

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

LUAN AUGUSTO DE SOUZA CARREIRA

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO
PROCESSO DE RETIFICAÇÃO DE METAL DURO**

SÃO CARLOS -SP

2022

LUAN AUGUSTO DE SOUZA CARREIRA

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO
DE METAL DURO

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de São Carlos,
para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr.-Ing. Carlos Eiji
Hirata Ventura

São Carlos-SP

2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Luan Augusto de Souza Carreira, realizada em 17/02/2022.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Carlos Eiji Hirata Ventura (UFSCar)

Prof. Dr. Luis Antonio Oliveira Araujo (UFSCar)

Prof. Dr. Amauri Hassui (UNICAMP)

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Dedico este trabalho a Deus e à minha
amada esposa, Isabela.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por todo o cuidado e o amor para comigo. Ele é o motivo e a razão de tudo.

À minha amada esposa, Isabela, companheira nas lutas e vitórias.

Aos meus pais, Arlindo e Cássia, e a todos da minha família.

Ao Prof. Dr.-Ing Carlos E. H. Ventura, por me impulsionar em mais um trabalho e me auxiliar na construção da minha carreira profissional.

Ao Prof. Dr. Dennis C. Cruz, por toda a ajuda que me deu na realização deste trabalho e na compreensão do tema.

Ao Técnico Administrativo Me. Leonildo Bernardo Pivotto, também por toda a ajuda que me deu.

À UFSCar e ao Departamento de Engenharia Mecânica, onde tenho me desenvolvido profissionalmente há oito anos.

À FAPESP, pelo apoio financeiro para aquisição dos equipamentos e materiais relacionados à pesquisa.

À CAPES, pelo fomento e financiamento do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFSCar.

Tudo neste mundo, seja o que for, nunca valerá
mais que Cristo, meu Senhor

RESUMO

A busca por tornar os processos de fabricação sustentáveis é uma necessidade cada vez mais importante. Neste sentido, o presente trabalho avaliou o processo de retificação de insertos de metal duro com geometria SNGN (quadrado, com ângulo de folga nulo e sem preparação de aresta) e composição WC-5%Co (classe ISO K10), um dos mais utilizados na indústria. Foram variadas as seguintes condições de corte: velocidade de corte ($v_c = 12, 40$ e 60 m/s), velocidade de avanço ($v_{fa} = 2$ e 12 mm/min) e vazão de fluido lubrificante ($\dot{Q} = 12,6$ e $16,2$ l/min). A combinação dos parâmetros deu origem a 12 experimentos para cada tipo de rebolo testado, com abrasivo de diamante, concentração C100 ($0,88$ g/cm³), diferentes tamanhos de grão e tipos de ligante: tamanho de grão de 15 μ m e ligante resinoide (D15R), tamanho de grão de 15 μ m e ligante vitrificado (D15V), tamanho de grão de 46 μ m e ligante resinoide (D46R) e tamanho de grão 46 μ m e ligante vitrificado (D46V). A combinação de todos os parâmetros testados visou avaliar sua influência sobre as rugosidades de superfície e de aresta, bem como sobre o consumo e eficiência energética. Como resultado, observou-se que a variação dos parâmetros de corte teve pouca influência sobre a qualidade do inserto, apresentando o uso do ligante vitrificado uma leve tendência de aumento da rugosidade em relação ao resinoide. O aumento da espessura de cavaco por grão levou ao aumento das forças e à diminuição da energia específica de corte, mas não se observou influência das variáveis de entrada sobre a potência da máquina, tendo sido o consumo energético reduzido em 62,8% apenas a partir da mudança da velocidade de avanço de 2 para 12 mm/min, que causou, na realidade, diminuição do tempo de processamento.

Palavras-chave: Retificação. Metal duro. Eficiência energética.

ABSTRACT

The quest to make manufacturing processes sustainable is an increasingly important need. In this context, the present work assessed the grinding process of cemented tungsten carbide inserts with SNGN geometry (square, with zero clearance angle and without edge preparation) and WC-5%CO composition (ISO grade K10), one of the most used in the industry. The following cutting conditions were varied: cutting speed (12, 40 and 60 m/s), feed speed (2 and 12 mm/min) and coolant fluid flow (12.6 and 16.2 l/min). The combination of the proposed parameters led to 12 conditions applied for each type of diamond grinding wheel, with concentration C100 (0.88 g/cm³), different abrasive grain sizes and bonding materials: grain size of 15 µm and resinoid binder (D15R), grain size of 15 µm and vitrified binder (D15V), grain size of 46 µm and resinoid binder (D46R), grain size of 46 µm and vitrified binder (D46V). The grinding tests were carried out to assess the influence of the different parameters on surface and edge roughness, as well as on energy consumption and efficiency. As a result, it was observed that the variation of grinding parameters had little influence on the insert quality, although a slight increase could be noticed with the use of the vitrified bonded diamond grinding with bigger grain size. The increase in the single grain chip thickness led to an increase in cutting forces and a decrease in specific energy, but there was no influence of grinding conditions on the electric power, being the energy consumption reduced by 62.8% only by changing the feed speed from 2 to 12 mm/min, which actually caused a decrease in processing time.

