UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

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

RODRIGO RÁFAGA DE SOUZA

EFEITO DA RETIFICAÇÃO COM DIFERENTES GRÃOS ABRASIVOS APLICADO NO FERRO FUNDIDO NODULAR AUSTEMPERADO ATRELADO A QUALIDADE E CUSTO INDUSTRIAL

BAURU

2023

RODRIGO RÁFAGA DE SOUZA

EFEITO DA RETIFICAÇÃO COM DIFERENTES GRÃOS ABRASIVOS APLICADO NO FERRO FUNDIDO NODULAR AUSTEMPERADO ATRELADO A QUALIDADE E CUSTO INDUSTRIAL

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: Professor Dr. José Cláudio Lopes

Coorientador: Professor Dr. Eduardo Carlos Bianchi.

BAURU

2023

Souza, Rodrigo Ráfaga.
Efeito da retificação com diferentes grãos abrasivos aplicado no ferro fundido nodular austemperado atrelado a qualidade e custo industrial / Rodrigo Ráfaga de Souza, 2023
72 f.

Orientador: José Cláudio Lopes

Dissertação (Mestrado)–Universidade Estadual Paulista (Unesp). Faculdade de Engenharia, Bauru, 2023

1. Retificação. 2. Friabilidade. 3. Nitreto de boro cúbico (CBN). 4. Ferro fundido nodular austemperado (ADI). I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Bauru

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

Aos 25 dias do mês de janeiro do ano de 2023, às 09:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de RODRIGO RÁFAGA DE SOUZA, intitulada **EFEITO DA RETIFICAÇÃO COM DIFERENTES GRÃOS ABRASIVOS APLICADO NO FERRO FUNDIDO NODULAR AUSTEMPERADO ATRELADO A QUALIDADE E CUSTO INDUSTRIAL**. A Comissão Examinadora foi constituida pelos seguintes membros: Prof. Dr. JOSÉ CLAUDIO LOPES (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecanica / Campus de Bauru, Prof. Dr. GILBERTO DE MAGALHÃES BENTO GONÇALVES (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / FEB/UNESP/Bauru, Profa. Dra. KATIA CRISTIANE GANDOLPHO CANDIOTO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Materiais / Engenharia Mecânica/EEL/USP. 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

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, João Francisco e Cláudia, por sempre me apoiaram nesta jornada de estudos. Ademais, agradeço aos professores que contribuíram com minha formação e especialmente a todos envolvidos direto e indiretamente com o Laboratório de Usinagem por Abrasão.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente ao Pai Celestial e aos espíritos de luz que me guiam e orientam para o caminho dos estudos e do trabalho, sinônimos de dignidade e honra.

Agradeço profundamente ao meu pai João Francisco de Souza e a minha mãe Cláudia Aparecida Cunha Souza, por estarem sempre me apoiando nos estudos, nas minhas escolhas e por estarem ao meu lado em todas as etapas da minha vida.

Expresso profunda gratidão ao meu orientador Professor Dr. José Cláudio Lopes, que além de um excelente profissional, é um grande amigo que a vida me apresentou. Muito obrigado por todas as nossas conversas e por me guiar no caminho do ensino-aprendizado. Serei eternamente grato a toda a nossa história e por todo apoio e confiança que depositou no meu trabalho ao longo dos anos.

Ao Professor Titular Eduardo Carlos Bianchi, que me recebeu no Laboratório de Usinagem por Abrasão de forma tão acolhedora e inspiradora, a fim de incentivar sempre a melhoria contínua do indivíduo na área acadêmica e espiritual.

Agradeço ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, campus Bauru, na pessoa do Coordenador Professor Titular Luiz Eduardo de Ângelo Sanchez, que esteve presente na minha qualificação, orientando e incentivando na realização da minha pesquisa.

Agradeço aos docentes da Faculdade Engenharia de Bauru, notoriamente ao Prof. Dr. Gilberto de Magalhães Bento Gonçalves e Prof. Dr. João Eduardo Guarnetti dos Santos, pelo apoio, amizade e pelas parcerias criadas ao longo dos meses.

Aos amigos Rafael Birelo Camacho, Matheus Camargo, Paola Weizenmann e Juliana Crisci, ficam meus sinceros agradecimentos, pela confiança, apoio e incentivo desde o começo dessa jornada.

Aos membros do Laboratório de Usinagem por Abrasão, meus agradecimentos por toda parceria, troca de informações e aprendizado que resultaram não apenas na minha pesquisa, mas em muitas outras que somam com a sociedade científica.

Ademais, ficam meus sinceros agradecimentos a todos que de forma direta ou indireta tenham contribuído com esta pesquisa.

“Faça tudo com muito amor, e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá, de alguma maneira você chega lá”.

(Ayrton Senna)

RESUMO

O ferro fundido nodular austemperado tem tomado espaço nas aplicações industriais devido as boas propriedades de manufatura, tais como usinabilidade, capacidade de tratamento térmico, elevada resistência mecânica, bom escoamento em moldes e baixo custo de fabricação. Haja vista a facilidade de confeccionar peças com dimensões próximas as desejadas. No entanto, para alguns conjuntos mecânicos é indispensável a aplicação de processos de usinagem para a correção de superfícies, otimização de rugosidade e padronização dimensional conforme norma. O processo de usinagem de retificação onde há o uso de abrasivos, tem uma posição estratégica na cadeia produtiva para o alcance desses parâmetros onde são necessários altos índices de qualidade. Há uma crescente variedade de grãos abrasivos a serem aplicados, todavia, para a retificação do ferro fundido nodular austemperado, destaca-se o uso de grãos de nitreto de boro cúbico (CBN) com variações de friabilidade que possibilitam maior rendimento no processo. Dessa forma, vislumbrou-se a necessidade de somar estudos a sociedade científica sobre a retificação do ferro fundido com diferentes friabilidades nos grãos abrasivos de CBN, conteúdo ao qual ainda é pouco explorado cientificamente. Para o estudo com utilização de dois rebolos com friabilidades diferentes, aplicou-se lubrirefrigeração constante, variando a velocidade de avanço em 0,5; 1,0 e 1,5 mm/min onde foi analisado o comportamento de rugosidade média aritmética (Ra e Rz), desvio de circularidade, desgaste diametral do rebolo, energia específica, emissão acústica, microdureza, microscopia óptica e análise de custo. Logo, na maioria dos resultados obtidos, o rebolo que possui grão abrasivos com menor friabilidade se comportou de maneira melhor quando comparado com o rebolo de maior friabilidade, devido a estabilidade do grão e maior resistência mecânica a deformação plástica.

Palavras-chave: Retificação; Friabilidade; Nitreto de boro cúbico (CBN); Ferro fundido nodular austemperado (ADI).

ABSTRACT

Austempered ductile iron has gained space in industrial applications due to its good manufacturing properties, such as machinability, heat treatment capacity, high mechanical strength, good flow in molds and low manufacturing cost. In view of the ease of making parts with dimensions close to the desired ones. However, for some mechanical assemblies, it is essential to apply machining processes for surface correction, roughness optimization and dimensional standardization according to the norm. The grinding machining process, where abrasives are used, has a strategic position in the production chain to reach those parameters where high quality levels are required. There ir as growing variety of abrasive grains to be applied, however, for the grinding os austempered nodular cast iron, the use of cubic boron nitride (CBN) grains with friability variations that allow greater yield in the process is highlighted. Thus, there was a need to add studies to the scientific society on the grinding of cast iron with different friability in CBN abrasive grains, a content that is still little explored scientifically. For the study using two grinding wheel whit different friability, constant cooling was applied, varying the advanced speed by 0,5; 1,0 and 1,5 mm/min where the behavior of arithmetic mean roughness (Ra and Rz), roundness deviation, diametral wear of the grinding wheel, specific energy, acoustic emission, microhardness and cost analysis was analyzed. Therefore, in most of the results obtained, the grinding wheel that has abrasive grains with lower friability behved better when compared to the grinding wheel with greater friability, due to the stability of the grain and greater mechanical resistance to plastic deformation.

Keywords: Grinding process; Friability; Cubic boron nitride (CBN); Austempered ductile iron (ADI).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Custo de produção de acordo com a quantidade de operações. 17
Figura 2: Principais estruturas do rebolo. 18
Figura 3: Exemplo das formas básicas da retificação. 19
Figura 4: Grandezas físicas do processo de retificação cilíndrica externa de mergulho 20
Figura 5: Estruturas típicas de um rebolo: a) superabrasivo e b) convencional. 21
Figura 6: Diferentes modos de fixação dos grãos abrasivos 24
Figura 7: Modos de quebra do grão/ligante no rebolo 26
Figura 8: Grãos de CBN GL (A) e GS (B) 27
Figura 9: Simulação de resultados de pressão distribuída em torno da aleta 28
Figura 10: Microestrutura típica de um ferro fundido nodular austemperado, apresentando a ferrita acicular e a austenita estável com um alto teor de carbono 35
Figura 11: Peça automotiva em alumínio substituída pelo equivalente em ADI. 36
Figura 12: Ciclo do tratamento térmico de austêmpera. 36
Figura 13: Retificadora cilíndrica CNC Sulmecânica – RUAP 515 H 38
Figura 14: Mangueiras utilizadas na aplicação convencional do fluido de corte 40
Figura 15: Corpo de prova dimensionado em milímetros. 40
Figura 16: Fluxograma dos ensaios 41
Figura 17: Método de impressão do perfil do rebolo na peça de aço ABNT 1020. 44
Figura 18: Rugosidade Ra 47
Figura 19: Rugosidade Rz 48
Figura 20: Microscopia confocal 49
Figura 21: Desvio de circularidade 50
Figura 22: Relação G (G-Ratio) 52
Figura 23: Energia específica. 53
Figura 24: Emissão acústica 54
Figura 25: Análise de custo. 56
Figura 26: Análise de microdureza vickers 58
Figura 27: Análise de microscopia óptica 59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características dos principais materiais utilizados na fabricação de grãos abrasivos 24
Tabela 2: Caracterização dos principais tipos de fluidos. 29
Tabela 3: Composição química do ferro fundido nodular austemperado 41
Tabela 4: Custos de retificação. 57

LISTA DE SÍMBOLOS

μ	Coeficiente de atrito	[-]
A	Área média no topo dos grãos abrasivos	[mm^2]
ADI	Austempered ductile iron	[-]
Al	Alumínio	[-]
Al_2O_3	Óxido de alumínio	[-]
a	Profundidade de corte real	[mm]
a_p	Profundidade de corte	[mm]
a_c	Largura de corte	[mm]
a_d	Profundidade de dressagem por passada	[µm]
b	Largura do rebolo	[mm]
C	Carbono	[-]
CBN	Nitreto de boro cúbico	[-]
Cu	Cobre	[-]
c_d	Profundidade radial de corte	[mm]
c_e	Custo de energia	[US$/kWh]
c_f	Custo de fluido de usinagem	[US$/l]
c_s	Custo de alumina utilizada no rebolo	[US$/$mm^3$]
c_w	Custo de descarte de fluido de corte	[US$/l]
d_s	Diâmetro do rebolo	[mm]
d_w	Diâmetro da peça	[mm]
e_c	Energia específica	[J/mm^3]
F_a	Força axial	[N]
F_n	Força normal	[N]
F_{tc}	Força tangencial	[N]
G	Relação G	[-]
GL	Rebolo de baixa friabilidade	[-]
GS	Rebolo de alta friabilidade	[-]
HRC	Dureza Rockwell C	[-]
h_{eq}	Espessura equivalente de corte	[µm]
K	Força de corte unitária	[N]
Lc	Comprimento de contato	[mm]
M	Custo de mão de obra	[US$/hora]
MQL	Mínima quantidade de líquido	[-]
n_s	Rotação do rebolo	[rpm]
n_c	Número de ciclos de vida do fluido	[-]
n_w	Rotação da peça	[rpm]

LISTA DE SÍMBOLOS

P	Potência de corte	[W]
p	Pressão unitária	[N/mm^2]
Q_w	Taxa de remoção de material no tempo	[mm^3/s]
Q_w	Taxa específica de remoção de material no tempo	[mm^3/mm.s]
R_a	Rugosidade média aritmética	[µm]
R_z	Rugosidade total	[µm]
R	Distância de aproximação	[mm]
r	Taxa de aproximação	[mm/min]
SiC	Carbeto de silício	[-]
Si	Silício	[-]
T_{so}	Tempo de spark out	[min]
v	Volume removido da peça	[mm³/peça]
v_f	Velocidade de avanço do rebolo	[mm/min]
v_d	Velocidade de dressagem	[mm/min]
v_{jet}	Fluxo do fluido	[l/min]
v_s	Velocidade tangencial do rebolo ou velocidade de corte	[m/s]
v_w	Velocidade da peça ou velocidade de trabalho	[m/s]
Z_s	Volume de rebolo gasto	[mm^3]
Z_w	Volume de material removido	[mm^3]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 14
1.1 Motivação 15
1.2 Objetivo geral 15
1.3 Objetivos específicos 16
2. REVISÃO DA LITERATURA 17
2.1 Processo de retificação 17
2.2 Retificação cilíndrica de mergulho 19
2.3 Rebolos 21
2.3.1 Óxido de alumínio (Al_2O_3) 22
2.3.2 Carbeto de silício (SiC) 23
2.3.3 Rebolo de CBN 23
2.4 Friabilidade dos grãos abrasivos 25
2.5 Lubrirefrigeração 28
2.6 Variáveis de saída na retificação cilíndrica 30
2.6.1 Rugosidade 30
2.6.2 Desvio de circularidade 31
2.6.3 Relação G (G-Ratio) 31
2.6.4 Energia específica 32
2.6.5 Emissão acústica 33
2.6.6 Análise de custo 33
2.6.7 Microdureza 34
2.7 Ferro fundido nodular austemperado (ADI) 35
3. MATERIAIS E MÉTODOS 38
3.1 Máquina retificadora 38
3.2 Rebolos e dressador 39
3.3 Sistemas de refrigeração 39
3.4 Corpos de prova 40
3.5 Planejamento dos ensaios 41
3.6 Equipamentos para variáveis de saída 42
3.6.1 Rugosidade 42
3.6.2 Desvio de circularidade 43
3.6.3 Desgaste diametral do rebolo e relação G 43

SUMÁRIO

3.6.4 Emissão acústica 44
3.6.5 Energia específica 45
3.6.6 Microscopia óptica 45
3.6.7 Microdureza 45
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 47
4.1 Rugosidade 47
4.2 Desvios de circularidade 50
4.3 Relação G (G-Ratio) 51
4.4 Energia específica 52
4.5 Emissão acústica 54
4.6 Análise de custo 55
4.7 Microdureza 58
4.8 Microscopia óptica 58
CONCLUSÕES 60
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 62
REFERÊNCIAS 63

1. INTRODUÇÃO

O processo de usinagem por retificação detém de posicionamento estratégico na engenharia, normalmente no final da cadeia produtiva, a fim de atender aos requisitos de projeto onde altos níveis de tolerância geométrica e acabamento superficial são solicitados (LI et al., 2013). Desse modo, há um valor agregado considerado alto a essa etapa da manufatura, fazendo jus a sua importância na indústria e nos processos de fabricação (BIANCHI et al., 2018). Quando comparado com outros processos de usinagem, a retificação detém de elevada geração de energia (HADAD et al., 2012).

A ferramenta de corte utilizada nesse processo é o rebolo, no qual é constituído de grãos abrasivos, porosidade e aglomerante, este último é que detém da capacidade de manter os grãos unidos em sua geometria cilíndrica (ALEXANDRE; LOPES; MARTINI, 2020). Os grãos abrasivos possuem diversas arestas cortantes e apresentam diferentes características de corte que interferem no seu rendimento e produtividade aos quais são influenciadas pela resistência a abrasão, o tipo de estrutura cristalina, forma, tamanho e friabilidade (LI et al., 2013). O intenso calor gerado durante a retificação pode alterar as características do material ligante do rebolo e dos grãos abrasivos, interferindo drasticamente na vida útil da ferramenta (BIANCHI et al., 2019). Desse modo, a utilização de fluidos de corte torna-se essencial na usinagem por abrasão, tendo como características básicas a finalidade de lubrificar, refrigerar e remover os cavacos gerados durante o corte, já a não utilização de fluido de corte pode obstruir os poros do rebolo, elevando o gradiente na zona de corte, e por consequência afetando na qualidade superficial da peça e na sua microestrutura (SILVA et al., 2020).

Os grãos abrasivos são determinados conforme o tipo de material que se deseja retificar, no entanto, a utilização de grãos abrasivos de nitreto de boro cúbico (CBN) tem revelado grandes vantagens, no que diz respeito a sua estabilidade e alta condutividade térmica, além de serem inertes quimicamente e possuir elevada dureza, os grãos de CBN apresentam menor desgaste, o que reduz a quantidade de dressagem no rebolo e permite também o uso de maiores velocidades de corte, aumentando consecutivamente a produtividade (HADAD et al., 2012).

Todavia, uma característica muito importante sobre os grãos abrasivos é a friabilidade, pois está relacionada à capacidade do grão se fragmentar em partículas menores, gerando novas arestas de corte (DING et al., 2015).

Entende-se desta forma, que um rebolo com grãos abrasivos de alta friabilidade, é aquele em que se fragmenta com maior facilidade durante o uso, gerando assim novas arestas de corte que tendem a remover o material com maior facilidade. Em contrapartida, os grãos abrasivos denominados como de baixa friabilidade, não se desprendem facilmente da estrutura do rebolo, impossibilitando a formação de novas arestas de modo constante, alterando assim as propriedades de corte no material (SATO et al., 2018).

O material a ser retificado também denota de severa importância de pesquisa, haja vista a vasta aplicação industrial do ferro fundido nodular austemperado, que vem sendo utilizado na confecção de eixos virabrequins, cilindros automotivos, bielas e demais componentes estruturais (LOPES et al., 2019).

1.1 Motivação

O processo de retificação cilíndrica é amplamente utilizado na indústria a fim de garantir o controle dimensional sob requisito de norma, permitindo que diversos componentes mecânicos atuem precisamente devido as condições superficiais adquiridas. Na retificação do ferro fundido nodular austemperado (*Austempered Ductile Iron - ADI*), tem-se como desafio garantir as condições geométricas sem alterar sua microestrutura ausferrítica.

No entanto, após pesquisas realizadas sobre o ADI em bancos de dados internacionais, tais como Scopus, Google Scholar, Science Direct, notou-se uma carência acerca do tema, posto que diversas empresas realizam tais processos, mas não detém de procedimentos técnicos que qualifiquem tais operações. Além disso, observou-se um baixo acervo sobre a retificação cilíndrica de quaisquer tipos de ferro fundido com rebolo de CBN. Devido ao crescimento exponencial de produção e a integração da indústria 4.0, cada vez mais os sistemas de produção estão sendo inovados e otimizados para o melhor atendimento ao cliente, viabilizando recursos e custos, o que fomenta também a indústria científica.

A motivação para o presente trabalho se resulta em buscar eficiência na retificação do ADI com rebolos de CBN de friabilidades diferentes, variando a velocidade de avanço e utilizando lubrirefrigeração abundante, com o intuito de comparar o custo produção de acordo com o tipo de rebolo e velocidade de avanço utilizada.

1.2 Objetivo geral

Avaliar e comparar o desempenho de dois rebolos de CBN com diferentes níveis de friabilidade na retificação cilíndrica do ferro fundido nodular austemperado, utilizando lubrirefrigeração abundante e três diferentes velocidades de avanço, sendo 0,5; 1,0 e 1,5 mm/min.

1.3 Objetivos específicos

- Analisar o desempenho entre os rebolos de maior (GS) e menor (GL) friabilidade no processo de retificação do ferro fundido nodular austemperado;
- Averiguar a influência da friabilidade de grãos abrasivos sob diferentes velocidades de avanço e o quão isso impacta na qualidade superficial e geométrica da peça, relacionando com a potência consumida no processo;
- Relacionar a friabilidade dos grãos abrasivos com sua capacidade de remoção de material, a fim de catalogar o comportamento dos rebolos, de modo a encontrar um ponto de equilíbrio entre eles;
- Avaliar possíveis danos térmicos na peça, de maneira a relacionar com a eficiência da friabilidade dos grãos abrasivos e com o mecanismo de formação de cavaco;
- Comparar o custo necessário para a fabricação de peças com os dois tipos de rebolos em diferentes velocidades de avanço.

