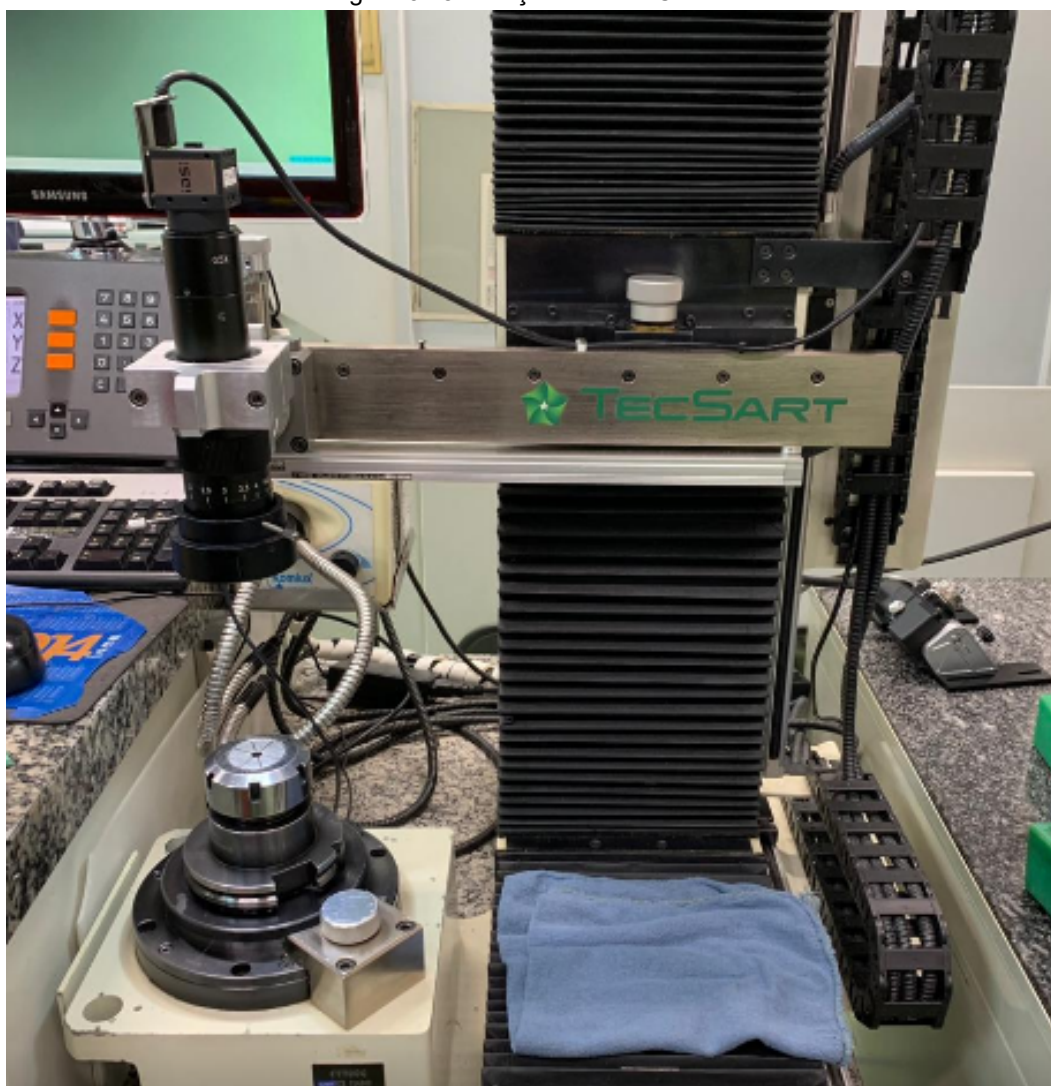


Fonte: Adaptado (autor)

3.13 MICROSCÓPIO ÓTICO

Para obtenção de imagens dos rebolos foi utilizada a máquina de medição ótica de ferramentas TECSART. É um sistema óptico composto por câmara de vídeo e lentes para capturar e ampliar detalhes e especificações do material. Capaz de gravar e integrar fotos e detalhes técnicos, conforme mostra a figura 3.18.

Figura 3.18 Medição ótica TECSART



Fonte: Adaptado (autor)

3.14 MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV)

Para a avaliação das condições dos rebolos de CBN e seeded-gel após os experimentos a $Q'w$ 200 mm³/mm.min e V_s de 80 m/s, houve o exame destrutivo dos rebolos e foi utilizado o MEV FEI Quanta 200 para a obtenção das imagens para a análise. As imagens obtidas para ambos os rebolos permitem com aumento de 100x, 200x, 1000x e 2000x, porém para efeito de comparação entre os rebolos foi utilizado o mesmo aumento. A ideia foi utilizar a caracterização das imagens da superfície dos rebolos para ajudar no entendimento do tipo de desgaste abrasivo ocorrido.

3.15 PARÂMETROS DE RETIFICAÇÃO

Para a retificação das peças foi planejada uma sequência de mergulhos de retificação, iniciando com desbaste (removendo 75% do sobremetal), onde foram utilizadas variações na taxa de remoção específica de material (Q'_w) de 100, 150 e 200 mm³/mm.min, baseados nos parâmetros utilizados por Bianchi et al., (2001). Na sequência vieram avanços de acabamento e acabamento fino etapas que foram controladas pelo Movomatic para garantia dimensional. Demais informações são mostradas na tabela 3.3. As 100 peças foram colocadas em sequência num suporte identificado com o número do experimento.

Tabela 3.3 Parâmetros de retifica

Sequência	Descrição	Remoção de material (%)	Valores			Unidade
	Sobre material	100%	0,12			mm
	Início posição desbaste		0,30			mm
Mergulho 1	Avanço de desbaste Q'w taxa remoção esp mat	75,0%	6,6 100	10,0 150,0	13,2 200	mm/min mm³/mm.min
Mergulho 2	Início posição de acabamento 1 Avanço de acabamento 1	11,7%	0,03 0,8			mm mm/min
Mergulho 3	Início posição de acabamento 2 Avanço de acabamento 2	7,5%	0,016 0,3			mm mm/min
Mergulho 4	Início posição de acabamento 3 Avanço de acabamento 3	2,5%	0,007 0,12			mm mm/min
Mergulho 5	Início posição acabamento fino Avanço de acabamento fino	3,3%	0,004 0,06			mm mm/min
	Rotação da peça (concordante)		980			1/min
	Diâmetro final		4,700±0,001			mm
	Comprimento da peça à retificar		15			mm

Fonte: autor

3.16 PARAMETROS DE DRESSAGEM

Os parâmetros de dressagem não foram alterados para quaisquer dos testes e foram utilizados os dados conforme a tabela 3.4.

Tabela 3.4 Parâmetros de dressagem

Descrição	Dados	Unidade
Fornecedor do fuso	Dr. Kaiser	
Fornecedor do disco dressador	Dr. Kaiser	
Tipo do disco dressador	Disco galvânico	
Tamanho e tipo do grão	D91	
Diâmetro do disco dressador	120	mm
Largura do disco dressador	0,8	mm
Taxa de avanço	65	mm/min
Rotação do rebolo na dressagem	3800	1/min
Rotação do dressador (concordante)	4600	1/min
Incremento de dressagem 1	0,002	mm
Incremento de dressagem 2	0,001	mm
Frequencia de dressagem	50	peças

Fonte: autor

3.17 ESTRATÉGIA DOS TESTES

Visando a realização deste trabalho, foram variados os tipos dos rebolos, seeded-gel e CBN, as taxas de remoção específicas de material (Q'_w) de 100, 150 e 200 mm³/mm.min, baseadas nos limites utilizados por Bianchi et al., (2001) e as altas velocidades periféricas de 60, 70 e 80 m/s, pois são as possíveis para ambos os tipos de rebolos. Esta combinação mostra a quantidade de 18 experimentos que foram planejados, conforme mostra a tabela 3.5. Cada experimento foi executado da seguinte maneira (fluxograma no apêndice A):

- 1 Dressagem;
- 2 Retificação de 50 peças;
- 3 Dressagem;
- 4 Retificação de 50 peças;
- 5 Mudança dos parâmetros para o próximo experimento.

Em cada experimento, como a máquina tem medição em processo, foi anotado o valor da posição do eixo x na primeira e na última peça de cada intervalo de dressagem, para se conhecer o valor do desgaste do rebolo para o lote de 50 peças. Estes valores estão registrados nas tabelas do Apêndice B, cota máquina início e cota máquina final. Esta estratégia foi repetida para os dois intervalos de dressagem para cada teste, também foi registrado separadamente para cada teste com o equipamento FIS o valor de potência de retificação para cada peça. Foi definido a frequência de

dressagem de 50 peças devido ao total de peças disponíveis para os experimentos, custos de manufatura e tempo para a realização dos experimentos.

Nos apêndices C e D estão apresentados os valores de média da relação G, potência, energia específica de retificação e desempenho de retificação para cada um dos experimentos.

Tabela 3.5 Sequência dos experimentos

Número do experimento	Sequencia	Velocidade Periférica (m/s)	Q'w (mm ³ /mm.min)	Rebolo	Quantidade de peças	Frequencia de dressagem	Quantidade de dressagens
1	1	60	100	CBN	100	50	2
2	4	60	150	CBN	100	50	2
3	7	60	200	CBN	100	50	2
4	2	70	100	CBN	100	50	2
5	5	70	150	CBN	100	50	2
6	8	70	200	CBN	100	50	2
7	3	80	100	CBN	100	50	2
8	6	80	150	CBN	100	50	2
9	9	80	200	CBN	100	50	2
10	10	60	100	"Seeded-Gel"	100	50	2
11	13	60	150	"Seeded-Gel"	100	50	2
12	16	60	200	"Seeded-Gel"	100	50	2
13	11	70	100	"Seeded-Gel"	100	50	2
14	14	70	150	"Seeded-Gel"	100	50	2
15	17	70	200	"Seeded-Gel"	100	50	2
16	12	80	100	"Seeded-Gel"	100	50	2
17	15	80	150	"Seeded-Gel"	100	50	2
18	18	80	200	"Seeded-Gel"	100	50	2

Fonte: autor

3.18 ESTRATÉGIA DE EXAMES DAS AMOSTRAS

Foram separadas para exame em laboratório 540 amostras de peças. Em cada um dos 18 experimentos foram segregadas 15 peças de cada intervalo de dressagem, totalizando 30 peças de cada, o número de sequência de cada peça do experimento retirado para exame consta na tabela 3.6. Das características examinadas foram obtidos gráficos onde cada ponto está representado pela média das 30 peças e também pela dispersão com o intervalo de confiança de 95%.

Tabela 3.6 Amostras para exame de erros de formas e textura

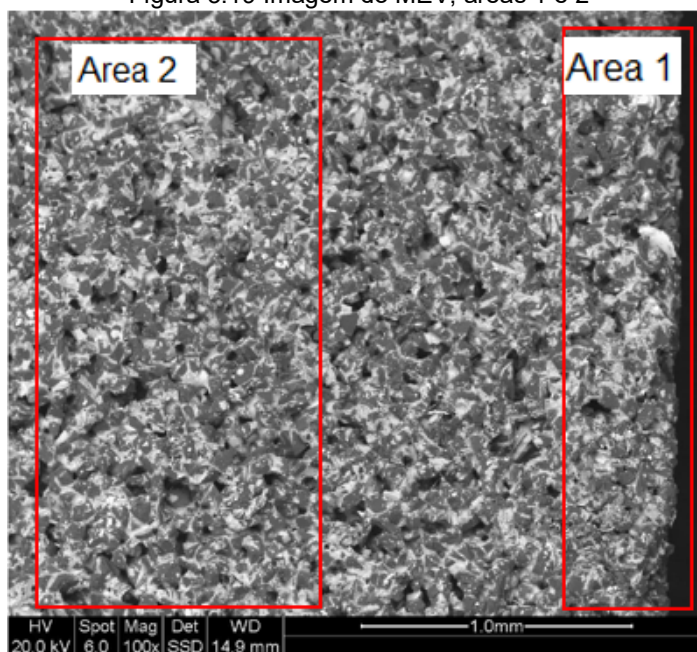
Intervalo de dressagem	Peças para exame														Quantidade (peças)	
1	1	5	8	12	15	19	22	26	29	33	36	40	43	47	50	15
2	1	5	8	12	15	19	22	26	29	33	36	40	43	47	50	15

Fonte: autor

3.18.1 Estratégia de exame no MEV

O último teste realizado com cada rebolo foram os experimentos número “9” para o rebolo de CBN e o número “18” para o de seeded-gel, ambos na velocidade periférica de 80 m/s e taxa de remoção específica de material de 200 mm³/mm.min, isto é, na maior velocidade periférica e maior taxa de remoção específica de material definidos nos parâmetros de processo. Após os experimentos citados os rebolos não foram dressados e para a análise no MEV foi necessário exame destrutivo dos mesmos. Conforme a figura 3.19, a região da área 1, na extremidade do rebolo onde não ocorreu o contato com a peça foi considerada como “após dressagem”, pois é uma região que não estava sujeita aos mecanismos de desgastes abrasivos e na região da área 2 de cada rebolo onde houve o contato com a peça, foi considerada como “após retificar 50 peças” onde foram estudados os mecanismos de desgastes. Isto porque foram utilizados somente um rebolo de cada material para o estudo.

Figura 3.19 Imagem do MEV, áreas 1 e 2



Fonte: autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ERROS GEOMÉTRICOS DA PEÇA

Segundo Shaw (1994), uma única peça de trabalho nunca é perfeitamente cilíndrica, uma vez que pode apresentar erros de circularidade e retitude, que são as principais causas dessa situação cilíndrica não perfeita. Desvios devem ser mantidos sob certas tolerâncias, especialmente no caso de fabricação de eixos. Altos valores podem levar a ruídos excessivos, vibrações e falhas nos componentes (Singh et al, 2014).

4.1.1 Circularidade

É de extrema importância para o processo de retificação que os valores de circularidade estejam conforme as especificações do projeto. Os valores obtidos no processo de retificação estão relacionados com as condições adotadas, as perturbações da máquina e da fixação da peça (WANG, 2008). Estudos de Singh, Kumar e Goyal, (2014) concluíram que em componentes mecânicos, o excesso de ruído, as vibrações e as danificações podem ser causadas pelo valor excessivo da circularidade.

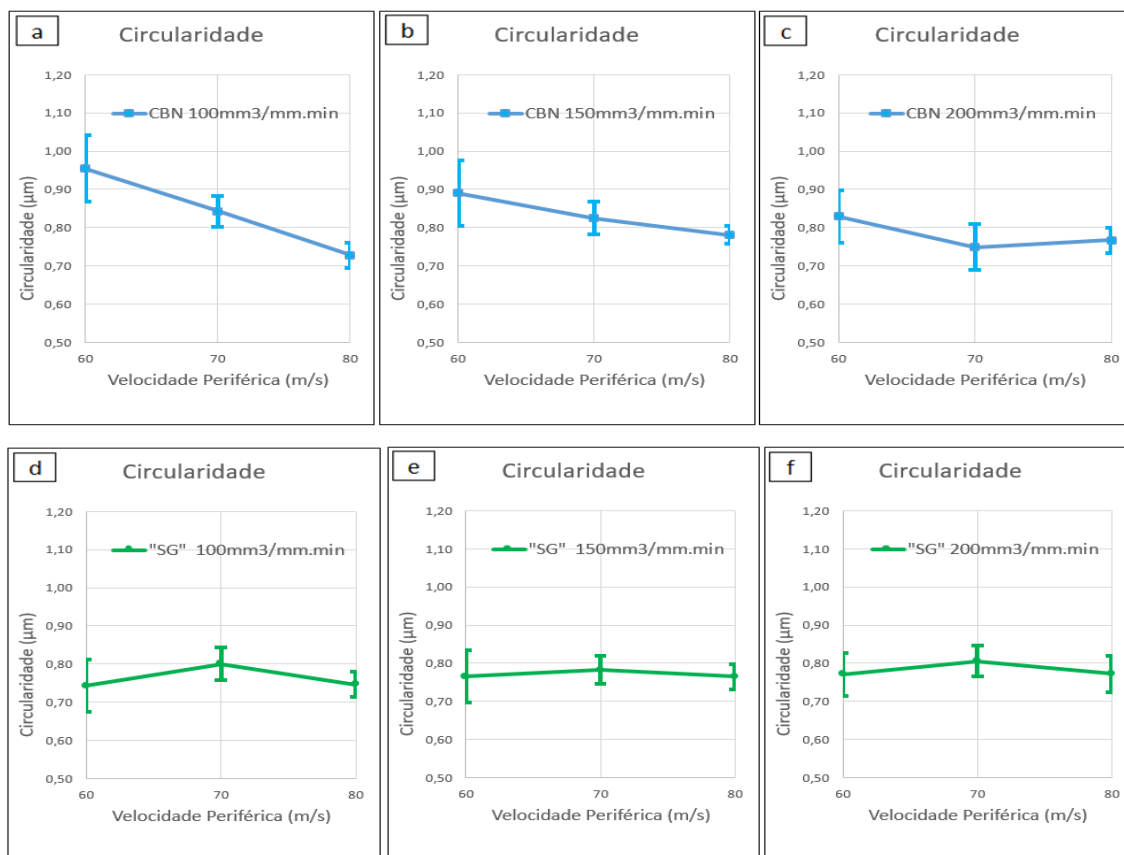
Os valores de circularidade para o rebolo de CBN e seeded-gel estão apresentados no gráfico 4.1 em função da velocidade periférica em diferentes taxas de remoção específicas de material. Para o rebolo de CBN em todas as taxas de remoção específicas de material, com o aumento da velocidade periférica há uma tendência de se reduzir o desvio de circularidade e dispersão com isto aumenta o índice de confiança das amostras. A velocidade periférica apresenta maior influência que a taxa de remoção específica de material no desvio de circularidade, como pode ser observado nos gráficos 4.1a, 4.1b e 4.1c. O menor desvio de circularidade foi verificado no gráfico 4.1a na velocidade periférica de 80 m/s, isto é, na menor remoção de material por rotação do rebolo, obtendo com isto uma menor espessura de cavacos que se alojam nos poros do rebolo, não riscando a superfície da peça e mantendo o seu perfil circular.