Keywords: Grinding. Cemented tungsten carbide. Energy efficiency.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Interação entre o grão abrasivo e a superfície usinada.....	18
Figura 2 - Retificação plana transversal de mergulho.....	24
Figura 3 - Remoção de material no regime frágil.....	25
Figura 4 - Sistema de retificação.....	27
Figura 5 - Sistema de medição de potência.....	31
Figura 6 - Sinais de força e potência durante a retificação de inserto de metal duro com rebolo D15/vitrificado, $v_c = 60$ m/s, $v_{fa} = 2$ mm/min, $Q = 12,6$ l/min e sistema de refrigeração de fluido ligado.....	32
Figura 7 - Esquema para avaliação da (a) rugosidade na superfície de folga e (b) lascamento na aresta após o processo de retificação.....	34
Figura 8 - Forças específicas (a) normal e (b) tangencial em relação à espessura de cavaco por grão (testes realizados com vazão de fluido $Q = 12,6$ l/min).....	36
Figura 9 - Forças específicas (a) normal e (b) tangencial em relação à espessura de cavaco por grão (testes realizados com vazão de fluido $Q = 16,2$ l/min).....	37
Figura 10 - Forças médias por grão nas direções (a) normal e (b) tangencial em relação à espessura de cavaco por grão (testes realizados com vazão de fluido $Q = 12,6$ l/min).....	38
Figura 11 - Forças médias por grão nas direções (a) normal e (b) tangencial em relação à espessura de cavaco por grão (testes realizados com vazão de fluido $Q = 16,2$ l/min).....	39
Figura 12 - Energia específica média em relação à espessura de cavaco por grão: testes realizados com vazão de fluido (a) $Q = 12,6$ l/min e (b) $Q = 16,2$ l/min.....	41
Figura 13 - Sinais de força e potência durante a retificação de inserto de metal duro com rebolo D15/vitrificado, $v_c = 60$ m/s, $v_{fa} = 12$ mm/min, $Q = 12,6$ l/min e sistema de refrigeração de fluido desligado.....	43
Figura 14 - Consumo energético para diferentes condições de retificação.....	44
Figura 15 - Rendimento médio do equipamento em relação à espessura de cavaco por grão: testes realizados com vazão de fluido (a) $Q = 12,6$ l/min e (b) $Q = 16,2$ l/min.....	45
Figura 16 - Rugosidade máxima em relação à espessura de cavaco por grão (testes realizados com vazão de fluido $Q = 12,6$ l/min.....	47

Figura 17 - Rugosidade máxima em relação à espessura de cavaco por grão (testes realizados com vazão de fluido $Q = 16,2$ l/min)	47
Figura 18 - Rugosidade de aresta em relação à espessura de cavaco por grão (testes realizados com vazão de fluido $Q = 12,6$ l/min)	48
Figura 19 - Rugosidade de aresta em relação à espessura de cavaco por grão (testes realizados com vazão de fluido $Q = 16,2$ l/min)	49
Figura 20 - Índice de sustentabilidade relacionando a rugosidade de superfície e o consumo energético nas diferentes condições de retificação	50
Figura 21 - Índice de sustentabilidade relacionando a rugosidade de aresta e o consumo energético nas diferentes condições de retificação	50

