



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU**

HÉLIO APARECIDO DE SOUZA

**AVANÇOS NA FABRICAÇÃO DE SUPERFÍCIES INTERROMPIDAS PELA
APLICAÇÃO DE DIFERENTES TÉCNICAS DE LUBRIRREFRIGERAÇÃO NO
PROCESSO DE RETIFICAÇÃO**

**BAURU
2023**



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"



HÉLIO APARECIDO DE SOUZA

**AVANÇOS NA FABRICAÇÃO DE SUPERFÍCIES INTERROMPIDAS PELA
APLICAÇÃO DE DIFERENTES TÉCNICAS DE LUBRIRREFRIGERAÇÃO NO
PROCESSO DE RETIFICAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. José Claudio Lopes

Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi

**BAURU
2023**

S729a

Souza, Hélio Aparecido

Avanços na fabricação de superfícies interrompidas pela aplicação de diferentes técnicas de lubrificação no processo de retificação / Hélio Aparecido Souza. -- Bauru, 2023

65 p. : il., tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, Bauru

Orientador: José Claudio Lopes

Coorientador: Eduardo Carlos Bianchi

1. Retificação. 2. Corte interrompido. 3. Lubrificação otimizada. 4. Estimativa de custo. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Engenharia, Bauru. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE HELIO APARECIDO DE SOUZA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 23 dias do mês de fevereiro do ano de 2023, às 09:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de HELIO APARECIDO DE SOUZA, intitulada **AVANÇOS NA FABRICAÇÃO DE SUPERFÍCIES INTERROMPIDAS PELA APLICAÇÃO DE DIFERNTES TÉCNICAS DE LUBRIRREFRIGERAÇÃO NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. JOSÉ CLAUDIO LOPES (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecanica / Campus de Bauru, Dr. HAMILTON JOSÉ DE MELLO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / FEB/UNESP/Bauru, Prof. Dr. CARLOS ELIAS DA SILVA JUNIOR (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: APROVADO . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.



Prof. Dr. JOSÉ CLAUDIO LOPES

Dedico a minha família que com apoio e cobranças colaboraram na realização desse trabalho: meus pais Ari (in memorian) e Ana Rosa (in memorian), à minha esposa Cybele e aos meus filhos Eduarda Cristina, Hélio Eduardo, Helena Vitória e Samuel Eloi os quais me ajudaram de maneira indireta, com os maiores e sinceros incentivos sem os quais não seria possível finalizar esta etapa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela graça e oportunidade de chegar até o presente momento com muitas lutas e provações, sobretudo, com vitórias marcantes e realizadoras.

Ao meu pai Ari de Souza (*in memoriam*) e a minha mãe Ana Rosa Mendes de Souza (*in memoriam*), que mesmo com todas as dificuldades puderam encaminhar a mim e aos meus irmãos Edson de Souza e Edilson de Souza (aos quais também agradeço), no caminho da honestidade, sinceridade, respeito, humildade e fé.

Agradeço a minha esposa Cybele Aparecida Bernardes aos nossos filhos Eduarda Cristina, Hélio Eduardo, Helena Vitória e Samuel Elói, pelos incentivos diretos e indiretos, pelo companheirismo e também pelas críticas construtivas que acarretaram mudanças e melhorias.

Ao meu orientador, Professor Dr. José Claudio Lopes, por acreditar na minha capacidade de concluir esta pesquisa, culminado com esta dissertação, pela grande e competente orientação dada ao longo de todo este estudo, não apenas no campo educacional, mas no campo pessoal, pelo incentivo, pelo conhecimento transmitido, pela constante disponibilidade para ajudar e pela amizade.

Agradeço imensamente ao meu coorientador Professor Titular Eduardo Carlos Bianchi pela confiança, por ser o maior incentivado para minha entrada no programa de pós-graduação. Agradeço por seu apoio, com muitos ensinamentos, dicas e orientações as quais estão sempre presentes no meu dia a dia.

À Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista *campus* de Bauru, em especial ao Departamento de Engenharia Mecânica por gentilmente ceder os Laboratórios de Usinagem por Abrasão – LUA e de Materiais, para a elaboração desta pesquisa.

Aos docentes da Faculdade Engenharia de Bauru, Professores Ivaldo de Domenico Valarelli, João Eduardo Guarnetti dos Santos, Luiz Daré Neto, Reinaldo Sebastião Silva e Thiago Valle França pela proximidade, amizade e pelas conversas sempre esclarecedoras sobre os mais diversos assuntos.

Aos servidores técnico-administrativos da Faculdade de Engenharia de Bauru, de maneira especial Dr. Hamilton José de Mello, Me. Cristiano Angélico, Dr. Ulisses Frazão de Oliveira Tibúrcio, Osmar Luís Martinelli e José Marcelo Felix da Silva, por todo

suporte que me foi dado e por gentilmente colaborarem neste projeto, com incentivo, motivação e apoio.

Aos alunos de graduação e pós-graduação, pelos momentos de aprendizados juntos em disciplinas, também nos laboratórios da FEB, e foram de grande importância no andamento deste trabalho: Felipe Aparecido Alexandre (*in memoriam*), Fernando Sabino Fontequê Ribeiro, Rafael Liberatti Javaroni, Matheus de Souza Rodrigues, Benício Nassif Ávila, Bruno Kenta Sato, Lucas de Martini Fernandes, Rafael Lemes Rodriguez, André Bueno Tavares e Anthony Gaspar Talon,

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

*Bem-aventurado o homem que acha sabedoria,
e o homem que adquire conhecimento.*

(Provérbios 3:13)

RESUMO

A retificação de geometrias interrompidas apresenta dificuldades técnicas como impactos mecânicos e maiores gradientes térmicos em relação á retificação de geometrias contínuas, resultando em diminuição da qualidade da peça, desgaste prematuro da ferramenta e aumento de custos. No entanto, poucos estudos sobre retificação interrompida estão disponíveis. Nesse contexto, a presente pesquisa avalia a retificação cilíndrica de mergulho de peças com diferentes geometrias (0, 2, 6 e 12 ranhuras), feitas de aço AISI 4340 temperado e revenido, retificadas com rebolo de CBN. Foram usados o sistema convencional de lubrificação e o sistema otimizado com bocal convergente, aplicados em três velocidades de avanço (0,25 0,50 e 0,75 mm/min). Os parâmetros de saída analisados formam rugosidade superficial, desvio de circularidade, desgaste diametral do rebolo, razão G, potência de retificação, análise metalográfica e custo do rebolo. O método de lubrificação por jato convergente apresentou melhor desempenho que o método convencional em todas as condições testadas, reduzindo em até 25% a rugosidade superficial, 20% o desvio de circularidade, 11% o desgaste diametral do rebolo, 11% a potência de retificação e 23% o custo do rebolo, indicando sua viabilidade para a retificação de geometrias interrompidas.

Palavras-chave: Retificação. Corte interrompido. Lubrificação otimizada. Estimativa de custo.

ABSTRACT

Grinding of interrupted geometries has technical difficulties, such as mechanical impacts and higher thermal gradients in relation to the continuous grinding geometries, resulting in decreased workpiece quality, premature wheel wear and cost increases. However, few interrupted grinding studies are available. In this context, this research evaluates the different feed rates applied to the plunge grinding with different geometries (0, 2, 6, and 12 grooves), made of seasoned and revealed AISI 4340 steel, using CBN wheel. The flood lubri-refrigeration system and the converging nozzle-optimized system were applied at three feed rates (0.25 0.50 and 0.75 mm/min). The analyzed output parameters were: surface roughness, roundness error, diametrical wheel wear, G-ratio, grinding power, metallographic analysis and grinding cost. The convergent jet lubri-refrigeration method showed better performance than the conventional method under all tested conditions, reducing surface roughness by up to 25%, 20% roundness error, 11% diametrical wheel wear, 11% grinding power, and 23% grinding cost, indicating its feasibility for the grinding of interrupted geometries.

Keywords: Grinding. Interrupted cutting. Optimized lubri-refrigeration. Cost analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Efeito do aumento da velocidade de corte: (a) Sob taxa de remoção de material constante e (b) Sob taxa de remoção de material crescente.....	24
Figura 2: Descrição dos quatro tipos de corpos de prova que foram utilizados nos ensaios de retificação.....	37
Figura 3: Processo retificação: a lubrificação convencional, b lubrificação por jato convergente e c características do bocal convergente:.....	38
Figura 4: Fluxograma de ensaios para refrigeração convencional.	39
Figura 5: Fluxograma de ensaios para refrigeração otimizada.....	40
Figura 6: Medição do desgaste diametral do rebolo (método indireto): sendo (a) rebolo em contato com a peça, (b) região desgaste do rebolo, (c) rebolo em contato com cilindro de impressão e (d) medição indireta do desgaste do rebolo	42
Figura 7: Rugosidade das peças retificadas em função da velocidade de avanço do rebolo e das condições de lubrificação empregadas.	44
Figura 8: Desvios de circularidade das peças retificadas em função da velocidade de avanço do rebolo e das condições de lubrificação empregadas.....	46
Figura 9: Desgaste diametral em função da velocidade de avanço do rebolo e das condições de lubrificação empregadas	48
Figura 10: Relação G em função da velocidade de avanço do rebolo e das condições de lubrificação empregadas.....	48
Figura 11: Potência elétrica consumida em função da velocidade de avanço do rebolo e das condições de lubrificação empregadas.....	50
Figura 12: Análise metalográfica das peças após a retificação com velocidade de avanço de 0,75 mm/min, com lubrificação convencional: a) sem ranhuras, b) 2 ranhuras, c) 6 ranhuras e d) 12 ranhuras; e com lubrificação convergente: e) sem ranhuras,52	
Figura 13: Estimativas de custo do rebolo em função do número de ranhuras das peças retificadas, das velocidades de avanço e das condições de lubrificação empregadas.	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

μ	Coeficiente de atrito	[-]
A	Área média de desgaste no topo dos grãos	[mm ²]
a	Profundidade de corte real	[mm]
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas	
ap	Profundidade de corte	[mm]
b	Largura do rebolo	[mm]
C	Carbono	
CBN	Nitreto cúbico de boro	[-]
cd	Profundidade radial	[mm]
Cr	Cromo	
Cu	Cobre	
ds	Diâmetro do rebolo	[mm]
dw	Diâmetro da peça	[mm]
ec	Energia específica	[J/mm ³]
Fa	Força axial	[N]
Fn	Força normal	[N]
Ftc	Força tangencial	[N]
G	Relação G	[-]
heq	Espessura equivalente de corte	[μ m]
h _{max}	Espessura teórica máxima do cavaco	
HRc	Dureza Rockwell (escala c)	
K	Força de corte unitária	[N]
lc	Comprimento de contato	[mm]
Mn	Manganês	
Mo	Molibdênio	
MQL	Mínima quantidade de lubrificante	
Ni	Níquel	
ns	Rotação do rebolo	[rpm]
nw	Rotação da peça	[rpm]
P	Potência de corte	[W]
p	Pressão unitária	[N/mm ²]
Q'w	Taxa específica de remoção de material no tempo	[mm ³ /mm.s]

Qw	Taxa de remoção de material no tempo	[mm ³ /s]
Ra	Rugosidade média aritmética	[μm]
Rz	Rugosidade total	[μm]
Si	Silício	
vf	Velocidade de avanço do rebolo	[mm/min]
vs	Velocidade tangencial do rebolo ou velocidade de corte	[mm/min]
vw	Velocidade da peça ou velocidade de trabalho	[m/s]
Zs	Volume de rebolo gasto	[mm ³]
Zw	Volume de material removido	[mm ³]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Objetivos	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Processo de retificação	17
2.1.1 Retificação cilíndrica externa de mergulho.....	18
2.1.2 Parâmetros do processo de retificação cilíndrica externa de mergulho.....	18
2.2 Fluido de corte	27
2.2.1 Problemas na utilização do fluido de corte	27
2.3 Rebolo Nitreto Cúbico de Boro (CBN)	28
2.4 Aço AISI 4340 temperado e revenido	30
2.5 Variáveis de saída do processo de retificação cilíndrica	30
2.5.1 Rugosidade	30
2.5.2 Desvios de circularidade	31
2.5.3 Desgaste diametral do rebolo	31
2.5.4 Microdureza	32
2.5.6 Força tangencial de corte	32
2.6 Usinagem em geometria interrompida	33
2.6.1 Retificação de peças com corte interrompido	33
2.6.2 Uso de rebolo de CBN com geometria interrompida	34
3 MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1 Equipamentos e materiais utilizados nos experimentos	35
3.1.1 Retificação corpos de prova	35
3.1.2 Rebolo de CBN e dressador	35
3.1.3 Corpos de prova.....	36
3.1.4 Sistemas de lubrificação utilizados	37
3.2 Sequências de ensaios	38
3.3 Parâmetros de saída analisados	40
3.3.1 Rugosidade	40
3.3.2 Desvio de circularidade.....	41
3.3.3 Desgaste Diametral do rebolo	41
3.3.4 Análise metalográfica	42
3.3.5 Potência de retificação.	42
3.3.6 Razão G de retificação	43

3.4	Análise de custo e desgaste do rebolo.....	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
4.1.	Rugosidade.....	44
4.2	Desvios de Circularidade.....	45
4.3	Desgaste diametral do rebolo e relação G.....	47
4.4.	Potência elétrica consumida	49
4.5	Análise metalográfica	51
4.6	Custo do rebolo	52
	CONCLUSÕES	55
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	56
	REFERÊNCIAS.....	57

1 INTRODUÇÃO

Na usinagem o corte interrompido ocorre quando não há contato estável entre a aresta de corte e a superfície do material usinado. Além disso, ocorre um impacto devido ao aumento súbito das forças de corte. A característica intrínseca do corte interrompido é a entrada e saída da ferramenta do contato com a peça repetidamente, durante a usinagem. Portanto, o material e a ferramenta são submetidos a ciclos termodinâmicos e de carga durante a usinagem. Além disso, a reentrada da ferramenta no material é crítica porque a força de corte aumenta de zero a seu valor médio muito rápido. Essas cargas termomecânicas são propensas a causar microfissuras na superfície do material e desgaste prematuro da ferramenta.

Produtos de alta qualidade com baixo custo e impacto mínimo sobre o meio ambiente são a chave para um processo de usinagem bem-sucedido. Neste contexto, há muitas melhorias possíveis na usinagem de corte interrompido desde que estudos anteriores apontam à qualidade insatisfatória da peça e ao desgaste precoce da ferramenta.

Trabalhos anteriores avaliaram a retificação com geometrias interrompidas. De Mello et al., (2018), avaliaram a retificação interrompida com três geometrias de peças diferentes (2, 6 e 12 ranhuras) em comparação com uma peça sem ranhuras. O resultado mostrou que a rugosidade da superfície aumentou até 100%, e o desgaste da ferramenta foi até 20% maior na retificação interrompida. Zhou et al., (2019) observaram o aumento da temperatura na retificação interrompida em relação à retificação contínua. Além disso, o pico de temperatura foi encontrado durante a saída da ferramenta.

Na usinagem com geometria definida, verifica-se que também há problemas em função do aumento das interrupções. Godoy e Diniz, (2011) estudaram os mecanismos de desgaste de corte interrompido no torneamento do aço AISI 4340 com CBN e ferramentas cerâmicas. O mecanismo de desgaste predominante foi abrasão, e lascamento que ocorreu na aresta de corte devido aos choques mecânicos. A rugosidade da superfície e o desgaste da ferramenta foram maiores no corte interrompido.

Durante a retificação de peças com geometria interrompida, Ribeiro et al., (2020) investigaram a influência do aglutinante em rebolos de óxido de alumínio. Eles observaram que o desgaste diametral do rebolo foi diretamente influenciado pela resistência do ligante a altas temperaturas e impactos. O ligante resinoide apresentou maior desempenho na retificação interrompida devido à sua melhor resistência ao impacto, enquanto a ligação vitrificada foi mais eficaz na remoção de material em

geometrias contínuas, principalmente devido sua maior resistência térmica. Nos processos de retificação, uma grande quantidade de energia é consumida para remover uma pequena quantidade de material. A maior parte desta energia é transformada em calor, o que pode danificar a peça de trabalho e o rebolo sem gestão adequada. Neste contexto, para obter parâmetros de qualidade, aplicar métodos de lubrificação é fundamental.