Para o rebolo de seeded-gel, valores de médias e intervalos de confiança apresentaram valores similares independentemente da taxa de remoção específica de material e velocidades periféricas, como mostram os gráficos 4.1d, 4.1e e 4.1f.

Numa análise comparativa a 60 m/s o rebolo com abrasivos de seeded-gel se comportou melhor que o de CBN, devido às características dos grãos abrasivos, considerando média e intervalo de confiança em todas as taxas de remoção específicas de material. Aumentando-se a taxa de remoção específica de material se reduz a diferença do desvio de circularidade entre os rebolos,

Na velocidade periférica para 70 m/s ocorre uma tendência favorável para o rebolo de CBN e o erro de circularidade se apresenta menor, porém ainda superior ao apresentado pelo rebolo de seeded-gel. Na velocidade periférica de 80 m/s e taxa de remoção específica de material de 100 mm³/mm.min, nota-se o melhor resultado para o rebolo de CBN. Nas velocidades periféricas mais elevadas o rebolo de CBN retifica com menor esforço de corte, menor vibração e valores de circularidade mais baixos.

Gráfico 4.1 Desvios de Circularidade ($X \pm IC95\%$) (μm)

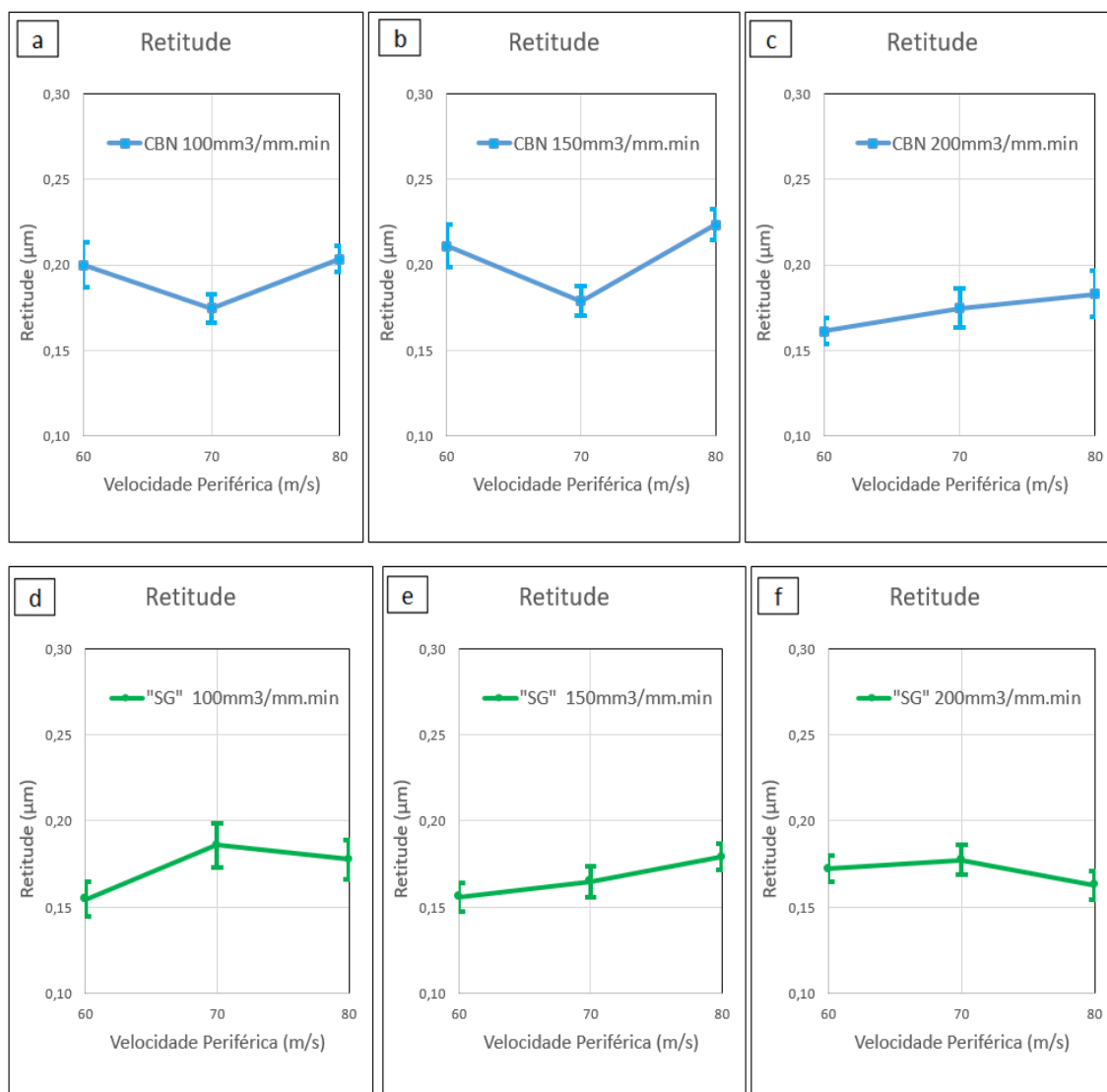


Fonte: Autor

4.1.2 Retitude

Os valores de retitude para o rebolo de CBN e seeded-gel estão apresentados no gráfico 4.2 em função da velocidade periférica em diferentes taxas de remoção específicas de material. Foi verificado o valor de maior média 0,225 μm para o rebolo de CBN a 150 $\text{mm}^3/\text{mm}\cdot\text{min}$ a 80 m/s, conforme mostra o gráfico 4.2b. Este valor de retitude é ainda relativamente baixo devido a quantidade de peças retificadas em cada intervalo de dressagem. O intervalo foi de 50 peças retificadas e com isto não ocorreu a degradação do perfil do rebolo.

Gráfico 4.2 Desvios de retitude ($X \pm IC95\%$) (μm)



Fonte: Autor

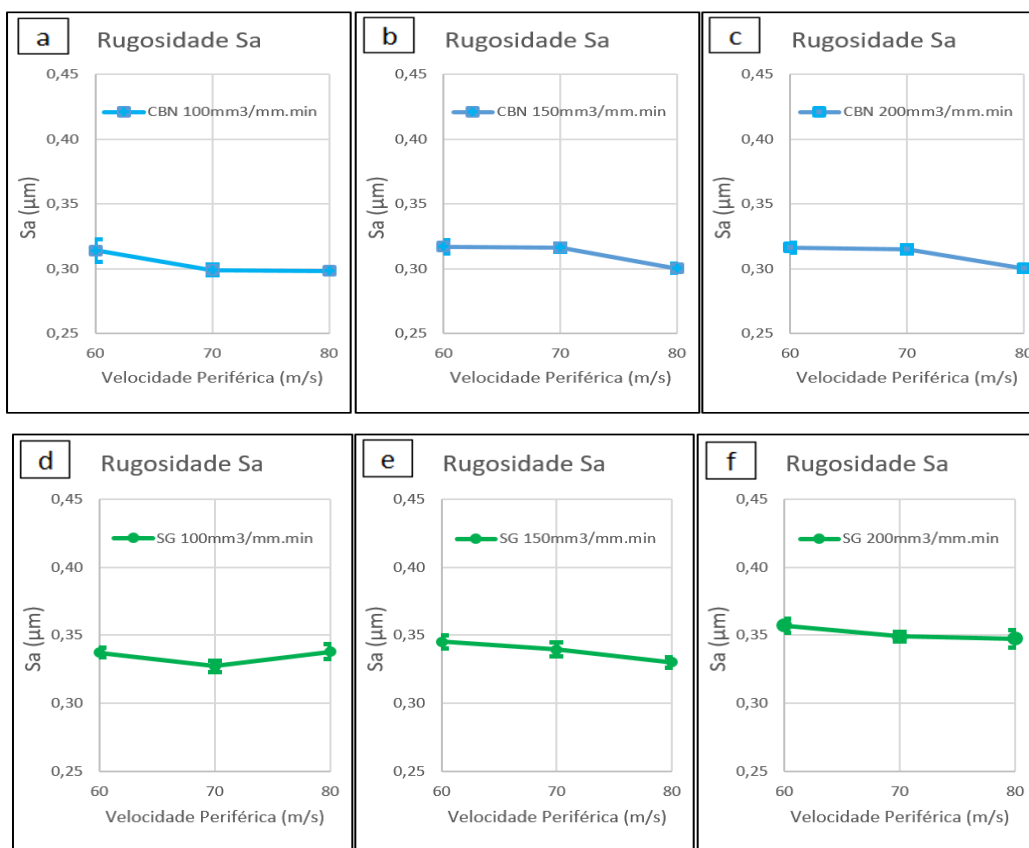
Retitude em especificações de projetos dificilmente tem valores inferiores a 1 μm . Esta característica foi medida para todas as combinações de parâmetros empregadas e os resultados atenderam esta condição. Portanto, ambos os tipos de rebolos podem ser empregados nas condições testadas para atender as exigências de tolerâncias de retitude.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA TOPOGRAFIA 3D DA PEÇA

4.2.1 Rugosidade Sa

Os valores de rugosidade Sa estão apresentados nos gráficos 4.3 em função da velocidade periférica em diferentes taxas de remoção específicas de material. Está relacionado com o controle do processo / qualidade, como é média, é considerado estável pois não é influenciado por picos ou riscos.

Gráfico 4.3 Comparação da rugosidade Sa ($X \pm IC95\%$)



Fonte: Adaptado (autor)

Em todas as condições testadas os resultados com o rebolo de CBN apresentaram valores mais baixos que os obtidos com o rebolo de seeded-gel. Conforme König, (1989), o CBN possui à elevada dureza do grão, estabilidade térmica e química e boa condutividade térmica. Estes fatores contribuem para um melhor acabamento da superfície retificada.

Para ambos os rebolos há uma tendência de com aumento da velocidade periférica, a redução dos valores de **Sa**. De acordo com King e Hahn, (1986), isto se deve à menor espessura dos cavacos arrancados que tendem a ser removidos de forma mais suave, sendo mais facilmente alojados nos poros da ferramenta, não danificando a superfície usinada.

A sequência de processo para os experimentos foi: desbaste, acabamento 1, 2 e 3 e acabamento fino. As variações de taxas de remoção específicas de material ocorreram somente no desbaste, por este motivo os resultados de **Sa** são similares para todos os experimentos.

4.2.2 Assimetria Ssk

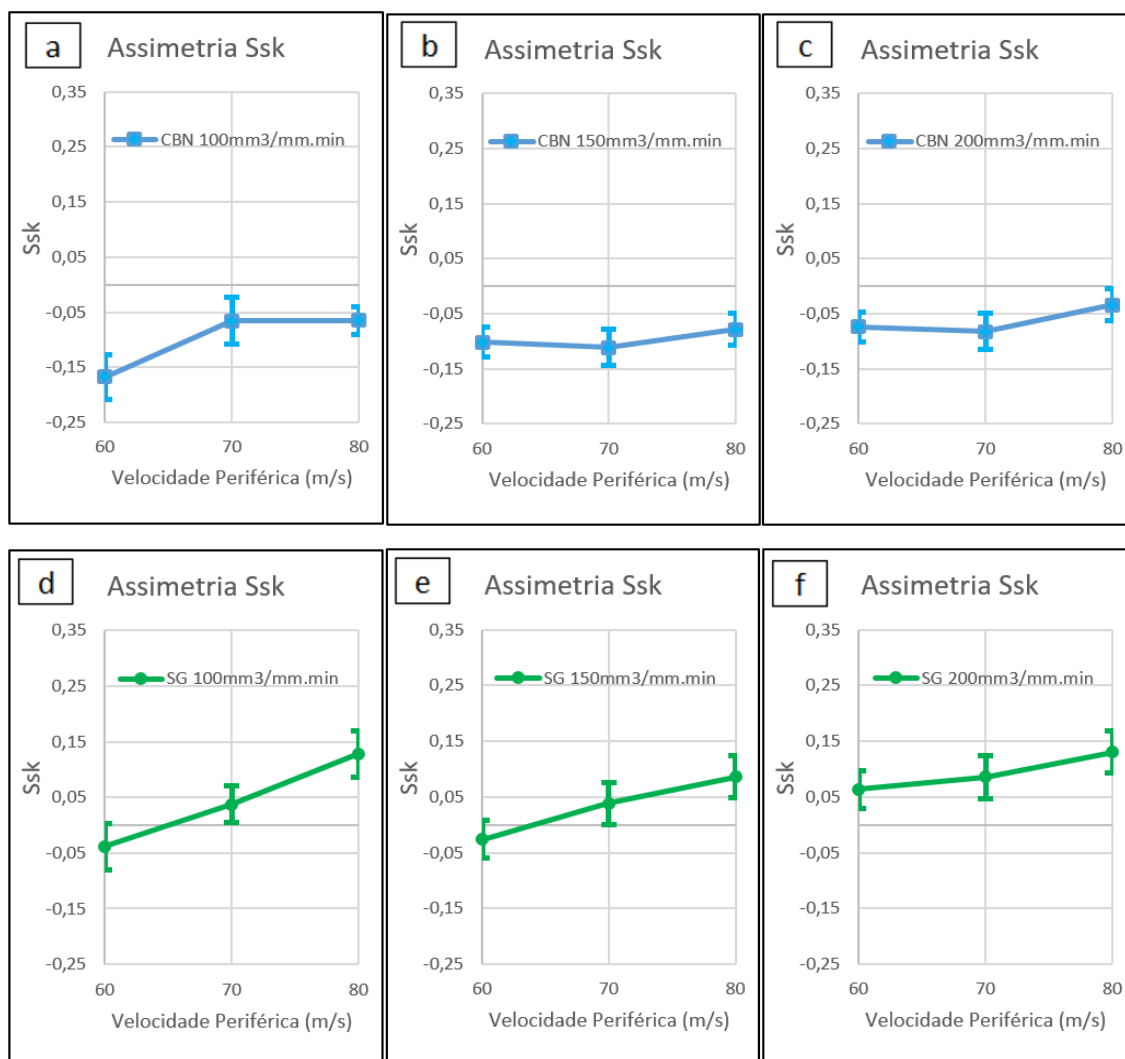
Os valores de assimetria Ssk obtidos estão apresentados no gráfico 4.4 em função da velocidade periférica em diferentes taxas de remoção específicas de material.

Para o rebolo de CBN em todas as taxas de remoção específicas de material ocorreram predominância de vales na caracterização da topografia da superfície, isto é, assimetria negativa. Para o rebolo de seeded-gel na velocidade periférica de 60 m/s nas taxas de remoção específicas de material de 100 e 150 mm³/mm.min ocorreram também a predominância de vales, entretanto nas demais condições avaliadas ocorreu a predominância de picos na caracterização da superfície. Superfícies com picos elevados tendem a se desgastar mais rapidamente podendo causar aumento de folga entre os componentes mecânicos.