LISTA DE SIGLAS

EPE	Empresa Brasileira de Pesquisa e Energia
IS	Índice de Sustentabilidade
LPF	Laboratório de Processos de Fabricação
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Penetração de trabalho
h_m	Espessura máxima de cavaco
l_k	Comprimento do caminho de corte
F_n	Força normal
F_t	Força tangencial
Rz	Média das distâncias de pico a vale em cinco diferentes trechos
Y_i	Variável de qualidade da i -ésima face retificada
Y'_z	Menor valor da variável de qualidade entre todos os testes
Δr	Menor distância entre o perfil de aresta obtido e o perfil teórico
E_i	Consumo energético do i -ésimo teste
E'	Menor consumo energético entre todos os testes
k_1	Pesos atribuídos na equação do IS
k_2	
\dot{Q}	Vazão de fluido lubrificante
v_{cd}	Velocidade tangencial do dressador
v_{fad}	Velocidade axial do dressador
v_c	Velocidade de corte
l_d	Comprimento do percurso de dressagem
u_i	Energia específica de corte da i -ésima face retificada
A_i	Área da i -ésima face retificada
C_1	Fatores de correção da geometria do grão
C_2	
d_G	Tamanho médio de um grão aproximadamente esférico
v_{fa}	Velocidade de avanço axial
N_k	Número de arestas por volume
f_c	Fator de correção do tipo de ligante do rebolo
c	Concentração em massa do rebolo
ρ	Densidade
F_{Gi}	Força por grão da i -ésima face retificada
F_i	Força tangencial ou normal da i -ésima face retificada
z	Protrusão de grão

I_{rms}	Corrente eficaz
V	Tensão
P	Potência instantânea
P_c	Potência efetiva de corte
η	Rendimento

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	15
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	16
2.1 PROCESSO DE RETIFICAÇÃO.....	16
2.1.1 Forças de retificação, energia e eficiência do processo	18
2.2. RETIFICAÇÃO DE METAL DURO.....	21
2.3 RETIFICAÇÃO DE INSERTOS	23
3 MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1 ENSAIOS DE RETIFICAÇÃO	27
3.2 CÁLCULO DA ESPESSURA DE CAVACO POR GRÃO	29
3.3 CÁLCULO DA FORÇA POR GRÃO.....	30
3.4 MEDIÇÃO DE POTÊNCIA E CÁLCULO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	30
3.5 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ARESTA E DA SUPERFÍCIE DO INSERTO	33
3.6 CÁLCULO DO ÍNDICE DE SUSTENTABILIDADE	34
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1 FORÇAS DE RETIFICAÇÃO E ENERGIA ESPECÍFICA.....	36
4.2 POTÊNCIA, CONSUMO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	42
4.3 RUGOSIDADE DE SUPERFÍCIE E DE ARESTA.....	46
4.4 ÍNDICE DE SUSTENTABILIDADE	49
5 CONCLUSÕES	52
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	53
REFERÊNCIAS.....	54

1 INTRODUÇÃO

O consumo de energia aumenta cada vez mais com os avanços tecnológicos, mudanças no estilo de vida da sociedade e novas exigências da indústria. Diante destes fatos, é de suma importância tornar os processos industriais o mais sustentável possível, principalmente no caso da indústria manufatureira, que é responsável por boa parte do consumo energético total, contribuindo para o meio ambiente e diminuindo os custos gerais (ZHOU *et al.*, 2017). Uma parte considerável do consumo de energia e recursos industriais pode ser atribuída a máquinas-ferramenta em geral e retificadoras, em particular (HACKSTEINER *et al.*, 2018).

A retificação é um processo de corte por abrasão, que utiliza uma ferramenta com arestas de geometria não definida, conhecida como rebolo, e tem por objetivo principal o acabamento. Diferentes máquinas e tipos de rebolo permitem que o processo possa ser aplicado em diferentes situações, sendo uma delas o acabamento de insertos de usinagem. Devido ao efeito escala, aos ângulos negativos dos grãos do rebolo e à não efetividade do contato dos grãos com a peça, é necessária uma grande quantidade de energia para se remover pouco volume de material, fazendo com que a eficiência da retificação seja muito baixa, e ainda necessite de um alto volume de fluido lubrificante (GROOVER, 2014; DENKINA *et al.*, 2005).

A retificação de insertos de corte visa ao aumento da vida da ferramenta e à melhoria da qualidade da usinagem. Por serem materiais de difícil usinabilidade, faz-se necessário o estudo e determinação das melhores estratégias de retificação. No caso do metal duro, Habrat (2016) cita que a retificação deste material é muito problemática devido ao alto teor de carbonetos duros na estrutura. O estudo da influência da variação dos parâmetros de corte e tipo de rebolo na retificação de insertos tem como foco a melhoria da qualidade e integridade do inserto retificado, a diminuição do desgaste da ferramenta e o atendimento às demandas de sustentabilidade e diminuição de custos. A velocidade de corte e de avanço, o fluxo de alimentação de fluido lubrificante e o tipo de rebolo têm influência direta sobre a energia específica de corte, os mecanismos de remoção de material e a qualidade superficial da peça. Assim, este trabalho visa buscar os parâmetros que combinem boa qualidade superficial com menor consumo energético.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

A retificação é um processo de usinagem por abrasão que, de acordo com Groover (2014), é utilizado primordialmente na etapa de acabamento de peças pela capacidade de baixa taxa de remoção de material. Algumas características específicas o tornam um dos mais importantes da indústria, entre elas o controle dimensional da ordem de nanômetros, a aplicabilidade a uma ampla gama de materiais e o grande intervalo possível em termos de taxa de remoção de material (CHEN e ÖPÖZ, 2016).