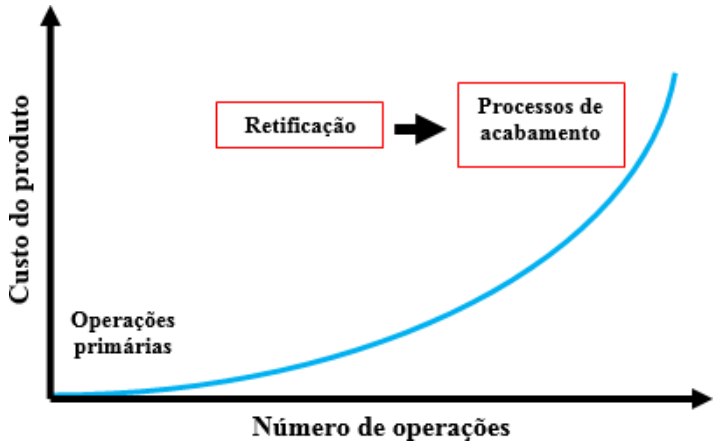
2. REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo será apresentado uma revisão bibliográfica sobre os principais assuntos abordados neste trabalho, onde serão tratados conteúdos sobre o processo de retificação e seus principais componentes, as características do rebolo de CBN, a variação na friabilidade dos grãos abrasivos, o ferro fundido nodular austemperado e as variáveis de saída no processo de retificação cilíndrica.

2.1 Processo de retificação

Segundo Anjos (2015), a retificação provavelmente seja o processo de modelagem de materiais mais antigo que exista, onde o homem descobriu como afiar suas ferramentas em pedras desde o período pré-histórico. O autor ainda cita, que atualmente, difere-se a retificação dos demais processos de usinagem, tais como torneamento e fresamento pelo tipo de ferramenta utilizada, haja vista que nesses outros processos o ângulo de corte é conhecido ou determinado, e na retificação as arestas de corte apresentam ângulos indefinidos. A retificação é incluída como uma das etapas mais precisas dos processos de fabricação, chamando a atenção de diversas sociedades envolvidas no segmento fabril (SOUZA et al., 2021). Por muito tempo a retificação foi apresentada como uma frente da engenharia de difícil compreensão, devido as diferentes geometrias de arestas vivas e da alta velocidade de corte. Assim, Bianchi et al., (2018) mencionam que os custos para falhas ocorridas em peças retificadas são muito altas, considerando os gastos envolvidos em trabalhos anteriores para que o produto pudesse chegar a fase atual de confecção. Na indústria atual, os índices de produção são elevados, e são exigidas reduções nos custos, além de manter a qualidade na produção e a fidelidade do cliente (RIBEIRO et al., 2020). Um tipo de relação de custos pode ser visualizado na figura 1.

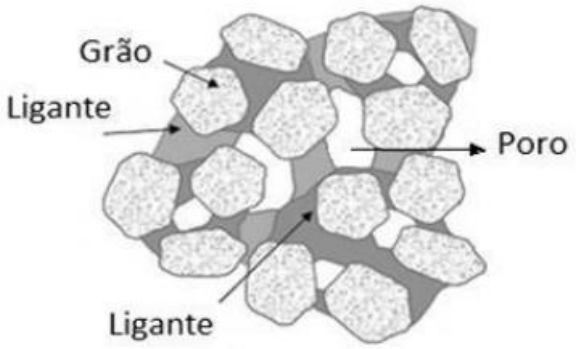
Figura 1: Custo de produção de acordo com a quantidade de operações.



Fonte: Adaptado de ROWE, 2014.

No processo de retificação, os grãos abrasivos são pequenas partículas com arestas vivas, capazes de remover o material desejado. Portanto, é necessário selecionar o tipo de grão abrasivo conforme o material que está sendo usinado (SOUZA et al., 2021). Para Marinescu et al., (2016) a afinidade química entre os grãos e o material a ser trabalhado é essencial para gerar alta eficiência nos padrões de retificação. O autor ainda cita que outros parâmetros de suma importância são os tamanhos dos grãos, tipos de liga, estrutura e dureza. Entre os tipos de grãos abrasivos, existe o óxido de alumínio, cuja aplicação destina-se a aços com baixa dureza e altas velocidades de retificação (TALON et al., 2019). Já os rebolos de carboneto de silício, são recomendados para trabalhos em aços inoxidáveis com o uso de lubrirefrigeração, podendo ser aplicado também ao ferro fundido cinzento e materiais não metálicos (ROWE, 2014). Além desses, encontra-se o rebolo de nitreto de boro cúbico (CBN), que pode ser aplicado na retificação de aços temperados, superligas de níquel e ferros fundidos especiais (SOSA; ECHEVERRIA, 2015). Por fim, o rebolo diamantado é a opção quando se deseja retificar materiais cerâmicos, vidros, metal duro e algumas ligas especiais (ROWE, 2014).

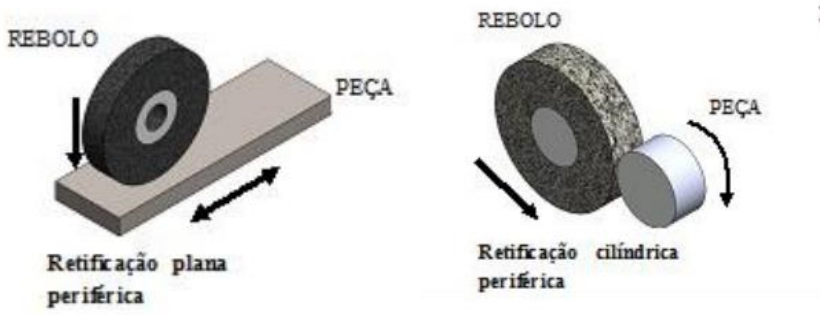
Figura 2: Principais estruturas do rebolo



Fonte: Adaptado de ANJOS, 2018.

Cada um deles possui vantagens e desvantagens, dependendo as condições que lhe são atribuídas. No entanto, todos eles devem conter estabilidade térmica quando submetidos as altas temperaturas na zona de corte (GARCIA et al., 2020). No processo de retificação, é possível observar que existem quatro operações básicas que são classificadas de acordo com a superfície a ser usinada e com a posição e o movimento relativo entre a peça de trabalho e o rebolo, conforme ilustra a figura 3.

Figura 3: Exemplos das formas básicas de retificação



Fonte: Adaptado de MARINESCU et al., 2007.

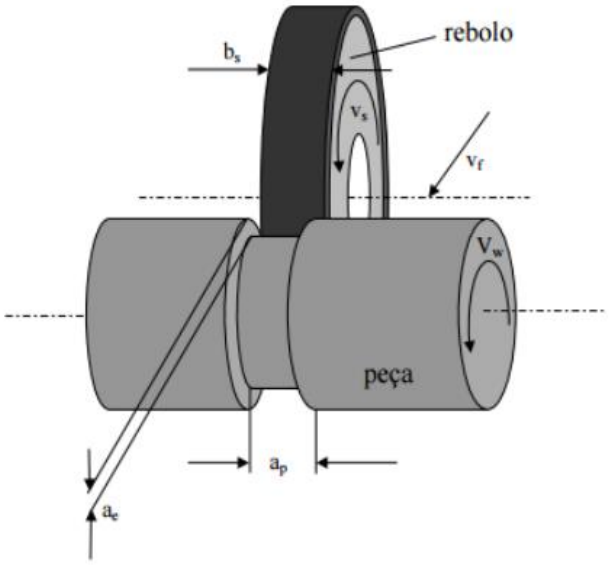
Há uma dependência da habilidade dos grãos abrasivos de penetrar efetivamente no material, pois é necessária uma quantidade elevada de energia específica, onde parte é disponibilizada para vencer o atrito, que acaba sendo convertido em calor na região de contato entre o rebolo e o material a ser usinado. Desse modo, para evitar danos térmicos na superfície da peça, utiliza-se um fluido refrigerante que também detém propriedades lubrificantes, reduzindo a temperatura na zona de corte e facilitando o escoamento do cavaco, impedindo diversas vezes que os poros do rebolo sejam preenchidos e empastados por material metálico (PUSAVEC et al., 2010).

2.2 Retificação Cilíndrica de Mergulho

Segundo Ding et al., (2010), há uma deformação elástica quando o rebolo toca a peça e inicia o avanço radial, no entanto, esse avanço acaba não sendo real, pois a posição real do rebolo fica atrasada em relação a teórica, e somente após algumas voltas o avanço real se iguala ao avanço comandado, entretanto a diferença entre a profundidade de corte real e teórica se mantém. A fim de garantir a dimensão desejada na peça é necessário que ao fim do corte, o rebolo interrompa seu movimento de avanço radial por alguns instantes até que o eixo árvore e a peça se recuperem de tal deformação, esse evento denomina-se como tempo de *spark-out* (LOPES et al., 2019).

A fim de compreender de maneira concisa o processo de retificação cilíndrica externa de mergulho e suas variáveis, a figura 4 ilustra esquematicamente as principais grandezas físicas envolvidas.

Figura 4: Grandezas físicas do processo de retificação cilíndrica externa de mergulho.



Sendo:

- a_p a largura de corte [mm],
- a_c a profundidade de corte [mm]
- v_s a velocidade periférica do rebolo (velocidade de corte) [m/s]
- v_w a velocidade tangencial da peça [m/s];
- v_f a velocidade de mergulho (avanço) [mm/min]; e
- b_s a largura do rebolo [mm]

Fonte: Adaptado de MARINESCU et al., 2007.

A velocidade de mergulho corresponde à velocidade do rebolo em sentido radial, a partir do contato. Esse parâmetro interfere no acabamento final da peça, além disso as forças de corte se elevam conforme há o aumento dessa velocidade (ANJOS, 2015). Dessa maneira, é possível compreender que quando se aumenta a velocidade de avanço e se preserva as outras velocidades de modo constante, gera-se um aumento na taxa de remoção de material, das forças de corte e da rugosidade da peça (TAWAKOLI; HADAD;SADEGHI, 2010).

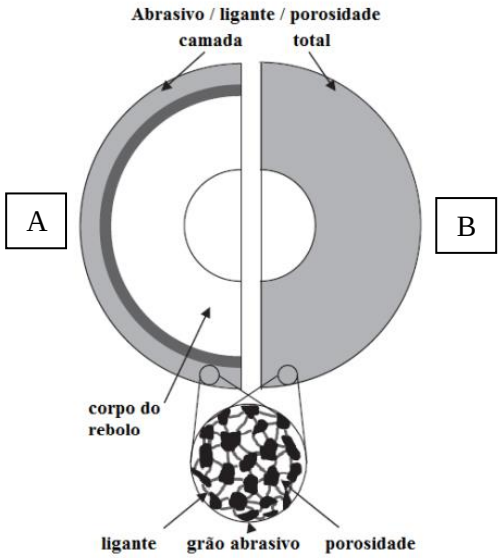
2.3 Rebolos

Os rebolos são ferramentas de revolução utilizados no processo de retificação e são considerados como um sistema trifásico compostos por três elementos, o grão abrasivo, que é o elemento que deve entrar em contato com a peça para remover material, o espaço intergranular, o qual serve para a armazenagem do material removido e permite o fluxo de líquido lubrirefrigerante, e o ligante que tem a função de reter os grãos no rebolo. (KUFFA; KUSTER; WEGENER, 2017).

Segundo Javaroni et al., (2020), o rebolo pode ser composto ainda por um quarto elemento, o projeto do rebolo, além dos três descritos anteriormente. O projeto considera as resistências mecânicas e químicas necessárias para a devida atuação, haja vista que em rebolos de CBN, apenas uma faixa de grãos abrasivos são fixadas em uma roda de estrutura metálica, conforme ilustra a figura 5.

Assim, seu desempenho está relacionado ao tipo e ao tamanho do grão, às propriedades abrasivas do material aglomerante e ainda à porosidade do conjunto. Para Rowe (2014), é necessário realizar o balanceamento e dressagem do rebolo como modo de preparação adequada, pois isso afeta diretamente no desempenho do processo de retificação. Em somativa a esses parâmetros, o autor cita que a dressagem deve produzir a topografia adequada para a superfície de corte, sendo um influenciador direto na rugosidade e morfologia da superfície da peça.

Figura 5: Estruturas típicas de um rebolo: a) superabrasivo e b) convencional.



Fonte: Adaptado de WEGENER et al., 2011

Referente ao desgaste dos rebolos, Martini et al., (2018) mencionam que essa característica está associada a falhas de seus componentes e pode ser classificado em outros três fenômenos, sendo eles o atrito, devido as forças de corte e o aumento de energia; a fratura do grão, que está associado a friabilidade do rebolo; e a fratura do ligante, que está vinculado à auto afiação da ferramenta de corte abrasiva. Para Marinescu, Guo e Wei (2013), quatro propriedades dos grãos demonstram a eficiência no processo de corte, sendo elas a dureza, a resistência térmica, a tenacidade e a friabilidade. Durante a fabricação dos rebolos, na operação de prensagem, nem todo o espaço é ocupado pelos grãos abrasivos, dessa forma, cria-se espaços vazios entre eles, que são denominados como porosidade.

A maior porosidade de um rebolo facilita o alojamento de cavacos, o que o torna uma ferramenta adequada para a remoção de grandes quantidades com maior rapidez (Wu et al., 2019). Dentre os diversos tipos de grãos abrasivos desenvolvidos, três se destacam pela alta aplicação industrial, a saber:

2.3.1 Óxido de Alumínio (Al_2O_3)

Considerado o mais convencional nas operações de retificação, os grãos de óxido de alumínio podem ser encontrados em diversas formas, tamanhos e misturados com óxidos de ferro, titânio e cromo (BIANCHI et al., 2018). Segundo Marinescu et al.,(2013), há uma diversidade de óxidos de alumínio, todavia todos se assemelham na característica de baixa condutividade térmica, o que acaba sendo um fator consideravelmente negativo no processo de retificação. No que diz respeito a dureza desse elemento, há um aumento nessa característica conforme a elevação da sua pureza.

Segundo Anjos (2015) o óxido de alumínio também pode ser fundido, para a fabricação desse abrasivo, primeiramente é extraído da bauxita o óxido hidratado de alumínio e então esse óxido é calcinado. Após essa etapa, é misturado ao coque e levado a um forno por tempo determinado. Após a etapa de queima, o material é deixado para esfriar por alguns dias para posteriormente ser moído e lavado. A aplicação do óxido de alumínio fundido está atrelada a ligas de baixa usinabilidade e de altas ligas de aço. O autor ainda cita que algumas técnicas podem ser utilizadas para alterar as propriedades do material, tais como o tratamento térmico da sílica, que proporciona adesão ao grão em relação ao ligante resinoide.

O óxido de alumínio branco apresenta-se como outra via dentro da categoria do Al_2O_3, normalmente produzida na escala mícron, a alumina é passada por um processo de beneficiamento, então logo após é separada em dois tamanhos diferentes através do processo de decantação (TAWAKOLI et al., 2011).

Suas características comuns são o alto poder de corte e friabilidade, desse modo são recomendados para afiação de peças produzidas em aço especial, alta dureza ou sensíveis ao calor (RODRIGUEZ et al., 2019).

2.3.2 Carbeto de Silício (SiC)

De acordo com Anjos (2015), o carbeto de silício foi o primeiro abrasivo a ser manufaturado em 1981, onde foi realizado a mistura de areia e coque para posteriormente ser fundido.

Desse modo, obteve-se o carborundum, uma união de carbono com corundum que detém de 60% de sílica e 40% de coque. Rowe (2014) relata que o carbeto de silício é comumente utilizado na usinagem de carbeto de tungstênio, ferro fundido, mármore, alumínio, titânio, latão e cobre. Devido a sua elevada dureza e agressividade que auxilia na penetração em superfícies macias, tais como o aço de baixa resistência a tração, alumínio e ligas de cobre, todavia, seu coeficiente de expansão térmica é baixo.

Há também outras variações desse tipo de abrasivo, o carbeto de silício impuro preto é comumente utilizado em operações de desbaste em ferro fundido, alumínio, bronze e vidro (MORETTI et al., 2020). O carberto de silício puro verde detém de maior friabilidade e proporciona dessa forma, uma usinagem com menor geração de calor, possui elevada pureza e difícil manufatura, o que eleva também os custos de usinagem (PUSAVEC et al., 2010). Há também o carberto de silício preto com óxido de alumínio, normalmente fabricado com ligante vitrificado e grãos que apresentam elevada dureza e friabilidade, devido ao carbureto de silício e baixa tenacidade (GARCIA et al., 2020).

2.3.3 Rebolo de CBN

Para Canarim (2018) o CBN – nitreto de boro cúbico, é um material sintético obtido através da transformação alotrópica do nitreto de boro hexagonal sob pressões e temperaturas elevadas. Sua aplicação é vasta devido a suas excelentes propriedades como abrasivo, haja vista as características de alta dureza, alta condutividade térmica e alta resistência ao desgaste. Juntamente com o diamante, tem-se classificado como um superabrasivo. O autor ainda cita que quando utilizado de modo correto e comparado com os rebolos convencionais, os de CBN são mais duros, mais resistentes ao desgaste e possuem uma maior vida útil.

A tabela 1 informa as principais características dos tipos de abrasivos utilizados na fabricação dos rebolos.

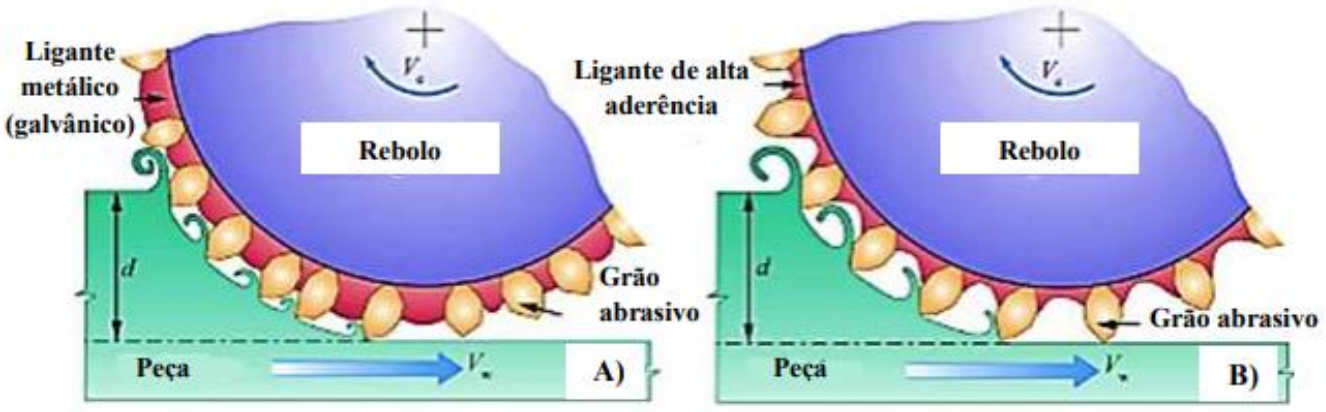
Tabela 1: Características dos principais materiais utilizados na fabricação de grãos abrasivos.

Material abrasivo	Dureza Knoop (kgf/mm²)	Ponto de fusão (°C)	Estrutura Cristalina	Densidade (g/cm³)	Resistência à compressão (kN/cm²)	Cond. térmica (cal/°C.cm.s)
Diamante	8000	3700	Cúbica	3,52	870	5.0
CBN	4500	3700	Cúbica	3,48	650	3.3
Al_2O_3	2500	2040	Hexagonal	3,98	350	0.08
SiC	2700	2830	Hexagonal	3,22	150	0.2
WC	2100	2870	Hexagonal	17,05	350	0.08

Fonte: Adaptado de MALKIN; GUO, 2008.