Com os experimentos foi constatado que para ambos os rebolos, com o aumento da velocidade periférica, aumenta a quantidade de picos na caracterização da superfície. Para o rebolo de seeded-gel esta constatação é mais evidente. Esta tendência nos resultados também foi verificada nos estudos sobre retificação com aço 100Cr6 realizados por Waikar e Guo, (2007). Além disso, concluíram que tamanho,

forma e espaçamento dos grãos abrasivos são decisivos para os resultados das topografias das superfícies.

Gráfico 4.4 Comparação da assimetria S_{sk} ($\bar{X} \pm IC95\%$)



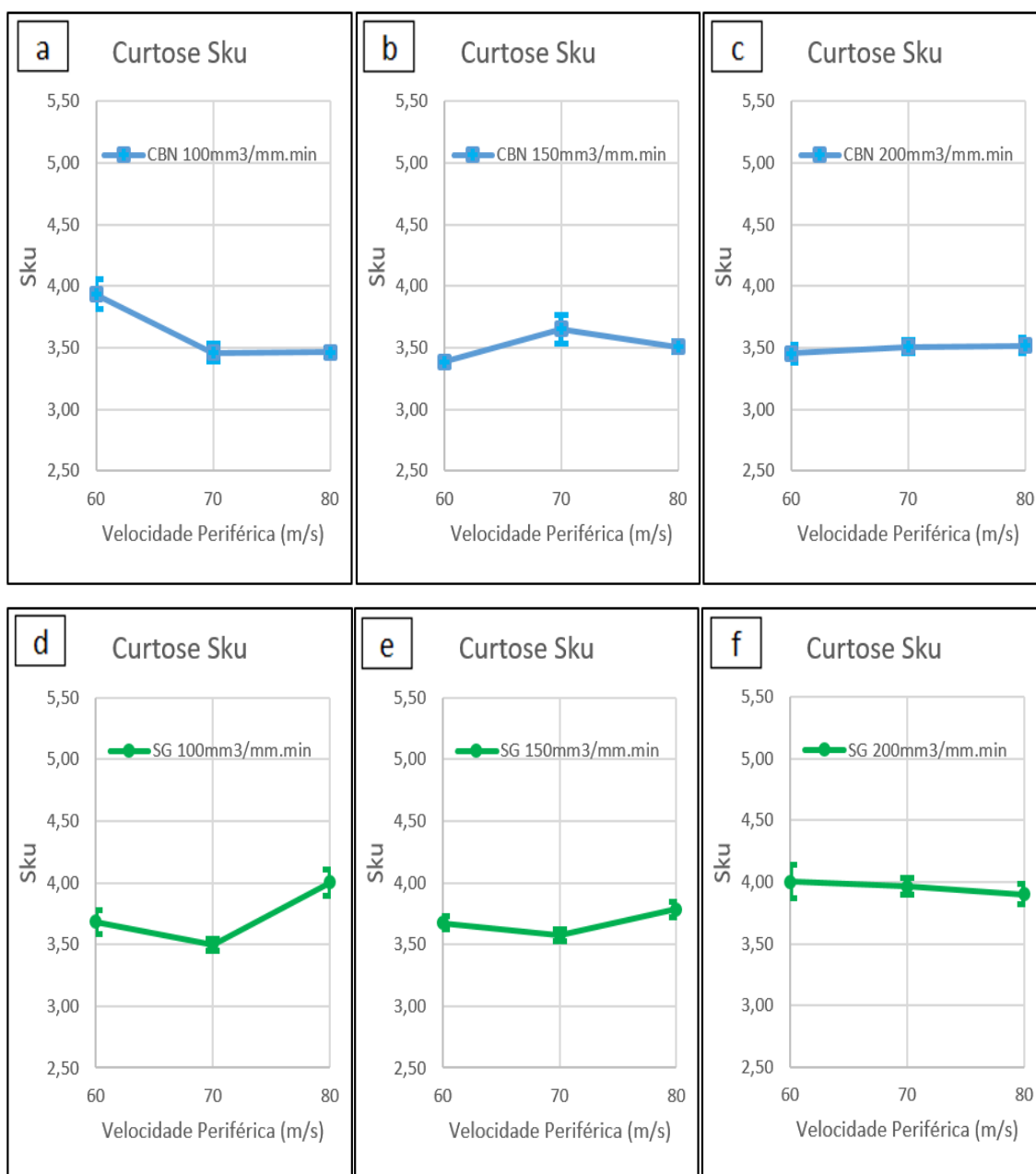
Fonte: Adaptado (autor)

4.2.3 Curtose S_{ku}

Os valores obtidos para curtose S_{ku} estão apresentados no gráfico 4.5 em função da velocidade periférica em diferentes taxas de remoção específicas de material.

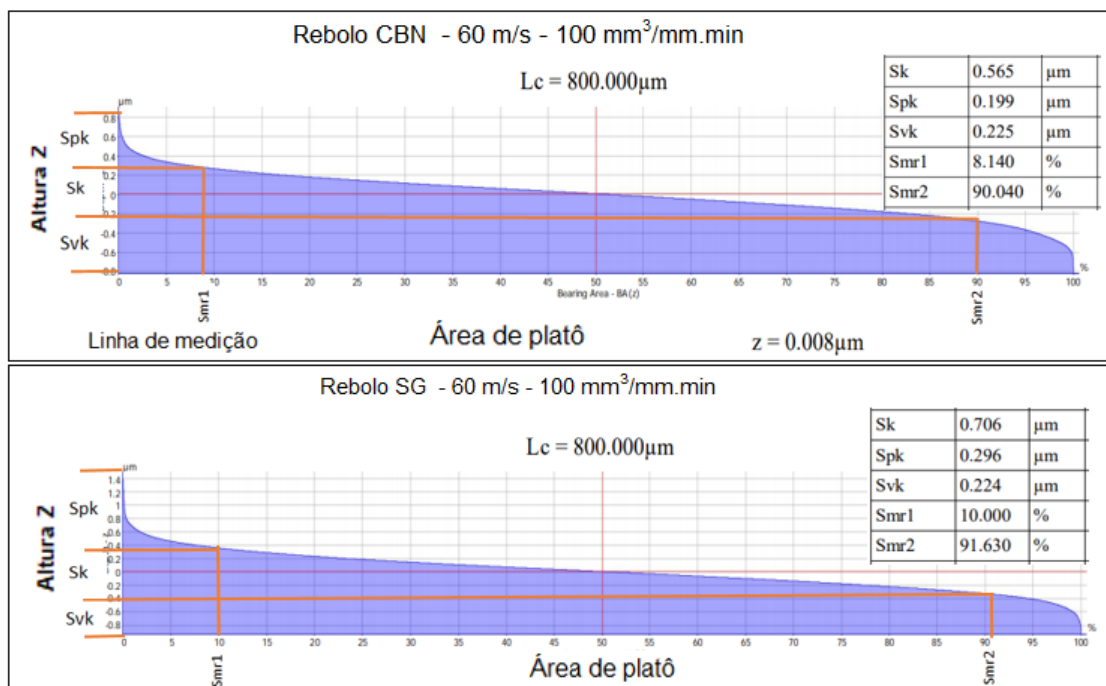
Para todos os experimentos ocorreu a predominância de picos e vales excessivamente altos na textura topográfica da peça. O gráfico 4.6 mostra um exemplo de curva de Abbott-Firestone obtida com o equipamento Alicona Infinite Focus SL. Para o rebolo de CBN observa-se que $S_{vk} > S_{pk}$, enquanto que para o rebolo de seeded-gel $S_{pk} > S_{vk}$. Isto se deve ao perfil de corte (protusão dos grãos) e das características dos grãos abrasivos de cada um dos rebolos empregados.

Gráfico 4.5 Comparação de curtose Sku ($X \pm IC95\%$)



Fonte: Adaptado (autor)

Gráfico 4.6 Curva de Abbott-Firestone para rebolos de CBN e seeded-gel



Fonte: Adaptado (autor)

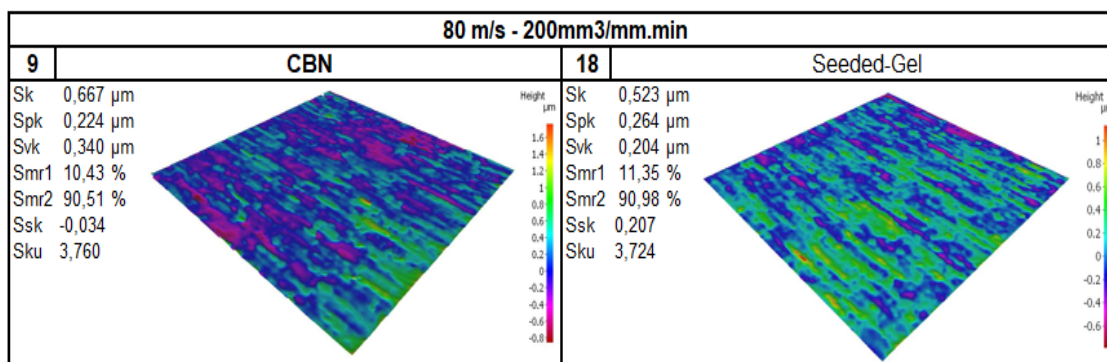
4.2.4 Parâmetro funcional Sk

Como é possível observar na figura 4.1, tem-se imagens de textura 3D dos rebolos de CBN e seeded-gel sob as mesmas velocidades periféricas e taxas de remoção específicas de material. Foram retificados dois lotes de 50 peças e estas imagens correspondem à última peça da segunda sequência após dressagem para cada um dos rebolos avaliados.

O platô (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. Conforme o gráfico 4.6, são aproximadamente 80% de todas as rugosidades e estão entre os pontos Smr1 e Smr2.

Nadolny, (2015), relatou que quando a porcentagem das alturas das rugosidades que formam o platô são maiores que 40% os componentes mecânicos apresentam resistência ao desgaste devido às alturas das rugosidades serem similares, há maior área de contato entre os componentes.

Figura 4.1 Comparação de texturas das peças

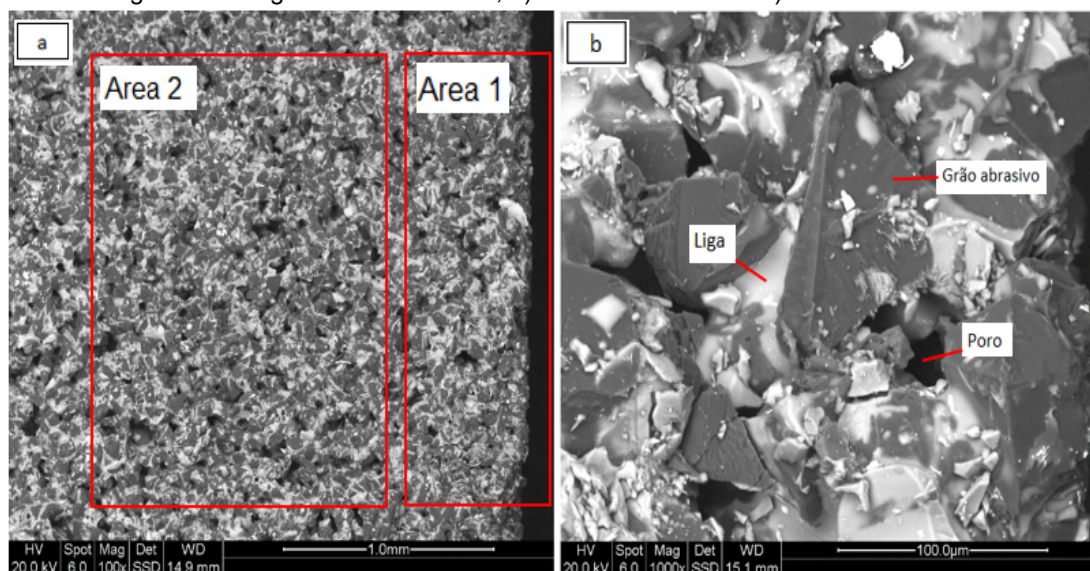


Fonte: Adaptado (autor)

4.3 Análise MEV dos rebolos CBN e seeded-gel

A figura 4.2 contém imagens obtidas do rebolo de CBN. A figura 4.2a contém indicações de área 1 e área 2. A região indicada como área 1, está localizada na extremidade do rebolo e não tem contato com a peça durante o processo de retificação. A região indicada como área 2 é a que está sujeita ao contato da peça com o rebolo e conseqüentemente neste local ocorre o desgaste do rebolo durante a retificação. Está apresentado na figura 4.2b o detalhe de grãos abrasivos, liga e poros da região da área 1.

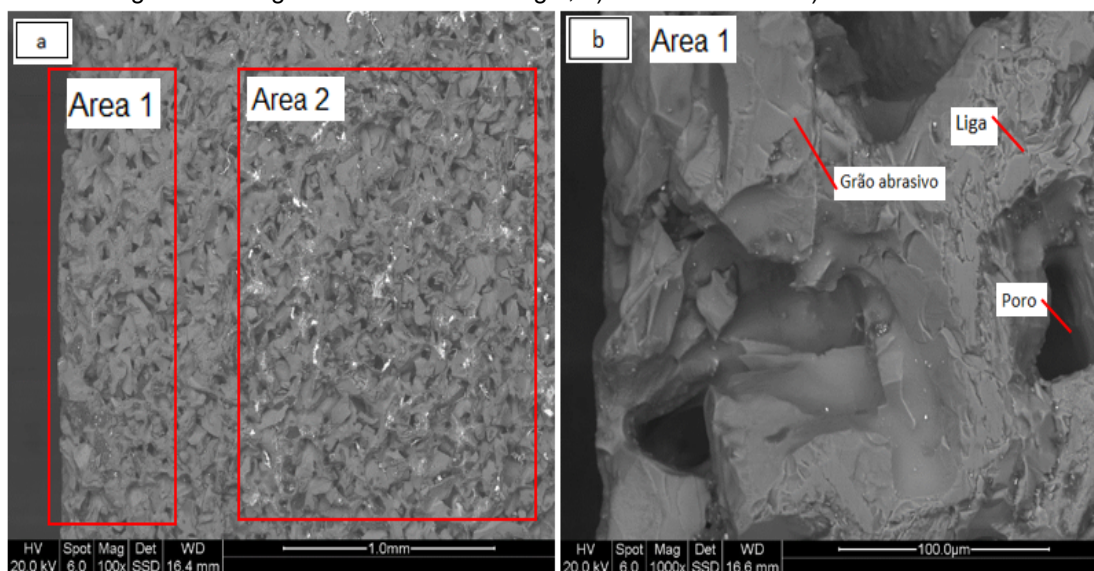
Figura 4.2 Imagens rebolo de CBN, a) aumento de 100x e b) aumento de 1000x.



Fonte: autor

A figura 4.3 contém imagens do rebolo de seeded-gel. Estão apresentadas na figura 4.3a, as indicações de detalhes das áreas 1 e 2. A área 1, localizada na extremidade do rebolo, local que não ocorre o contato da peça com o rebolo. A área 2 é a região que está sujeita ao contato com a peça e onde ocorre o desgaste. Na figura 4.3b, que é o detalhe da área 1, é possível observar os grãos abrasivos, liga e poros do rebolo.

Figura 4.3 Imagens rebolo de seeded-gel, a) aumento 100x e b) aumento 1000x.