O rebolo é uma ferramenta rotativa com geometria circular, sendo os elementos cortantes granulados de um material específico, unidos por um determinado aglomerante. Esta ferramenta pode ser classificada quanto a cinco fatores: material abrasivo, tamanho de grão, material do aglomerante, estrutura e dureza do rebolo, os quais são escolhidos de acordo com sua aplicação (GROOVER, 2014). À medida que este se desgasta ocorre o aumento da força de corte nos grãos, culminando na fratura da aresta desgastada, criando novas arestas de corte afiadas, ou fazendo com que o grão seja retirado da matriz, permitindo o aparecimento de novas arestas a partir das camadas mais inferiores. Devido à ação de autoafiação, o rebolo é capaz de usinar materiais de dureza semelhante à dos grãos abrasivos (CHEN e ÖPÖZ, 2016).

Os grãos abrasivos possuem geometria não definida e são posicionados aleatoriamente em uma concentração específica, estando disponíveis em diferentes tamanhos e sendo classificados de forma geral como abrasivos e superabrasivos (GROOVER, 2014). Os materiais mais comumente utilizados são o óxido de alumínio (Al_2O_3), o carboneto de silício (SiC), o nitreto cúbico de boro (CBN) e o diamante, sendo os dois últimos utilizados para materiais endurecidos e cerâmicas (GROOVER, 2014). Habrat (2016) cita que a utilização de rebolos diamantados na retificação de metal duro já é bem estabelecida como a primeira opção, garantindo uma boa usinabilidade com boa tolerância dimensional.

Os tipos de ligante mais comumente utilizados são o resinoide, vitrificado e metálico, sendo o ligante vitrificado o que possui maior quantidade de poros em sua estrutura, e conseqüentemente possui menor quantidade de grãos ativos,

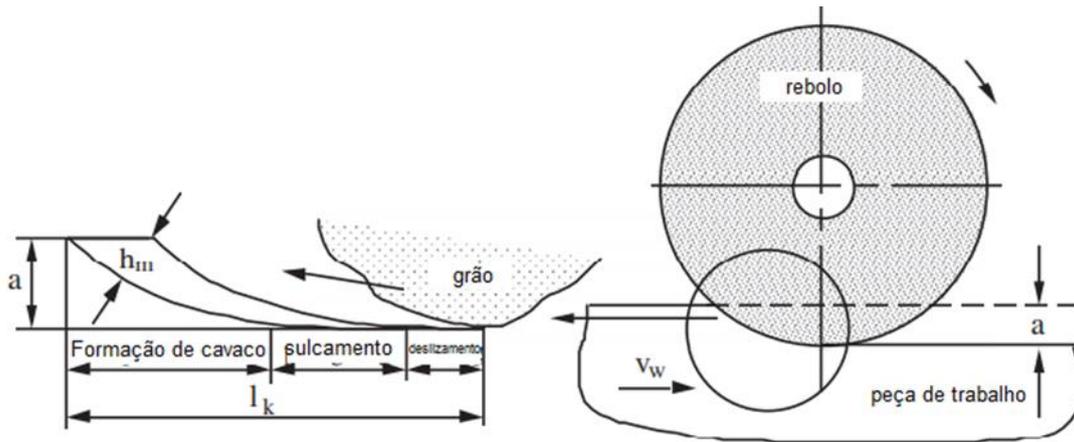
permitindo assim a melhor circulação de fluido e melhor retirada do cavaco durante o corte. Já o ligante resinoide tem a capacidade de melhor retenção dos grãos e maior deformação, permitindo, assim, o contato de mais grãos com a peça, possibilitando a obtenção de menores valores de rugosidade (CRUZ, 2021).

O processo de dressagem é essencial na retificação, sendo este responsável por corrigir a topografia do rebolo e renovar as arestas de corte após seu desgaste, limpando restos de cavaco encrustados no rebolo e camadas de ligante que encobrem arestas cortantes. Este pode ser realizado por meio de uma ferramenta de ponta única de diamante ou através do rolo dressador, sendo este último escolhido de acordo com as características específicas do rebolo a ser dressado (CRUZ, 2021; GROOVER, 2014).