Segundo LOPES et al., (2018), os rebolos de CBN tendem a ser muito mais caros do que os convencionais, entretanto a vantagem de utilizá-los estão não apenas nos quesitos técnicos de qualidade dimensional e de superfície, mas também nos menores custos do processo devido ao seu potencial de alcançar altas velocidades de corte, maiores intervalos de dressagem e elevadas taxas de remoção de material. O autor menciona que no passado havia diversos problemas ligados ao empastamento dos rebolos na retificação cilíndrica, principalmente os de CBN durante a usinagem de materiais dúcteis, onde havia a necessidade de maior profundidade de dressagem e de repetir tal operação com maior frequência, a fim de manter limpa a superfície de corte. Atualmente as novas técnicas de distribuição dos grãos abrasivos têm sido difundida nos processos de retificação, conforme ilustra a figura 6.

Figura 6: Diferentes modos de fixação dos grãos abrasivos.



Fonte: Adaptado de WENFENG et al., 2017.

Desse modo, é possível compreender que na figura 6 (A) tem-se um ligante metálico e galvanizado, ao qual proporciona maior remoção de material, haja vista que a sua estrutura está vinculada a alto desempenho, podendo ser utilizada em usinagens de alta velocidade, onde normalmente os rebolos são obrigados a serem compostos de um corpo metálico de alta resistência mecânica e um revestimento fino de superabrasivo. Já na figura 6 (B), ilustra-se um ligante de alta aderência, nos quais permite um maior armazenamento de cavacos e espaçamento uniforme dos grãos, podendo ser amplamente utilizado na usinagem de materiais dúcteis, ao qual minimizará o empastamento (WENFENG, 2017).

Hadad et al., (2012), menciona que a quantidade de energia dissipada pela peça usinada por um rebolo de CBN e refrigeração abundante é de 14%, no entanto, com o uso de um rebolo convencional, esse índice sobe para 36%. O autor reforça a excelente condutividade térmica dos grãos de CBN, reduzindo os riscos de danos térmicos ao material retificado.

2.4 Friabilidade dos grãos abrasivos

De acordo com Marinescu et al., (2013), a friabilidade de uma ferramenta abrasiva está diretamente ligada ao seu desgaste, pois essa característica pode ser vista em todos os tipos de rebolo. Outro destaque é a influência do tamanho do grão abrasivo em seu desgaste, uma vez que em rebolos com grãos maiores em sua extensão e, portanto, em menor quantidade, a carga mecânica individual é mais acentuada e, desta forma, fraturam facilmente (BRINKSMEIER et al., 2010). Quando os grãos utilizados são menores, há uma variação mais suave no desgaste do rebolo, o que torna o processo mais estável. No entanto, com a menor carga mecânica individual, há uma chance maior de que os grãos não fraturem, perdendo a potência de corte, e por consequência aumentando o atrito e rugosidade da peça. Desse modo, é possível compreender a importância da escolha da friabilidade do rebolo, além disso, Ding et al., (2010) descobriram que apenas 70% do próprio grão realiza o corte, os outros 30% se desprendem ou perdem a capacidade de corte.

Nesse contexto, Martini et al., (2018) analisou a influência da friabilidade do rebolo de CBN no ferro fundido dúctil e concluiu que com menor friabilidade e maiores velocidades de corte, uma superfície uniforme é obtida na peça de trabalho, mas gerando maiores custos. Assim um equilíbrio entre friabilidade e velocidade de corte é necessário para obter a otimização do acabamento final (BIANCHI et al., 2018)

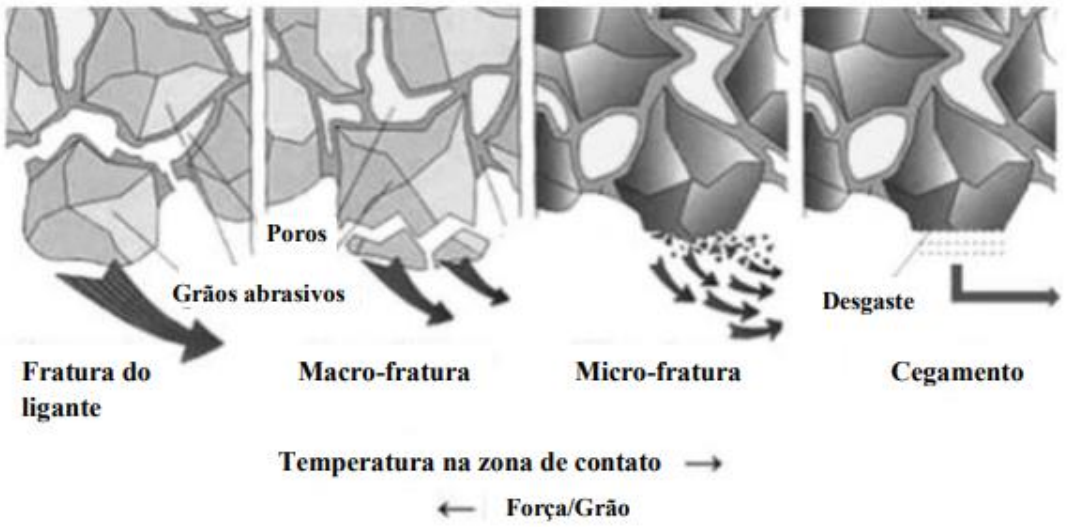
Define-se como friabilidade a característica que o grão abrasivo tem de se fraturar e se desprender da superfície do rebolo devido a esforços de usinagem, gerando novas arestas cortantes e por consequência aumentando a taxa de remoção de material (LOPES et al., 2018).

Canarim (2018), definiu friabilidade através do conceito de que a tenacidade é a resistência de um material contra fratura e propagação de trincas, sendo usualmente medida em condições dinâmicas, desse modo a friabilidade é o inverso da tenacidade à fratura. Os autores ainda citam que o comportamento da fratura pode variar entre a quebra de partículas maiores ou menores, deixando na superfície do rebolo uma topografia mais lisa ou áspera, contendo mais ou menos arestas de corte.

Para LOPES et al., (2019), o grão deve fraturar e perder partículas relativamente finas em escala micrométrica, denominando-se como um processo de microfratura, todavia o restante dos grãos presos ao rebolo devem permanecerem afiados e com capacidade de corte. O autor ainda cita que quando se tem grãos mais tenazes, há um menor desgaste da ferramenta de corte, entretanto podem ficar cegos e perder a eficiência de corte, aumentando dessa forma o atrito, gerando danos térmicos e vibrações.

Para grãos mais friáveis há uma tendência na exposição de novas arestas de corte com alto índice de afiação, em contrapartida resultam em uma menor vida útil do rebolo, além de possibilitar desvios de circularidade na peça usinada (LI et al., 2016). A figura 7 ilustra o mecanismo de friabilidade dos grãos abrasivos.

Figura 7: Modos de quebra do grão/ligante no rebolo



Fonte: Adaptado de JACKSON E DAVIM, 2011.

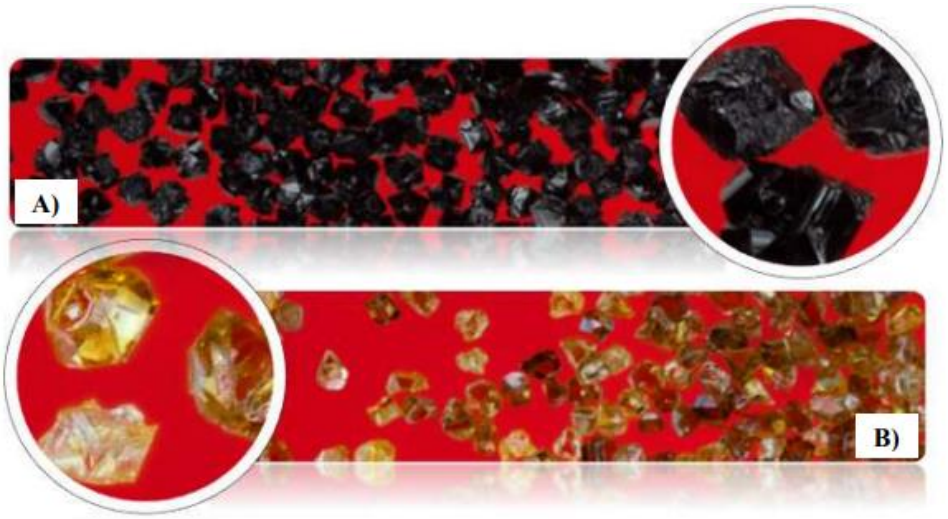
Quando o ligante aplicado no rebolo possui dureza o suficiente para reter o grão, mas durante o processo de usinagem as forças de corte são extremamente elevadas, tem-se por consequência a fratura frequente e a perda elevada de grãos devido a macrofratura, sem que ainda tenham desempenhado todo poder de corte sob a peça.

Todavia, se o grão tem tenacidade e o ligante alta dureza ou resistência ao desgaste mecânico, térmico ou químico, há a perda de afiação, fazendo com que os grãos fiquem sem arestas cortantes, aumentando as forças de corte e temperatura na interface do rebolo-peça (HADAD et al.,2012).

Ao fabricar-se grãos superabrasivos, é necessário realizar uma análise de comportamento referente a fratura do grão através de teste de impacto, comumente denominado como teste de friabilidade ou "*friatester*". Nesse ensaio, é recolhido uma amostra de grãos com um peso definido sob requisito de norma e uma esfera de aço, onde os dois elementos ficam envoltos de uma cápsula, a qual é agitada com um número de ciclos também definido. Com esse movimento, a carga de impacto fratura um percentual de grãos, e a quantidade de grãos não destruídos geram o índice de tenacidade (IT), e o índice de friabilidade (IF) é definido pelo número de ciclos necessários para fraturar 50% dos grãos (BASSO; SIKORA, 2012).

Para Saint-Gobain (2018), há diferentes níveis de friabilidade de um grão abrasivo, no entanto é necessário analisar a sua aplicação pois o método de fabricação pode interferir diretamente nas propriedades químicas e mecânicas. Conforme ilustra a figura 8, os grãos abrasivos do tipo GL denotam de menor friabilidade e os grãos classificados como GS possuem maior friabilidade.

Figura 8: Grãos de CBN GL (A) e GS (B)



Fonte: Adaptado de SAINT-GOBAIN, 2018.

Sosa e Echeverría (2015) justificaram que a união entre tenacidade e friabilidade seja o ideal para a usinagem por retificação, haja vista que em alguns trabalhos ao aplicar-se grãos mais duros e friáveis tem-se maior precisão, em contrapartida, ao aplicar-se grãos com maior tenacidade e de maior dimensão, obtenha-se melhor eficiência em desbaste.

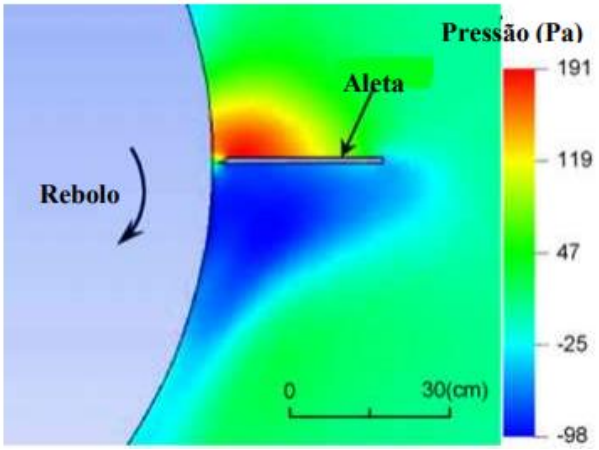
2.5 Lubrirefrigeração

Devido as múltiplas arestas de corte que atuam na interface entre o rebolo e a peça gerando uma considerável pressão de corte, tem-se uma elevação na temperatura na peça usinada, por essa razão o fluido de corte é essencial para o processo de retificação, evitando assim alterações na integridade superficial da peça e reduzindo o desgaste prematuro da ferramenta (DEMIRBAS; KOBYA, 2016). De acordo com Pawlak et al., (2004), os fluidos de corte foram aplicados com o intuito de reduzir, através da lubrificação as características tribológicas presentes no contato direto da ferramenta com a peça, além disso, é possível desenvolver propriedades anticorrosivas à peça e a máquina retificadora (LI et al., 2013). A limpeza do rebolo também é beneficiada com o uso de lubrirefrigeração, facilitando o escoamento do cavaco pelos poros, evitando o empastamento de material na face do rebolo.

Lavisse et al., (2018) mencionam que a utilização de fluido com baixa vazão e velocidade reduzem a sua eficiência, em contrapartida elevando essas grandezas obtém-se melhoras no corte até determinado valor, a partir do qual já não se tem mais ganhos na eficiência da refrigeração, e sim desperdício. Sendo necessário um controle de parâmetros na aplicação do fluido para uma performance adequada (ROWE, 2014).

Para LOPES et al., (2018), um fator ligado a lubrirefrigeração que é determinante para se obter bons resultados na retificação é a velocidade que o fluido de corte entra na interface do rebolo com a peça. Haja vista que a rotação do rebolo promove um deslocamento de ar, tem-se uma ineficiência da penetração do fluido de corte. O autor ainda cita que com o uso de fluidodinâmica computacional é possível determinar o ponto de posicionamento de saída do fluido, assim como a sua velocidade, que deve estar de 80 a 100% da velocidade de corte aplicada, conforme ilustra a figura 9.

Figura 9: Simulação de resultados de pressão distribuída em torno da aleta.



Fonte: Adaptado de MORGAN, 2008.

De acordo com Javaroni et al., (2020), a aplicação de fluido lubrirefrigerante de forma abundante representa algumas desvantagens, além do alto custo atrelado a desperdício, a contaminação no meio ambiente e os danos gerados a saúde dos operadores são consideráveis. O mesmo autor cita que em relação a aquisição, armazenamento, conservação e descarte dos fluidos, tem-se uma representatividade de 16% do total das despesas com usinagem, enquanto os custos com ferramentas estão em torno de 4%. Os fluidos de corte são, em sua grande maioria de origem mineral, portanto não são biodegradáveis, necessitando de manutenção e tratamento específico a fim de reduzir os impactos ambientais a saúde, tais como dermatites e problemas respiratórios gerados pela névoa durante a usinagem. Essa névoa pode causar também asma e alguns tipos de câncer (MORAES et al.,2019).

Esse tema ganhou severa importância nos últimos anos, e leis mais rigorosas foram implantadas em todo mundo, estudos direcionam o uso da técnica de mínima quantidade de líquido (MQL) para a substituição da lubrirefrigeração abundante (GOINDI; SARKAR, 2017). Para Anjos (2018), os fluidos de corte podem ser classificados em quatro categorias, sendo o mineral, emulsionável, sintético e semissintético. A tabela 2 apresenta as principais características dos fluidos lubrirefrigerantes conforme composição química.

Tabela 2: Caracterização dos principais tipos de fluidos.

	Sintético	**Semissintético**	**Óleo emulsionável**	**Óleo mineral**
Calor removido	Excelente	Ótimo	Bom	Ruim
Lubrificação	Ruim	Bom	Ótimo	Excelente
Manutenção	Ótimo	Bom	Ruim	Excelente
Friabilidade	Excelente	Ótimo	Bom	Ruim
Danos – Meio ambiente	Excelente	Ótimo	Bom	Ruim
Custo	Excelente	Ótimo	Bom	Ruim
Vida do rebolo	Ruim	Bom	Ótimo	Excelente

Fonte: Adaptado de ANJOS, 2018.

Os fluidos lubrirefrigerantes miscíveis em água são uma alternativa para métodos de produção com baixo custo, sendo considerado um dos melhores fluidos para aplicação industrial. Para Souza et al., (2021), a água possui baixo poder lubrificante, mas alto poder refrigerante, auxiliando na remoção de calor e removendo cavacos da superfície do rebolo que poderiam causar o empastamento. O mesmo autor menciona que os fluidos de corte que são miscíveis em água são da categoria solúvel, podendo ser sintéticos ou semissintéticos.

Para os fluidos lubrirefrigerantes sintéticos, é sabido que em sua composição não há elementos minerais, ao invés disso, utilizam elementos químicos orgânicos e inorgânicos com o objetivo de alterar a estrutura da água, prevenindo a corrosão e aumentando a capacidade de lubrificação (CANARIM, 2018).

2.6 Variáveis de saída na retificação cilíndrica

2.6.1 Rugosidade

O termo rugosidade está atrelado as micro irregularidades presentes na superfície de qualquer material, usinado ou não. No universo da engenharia, a rugosidade é um parâmetro a ser controlado devido aos níveis de ajustes e precisões de conjuntos mecânicos que dependem de uma topografia uniforme (BIANCHI et al.,2013).

Na retificação cilíndrica, a rugosidade é uma variável de saída de extrema importância, haja vista que o principal objetivo do processo é produzir peças com excelente grau de acabamento superficial e de tolerâncias geométricas (TAWAKOLI; HADAD; SADEGHI, 2010).

Durante o processo de retificação cilíndrica, os sulcos produzidos pelos grãos abrasivos geram rugosidade, no caso de rebolos com topografias irregulares, essa rugosidade tende a ser maior. Além disso, o acabamento superficial de uma peça usinada tem relação significativa com a resistência à fadiga, em especial aqueles que estão sujeitos a condições de trabalho com tensões alternadas e altas temperaturas (Mello et al., 2018). Para Puerto et al., (2013), a rugosidade no processo de retificação depende de diversos fatores, sendo eles o rebolo, a dressagem, condições de usinagem, velocidade de avanço e tempo de spark-out. Os autores ainda mencionam que a rugosidade pode sofrer interferência devido ao método de lubrirefrigeração, podendo reduzir as forças de corte e como consequência reduzir a rugosidade.

A dimensão e a forma dos grãos abrasivos no rebolo apresentam uma relação direta com a rugosidade, nessa relação tem-se que quanto maior o número de arestas de corte em contato com a superfície a ser usinada, menor será o índice de rugosidade (LAVISSE et al.,2018).

Javaroni et al., (2020) mencionam que o material ao qual será submetido ao processo de retificação também deve deter de uma análise crítica, pois em caso de tratamentos térmicos, as características de resistência mecânica, dureza e condutividade térmica também são influenciadas. Atualmente existem diversos métodos e parâmetros para quantificar a rugosidade gerada em uma superfície após o processo de retificação, sendo a mais comum à rugosidade média aritmética (Ra), que traça uma linha média entre as dimensões de picos e vales encontrados na região de varredura (BIANCHI et al.,2013).

2.6.2 Desvio de Circularidade

O desvio de circularidade é um fator que conflita diretamente com a finalidade da retificação cilíndrica, pois se não atender as devidas tolerâncias, tende a prejudicar no acoplamento de peças, essa característica pode ser considerada como um desvio macro geométrico do contorno externo em relação a um formato circular ideal (DING et al., 2015). Esse tipo de análise está interligado às condições de retificação, aos danos térmicos, a resistência mecânica, ao fluxo de fluido de corte e à pressão exercida durante a usinagem (MARTINI et al., 2019).

Para Marinescu et al., (2013), o desvio de circularidade está atrelado a deformações elásticas do conjunto ferramenta-peça, onde o perfil irregular do rebolo e remoção irregular de material favorecem essa anomalia. No entanto, os autores citam que a aplicação de spark-out ou tempo de centelhamento, corrige parte das imperfeições e minimizam os problemas de circularidade. Outras condições que favorecem o desvio de circularidade estão no método de fixação, desbalanceamento do rebolo, rigidez do equipamento e deformações elásticas (DENKENA; GROVE; GOTTSCHING, 2015). O empastamento do rebolo reduz a área de contato das arestas de corte com a peça, no entanto aumenta a superfície de contato do rebolo com o material usinado, elevando as forças de corte e consequentemente o desvio de circularidade (ROWE, 2014).

2.6.3 Relação G (G-Ratio)

A relação G é a medida de quanto de volume de material é removido da peça por unidade de volume do rebolo gasto, essa relação é expressa pela equação 1:

(1)

$$G = \frac{Z_w}{Z_s}$$

Onde: Z_w e Z_s correspondem ao volume de material removido e o volume de material gasto do rebolo, respectivamente.