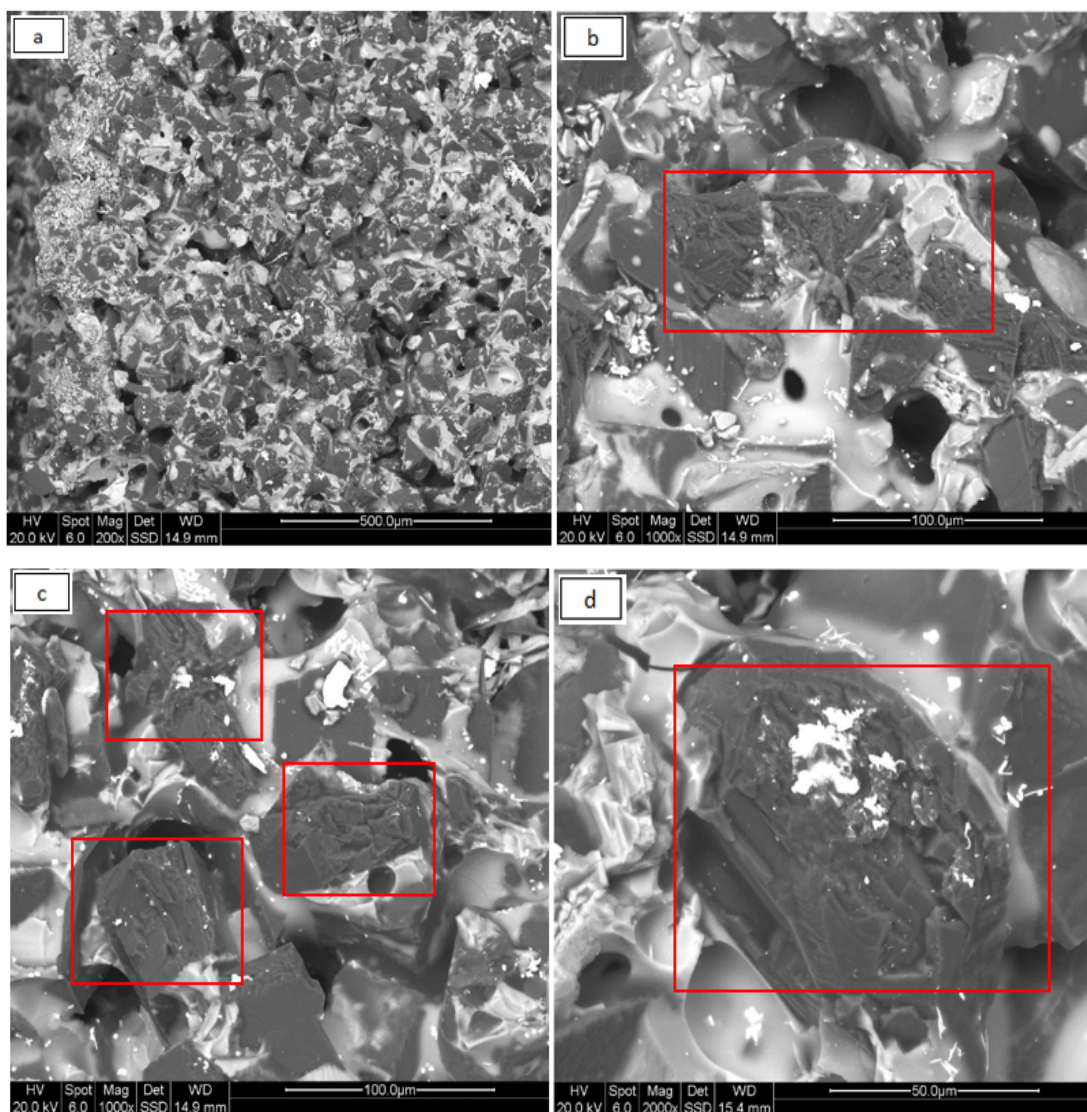


Fonte: autor

Com as imagens das Fig. 4.2b e Fig. 4.3b dos rebolos de CBN e seeded-gel respectivamente, é possível se ter um entendimento das condições dos rebolos antes do início da retificação das peças.

As imagens da figura 4.4 correspondem a área 2 do rebolo de CBN após retificar as 50 peças na taxa de remoção específica de material de $200 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{min}$ e velocidade periférica de 80 m/s. Nas imagens das figuras 4.4b e 4.4c pode se observar que os grãos abrasivos sofreram o desgaste pelo corte, isto é, ocorreu desgaste esperado em um processo de retificação estável. Entretanto, na figura 4.4d é possível observar que há uma pequena quantidade de material da peça impregnado no rebolo, este tipo de arrastamento de material da peça não foi comum para este tipo de rebolo.

Figura 4.4 Imagens rebolo de CBN, a) aumento 200x, b) e c) aumento 1000x, d) aumento 2000x.



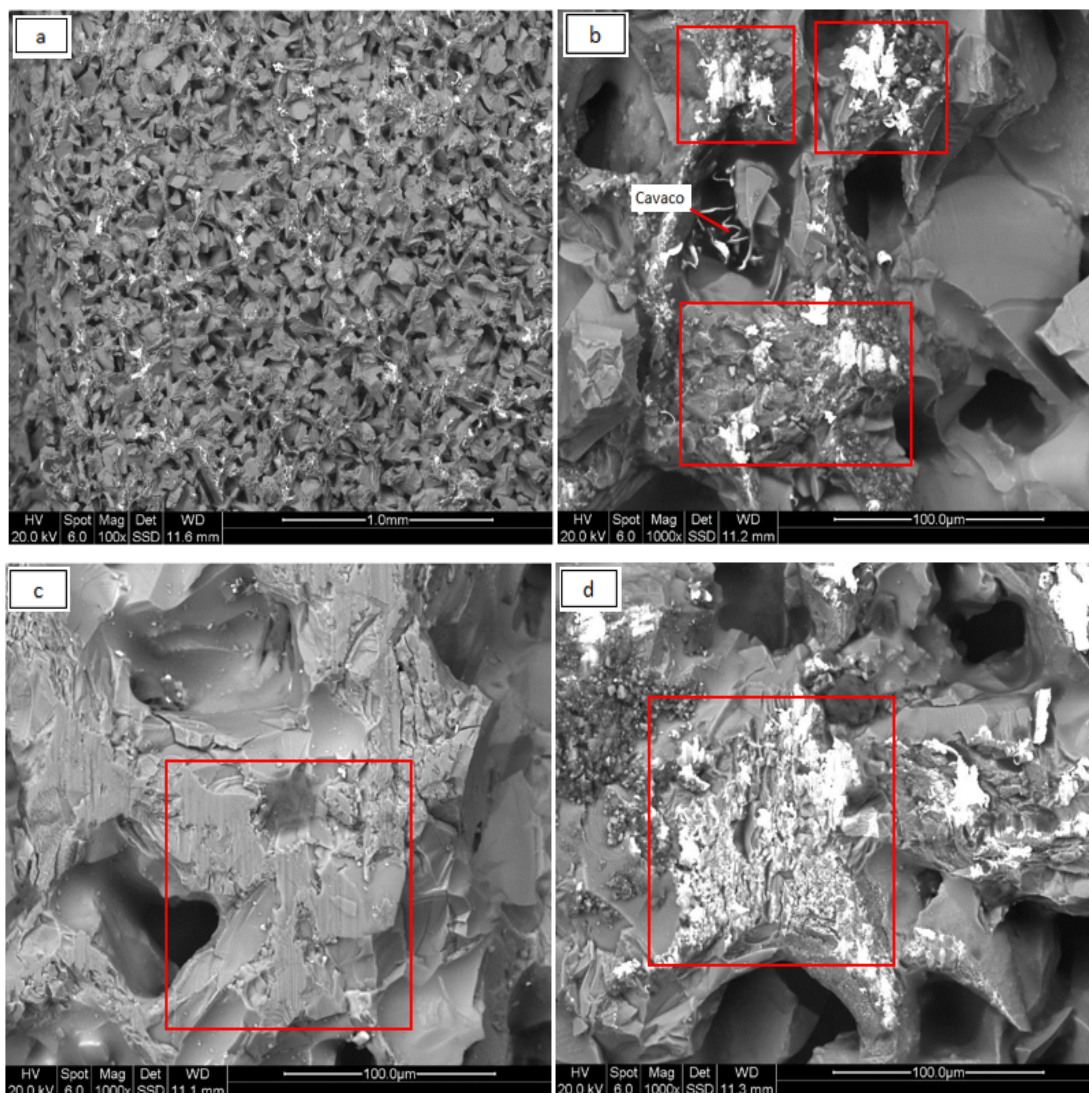
Fonte: autor

A figura 4.5 apresenta as imagens da área 2 (onde ocorreu desgaste abrasivo) após retificar as 50 peças na taxa de remoção específica de material de $200 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{min}$ e velocidade periférica de 80 m/s para o rebolo de seeded-gel.

Conforme Nadolny, (2015), estudos com o aço 100Cr6, no grão microcristalino a propagação de trincas se dá nas suas interfaces de sinterização entre os micro grãos, fazendo com que os grãos mantenham suas formas por mais tempo. O enfraquecimento dos vértices de grãos abrasivos de seeded-gel é causado pelo desgaste e ocorre como resultado de vários fenômenos como o atrito entre a peça e o grão abrasivo, o escoamento plástico do grão abrasivo, a alta temperatura e

pressão, a desintegração do grão abrasivo devido à difusão térmica e ao impacto mecânico, da reação química entre o material abrasivo e o material da peça a temperaturas elevadas e na presença de fluidos de retificação.

Figura 4.5 Imagens rebolo de seeded-gel, a) aumento 100x, b), c) e d) aumento 1000x.



Fonte: autor

Na imagem 4.5b, pode se observar que os grãos abrasivos sofreram o desgaste pelo corte, isto é, ocorreu o desgaste por microlascamentos de grãos que é o tipo de desgaste esperado para o rebolo. Pois mostra a friabilidade, que é a capacidade do grão abrasivo se romper e da renovação das arestas de corte. No entanto resíduos de material da peça ficaram impregnados no rebolo.

A ilustração da figura 4.5c apresenta o desgaste por fadiga e termo-fadiga, deixando o grão abrasivo plano devido ao deslizamento entre rebolo e a peça.

Também é possível observar na figura 4.5d que ocorre o desgaste por fadiga e termo-fadiga, gerando grãos planos com resíduos de cavacos impregnados no rebolo pelo arrastamento de material. Conforme estudos de Madopothula, Nimmagadda e Lakshmanan, (2018) utilizando o material 100Cr6, enquanto o desgaste durante o processo for por microlascamentos de grãos no rebolo de sol-gel não ocorrerá a formação de camada branca na superfície. Na mesma direção estudos de Webster e Tricard, (2004) e Nadolny e Kaplonek, (2013), concluíram que a geração de desgastes planos em grãos abrasivos de sol-gel leva a transformação do mecanismo dominante desde o arrastamento até o deslizamento de material, o que ocasiona um aumento repentino na potência de retificação. O desgaste plano ocorre devido ao excesso de taxa de remoção específica de material, causando a fadiga térmica. Com esta sollicitação que o rebolo apresenta aumenta o desgaste radial da ferramenta (BIANCHI et al., 2001).

4.4 RELAÇÃO G DE RETIFICAÇÃO

O valor da relação G é definida como a razão do volume de material removido da peça pelo volume de desgaste do rebolo, isto é, aumenta com a diminuição do desgaste do rebolo. O gráfico 4.7 mostra a comparação da relação G entre os rebolos de seeded-gel e CBN em função da velocidade periférica em diferentes taxas de remoção específicas de material, cada ponto do gráfico é a média de duas relações G de cada sequência de 50 peças retificadas para cada experimento.

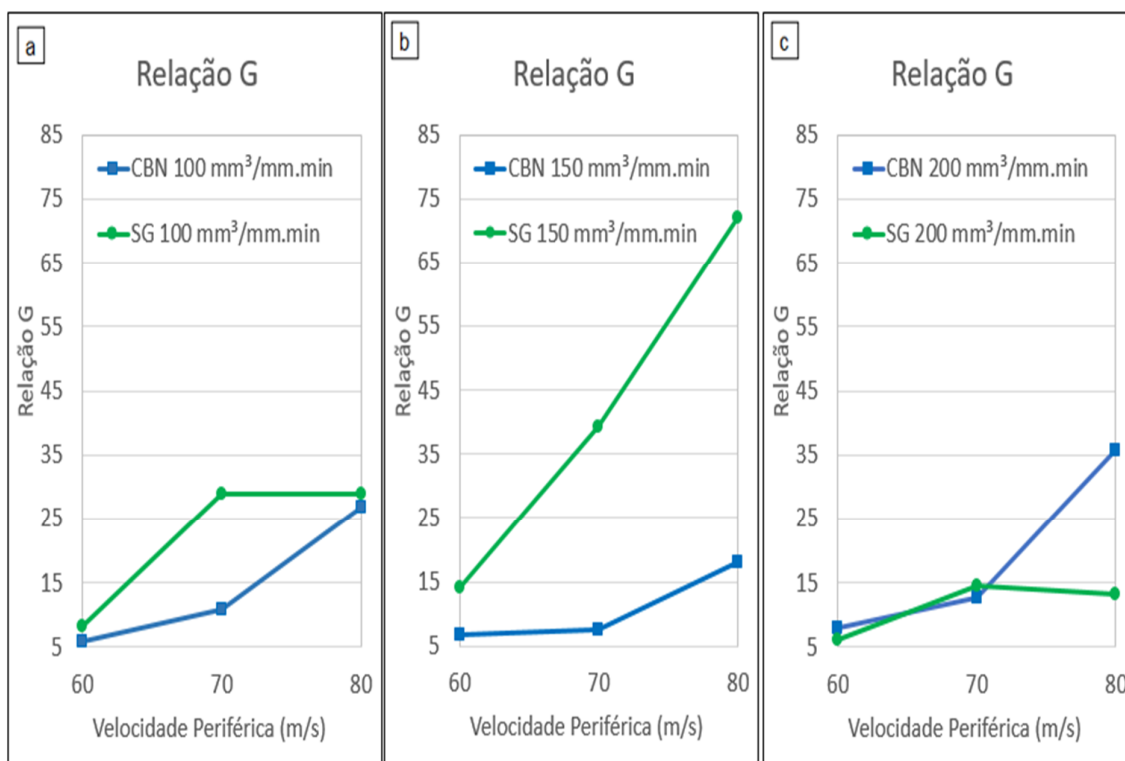
Pode se observar que para os rebolos de seeded-gel e CBN, ao incrementar a velocidade periférica também há uma tendência de ocorrer o incremento da relação G de retificação.

Nas taxas de remoção específicas de material de 100 e 150 mm³/mm.min, em todas as velocidades periféricas o rebolo de seeded-gel obteve melhor relação G que o rebolo de CBN (gráficos 4.7a e 4.7b). Na taxa de remoção específica de material de 150 mm³/mm.min a 80 m/s, em termos de relação G ocorreu a melhor condição de trabalho com o rebolo de seeded-gel, aproximadamente 4 vezes maior do que com o

rebolo de CBN. Isto aconteceu devido a elevada capacidade de suportar cargas mecânicas e térmicas da liga abrasiva “Vitrium3” e também das micro-fraturas que ocorrem com os grãos abrasivos seeded-gel Norton Quantum.

Na taxa de remoção específica de material de $200 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{min}$ à 80 m/s (gráfico 4.7c), pode se observar que o rebolo de CBN tem um valor da relação G de 150% maior que o rebolo de seeded-gel. No rebolo de seeded-gel ocorreram desgaste por deformação plástica e desgaste por fadiga e termo-fadiga. Nesta condição o rebolo de CBN tem capacidade prolongada de corte e a sua alta condutividade térmica colabora no sentido de reduzir a elevação excessiva da temperatura.