Trabalhos recentes têm procurado identificar influências na formação de calor na retificação, incluindo retificação de geometrias interrompidas. Jamshidi e Budak, (2021) utilizaram um modelo teórico e uma avaliação experimental em retificação a seco e lubrificada. Os resultados teóricos mostraram que, considerando a natureza dependente do tempo da fonte de calor no modelo forneceu informações mais detalhadas sobre a temperatura da peça durante o aquecimento e períodos de resfriamento, fornecendo previsões mais próximas das medições. Os autores destacaram que o modelo proposto previsões de temperatura melhoraram em aproximadamente 47% comparado com o modelo de fonte de calor constante. Além disso, ele prevê a temperatura máxima com menos de 10% discrepância média com as medidas. Em outro trabalho, Jamshidi e Budak, (2021b) apresentaram um modelo numérico para prever a espessura da camada termicamente afetada durante a retificação, sendo comparado com avaliações experimentais para a validação do modelo.

Guo e Chen, (2018) propuseram modelos térmicos transientes para entender os fatores subjacentes que afetam a temperatura durante a retificação de geometrias interrompidas. Os autores propuseram estratégias de otimização de processos para aumentar a taxa de remoção do modelo, visando entender os fatores subjacentes que afetam a temperatura na retificação de geometrias interrompidas. Eles determinaram que resfriar as superfícies laterais torna-se fundamental para suprimir a temperatura, especialmente em baixas velocidades.

O método de lubrificação mais comum é a aplicação do fluido de corte abundantemente na zona de contato entre a ferramenta e a peça de trabalho. A aplicação do fluido melhora o desempenho do processo lubrificando, resfriando e limpando a interface de corte, resultando em maior qualidade e produtividade (MAJUMDAR et al., 2021).

A otimização na aplicação do fluido de corte é a chave para atingir seu maior potencial de desempenho. Portanto, os parâmetros de entrada devem ser estudados para elevar o desempenho do processo, por exemplo, bocal, ângulo, distância, pressão e

velocidade. O fato desafiador sobre a aplicação do fluido de corte na retificação é a barreira de ar formada ao redor do rebolo faz com que a entrega de fluido na zona de corte seja dificultada. Nesse contexto, Lightstone; Koshy; Tullis, (2021) estudaram a aplicação do fluido de corte em um fluxo laminar para melhorar a penetração da barreira de ar. O fluxo laminar tem que ter uma velocidade de 25% do rebolo para penetrar a barreira de ar. A velocidade mais alta aplicação de fluidos de corte melhorou a rugosidade da superfície e desvio de arredondamento (M. C. S., ALVES, BIANCHI, E. C., AGUIAR, P. R., CANARIM, 2011).

O impulso do fluxo de fluido de corte determina a eficácia do fluido entrar na zona de corte; ou seja, a velocidade, o fluxo e a pressão devem ser calculados para fornecer a penetração do fluido na barreira de ar (BAUMGART et al., 2017). Portanto, o sistema de lubrificação otimizada se caracteriza por uma alta pressão e uma elevada taxa de fluido de corte para penetrar na barreira de ar. Dessa forma, a correta aplicação desse sistema permite uma melhor dissipação do calor gerado durante a usinagem, além de garantir a lubrificação adequada da ferramenta de corte. A lubrificação e o resfriamento dependem da eficiência da entrada do fluido na região de corte entre a peça e o rebolo (WEBSTER et al., 1995). Desta forma, grandes volumes de fluido aplicado em baixas pressões podem ser ineficiente, resultando em desperdícios e aumento de custos no processo. No outro lado, um método convergente com jato de fluido com maior velocidade e pressão aplicadas diretamente na região de corte podem penetrar na barreira de ar de forma mais eficaz, reduzindo significativamente a temperatura do processo. Damasceno et al., (2017) analisaram a retificação da superfície do aço AISI 4340 com um rebolo de CBN vitrificado, usando convencional, convergente e métodos MQL e observaram que a técnica otimizada apresentou os melhores resultados.

Morgan; Barczak; Batako, (2012) desenvolveram um modelo numérico aplicável ao método MQL. O modelo térmico usado neste estudo mostrou uma boa relação entre teoria e valores medidos experimentalmente. Embora o modelo tenha produzido bons resultados para o regime MQL, os autores afirmaram que mais pesquisas e refinamentos de modelos são necessários para esclarecer incertezas, como a presença de um efeito de resfriamento a jato e convecção. No entanto, os resultados atuais tendem a indicar que o fenômeno MQL vem diretamente da redução da razão de força.

Outra questão relevante abordada em alguns trabalhos é a relação entre o custo do processo de retificação e os métodos de lubrificação aplicados. Moretti et al., (2021) avaliaram o custo de retificação VP50 aço com rebolos de óxido de alumínio em

função dos métodos de lubrificação-resfriamento usados (convencional e MQL). Os autores concluíram que o custo do processo está diretamente ligado à técnica de lubrificação empregada, lembrando que a adoção de MQL em baixas velocidades de avanço pode reduzir o custo de produção em 200%.

Além disso, o custo do desgaste do rebolo pode ser decisivo para aumentar o custo do processo, principalmente para aplicações com rebolos de maior custo de aquisição. Talon et al., (2021) analisaram o custo em função do desgaste de rebolos de CBN com friabilidades diferentes. Verificaram que o uso do rebolo com maior friabilidade levou a um aumento no custo do processo devido à maior desgaste significativo observado na ferramenta.

1.1 Objetivos

Aprofundar a conhecimento sobre o processo de retificação de peças interrompida com diferentes geometrias interrompidas (0, 2, 6 e 12 ranhuras), feitas de aço temperado e revenido, usando rebolo de CBN e sistema de lubrificação convencional combinado a três diferentes velocidades de avanço (0,25, 0,50 e 0,75 mm/min). Os parâmetros de saída analisados foram: rugosidade média aritmética (R_a), desvio de circularidade, desgaste diametral do rebolo, razão G, potência, microscopia das peças retificadas e análise de custo do processo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Essa seção apresenta uma revisão teórica dos temas fundamentais abordados e relacionados a esse trabalho. Desse modo esse tópico visa o entendimento e embasamento dos seguintes constituintes: processo de fabricação por retificação, fluidos de corte, usinagem de peças com geometrias interrompida, rebolo de Nitreto de Boro Cúbico (CBN) e parâmetros no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho do aço AISI 4340 temperado e revenido.

2.1 Processo de retificação

A retificação é considerada um processo de usinagem por abrasão por possuir em seu sistema um rebolo constituído de grãos abrasivos, o qual rotaciona à altas velocidades (em relação ao torneamento e fresamento) e cuja finalidade é gerar alta precisão dimensional e geométrica, associada a um excelente acabamento superficial no componente usinado (ANJOS et al., 2016). Suas principais diferenças em relação aos outros processos de usinagem são: a maior área de contato entre a ferramenta de corte e a peça, ferramenta abrasiva com inúmeras arestas de corte com grãos dispostos aleatoriamente, assim como o intenso atrito entre os grãos abrasivos e a superfície da peça (BRINKSMEIER; HEINZEL; WITTMANN, 1999). Ela é empregada na indústria metalmeccânica de precisão, possuindo alto valor agregado (ALVES, 2007).

Durante a retificação, grande parte da energia é transformada em calor, aumentando a temperatura na zona de corte. Caso essa temperatura não seja mantida em níveis aceitáveis, podem ocorrer danos térmicos à peça como: trincas, queima superficial, mudanças na microestrutura e tensões residuais (MARINESCU et al., 2007). Para adequar a dissipação de calor gerada, faz-se necessária a utilização de fluidos de corte. Esses fluidos têm três funções principais: lubrificarrefrigeração do contato entre o material e o rebolo, remoção dos cavacos da zona de corte e refrigeração do sistema, diminuindo o atrito (BIANCHI et al., 2011). Por apresentarem tais funções, os fluidos de corte possibilitam um menor desgaste da ferramenta abrasiva, colaborando para o aumento da produtividade além de produzirem uma melhor qualidade dimensional e de acabamento, sendo esta última, um fator crucial na resistência da peça contra corrosão e fadiga (DEBNATH; REDDY; YI, 2014).

2.1.1 Retificação cilíndrica externa de mergulho

Em geral, na retificação cilíndrica externa de mergulho a peça possui unicamente movimento rotacional, mas em alguns casos pode se deslocar longitudinalmente. Além disso, o rebolo tem uma largura maior do que a superfície a usinar. Em algumas máquinas de produção é possível utilizar vários rebolos e usinar várias superfícies ao mesmo tempo. O processo de retificação de mergulho também permite usinar superfícies com perfis variados, através do uso de rebolos com o perfil adequado (DINIZ; DE OLIVEIRA, 2008).

2.1.2 Parâmetros do processo de retificação cilíndrica externa de mergulho

Na retificação, são adotados alguns parâmetros com a finalidade de facilitar a compreensão de alguns fenômenos do processo. A seguir serão apresentados esses parâmetros para o processo de retificação externa de mergulho. Na retificação, a taxa de remoção do material (Q_w) é um parâmetro determinado entre a profundidade de corte (a), a velocidade relativa entre a peça e o rebolo (V_w) e a largura de retificação (b) (MALKIN; BITTER, 1989). Assim, a Equação 1 pode ser apresentada (DEMIRCI; MEZGHANI; EL MANSORI, 2008):

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

Onde:

V_f = velocidade de avanço (mergulho)

d_w = diâmetro da peça.

Dividindo a taxa de remoção (Q_w) pela largura de retificação (b) pode-se obter a taxa específica de remoção (Q'_w), representada pela Equação 2, possibilitando a análise de produtividade do processo de retificação (KRUEGAR et al., 2000).

$$Q'_w = a \cdot V_w = \pi \cdot d_w \cdot V_f \quad (2)$$

A espessura da camada de material removida pelo rebolo com a velocidade periférica do mesmo é denominada espessura equivalente de corte (heq) (SHAW; COOKSON, 2005). Esse parâmetro na retificação cilíndrica pode ser denotado como a

razão entre a taxa de remoção específica do material ($Q'w$) e a velocidade de corte (V_s), sendo relacionada pela Equação 3 (HEINZEL; BLEIL, 2007):

$$heq = \frac{Q'w}{V_s} = \frac{\pi \cdot dw \cdot Vf}{60 \cdot 1000 \cdot V_s} \quad (3)$$

Além da força de corte, a espessura equivalente de corte está diretamente relacionada ao comportamento do processo de retificação o qual envolve variáveis tais como rugosidade e topografia do rebolo (MALKIN; BITTER, 1989). Para que também sejam consideradas as características do rebolo como o espaçamento entre seus grãos, é possível calcular a espessura teórica máxima do cavaco ($hmax$) (MARINESCU et al., 2007), a qual é apresentada na Equação 4:

$$hmax = 2L \frac{V_w}{V_s} \sqrt{\frac{a}{D_s}} \quad (4)$$

Onde:

L = espaçamento médio entre grãos abrasivos;

D_s = diâmetro do rebolo.

Para se obter superfícies de melhor acabamento, minimizando os danos da retificação, deve-se diminuir o valor de $hmax$. Porém, como consequência, haverá uma diminuição de produtividade já que as taxas de remoção serão reduzidas (GUO; CHEN, 2018).

2.1.3 Comprimento de contato

A extensão que a peça de trabalho fica em contato com o rebolo enquanto está sendo retificada é conhecido como comprimento de contato. Pode ser calculado levando em conta a geometria dos componentes em contato. Marinescu et al. (2007) equacionaram tal parâmetro através da Equação 5:

$$l_c = (a \cdot d_e)^{1/2} \quad (5)$$

Onde:

lc = comprimento de contato (mm)

a = profundidade de corte (mm)

de = diâmetro equivalente (mm)

Segundo Malkin e Bitter, (1989) a equação anterior não leva em conta os movimentos e deformações envolvidas no processo, tendo validade assim no caso da retificação plana, e pode ser denominado de comprimento de contato estático. Deste modo, cria-se um parâmetro denominado diâmetro equivalente, o qual estabelece que a diferença de curvatura entre a peça e o rebolo influencia no comprimento de contato (KING; HAHN, 2012). Tal parâmetro correlaciona a retificação plana e a diferença de curvatura em retificações cilíndricas internas e externas, o qual pode ser obtido conforme a Equação (6):

$$de = \frac{ds \cdot dw}{ds \pm dw} \quad (6)$$

Onde:

de = diâmetro equivalente (mm);

ds = diâmetro do rebolo (mm);

dw = diâmetro da peça (mm).

Malkin e Bitter (1989) afirmaram que, para a Equação (6), adota-se o sinal negativo quando se trata da retificação cilíndrica interna e o sinal positivo no caso da externa. No caso da retificação plana, o diâmetro da peça (d_w) deve ser considerado infinito. Assim, $d_e = d_w$. Portanto, na retificação cilíndrica esse parâmetro equivale ao diâmetro necessário de um rebolo em uma retificação plana tangencial para que este proporcione a mesma geometria de corte e comprimento de contato da retificação cilíndrica.

Desta maneira, a área de contato rebolo-peça é de grande interesse visto que para um determinado esforço no sentido radial do rebolo, tem-se uma pressão específica de corte que é função inversa do comprimento de contato rebolo-peça. A pressão que existe sobre o rebolo na região de contato entre o rebolo e a peça é dividida sobre os grãos abrasivos de forma que o aumento no comprimento de contato tem como consequência

um maior número de grãos que irão suportar o esforço com conseqüente diminuição da pressão sobre cada grão. Assim, o rebolo aparentemente é mais duro, pois quão menor o esforço existente sobre o grão, mais difícil é de removê-lo. Por conseguinte, se o comprimento de contato aumenta, pode-se também aumentar a porosidade do rebolo e o tamanho dos grãos, o que resulta em uma diminuição do número de grãos no total do rebolo, mantendo assim o número de grãos em contato com a peça e permite-se uma melhor dissipação do calor gerado, já que uma maior porosidade permite liberar mais facilmente o cavaco e favorecer a ação do refrigerante, ainda que quanto maior a área de contato rebolo-peça, maior deve ser o grão e conseqüentemente o rebolo deve ser mais macio (DINIZ; MICARONI; HASSUI, 2010).

2.1.4 Profundidade de corte (a_p)

Malkin e Bitter (1989) determinaram que a profundidade de corte equivale a profundidade que o rebolo entra na peça em relação à sua superfície com uma velocidade de avanço (v_f) durante uma revolução completa da mesma.

Segundo Rowe, (2014) o parâmetro de retificação mais básico é o real valor de profundidade de corte (a_e), mas no caso de um operador de máquina, o valor que este informa ao programa é a profundidade de corte programada (a_p), o qual se é dado em uma única passada do rebolo pela peça, remove uma profundidade real (a_e) do material muito menor do que a profundidade de corte programada. O mesmo autor ainda afirma que no caso da retificação cilíndrica de mergulho, o tempo necessário para uma revolução da peça de diâmetro d_w vale π multiplicado pelo d_w/v_w . Sendo representado pela Equação 7 para a profundidade de corte:

$$a = (\pi \cdot d_w \cdot V_f) / V_w \quad (7)$$

Onde:

a = profundidade de corte (μm)

d_w = diâmetro da peça (mm)

V_f = velocidade avanço (mm/min.)

V_w = velocidade da peça (mm/min.)

Finalmente, o autor ainda afirmou que após um número de revoluções, a profundidade de corte real (a_e) se aproxima do valor de profundidade de corte programado (a_p).

Deste modo, Marinescu et al. (2007), explicaram que tal diferença entre o valor programado e o valor real ocorre em decorrência da peça, do rebolo e da estrutura da máquina, pois defletem quando acontece o contato entre rebolo e peça, gerando deflexões mecânicas, térmicas e desgaste do rebolo. Todavia, após certo tempo de avanço ocorre uma estabilização das deflexões e elas se tornam constantes.

Ainda segundo o mesmo autor, a Equação 7 é válida quando se desconsidera a taxa de desgaste do rebolo, o que logicamente afeta a profundidade de corte devido a uma diminuição, mesmo que infinitesimal, do diâmetro rebolo. No entanto, há casos em que se deve considerar essa taxa de desgaste do rebolo como, por exemplo, na retificação de um material muito duro, em que a taxa de desgaste do rebolo é mais acentuada. Levando isso em consideração, o parâmetro (a_p) é dado pela Equação 8:

$$a_p = \frac{\pi \cdot d_w}{1 + (1/G) \cdot (d_w/d_s)} \cdot \left(\frac{v_f}{v_w} \right) \quad (8)$$

Sendo G a relação “G” que representa o volume de material removido por volume de rebolo gasto e d_s o diâmetro do rebolo.