De acordo com Malkin (2008), há três formas de gerar o desgaste em ferramentas abrasivas durante a retificação, podendo ser pelo atrito direto com a peça, por fratura de grãos abrasivos ou por meio de desprendimento dos grãos do ligante. Para Talon et al., (2019), é de suma importância para o setor industrial o entendimento sobre o desgaste do rebolo, visto que está ligado diretamente com a produtividade, quanto menor o desgaste da ferramenta, menor também será a necessidade de dressagem e de substituições.

Durante o processo de retificação cilíndrica os cavacos tendem a ficar alojados na porosidade da ferramenta de corte, aumentando a área de contato entre o rebolo e a peça, alterando a intensidade do processo e elevando a temperatura na interface. A lubrirefrigeração adequada e a adequação de parâmetros podem minimizar o entupimento de poros, e por consequência reduzir as dressagens de rebolo, o que amplia o valor da relação G (RIBEIRO et al., 2020).

Existem técnicas destrutivas e não destrutivas que possibilitam a análise do desgaste do rebolo e por consequência o cálculo da relação G (KUFFA; KUSTER;WEGENER, 2017). Com o uso de equipamentos específicos de coordenadas ou rugosímetros é possível realizar medições diretamente na superfície do rebolo; é possível também através do método indireto, onde é feito a impressão do perfil do rebolo em um corpo de prova de aço ABNT 1020 ou material semelhante (DEMIRBAS; KOBYA et al.,2017).

Posteriormente a esse processo, é analisado com equipamentos de medição por coordenadas a fim de informar tais dimensões; há também as técnicas de não contato, utilizando microscopia óptica de varredura, no entanto essa técnica detém de uma grande desvantagem, a de remover uma amostra do rebolo, inutilizando a ferramenta em futuras operações (SATO et al., 2020). Outras técnicas a serem utilizadas é a de monitoramento de sinais de emissão acústica e potência, que podem ser relacionadas ao desgaste; e a de utilização de scanners de alta resolução, mapeando a superfície do rebolo, permitindo a observação e quantificação do desgaste da ferramenta (MARINESCU et al., 2016).

2.6.4 Energia Específica

Segundo Souza et al., (2021), a energia específica pode ser definida como a energia necessária para promover a remoção de um volume unitário de material, estando intensamente ligado com a força de corte, formação de cavaco e dissipação de energia na forma plástica. Para Bianchi et al., (2018), a potência consumida durante a retificação pode ser monitorada através de aquisição de dados, transformando a tensão emitida no eixo do motor para sinal de potência. Esse monitoramento ocorre como num ensaio não destrutivo, podendo auxiliar também na estimativa de temperaturas na zona de corte e no controle de danos térmicos.

Para Sutowski (2017), com o aumento da profundidade de corte, a área de contato entre o rebolo e peça aumentam, desse modo as forças de corte se elevam, exigindo maior energia específica para a formação do cavaco. Souza et al., (2021), relatam que a lubrirefrigeração tem elevada importância sob o controle da energia específica, haja vista que com o acúmulo de cavaco e demais fragmentos, a face do rebolo pode sofrer de entupimento e empastamento, e como consequência um aumento na potência utilizada pelo equipamento durante a retificação.

O aumento na energia específica do processo de retificação está diretamente relacionado à formação da camada branca na superfície da peça usinada, haja vista os dados comparativos de microdureza com a potência consumida em peças que continham ou não a formação de camada branca na superfície (JAVARONI et al., 2020).

2.6.5 Emissão Acústica

Durante o processo de retificação, é possível captar a intensidade do contato peça-rebolo através da tensão gerada por um sinal sonoro causado por deformações, trincas e quebras na peça de trabalho, bem como o desgaste constante e quebra dos grãos abrasivos (SOUZA et al., 2021)

De acordo Lopes et al., (2018), a utilização do monitoramento por emissão acústica vem ganhando uma aplicação constante na retificação, haja vista ser uma técnica não invasiva permitindo a operação em tempo real. Utiliza-se como referência a detecção de ondas de tensão elástica transientes geradas através da rápida liberação de energia do material que sofreu algum impulso externo. Dessa forma, sensores piezoelétricos detectam e convertem esses deslocamentos em sinais elétricos (DAI et al., 2018).

Com a emissão acústica é possível analisar a interface da ferramenta de corte, o desgaste do rebolo, vibrações, danos térmicos e desvio de circularidade na retificação cilíndrica (WU; SHEN; SHANG, 2019). Tawakoli et al., (2011) estudaram que para a análise de emissão acústica no processo de retificação há suas complicações, pois é um processo em que há diversas arestas de corte com geometria indefinida, o que é totalmente oposto a outros processos de usinagem convencionais, que se detém de padrões geométricos definidos. A utilização do processo de emissão acústica é consentânea no meio industrial, no trabalho desenvolvido por Lopes et al., (2017), foi apresentado o monitoramento no processo de dressagem dos rebolos com o intuito de buscar soluções e características sobre o momento ideal da dressagem, o que acaba gerando influências no cálculo de relação G, apresentado anteriormente nessa pesquisa.

2.6.6 Análise de Custo

O cálculo de custeio de produção é de extrema importância para a sobrevivência das indústrias, quando bem realizado é possível detectar falhas e realizar tomadas de decisões assertivas e estratégicas para o melhor rendimento dos dados das empresas. A sustentabilidade no meio industrial é o que mais se aborda nas últimas pesquisas, para Souza et al., (2021), a análise de custos tem capacidade de comparar os gastos com os lucros, identificando os desperdícios e possibilitando a precificação de forma cautelosa.

O processo de retificação é considerado oneroso, diversos fatores compactuam com a alteração de custos, da mão de obra ao volume de fluido lubrirefrigerante utilizado, todas as técnicas aplicadas derivam de custos fixos e variáveis, e a forma como melhor desenvolvê-las é o que trará um balanceamento e estabilidade no mercado industrial (GARCIA et al.,2020).

Ngoc et al., (2016), apresentaram em seu estudo a importância da análise de custos na retificação cilíndrica interna, onde foi descoberto que diâmetros de rebolos próximo das dimensões a serem trabalhadas, consomem menos abrasivos e necessidades de dressagem, o que também estabiliza parâmetros de usinagem e por consequência menor consumo de potência.

Ferramentas de gestão e a digitalização de processos de fabricação permitem um controle financeiro com mais eficiência, proporcionando relatórios completos e o mapeamento da cadeia produtiva e do controle de estoque (SOUZA et al., 2021).

2.6.7 Microdureza

Durante o processo de retificação, é necessário a aplicação de muita energia para cada taxa de material removido. A geração de calor causada nesse processo aumenta drasticamente a temperatura na zona de corte, e quando a temperatura de interface ultrapassa os 600°C, a queima da retificação ocorre na superfície da peça e acompanha a aparência de uma camada branca. No caso de a temperatura ultrapassar a casa de 800°C, pode ocorrer trincas na superfície da peça usinada (RODRIGUEZ et al.,2019). Dessa forma, utiliza-se a técnica de microscopia para analisar a integridade da superfície retificada, permitindo a visualização microestrutural do material usinado. Além disso, a técnica pode ser utilizada para analisar a superfície de corte do rebolo, servindo como um quantificador de grãos e verificação de desgaste. Na somativa as análises microscópicas, tem-se os testes de microdureza, podendo ser realizados na superfície da peça ou em sua seção transversal (LI et al., 2016).

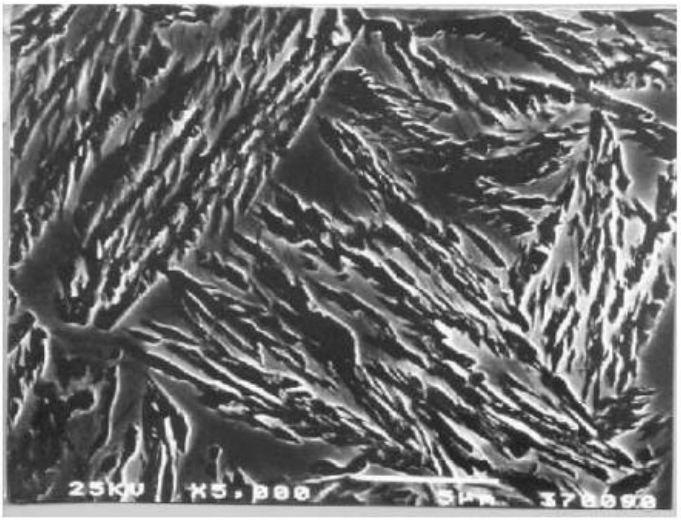
Canarim (2018), relatou em sua pesquisa que devido as altas temperaturas envolvidas no processo de retificação e a utilização de fluido lubrirefrigerante, pode ocorrer mudanças significativas em sua dureza, mesmo quando não houver mudança de fase na estrutura do material, tendendo-se a um super revenimento, reduzindo a dureza e consequentemente a perca de resistência. O autor ainda menciona que na maioria dos casos em que ocorre alterações na microdureza das superfícies usinadas tendendo a um aumento na dureza, tem-se como justificativa as altas forças de corte aplicadas.

2.7 Ferro fundido nodular austemperado (ADI)

A fabricação do ferro fundido nodular austemperado ou também conhecido como ADI (*Austempered Ductile Iron*) é realizada após o processo de tratamento térmico de austêmpera, e carrega as características de boa ductilidade, resistência mecânica, impacto e boa resistência ao desgaste.

A microestrutura ausferrítica é típica nessa família de materiais, sendo formada por agulhas de ferrita e placas de austenita estável de alto teor de carbono (SOUZA, 2015). Esse tipo de microestrutura pode ser verificado na figura 10.

Figura 10: Microestrutura típica de um ferro fundido nodular austemperado, apresentando a ferrita acicular e a austenita estável com um alto teor de carbono.



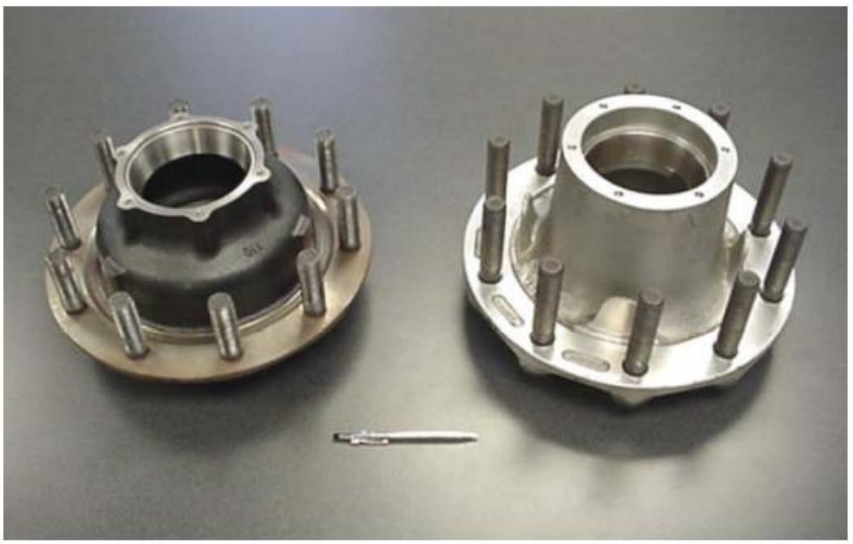
Fonte: Adaptado de CARMO, 2003.

A nomenclatura para a matriz estrutural do ferro fundido nodular austemperado não é totalmente definida universalmente, sendo muito conhecida como bainita ou pró-bainita (KIM et al., 2008). Em sua pesquisa, Carmo (2003) a denominou como ausferrita, indicando que a estrutura consiste em austenita estável reagida pela ferrita acicular. Os autores mencionam que o termo bainita não condiz com a morfologia adequada, pois visualmente se aparentam com a ausferrita por serem formadas na mesma temperatura.

O ADI detém de uma diferença de 8% de redução de peso quando comparado com aços forjados, isso por ser justificado pelos nódulos de grafita presentes em sua estrutura, dessa forma sua estrutura se equipara a alguns tipos de aços de maior resistência, ou até ligas de alumínio. Outro fator chave que permite o ADI ser um material de vasta aplicação na indústria é o custo de produção e de usinagem, que são significativamente menores (KIM et al., 2008).

Sua aplicação é vasta, e atendem a diversas gamas da engenharia, entretanto o setor automotivo é o que mais se beneficia desse tipo de material, na qual permite a fabricação com excelência de engrenagens, virabrequins, bielas, entre outros elementos (LOPES et al., 2018). A figura 11 apresenta uma peça de alumínio que foi substituída por uma de ADI.

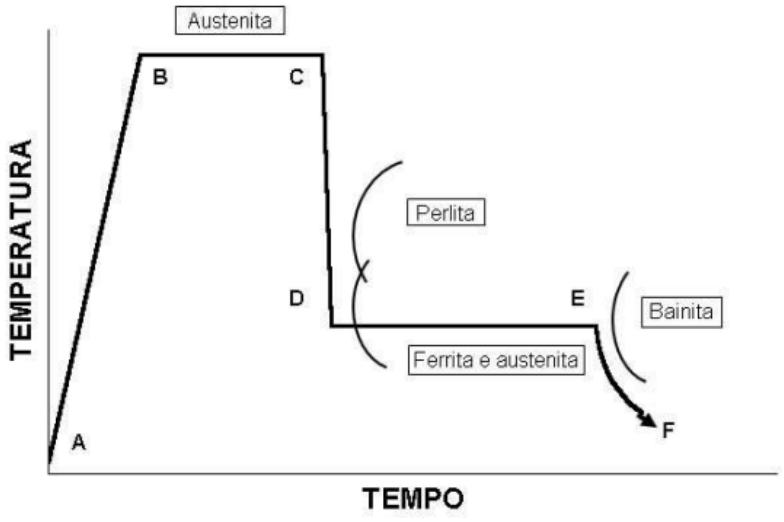
Figura 11: Peça automotiva em alumínio substituída pelo equivalente em ADI



Fonte: Adaptado de CARMO, 2003.

A composição química do ferro fundido nodular austemperado se assemelha a de um ferro fundido nodular convencional, entretanto, peças que detém espessuras superiores a 18mm são fabricadas com adição de Cu, Ni e Mo, aumentando assim a sua austemperabilidade e evitando a formação de perlita (KIM et al., 2008). O ciclo para a realização do tratamento térmico de austêmpera pode ser observado na figura 12.

Figura 12: Ciclo do tratamento térmico de austêmpera.



Fonte: Adaptado de KIM et al., 2008.

Nota-se que inicialmente a peça é aquecida (A-B) com temperatura de patamar de 825-950°C, permanecendo nessa temperatura (B-C) por no máximo 3 horas, nesse período a estrutura torna-se totalmente austenita. Após esse período de transformação, o material é resfriado bruscamente, porém não até a temperatura ambiente, mas sim a uma temperatura de austêmpera desejada (C-D) variando de 230-400°C por um prazo máximo de 4 horas (D-E).

Ao atingir esses indicadores a peça sofre um resfriamento até a temperatura ambiente antes de iniciar a reação bainítica. Ao término do processo, as peças devem ser lavadas a fim de retirar os sais de têmpera.

Os sais fundidos comumente utilizados são compostos de nitritos ou nitratos de sódio ou potássio, variando a temperatura que deseja obter. Entretanto, independentemente do tipo de sal utilizado, deve-se respeitar o parâmetro de queda de temperatura de 6°C/s, dessa maneira é possível atingir a temperatura de austêmpera sem criar uma nova curva de formação de perlita (CARMO, 2003).

Ainda tratando sobre o peso de materiais, o ADI pode ser uma alternativa não somente a ligas de alumínio, mas também ao ferro fundido cinzento; conjuntos mecânicos automobilísticos, blocos de motores, tambores de freio comumente feitos em ferro fundido cinzento podem ser substituídos por ADI com facilidade, podendo ter as espessuras de paredes reduzidas, aumentando a capacidade de dissipação de calor, sem perda de resistência e com ganho de ductilidade, aumentado consideravelmente a competitividade entre os ferros fundidos (CARMO, 2003).

Pimentel e Guesser (2016), apresentaram em seu estudo uma aplicação do ferro fundido nodular austemperado com a adição de nióbio e cromo, elementos ao quais provocam a formação de carbonetos primários e poligonais o que resulta em maior resistência ao desgaste.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo, serão descritos todos os equipamentos, materiais e métodos utilizados para a realização dos ensaios, assim como os parâmetros de entrada aplicados e as variáveis de saída obtidos e analisados durante os experimentos. Todas as amostras seguiram procedimentos e as mesmas condições para analisar a friabilidade de dois rebolos de CBN (GL e GS). Toda prática foi executada no Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA) da Faculdade de Engenharia de Bauru -FEB/UNESP.

3.1 Máquina Retificadora

Os testes práticos foram realizados em uma retificadora cilíndrica do fabricante Sulmecânica, modelo RUAP515H, cujo sistema de comando numérico computadorizado (CNC) provém da empresa Fagor, para o acionamento do eixo “X”. A figura 13 ilustra o equipamento utilizando nas operações de retificação cilíndrica de mergulho.

Figura 13: Retificadora cilíndrica CNC Sulmecânica – RUAP 515 H

Fonte: Autor, 2020

A máquina operatriz detém de vedação com cortinas de plástico e placas de policarbonato para minimizar as perdas de fluido de corte no ambiente e para a proteção dos operadores.

3.2 Rebolos e dressador

Para a realização dos ensaios, foram utilizados dois rebolos superabrasivos de nitreto de boro cúbico (CBN) cedidos ao Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA) da UNESP de Bauru, pelo grupo Saint-Gobain, proprietária da empresa fabricante Nikon Ferramentas de Corte. Os rebolos são compostos de ligante vitrificado sob especificação SNB151.GLQ12VR2 (rebolo menos friável) e SNB151.GSQ12VR2 (rebolo mais friável), cumprindo as seguintes dimensões: 350mm de diâmetro externo; 19mm de largura e 127mm de diâmetro de furo. Foi realizado a calibração da rotação do rebolo com um tacômetro digital da marca Lutron, modelo DT-2235B, sendo utilizado também uma velocidade de corte constante e igual a 32m/s acionada por um inversor de frequência WEG CFW 08.

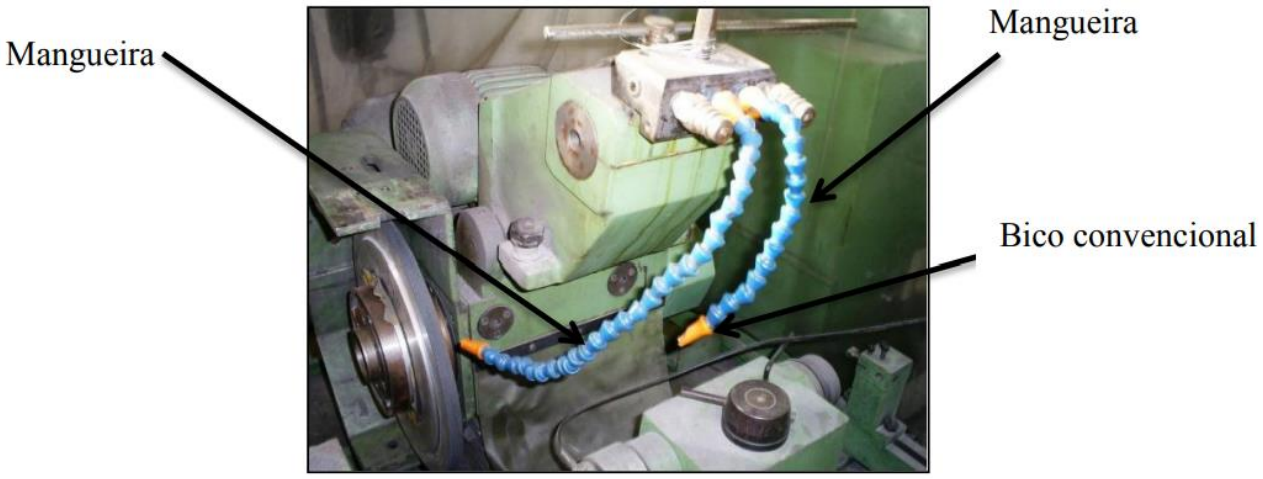
Foi realizado a dressagem dos rebolos com um dressador do tipo conglomerado do fabricante Master Diamond. Trata-se de uma ferramenta afiadora cuja ponta é composta por diamantes em uma matriz metálica. As dimensões da pastilha são de 15mm x 8mm x 10mm. As condições de dressagem utilizadas foram: velocidade de corte (V_s) = 32m/s, velocidade de dressagem (V_d) = 100mm/min, profundidade de dressagem por passada (A_d) = 2 µm e profundidade de dressagem total = 80µm.