Groover (2014) explica que, devido ao efeito escala, que sustenta que, quanto menor o volume de material retirado, maior é a energia necessária, em função da menor probabilidade de existirem defeitos no material, a energia de corte na retificação é cerca de 10 vezes maior que a de outros métodos de usinagem convencionais. Também o fato de os ângulos de saída dos grãos serem negativos (variando entre -30° e -60°) faz com que sejam geradas altas tensões cisalhantes no plano de corte, aumentando a energia requerida. Ren *et al.* (2009) apontam que a energia específica na retificação é aproximadamente uma ordem de magnitude maior do que no torneamento ou fresamento, o que se deve principalmente à maior incidência de deformações do material usinado (tanto plásticas quanto elásticas).

A interação entre as arestas de corte abrasivas e a peça de trabalho é altamente dependente da topografia e geometria da superfície do rebolo, da peça de trabalho e movimentos relativos entre o rebolo e a peça (REN *et al.*, 2009). Hahn (1962) propôs um modelo que descreve a interação entre grão e peça na retificação plana, conforme a Figura 1. Nela, a letra a representa a penetração de trabalho, h_m é a espessura máxima de cavaco e l_k é o comprimento do caminho de corte. De acordo com este autor, a retirada de cavaco é dividida em três fases: na primeira, ocorre o deslizamento do grão sobre a superfície sem a ocorrência de corte, somente deformação elástica; na segunda fase, conhecida por sulcamento, com o aumento da tensão na interface grão/peça ocorre o rompimento do regime elástico e a deformação plástica, quando o material da peça se empilha na frente e nas laterais do grão; finalmente, o cavaco é formado quando o material acumulado não suporta mais as tensões cisalhantes, sendo retirado da matriz.

Figura 1 - Interação entre o grão abrasivo e a superfície usinada



Fonte: Adaptado de Chen e Öpöz (2016)

2.1.1 Forças de retificação, energia e eficiência do processo

Durante a retificação, duas forças principais agem no contato entre o rebolo e a peça: a força normal à superfície de corte F_n e a força tangencial F_t ao movimento do rebolo. A magnitude das forças e a razão entre elas são capazes de mostrar quais são os mecanismos de corte predominantes durante a retificação. Choudhary e Babu (2020) definiram uma metodologia que mostra a predominância de certos fenômenos durante o corte do aço EN8 (atrito, sulcamento ou cisalhamento) por meio da relação entre as forças tangencial e normal e constataram que o cisalhamento (a retirada efetiva de material) representa a menor parcela. De acordo com os resultados obtidos, a predominância do corte se dá quando a relação alcança um valor maior ou igual a um.

O atrito e o sulcamento aumentam a ineficiência do processo, já que não contribuem para o corte. Além disso, geram o aumento da temperatura, que pode levar a uma taxa excessiva de desgaste do rebolo e a danos metalúrgicos na peça (SUBRAMANIAN *et al.*, 2015; CHEN e ÖPÖZ, 2016).

Sabe-se que para que ocorra a diminuição das forças por grão, deve-se diminuir a espessura de cavaco por grão, o que pode ser feito com o aumento da velocidade de corte e diminuição do tamanho de grão do rebolo (FRIEMUTH, 1999; DENKENA *et al.*, 2005; ABDULAH *et al.*, 2009; VENTURA *et al.*, 2013). Por outro lado, a redução da espessura de cavaco por grão pode levar a um aumento da deformação do material em relação ao cisalhamento.

O estudo de estratégias para a melhoria da eficiência do processo de retificação tem motivações como sustentabilidade, redução de custos e melhoria da qualidade do processo como um todo. O trabalho de Khan *et al.* (2021) revisa uma grande quantidade de pesquisas voltadas ao mapeamento do funcionamento e gasto energético das máquinas-ferramenta em geral, a fim de encontrar estratégias para a melhoria da eficiência energética nos diferentes níveis de funcionamento das máquinas, envolvendo a otimização de hardwares e sistemas de controle e acionamento, e, a nível operacional, como exemplo, a otimização do processo de lubrificação e refrigeração e diminuição do tempo de processamento.