Conforme explica Rowe, (2014), considera-se que para determinar a profundidade real de corte é necessário realizar uma medição na peça após o processo, visto que seu valor normalmente difere da profundidade de corte programada devido aos diversos fatores ocorrentes durante o processo, influenciado pela dureza da peça, afiação do rebolo, deflexão do rebolo, comprimento de contato, velocidade de corte e velocidade da peça, dentre outros. Em razão disso as forças de retificação e conseqüentemente a deflexão resultante (x) do sistema pode ser significativamente modificada, obtendo assim uma profundidade real de corte expressa pelo autor através da Equação 9:

$$a_e = a_p - x - a_s + x_{exp} \quad (9)$$

Sendo a_s o desgaste do rebolo, o qual reduz a profundidade real de corte e por isso o sinal negativo, e x_{exp} a expansão térmica da peça e elementos de máquina, a qual geralmente aumenta a profundidade de corte, e por isso o sinal positivo (ROWE, 2014).

A espessura de corte é um parâmetro importante, pois seu aumento é diretamente proporcional ao aumento na espessura equivalente de cavaco, o que causa um consequente aumento dos esforços de corte e da rugosidade da peça e logo uma diminuição da vida do rebolo em decorrência dos esforços. Diante disso, tem-se sempre buscado usar rebolos cujos ligantes suportem altas velocidades de corte, pois quanto maior a velocidade, maior será a vida do rebolo, menores serão os esforços de corte e melhor será a rugosidade da peça (DINIZ; MICARONI; HASSUI, 2010).

2.1.5 Velocidade de corte ou velocidade periférica do rebolo (v_s)

Segundo Tian et al., (2015) é sabido que velocidades de corte mais elevadas na retificação aumentam a eficiência do processo de corte visto que um maior número de grãos abrasivos passa pela peça em um mesmo intervalo de tempo para remover material na forma de cavacos menores, resultando em menores forças de corte e maior vida da ferramenta. Isso posto, a velocidade de corte v_s é definida pela Equação 10 (MALKIN; GUO, 2008):

$$V_s = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_w}{60 \cdot 1000} \quad (10)$$

Onde:

V_s = velocidade periférica da peça (m/s)

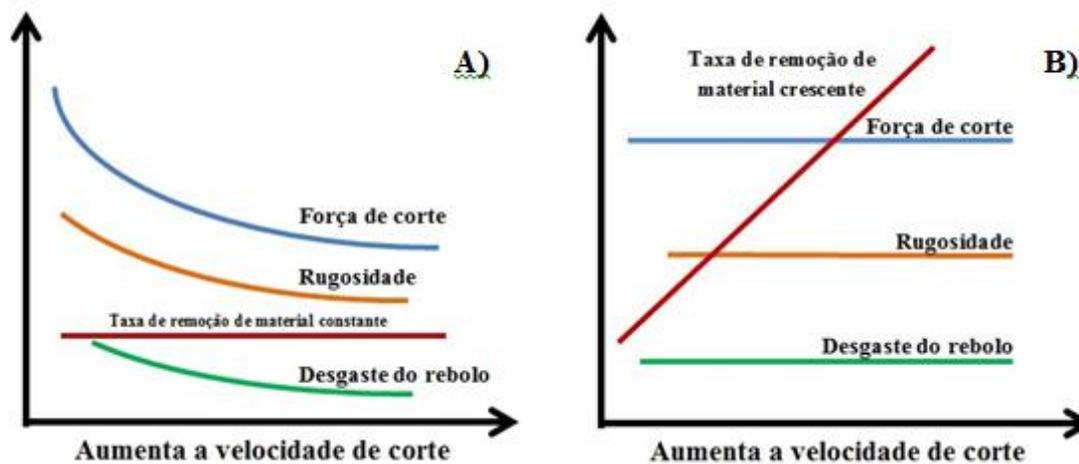
d_w = diâmetro da peça (mm)

n_w = rotação da peça (rpm)

n_s = rotação do rebolo (rpm)

Tian et al., (2015) ainda afirmaram que comparado à velocidade de corte convencional, velocidades de corte mais altas são amplamente utilizadas para se obter peças de maiores qualidades combinado com aumento da produtividade, diminuição da força de corte e maior tempo de vida do rebolo. Rowe (2014) complementou afirmando que maiores velocidades de corte podem ser usadas tanto para melhorar a precisão e qualidade, ao passo que melhoram a produtividade do processo, mantendo igual à precisão e qualidade da peça, o que pode ser visto na Figura 1:

Figura 1: Efeito do aumento da velocidade de corte: (a) Sob taxa de remoção de material constante e (b) Sob taxa de remoção de material crescente.



Adaptado de Rowe (2014).

O efeito do aumento da velocidade de corte com profundidade de corte constante e velocidade periférica da peça constante na Figura 1a é decorrente de que menos material é removido por cada grão, o que reduz o desgaste do rebolo, sendo que a rugosidade e as forças de corte também são reduzidas. As menores forças de corte gerarão menores desvios de forma, melhorando assim a precisão da peça final (ROWE, 2014).

Ainda o mesmo autor mencionou que o aumento da velocidade de corte pode proporcionar maiores taxas de remoção de material. A remoção de material é otimizada por cada grão abrasivo, podendo ser mantida aumentando a velocidade periférica da peça na mesma proporção em que se aumenta a velocidade periférica do rebolo. Deste modo, mantêm-se as forças de corte, a rugosidade da peça e o desgaste do rebolo aproximadamente constante (relação G).

2.1.6 Velocidade periférica da peça (v_w)

A velocidade periférica da peça (v_w) pode ser obtida em função do diâmetro e rotação desta, conforme indica a Equação 11 (MALKIN; GUO, 2008):

$$v_w = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_w}{60 \cdot 1000} \quad (11)$$

Onde:

V_w = velocidade periférica da peça (m/s)

d_w = diâmetro da peça (mm)

n_w = rotação da peça (RPM)

Um aumento da velocidade periférica da peça gera um aumento da taxa de remoção de material, resultando em cavacos mais grossos. Também pode ser notado um aumento da carga sobre cada grão abrasivo, o que gera valores de força tangencial de corte mais elevadas. Desta maneira, um aumento da velocidade periférica da peça confere ao rebolo um comportamento macio (MARINESCU et al., 2016).

De acordo com Rowe (2014), a velocidade periférica da peça muito baixa aumenta a probabilidade de dano térmico à peça, visto que neste caso a profundidade de corte mais elevada leva a um comprimento de contato muito grande, o que causa uma acentuada taxa de cegamento dos grãos abrasivos do rebolo, aumentando conseqüentemente as forças de retificação e temperatura no local. O problema da queima da retificação é então o principal desafio, especialmente porque em baixas velocidades periféricas o calor tem mais tempo para ser conduzido à peça.

2.1.7 Velocidade de avanço ou de mergulho (v_f)

Segundo Marinescu et al. (2007), a velocidade de mergulho corresponde à velocidade do movimento do rebolo na direção normal à superfície da peça no ponto em que se dá o contato do rebolo com a peça. Este parâmetro afeta o acabamento final da peça e as forças de corte, que se elevam com o aumento desta velocidade.

Conforme apresentado por Rowe (2014), o aumento da velocidade de avanço com as outras velocidades constantes gera um aumento da taxa de remoção de material, o que é benéfico. No entanto também aumenta as forças de corte, rugosidade e conseqüentemente diminui o tempo para dresser novamente, uma vez que se acentua o desgaste do rebolo. Este processo se torna mais eficiente energeticamente até que a velocidade de avanço se torne excessivamente alta levando a um elevado desgaste do rebolo e baixa relação G.

2.1.8 Taxa de remoção de material (Q_w)

A taxa de remoção de material (Q_w) é um parâmetro determinado pela profundidade de corte (a_e), pela velocidade relativa entre a peça e o rebolo (v_w) e pela largura de retificação (b) (MALKIN; GUO, 2008). Este parâmetro pode ser apresentado pela Equação 12 (DEMIRCI; MEZGHANI; EL MANSORI, 2008):

$$Q_w = a_e \cdot v_w \cdot b = \pi \cdot d_w \cdot v_f \cdot b \quad (12)$$

Ainda segundo o mesmo autor, pode-se obter a taxa específica de remoção de material (Q'_w), dividindo a taxa de remoção de material (Q_w) pela largura de retificação (b), sendo indicada na Equação 13:

$$Q'_w = a \cdot v_w = \pi \cdot d_w \cdot v_f \quad (13)$$

Kruegar et al., (2000) afirmaram que a taxa específica de remoção de material é importante pois a partir desta pode-se avaliar a produtividade de um processo de retificação. Segundo Rowe (2014) a taxa de remoção de material tem grande relevância para as forças na máquina, deflexões e consumo de potência.

O aumento do comprimento de contato na retificação leva a um aumento das forças de corte e potência de maneira diretamente proporcional. O autor ainda afirmou que a taxa de remoção específica de material é uma medida da efetividade do grão abrasivo em remover material. No caso da retificação de um material muito duro, em que há desgaste acentuado do rebolo, a taxa de remoção de material deve ser dada pela Equação 12 (MARINESCU et al., 2007).

2.1.9 Espessura equivalente de corte (h_{eq})

De acordo com Malkin e Guo, (2008) a espessura equivalente de corte (h_{eq}) é definida como a relação que envolve: taxa de remoção específica de material (Q'_w), a velocidade de movimento relativo da peça e velocidade de corte (v_s). No caso da retificação cilíndrica, essa relação é dada pela Equação 14.

$$h_{eq} = \frac{Q'_w}{v_s} = \frac{\pi \cdot d_w \cdot v_f}{60 \cdot 1000 \cdot v_s} \quad (14)$$

Onde:

h_{eq} = espessura equivalente de corte (mm).

Silva Neto, (2012) mostrou que o parâmetro de espessura equivalente é o que melhor caracteriza o processo de retificação, pois engloba as três importantes características do processo (v_s , v_f , d_w). Dessa forma, a velocidade de corte é responsável pela dureza dinâmica do rebolo. Dessa forma, sua elevação proporciona o aumento do número de grãos ativos num mesmo intervalo de tempo, provocando a diminuição da força tangencial de corte (MALKIN; BITTER, 1989).

Neste conceito Marinescu et al. (2007) mostraram que esse parâmetro não considera o espaçamento dos grãos do rebolo. Dessa forma, fica evidente que o comportamento da retificação está intimamente relacionado com a combinação da espessura equivalente de corte e a densidade das arestas de corte. Mais além, a espessura equivalente de corte está diretamente relacionada a variáveis envolvidas no processo como a rugosidade e topografia do rebolo (MALKIN; BITTER, 1989).

2.2 Fluido de corte

Em um processo de usinagem, se desenvolve uma grande quantidade de calor devido aos atritos ferramenta-peça e cavaco-ferramenta. Os fluidos de corte contribuem, refrigerando, lubrificando e limpando, peças e ferramentas, além da zona de corte. Ao fazê-lo, desempenham um importante papel, colaborando para uma maior vida da ferramenta associada a uma maior qualidade da peça (DINIZ; DE OLIVEIRA, 2008), além de possibilitarem uma velocidade de corte mais econômica e como um todo, contribuírem para a eficiência do sistema de produção (SOKOVIĆ; MIJANOVIĆ, 2001).

Os fluidos de corte associados ao processo de retificação, possibilitam um menor valor de rugosidade superficial e conseqüentemente um acabamento final de melhor qualidade. Além de uma maior vida útil da ferramenta pelo distanciamento entre os períodos de dressagem do rebolo.

2.2.1 Problemas na utilização do fluido de corte

A utilização de fluidos de corte nos processos de usinagem apresenta alguns aspectos negativos como: impacto do descarte do fluido ao meio ambiente e os riscos proporcionados à saúde dos operários submetidos ao ambiente de trabalho com tais

fluidos. Logo, leis e protocolos devem ser atendidos ao utilizar e descartar esse tipo de fluido.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), estabelece a quantidade de diferentes tipos de óleo permitida na água. O art. 34 da resolução 357/06 permitia uma concentração de até 20 mg/L de óleo mineral e até 50 mg/L de óleos vegetais e animais em água. Porém, esse artigo foi revogado pela resolução 430/11 que estabeleceu que nenhuma quantidade de óleo poderia estar contida na água. Portanto, o enrijecimento das leis tem influenciado os usuários de óleo solúvel a escolher os produtos pela maior facilidade no tratamento e descarte após o uso (GANIER, 1993).

Os fluidos de corte contêm substâncias tóxicas tais como: nitros aminas, formaldeídos, substâncias orgânicas contendo parafinas cloradas e bifenis poli clorados, substâncias orgânicas contendo fósforo, as quais foram caracterizadas como substâncias nocivas para a saúde e meio ambiente (SHASHIDHARA; JAYARAM, 2010). Além disso, os fluidos de corte podem sofrer contaminação, por meio de outros corpos, fluido ou micro-organismos, degradando suas propriedades anticorrosivas e de lubrificação (SOKOVIĆ; MIJANOVIĆ, 2001).

2.3 Rebolo Nitreto Cúbico de Boro (CBN)

O rebolo é uma ferramenta abrasiva cuja forma se assemelha à de um disco constituído de núcleo, ligantes e grãos abrasivos (BIANCHI et al., 2011). Esses grãos abrasivos são arestas cortantes com geometria indefinida que removem o material de maneira simultânea e uma de suas características mais importantes é que eles sejam mais duros que o material a ser retificado (MALKIN; BITTER, 1989).

Com o aprimoramento das técnicas de retificação, os superabrasivos foram criados e assim foram desenvolvidos dois tipos principais: o diamante sintético e o Nitreto Boro Cúbico (CBN) (KOPAC; KRAJNIK, 2006). Os superabrasivos recebem esta denominação em função de suas propriedades, por serem mais resistentes ao desgaste, mais duros e quando utilizados de forma adequada, apresentarem uma vida útil mais longa comparados aos rebolos de grãos abrasivos convencionais. Os autores ainda afirmaram que eles são usados em especial para a retificação dos seguintes materiais: superligas, metal duro, cerâmicas e materiais compósitos.

Segundo Rowe (2014) o CBN é o segundo material mais duro e é amplamente usado na retificação de aços. Apesar de ter um custo elevado, ele tem sido utilizado no

lugar dos abrasivos convencionais na retificação de precisão de aços endurecidos, devido a sua baixa taxa de desgaste e habilidade de gerar uma pequena faixa de tolerância nas peças produzidas.

De acordo com Marinescu *et al.* (2007) o CBN é no mínimo de 3 a 4 vezes mais barato que o diamante sintético. O CBN é o mais recente dos quatro principais abrasivos, industrialmente pode ser conhecido como *Borazon* (General Eletric a primeira empresa que o fabricou comercialmente).

O nitreto cúbico de boro (CBN) tem sido utilizado no lugar do óxido de alumínio nas indústrias aeroespaciais, automotiva e de rolamentos. Isto porque os grãos CBN possuem elevada dureza, superior resistência ao desgaste, além de diminuir a temperatura na zona de corte da retificação, reduzindo assim a tendência de danos térmicos e indesejáveis tensões residuais.

O melhoramento da situação térmica do processo não é apenas devido a menor energia requerida, mas também a alta condutividade térmica dos grãos superabrasivos CBN (MALKIN; GUO, 2008). Para produção desse grão primeiramente é fabricado o nitreto de boro, uma solução branca com uma estrutura atômica hexagonal em camadas, chamada de HBN. Em seguida esse composto é submetido à alta temperatura e pressão para se converter em uma estrutura cúbica, similar a estrutura do diamante (MARINESCU *et al.*, 2007).

A dureza Knoop do CBN em temperatura ambiente é aproximadamente 45 GPa, é quase a metade da dureza do diamante e duas vezes mais duro que os abrasivos convencionais. Sua condutividade térmica é quase tão grande quanto à do diamante e a expansão térmica é em torno de 20% maior que a do diamante (MARINESCU *et al.*, 2007).