3.3 Sistema de Refrigeração

O sistema de refrigeração convencional é comum no meio industrial, sendo composto de um tanque reservatório de fluido com capacidade de 100 litros, uma bomba de sucção, mangueiras, bocais aplicadores e o fluido lubrirefrigerante. Para o controle de vazão, foi utilizado um sistema de válvula de esferas após o posicionamento da bomba centrífuga e antes do bico de saída do fluido, onde através de um display da marca Contech, modelo SVTG DMY-2030 pode ser verificado a vazão real aplicada.

O fluido de corte utilizado foi um óleo solúvel semissintético ME-I concentrado, da marca Quimatic Tapmatic, sendo diluído em uma proporção de 2,5%. Não foi necessário realizar o controle de bactérias, devido a rápida utilização do fluido após ser emulsionado no reservatório que já havia sofrido um processo de assepsia. O bocal utilizado é componente original da máquina retificadora, composta por dois bicos difusores fixoflex, com 6,3mm de diâmetro em cada saída, com vazão preliminar de 10 l/min e pressão de 0,2 Pa. A figura 14 ilustra o sistema de refrigeração da retificadora RUAP 515 H.

Figura 14: Mangueiras utilizadas na aplicação convencional do fluido de corte

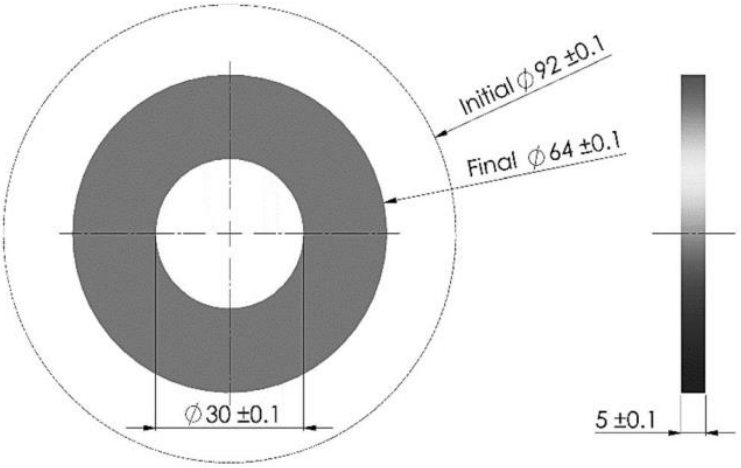


Fonte: Autor, 2020

3.4 Corpos de prova

Os corpos de prova utilizados para os ensaios são feitos de ferro fundido nodular austemperado (ADI), com 48 ± 2HRC e dimensões: 92 ± 0,1mm de diâmetro externo, 30 ± 0,1mm de diâmetro interno e 5 ± 0,1mm de espessura, conforme ilustra a figura 15.

Figura 15: Corpo de prova dimensionado em milímetros



Fonte: Adaptado de SOUZA et al., 2021

A composição química do material utilizado, pode ser verificado na tabela 3.

Tabela 3: Composição química do ferro fundido nodular austemperado.

Elemento	%C	%Si	%Mg	%Al	%Mn	%Cu	% Carbono Equivalente
Média (3 medidas)	3,65	2,78	0,041	0,003	0,26	0,08	4,57

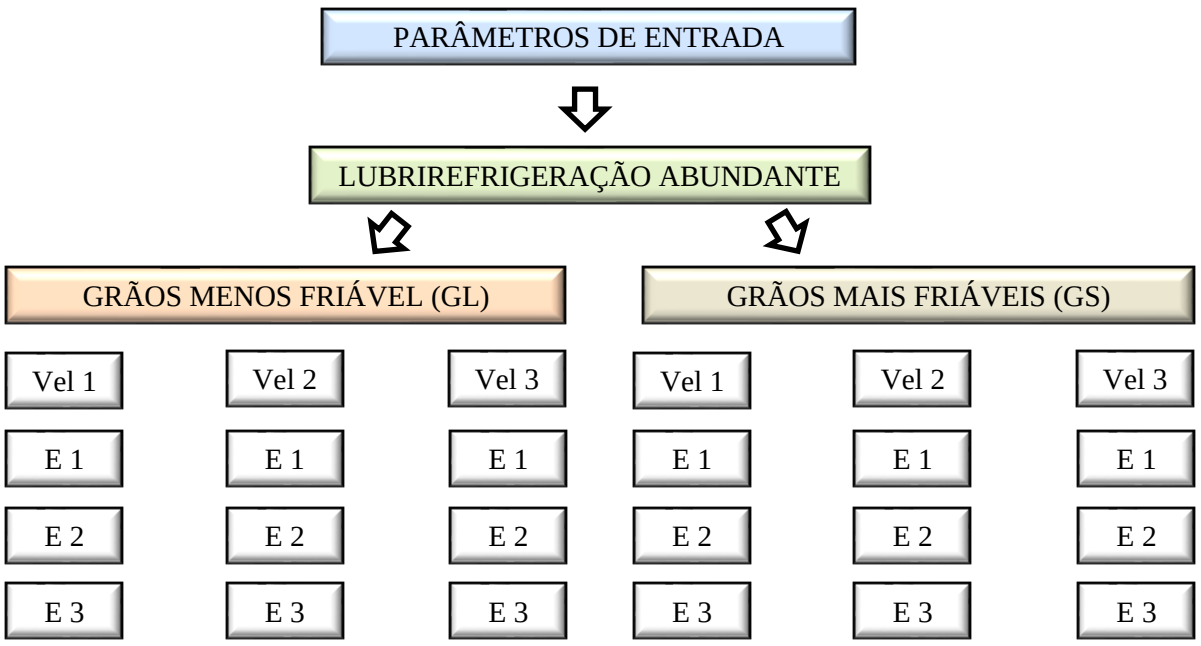
Fonte: Autor, 2020

Foram utilizados 18 corpos de prova, que foram preparados em torno convencional no Laboratório de Tecnologia de Usinagem LATUS, da Faculdade de Engenharia da UNESP de Bauru.

3.5 Planejamento dos Ensaios

Para a realização dos ensaios, foram utilizados 18 corpos de prova feitos de ferro fundido nodular austemperado, sob lubrirefrigeração abundante com vazão de 10 l/min e velocidade de corte de 32m/s. As peças foram submetidas a retificação com três velocidades de avanço, sendo 0,5; 1,0 e 1,5 mm/min sob rotação de 1740 RPM com dois tipos de rebolo de CBN, sendo o de classificação denominada GL menos friável e o GS com maior friabilidade. A figura 16 ilustra o ciclo de ensaios.

Figura 16: Fluxograma dos ensaios



Fonte: Autor, 2023.

O procedimento foi iniciado com o uso do rebolo menos friável, sendo instalado na máquina retificadora e devidamente balanceado, para na sequência ser submetido ao processo de dressagem. O corpo de prova foi montado em um eixo e posicionado de tal modo a ficar entre pontas. O rebolo foi aproximado da peça até tocá-la, gerando o ponto de referência na face para controle do comando numérico e posteriormente recuou 0,1mm em sentido radial. Após o presset da ferramenta, os sistemas de aquisição de emissão acústica e consumo de potência foram acionados, juntamente com a lubrirefrigeração em abundância, iniciando-se a retificação cilíndrica. Foram realizados 280 ciclos com profundidade de corte em sentido radial de 0,1mm cada, utilizou-se tempo de spark-out de 8 segundos em cada um deles. Ao término dos ensaios, os sistemas de aquisição de dados eram desligados, a peça removida e marcada com um gravador de ponta de aço temperado, de acordo com a velocidade de avanço e o tipo de rebolo de CBN utilizado para demais análises.

3.6 Equipamentos para variáveis de saída

3.6.1 Rugosidade

Para a verificação da rugosidade superficial das peças retificadas, utilizou-se um rugosímetro portátil modelo Surtronic 3^+ e um software TalyProfile, versão Lite 3.1.4, ambos do fabricante Taylor Hobson. Tal instrumento detém de uma agulha no apalpador confeccionada de diamante e com ponta de 5 μm de raio, com resolução de 0,01 μm e carga de trabalho de 150 a 300 gf. Todo o conjunto é anexado a um microcomputador com face de transmissão capaz de coletar dados RS232. Esse equipamento tem capacidade de realizar medições de rugosidade nos parâmetros Ra, Ry, Rz e Rq, com possibilidade de configuração de comprimento de amostragem (*cut-off*), assim como o número de cut-offs de uma mesma medição. Nesse estudo, foi utilizado o parâmetro Ra, que determina a rugosidade média aritmética e o parâmetro de rugosidade Rz, que subdivide as medições realizadas pela área de Ra em até cinco parciais.

O equipamento foi aferido e calibrado momentos antes da realização das medições, com cut-off de 0,25mm, comprimento de amostragem de 0,8mm e filtro 2CR-fase corrigida. Para a obtenção de valores precisos, o apalpador foi posicionado de modo que a mensuração fosse praticada no sentido axial da peça. Os corpos de provas foram limpos utilizando uma sequência de banhos, respeitando a ordem crescente de volatilidade dos líquidos, querosene, thinner, álcool etílico P. A. e álcool metílico P. A.

Para a realização das medições, fixou-se o corpo de prova em um eixo, o qual por sua vez foi preso em um bloco em “V”. Executou-se 5 medições em cada peça, sendo estas feitas em regiões distintas e equidistantes. Com estes valores foi possível obter uma média aritmética e o desvio-padrão das amostras.

3.6.2 Desvios de circularidade

Para a verificação dos desvios de circularidade das peças retificadas, foi utilizado um circularímetro Talyrond 31C, fabricado pela empresa Taylor Hobson.

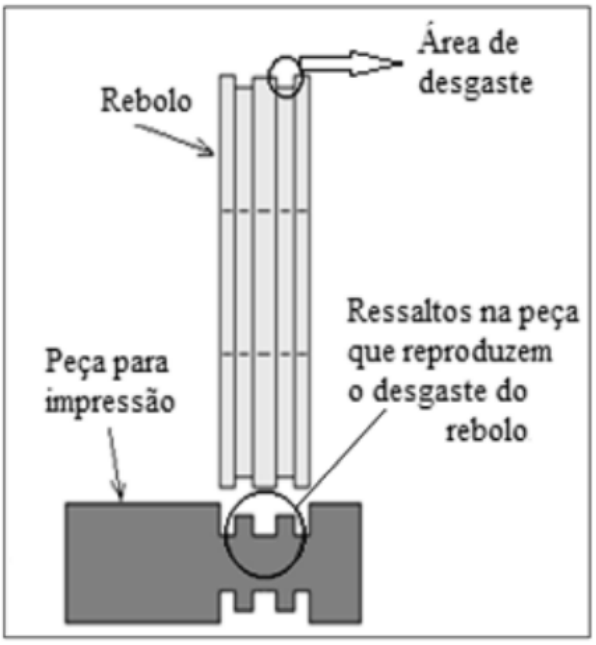
Tal equipamento possui precisão de até 0,03 μm com range máximo de 370mm de diâmetro e 225mm de altura. O equipamento é composto de um conjunto de braço/coluna, que possibilita movimentos no sentido vertical e horizontal. Detém também de uma mesa giratória que é alimentada através de um sistema de ar comprimido que facilita seu deslocamento, evitando atritos indesejáveis e dificuldades de manuseio. Todavia, o sistema de ar comprimido deve passar por um processo de secagem, a fim de evitar oxidações e futuros travamentos nos componentes da mesa. Antes de realizar a fixação das peças, as mesmas foram submetidas a limpeza, evitando que pequenas partículas abrasivas influenciassem na medição. Somente após a assepsia das peças, é que se realizou a fixação em uma placa de três castanhas e iniciou-se o processo de medição. Foram realizadas três medições com ângulos defasados em 120°.

Como os corpos de prova possuem 5mm de espessura, para cada medição realizada houve um deslocamento em sentido axial de 0,75mm a fim de pegar linhas de retificação diferentes.

3.6.3 Desgaste diametral do rebolo e Relação G

Para a realizar a análise de desgaste diametral do rebolo e posteriormente lançar dados para o cálculo de relação G (*G-Ratio*), utilizou-se a técnica de medição indireta. Para o cumprimento dessa técnica, após a retificação de dois corpos de prova, o rebolo é utilizado para usinar um eixo de aço ABNT 1020, fixado entre pontas, com 40mm de diâmetro e 150mm de comprimento. Aplicou-se lubrirefrigeração abundante e uma profundidade de corte de 0,5mm, preservando os demais parâmetros que foram utilizados nos corpos de prova de ADI. A figura 17 ilustra o processo de impressão.

Figura 17: Método de impressão do perfil do rebolo na peça de aço ABNT 1020



Fonte: Adaptado de JAVARONI et al., 2020

Após a retificação dos corpos de prova, o cilindro foi analisado através de um rugosímetro de contato da marca Taylor Hobson, modelo Surtronic 3^{+}, com raio do apalpador de 5 μm e programa computacional Taylor Hobson TalyMap. As análises superficiais utilizaram o programa Talymap, adquirido junto com o rugosímetro. Os parâmetros adotados foram cut-off de 0,25mm, comprimento de amostragem de 1,25 mm e filtro tipo Gaussiano, para separar rugosidade, ondulação e erro de forma das amostras. Todas as superfícies foram medidas cinco vezes em regiões distintas e equidistantes, para que o valor médio e desvio padrão pudessem ser calculados.

3.6.4 Emissão Acústica

Para a medição da emissão acústica, foi utilizado o módulo de aquisição de dados da marca SENSIS, modelo DM42, ao qual foi ligado a um bloco de conectores BNC 2110, conectado a placa de aquisição. Estes equipamentos possuem a capacidade de monitorar em tempo real o sinal de emissão acústica por meio do seu valor quadrático médio em RMS (*Root Mean Square*). Para a aquisição de sinais, o detector foi posicionado no cabeçote móvel da máquina retificadora, bem próxima ao contraponto, a fim de detectar as possíveis variações do sinal de emissão acústica e a sua relação com as demais variáveis de saída.

3.6.5 Energia específica

Para a verificação da energia específica é necessário coletar a potência elétrica do motor. Para isso, foi utilizado um inversor de frequência da marca WEG, modelo CFW 08, que monitora a corrente elétrica e a tensão do motor de acionamento do rebolo durante o ensaio de retificação. A corrente elétrica é proporcional a potência elétrica consumida, permitindo assim obter o sinal de potência do processo. Esses sinais são tratados por um circuito eletrônico, denominado Curvopower 3, ao qual foi projetado e construído em parceria com o Laboratório de Aquisição de Dados e Processamento de Sinais LADAPS da Faculdade de Engenharia UNESP de Bauru, sendo posteriormente transmitido a uma placa de aquisição de dados A/D, instalada em um notebook. Desse modo, os sinais são analisados pelo software LabView 7.1 (Laboratory Virtual Instrument), da empresa National Instruments. Onde dessa forma foi possível obter os valores da potência elétrica consumida durante a retificação.

3.6.6 Microscopia óptica

O objetivo de realizar o ensaio de microscopia óptica é de observar se há alterações microestruturais no material, que podem ter sido adquiridas conforme os esforços mecânicos e também com a variação de temperatura durante os ensaios. Após a coleta e preparação das amostras por polimento, foi realizado um ataque químico com ácido Nital 2% (álcool etílico P.A. com 2% de ácido nítrico P.A.) sob temperatura de 25°C pelo tempo de 5 segundos. Para realizar a neutralização do ataque, as amostras foram lavadas em água corrente com o uso de detergente neutro e álcool etílico; para auxiliar nessa etapa, utilizou-se um soprador térmico. Não foi utilizado nenhum tipo de verniz para realçar o brilho ou até mesmo preservar a face atacada quimicamente para posteriores análises.

As observações puderam ser realizadas com o auxílio de um microscópio óptico da marca Olympus, modelo BX51, acoplado a uma câmera digital da marca Leica, modelo EC-3. O software utilizado foi o Leica Application Suite EZ – Versão 2.0

3.6.7 Microdureza

O ensaio de microdureza vickers foi realizado após o procedimento de microscopia, no entanto, os corpos de prova tiveram que ser preparados novamente para a realização do novo ensaio. Foi utilizado um microdurômetro digital da marca Mitutoyo, modelo HM-211. Utilizou-se uma ponta de diamante piramidal com base quadrada e ângulo de 136° entre as faces, com aplicação de carga de 300gf durante o intervalo de 40 segundos.

Foram realizadas três endentações em cada uma das cinco distâncias estabelecidas, o que totalizou quinze ensaios por amostra. O ensaio foi realizado na lateral das amostras, ou seja, na superfície perpendicular a área retificada. Os testes aconteceram no Laboratório de Materiais da Faculdade de Engenharia da UNESP de Bauru, respeitando as normas de ensaios ASTM E140-12B (2019); ASTM E384-17 (2017) e ASTM E92-17 (2017).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

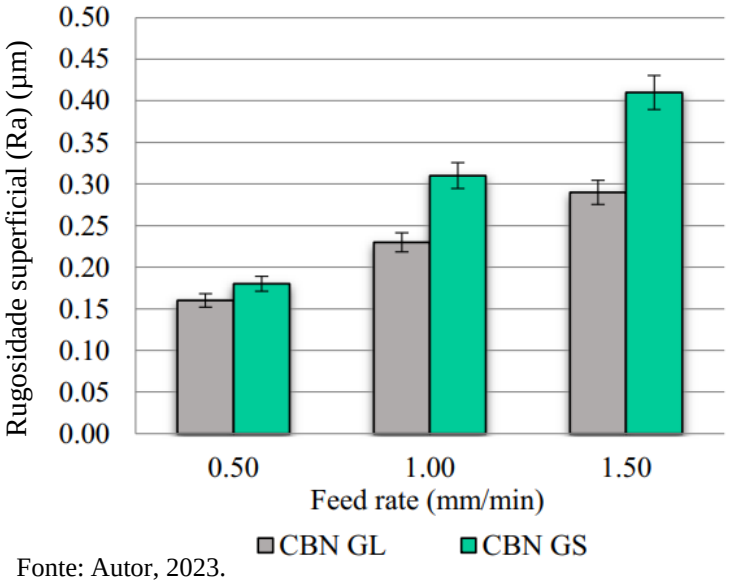
Neste capítulo, serão apresentados os resultados dos ensaios e das análises ocorridas durante a retificação. Os parâmetros de saída estudados são: Rugosidade Ra e Rz, desvio de circularidade, relação G (*G-Ratio*), energia específica, emissão acústica, microscopia óptica, microdureza e análise de custo.

Os resultados foram projetados em modo de gráfico de colunas, apresentando a média das medições realizadas e considerando o desvio padrão.

4.1 Rugosidade

A rugosidade da superfície representa um dos critérios essenciais a ser estudado e desenvolvido na retificação e em outros processos de fabricação, determinando o grau de acabamento e o controle dimensional da peça. Desse modo, conforme ilustra A figura 18, foi possível detectar que o rebolo GL (menos friável) apresentou menor rugosidade superficial Ra em todas as variações na taxa de alimentação, sendo 0,16µm, 0,23µm e 0,29µm para as variáveis de 0,5; 1,0 e 1,5mm/min respectivamente.