Nos EUA, no ano de 2013, a indústria foi responsável por 31% do consumo total de energia, sendo 90% decorrente da indústria manufatureira, onde as máquinas-ferramenta contribuíram com 75% deste valor (EIA, 2013). De acordo com Ceratti (2019) e as projeções realizadas pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), estima-se que em 2027, no Brasil, o setor industrial será responsável por 47% do consumo total de energia, atuando a indústria metal mecânica em 24% deste total. Torna-se, então, cada vez mais necessário e relevante o estudo de estratégias otimizadas no processo de retificação, sendo este um dos que possui o maior gasto energético por volume de material removido, buscando-se utilizar mais eficientemente os recursos existentes. O consumo energético de máquinas-ferramenta é dividido basicamente em dois estágios: o estágio de consumo constante, no qual todos os sistemas auxiliares e sensores necessários ao funcionamento da máquina estão ligados e desenvolvem um determinado valor constante de potência; e o estágio de potência variável, que acontece quando o eixo-árvore e os sistemas de movimentação são ligados para a retirada efetiva de material (HACKESTEINER *et al.*, 2018; PELEGRINO, 2018).

Zhou *et al.* (2017) ressaltam que processos com boa eficiência energética não devem sacrificar fatores como a qualidade do produto, desgaste da ferramenta e produtividade, e Linke *et al.* (2013) apontam que a avaliação da sustentabilidade em operações de retificação ainda está em seu início e que minimizar o consumo de energia é uma questão central.

Pesquisadores têm encontrado diferentes fatores que podem ser otimizados para diminuir o consumo energético e os impactos ambientais provenientes do processo de retificação, como a diminuição do desgaste do rebolo, da utilização de fluido refrigerante, do tempo de processamento, entre outros. Li (2012) mostrou que

o aumento da taxa de remoção de material diminui o tempo de processamento e, conseqüentemente, diminui a energia gasta, aumentando a eficiência energética da retificação, mas este aumento compromete a qualidade superficial da peça. Além disso, foi observado um menor gasto energético devido à menor necessidade de dressagem utilizando um rebolo de CBN, já que seu desgaste foi menor que o de óxido de alumínio (Al_2O_3), além de conferir uma melhor rugosidade superficial da peça em taxas maiores de remoção de material.

Salonitis (2015) retificou o material 42CrMo4 com superfície tratada termicamente com diferentes parâmetros de corte e concluiu que a variação destes não influenciou significativamente a energia consumida. O único fator que cooperou para a redução do consumo foi a condição de corte que exigiu um menor número de passes e, conseqüentemente, reduziu o tempo de processo. Hacksteiner *et al.* (2018) encontraram os melhores valores de eficiência energética para as maiores taxas específicas de remoção de material e maiores velocidades de corte, quando o tempo de processamento foi diminuído. Neste trabalho, o rebolo de CBN também teve um melhor rendimento em relação ao rebolo de Al_2O_3 devido à sua capacidade de operar com maiores profundidades de corte e taxas de remoção.

Denkena *et al.* (2005) afirmam que o benefício de reduzir o tempo de ciclo em processos de retificação de acabamento é muito mais interessante do que reduzir as forças de retificação, o que, na verdade, é responsável apenas por uma pequena parte do consumo total de energia de uma retificadora. O efeito é ainda mais significativo porque não apenas o consumo de energia da retificação é reduzido, mas o tempo de processo mais curto também reduz o tempo de operação para bombas de refrigeração e dispositivos de filtragem, unindo o fator econômico e ambiental da otimização.

A utilização de fluido lubrificante é responsável por boa parcela dos custos gerais em processos de fabricação, sendo as altas cargas térmicas geradas danosas tanto à ferramenta quanto à peça, impossibilitando que o processo seja feito a seco (HACKSTEINER *et al.*, 2018). Denkena *et al.* (2005) afirmam que um dos principais caminhos para melhorar a ecoeficiência da retificação é a otimização do sistema de distribuição de fluido lubrificante, diminuindo a quantidade de fluido requerida e o consumo de energia elétrica do sistema. Após monitorar diferentes subsistemas da máquina durante a retificação, Salonitis (2015) concluiu que 75% da energia total consumida no processo é devida à alimentação de fluido

lubrificante e ao eixo do rebolo, sendo 40% proveniente das bombas de fluido. Hacksteiner *et al.* (2018) observaram que 62% do consumo ocorre pelas bombas. Heinzl e Kolkwitz (2019) concluíram que, na retificação plana de um aço AISI 4240 com rebolo de óxido de alumínio, pode-se aumentar a eficiência energética com a redução da vazão de fluido combinada a uma taxa constante de remoção de material, se a peça não sofrer danos, ou com o aumento da vazão acompanhado de maiores taxas de remoção de material.

Priarone (2016) avaliou a otimização do consumo energético do processo de retificação de canais e sua influência sobre a qualidade. Os parâmetros de corte foram variados, bem como o tipo de ligante do rebolo, sendo o grão abrasivo de óxido de alumínio. A potência foi medida durante os testes e a rugosidade média Ra foi utilizada para a avaliação da qualidade. Observou-se que uma menor rugosidade pode ser obtida com o rebolo de ligante resinoide, enquanto o menor consumo energético, com o ligante vitrificado, por possibilitar um processo mais rápido e com menor número de passes.