Gráfico 4.7 Comparação de relação G



Fonte: Autor

4.5 POTÊNCIA DE RETIFICAÇÃO

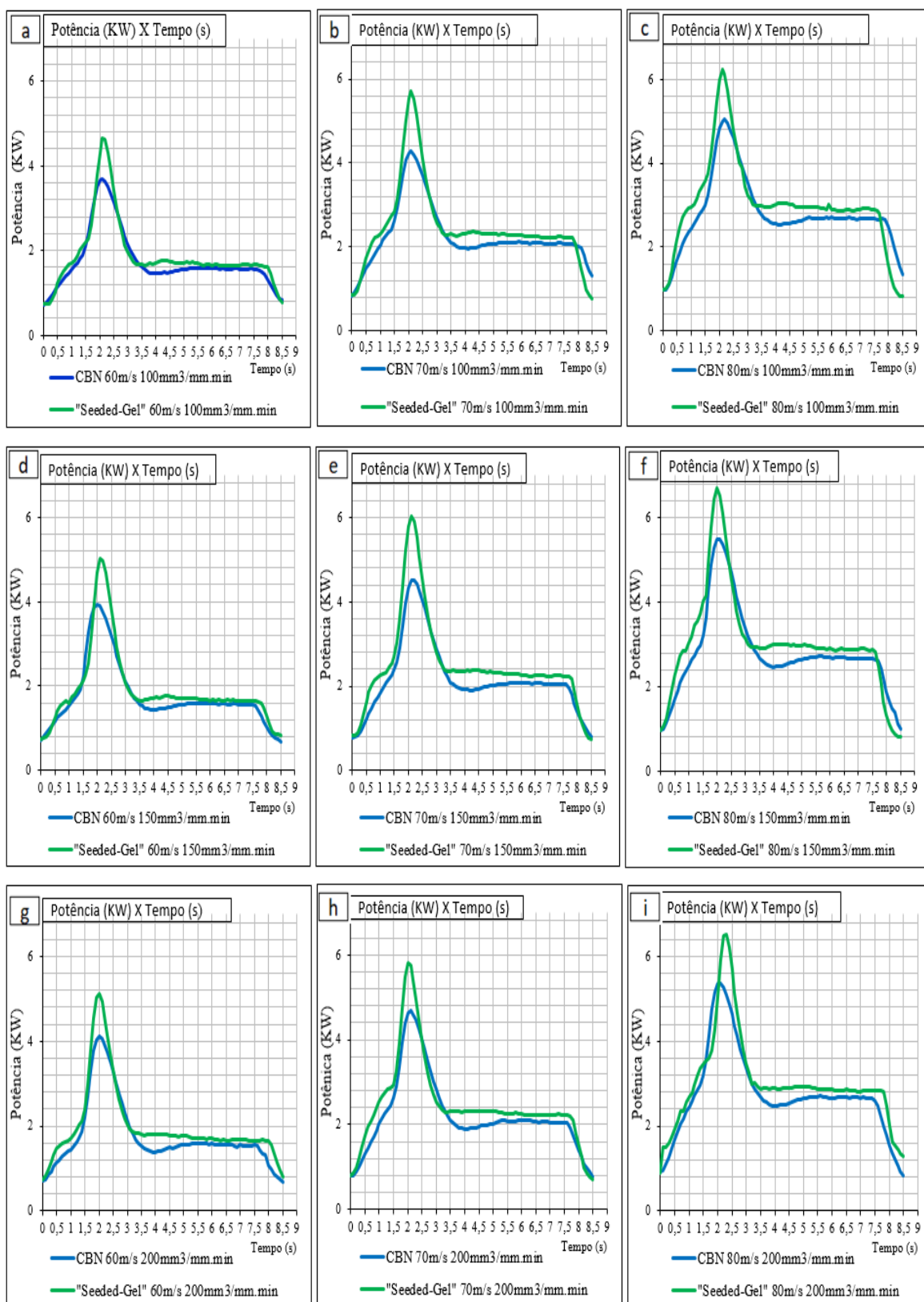
As potências de retificação estão apresentadas nos gráficos 4.8a a 4.8i em função da velocidade periférica em diferentes taxas de remoção específicas de material. São apresentados valores médios obtidos para as 100 peças de cada experimento. Estes se mantiveram estáveis com pequena variação para as peças retificadas.

É possível observar que com o aumento da velocidade periférica, utilizando a mesma taxa de remoção específica de material, aumenta-se também as potências de retificação (gráficos 4.8a, 4.8b e 4.8c). Durante os avanços de desbaste foram removidos 75% do sobremetal das peças, nesta etapa da retificação ocorreram picos de potência em todos os experimentos. Estes picos foram maiores para o rebolo de seeded-gel nas mesmas condições de velocidade periférica e taxa de remoção específica de material. A estrutura, o tamanho, o tipo de grão abrasivo e os parâmetros de retificação tem grande influência na potência de retificação. Nas mesmas condições o rebolo de CBN exige menor potência de retificação que o rebolo de seeded-gel devido as condições tribológicas entre o rebolo e a peça. Apresentando também menor possibilidade de arrastamento de material, deslizamento e aderência de material no rebolo, conforme explorado no estudo de Webster e Tricard, (2004).

Para as avaliações nas mesmas velocidades periféricas foi possível observar que durante a etapa de desbaste, quanto maior a taxa de remoção específica de material maior também a potência de retificação. Durante o acabamento e acabamento fino, onde não foram alteradas as taxas de remoção específicas de material, o valor da potência de retificação não se alterou (gráficos 4.8a, 4.8d e 4.8h).

A opção pela utilização de um rebolo mole de seeded-gel, como usado neste trabalho, permite a manutenção das potências de retificação e dos valores de rugosidade estáveis durante a usinagem pela liberação e renovação constante de arestas de corte de grãos abrasivos. Segundo Bianchi et al, (2001), o aumento de potência de retificação resulta do desgaste dos grãos abrasivos e da capacidade de retenção do ligante. Todavia, isto leva a uma queda da relação G, devido ao maior desgaste do rebolo.

Gráfico 4.8 Potências de retificação (valor médio)



Fonte: Adaptado (autor)

4.6 ENERGIA ESPECÍFICA DE RETIFICAÇÃO

Energia específica de retificação (U) é dada pela razão entre a potência de retificação (P) e a taxa de remoção de material (V'_w).

É possível observar no gráfico 4.9 valores de energia específica de refiticação em função da velocidade periférica em diferentes taxas de remoção específicas de material.

Na taxa de remoção específica de material de $100 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{min}$, com o aumento da velocidade periférica (v_s) também ocorre o aumento da energia específica de retificação (U), de 60 m/s para 70 m/s em aproximadamente 22% e de 70 m/s para 80 m/s em aproximadamente 11%, em todas as velocidades periféricas o rebolo de seeded-gel tem energia específica de retificação maior que o do rebolo de CBN em aproximadamente 25%, devido a maior potência de retificação (gráfico 4.9a).

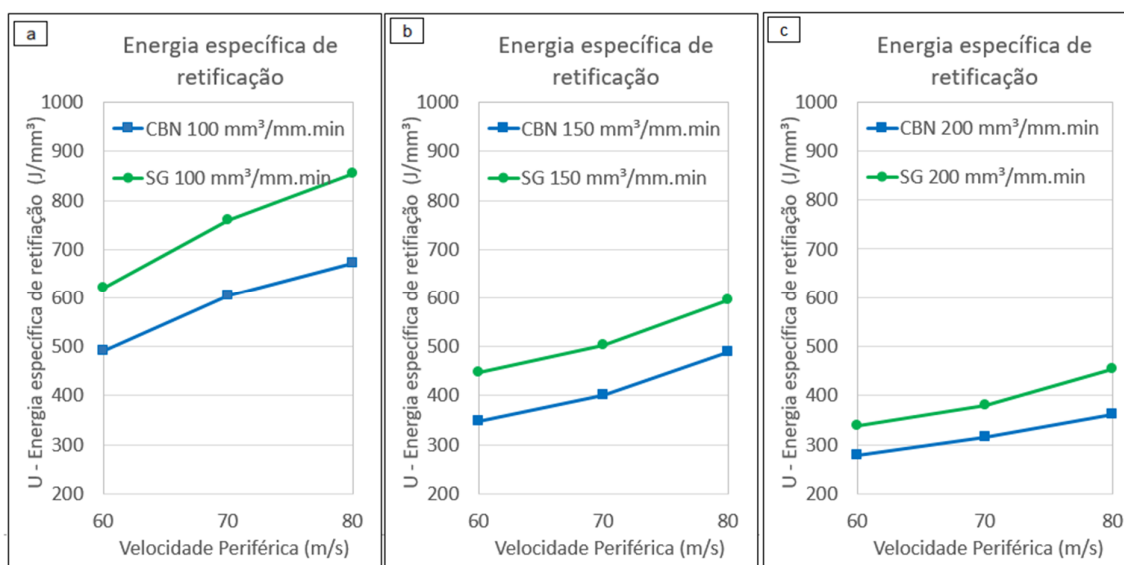
A energia específica de retificação na taxa de remoção específica de material de $150 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{min}$ está apresentada no gráfico 4.9b. Pode-se observar que com o incremento da velocidade periférica (v_s) também ocorre o incremento da energia específica de retificação (U), de 60 m/s para 70 m/s em aproximadamente 15% e de 70 m/s para 80 m/s em aproximadamente 23% e que em todas as velocidades periféricas o rebolo de seeded-gel tem U maior que o do rebolo de CBN em aproximadamente 25%.

No gráfico 4.9c na taxa de remoção específica de material de $200 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{min}$ pode-se observar que com o incremento da velocidade periférica (v_s) também ocorre o incremento da energia específica de retificação (U), de 60 m/s para 70 m/s em aproximadamente 15%, o mesmo incremento ocorre de 70 m/s para 80 m/s e que em todas as velocidades periféricas o rebolo de seeded-gel tem U maior que o do rebolo de CBN em aproximadamente 25%.

Para ambos os rebolos, com o aumento da taxa de remoção específica de material de 100 para $150 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{min}$, os valores de U são inferiores em aproximadamente 40% e com o aumento de 150 para $200 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{min}$, os valores de U se apresentam menores em aproximadamente 25%. Estas reduções apresentadas são devido a maior velocidade de avanço e conseqüentemente o menor tempo de retificação. Quando se aumenta a taxa de remoção específica de material se reduz a energia específica de refiticação para a mesma velocidade periférica (v_s).

O melhor resultado obtido para a energia específica de retificação U foi com o rebolo de CBN à velocidade periférica de 60 m/s e a 200 mm³/mm.min, sendo este 27% menor que para o rebolo de seeded-gel nas mesmas condições. Upadhyaya e Malkin, (2004), concluíram que o rebolo de CBN retifica com uma mais baixa energia específica, isto permite maiores taxas de remoção e além disso a elevada condutividade térmica do CBN contribui para maior dissipação do calor durante a retificação.

Gráfico 4.9 Comparação da energia específica de retificação



Fonte: Adaptado (autor)

4.7 DESEMPENHO DE RETIFICAÇÃO

Desempenho de retificação E (mm^3/J) é a razão entre relação G de retificação e a energia específica de retificação U (J/mm^3) (SELVAKUMARAN et al., 2018; SMITH, 1998). Desta forma se avalia a relação do desgaste da ferramenta e a energia consumida para a retificação das peças.

Pode-se observar no gráfico 4.10 o desempenho de retificação E em função da velocidade periférica em diferentes taxas de remoção específicas de material. Como apresentado no gráfico 4.10a, para a velocidade periférica de 60 m/s os valores obtidos para o desempenho de retificação para os rebolos de seeded-gel e CBN são similares. Para 70 m/s o desempenho da retificação aumentou em aproximadamente

80% para rebolo de seeded-gel e em 40% para o de CBN e a 80 m/s reduz em aproximadamente 11 % para o rebolo de seeded-gel e aumenta em 125% para o rebolo de CBN.

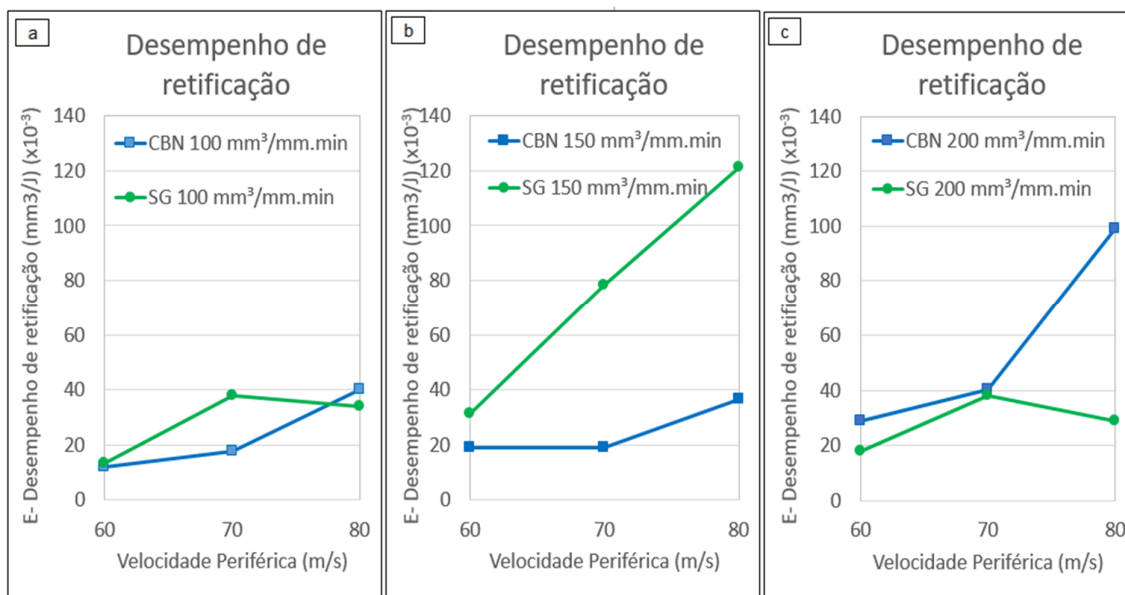
Na taxa de remoção específica de material de $150 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{min}$ (gráfico 4.10b), pode-se observar que a 60 m/s o rebolo de seeded-gel tem desempenho melhor que o de CBN em 64%, a 70 m/s o rebolo de seeded-gel tem incremento de desempenho de retificação de aproximadamente 140% enquanto que o de CBN se mantém no mesmo patamar que a 60 m/s. Já a 80 m/s o rebolo de seeded-gel tem um aumento de 55% enquanto o de CBN aumenta 95%, isto é, nestas condições o rebolo de seeded-gel tem desempenho de retificação aproximadamente 220% maior comparado ao do rebolo de CBN.

No gráfico 4.10c, na taxa de remoção específica de material de $200 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{min}$, pode-se observar que se inverteram os resultados. O rebolo de CBN obteve desempenho superior ao de seeded-gel. A 60 m/s o rebolo de CBN tem desempenho superior em 61%, com o aumento da velocidade periférica para 70 m/s o rebolo de CBN tem um aumento de desempenho de 33% enquanto que o de seeded-gel tem aumento de 100%, nesta condição com valores similares para ambos os rebolos. Já a 80 m/s o rebolo de CBN tem aumento de mais 150% enquanto que o de seeded-gel tem redução desempenho de 24%.

O melhor resultado obtido para E (mm^3/J) foi com o rebolo de seeded-gel a velocidade periférica (v_s) de 80 m/s numa taxa de remoção específica de material (Q'_w) de $150 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{min}$. Isto foi devido ao elevado valor obtido da relação G e energia específica de retificação relativamente baixa. Nota-se que o rebolo de CBN mostra a tendência positiva em altas velocidades periféricas e em maior taxa de remoção específica de material.

Para o rebolo de CBN o desgaste abrasivo foi o mesmo em todos os experimentos e constatado desgaste normal pelo processo de corte. Para o rebolo de seeded-gel ocorreram desgastes abrasivos por microlascamentos de grãos, deformação plástica e fadiga e termo-fadiga, baseados em estudos de Nadolny, (2014). Isto fez com que houvesse redução da relação G e conseqüentemente redução do desempenho do rebolo de seeded-gel na condição de maior taxa de remoção específica de material.

Gráfico 4.10 Comparação do desempenho de retificação



Fonte: Adaptado (autor)

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

5.1.1 Qualidade – Desvios de formas geométricas

Os resultados dos experimentos mostraram que a circularidade das peças retificadas e sua dispersão diminuem com o aumento da velocidade periférica para o rebolo de CBN. A velocidade periférica apresenta maior influência que a taxa de remoção específica de material no erro de circularidade. O menor erro de circularidade foi verificado na velocidade periférica de 80 m/s, isto é, na menor remoção de material por rotação do rebolo, para ambos os rebolos. Para o rebolo de seeded-gel, valores de médias e intervalos de confiança apresentaram valores similares independentemente da taxa de remoção específica de material e velocidades periféricas. Nas velocidades periféricas menores o rebolo com abrasivos de seeded-gel se comportou melhor que o de CBN, considerando média e intervalo de confiança em todas as taxas de remoção específicas de material. Nas velocidades periféricas mais elevadas o rebolo de CBN retifica com menor esforço de corte, menor vibração e valores de desvios circularidade mais baixos.

Os desvios de retitude foram inferiores a 1 μm para todas as combinações de parâmetros empregadas. Considerando que especificações de projetos dificilmente tem valores inferiores a este, ambos os rebolos podem ser empregados nas faixas de parâmetros testadas para atender esta condição.

5.1.2 Qualidade – Topografia da superfície

Os valores de rugosidade **Sa** das peças retificadas com o rebolo de CBN foram mais baixos que os obtidos com o rebolo de seeded-gel, pois o CBN possui elevada dureza do grão, estabilidade térmica e química e boa condutividade térmica. Estes fatores contribuem para um melhor acabamento da superfície retificada. Para ambos os rebolos há uma tendência com aumento da velocidade periférica ocorrer a redução dos valores de **Sa**. Isto se deve à menor espessura dos cavacos arrancados que

tendem a ser removidos de forma mais suave, sendo mais facilmente alojados nos poros da ferramenta, não danificando a superfície usinada.