Em comparação com o diamante, uma importante vantagem do CBN é sua estabilidade térmica (MALKIN; GUO, 2008). O CBN é termicamente estável em uma atmosfera inerte a temperaturas maiores de 1500°C, e em ar o CBN forma uma camada de óxido de boro (*B₂O₂*) que protege o abrasivo de uma futura oxidação, assim o CBN no ar é estável termicamente até uma temperatura de 1300°C. No entanto essa camada protetora é dissolvida pela água quando é utilizado um fluido a base de água no processo, assim o CBN tende a se desgastar mais rapidamente nesse caso do que quando se utilizado fluidos de corte de óleo puro (ROWE, 2014).

As vantagens do CBN comparado a outros abrasivos é a alta dureza, a estabilidade térmica, ser inerte quimicamente e ter uma boa condutividade térmica o que o torna

adequado para retificação de alto desempenho. Os rebolos de CBN são mais caros comparados a rebolos fabricados de outros materiais, porém, sua vida útil é maior o que possibilita custos de produção baixos e alta produtividade quando utilizado de maneira adequada. Para produção do CBN primeiramente é fabricado o nitreto de boro, uma solução branca com uma estrutura atômica hexagonal em camadas, chamada de HBN (ou α -Bn). Em seguida esse composto é submetido à alta temperatura e pressão para se converter em uma estrutura cúbica, similar a estrutura do diamante (MARINESCU et al., 2007).

2.4 Aço AISI 4340 temperado e revenido

O aço AISI 4340 é um aço de alta resistência mecânica e à fadiga, alta tenacidade, além de uma alta temperabilidade. É utilizado na confecção de dispositivos e peças sujeitas a cargas elevadas e periódicas, como engrenagens, virabrequins e elementos para diversas aplicações industriais (WENG et al., 2013). O aço AISI 4340 é composto de aproximadamente 0,38% de C (carbono), 96% Fe (ferro), 0,2% Si (silício), 1,3% Ni (níquel), 0,8% Cr (cromo), 0,04% S (enxofre), 0,7% Mn (manganês), 0,25% Mo (molibdênio) e 0,035% P (fósforo).

Assim como informa a empresa Schmolz Bickenbach, o tratamento térmico deste aço é feito normalmente entre 830 - 850 °C, seguido por um resfriamento em óleo. Um revenimento completo pode ser feito à 840 °C seguido por um resfriamento controlado. Dessa forma, a dureza do material alcança entre 52-56 HRc

2.5 Variáveis de saída do processo de retificação cilíndrica

Nesse tópico serão apresentadas as principais variáveis de saída que serão objeto de estudos do referido projeto. Cada qual será analisado de forma a entender o comportamento e alteração do mesmo, ao ponto de poder se fazer uma análise quantitativa dos melhores valores encontrados para utilização de diferentes técnicas.

2.5.1 Rugosidade

A rugosidade é definida por micro irregularidades geométricas na superfície do material usinado, ou seja, distorções da forma ideal que essa superfície deveria ter. A rugosidade consiste em marcas provenientes do perfil da ferramenta combinado à outras

irregularidades, podendo ser variáveis dependendo do tipo de material e ferramenta de corte (MUNHOZ et al., 2020).

A geração de rugosidade na retificação ocorre devido à riscos feitos pelos grãos abrasivos, ao material da peça que adere ao rebolo e não é liberado pelo fluido de corte e posteriormente é impregnado na peça, ou ainda, por partículas abrasivas que se fragmentam durante o corte e se aderem à peça. Pode-se citar também o desgaste do rebolo, assim como a vibração do sistema, os quais auxiliam na formação de rugosidade na peça (KHARE; AGARWAL, 2015).

O parâmetro mais utilizado para a mensuração dos valores de rugosidade é a média aritmética (R_a). Ele representa a média aritmética dos valores absolutos de picos e vales das micro irregularidades da superfície, dentro de um percurso de medição (MUNHOZ et al., 2020).

2.5.2 Desvios de circularidade

O desvio de circularidade é definido como qualquer diferença de circularidade entre a peça usinada e a projetada, com tolerâncias especificadas (LEI et al., 2011). Dessa forma, a precisão de uma peça trabalhada na retificação é determinada pela precisão do equipamento de produção, magnitude de desgaste do rebolo, vibrações do conjunto máquina/peça/ferramenta/sistema, taxa de remoção do material e energia específica.

Ainda os mesmos autores citaram que quanto maior o calor desenvolvido na zona de corte, maior será a dilatação e as deformações térmica a que a peça estará submetida e conseqüentemente ocorrerá um aumento nos desvios geométricos, especialmente no desvio de circularidade (AYUB; MOHAMED; ESA, 2014).

2.5.3 Desgaste diametral do rebolo

Há três formas de desgaste da ferramenta abrasiva durante a retificação: pelo atrito entre o grão abrasivo e a peça, fratura do grão e fratura do ligante. Isso decorre das solicitações mecânicas a que o rebolo é submetido, assim como a deterioração térmica do próprio ligante (MOERLEIN et al., 2009).

Para se medir a eficiência de um rebolo, utiliza-se a relação “G”, a qual é a razão entre o volume de material removido e o volume de rebolo gasto, assim a equação 15 demonstra a sua definição:

$$G = \frac{Z_w}{Z_s} = \frac{a.V_w.t}{\pi.D_s.\delta} \quad (15)$$

Onde:

Z_w = volume do material removido

Z_s = volume de rebolo gasto

t = tempo de retificação

δ = desgaste radial do rebolo.

Segundo Marinescu et al., (2007), rebolos que apresentam relação G alta produzem mais e desgastam-se menos, ou seja, são mais eficientes que aqueles com relação G baixa.

2.5.4 Microdureza

Grande parte da energia do processo de retificação é transformada em calor. No início da usinagem isso é acentuado o que aumenta a possibilidade de queima da superfície da peça, transformação de fase, danos térmicos, amolecimento superficial, aumento da tensão residual, trincas e diminuição de resistência à fadiga (MALKIN; BITTER, 1989).

Os aços são retificados após o tratamento térmico. Com isso, a queima superficial pode ocasionar uma retêmpera, originando uma microestrutura frágil que prejudicará a resistência à fadiga. Em contraponto, devido ao aquecimento do material durante a retificação e seu resfriamento proporcionado pelo refrigerante, pode ocorrer o revenimento e perda de dureza superficial.

Portanto, a microdureza é uma variável que complementa os resultados da análise microscópica do material. Dessa forma, é importante para avaliar as possíveis transformações microestruturais que a peça possa experimentar durante sua produção e dessa maneira consegue-se uma maior análise da integridade superficial.

2.5.6 Força tangencial de corte

De acordo com Bianchi, (2011) a força de corte na retificação é importante pois influencia em inúmeros fatores como: qualidade geométrica, dimensional e superficial da peça, a vida útil do rebolo (desgaste volumétrico) e finalmente o tempo de usinagem.

Geralmente essa força é decomposta em três componentes: normal (F_n), tangencial (F_t) e uma componente ao longo da direção de avanço longitudinal, a qual não tem muita significância.

Os valores médios da força tangencial têm fundamental importância já que determinam a potência necessária para a máquina retificadora assim como suas necessidades estruturais. Com o monitoramento das forças de retificação torna-se possível manter a topografia do rebolo adequada à operação, prevenindo a redução da taxa de remoção de material, além de diminuir o desgaste do rebolo (LIU et al., 2005).

2.6 Usinagem em geometria interrompida

A fragilidade de ferramentas de uso frequente, que apresentam baixa resistência a impactos gerados por forças mecânicas, impõe certas restrições ao torneamento de peças de aço endurecido, as quais apresentam pouca resistência aos impactos provocados, durante a usinagem, devido à geometria interrompida de um grande número de peças. Isso tem obrigado os pesquisadores a gastar dinheiro em estudos que visam melhorar os equipamentos para torná-los mais adequados e resistentes para operações de usinagem de peças segmentadas (DINIZ; GOMES; BRAGHINI, 2005).

2.6.1 Retificação de peças com corte interrompido

Controlar o calor transferido para a peça durante o processo de retificação é um grande desafio, segundo (PÉREZ et al., 2008). Danos térmicos na peça, como deformações nos materiais retificados, resultam de uma parte da energia liberada durante a retificação sendo convertida em calor e transmitida à peça. A literatura sobre temperatura transiente em corte interrompido de metal ainda é escassa em comparação com outras áreas de pesquisa em usinagem, apesar do controle de temperatura ser um parâmetro crucial na operação de retificação. No entanto, sabe-se que cortes contínuos causam diferentes tipos de desgaste da ferramenta comparativamente aos cortes interrompidos, e essas diferenças podem ser vistas nos padrões de desgaste da ferramenta (PÉREZ et al., 2008).

Tendo em vista que a maioria das ferramentas tem baixa tolerância para as cargas típicas de corte interrompido, os aços endurecidos com superfícies interrompidas possuem alguns limites, conforme afirmaram (VENTURA; KÖHLER; DENKANA, 2015).

No esforço de investigar essa questão, vários estudos têm mostrado o potencial de aprimoramento de ferramentas para usinagem de geometria interrompida, o que pode favorecer a redução de danos térmicos, bem como a redução do consumo de energia, a otimização do uso de ferramentas e uma melhoria no acabamento da peça. A queima, a camada branca e a tensão residual são apenas alguns dos efeitos da degradação superficial causados pela alta intensidade energética da ação de retificação (UMBRELLO, 2013).

Li; Axinte, (2018) compararam os resultados da utilização de sete rebolos, sendo um de geometria convencional e os outros seis com vários tipos de geometria interrompida feitos com várias texturas na superfície dos rebolos, como, por exemplo, texturas projetadas com direções de ranhura em direções horizontais, inclinadas e em zigue-zague. Após a realização dos testes, os autores confirmaram que as áreas passivas dos rebolos segmentados foram eficazes, favorecendo tanto a temperatura durante as operações de retificação quanto os níveis de rugosidade dos corpos de prova ensaiados, em contraste com os resultados obtidos com o reboleto com geometria para contínua.

2.6.2 Uso de reboleto de CBN com geometria interrompida

As consequências da utilização de duas ferramentas com quantidades variadas de nitrato cúbico de boro (CBN) em sua composição, uma com baixo teor e outra com alto teor, sendo 60% e 90%, respectivamente, foram examinadas por Diniz et al. (2005). Diferentes corpos de prova com geometrias contínuas e interrompidas foram empregados nesta investigação. Segundo os autores, a ferramenta com baixo teor de CBN em sua composição se mostrou mais resistente durante as usinagens de peças com geometria contínua, enquanto a ferramenta com alto teor de CBN demonstrou maior resistência durante a usinagem de peças com geometria interrompida.

De Godoy e Diniz, (2011), demonstraram a superioridade da ferramenta de CBN em relação à cerâmica, tanto no corte contínuo quanto no corte interrompido, onde a taxa de desgaste de flanco da ferramenta de CBN foi significativamente menor que a taxa de desgaste da cerâmica nas diversas velocidades de corte utilizadas. Na usinagem de aço duro com geometria interrompida, a alta tenacidade das ferramentas de CBN favoreceu sua resistência ao desgaste dentro dos parâmetros de corte utilizados no trabalho (VENTURA; KÖHLER; DENKENA, 2015).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta secção serão apresentados os equipamentos e materiais que foram utilizados na realização deste trabalho, assim como os procedimentos adotados. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA) do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - FEB/UNESP, câmpus de Bauru – SP.

3.1 Equipamentos e materiais utilizados nos experimentos

3.1.1 Retificação corpos de prova

A operação de retificação foi realizada utilizando uma retificadora cilíndrica externa CNC da empresa Sulmecânica, modelo RUAP515H, com movimentação do eixo “X” possibilitada pelo controle numérico computadorizado CNC Fagor. Para realizar os experimentos, dois programas CNC diferentes foram empregados, um para retificar os corpos de prova e outro para imprimir o desgaste do rebolo para posterior análise.

3.1.2 Rebolo de CBN e dressador

O rebolo utilizado foi do tipo (CBN), com liga vitrificada, modelo SNB151Q12VR2, fabricado pela Nikkon. O rebolo tinha dimensões de 350 mm (diâmetro externo), 15 mm (largura), 5 mm de camada de CBN, e diâmetro interno para acoplamento na retificadora de 127 mm, com granulometria de 120 mesh. A velocidade de corte (v_s) utilizada foi de 30 m/s e as velocidades de avanço (v_f) foram de 0,25, 0,50 e 0,75 mm/min.

Durante todo o ensaio, houve os procedimentos de dressagem do rebolo para garantir sua integridade e evitar que o desgaste excessivo diminuísse a qualidade final das amostras. Para o procedimento foi utilizado dressador multigranular do tipo conglomerado fabricado pela empresa Master Diamond. É um afiador com uma base metálica e pontas de diamantes, suas dimensões são: 15 x 8 x 10 mm. As condições de dressagem foram: velocidade de corte (v_s) = 30 m/s, velocidade de dressagem (V_d) = 100 mm/min, profundidade de dressagem por passada (a_d) = 2 μm e profundidade de dressagem total = 40 μm .

3.1.3 Corpos de prova

Os corpos de prova foram feitos de aço AISI 4340, temperado e revenido, com dureza de 54 HRc, amplamente aplicado na indústria devido às boas características como resistência mecânica, resistência à fadiga e tenacidade.

Alves et al. (2011) afirmaram que o beneficiamento, revenimento e têmpera são os processos utilizados para produzir os atributos de resistência e tenacidade do aço ABNT 4340. A composição química desse aço é apreentada no Quadro 1.

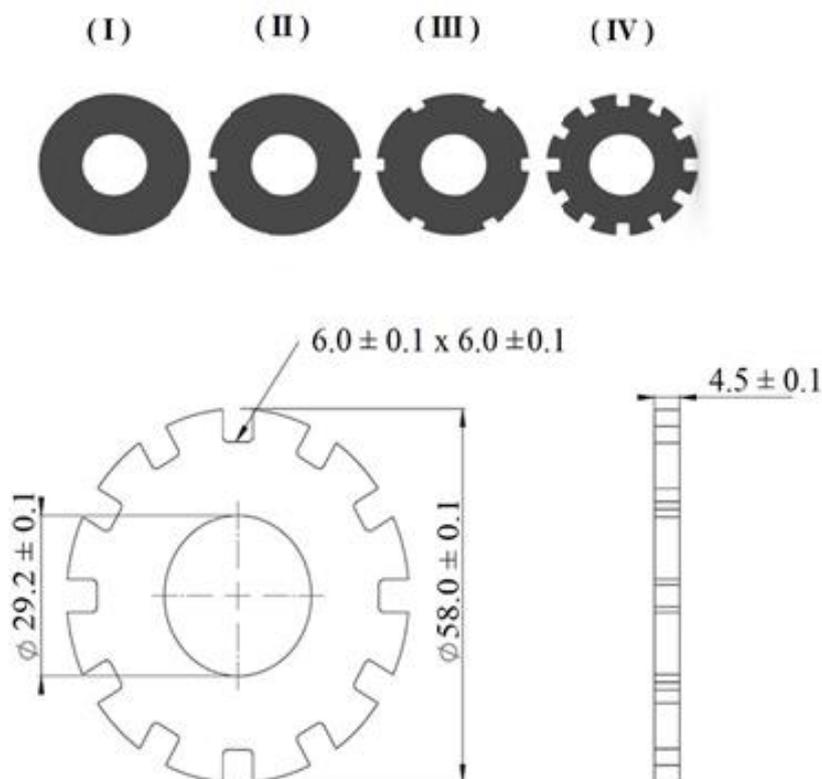
As peças eram cilíndricas, 58 mm de diâmetro externo, 29,2 mm de diâmetro interno e 4,5 mm de espessura, com quatro geometrias diferentes: contínua e com 2, 6 e 12 ranhuras, como mostrado na Figura 2. A retificação foi realizada até um diâmetro externo de 50 mm (40 ciclos de 0,1 mm/ciclo), assim mantendo as interrupções geométricas durante o processo uma vez que a profundidade das ranhuras era de 6 mm,

Quadro 1: Composição química do aço AISI 4340

C	0,4%	S	0,011%	Al	0,016%
Mn	0,77%	Cr	0,81%	Cu	0,18%
P	0,026%	Ni	1,71%	Co	0,04%
Si	0,30%	Mo	0,22%	Fe	Balanço

Fonte: Villares Metals S. A.