Com as experiências obtidas na literatura, será possível traduzir de maneira mais rica os efeitos causados pela variação dos parâmetros de corte e tipo de rebolo sobre as forças de corte, qualidade do inserto retificado e finalmente sobre a eficiência energética do corte. Espera-se que o fator de primordial influência sobre o consumo energético seja a diminuição no tempo de processamento, mas em contrapartida a qualidade do inserto seja prejudicada.

2.2. RETIFICAÇÃO DE METAL DURO

García *et al.* (2019) apontam que aproximadamente 65% da produção mundial de metal duro está relacionada à fabricação de ferramentas de corte e, dentre os materiais de ferramenta, o metal duro é responsável por 50% do mercado. O carbeto de tungstênio (WC) tem sido amplamente utilizado na indústria de manufatura para muitas aplicações, como moldes e matrizes, ferramentas de corte e componentes e revestimentos resistentes ao desgaste, devido à sua alta dureza e resistência à fratura (JIA *et al.*, 1998; HEGEMAN *et al.*, 2001). Ke *et al.* (2019) afirmam que os carbetos de tungstênio com matriz de cobalto (WC-Co) possuem combinação de alta dureza e boa tenacidade à fratura, o que é um requisito indispensável para aplicações industriais, mas estas características tornam seu

processo de produção um grande desafio. Neste contexto, a retificação é uma etapa chave para o acabamento de ferramentas de metal duro (YANG *et al.*, 2017).

Nos experimentos de Hegeman *et al.* (1970), constatou-se que o mecanismo de remoção de material ocorre por meio de trincas e pulverização de grãos de WC, mas também se observou o espalhamento da fase Co. Já os testes de Zelwer e Malkin (1980) mostraram que a retirada de material pode ocorrer com deformação plástica, gerando cavacos muito próximos de um metal. Uma grande quantidade de deformação plástica também foi observada por Yang *et al.* (2017). Nos testes de retificação com um único grão em peças de WC-Co, Wirtz *et al.* (2017) identificaram trincas em grãos de WC, rompimento, abaulamento, descamação e rupturas contínuas, sendo que a presença de trincas aumentou consideravelmente após a transição dúctil-frágil na remoção de material. De forma mais geral, Hegeman *et al.* (2001) concluíram que o mecanismo de remoção de material na retificação de WC-Co com rebolo de diamante depende diretamente do tamanho do grão abrasivo e do tamanho dos grãos de WC na estrutura.

Ren *et al.* (2009) e Cruz *et al.* (2021) observaram na prática o efeito escala citado anteriormente. Quanto menor a espessura de cavaco e maior o tamanho de grão de WC, maior era a energia específica de corte. Zhan e Xu (2015) notaram que na retificação do metal duro a seco, com grão abrasivo de diamante, a redução da espessura do cavaco indeformado com o aumento da velocidade de corte leva a uma remoção de material mais dúctil e exige mais energia. Complementarmente, Abdulah *et al.* (2009) mostraram que, com o aumento da velocidade de corte e consequente redução da espessura de cavaco, são diminuídas as forças por grão e o desgaste do rebolo.

Em relação à qualidade da peça, na retificação da liga WC-9%Co, Beju e Brindasu (2015) verificaram aumento da rugosidade com o aumento da profundidade de corte e da velocidade de avanço, mas notaram também a redução da rugosidade com a diminuição do tamanho de grão de diamante. Com o aumento da velocidade de corte, houve uma ligeira diminuição da rugosidade, devido à maior propensão à deformação plástica durante a retificação. Baska *et al.* (2018) retificaram ferramentas de corte de metal duro com diferentes velocidades de avanço (entre 20 e 260 mm/min) e observaram que, à medida que ela aumentava, também aumentava a incidência de marcas cada vez mais expressivas de rugosidade juntamente com o aumento da incidência de lascamentos. Andreas *et al.*

(2012) constataram que, quanto maior a taxa de remoção, pior é a qualidade da superfície, e para se obter uma superfície de qualidade favorável e altas tensões residuais compressivas, estratégias de retificação com baixo avanço e altos valores de profundidade devem ser preferidas.

Bierman e Würz (2009) mostraram que, na retificação de metal duro, maiores valores de velocidade de corte levam a uma menor rugosidade final. Yin *et al.* (2005) identificaram uma redução significativa na rugosidade final na retificação de WC-Co quando a espessura de cavaco foi diminuída para a escala nanométrica.