A assimetria **Ssk** das peças retificadas com o rebolo de CBN ocorre com predominância de vales, enquanto que para o rebolo de seeded-gel ocorre com predominância de picos na topografia da superfície devido à protusão, forma e tamanho do grão abrasivo. Para ambos os rebolos, com o aumento da velocidade periférica, aumenta a quantidade de picos na caracterização da superfície. A curtose **Sku** demonstrou que ocorreu a predominância de picos e vales excessivamente altos na textura topográfica das peças. As peças retificadas com rebolo de CBN apresentaram vales maiores que picos, enquanto que as retificadas com o rebolo de seeded-gel tiveram picos maiores que vales. O parâmetro funcional **Sk** indicou que os componentes mecânicos retificados com ambos os rebolos tem elevada resistência ao desgaste devido à grande quantidade de alturas de rugosidades que formam o platô.

5.1.3 Desgastes abrasivos

O desgaste abrasivo que ocorre para o rebolo de seeded-gel até uma taxa de remoção específica de material de $150 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{min}$ em todas as velocidades periféricas avaliadas é o microlascamento de grãos. Este é o tipo de desgaste esperado para o rebolo, pois mostra o rendimento e a capacidade de auto afiar do grão abrasivo. Acima desta taxa o seeded-gel está numa fase de transição, pois ocorrem desgaste por microlascamentos de grãos, desgaste por deformação plástica (grãos planos) e o desgaste por fadiga e termo-fadiga (arrastamento de material da peça). Os desgastes por deformação plástica e por fadiga e termo-fadiga são causados pelo excesso de taxa de remoção específicas de material por influência recorrente da carga de choque mecânico e pelo desgaste por fadiga térmica. Para o rebolo de CBN em todas as taxas de remoção específicas de material e velocidades periféricas o desgaste é gradual devido à elevada dureza do grão, estabilidade térmica, química e boa condutividade térmica.

Nas taxas de remoção específicas de material de 100 e $150 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{min}$, em todas as velocidades periféricas o rebolo de seeded-gel obteve melhor relação G que o rebolo de CBN. Na taxa de remoção específica de material de $150 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{min}$ a

80 m/s, ocorreu a melhor condição de trabalho com o rebolo de seeded-gel, devido a relação G, aproximadamente 4 vezes maior do que com o rebolo de CBN. No entanto, para a condição de 200 mm³/mm.min a 80 m/s o rebolo de CBN apresentou um valor da relação G de 150% maior que o rebolo de seeded-gel.

5.1.4 Potência e energia específica de retificação

A potência de retificação (P) aumenta com o aumento da velocidade periférica (v_s) na mesma taxa de remoção específica de material (Q'_w). Na mesma velocidade periférica (v_s) quanto maior a taxa de remoção específica de material Q'_w maior é a potência de retificação (P). O rebolo de CBN retifica com potência menor que a do seeded-gel. Quanto maior é a velocidade periférica maior é a energia específica de retificação (U) na mesma taxa de remoção específica de material (Q'_w). Nas mesmas condições o rebolo de CBN obteve menor energia específica de retificação (U) que o rebolo de seeded-gel.

5.1.5 Desempenho de retificação

O rebolo de seeded-gel apresentou o melhor desempenho de retificação E, onde a maior influência foi a relação G de retificação. Porém, com este rebolo não se pode exceder a capacidade de remoção que é de 150 mm³/mm.min a 80 m/s, pois nestas condições desgastes abrasivos como arrastamento de material e deslizamento entre rebolo e peça são verificados.

Os resultados mostram que o rebolo de seeded-gel alumina mantém o perfil dos grãos afiados e pode ser uma boa alternativa na produção de peças fabricadas com o aço 100Cr6, desde que não exceda sua capacidade de remoção. Além disto, deve ser considerado o custo de aquisição e prazo de entrega que são muito menores que os do rebolo de CBN.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Processo de retificação com rebolo de grãos microcristalinos seeded-gel demonstrou ter possibilidade de outras aplicações industriais, porém será necessária uma avaliação dos possíveis fenômenos referentes a desgastes abrasivos e da integridade da peça retificada. Como tópicos de trabalhos futuros de pesquisa na área sugere-se:

- a) Comparação de rebolos com grãos de seeded-gel, eletrofundidos convencionais e CBN em retificação cilíndrica externa de mergulho em peças com diversos perfis, avaliando queima e retempera na superfície;
- b) Comparação de rebolos com grãos de seeded-gel de nova geração (NQ2) com grãos eletrofundidos convencionais em retificação cilíndrica externa de mergulho angular, avaliando a qualidade de formas geométricas e superficial;
- c) Aplicações de rebolos com grãos de seeded-gel em retificação centerless de passagem com alta taxa de remoção de material em peças de fina espessura de parede, avaliando a qualidade de formas geométricas e superficial;
- d) Comparação de rebolos com grãos de seeded-gel com CBN em retificação cilíndrica externa em aços de difícil retificação (exemplo: Inconel), avaliando qualidade da superfície e tipos de desgastes abrasivos com avaliação da topografia 3D dos rebolos;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAUJO, L. M. Influência da concentração de grãos de Al₂O₃ microcristalinos sobre a força e textura na retificação cilíndrica externa de mergulho. **UFSC**, 2018.

AZIZI, A.; REZAEI, S. M.; RAHIMI, A. Study on the rotary cup dressing of CBN grinding wheel and the grinding performance. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 47, n. 9–12, p. 1053–1063, 2010.

BEN FATHALLAH, B. et al. Effects of abrasive type cooling mode and peripheral grinding wheel speed on the AISI D2 steel ground surface integrity. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 49, n. 3–4, p. 261–272, 2009.

BENINI, L. Características das Grandezas de Processo e Resultado de Trabalho de Retificação como Função da Composição de Rebolo de Al₂O₃. **UFSC**, p. 178, 2011.

BERTALAN, C. Retificação com rebolos de nitreto de boro cúbico em máquinas-ferramenta convencionais. **UFSC**, p. 238, 1997.

BHARAT BHUSHAN. **Principles and applications of tribology**. 2^a edition ed. Columbus Ohio: A John Wiley & Sons, Ltd., Publication, 2013.

BIANCHI, E. C. et al. Estudo comparativo do desempenho de rebolos com grãos superabrasivos e convencionais. **Science and Engineering Journal**, v. 10, n. 2, p. 85–92, 2001.

BIANCHI, E. C. et al. The grinding wheel performance in the transverse cylindrical grinding of an eutectic alloy 2. **Material research**, v. 5, n. 4, p. 433–438, 2002.

BRUKER ALICONA. **3D measurement system for form & finish**. 2019. Disponível em: <<https://www.alicon.com/en/products/infinitefocus/>>. Acesso em 15/07/2019.

COUEY, J. A. et al. Monitoring force in precision cylindrical grinding. **Precision Engineering**, v. 29, p. 307–314, 2005.

DENKENA, B. et al. Enhanced grinding performance by means of patterned grinding wheels. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 77, n. 9–12, p. 1935–1941, 2015.

DR. KAISER GMBH. **Dressing spindle systems**. 2019. Disponível em: <www.drkaiser.com>. Acesso em 05/09/2019.

ERANKI, J.; XIAO, G.; MALKIN, S. Evaluating the performance of "seeded gel" grinding wheels. **Journal of Materials Processing Tech.**, v. 32, p. 609–625, 1992.

GHOSH, S.; CHATTOPADHYAY, A. B.; PAUL, S. Modelling of specific energy requirement during high-efficiency deep grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 48, n. 11, p. 1242–1253, 2008.

GRINDAIX GMBH. **Lubricoolant-nozzles**. 2019. Disponível em: <<https://grindaix.de/en/coolant-product/>>. Acesso em 05/09/2019.

HECKER, R. L.; NACIONAL, U.; PAMPA, D. LA. Analysis of Wheel Topography and Grit Force for Grinding Process Modeling. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 5, p. 13–23, 2003.

JACKSON, M. J. et al. High-speed grinding with CBN grinding wheels - applications and future technology. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 110, p. 78–88, 2001.

JACKSON, M. J.; MILLS, B. Materials selection applied to vitrified alumina & CBN grinding wheels. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 108, p. 114–124, 2000.

- JACKSON, M. J.; MILLS, B. Microscale wear of vitrified abrasive materials. **Journal of Materials Science**, v. 39, n. 6, p. 2131–2143, 2004.
- KLOCKE, F. **Manufacturing Process 2 (Grinding Honing Lapping)**. Aachen: Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- KLOCKE, F.; KÖNIG, W. **Fertigungsverfahren 2: Schleifen, Honen, Läppen**. Aachen: Springer Berlin Heidelberg, 2005.
- KÖNIG, W. **Manufacturing processes**. Aachen: Springer Berlin Heidelberg, 1989.
- KUMAR, V.; SALONITIS, K. Empirical Estimation of Grinding Specific Forces and Energy Based on a Modified Werner Grinding Model Empirical estimation of grinding specific forces and energy based on a modified Werner grinding model. **Procedia CIRP**, v. 8, n. December 2013, p. 287–292, 2015.
- LEME, S. Dressamento por toque de rebolos de cbn. **UFSC**, p. 181, 1999.
- LINDSAY, R. P. **Handbook of Modern Grinding Technology**. 1^a ed. New York ; London: Published in Great Britain by Chapman and Hall Ltd, 1987.
- LINDSAY, R. P. The Performance of Seeded Gel Abrasives in the Laboratory and at Customer Test Sites. **Aircraft Engineering and Aerospace Technology**, v. 61, n. 10, p. 20–26, 1989.
- LINKE, B. S. **Life cycle and sustainability of abrasive tools**. Davis CA: Springer International Publishing Switzerland, 2016.
- MADOPOTHULA, U.; NIMMAGADDA, R. B.; LAKSHMANAN, V. Assessment of white layer in hardened AISI 52100 steel and its prediction using grinding power. **Machining Science and Technology**, v. 22, n. 2, p. 299–319, 2018.
- MALKIN, S.; GUO, C. **Grinding Technology: Theory and applications of machining with abrasives**. New York: Industrial Press, 2008. v. 3
- MANIMARAN, G.; KUMAR, M. P. Effect of cryogenic cooling and sol – gel alumina wheel on grinding performance of AISI 316 stainless steel. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 13, n. 3, p. 304–312, 2013.
- MARINESCU, I. D. et al. **Handbook of Machining with Grinding Wheels**. 2^a Edition ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, FL 33487-2742, 2016.
- MAYER, J. et al. Wear characteristics of second-phase-reinforced sol – gel corundum abrasives. **Acta materialia**, v. 54, p. 3605–3615, 2006.
- NADOLNY, K. The method of assessment of the grinding wheel cutting ability in the plunge grinding. **Central European Journal of Engineering**, v. 2, n. 3, p. 399–409, 2012.
- NADOLNY, K. State of the art in production, properties and applications of the microcrystalline sintered corundum abrasive grains. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 74, n. 9–12, p. 1445–1457, 2014.
- NADOLNY, K. Wear phenomena of grinding wheels with sol – gel alumina abrasive grains and glass – ceramic vitrified bond during internal cylindrical traverse grinding of 100Cr6 steel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, p. 83–98, 2015.
- NADOLNY, K.; KAPLONEK, W. The effect of wear phenomena of grinding wheels with sol-gel alumina on chip formation during internal cylindrical plunge grinding of 100Cr6 steel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2016.
- NADOLNY, K.; KAPLONEK, W. Assessment of Working Conditions of Grinding Wheels in the Grinding

Process of Hard-To-Cut Materials. **Advanced Research in Engineering Science “ARES”**, v. 1, n. October, 2013.

NORTON SAINT-GOBAIN. **Renovando o mundo da retificação de precisão** Saint-Gobain, , 2015.

ROBERT KING; ROBERT HAHN. **Handbook of Modern Grinding Technology**. Chapman an ed. New York ; London: Chapman and Hall, 1986.

ROWE, W. B. **Principles of Modern Grinding Technology**. 2^a edition ed. Waltham, MA: William Andrew is an imprint of Elsevier 225 Wyman Street, Waltham, MA 02451, USA The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford OX5 1GB, UK, 2014. v. 1

SELVAKUMARAN, D. et al. Performance Comparison of Sol-gel with White Alumina Abrasives for Grinding of Super Duplex Stainless Steel (SDSS). **Procedia Manufacturing**. Anais...Elsevier B.V., 2018

SEVERIANO, A C. Retificação de aços com rebolos de CBN ligado galvânicamente sobre corpo de alumínio. **UFSC**, p. 140, 2002.

SHAW, M. C. **Principles of abrasive processing**. 01. ed. Oxford: Oxford University Press Inc.. New York, 1996.

SINGH, T.; KUMAR, P.; GOYAL, K. 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, n. 2, p. 34–40, 2014.

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

SOUZA, A. M.; DA SILVA, E. J. Global strategy of grinding wheel performance evaluation applied to grinding of superalloys. **Precision Engineering**, v. 57, n. March, p. 113–126, 2019.

SOUZA, C. N. DE et al. Analysis of Diametrical Wear of Grinding Wheel and Roundness Errors in the Machining of Steel. **ABCM**, v. XXVI, n. 2, p. 209–212, 2004.

STARKOV, V. K. et al. Comparative Analysis of Performance of Cubic Boron Nitride and Microcrystalline Alumina Tools in Profile Grinding of Form Cutters. **Investigation of machining processes**, v. 36, n. 1, p. 43–48, 2014.

SULLIVAN, J. Choosing the right grinding wheel. **Modern Machine Shop**, p. 92–98, 2000.

TAWAKOLI, T. et al. An Experimental Investigation on the Characteristics of Cylindrical Plunge Dry Grinding with Structured cBN Wheels. **5th CIRP Conference on High Performance Cutting 2012**, v. 1, p. 399–403, 2012.

UPADHYAYA, R. P.; MALKIN, S. Thermal Aspects of Grinding With Electroplated CBN Wheels. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 126, n. 1, p. 107, 2004.

WAIKAR, R. A.; GUO, Y. B. A comprehensive characterization of 3D surface topography induced by hard turning versus grinding. **Journal of materials processing technology**, v. 7, p. 189–199, 2007.

WANG, J. P. Avaliação da retificação com rebole de CBN vitrificado aplicada em ligas de alto desempenho. **UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO** Escola, 2008.

WEBSTER, J.; TRICARD, M. Innovations in abrasive products for precision grinding. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 53, n. 2, p. 597–617, 2004.

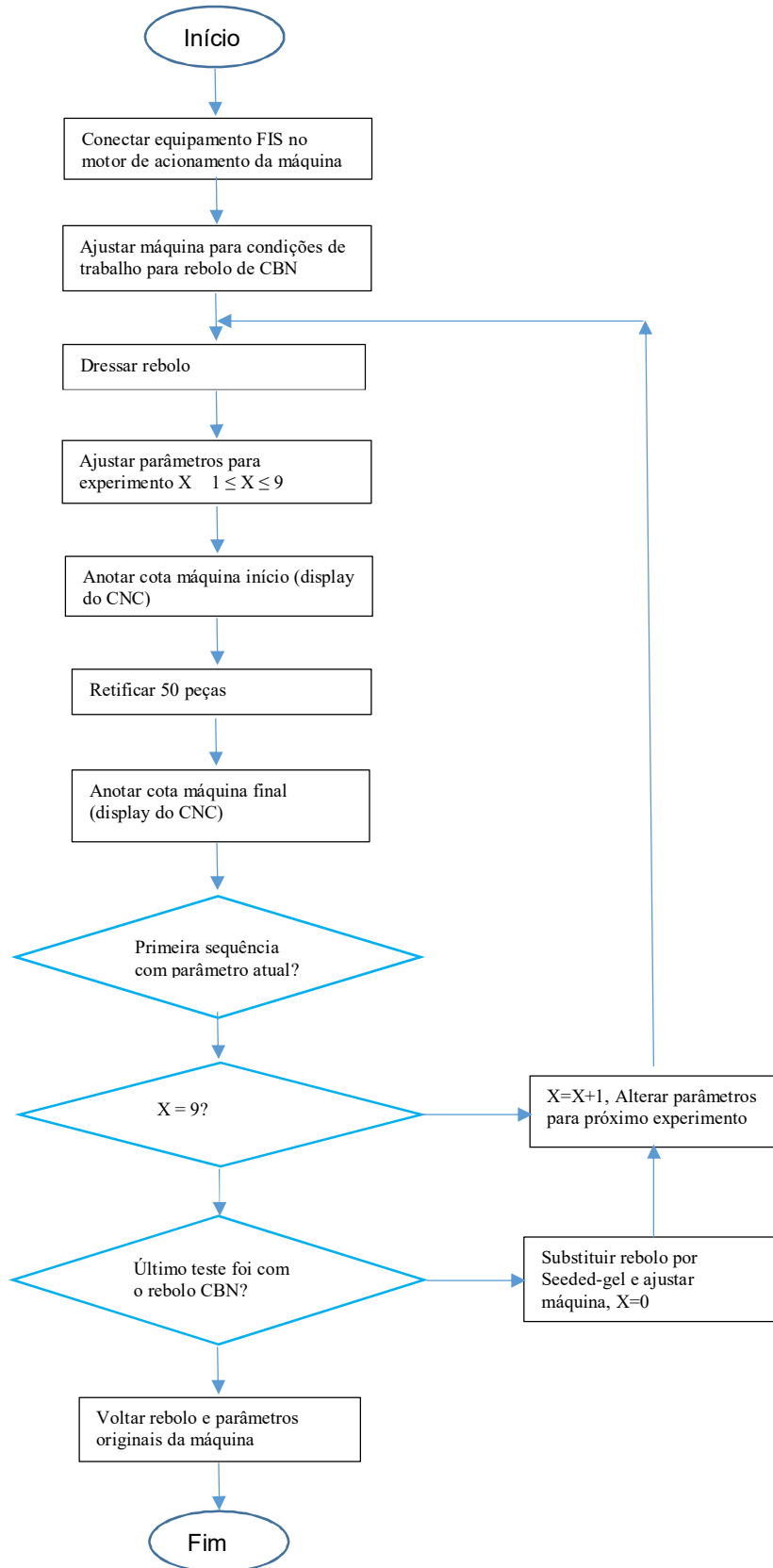
WEGENER, K. et al. Conditioning and monitoring of grinding wheels. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 60, n. 2, p. 757–777, 2011.