Figura 18: Rugosidade Ra

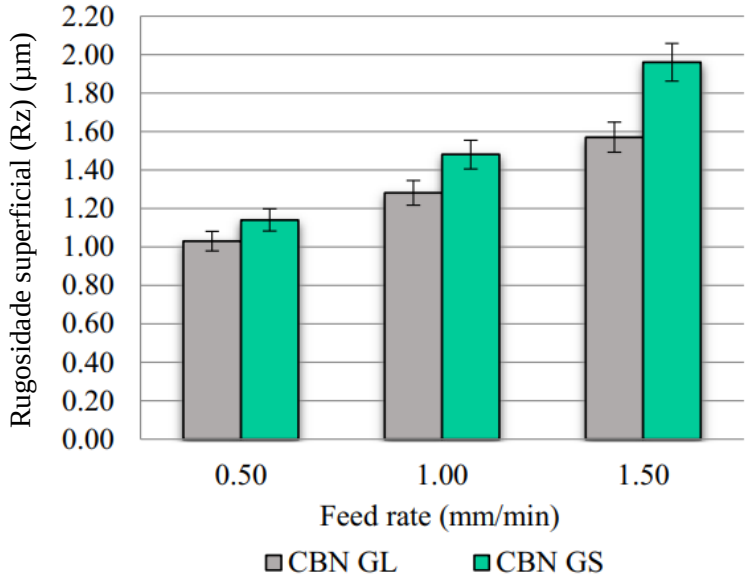


Fonte: Autor, 2023.

Utilizando as mesmas variáveis de entrada obteve-se os valores de 0,18µm, 0,31µm e 0,41µm de rugosidade superficial no rebolo GS. Assim, nota-se que, com o aumento da taxa de avanço, há também um aumento na rugosidade da superfície da peça.

Isso pode ser justificado pelo fato de que, com esse aumento da velocidade, há também um aumento na pressão exercida entre o rebolo e a peça de trabalho e, consequentemente há um aumento na espessura do cavaco (ROWE, 2014). Esse aumento ocorre devido aos grãos que precisam retirar mais material em menos tempo para compensar o aumento na taxa de alimentação. Além disso, as forças começam a serem mais significativas para compensar a maior velocidade de penetração do rebolo na peça, gerando mais quebras dos grãos abrasivos e desigualando sua geometria em relação aos demais, obtendo desse modo um corte mais intenso do material. O uso de duas rugosidades superficiais, Ra e Rz neste estudo aumentam a confiabilidade dos testes. Essa pluralidade pode ser justificada pela característica de rugosidade superficial Ra em demonstrar apenas uma média aritmética dos picos e vales encontrados ao longo da superfície analisada. Por outro lado, a rugosidade da superfície Rz divide essa superfície detectada pela rugosidade da superfície Ra em até cinco parciais e, portanto, realiza uma média aritmética individual de cada parcial. Dessa forma, é possível detectar com maior precisão as variações dos picos e vales em cada uma das análises, conforme ilustra a figura 19.

Figura 19: Rugosidade Rz



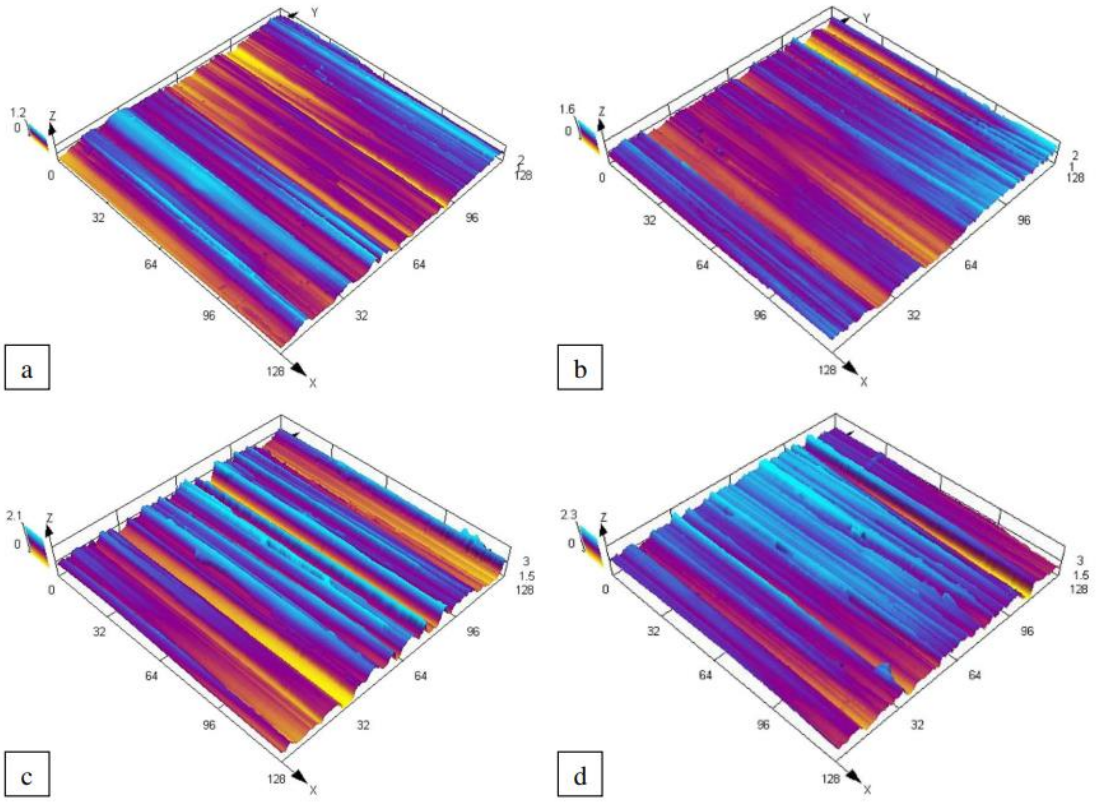
Fonte: Autor, 2023.

Assim, para as variáveis de 0,5; 1,0 e 1,5mm/min respectivamente, a rugosidade da superfície Rz no rebolo GL é de 1,03; 1,28 e 1,57 µm, e os resultados na utilização do rebolo GS são: 1,14; 1,48 e 1,96 µm, provando que o uso do rebolo menos friável garante os melhores resultados de rugosidade da mesma superfície, mesmo com diferentes métodos de medição.

A tendência do rebolo de classificação GS aumentar a rugosidade da superfície usinada é maior, isso pode ser justificado pelo fato de que os grãos abrasivos fraturam com mais facilidade, gerando novas arestas de corte. Entretanto, essas novas arestas ainda são irregulares e, portanto, há uma irregularidade na disposição dos grãos abrasivos que atuam de forma desordenada na superfície da peça usinada. (BIANCHI et al., 2018).

Martini, Fernandes (2020) compararam o rebolo de CBN GL e GS ao retificar o ferro fundido nodular e encontraram a mesma tendência para com o rebolo de maior friabilidade (GS), apresentando maiores valores de rugosidade superficial média. Em suma, os rebolos com maiores valores de friabilidade tendem a gerar arestas de corte por macrofratura, proporcionando maior rugosidade superficial. No entanto, rebolos com menor friabilidade garantem estabilidade no formato dos grãos abrasivos por mais tempo, onde ocorrem as microfraturas e consequentemente menos danos a superfície da peça. Com a microscopia confocal é possível observar com precisão a superfície da peça usinada, permitindo verificar a irregularidade da superfície e compará-la com os resultados obtidos com o teste de rugosidade. Desse modo, o efeito de friabilidade dos rebolos no acabamento das peças, bem como a variação dos picos e vales ao longo de seu comprimento, podem ser vistos na figura 20.

Figura 20: Microscopia confocal



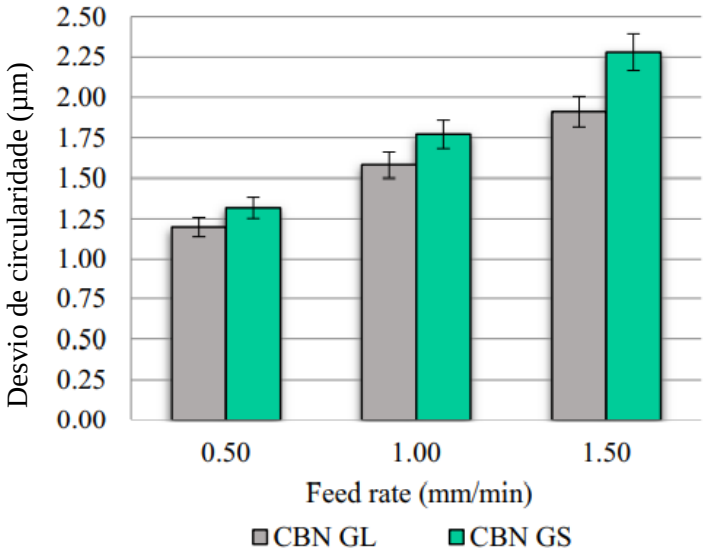
Fonte: Autor, 2023.

Como resultado, a mesma tendência foi verificada nos testes de rugosidade superficial, nos quais o rebolo de CBN GL se destacou e demonstrou alta eficiência na área de acabamento superficial. Portanto, com o uso de refrigeração convencional na retificação do ferro fundido nodular austemperado utilizando dois rebolos com friabilidades distintas, obteve-se os melhores resultados com baixas velocidades de avanço. No entanto, quando submetido a altas taxas de avanço, o rebolo com menor friabilidade obteve um melhor desempenho.

4.2 Desvio de Circularidade

O processo de retificação tem, em geral, o objetivo de atender tolerâncias geométricas precisas (ROWE, 2014). Portanto, a análise de desvio de circularidade é fundamental para verificar se há um excesso de tensões mecânicas e expansão térmica não identificada pela análise de rugosidade da superfície. Assim, em comparação com a ferramenta mais friável, o rebolo GL resultou em valores de menor desvio de circularidade, com queda de 9,09% ao utilizar a velocidade de avanço de 0,5mm/min e 10,7% e 16,2% menor ao utilizar as velocidades de avanço de 1,0 e 1,5mm/min respectivamente, quando comparadas com o rebolo GS, conforme ilustra a figura 21.

Figura 21: Desvio de circularidade



Fonte: Autor, 2023.

Devido à capacidade dos grãos abrasivos de manter a sua integridade por mais tempo no rebolo com menor friabilidade, a superfície da peça sofre menos deformação em sua circularidade já que o rebolo GL apresenta desgaste por microfratura e suas arestas de corte tendem a ter uma estabilidade melhor em relação a outros tipos de grãos abrasivos.

Essa homogeneidade resulta em uma superfície usinada com menor deformações e desvios de circularidade, auxiliando também no acabamento e rugosidade da superfície do material usinado. No entanto, com o aumento da taxa de alimentação, a frequência de fricção entre o rebolo e a peça aumenta, gerando uma grande quantidade de calor na região de corte e, consequentemente, resultando em dilatações e deformações na superfície da peça e da ferramenta.

Para esse tipo de comportamento, quanto menor a variação de temperatura durante a retificação, melhor serão as condições para garantir a boa integridade da circularidade da peça retificada. Rodrigues et al., (2020) estudaram a retificação com rebolo de CBN aplicados em peças com geometria interrompida e encontrou um aumento no desvio de circularidade conforme o avanço foi elevado.

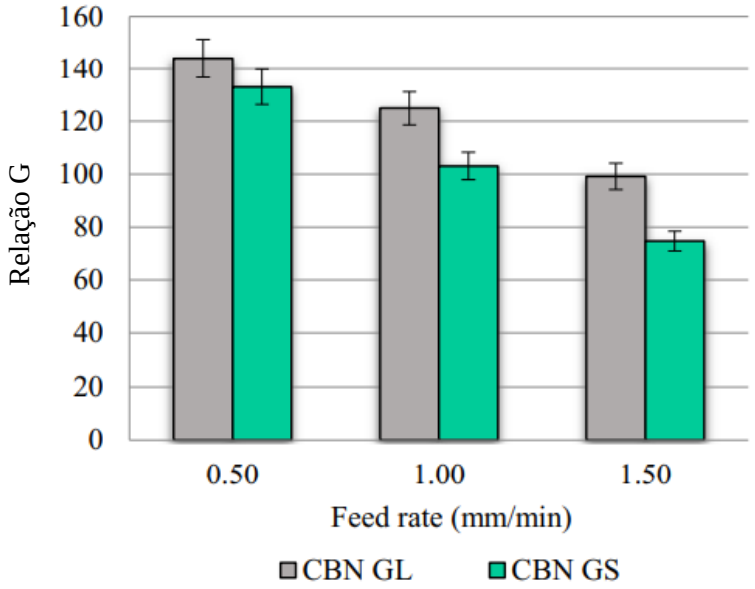
Conforme apresentado na figura 21, o uso do rebolo GL mostrou os melhores resultados para o desvio de circularidade em todos os tipos de velocidade de avanço. Nesse sentido, a maior fragmentação do rebolo GS torna-se mais significativo com o aumento dos esforços durante o corte. Esse comportamento justifica o distanciamento dos resultados do rebolo GS em relação ao GL, conforme o aumento na velocidade de avanço.

Dessa forma, os testes direcionam a vantagem da retificação do ADI com um rebolo menos friável quando desejado atingir baixos valores de desvio de circularidade e, portanto, menores custos para a empresa, evitando possíveis retrabalhos.

4.3 Relação G (*G-Ratio*)

A relação G representa a proporção do volume de material retirado da peça em relação ao volume de material retirado do rebolo, sendo este um grande parâmetro para determinar a eficiência da retificação de acordo com taxa de remoção de material e desgaste da ferramenta, porque, quanto maior essa relação, melhor (MARTINI et al., 2018). Assim, um fenômeno não associado a esta relação são as altas temperaturas atingidas durante o processo de retificação, que proporcionam uma redução na dureza da peça, impondo assim dificuldades mais significativas no desempenho do grão abrasivo. As condições da relação G durante a retificação podem ser verificadas na figura 22.

Figura 22: Relação G (*G-Ratio*)



Fonte: Autor, 2023.

O valor obtido para o rebolo GL foi de 144,03 contra 133,09 em comparação com o rebolo de CBN GS, ambas com velocidade de 0,5mm/min. Na maior velocidade de avanço, 1,5mm/min, uma relação G de 99,19 foi obtida no rebolo menos friável e o valor de 74,72 para o rebolo com maior friabilidade. De acordo com os testes e analisando a figura 22, foi possível observar que de forma proporcional, quanto maior o valor adotado para a taxa de avanço durante a retificação, menor é a relação G em ambos os rebolos; isso se deve ao aumento das forças de corte em altas velocidades, que quando elevadas fornecem fratura mais significativa e quebra de grão abrasivos.

No entanto, para obter valores excelentes para a análise neste estudo, os valores de avanço devem ser reduzidos, o que por sua vez aumenta o tempo de usinagem, podendo ser uma alavanca para o acabamento final e o valor agregado ao produto.

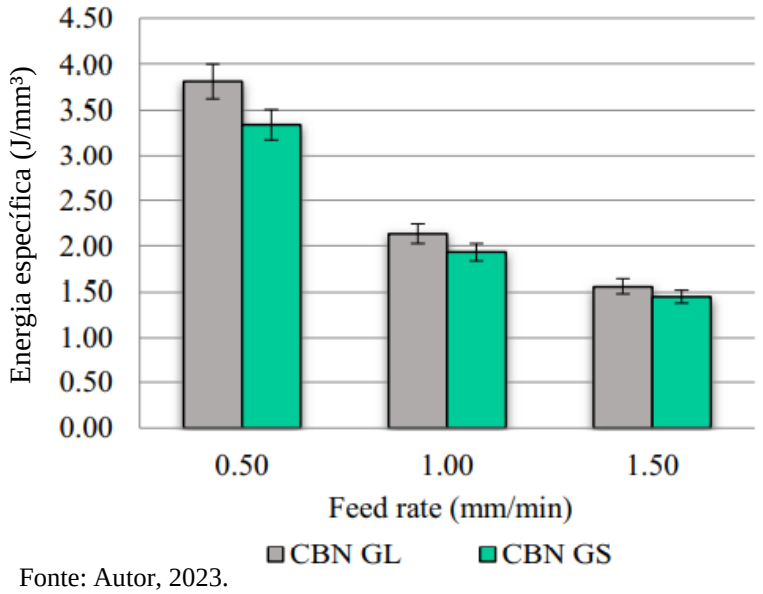
4.4 Energia específica

A energia específica é definida como a energia necessária para promover a remoção de um valor unitário de material, e está intensamente relacionado com a força de corte durante o processo de retificação. Desta forma, os fatores de temperatura e lubrificação influenciam diretamente nos valores de energia específica (RODRIGUEZ et al., 2020).

Como resultado, os efeitos da temperatura durante a retificação influenciam o comprimento do cavaco; quanto menor for a sua dimensão, menor será a chance de ficar preso em poros do rebolo ou em arestas de corte, reduzindo assim o entupimento da ferramenta abrasiva.

O entupimento do rebolo pode acontecer devido ao acúmulo de cavacos abrasivos fragmentados em grãos e resíduos do próprio fluido de corte; a inclusão desses elementos aumenta o atrito na interface entre a peça de trabalho e o rebolo, e por consequência, fornece uma elevação nos valores de energia específica. Os dados podem ser analisados conforme ilustra a figura 23. Na retificação com rebolo de CBN GL usando uma velocidade de 0,5mm/min, uma energia específica no valor de 3,80 J/mm³ foi adquirido, quando comparado com o rebolo de CBN GS em que um valor de 3,34 J/mm³, ou seja, uma redução de 12,11%.

Figura 23: Energia específica



Fonte: Autor, 2023.

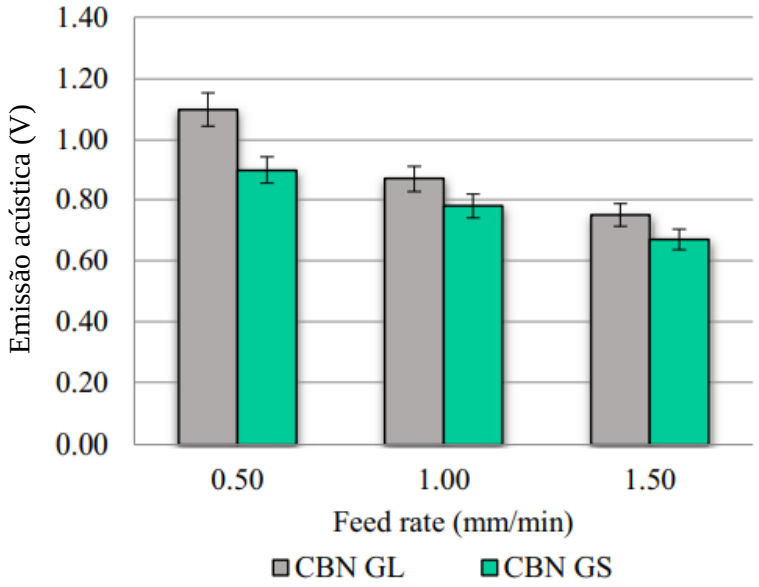
Com o aumento do avanço, foi possível observar em ambos os rebolos uma redução considerável no consumo de energia específica; mesmo com valores aproximados da velocidade de 1,5mm/min, o rebolo de CBN GS apresentou melhor desempenho, resultando em 1,45 J/mm³, sendo apenas 7,05% menor que o rebolo GL, que apresentou 1,56 J/mm³ de energia específica. Como o rebolo GS é mais friável, os esforços necessários para fraturar os grãos e gerar novas arestas de corte são menores do que fazer o uso do rebolo GL, que requer maior esforço para manter os grãos abrasivos afiados. O uso abundante do fluido de corte proporcionou um excelente fluxo de cavacos, evitando o entupimento do rebolo e o aumento excessivo do consumo de energia.

Portanto, este teste valida o uso de rebolo de CBN GS quando o principal fator a ser alcançado na retificação seja a redução do consumo de energia. Porém, a aplicação do rebolo mais friável vai elevar o consumo da ferramenta, considerando que os grãos abrasivos fraturam com mais facilidade.

4.5 Emissão Acústica

Durante o processo de retificação, é possível captar a intensidade do contato peça-ferramenta através da tensão gerada por um sinal sonoro causado por deformações, trincas, e fraturas na peça, bem como o desgaste constante e quebra de grãos abrasivos. Assim, é possível perceber na Figura 23 que a melhor combinação para este parâmetro foi o avanço de 1,5mm/min com rebolo de CBN GS, apresentando uma emissão de 0,67V. Para a mesma velocidade, o rebolo GS reduziu em 10,7% o valor obtido pelo rebolo GL. No mesmo comparativo ao utilizar a velocidade de avanço em 0,5mm/min, a redução foi de 18,2%, sendo que o GL possui 1,10V de emissão acústica.