Figura 2: Descrição dos quatro tipos de corpos de prova que foram utilizados nos ensaios de retificação.



Legendas: (I) geometria contínua, (II) 2 ranhuras, (III) 6 ranhuras e (IV) 12 ranhuras.

Fonte: Autor.

3.1.4 Sistemas de lubrificação utilizados

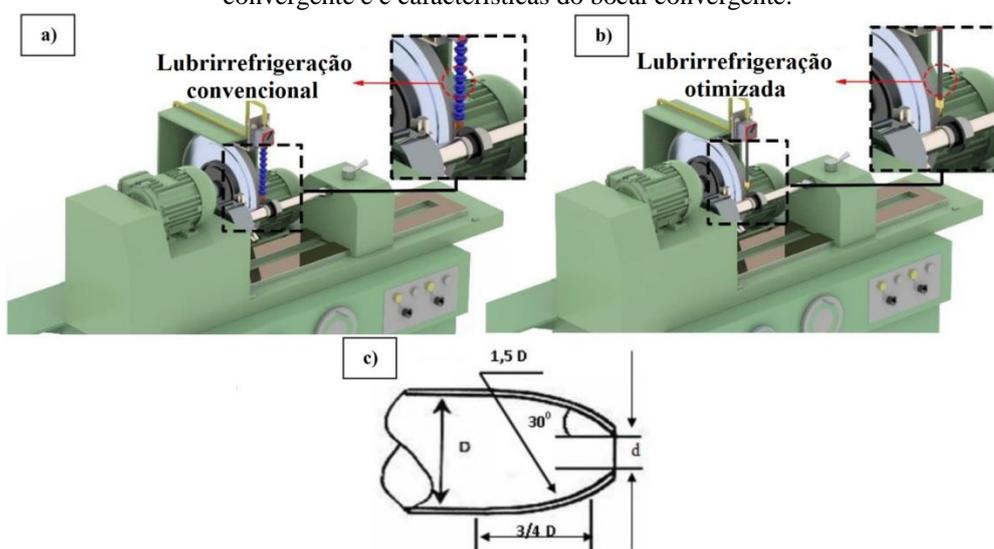
Dois métodos diferentes foram adotados, convencional e jato convergente, para verificar a influência da lubri-refrigeração na retificação de peças com geometria interrompida.

3.1.5 Lubrificação convencional e otimizada

O sistema de lubrificação convencional foi composto de um reservatório de fluido de 100 litros, bomba centrífuga, medidor de vazão, válvulas de esfera, mangueira de aplicação e bicos, nesta condição como mostrado na Fig. 3a, o bocal utilizado, foi o original da retificadora CNC, composto por um bico tipo fixoflex, com 6,3 mm de diâmetro para a saída do fluido, cuja vazão de 20 l/min foi usada sob uma pressão de 0,1 MPa, resultando em uma velocidade tangencial em relação ao rebolo de 5,3 m/s.

Para o método de jato convergente, manteve-se o sistema de reservatório e bomba adicionando um bocal conforme mostrado na Fig. 3b, o jato de fluido de corte foi aplicado em uma vazão de 24 l/min sob uma pressão de 0,5 MPa, gerando uma velocidade tangencial de 30 m/s, através da aplicação com um bico que promove a convergência do fluido de corte durante a aplicação, conforme indicado na Fig. 3c. Assim, é entendido como a otimização com o aumento da velocidade de aplicação do fluido de corte de 5,3 a 30 m/s na interface rebolo-peça.

Figura 3: Processo retificação: a lubrificação convencional, b lubrificação por jato convergente e c características do bocal convergente:



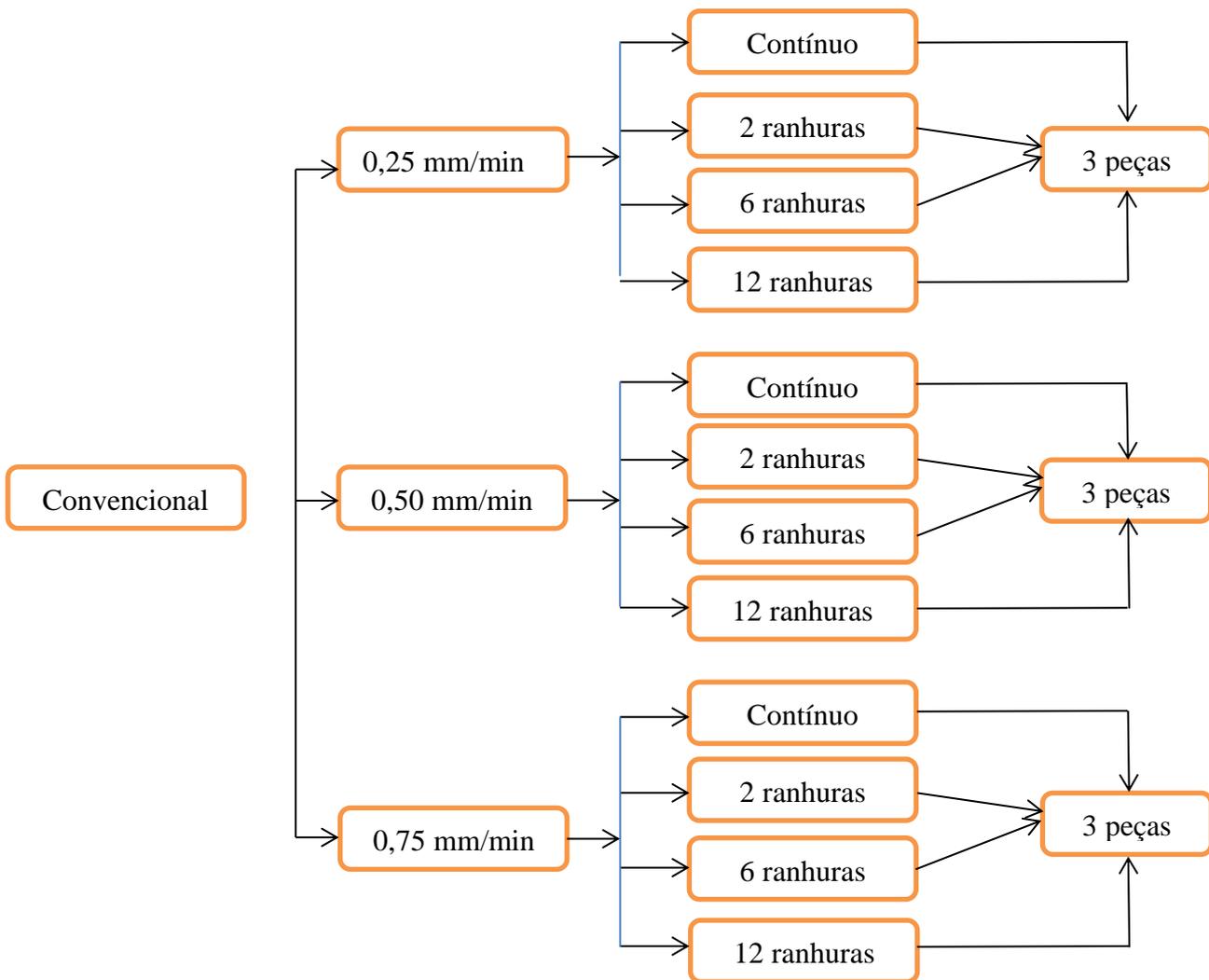
Fonte: Autor.

3.2 Sequências de ensaios

Inicialmente, foram utilizados 3 valores de velocidade de mergulho - (V_f) para desenvolver o projeto do corpo de prova para a aplicação de inúmeras técnicas de resfriamento e alta velocidade. Esses valores de velocidade foram 0,25 mm/min, 0,50 mm/min e 0,75 mm/min, respectivamente.

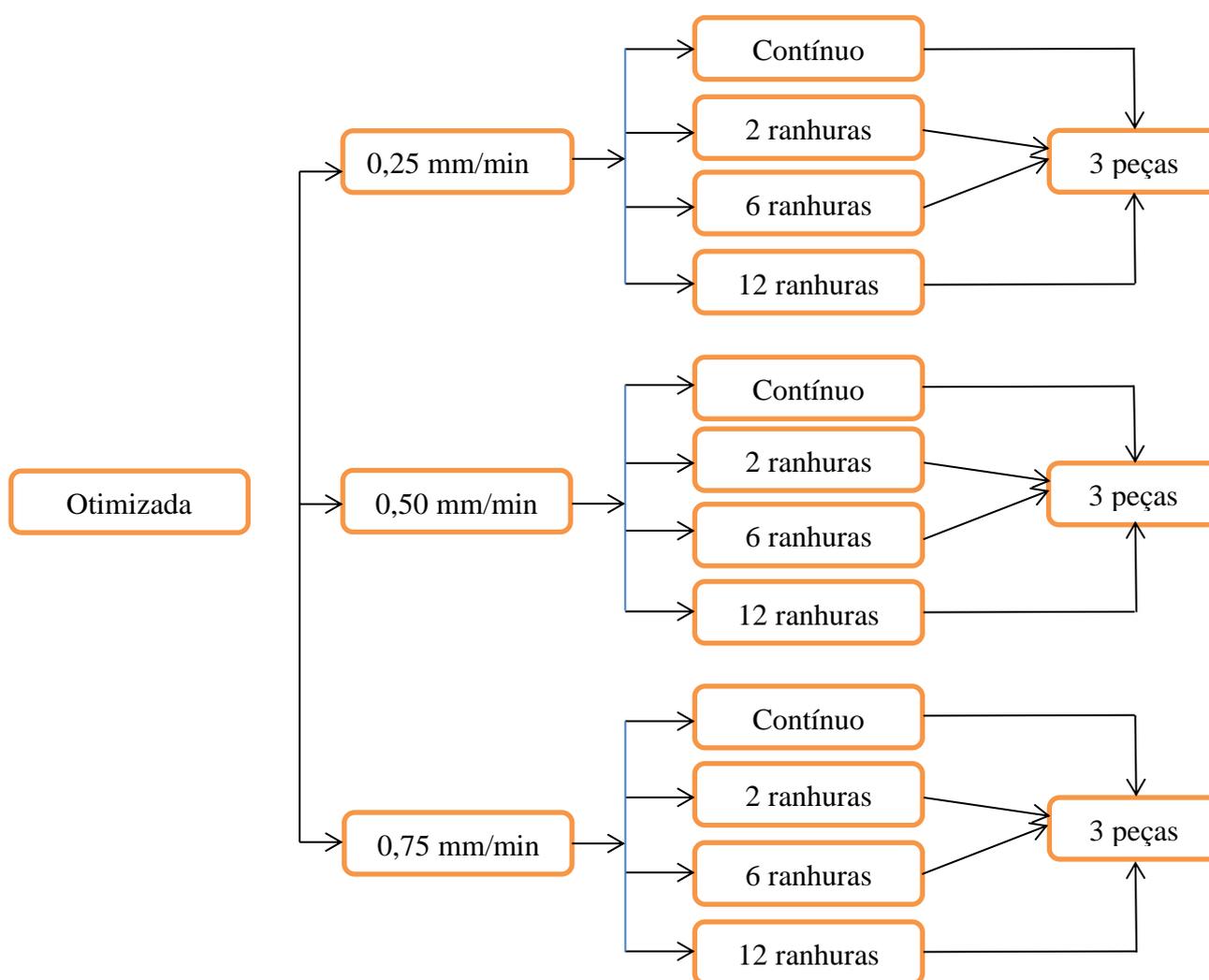
Quatro geometrias de corpo de prova distintas foram usadas para essas circunstâncias de retificação, levando em consideração seções com 0, 2, 6 e 12 ranhuras. Para cada condição foram realizadas 3 repetições, resultando assim num total de 72 peças retificadas, para aumentar a confiabilidade estatística nas análises. O fluxograma de teste criado para este experimento é exibido nas Figuras 4 e 5.

Figura 4: Fluxograma de ensaios para refrigeração convencional.



Fonte: Autor

Figura 5: Fluxograma de ensaios para refrigeração otimizada.



Fonte: Autor.

3.3 Parâmetros de saída analisados

3.3.1 Rugosidade

A medição da rugosidade média aritmética (R_a) foi realizada com o auxílio de um rugosímetro fabricado pela empresa Taylor Hobson modelo Surtronic3+. Para tal, adotou-se comprimento de medição (cut-off) igual a 0,25 mm e percurso total (l_n) igual a 0,8 mm, o equipamento foi aferido e calibrado antes das medições. Para cada corpo de prova, foram realizadas medições em três posições equidistantes em cada peça, foram realizadas perpendicularmente a superfície de retificação, e então o valor médio e o desvio-padrão foram calculados.

3.3.2 Desvio de circularidade

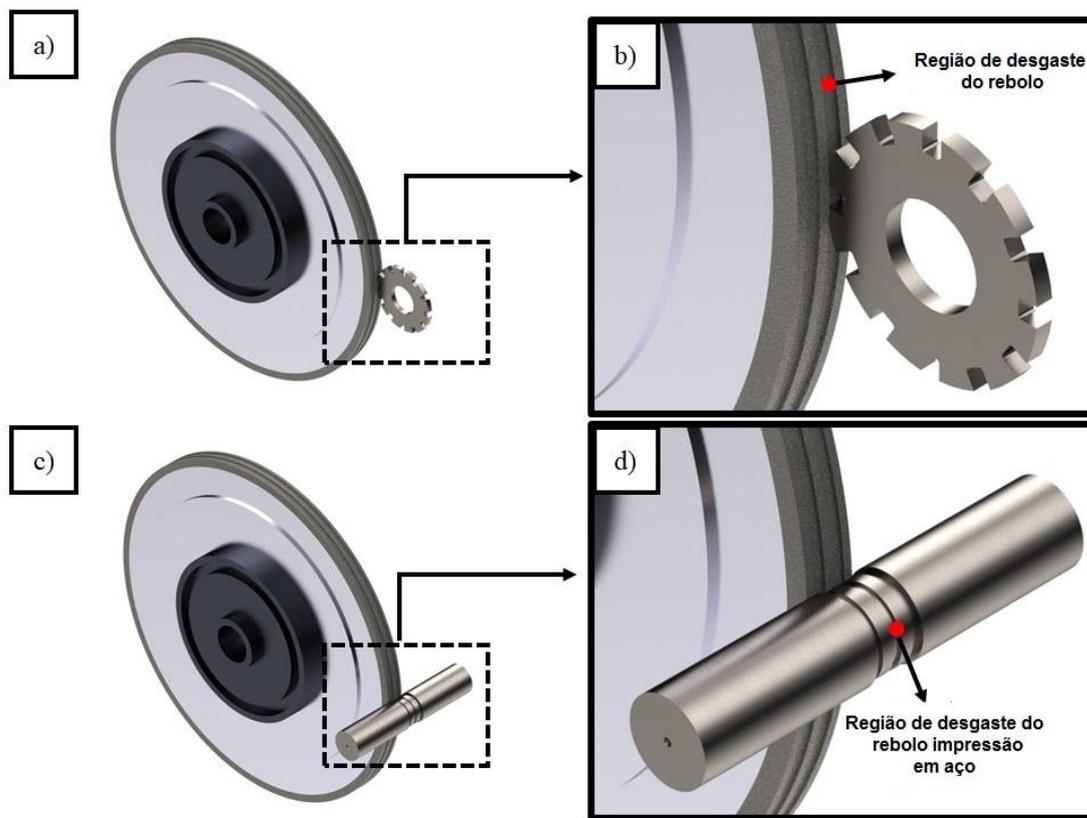
A medição do desvio de circularidade constitui no quão a peça não está perfeitamente circular, assim para esta análise foi utilizado um medidor de circularidade modelo Tayround 31C marca Taylor Hobson, projetado para aplicações que requerem controle de precisão geométrica e de forma, alocado no Laboratório de Usinagem por Abrasão da Faculdade de Engenharia da Unesp, *campus* de Bauru/SP.

Para a realização da medição dos desvios de circularidade, as peças foram dispostas e colocadas na base giratória da máquina, e um apalpador com ponta de rubi foi usado para pressionar contra as superfícies corrigidas das peças para quantificar as discrepâncias de circularidade. Em seguida, o aparelho foi ligado para rotacionar os componentes, permitindo que a sonda registrasse os valores de desvio de circularidade, 3 medições foram feitas na região retificada, em três locais diferentes, cada um com 120 graus de distância um do outro.