WINTER, M. et al. Life cycle assessment of cubic boron nitride grinding wheels. **Journal of Cleaner Production**, v. 107, p. 707–721, 2015.

YOON, S. C.; KRUEGER, M. Optimizing grinding performance by the use of sol-gel alumina abrasive wheels and a new type of aqueous metalworking fluid. **Machining Science and Technology**, v. 3, n. 2, p. 287–294, 1999.

APÊNDICES

Apêndice A – Fluxograma do processo



Apêndice B – Valores obtidos de desgaste de rebolo e remoção da peça

	Corrida 1			Corrida 2				
	Volume de material da peça			Volume de material da peça				
Teste 1- 60m/s - Q'w 100 mm3/mm.min - CBN	Diametro maior inicial	di	4,82 mm	Diametro maior inicial	di	4,82 mm	Vm 405,2202	
	Diametro final	df	4,7 mm	Diametro final	df	4,7 mm		
	Diametro menor inicial	di	2,92 mm	Diametro menor inicial	di	2,92 mm		
	Diametro menor final	df	2,8 mm	Diametro menor final	df	2,8 mm		
	Largura	l	8,9 mm	Largura	l	8,9 mm		
	Largura	l	6,1 mm	Largura	l	6,1 mm		
	numero de peças	np	50	numero de peças	np	50		
	Volume de material removido da peça	Vm	405,2202 mm3	Volume de material removido da peça	Vm	405,2202 mm3		
	Volume de material removido do rebolo			Volume de material removido do rebolo				Vs 67,8568
	Cota maquina final	Cf	278,7394 mm	Cota maquina final	Cf	278,7451 mm		
	Cota maquina inicio	Ci	278,7351 mm	Cota maquina inicio	Ci	278,7422 mm		
	Diametro do rebolo inicial		400 mm	Diametro do rebolo inicial		399,9858 mm		
	Diametro do rebolo final		399,9914 mm	Diametro do rebolo final		399,98 mm		
Largura efetiva do rebolo	l	15 mm	Largura efetiva do rebolo	l	15 mm	Vs 67,8568		
Volume de rebolo gasto	Vs	81,05222 mm3	Volume de rebolo gasto	Vs	54,66138 mm3			
Relação G	G1	4,999496	Relação G	G2	7,413282	G 5,971697		
Teste 4- 70m/s - Q'w 100 mm3/mm.min - CBN	Volume de material da peça			Volume de material da peça			Vm 405,2202	
	Diametro maior inicial	di	4,82 mm	Diametro maior inicial	di	4,82 mm		
	Diametro final	df	4,7 mm	Diametro final	df	4,7 mm		
	Diametro menor inicial	di	2,92 mm	Diametro menor inicial	di	2,92 mm		
	Diametro menor final	df	2,8 mm	Diametro menor final	df	2,8 mm		
	Largura	l	8,9 mm	Largura	l	8,9 mm		
	Largura	l	6,1 mm	Largura	l	6,1 mm		
	numero de peças	np	50	numero de peças	np	50		
	Volume de material removido da peça	Vm	405,2202 mm3	Volume de material removido da peça	Vm	405,2202 mm3		
	Volume de material removido do rebolo			Volume de material removido do rebolo				Vs 37,6965
	Cota maquina final	Cf	278,7481 mm	Cota maquina final	Cf	278,7522 mm		
	Cota maquina inicio	Ci	278,7459 mm	Cota maquina inicio	Ci	278,7504 mm		
	Diametro do rebolo inicial		399,9784 mm	Diametro do rebolo inicial		399,9694 mm		
Diametro do rebolo final		399,974 mm	Diametro do rebolo final		399,9658 mm			
Largura efetiva do rebolo	l	15 mm	Largura efetiva do rebolo	l	15 mm	Vs 37,6965		
Volume de rebolo gasto	Vs	41,46656 mm3	Volume de rebolo gasto	Vs	33,92645 mm3			
Relação G			Relação G			G 10,74954		
Teste 7- 80m/s - Q'w 100 mm3/mm.min - CBN	Volume de material da peça			Volume de material da peça			Vm 405,2202	
	Diametro maior inicial	di	4,82 mm	Diametro maior inicial	di	4,82 mm		
	Diametro final	df	4,7 mm	Diametro final	df	4,7 mm		
	Diametro menor inicial	di	2,92 mm	Diametro menor inicial	di	2,92 mm		
	Diametro menor final	df	2,8 mm	Diametro menor final	df	2,8 mm		
	Largura	l	8,9 mm	Largura	l	8,9 mm		
	Largura	l	6,1 mm	Largura	l	6,1 mm		
	numero de peças	np	50	numero de peças	np	50		
	Volume de material removido da peça	Vm	405,2202 mm3	Volume de material removido da peça	Vm	405,2202 mm3		
	Volume de material removido do rebolo			Volume de material removido do rebolo				Vs 15,07814
	Cota maquina final	Cf	278,7534 mm	Cota maquina final	Cf	278,7565 mm		
	Cota maquina inicio	Ci	278,7529 mm	Cota maquina inicio	Ci	278,7554 mm		
	Diametro do rebolo inicial		399,9644 mm	Diametro do rebolo inicial		399,9594 mm		
Diametro do rebolo final		399,9634 mm	Diametro do rebolo final		399,9572 mm			
Largura efetiva do rebolo	l	15 mm	Largura efetiva do rebolo	l	15 mm	Vs 15,07814		
Volume de rebolo gasto	Vs	9,423927 mm3	Volume de rebolo gasto	Vs	20,73235 mm3			
Relação G			Relação G			G 26,87468		

	Corrida 1			Corrida 2				
	Volume de material da peça			Volume de material da peça				
Teste - 2 60m/s - Q'w 150 mm3/mm.min - CBN	Diametro maior inicial	di	4,82 mm	Diametro maior inicial	di	4,82 mm	Vm 405,2202	
	Diametro final	df	4,7 mm	Diametro final	df	4,7 mm		
	Diametro menor inicial	di	2,92 mm	Diametro menor inicial	di	2,92 mm		
	Diametro menor final	df	2,8 mm	Diametro menor final	df	2,8 mm		
	Largura	l	8,9 mm	Largura	l	8,9 mm		
	Largura	l	6,1 mm	Largura	l	6,1 mm		
	numero de peças	np	50	numero de peças	np	50		
	Volume de material removido da peça	Vm	405,2202 mm3	Volume de material removido da peça	Vm	405,2202 mm3		
	Volume de material removido do rebolo			Volume de material removido do rebolo				Vs 61,25204
	Cota maquina final	Cf	278,7642 mm	Cota maquina final	Cf	278,7685 mm		
Cota maquina inicio	Ci	278,7607 mm	Cota maquina inicio	Ci	278,7655 mm			
Diametro do rebolo inicial		399,9488 mm	Diametro do rebolo inicial		399,9392 mm			
Diametro do rebolo final		399,9418 mm	Diametro do rebolo final		399,9332 mm			
Largura efetiva do rebolo	l	15 mm	Largura efetiva do rebolo	l	15 mm	Vs 61,25204		
Volume de rebolo gasto	Vs	65,96442 mm3	Volume de rebolo gasto	Vs	56,53965 mm3			
Relação G			Relação G			G 6,61562		

	Corrida 1			Corrida 2				
	Volume de material da peça			Volume de material da peça				
Teste - 5 70m/s - Q'w 150 mm3/mm.min - CBN	Diametro maior inicial	di	4,82 mm	Diametro maior inicial	di	4,82 mm	Vm 405,2202	
	Diametro final	df	4,7 mm	Diametro final	df	4,7 mm		
	Diametro menor inicial	di	2,92 mm	Diametro menor inicial	di	2,92 mm		
	Diametro menor final	df	2,8 mm	Diametro menor final	df	2,8 mm		
	Largura	l	8,9 mm	Largura	l	8,9 mm		
	Largura	l	6,1 mm	Largura	l	6,1 mm		
	numero de peças	np	50	numero de peças	np	50		
	Volume de material removido da peça	Vm	405,2202 mm3	Volume de material removido da peça	Vm	405,2202 mm3		
	Volume de material removido do rebolo			Volume de material removido do rebolo				Vs 53,71172
	Cota maquina final	Cf	278,7696 mm	Cota maquina final	Cf	278,775 mm		
Cota maquina inicio	Ci	278,7664 mm	Cota maquina inicio	Ci	278,7725 mm			
Diametro do rebolo inicial		399,9374 mm	Diametro do rebolo inicial		399,9252 mm			
Diametro do rebolo final		399,931 mm	Diametro do rebolo final		399,9202 mm			
Largura efetiva do rebolo	l	15 mm	Largura efetiva do rebolo	l	15 mm	Vs 53,71172		
Volume de rebolo gasto	Vs	60,30866 mm3	Volume de rebolo gasto	Vs	47,11478 mm3			
Relação G			Relação G			G 7,544354		

	Corrida 1			Corrida 2				
	Volume de material da peça			Volume de material da peça				
Teste - 8 80m/s - Q'w 150 mm3/mm.min - CBN	Diametro maior inicial	di	4,82 mm	Diametro maior inicial	di	4,82 mm	Vm 405,2202	
	Diametro final	df	4,7 mm	Diametro final	df	4,7 mm		
	Diametro menor inicial	di	2,92 mm	Diametro menor inicial	di	2,92 mm		
	Diametro menor final	df	2,8 mm	Diametro menor final	df	2,8 mm		
	Largura	l	8,9 mm	Largura	l	8,9 mm		
	Largura	l	6,1 mm	Largura	l	6,1 mm		
	numero de peças	np	50	numero de peças	np	50		
	Volume de material removido da peça	Vm	405,2202 mm3	Volume de material removido da peça	Vm	405,2202 mm3		
	Volume de material removido do rebolo			Volume de material removido do rebolo				Vs 22,61471
	Cota maquina final	Cf	278,7769 mm	Cota maquina final	Cf	278,7797 mm		
Cota maquina inicio	Ci	278,7753 mm	Cota maquina inicio	Ci	278,7789 mm			
Diametro do rebolo inicial		399,9196 mm	Diametro do rebolo inicial		399,9124 mm			
Diametro do rebolo final		399,9164 mm	Diametro do rebolo final		399,9108 mm			
Largura efetiva do rebolo	l	15 mm	Largura efetiva do rebolo	l	15 mm	Vs 22,61471		
Volume de rebolo gasto	Vs	30,15311 mm3	Volume de rebolo gasto	Vs	15,07631 mm3			
Relação G			Relação G			G 17,91844		

Teste - 360m/s - Q _w 200 mm ³ /mm.min - CBN	Corrida 1			Corrida 2			Vm 405,2202
	Volume de material da peça			Volume de material da peça			
	Diametro maior inicial	di	4,82 mm	Diametro maior inicial	di	4,82 mm	
	Diametro final	df	4,7 mm	Diametro final	df	4,7 mm	
	Diametro menor inicial	di	2,92 mm	Diametro menor inicial	di	2,92 mm	
	Diametro menor final	df	2,8 mm	Diametro menor final	df	2,8 mm	
	Largura	l	8,9 mm	Largura	l	8,9 mm	
	Largura	l	6,1 mm	Largura	l	6,1 mm	
	numero de peças	np	50	numero de peças	np	50	
	Volume de material removido da peça	Vm	405,2202 mm ³	Volume de material removido da peça	Vm	405,2202 mm ³	
Volume de material removido do rebolo			Volume de material removido do rebolo			Vs 50,88056	
Cota maquina final	Cf	278,787 mm	Cota maquina final	Cf	278,7912 mm		
Cota maquina inicio	Ci	278,7836 mm	Cota maquina inicio	Ci	278,7892 mm		
Diametro do rebolo inicial		399,903 mm	Diametro do rebolo inicial		399,8918 mm		
Diametro do rebolo final		399,8962 mm	Diametro do rebolo final		399,8878 mm		
Largura efetiva do rebolo	l	15 mm	Largura efetiva do rebolo	l	15 mm		
Volume de rebolo gasto	Vs	64,0724 mm ³	Volume de rebolo gasto	Vs	37,68873 mm ³		
Relação G			Relação G				
							G 7,964145
Teste - 670m/s - Q _w 200 mm ³ /mm.min - CBN	Corrida 1			Corrida 2			Vm 405,2202
	Volume de material da peça			Volume de material da peça			
	Diametro maior inicial	di	4,82 mm	Diametro maior inicial	di	4,82 mm	
	Diametro final	df	4,7 mm	Diametro final	df	4,7 mm	
	Diametro menor inicial	di	2,92 mm	Diametro menor inicial	di	2,92 mm	
	Diametro menor final	df	2,8 mm	Diametro menor final	df	2,8 mm	
	Largura	l	8,9 mm	Largura	l	8,9 mm	
	Largura	l	6,1 mm	Largura	l	6,1 mm	
	numero de peças	np	50	numero de peças	np	50	
	Volume de material removido da peça	Vm	405,2202 mm ³	Volume de material removido da peça	Vm	405,2202 mm ³	
Volume de material removido do rebolo			Volume de material removido do rebolo			Vs 32,03477	
Cota maquina final	Cf	278,7932 mm	Cota maquina final	Cf	278,7966 mm		
Cota maquina inicio	Ci	278,7917 mm	Cota maquina inicio	Ci	278,7947 mm		
Diametro do rebolo inicial		399,8868 mm	Diametro do rebolo inicial		399,8808 mm		
Diametro do rebolo final		399,8838 mm	Diametro do rebolo final		399,877 mm		
Largura efetiva do rebolo	l	15 mm	Largura efetiva do rebolo	l	15 mm		
Volume de rebolo gasto	Vs	28,26623 mm ³	Volume de rebolo gasto	Vs	35,80331 mm ³		
Relação G			Relação G				
							G 12,64939
Teste 9 - 80m/s - Q _w 200 mm ³ /mm.min - CBN	Corrida 1			Corrida 2			Vm 405,2202
	Volume de material da peça			Volume de material da peça			
	Diametro maior inicial	di	4,82 mm	Diametro maior inicial	di	4,82 mm	
	Diametro final	df	4,7 mm	Diametro final	df	4,7 mm	
	Diametro menor inicial	di	2,92 mm	Diametro menor inicial	di	2,92 mm	
	Diametro menor final	df	2,8 mm	Diametro menor final	df	2,8 mm	
	Largura	l	8,9 mm	Largura	l	8,9 mm	
	Largura	l	6,1 mm	Largura	l	6,1 mm	
	numero de peças	np	50	numero de peças	np	50	
	Volume de material removido da peça	Vm	405,2202 mm ³	Volume de material removido da peça	Vm	405,2202 mm ³	
Volume de material removido do rebolo			Volume de material removido do rebolo			Vs 11,30615	
Cota maquina final	Cf	278,7973 mm	Cota maquina final	Cf	278,7998 mm		
Cota maquina inicio	Ci	278,7968 mm	Cota maquina inicio	Ci	278,7991 mm		
Diametro do rebolo inicial		399,8766 mm	Diametro do rebolo inicial		399,872 mm		
Diametro do rebolo final		399,8756 mm	Diametro do rebolo final		399,8706 mm		
Largura efetiva do rebolo	l	15 mm	Largura efetiva do rebolo	l	15 mm		
Volume de rebolo gasto	Vs	9,421859 mm ³	Volume de rebolo gasto	Vs	13,19044 mm ³		
Relação G			Relação G				
							G 35,84069