Figura 24: Emissão acústica



Fonte: Autor, 2023.

O resultado inferior do rebolo menos friável foi devido a sua capacidade de manter a integridade dos grãos abrasivos por mais tempo; isso resulta em vários grãos perdendo arestas de corte ao longo do tempo (JAVARONI; RIBEIRO, 2020). Portanto, a menor capacidade dos grãos GL em criar arestas de corte aumentam os fenômenos de fricção e corte, o que torna a deformação mais intensa e, assim, a emissão acústica mais elevada.

Além disso, a área de contato entre a peça de trabalho e o rebolo GL aumenta enquanto os grãos não fraturam; isso corrobora a elevação nas tensões ativas e, consequentemente, o aumento do valor de emissão acústica. Lopes et al., (2019) comparou os rebolos de CBN GL e GS ao retificar um aço AISI 4340 e encontrou a mesma tendência do rebolo com menor friabilidade (CBN GL), apresentando maiores valores de emissão acústica.

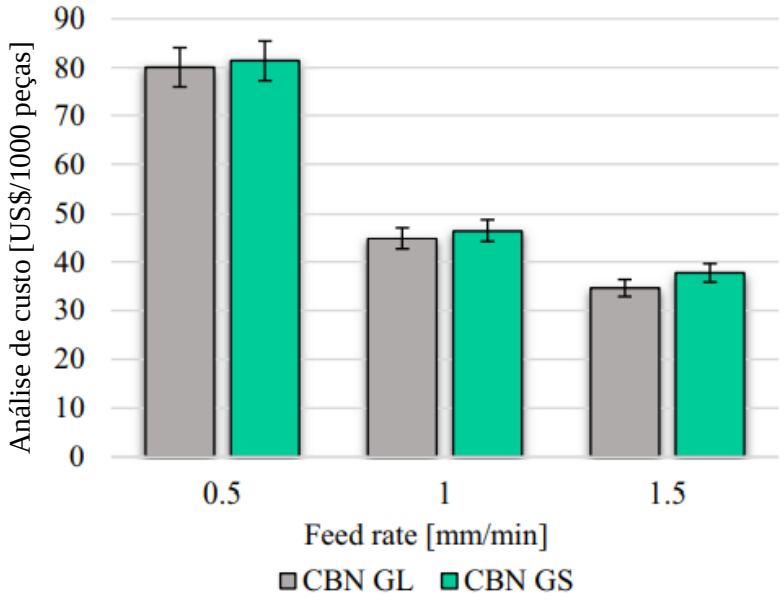
Por outro lado, é notável na figura 24 que, à medida em que a taxa de alimentação aumenta, os valores de emissão acústica são reduzidos. Este comportamento ocorre porque, ao longo do comprimento da peça, o rebolo com menos velocidade acaba ficando em contato com a peça por mais tempo, o que causa sinais sonoros com maior frequência. Todavia, o maior índice de acabamento da peça com 1,5mm/min reduziu o contato não efetivo que também gera emissão acústica no processo. Portanto, a emissão acústica apresentou a mesma tendência que o teste de energia específica, minimizada por forças mais altas. De acordo com Kuffa, Kuster e Weneger (2017), durante a retificação de um aço 58CrMoV4 com rebolo de CBN, houve também uma redução na força de corte tangencial conforme o avanço aumenta, o que está diretamente relacionado com a emissão acústica.

4.6 Análise de custo

A figura 25 mostra o custo de produção para um lote com 1.000 peças, com variação na velocidade de avanço com os dois tipos de rebolo de CBN. A diferença de custo entre o rebolo GL e GS torna-se mais crítica com o aumento da velocidade de avanço. O uso do CBN GS aumentou o custo em 1,68%; 3,54% e 9,06% respectivamente, em relação ao rebolo de CBN GL para as taxas de avanço de 0,5; 1,0 e 1,5mm/min. Avaliando um único rebolo, foi possível notar que o aumento da velocidade de avanço reduziu o consumo dos insumos. Para o rebolo GL, a redução de custos foi de 43,9% e 56,8% usando a taxa de alimentação de 1,0 e 1,5mm/min respectivamente, em relação a 0,5mm/min. Além disso, para o CBN GS, a redução de custos foi de 42,9% e 53,7 usando a velocidade de avanço de 1,0 e 1,5mm/min respectivamente, em relação a 0,5mm/min.

O uso do rebolo de CBN GS se torna mais caro devido a eficiência do rebolo ser menor durante o corte, o que pode ser visto através da relação G que tendeu a ser menor, gerando desgaste maior do que o rebolo GL, e impactando no custo. Dessa forma, o menor gasto de energia de retificação com o CBN GS não foi o suficiente para evitar o aumento de custo devido ao menor G-Ratio, justificando os melhores resultados do rebolo GL.

Figura 25: Análise de custo



Fonte: Autor, 2023

O aumento do avanço ocasionou uma redução da relação G e aumentou a potência de corte, o que intensificou os gastos com energia e desgaste da ferramenta de corte. No entanto, com um maior avanço tem-se uma redução no tempo de corte, reduzindo o tempo de operação de mão de obra e custos indiretos. Além disso, um tempo de usinagem mais curto reduz o uso de fluido de corte durante o processo, reduzindo o custo de compra e descarte de fluidos. Assim, a economia causada pelo tempo de operação superou o aumento do custo causado pelo maior consumo da ferramenta da corte. Dessa forma é possível concluir que com a maior taxa de velocidade de avanço com o rebolo de CBN GL, obteve-se os resultados com menor custo. Todavia, é importante ressaltar que o aumento da velocidade de avanço interfere diretamente na qualidade superficial da peça usinada, evidenciando alterações na rugosidade e demais testes aqui apresentados.

Mesmo assim, essas reduções não efetuaram os patamares de 1,6µm conforme estabelecidos como referência para o limite de rugosidade, proposto pela norma ASME 46.1.

A equação 2 foi adaptada de Field et al., (1980), sendo que essa equação foi utilizada para a determinação do custo (US$/peça), em que apenas os parâmetros que são influenciados pelas variáveis de avanço e do rebolo.

Desse modo, o valor de C é composto pelo desgaste do rebolo, o custo do tempo de corte, o custo do fluido de corte utilizado, o custo do descarte desse fluido, e o custo da energia utilizada para retificação.

$$C = \frac{C_s \cdot V}{G} + \frac{M \cdot a_e}{60 \cdot v_w} + \frac{v_{jet} \cdot a_e}{N_c \cdot v_w} \cdot (C_f + C_w) + \frac{P_c \cdot C_e}{60000} \cdot \left(\frac{2 \cdot R}{r} + \frac{a_e}{v_w} + t_{so} \right) \quad (2)$$

Já os custos envolvendo a dressagem, configuração do rebolo, troca da peça a ser usinada e a troca do rebolo permaneceram constante por todas as condições de usinagem aplicadas, o que justifica a não utilização desses valores específicos na análise de custo. A tabela 4 menciona os custos da retificação.

Tabela 4: Custos de retificação

	Descrição	Unidade	Valores		
a_e	Profundidade de corte	[mm]	0.1		
C_e	Custo de energia	[US$/kWh]	0.12 [53]		
C_f	Custo de fluido de usinagem	[US$/l]	0.34375		
C_s	Custo de alumina utilizado no rebolo	[US$/mm^3]	0.0066139		
C_w	Custo de descarte de fluido de corte	[US$/l]	0.085 [54]		
v_w	Velocidade de avanço	[mm/min]	0.5, 1.0, and 1.5		
G	Relação G	[-]		CBN GL	CBN GS
			0.5 mm/min	144.0	133.1
			1.0 mm/min	125.0	103.1
			1.5 mm/min	99.2	74.7
M	Custo de mão de obra	[US$/hour]	20 [52]		
N_c	Número do ciclo de vida do fluido	[-]	200 [55]		
P_c	Potência de corte	[W]		CBN GL	CBN GS
			0.5 mm/min	370.5	325.5
			1.0 mm/min	415.3	376.0
			1.5 mm/min	456.4	424.9
R	Distância de aproximação	[mm]	300		
r	Taxa de aproximação	[mm/min]	5000		
v_{jet}	Vazão do fluido	[l/min]	17		
t_{so}	Tempo de spark out	[min]	0.1333		
V	Remoção de volume da peça	[mm^3/piece]	144.36		

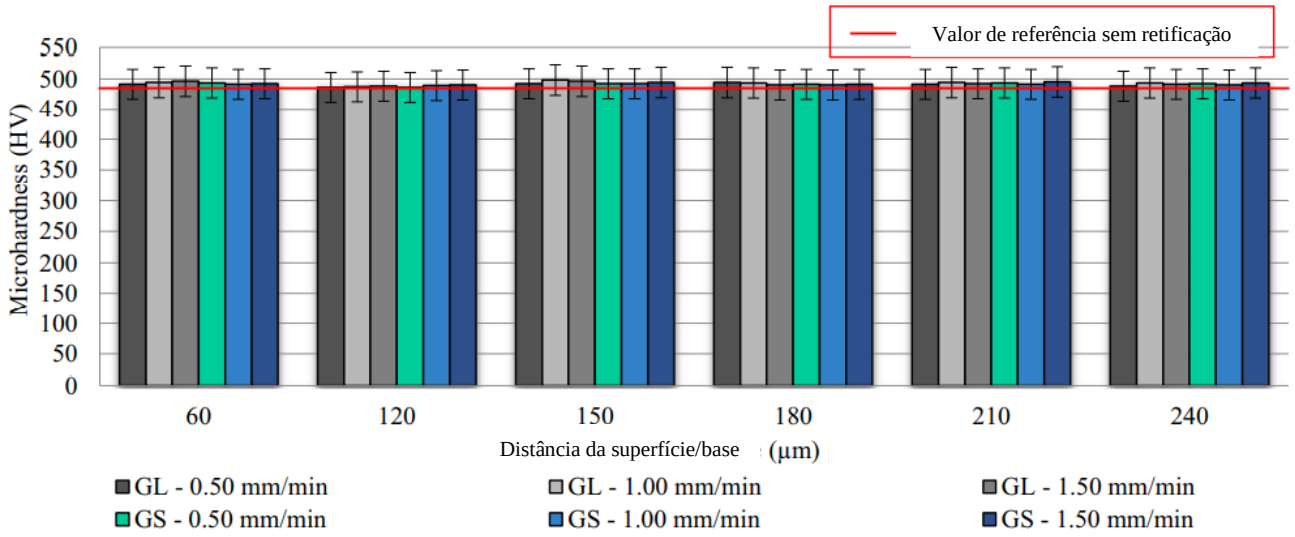
Fonte: Adaptado de SOUZA et al., 2021.

4.7 Microdureza

A figura 26 mostra os valores de microdureza obtidos após a retificação das peças para cada variável utilizada, sendo os dois rebolos de CBN e as três velocidades de avanço para cada um deles. Foi possível verificar as alterações na microestrutura da peça, o que não deveria ocorrer, haja vista que a retificação é um processo realizado após tratamentos térmicos ou químicos, o que já deixa a peça com as propriedades exigidas.

Portanto, é possível aplicar os dois tipos de rebolos na retificação do ferro fundido nodular austemperado com o uso de lubrirefrigeração abundante e obter resultados que não prejudicam a integridade da peça usinada, já que durante o processo de usinagem há presença de altas temperaturas e tensões de compressão. No entanto, esses resultados satisfatórios são obtidos para as taxas de avanço de 0,5; 1,0 e 1,5mm/min.

Figura 26: Análise de microdureza Vickers

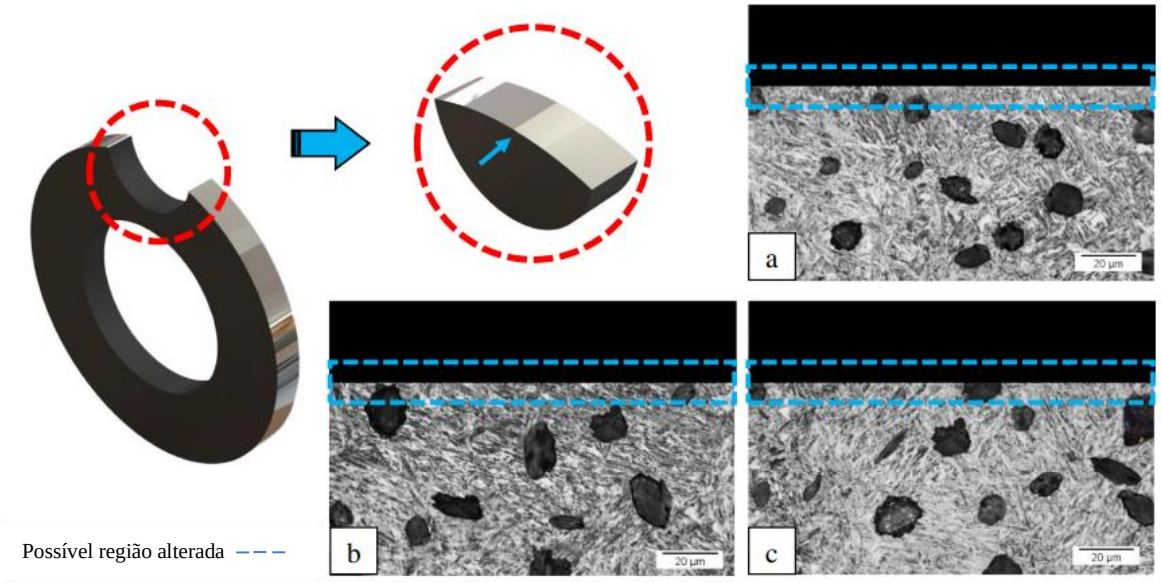


Fonte: Autor, 2023.

4.8 Microscopia óptica

A microscopia óptica foi realizada para detectar possíveis danos na superfície da peça retificada, conforme ilustra a figura 27. Esses danos são oriundos das altas temperaturas atingidas e as tensões atuantes durante o processo de retificação, que são geradas devido as altas velocidades de corte e as diversas arestas cortantes atuando simultaneamente. Nessa análise, foi possível detectar que não houve alterações na microestrutura das peças retificadas, prevalecendo a estrutura original do ADI. Assim, ficou demonstrado que não houve danos térmicos ou alterações nas propriedades no final da retificação, o que faz jus aos resultados do ensaio de microdureza.

Figura 27: Análise de microscopia óptica. (a) Peça antes da retificação (b) Peça depois da retificação com CBN GS e avanço de 1,5mm/min (c) Peça depois da retificação com CBN GL e avanço de 1,5mm/min



Fonte: Autor, 2023.

CONCLUSÕES

De acordo com os testes realizados nesse estudo na retificação cilíndrica do ferro fundido nodular austemperado, utilizando dois rebolos de CBN com friabilidades distintas e lubrirefrigeração abundante, variando os valores de velocidade de avanço em 0,5; 1,0 e 1,5mm/min, tem-se que:

- No parâmetro de rugosidade da superfície, a retificação com o uso do rebolo de CBN GL apresentou melhores resultados em todos os avanços analisados, isso se justifica pelo fato do rebolo ser menos friável, dessa forma os grãos abrasivos tem excelência na estabilidade em sua forma quanto ao tempo de corte, gerando microfraturas. Consequentemente, o rebolo de friabilidade GL oferece danos menores a superfície usinada quando comparado com o rebolo GS. Essa característica de estabilização dos grãos abrasivos também mostrou resultados benéficos na análise de desvio de circularidade.
- Ao aumentar os valores de avanço na retificação, há um aumento nas forças entre o rebolo e a peça, gerando um aumento na temperatura da região de corte, e por consequência, um aumento na deformação de expansão da superfície da peça de trabalho e da ferramenta de corte.
- A relação G, que determina a proporção do volume de material removido da peça em relação à quantidade de material retirado do rebolo, demonstrou que seu aumento é inversamente proporcional ao aumento da taxa de alimentação durante a retificação. Ao utilizar o rebolo de CBN GL, foi obtido uma relação G melhor em todas as velocidades de avanço aplicadas. No entanto, os padrões de proporção na relação G desejados exigem valores mais baixos, aumentando assim o tempo de usinagem, e consequentemente o valor agregado ao produto.
- Em relação à energia específica e emissão acústica no processo de retificação, o uso do rebolo de CBN GS apresentou os melhores resultados quando comparado com a ferramenta menos friável. Este comportamento pode ser justificado pelo fato do rebolo GS realizar menos esforços para fraturar os grãos abrasivos e gerar novas arestas de corte. Vale ressaltar que o consumo do rebolo GS é maior do que o rebolo GL, o que reduz a sua vida útil.
- Por outro lado, foi possível detectar os danos térmicos e mecânicos significativos devido a microscopia óptica e confocal, verificando também a não ocorrência de variações nas propriedades mecânicas com auxílio do teste de microdureza.

- O custo para utilizar taxas de alimentação mais altas foram substancialmente menores, embora consumisse mais energia e colocasse mais tensão no rebolo. Este comportamento ocorreu devido a economia de tempo e de fluido de corte, sendo suficientes para compensar os gastos operacionais citados.
- Em suma, por meio de análises foi possível notar que a diversificação do tipo de friabilidade aplicada ao rebolo de CBN se reflete consideravelmente na qualidade, tempo de produção e valores agregados ao produto; devido a isso, o rebolo de CBN GL apresentou os melhores resultados na maioria dos testes, o que a torna uma ferramenta econômica.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos conhecimentos adquiridos nessa pesquisa, seguem algumas sugestões para trabalhos futuros sobre a retificação do ferro fundido nodular austemperado:

- Verificar o comportamento da friabilidade dos rebolos de CBN GL e GS, na retificação de ferro fundido nodular austemperado com carbonetos livres (CADI), com favorável resistência à abrasão e tenacidade, o que se traduz em segurança à ruptura.

- Utilizar maiores velocidades de avanço, a fim de verificar o comportamento do rebolo mais friável no que se refere a energia específica e emissão acústica e quais as respectivas consequências.

- Aplicar diferentes métodos de lubrirefrigeração, tais como a MQL, e analisar quais os efeitos serão causados no quesito de rugosidade, desvio de circularidade e análise de custos.

- Avaliar através de microscopia óptica a superfície de corte do rebolo, tendo como finalidade o entendimento se a friabilidade dos grãos abrasivos é de fato um aspecto determinante para a maximização ou minimização do efeito de empastamento.