3.3.3 Desgaste Diametral do rebolo

A medição do desgaste diametral do rebolo pode ser realizada pelo método de medição indireta, para isso, após a retificação de duas peças, um cilindro de aço AISI 1020 com as seguintes dimensões; 30 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento, foi usinado pelo rebolo com uma taxa de avanço de 0,25 mm/min e uma profundidade de 1 mm, conforme mostrado na Figura 6. Desta forma, a superfície do rebolo é impressa na superfície do cilindro sem que a ferramenta seja desgastada novamente. A medição do perfis gerados por este processo foi realizado com o auxílio de rugosímetro fabricado pela empresa Taylor Hobson modelo Surtronic3+, com os mesmos parâmetros indicados anteriormente. Cada componente foi submetido a três medidas em seções distintas e uniformemente espaçadas, ou com um intervalo de 120 graus entre elas, sendo computados o valor médio e o desvio padrão.

Figura 6: Medição do desgaste diametral do rebolo (método indireto): sendo (a) rebolo em contato com a peça, (b) região desgaste do rebolo, (c) rebolo em contato com cilindro de impressão e (d) medição indireta do desgaste do rebolo



Fonte: Autor.

3.3.4 Análise metalográfica

A análise metalográfica foi realizada nas superfícies das peças para verificar possíveis danos térmicos ou microestruturais nas superfícies das peças retificadas. Portanto, seções das peças foram lixadas com 120 a 2000 mesh e polidas com pasta diamantada de 3 a 6 μm e 0,3 a 1 μm de alumina suspensa. Posteriormente, as amostras foram quimicamente atacadas com uma solução formada por HNO_3 (2,0 ml) e etanol (100 ml). As amostras foram então observadas em um microscópio Olympus modelo BX 51, equipado com uma câmera digital Leica, modelo EC-3, com ampliações de 500 a 1000 vezes.

3.3.5 Potência de retificação.

A potência de retificação foi determinada através da tensão e dados atuais adquiridos por sensores hall, com uma taxa aquisição de 2 k/s, juntamente com um encoder para medir a rotação do rebolo. Os sensores e o codificador foram conectados a

um módulo Curvepower projetado e construído no Laboratório de Aquisição de Dados e Processamento de Sinais – LADAPS – FE – Unesp - Bauru e a um PCI-6035EDAQ (16 bits), fabricada pela National Instruments, para tratar os sinais, que depois foram processados e analisados nos softwares LabView 7.1 e MatLab,

3.3.6 Razão G de retificação

A razão G de retificação (G) é determinada pela divisão do volume de material removido (Z_w) pelo volume de desgaste do rebolo (Z_s), conforme indicado na Equação 15.

Neste trabalho, cada interrupção geométrica diminui o volume de material a ser removido em 135 mm³. Portanto, o volume de material removido para o contínuo e com 2, 6 e 12 peças de trabalho de ranhuras em cada teste foi 11.889,36, 11.619,36, 11.079,36 e 10.269,36 mm³, respectivamente.

3.4 Análise de custo e desgaste do rebolo

O custo do desgaste do rebolo durante o processo de retificação (C_s), dado em US\$/peça, pode ser determinado pela Equação 17:

$$C_s = \left[\frac{4C_r}{(b_s\pi) \cdot (d_s^2 - d_{min}^2)} \right] Z_s \quad (17)$$

Onde:

C_r = custo médio do rebolo de CBN;

b_s = largura de retificação,

d_s = diâmetro inicial do rebolo

d_{min} = diâmetro mínimo do rebolo

Z_s = volume de desgaste do rebolo durante a retificação de uma peça.

Aplicando um custo médio de um rebolo de CBN (C_r) de US\$ 681.00, com largura do rebolo (b_s) de 15 mm, diâmetro inicial do rebolo (d_s) de 350 mm e diâmetro mínimo do rebolo (d_{min}) de 340 mm, juntamente com o volume de rebolo gasto durante a retificação de uma peça (Z_s) para cada condição testada, foi possível determinar o custo do rebolo em relação a cada usinagem. Na análise dos resultados, o os custos de lotes de

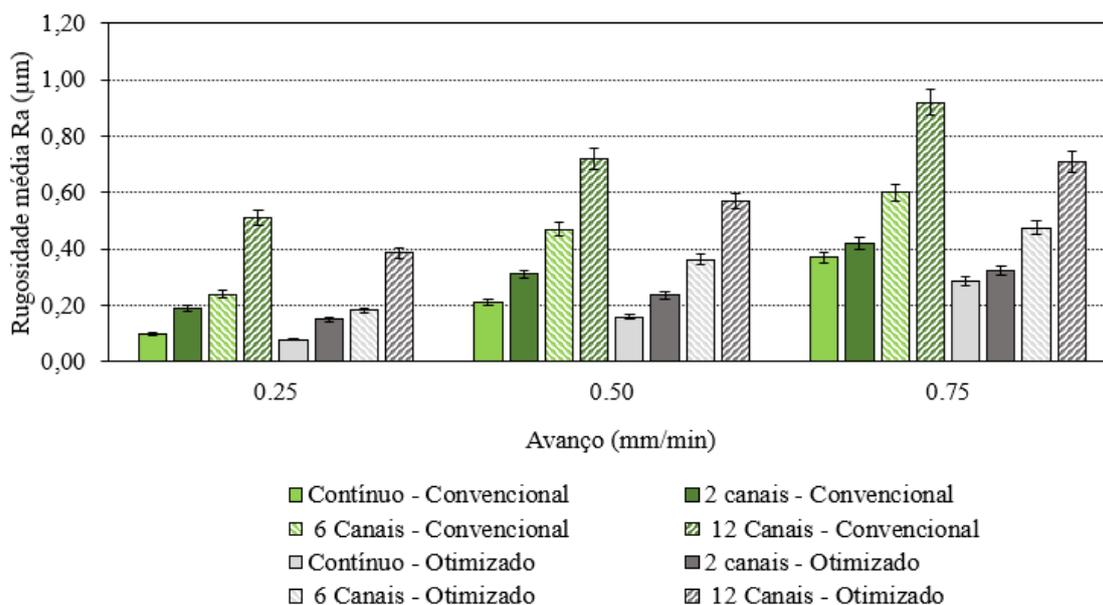
1000 peças foram calculados para cada condição, e os custos de preparação não foram considerados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Rugosidade

A rugosidade da superfície de um componente influencia significativamente sua resistência à fadiga. Portanto, a análise desse parâmetro é essencial após processos de acabamento, como a retificação (JAVARONI et al., 2020b). A Figura 7 mostra os resultados da rugosidade (Ra) para todas as condições testadas.

Figura 7: Rugosidade das peças retificadas em função da velocidade de avanço do rebolo e das condições de lubrificação empregadas.



Fonte: Autor.

Na retificação da peça de superfície contínua, os valores de rugosidade obtidos foram 0,10, 0,21 e 0,37 μm , com lubrificação convencional, para velocidades de avanço de 0,25, 0,50 e 0,75 mm/min, respectivamente. Com a refrigeração por jato convergente, os valores foram 0,08, 0,16 e 0,29 μm , reduções de 20,0%, 23,8% e 21,6%, respectivamente, em relação ao método convencional.

Para peças com duas ranhuras e com a aplicação do método convencional, os valores de rugosidade obtidos foram 0,19, 0,31 e 0,42 μm , para velocidades de avanço de

0,25, 0,50 e 0,75 mm/min, respectivamente, enquanto para a lubrificação convergente os valores foram 0,15, 0,24 e 0,32 μm , ou seja, 21,0%, 22,5% e 23,8% menores.

Para peças com seis ranhuras, os valores de rugosidade obtidos foram 0,24, 0,47 e 0,60 μm pelo método convencional, para velocidades de avanço de 0,25, 0,5 e 0,75 mm/min, respectivamente. Com a utilização da lubrificação convergente, os valores foram 0,18, 0,36 e 0,47, reduções de 25,0%, 23,4% e 21,6%, respectivamente.

Por fim, a aplicação da lubrificação por jato convergente também contribuiu para a melhora da rugosidade nas peças com doze ranhuras, sendo observadas reduções de 23,5%, 20,8% e 22,8% para os avanços de 0,25, 0,50 e 0,75 mm/min, respectivamente, em relação à técnica convencional.

Portanto, pode-se concluir que, para todas as combinações com os mesmos parâmetros de retificação e número de ranhuras nas peças retificadas, o método de refrigeração por jato convergente resultou em melhor qualidade da peça em termos de rugosidade. Na técnica de jato convergente, o jato de fluido é aplicado com maior velocidade e pressão, o que garante uma penetração mais eficiente na barreira de ar formada ao redor do rebolo, aumentando a quantidade de fluido efetivamente entregue na interface de contato e, conseqüentemente, a capacidade de lubrificação desta técnica em comparação com o método convencional.

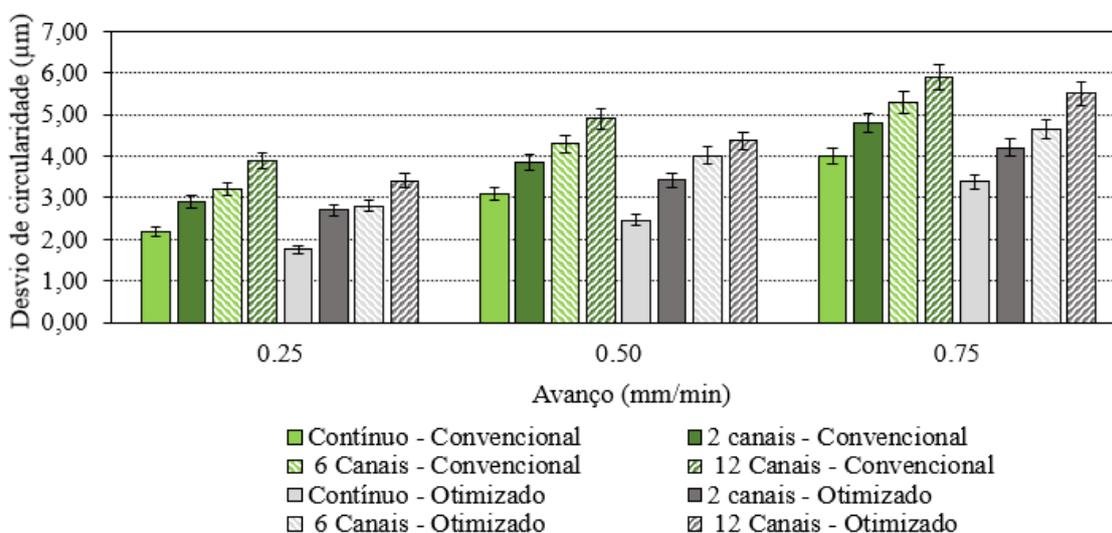
O aumento do número de ranhuras nas peças impacta negativamente sua rugosidade devido à ocorrência mais significativa de choques entre as arestas da peça e a ferramenta, que aumentam as vibrações e os gradientes térmicos no processo. Além disso, a rugosidade da superfície também piora com o aumento da velocidade de avanço, devido a condições de retificação mais severas, como cavacos mais espessos e forças de usinagem mais altas. Resultados semelhantes foram relatados por Ribeiro et al. (2020) em seu estudo sobre retificação interrompida com refrigeração convencional e rebolos de óxido de alumínio (RIBEIRO et al., 2020a).

4.2 Desvios de Circularidade

A elevada precisão dimensional das peças usinadas é um dos principais fatores que caracterizam a retificação como um dos processos de acabamento mais essenciais e insubstituíveis para a fabricação de peças (KLOCKE; BRINKSMEIER; WEINERT, 2005). Desta forma, os valores de desvios de circularidade mostram a eficácia do processo

de retificação e representam um aspecto fundamental para o controle de qualidade final dos componentes retificados (JAVARONI et al., 2020a). No processo de retificação de geometrias interrompidas, o desvio de circularidade é drasticamente aumentado por velocidades de avanço mais altas e pela presença de mais descontinuidades geométricas (ranhuras). Vibrações e trepidações produzidas por choques das arestas das ranhuras com a superfície do rebolo podem aumentar a ocorrência de desvios de forma, principalmente para condições com maior espessura de cavaco (RODRIGUEZ et al., 2020). Velocidades de avanço mais altas levam a maiores deformações mecânicas da peça, da máquina e do rebolo (RODRÍGUEZ et al., 2022) piorando o acabamento superficial e introduzindo uma maior taxa de compressão na superfície da peça, o que resulta em tensões residuais superficiais mais elevadas e, conseqüentemente, maiores desvios de circularidade (LEI et al., 2011). Os resultados de desvios de circularidade obtidos estão apresentados na Figura 8.

Figura 8: Desvios de circularidade das peças retificadas em função da velocidade de avanço do rebolo e das condições de lubrificação empregadas.



Fonte: Autor.

Na Figura 10, pode-se observar que menores velocidades de avanço geraram variações menores no desvio de circularidade. Para o avanço de 0,25 mm/min, o método de jato convergente apresentou resultados 20,5%, 6,6%, 12,5% e 12,6% menores quando comparado à técnica convencional para peças com 0, 2, 6 e 12 ranhuras, respectivamente. Para a velocidade de avanço de 0,50 mm/min, o método de jato convergente produziu resultados 20,3%, 10,9%, 6,5% e 10,8% menores quando comparado ao convencional para peças com 0, 2, 6 e 12 ranhuras, respectivamente. Por fim, para o avanço de 0,75

mm/min, o jato convergente apresentou resultados 15,0%, 12,5%, 12,5% e 6,6% menores quando comparado ao convencional para peças com 0, 2, 6 e 12 ranhuras, respectivamente.

Segundo Malkin e Guo, (2008), quanto maior a eficiência de penetração do fluido de usinagem na zona de retificação, menor é a quantidade de calor distribuído para a peça e, conseqüentemente, menores são as expansões térmicas e desvios de forma, o que justifica o melhor desempenho apresentado pela técnica de jato convergente.

Conforme observado nos resultados de rugosidade, o aumento do número de ranhuras e da velocidade de avanço também piorou os desvios de circularidade pelos motivos já apresentados.

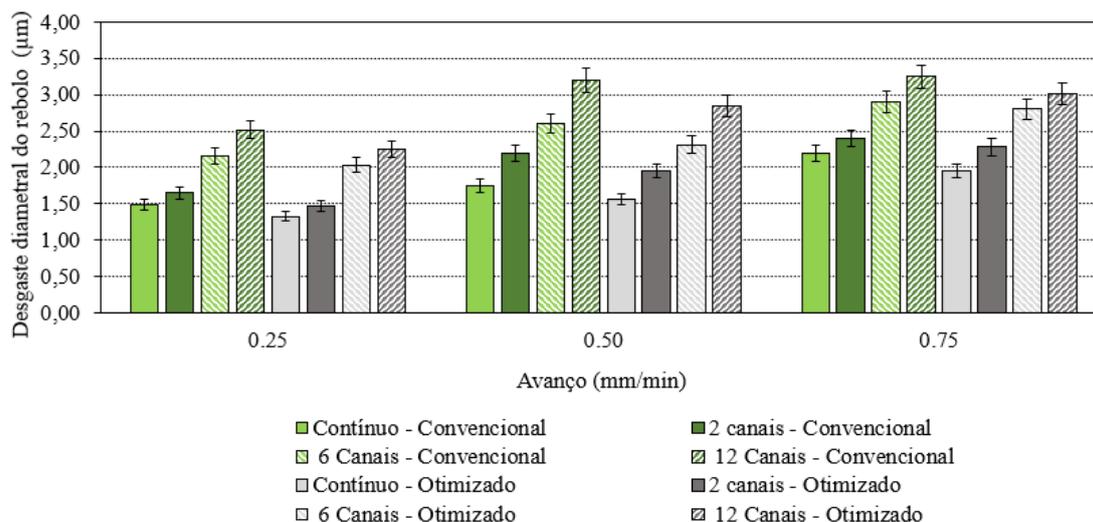
4.3 Desgaste diametral do rebolo e relação G

O processo de retificação de componentes mecânicos com ranhuras, afeta diretamente a vida útil do rebolo (RIBEIRO et al., 2021). Conforme descrito anteriormente, neste estudo foram avaliadas diferentes técnicas de lubrificação, bem como a velocidade de avanço e o número de ranhuras das peças retificadas. Velocidades de avanço maiores levam a maior produtividade, reduzindo o consumo de energia, custo de mão de obra e custo de fluido de corte por peça (TALON et al., 2021).