	Corrida 1				Corrida 2					
	Volume de material da peça				Volume de material da peça					
Teste 11 - 60m/s - Qw 150 mm3/mm.min. - SG	Diametro maior inicial	di	4,82	mm	Diametro maior inicial	di	4,82	mm	Vm	405,2202
	Diametro final	df	4,7	mm	Diametro final	df	4,7	mm		
	Diametro menor inicial	di	2,92	mm	Diametro menor inicial	di	2,92	mm		
	Diametro menor final	df	2,8	mm	Diametro menor final	df	2,8	mm		
	Largura	l	8,9	mm	Largura	l	8,9	mm		
	Largura	l	6,1	mm	Largura	l	6,1	mm		
	numero de peças	np	50		numero de peças	np	50			
	Volume de material removido da peça	Vm	405,2202	mm3	Volume de material removido da peça	Vm	405,2202	mm3		
	Volume de material removido do rebolo				Volume de material removido do rebolo					
	Cota maquina final	Cf	279,1646	mm	Cota maquina final	Cf	279,1682	mm		
Cota maquina inicio	Ci	279,1629	mm	Cota maquina inicio	Ci	279,1668	mm			
Diametro do rebolo inicial		396,9648	mm	Diametro do rebolo inicial		396,957	mm			
Diametro do rebolo final		396,9614	mm	Diametro do rebolo final		396,9542	mm			
Largura	l	15	mm	Largura	l	15	mm			
Volume de rebolo gasto	Vs	31,80096	mm3	Volume de rebolo gasto	Vs	26,18853	mm3			
Relação G	G1	12,74239		Relação G	G2	15,4732		G	13,97564	
Teste 14 - 70m/s - Qw 150 mm3/mm.min. - SG	Volume de material da peça				Volume de material da peça				Vm	405,2202
	Diametro maior inicial	di	4,82	mm	Diametro maior inicial	di	4,82	mm		
	Diametro final	df	4,7	mm	Diametro final	df	4,7	mm		
	Diametro menor inicial	di	2,92	mm	Diametro menor inicial	di	2,92	mm		
	Diametro menor final	df	2,8	mm	Diametro menor final	df	2,8	mm		
	Largura	l	8,9	mm	Largura	l	8,9	mm		
	Largura	l	6,1	mm	Largura	l	6,1	mm		
	numero de peças	np	50		numero de peças	np	50			
	Volume de material removido da peça	Vm	405,2202	mm3	Volume de material removido da peça	Vm	405,2202	mm3		
	Volume de material removido do rebolo				Volume de material removido do rebolo					
Cota maquina final	Cf	279,1684	mm	Cota maquina final	Cf	279,1709	mm			
Cota maquina inicio	Ci	279,1681	mm	Cota maquina inicio	Ci	279,1701	mm			
Diametro do rebolo inicial		396,9544	mm	Diametro do rebolo inicial		396,9504	mm			
Diametro do rebolo final		396,9538	mm	Diametro do rebolo final		396,9488	mm			
Largura	l	15	mm	Largura	l	15	mm			
Volume de rebolo gasto	Vs	5,611806	mm3	Volume de rebolo gasto	Vs	14,96465	mm3			
Relação G	G1	72,20852		Relação G	G2	27,0785		G	39,38679	
Teste 17 - 80m/s - Qw 150 mm3/mm.min. - SG	Volume de material da peça				Volume de material da peça				Vm	405,2202
	Diametro maior inicial	di	4,82	mm	Diametro maior inicial	di	4,82	mm		
	Diametro final	df	4,7	mm	Diametro final	df	4,7	mm		
	Diametro menor inicial	di	2,92	mm	Diametro menor inicial	di	2,92	mm		
	Diametro menor final	df	2,8	mm	Diametro menor final	df	2,8	mm		
	Largura	l	8,9	mm	Largura	l	8,9	mm		
	Largura	l	6,1	mm	Largura	l	6,1	mm		
	numero de peças	np	50		numero de peças	np	50			
	Volume de material removido da peça	Vm	405,2202	mm3	Volume de material removido da peça	Vm	405,2202	mm3		
	Volume de material removido do rebolo				Volume de material removido do rebolo					
Cota maquina final	Cf	279,1714	mm	Cota maquina final	Cf	279,1722	mm			
Cota maquina inicio	Ci	279,1712	mm	Cota maquina inicio	Ci	279,1718	mm			
Diametro do rebolo inicial		396,9482	mm	Diametro do rebolo inicial		396,947	mm			
Diametro do rebolo final		396,9478	mm	Diametro do rebolo final		396,9462	mm			
Largura	l	15	mm	Largura	l	15	mm			
Volume de rebolo gasto	Vs	3,741147	mm3	Volume de rebolo gasto	Vs	7,482267	mm3			
Relação G	G1	108,3144		Relação G	G2	54,15741		G	72,2098	

	Corrida 1				Corrida 2				Vm	405,2202
	Volume de material da peça				Volume de material da peça					
	Teste 12 - 60m/s - Qw 200 mm3/mm.min - SG	Diametro maior inicial	di	4,82	mm	Diametro maior inicial	di	4,82		
Diametro final		df	4,7	mm	Diametro final	df	4,7	mm		
Diametro menor inicial		di	2,92	mm	Diametro menor inicial	di	2,92	mm		
Diametro menor final		df	2,8	mm	Diametro menor final	df	2,8	mm		
Largura		l	8,9	mm	Largura	l	8,9	mm		
Largura		l	6,1	mm	Largura	l	6,1	mm		
numero de peças		np	50		numero de peças	np	50			
Volume de material removido da peça		Vm	405,2202	mm3	Volume de material removido da peça	Vm	405,2202	mm3		
Volume de material removido do rebolo				Volume de material removido do rebolo						
Cota maquina final		Cf	279,1759	mm	Cota maquina final	Cf	279,1799	mm		
Cota maquina inicio	Ci	279,1713	mm	Cota maquina inicio	Ci	279,1773	mm			
Diametro do rebolo inicial		396,948	mm	Diametro do rebolo inicial		396,936	mm			
Diametro do rebolo final		396,9388	mm	Diametro do rebolo final		396,9308	mm			
Largura	l	15	mm	Largura	l	15	mm			
Volume de rebolo gasto	Vs	86,04538	mm3	Volume de rebolo gasto	Vs	48,63312	mm3			
Relação G	G1	4,709378		Relação G	G2	8,332186				
								G	6,017593	

	Corrida 1				Corrida 2				Vm	405,2202
	Volume de material da peça				Volume de material da peça					
	Teste 15 - 70m/s - Qw 200 mm3/mm.min - SG	Diametro maior inicial	di	4,82	mm	Diametro maior inicial	di	4,82		
Diametro final		df	4,7	mm	Diametro final	df	4,7	mm		
Diametro menor inicial		di	2,92	mm	Diametro menor inicial	di	2,92	mm		
Diametro menor final		df	2,8	mm	Diametro menor final	df	2,8	mm		
Largura		l	8,9	mm	Largura	l	8,9	mm		
Largura		l	6,1	mm	Largura	l	6,1	mm		
numero de peças		np	50		numero de peças	np	50			
Volume de material removido da peça		Vm	405,2202	mm3	Volume de material removido da peça	Vm	405,2202	mm3		
Volume de material removido do rebolo				Volume de material removido do rebolo						
Cota maquina final		Cf	279,1812	mm	Cota maquina final	Cf	279,1844	mm		
Cota maquina inicio	Ci	279,1804	mm	Cota maquina inicio	Ci	279,1822	mm			
Diametro do rebolo inicial		396,9298	mm	Diametro do rebolo inicial		396,9262	mm			
Diametro do rebolo final		396,9282	mm	Diametro do rebolo final		396,9218	mm			
Largura	l	15	mm	Largura	l	15	mm			
Volume de rebolo gasto	Vs	14,96387	mm3	Volume de rebolo gasto	Vs	41,15013	mm3			
Relação G	G1	27,07991		Relação G	G2	9,847363				
								G	14,44275	

	Corrida 1				Corrida 2				Vm	405,2202
	Volume de material da peça				Volume de material da peça					
	Teste 18 - 80m/s - Qw 200 mm3/mm.min - SG	Diametro maior inicial	di	4,82	mm	Diametro maior inicial	di	4,82		
Diametro final		df	4,7	mm	Diametro final	df	4,7	mm		
Diametro menor inicial		di	2,92	mm	Diametro menor inicial	di	2,92	mm		
Diametro menor final		df	2,8	mm	Diametro menor final	df	2,8	mm		
Largura		l	8,9	mm	Largura	l	8,9	mm		
Largura		l	6,1	mm	Largura	l	6,1	mm		
numero de peças		np	50		numero de peças	np	50			
Volume de material removido da peça		Vm	405,2202	mm3	Volume de material removido da peça	Vm	405,2202	mm3		
Volume de material removido do rebolo				Volume de material removido do rebolo						
Cota maquina final		Cf	279,1849	mm	Cota maquina final	Cf	279,1878	mm		
Cota maquina inicio	Ci	279,1831	mm	Cota maquina inicio	Ci	279,1863	mm			
Diametro do rebolo inicial		396,9244	mm	Diametro do rebolo inicial		396,918	mm			
Diametro do rebolo final		396,9208	mm	Diametro do rebolo final		396,915	mm			
Largura	l	15	mm	Largura	l	15	mm			
Volume de rebolo gasto	Vs	33,66817	mm3	Volume de rebolo gasto	Vs	28,05637	mm3			
Relação G	G1	12,03571		Relação G	G2	14,44307				
								G	13,12995	

Apêndice C – Valores para cálculo de U e E para rebolos de CBN

Teste 1 60m/s Q1 CBN		Teste 2 60m/s Q2 CBN		Teste 3 60m/s Q3 CBN	
G	5,97169672	G	6,61562	G	7,964145
P	3693 W	P	3923 W	P	4114 W
P	3693 J/s	P	3923 J/s	P	4114 J/s
t _c	0,81 s	t _c	0,54 s	t _c	0,41 s
V _w	6,078303201 mm ³	V _w	6,078303 mm ³	V _w	6,078303 mm ³
V' _w	7,504078026 mm ³ /s	V' _w	11,25612 mm ³ /s	V' _w	14,82513 mm ³ /s
b _{s eff}	15 mm	b _{s eff}	15 mm	b _{s eff}	15 mm
Q'	0,500271868 mm ³ /mm.s	Q'	0,750408 mm ³ /mm.s	Q'	0,988342 mm ³ /mm.s
U	492,1324095 J/mm³	U	348,5216 J/mm³	U	277,5018 J/mm³
E	12,13432931 mm³/J	E	18,98195 mm³/J	E	28,69944 mm³/J

Teste 4 70m/s Q1 CBN		Teste 5 70m/s Q2 CBN		Teste 6 70m/s Q3 CBN	
G	10,7495436	G	7,544354	G	12,64939
P	4538 W	P	4512 W	P	4675 W
P	4538 J/s	P	4512 J/s	P	4675 J/s
t _c	0,81 s	t _c	0,54 s	t _c	0,41 s
V _w	6,078303201 mm ³	V _w	6,078303 mm ³	V _w	6,078303 mm ³
V' _w	7,504078026 mm ³ /s	V' _w	11,25612 mm ³ /s	V' _w	14,82513 mm ³ /s
b _{s eff}	15 mm	b _{s eff}	15 mm	b _{s eff}	15 mm
Q'	0,500271868 mm ³ /mm.s	Q'	0,750408 mm ³ /mm.s	Q'	0,988342 mm ³ /mm.s
U	604,7378485 J/mm³	U	400,8487 J/mm³	U	315,3429 J/mm³
E	17,77554295 mm³/J	E	18,82095 mm³/J	E	40,11311 mm³/J

Teste 7 80m/s Q1 CBN		Teste 8 80m/s Q2 CBN		Teste 9 80m/s Q3 CBN	
G	26,87468411	G	17,91844	G	35,84069
P	5041 W	P	5501 W	P	5366 W
P	5041 J/s	P	5501 J/s	P	5366 J/s
t _c	0,81 s	t _c	0,54 s	t _c	0,41 s
V _w	6,078303201 mm ³	V _w	6,078303 mm ³	V _w	6,078303 mm ³
V' _w	7,504078026 mm ³ /s	V' _w	11,25612 mm ³ /s	V' _w	14,82513 mm ³ /s
b _{s eff}	15 mm	b _{s eff}	15 mm	b _{s eff}	15 mm
Q'	0,500271868 mm ³ /mm.s	Q'	0,750408 mm ³ /mm.s	Q'	0,988342 mm ³ /mm.s
U	671,7680684 J/mm³	U	488,712 J/mm³	U	361,953 J/mm³
E	40,00589694 mm³/J	E	36,66461 mm³/J	E	99,02028 mm³/J

Apêndice D – Valores para cálculo de U e E para rebolos de seeded-gel

Teste 10 60m/s Q1 NQ		Teste 11 60m/s Q2 NQ		Teste 12 60m/s Q3 NQ	
G	8,33092186	G	13,97564	G	6,017593
P	4656 W	P	5032 W	P	5025 W
P	4656 J/s	P	5032 J/s	P	5025 J/s
t _c	0,81 s	t _c	0,54 s	t _c	0,41 s
V _w	6,078303201 mm ³	V _w	6,078303 mm ³	V _w	6,078303 mm ³
V' _w	7,504078026 mm ³ /s	V' _w	11,25612 mm ³ /s	V' _w	14,82513 mm ³ /s
b _{s eff}	15 mm	b _{s eff}	15 mm	b _{s eff}	15 mm
Q'	0,500271868 mm ³ /mm.s	P	0,750408 mm ³ /mm.s	P	0,988342 mm ³ /mm.s
U	620,4626317 J/mm³	U	447,0458 J/mm³	U	338,9515 J/mm³
E	13,42695182 mm³/J	E	31,26222 mm³/J	E	17,75355 mm³/J
Teste 13 70m/s Q1 NQ		Teste 14 70m/s Q2 NQ		Teste 15 70m/s Q3 NQ	
G	28,88141497	G	39,38679	G	14,44275
P	5707 W	P	5650 W	P	5644 W
P	5707 J/s	P	5650 J/s	P	5644 J/s
t _c	0,81 s	t _c	0,54 s	t _c	0,41 s
V _w	6,078303201 mm ³	V _w	6,078303 mm ³	V _w	6,078303 mm ³
V' _w	7,504078026 mm ³ /s	V' _w	11,25612 mm ³ /s	V' _w	14,82513 mm ³ /s
b _{s eff}	15 mm	b _{s eff}	15 mm	b _{s eff}	15 mm
Q'	0,500271868 mm ³ /mm.s	Q'	0,750408 mm ³ /mm.s	Q'	0,988342 mm ³ /mm.s
U	760,5198108 J/mm³	U	501,9493 J/mm³	U	380,7049 J/mm³
E	37,97588775 mm³/J	E	78,46766 mm³/J	E	37,93686 mm³/J
Teste 16 80m/s Q1 NQ		Teste 17 80m/s Q2 NQ		Teste 18 80m/s Q3 NQ	
G	28,88174382	G	72,2098	G	13,12995
P	6405 W	P	6695 W	P	6724 W
P	6405 J/s	P	6695 J/s	P	6724 J/s
t _c	0,81 s	t _c	0,54 s	t _c	0,41 s
V _w	6,078303201 mm ³	V _w	6,078303 mm ³	V _w	6,078303 mm ³
V' _w	7,504078026 mm ³ /s	V' _w	11,25612 mm ³ /s	V' _w	14,82513 mm ³ /s
b _{s eff}	15 mm	b _{s eff}	15 mm	b _{s eff}	15 mm
Q'	0,500271868 mm ³ /mm.s	Q'	0,750408 mm ³ /mm.s	Q'	0,988342 mm ³ /mm.s
U	853,5359012 J/mm³	U	594,7877 J/mm³	U	453,5542 J/mm³
E	33,83776098 mm³/J	E	121,4043 mm³/J	E	28,94903 mm³/J