REFERÊNCIAS

ALEXANDRE FA, LOPES JC, de MARTINI FL et al, Depth of dressing optimization in CBN wheels of different friabilities using acoustic emission (AE) technique. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 106: 5225–5240, 2020 https://doi.org/10.1007/s00170-020-04994-8

ALEXANDRE FA, LOPES WN, LOFRANO FR, FERREIRA FI, AGUIAR PR, BIANCHI EC, LOPES JC, Tool condition monitoring of aluminum oxide grinding wheel using AE and fuzzy model. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 96:67–79, 2018. https://doi.org/10.1007/s00170- 018-1582-0

ANJOS MA, Estudo experimental do uso de rebolos convencionais na usinagem do aço VP-50 utilizado na retificação cilíndrica, por meio de diferentes métodos de lubri-refrigeração, 2015. **Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" UNESP/Buru.**

BASSO A, SIKORA J, Review on production processes and mechanical properties of dual phase austempered ductile iron. **Int J Met** 6:7–14, 2012 https://doi.org/10.1007/BF03355473

BIANCHI EC, SATO BK, SALES AR, LOPES JC, DE MELLO HJ, DE ANGELO SANCHEZ LEA, DINIZ AE, AGUIAR PR, Evaluating the effect of the compressed air wheel cleaning in grinding the AISI 4340 steel with CBN and MQL with water. **International Journal of Advanced Manufacturing** 95: 2855–2864, 2018 https://doi.org/10.1007/s00170-017-1433-4

BIANCHI, Eduardo Carlos, RODRIGUEZ RL, HILDEBRANT RA, LOPES JC, de MELLO HJ, AGUIAR PR, SILVA RB, Jackson MJ,Application of the auxiliary wheel cleaning jet in the plunge cylindrical grinding with Minimum Quantity Lubrication technique under various flow rates. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture** 233:1144–1156, 2019 https://doi.org/10.1177/0954405418774599

BIANCHI, Eduardo Carlos, RODRIGUEZ RL, HILDEBRANT RA, LOPES JC, MELLO HJ, SILVA RB, AGUIAR PR, Plunge cylindrical grinding with the minimum quantity lubrication coolant technique assisted with wheel cleaning system. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 95:2907– 2916, 2018 https://doi.org/10.1007/s00170-017-1396-5

BRINKSMEIER E, MUTLUGÜNES Y, KLOCKE F, AURICH JC, SHORE P, OHMORI H, Ultra-precision grinding. **CIRP** Ann 59:652-671, 2010. https://doi.org/10.1016/J.CIRP.2010.05.001

CANARIM RC, Influência da friabilidade dos grãos abrasivos de rebolos de CBN na retificação cilíndrica externa de mergulho do aço AISI 4340, 2018. **Dissertação de Doutorado, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" UNESP/Buru.**

CARMO DJ, Desenvolvimento do processo tecnológico de fabricação de peças em ferro fundido nodular austemperado (ADI), 2003. **Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais.**

DAI C, DING W, XU J, FU Y, YU T, Influence of grain wear on material removal behavior during grinding nickel-based superalloy with a single diamond grain. **International Jounal of Machine Tools and Manufacture** 113:49-58, 2017. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.12.001

DAI CW, DING WF, ZHU YJ, XU JH, YU HW, Grinding temperature and power consumption in high speed grinding of Inconel 718 nickel-based superalloy with a vitrified CBN wheel. **Precis Eng** 52:192–200, 2018. https://doi.org/10.1016/j.precisioneng. 2017.12.005

DANIEL DM, ÁVILA BN, GARCIA MV, LOPES JC, RIBEIRO FSF, MELLO HJ, SANCHEZ LEA, AGUIAR PR, BIANCHI EC, Grinding comparative between ductile iron and austempered ductile iron under CBN wheel combined to abrasive grains with high and low friability. I**nternational Journal of Advanced Manufacturing Technology** 109:2679–2690, 2020 https:// doi.org/10.1007/s00170-020-05787-9

DE MARTINI FL, LOPES JC, VOLPATO RS et al, Comparative analysis of two CBN grinding wheels performance in nodular cast iron plunge grinding. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 98:237–249, 2018 https:// doi.org/10.1007/s00170-018-2133-4

DEMIRBAS E, KOBYA M, Operating cost and treatment of metalworking fluid wastewater by chemical coagulation and electrocoagulation processes. **Process Safety and Environmental Protection** 105:79– 90, 2017. https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.10.013

DENKENA B, GROVE T, BREMER I, BEHRENS L, Design of bronze-bonded grinding wheel properties. **CIRP Annals** 65:333– 336, 2016. https://doi.org/10.1016/J.CIRP.2016.04.096

DENKENA B, GROVE T, GOTTSCHING T, Grinding with patterned grinding wheels. **CIRP J Manuf Sci Technol** 8:12–21, 2015. https://doi. org/10.1016/J.CIRPJ.2014.10.005

DING W-F, XU J-H, CHEN Z-Z, SU HH, FU YC, Wear behavior and mechanism of single-layer brazed CBN abrasive wheels during creep-feed grinding cast nickel-based superalloy I**nternational Journal of Advanced Manufacturing Technology** 51:541–550, 2010 https://doi.org/10.1007/s00170-010- 2643-1

FIELD M, KEGG R, BUESCHER S, Computerized cost analysis of grinding operations. **CIRP Ann** 29:233–237, 1980. https://doi.org/10. 1016/S0007-8506(07)61328-6

GARCIA MV, LOPES JC, DINIZ AE, RODRIGUES AR, VOLPATO RS, SANCHEZ LEA, DE MELLO HJ, AGUIAR PR, BIANCHI EC, Grinding performance of bearing steel using MQL under different dilutions and wheel cleaning for green manufacture. **Journal Clean Production** 257:120376, 2020. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120376

GOINDI, G. S.; SARKAR, P. Dry machining: A step towards sustainable machining – Challenges and future directions. **Journal of Cleaner Production**, v. 165, p. 1557–1571, 2017.

HADAD MJ, et al, Temperature and energy partition in minimum quantity lubrication-MQL grinding process. **International Journal of Machine Tools and Manufacture** 4– 55:10–17, 2012. https://doi.org/10.1016/J.IJMACHTOOLS.2011.11.010

JAVARONI RL, LOPES JC, DINIZ AE, GARCIA MV, RIBEIRO FSF, TAVARES AB, TALON AG, SANCHEZ LEA, MELLO HJ, AGUIAR PR, BIANCHI EC, Improvement in the grinding process using the MQL technique with cooled wheel cleaning jet. **Tribology International** 152:106512, 2020. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106512

JAVARONI RL, LOPES JC, GARCIA MV, RIBEIRO FSF, SANCHEZ LEA, MELLO HJ, AGUIAR PR, BIANCHI EC (2020) Grinding hardened steel using MQL associated with cleaning system and CBN wheel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 107:2065–2080, 2020. https://doi.org/10.1007/s00170-020-05169-1

JAVARONI RL, LOPES JC, RIBEIRO FSF, GARCIA MV, SANCHEZ LEA, MELLO HJ, AGUIAR PR, BIANCHI EC, Evaluation of a cooled wheel cleaning jet in minimum quantity lubrication grinding process. I**nternational Journal of Advanced Manufacturing Technology** 111:1303– 1317, 2020 https://doi.org/10.1007/s00170-020-06198-6

JAVARONI RL, LOPES JC, SATO BK, SANCHEZ LEA, MELLO HJ, BIANCHI EC Minimum quantity of lubrication (MQL) as an eco-friendly alternative to the cutting fluids in advanced ceramics grinding. **International Journal of Advanced Manufacturing** 103:2809–2819, 2019 https://doi.org/10.1007/s00170-019-03697-z

Kim, Y.-J., Shin, H., Park, H., Lim, J. D.; Investigation into Mechanical Properties of Austempered Ductile Cast Iron (ADI) in Accordance with Austempering Temperature. **Materials Letters** 2008, 62, 351-360

KOPAC J, KRAJNIK P, High-performance grinding-a review. **J Mater Process Technol** 175:278–284, 2006. https://doi.org/10.1016/j. jmatprotec.2005.04.010

KUFFA M, KUSTER F, WEGENER K, Comparison of lubrication conditions for grinding of mild steel with electroplated CBN wheel. **CIRP Journal Manufacturing Science and Technology** 18:53–59, 2017. https://doi.org/10.1016/J. CIRPJ.2016.09.002

LAVISSE, B. et al. The effects of the flow rate and speed of lubricoolant jets on heat transfer in the contact zone when grinding a nitrided steel. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 35, n. February, p. 233–243, 2018.

Li CH, Li JY, WANG S, ZHANG Q, Modeling and numerical simulation of the grinding temperature field with nanoparticle jet of MQL. **Advanced Mechanical Engineering** 5:986984, 2013. https://doi.org/10.1155/2013/ 986984

Li X, Li Y Chain-to-chain competition on product sustaintability. **Journal Clean Production** 112:2058–2065, 2016. https://doi.org/10.1016/j. jclepro.2014.09.027

LOPES JC, DE MARTINI FL, DOMINGUES BB et al, Effect of CBN grain friability in hardened steel plunge grinding. I**nternational Journal of Advanced Manufacturing Technology** 103:1567–1577, 2019. https://doi.org/10.1007/s00170- 019-03654-w

LOPES JC, FRAGOSO KM, GARCIA MV, RIBEIRO FSF, FRANCELIN AP, SANCHEZ LEA, RODRIGUES AR, MELLO HJ, AGUIAR PR, BIANCHI EC (2019) Behavior of hardened steel grinding using MQL under cold air and MQL CBN wheel cleaning. **International Journal of Advanced Manufacturing** 105:4373-4387, 2019. https://doi.org/10.1007/s00170- 019-04571-8

LOPES JC, GARCIA MV, VALENTIM M, JAVARONI RL, RIBEIRO FSF, Sanchez LEA, MELLO HJ, AGUIAR PR, BIANCHI EC, Grinding performance using variants of the MQL technique: MQL with cooled air and MQL simultaneous to the wheel cleaning jet. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 105:4429–4442, 2019. https://doi.org/10.1007/ s00170-019-04574-5

LOPES JC, MARTINI FL, GARCIA MV et al, Performance of austempered ductile iron (ADI) grinding using diluted oil in MQL combined with wheel cleaning jet and different CBN grains friability. I**nternational Journal of Advanced Manufacturing Technology** 107:1805–1818, 2020. https://doi.org/10. 1007/s00170-020-05142-y

LOPES JC, RIBEIRO FSF, JAVARONI RL, GARCIA MV, VENTURA CEH, SCALON VL, SANCHEZ LEA, DE MELLO HJ, AGUIAR PR, BIANCHI EC, Mechanical and thermal effects of abrasive cut-off applied in low and medium carbon steels using aluminum oxide cutting disc. I**nternational Journal of Advanced Manufacturing Technology** 109:1319–133, 2020. https://doi.org/10.1007/s00170-020-05753-5

LOPES JC, VENTURA CEH, DE M. FERNANDES L, et al, Application of a wheel cleaning system during grinding of alumina with minimum quantity lubrication. **International Journal of Advanced Manufacturing** 102: 333–341, 2019. https://doi.org/10.1007/s00170-018-3174-4

LOPES, José Cláudio et al. Application of MQL technique using TiO2 nanoparticles compared to MQL simultaneous to the grinding wheel cleaning jet. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 106:2205–2218, 2020. https://doi.org/10.1007/s00170-019-04760-5

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

MARINESCU I, GUO L, WEI P Basic research for the UV fixed abrasive lapping plate. **Appl Mech Mater** 371:95–100, 2013. https://doi. org/10.4028/www.scientific.net/AMM.371.95

MARTINI FL, LOPES JC, RIBEIRO FSF et al, Thermal model for surface grinding application. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 104: 2783–2793, 2019. https://doi.org/10.1007/s00170-019-04101-6

MELLO HJ, MELLO DR, RODRIGUEZ RL, LOPES JC, da Silva RB, SANCHEZ LEA, HILDEBRANT RA, BIANCHI EC, Contribution to cylindrical grinding of interrupted surfaces of hardened steel with medium grit wheel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 95:4049–4057, 2018. https://doi.org/10.1007/s00170-017-1552-y

MELLO HJ, MELLO DR, RODRIGUEZ RL, LOPES JC, SILVA RB, SANCHEZ LEA, , BIANCHI EC, Contribution to cylindrical grinding of interrupted surfaces of hardened steel with medium grit wheel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 95:4049–4057, 2018. https://doi.org/10.1007/s00170-017-1552-y

MORAES DL, GARCIA MV, LOPES JC, RIBEIRO FSF, SANCHEZ LEA, FOSCHINI CR, MELLO HJ, AGUIAR PR, BIANCHI EC, Performance of SAE 52100 steel grinding using MQL technique with pure and diluted oil. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 105: 4211–4223, 2019 https://doi.org/10.1007/s00170-019-04582-5

MORETTI GB, DE MORAES DL, GARCIA MV, LOPES JC, RIBEIRO FSF, FOSCHINI CR, MELLO HJ, SANCHEZ LEA, AGUIAR PR, BIANCHI EC, Grinding behavior of austempered ductile iron: a study about the effect of pure and diluted MQL technique applying different friability wheels. I**nternational Journal of Advanced Manufacturing Technology** 108:3661–3673, 2020 https://doi.org/10.1007/s00170-020-05577-3

NGOC VP, XUAN H, TUNG LA, LONG BT, Cost optimization of Internal Grinding. **Journal of Materials Science and Engineering** B6, 291-296, 2016. doi: 10.17265/2161-6221/2016.11-12.004

PANNEERSELVAM S, PUTATUNDA SK, GUNDLACH R, BOILEAU J, Influence of intercritical austempering on the microstructure and mechanical properties of austempered ductile cast iron (ADI). **Materials Science and Engineering A** 694:72–80, 2017. https://doi.org/10.1016/J.MSEA. 2017.03.096

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

PIMENTEL ASO, GUESSER WL, Tratamento térmico de austêmpera em ferro fundido nodular com adições de nióbrio e cromo. **Revista Matéria,** v.22, n2 1517-7076, 2016.

PUERTO, P., FERNÁNDEZ, R., MADARIAGA, J., ARANA, J., GALLEGO, I. Evolution of surface roughness in grinding and its relationship with the dressing parameters and the radial wear. **Procedia Engineering**, v. 63, pp. 174-182, 2013

PUSAVEC F, KRAMAR D, KRAJNIK P, KOPAC J, Transitioning to sustainable production – part II: evaluation of sustainable machining technologies. **Journal Clean Production** 18:1211–1221, 2010 https://doi.org/10. 1016/j.jclepro.2010.01.015

RIBEIRO FSF, LOPES JC, GARCIA MV, DE ANGELO SANCHEZ LE, DE MELLO HJ, DE AGUIAR PR, BIANCHI EC, Grinding performance by applying MQL technique: an approach of the wheel cleaning jet compared with wheel cleaning Teflon and Alumina block. **nternational Journal of Advanced Manufacturing Technology** 107:4415–4426, 2020 https://doi.org/10.1007/ s00170-020-05334-6

RIBEIRO FSF, LOPES JC, GARCIA MV, DE MORAES DL, DA SILVA AE, SANCHEZ LEA, AGUIAR PR, BIANCHI EC, New knowledge about grinding using MQL simultaneous to cooled air and MQL combined to wheel cleaning jet technique. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 109:905–917, 2020. https://doi.org/10.1007/s00170-020-05721-z

RIBEIRO FSF, LOPES JC, GARCIA MV, SANCHEZ LEA, MELLO HJ, AGUIAR PR, BIANCHI EC, Grinding assessment of workpieces with different interrupted geometries using aluminum oxide wheel with vitrified bond. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 108:931–941, 2020 https://doi.org/10.1007/s00170-020-05500-w

RIBEIRO FSF, LOPES JC, TALON AG, GARCIA MV, DE MELLO HJ, SANCHEZ LEDA, DE AGUIAR PR, BIANCHI EC, Comparative analysis between resinoid and vitrified bond grinding wheel under interrupted cutting. I**nternational Journal of Advanced Manufacturing Technology** 109:75–85, 2020 https:// doi.org/10.1007/s00170-020-05667-2

RODRIGUEZ RL, LOPES JC, GARCIA MV, FONTEQUE RIBEIRO FS, DINIZ AE, SANCHEZ LEA, MELLO H, AGUIAR PR, BIANCHI EC, Application of hybrid eco-friendly MQL+WCJ technique in AISI 4340 steel grinding for cleaner and greener production. **Journal Clean Prodruction** 124670:124670, 2020 https://doi.org/ 10.1016/j.jclepro.2020.124670

RODRIGUEZ RL, LOPES JC, GARCIA MV, TARRENTO GE, RODRIGUES AR, SANCHEZ LEA, MELLO HJ, AGUIAR PR, BIANCHI EC, Grinding process applied to workpieces with different geometries interrupted using CBN wheel. I**nternational Journal of Advanced Manufacturing Technology** 107:1265–1275, 2020. https://doi.org/10.1007 /s00170-020-05122-2

RODRIGUEZ RL, LOPES JC, HILDEBRANDT RA, PEREZ RRV, DINIZ AE, SANCHEZ LEA, RODRIGUES AR, MELLO HJ, AGUIAR PR, BIANCHI EC, Evaluation of grinding process using simultaneously MQL technique and cleaning jet on grinding wheel surface. **Journal of Materials Processing Technology** 271:357–367, 2019 https://doi.org/10.1016/j. jmatprotec.2019.03.019

ROWE WB, Principles of Modern Grinding Technology. 2014. **Elsevier**

SAINT-GOBAIN, Cubic Boron Nitride Mesh - Engineered Particles, disponível em: último acesso em 13/06/2018.

SATO BK, LOPES JC, DINIZ AE, RODRIGUES AR, DE MELLO HJ, SANCHEZ LEA, AGUIAR PR, BIANCHI EC, Toward sustainable grinding using minimum quantity lubrication technique with diluted oil and simultaneous wheel cleaning. **Tribology International** 147:106276, 2020. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106276

SATO BK, RODRIGUEZ RL, TALON AG, LOPES JC, MELLO HJ, AGUIAR PR, BIANCHI EC, Grinding performance of AISI D6 steel using CBN wheel vitrified and resinoid bonded. **International Journal of Advanced Manufacturing** 105:2167–2182, 2019. https://doi.org/10.1007/s00170-019- 04407-5

SATO BK, SALES AR, LOPES JC et al, Influence of water in the MQL technique in the grinding of steel AISI 4340 using CBN wheels. **Revista Escola de Minas** 71:391–396, 2018. https://doi.org/10.1590/0370- 44672017710152.

SILVA AE, LOPES JC, DANIEL DM, MORAES DL, GARCIA MV, RIBEIRO FSF, MELLO HJ, SANCHEZ LEDA, AGUIAR PR, BIANCHI EC, Behavior of austempered ductile iron (ADI) grinding using different MQL dilutions and CBN wheels with low and high friability. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 107:4373–4387, 2020. https://doi.org/10. 1007/s00170-020-05347-1

SOSA AD, ECHEVERRÍA MD, Surface alterations produced in grinding of austempered ductile iron. **Materials Science and Engineering** A 8:155– 161, 2015. https://doi.org/10.1016/J.MSPRO.2015.04.059

SOUZA BV, Desenvolvimento de ferro fundido austemperado (ADI) em banho de zinco e alumínio, 2015. **Dissertação de Mestrado, Pontífica Universidade Católica do Rio Grande do Sul.**

SOUZA RR, MORAES DL, GARCIA MV, et al, Effect of grinding with different CBN grains applied to austempered ductile iron linked to quality and industrial cost. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology,** 2021. https://doi.org/10.1007/s00170-021-06647-w

SUTOWSKI, P. The effect of process parameters on grinding forces and acoustic emission in machining tool steel 1.2201/NC10. **Journal of Mechanical and Energy Engineering**, v. 1, n. 1, p. 37–44, 2017.

TALON AG, LOPES JC, TAVARES AB, SATO BK, RODRIGUES AR, GENOVEZ MC, DINIS PINTO TA, DE MELLO HJ, AGUIAR PR, BIANCHI EC, Effect of hardened steel grinding using aluminum oxide wheel under application of cutting fluid with corrosion inhibitors. **International Journal of Advanced Manufacturing** 104:1437–1448, 2019 https://doi.org/10.1007/ s00170-019-04005-5

TAWAKOLI T, HADAD M, SADEGHI MH, DANESHI A, SADEGHI B, Minimum quantity lubrication in grinding: Effects of abrasive and coolant-lubricant types. **Journal Clean Production** 19:2088–2099, 2011. https://doi. org/10.1016/j.jclepro.2011.06.020

TAWAKOLI T, HADAD MJ, SADEGHI MH, Investigation on minimum quantity lubricant-MQL grinding of 100Cr6 hardened steel using different abrasive and coolant-lubricant types. **International Journal of Machine Tools and Manufacture** 50:698–708, 2010. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools. 2010.04.009

WANG Z, ZHANG T, YU T, ZHAO J, Assessment and optimization of grinding process on AISI 1045 steel in terms of green manufacturing using orthogonal experimental design and grey relational analysis. **Journal Clean Production** 253:119896, 2020. https://doi.org/10.1016/ j.jclepro.2019.119896

WENFENG D, et al. Review on monolayer CBN superabrasive wheels for grinding metallic materials. **Chinese Journal of Aeronautics**, v. 30, n. 1, p. 109-134, 2017.

WU Y, SHEN M, QU M, XIE G, SHANG Z, JIN T, An experimental investigation on surface layer damage in high-efficiency and low-damage grinding of rail by slotted CBN grinding wheel. **International Journal of Advanced Manufacturing** 105:2833–2841, 2019. https://doi.org/10.1007/ s00170-019-04528-x