No entanto, o aumento do avanço também aumenta as forças de retificação, resultando em maior desgaste dos grãos abrasivos (RIBEIRO et al., 2021), aumento da espessura equivalente do cavaco e, conseqüentemente, em maior desgaste diametral do rebolo. Além disso, choques mecânicos entre a superfície de corte do rebolo e as ranhuras da superfície da peça levam a uma condição de retificação mais severa do que a de peças contínuas (CHOI; LEE; JEONG, 2001).

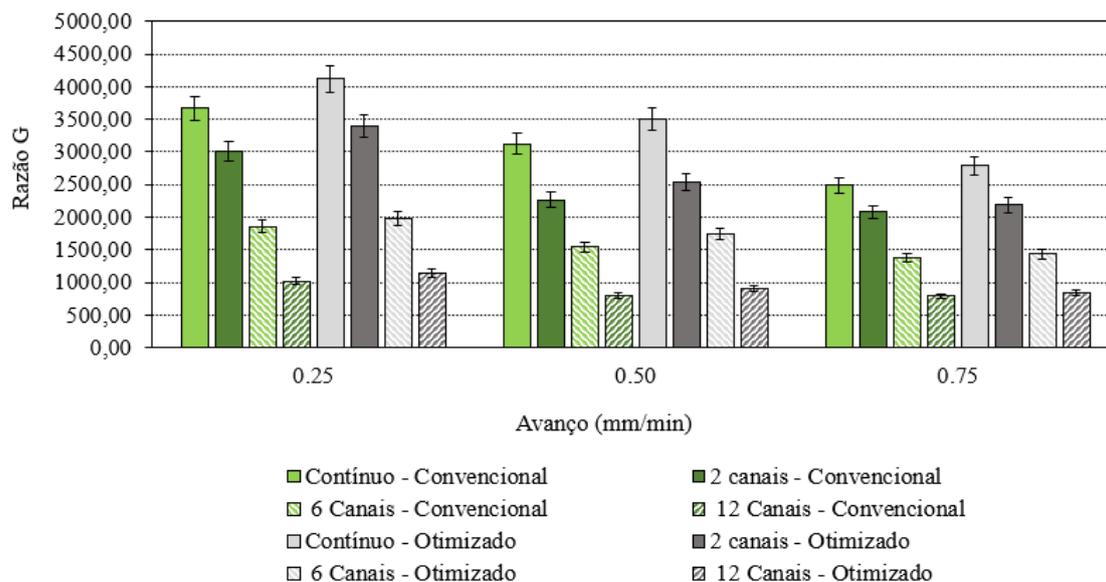
A presença de ranhuras na peça resulta em maior ocorrência de macrofraturas e desgaste do rebolo, devido a choques mecânicos e cargas cíclicas. Já em peças sem ranhuras, há predominantemente o desgaste por microfraturas, que resulta em maior vida da ferramenta em relação à retificação de peças com geometria interrompida. Os resultados obtidos para desgaste diametral do rebolo e relação G são apresentados nas Figuras 9 e 10, respectivamente.

Figura 9: Desgaste diametral em função da velocidade de avanço do rebolo e das condições de lubrificação empregadas



Fonte: Autor.

Figura 10: Relação G em função da velocidade de avanço do rebolo e das condições de lubrificação empregadas.



Fonte: Autor.

Conforme mostrado na Figura 11, aumentar a velocidade de avanço e o número de ranhuras resultou diretamente em maior desgaste do rebolo. Para o avanço de 0,25 mm/min, o método de jato convergente apresentou resultados 10,7%, 10,9%, 6,0% e 11,1% menores quando comparado ao convencional para peças com 0, 2, 6 e 12 ranhuras, respectivamente.

Para o avanço de 0,50 mm/min, os resultados do jato convergente foram 10,9%, 10,9%, 11,2% e 10,9% menores quando comparados ao convencional para as peças com 0, 2, 6 e 12 ranhuras, respectivamente.

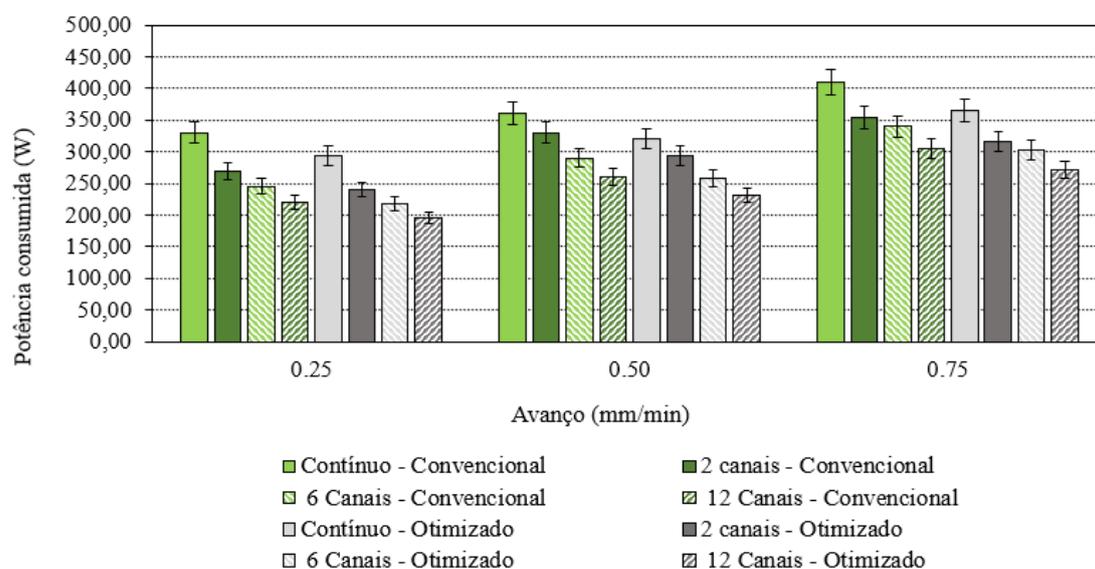
Por fim, para a velocidade de avanço de 0,75 mm/min, os resultados do método de jato convergente foram 10,9%, 5,0%, 3,4% e 7,4% menores quando comparados ao convencional para peças com 0, 2, 6 e 12 ranhuras, respectivamente.

Verifica-se que a maior eficiência da técnica de lubrificação por jato convergente diminuiu o desgaste da ferramenta, resultando em uma maior relação G em relação ao método convencional, conforme apresentado na Figura 12. Pode-se observar o mesmo padrão dos resultados anteriores, onde o aumento do número de ranhuras e da velocidade de avanço do rebolo levaram a uma piora na qualidade do processo, neste caso, a um maior desgaste do rebolo.

4.4. Potência elétrica consumida

A potência elétrica consumida na retificação representa a soma das energias consumidas por atrito, deformação elástica, plástica e formação de cavacos durante o processo. O monitoramento deste parâmetro é frequentemente usado para prevenção de sobrecarga da máquina e para detecção de colisão do rebolo (INASAKI; KARPUSCHEWSKI; WEHMEIER, 2000). A Figura 13 demonstra os resultados obtidos de potência elétrica consumida durante os ensaios.

Figura 11: Potência elétrica consumida em função da velocidade de avanço do rebolo e das condições de lubrificação empregadas.



Fonte: Autor.

Na Figura 11 pode-se observar que, para peças com a mesma geometria, a potência consumida aumentou com o aumento da velocidade de avanço, devido às maiores forças de corte presentes no processo. Além disso, diferentemente dos resultados anteriores, um aumento no número de ranhuras leva a uma diminuição da potência consumida, devido à menor área usinada nas peças com interrupções.

Por fim, observa-se que o método de jato convergente apresentou desempenho superior ao convencional em todas as velocidades de avanço e geometrias de peças testadas, reduzindo a potência consumida em média em 11%, devido à maior penetração do fluido aplicado em maiores velocidade e pressão, que melhora a lubrificação da interface entre ferramenta e peça, reduzindo as forças de corte e, conseqüentemente, a potência consumida.

A tendência de redução de forças durante a retificação de geometrias interrompidas se deve principalmente aos momentos de ausência de corte, conforme demonstrado experimentalmente por Ribeiro et al., (2021). Neste trabalho, os autores verificaram que os picos de potência durante o corte somados aos momentos de baixa potência durante o corte em vazio geraram resultados médios inferiores aos resultados obtidos durante a retificação contínua, onde a potência de retificação e a força tangencial tendem a se manter em níveis mais elevados.

Esses ciclos de tensões causam fadiga no ligante do rebolo, sendo esse ponto o responsável pela severidade do processo. Por outro lado, a presença de interrupções

geométricas promove maior entrada de fluido de corte, o que, neste trabalho, foi melhorado com a utilização de um bocal de fluido convergente, que permitiu maior velocidade do fluido na interface de corte. Dito isso, a maior lubrificação promovida pelas interrupções ajuda a reduzir a temperatura, mas não elimina a característica de fadiga a que está submetido o rebolo.

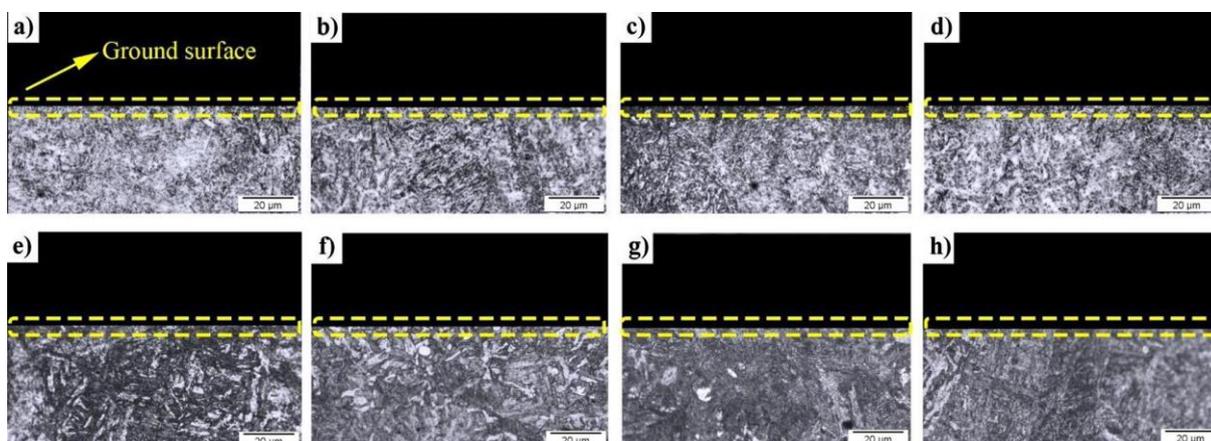
Além disso, destaca-se que devido às maiores velocidades de avanço e, conseqüentemente, à maior espessura do cavaco, há uma dificuldade crescente na penetração do fluido de corte nas interfaces de atrito, o que explica a tendência de obtenção de maiores desgastes do rebolo, rugosidades e desvios de circularidade.

4.5 Análise metalográfica

Melhores condições da superfície de corte do rebolo promovem melhores condições de remoção de material (DE MORAES et al., 2021; JAVARONI et al., 2020c) devido às condições térmicas favoráveis e à menor taxa de empastamento (LOPES et al., 2019) resultando em melhor qualidade final da peça e menor consumo de material abrasivo da ferramenta (MUNHOZ et al., 2020). No entanto, os impactos gerados durante a retificação interrompida, juntamente com os ciclos térmicos do processo, podem ser decisivos em termos de confiabilidade na aplicação desses componentes em demandas específicas.

Portanto, foi realizada a análise metalográfica das peças usinadas para verificar possíveis danos térmicos causados pelo processo nas peças, como alterações microestruturais, queimaduras e microfissuras. Na Figura 14 são mostradas as micrografias realizadas em cortes transversais da superfície retificada das peças, com uma velocidade de avanço de 0,75 mm/min (condição mais severa), sob lubrificação convencional (Figura 12 a-d) e método de jato convergente (Figura 14 e-h).

Figura 12: Análise metalográfica das peças após a retificação com velocidade de avanço de 0,75 mm/min, com lubrificação convencional: a) sem ranhuras, b) 2 ranhuras, c) 6 ranhuras e d) 12 ranhuras; e com lubrificação convergente: e) sem ranhuras, f) 2 ranhuras, g) 6 ranhuras e h) 12 ranhuras.



Fonte: Autor.

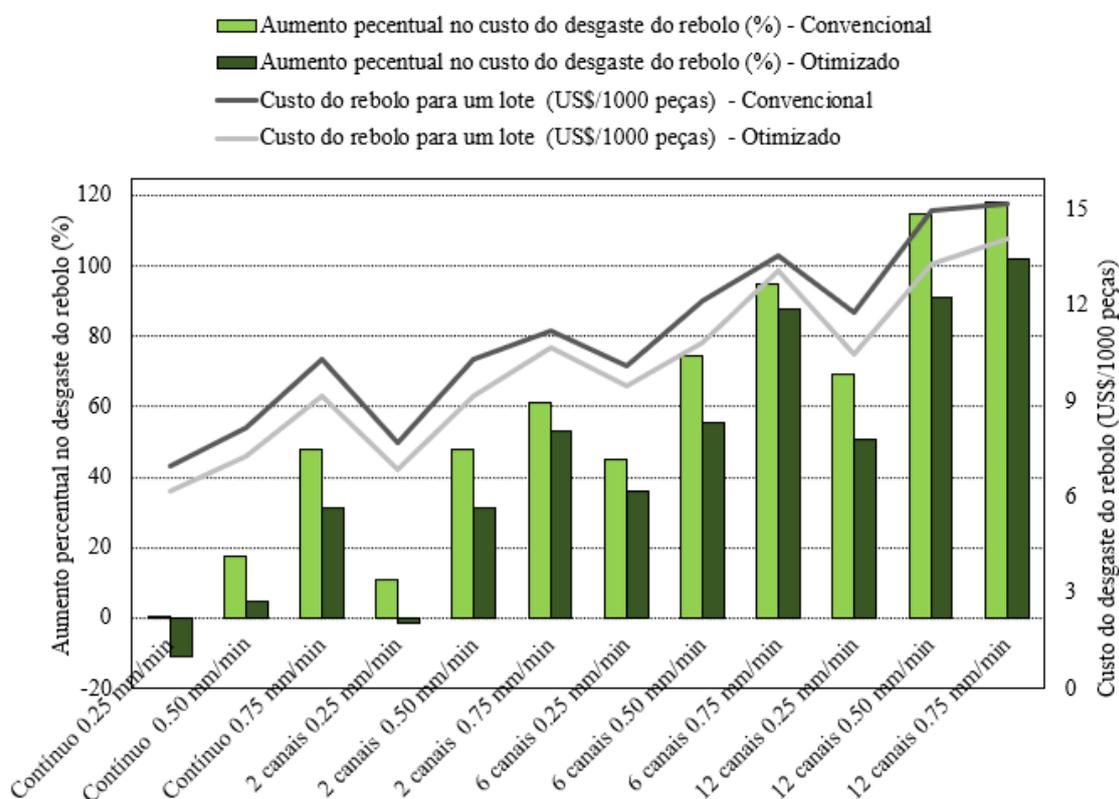
Observa-se que as velocidades de avanço combinadas com as técnicas de lubrificação aplicadas não geraram não conformidades, como regiões termicamente afetadas com camadas brancas ou escuras, nem a ocorrência de microfissuras. Portanto, pode-se concluir que todas as condições testadas apresentaram capacidades de lubrificação e refrigeração adequadas para evitar danos térmicos.

4.6 Custo do rebolo

Diante dos dados apresentados nas seções anteriores, fica comprovada a melhor eficácia do método de lubrificação por jato convergente em relação ao convencional. Nesse contexto, a técnica de jato convergente promoveu melhores qualidades superficial e geométrica às peças retificadas e reduziu o desgaste do rebolo.

No entanto, considerando que a redução das emissões de carbono está diretamente ligada ao aumento da vida do rebolo (SATO et al., 2022) principalmente em condições em que se observa um maior consumo de material abrasivo (TALON et al., 2020), como no caso da retificação interrompida, estudos são necessários para avaliar a viabilidade técnica e econômica do processo. Assim, a Figura 13 apresenta estimativas de custo do rebolo nas condições testadas neste trabalho.

Figura 13: Estimativas de custo do rebolo em função do número de ranhuras das peças retificadas, das velocidades de avanço e das condições de lubrificação empregadas.



Fonte: Autor.

Considerando como referência a condição com lubrificação convencional e avanço de 0,25 mm/min, verifica-se um custo de desgaste do rebolo para um lote de 1000 peças de US\$ 6,97. Na condição mais severa, com 12 ranhuras, lubrificação convencional e avanço de 0,75 mm/min, observa-se o valor de US\$ 15,20, correspondendo a um aumento de 118% em relação à referência.

Comparando-se peças contínuas (sem ranhuras) sob lubrificação convencional, o aumento no custo de desgaste do rebolo foi de 17% e 48% para velocidades de avanço de 0,50 e 0,75 mm/min, respectivamente. Na condição de lubrificação por jato convergente, há uma redução de 11% em relação à condição de referência (convencional, avanço de 0,25 mm/min) e aumentos de 5% e 31% para os avanços de 0,50 e 0,75 mm/min, respectivamente, consideravelmente inferiores aos observados com o método convencional. Essa tendência é observada em todos os outros resultados, demonstrando que a lubrificação por jato convergente pode efetivamente reduzir o custo do processo de retificação.

Por fim, ao aplicar a lubrificação por jato convergente, os valores da estimativa de custo de desgaste do rebolo foram reduzidos em até 19% e 23% para peças com seis e doze ranhuras, respectivamente, em relação ao método convencional. A utilização de um jato de fluido com maiores velocidade e pressão resultou em condições de lubrificação da zona de corte mais eficientes, reduzindo o desgaste da ferramenta e, conseqüentemente, levando a um menor custo do rebolo e a um processo de usinagem mais limpo.

CONCLUSÕES

Após a análise dos resultados obtidos, chegou-se às seguintes conclusões:

- O método de lubrificação por jato convergente apresentou melhor desempenho que o convencional em todas as condições testadas, reduzindo em até 25% a rugosidade, 20% os desvios de circularidade, 11% o desgaste diametral do rebolo, 11% a potência elétrica consumida e 23 % o custo do rebolo.
- O aumento do número de ranhuras e da velocidade de avanço do rebolo levou a uma piora na qualidade das peças e a um aumento no desgaste do rebolo devido às condições de usinagem mais severas (aumentos de vibrações, forças de corte, gradientes térmicos e espessura do cavaco).
- Não foram detectadas alterações microestruturais ou danos térmicos nas peças retificadas, independentemente do método de lubrificação aplicado.
- O melhor desempenho do método de lubrificação por jato convergente pode ser justificado pelas maiores velocidade e pressão de aplicação do fluido, o que garante uma penetração mais eficiente na barreira de ar formada ao redor do rebolo, aumentando a quantidade de fluido que é efetivamente entregue na interface de corte e, conseqüentemente, as capacidades de lubrificação e refrigeração desta técnica.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas sugestões podem ser exploradas no futuro, tais como:

- Pode ser explorado outros rebolos, a fim de que possa ser entendido a variação do processo em função de diferentes grãos abrasivos;
- Realização de ensaios utilizando diferentes materiais com outros formatos de secções interrompidas, com finalidade de criar uma análise mais aprofundada dos fenômenos responsáveis pelos desgaste e deformações plásticas da peça;
- Utilização de outras técnicas de lubrificação, tal como mínima quantidade de lubrificante (MQL) e, também, técnicas alternativas consideradas para minimização de danos ambientais em prol de uma manufatura embasada em sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

- ALVES, M. C.S.; BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R. Influência da lubrificação na qualidade superficial de metais retificados. **Revista Escola de Minas**. vol.64. n.4, pp. 505-512. Ouro Preto, MG, 2011. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/pdf/564/56421349017.pdf>>. Acesso em 15 nov 2022.
- ALVES, M. C. DE S. Influência dos métodos de lubri-refrigeração na retificação do aço ABNT 4340 usando rebolo de CBN. v. 2, p. 155, 2007.
- ANJOS, M. A. DOS et al. Experimental study of the use of conventional wheels on steel processing VP-50 used in the cylindrical grinding by means of different methods of lubrication and cooling. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 21, n. 1, p. 169–184, 2016.
- AYUB, M. A.; MOHAMED, A. B.; ESA, A. H. In-line Inspection of Roundness Using Machine Vision. **Procedia Technology**, v. 15, p. 807–816, 1 jan. 2014.
- BAUMGART, C. et al. **A Study of the Interaction between Coolant Jet Nozzle Flow and the Airflow Around a Grinding Wheel in Cylindrical Grinding**. **Procedia CIRP**, 2017.
- BIANCHI, E. C. Optimization of ceramics grinding. **Advances in Ceramics-Synthesis and Characterization, Processing and Specific Applications**, 2011.
- BIANCHI, E. C. et al. Estudo comparativo entre a agressividade superficial obtida na retificação com rebolos de óxido de alumínio e CBN, fabricados com ligantes resinóide e vitrificado. **Cerâmica**, v. 57, n. 344, p. 431–437, dez. 2011.
- BRINKSMEIER, E.; HEINZEL, C.; WITTMANN, M. Friction, Cooling and Lubrication in Grinding. **CIRP Annals**, v. 48, n. 2, p. 581–598, 1999.
- CHOI, H. Z.; LEE, S. W.; JEONG, H. D. A comparison of the cooling effects of compressed cold air and coolant for cylindrical grinding with a CBN wheel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 111, n. 1–3, p. 265–268, 25 abr. 2001.
- DAMASCENO, R. F. et al. Performance evaluation of various cooling-lubrication techniques in grinding of hardened AISI 4340 steel with vitrified bonded CBN wheel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 92, n. 9–12, p. 3795–3806, 2017.
- DE GODOY, V. A. A.; DINIZ, A. E. Turning of interrupted and continuous hardened steel surfaces using ceramic and CBN cutting tools. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 211, n. 6, p. 1014–1025, 2011.
- DE MELLO, H. J. et al. Contribution to cylindrical grinding of interrupted surfaces of hardened steel with medium grit wheel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 95, n. 9–12, p. 4049–4057, 3 abr. 2018.

DE MORAES, D. L. et al. Advances in precision manufacturing towards eco-friendly grinding process by applying MQL with cold air compared with cooled wheel cleaning jet. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 113, n. 11–12, p. 3329–3342, 2 abr. 2021.

DEBNATH, S.; REDDY, M. M.; YI, Q. S. Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review. **Journal of Cleaner Production**, v. 83, p. 33–47, 2014.

DEMIRCI, I.; MEZGHANI, S.; EL MANSORI, M. On Material Removal Regimes for the Shaping of Glass Edges: Force Analysis, Surface Topography and Damage Mechanisms. **Tribology Letters**, v. 30, n. 2, p. 141–150, 2 maio 2008.

DINIZ, A. E.; DE OLIVEIRA, A. J. Hard turning of interrupted surfaces using CBN tools. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 195, n. 1–3, p. 275–281, jan. 2008.

DINIZ, A. E.; GOMES, D. M.; BRAGHINI, A. Turning of hardened steel with interrupted and semi-interrupted cutting. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 159, n. 2, p. 240–248, 30 jan. 2005.

DINIZ, A. E.; MICARONI, R.; HASSUI, A. Evaluating the effect of coolant pressure and flow rate on tool wear and tool life in the steel turning operation. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 50, n. 9–12, p. 1125–1133, 6 out. 2010.

GANIER, M. Reciclar, eliminar e valorizar fluídos e resíduos de corte. **Revista Máquinas e Metais**, p. 26–29, 1993.

GUO, C.; CHEN, Y. Thermal modeling and optimization of interrupted grinding. **CIRP Annals**, v. 67, n. 1, p. 321–324, 2018.

HEINZEL, C.; BLEIL, N. The use of the size effect in grinding for work-hardening. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 56, n. 1, p. 327–330, 1 jan. 2007.

INASAKI, I.; KARPUSCHEWSKI, B.; WEHMEIER, M. Grinding monitoring system based on power and acoustic emission sensors. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 49, n. 1, p. 235–240, 2000.

JAMSHIDI, H.; BUDAK, E. On the prediction of surface burn and its thickness in grinding processes. **CIRP Annals**, v. 70, n. 1, p. 285–288, 2021a.

JAMSHIDI, H.; BUDAK, E. A 3D analytical thermal model in grinding considering a periodic heat source under dry and wet conditions. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 295, n. February, p. 117158, 2021b.

JAVARONI, R. L. et al. Grinding hardened steel using MQL associated with cleaning system and cBN wheel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 107, n. 5–6, p. 2065–2080, 13 mar. 2020a.

JAVARONI, R. L. et al. Evaluation of a cooled wheel cleaning jet in minimum quantity lubrication grinding process. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 111, n. 5–6, p. 1303–1317, 10 nov. 2020b.

JAVARONI, R. L. et al. Improvement in the grinding process using the MQL technique with cooled wheel cleaning jet. **Tribology International**, v. 152, p. 106512, 4 dez. 2020c.

KHARE, S. K.; AGARWAL, S. Predictive modeling of surface roughness in grinding. **Procedia CIRP**, v. 31, p. 375–380, 2015.

KING, R. I.; HAHN, R. S. **Handbook of modern grinding technology**. [s.l.] Springer Science & Business Media, 2012.

KLOCKE, F.; BRINKSMEIER, E.; WEINERT, K. Capability Profile of Hard Cutting and Grinding Processes. **CIRP Annals**, v. 54, n. 2, p. 22–45, 2005.

KOPAC, J.; KRAJNIK, P. High-performance grinding-A review. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 175, n. 1–3, p. 278–284, 2006.

KRUEGAR, M. K. et al. **New Technology in Metalworking Fluids and Grinding Wheels Achieves Tenfold Improvements in Grinding Performance**. [s.l.] Oak Ridge National Lab., TN (US), 2000.

LEI, X. et al. Roundness error evaluation algorithm based on polar coordinate transform. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 44, n. 2, p. 345–350, fev. 2011.

LI, H. N.; AXINTE, D. On the inverse design of discontinuous abrasive surface to lower friction-induced temperature in grinding: An example of engineered abrasive tools. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 132, p. 50–63, 1 set. 2018.

LIGHTSTONE, M.; KOSHY, P.; TULLIS, S. High-coherence jets for focused fluid delivery in grinding. **CIRP Annals**, v. 70, n. 1, p. 293–296, 2021.

LIU, C. H. et al. Grinding force control in an automatic surface finishing system. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 170, n. 1–2, p. 367–373, 14 dez. 2005.

LOPES, J. C. et al. Application of a wheel cleaning system during grinding of alumina with minimum quantity lubrication. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 102, n. 1–4, p. 333–341, 3 maio 2019.

M. C. S., ALVES, BIANCHI, E. C., AGUIAR, P. R., CANARIM, R. C. Influence of optimized lubrication-cooling and minimum quantity lubrication on the cutting forces, on

the geometric quality of the surfaces and on the micro-structural integrity of hardened steel parts. **Matéria (Rio de Janeiro) [online]**, v. 16, n. 3, p. 12, 2011.

MAJUMDAR, S. et al. Evaluation of cutting fluid application in surface grinding. **Measurement**, v. 169, p. 108464, 2021.

MALKIN, S.; BITTER, J. E. Grinding mechanisms and strength degradation for ceramics. **Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME**, v. 111, n. 2, p. 167–174, 1989.

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

MARINESCU, I. D. et al. **Handbook of Machining with Grinding Wheels**. 1. ed. New York: CRC Press, 2007.

MARINESCU, I. D. et al. **Handbook of Machining with Grinding Wheels**. [s.l.] CRC Press, 2016.

MOERLEIN, A. W. et al. In-process force measurement for diameter control in precision cylindrical grinding. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 42, n. 1, p. 93–101, 2009.

MORETTI, G. B. et al. Industrial manufacturing linked to the mechanical and economic viewpoint of the mold steel grinding process using aluminum oxide wheel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 117, n. 9–10, p. 2655–2666, 2021.

MORGAN, M. N.; BARCZAK, L.; BATAKO, A. Temperatures in fine grinding with minimum quantity lubrication (MQL). **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 60, n. 9–12, p. 951–958, 2012.

MUNHOZ, M. R. et al. Analysis of the surface roughness obtained by the abrasive flow machining process using an abrasive paste with oiticica oil. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2020.

PÉREZ, J. et al. Heat transfer analysis of intermittent grinding processes. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 51, n. 15–16, p. 4132–4138, 2008.

RIBEIRO, F. S. F. et al. Grinding assessment of workpieces with different interrupted geometries using aluminum oxide wheel with vitrified bond. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 108, n. 3, p. 931–941, 25 maio 2020a.

RIBEIRO, F. S. F. et al. Comparative analysis between resinoid and vitrified bond grinding wheel under interrupted cutting. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 109, n. 1–2, p. 75–85, 30 jul. 2020b.

RIBEIRO, F. S. F. et al. Novel performance assessment of interrupted grinding process using aluminum oxide wheel with resinoid bond. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 117, n. 9–10, p. 2701–2713, 2021.

RODRÍGUEZ, C. et al. Strength of advanced ceramics by the Small Punch Test. Proposal of a simple empirical equation for the Weibull effective volume. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 42, n. 16, p. 7620–7630, 1 dez. 2022.

RODRIGUEZ, R. L. et al. Grinding process applied to workpieces with different geometries interrupted using CBN wheel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 107, n. 3–4, p. 1265–1275, 25 mar. 2020.

ROWE, W. B. **Principles of modern grinding technology**. 2. ed. United States: William Andrew, 2014.

SATO, B. K. et al. Evaluating the effect of MQL technique in grinding VP50IM steel with green carbide wheel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 121, n. 11, p. 7287–7294, 2022.

SHASHIDHARA, Y. M.; JAYARAM, S. R. Vegetable oils as a potential cutting fluid—An evolution. **Tribology International**, v. 43, n. 5, p. 1073–1081, 2010.

SHAW, M. C.; COOKSON, J. O. **Metal cutting principles**. New York: Oxford university press, 2005.

SILVA NETO, J. F. DA. Estudo experimental da remoção, por jato de ar comprimido, de detritos na superfície de corte de rebolo diamantado durante a retificação da alumina refrigerada pela técnica MQL. **94 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia.**, 2012.

SOKOVIĆ, M.; MIJANOVIĆ, K. Ecological aspects of the cutting fluids and its influence on quantifiable parameters of the cutting processes. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 109, n. 1–2, p. 181–189, 1 fev. 2001.

TALON, A. G. et al. Grinding performance of hardened steel: a study about the application of different cutting fluids with corrosion inhibitor. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 108, n. 9–10, p. 2741–2754, 13 jun. 2020.

TALON, A. G. et al. Comparative evaluation of CBN wheels with abrasive grains of different friability applied to steel and ductile iron grinding process. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 7 jan. 2021.

TIAN, L, Yucan Fu , Jihua Xu , Haiyan Li , Wenfeng Ding, The influence of speed on material removal mechanism in high speed grinding with single grit. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 89, p. 192–201, 1 fev. 2015.

UMBRELLO, D. Analysis of the white layers formed during machining of hardened AISI 52100 steel under dry and cryogenic cooling conditions. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 64, n. 5–8, p. 633–642, 2013.

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

WEBSTER, J. A. C. Cui , R.B. Mindek Jr. , Dr. R. Lindsay. Grinding Fluid Application System Design. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 44, n. 1, p. 333–338, 1995.

WENG, L. Jixi Zhang , Sergiy Kalnaus , Miaoling Feng , Yanyao Jiang. Corrosion fatigue crack growth of AISI 4340 steel. **International Journal of Fatigue**, v. 48, p. 156–164, 2013.

WOJCIECHOWSKI, S. The estimation of cutting forces and specific force coefficients during finishing ball end milling of inclined surfaces. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 89, p. 110–123, 1 fev. 2015.

ZHOU, K. H.H. Ding, S.Y. Zhang, J. Guo, Q.Y. Liu, W.J. Wang. Modelling and simulation of the grinding force in rail grinding that considers the swing angle of the grinding stone. **Tribology International**, v. 137, p. 274–288, 2019.