No trabalho de Klocke *et al.* (2016) foram realizados testes de remoção de material com um único grão abrasivo e notou-se que quanto maior a porcentagem de cobalto na matriz, maior era a tenacidade à fratura e maior a espessura de cavaco crítica que promove a transição entre o regime dúctil e frágil de corte. Jia (1996) demonstrou que a resistência à abrasão da liga WC-Co pelo diamante aumenta com a dureza do material e diminui com o tamanho do grão de WC.

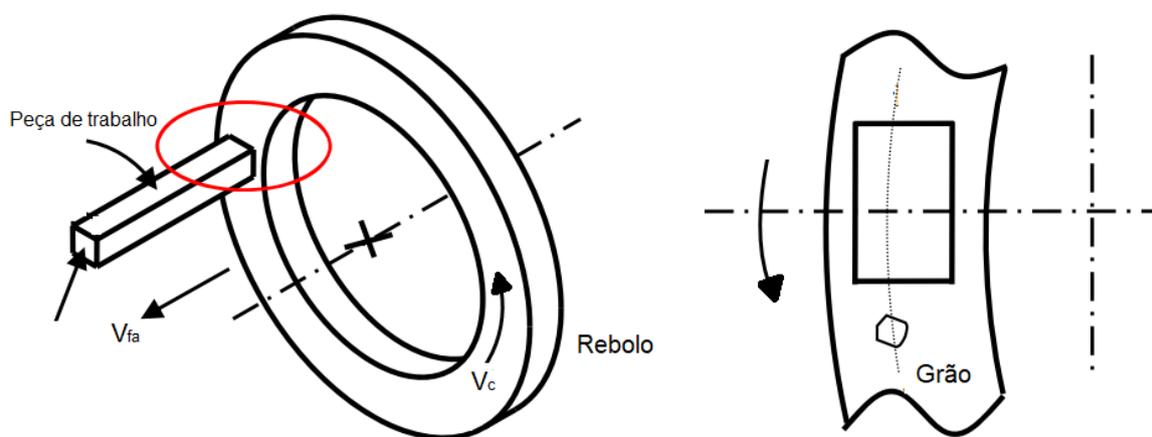
Não deixando de se levar em conta que a composição e as características microestruturais da liga WC-Co influenciam o acabamento da peça, pode-se abstrair da literatura boas práticas para a obtenção de uma qualidade superficial superior, como a aplicação de menores grãos abrasivos do rebolo, de menores velocidades de avanço e maiores velocidades de corte. Espera-se observar o efeito da transição de retirada de material do regime dúctil para o frágil por meio da energia específica de corte juntamente com a qualidade do inserto, de forma que a energia específica diminua com o crescimento da espessura de cavaco por grão e em contrapartida os valores de rugosidade de superfície e de aresta aumentem.

2.3 RETIFICAÇÃO DE INSERTOS

De acordo com Wirtz *et al.* (2017), as ferramentas de corte feitas de metal duro devem ser usinadas após a sinterização, devido ao empenamento e encolhimento induzidos pelo processo. As propriedades do metal duro restringem fortemente a seleção de possíveis tecnologias de usinagem, de modo que, quando são necessários acabamentos superficiais finos, a usinagem é feita por retificação, utilizando-se preferencialmente rebolo com grão abrasivo de diamante. Neste contexto, há ainda a necessidade da preparação específica das arestas de corte da ferramenta, o que confere a ela maior vida útil e capacidade de gerar bom

acabamento superficial. Geralmente, a operação utilizada para dar acabamento a insertos de corte corresponde à retificação plana transversal de mergulho (Figura 2), que oferece a cinemática adequada e permite o acabamento das superfícies e arestas de corte em uma única fixação (VENTURA *et al.*, 2014).

Figura 2 - Retificação plana transversal de mergulho



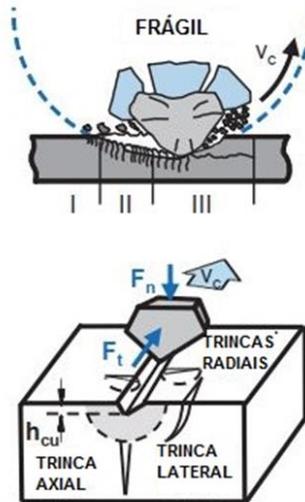
Fonte: Adaptado de Feng *et al.* (2021)

O processo de retificação das ferramentas provoca alterações significativas na superfície, por deformação, microtrincas e tensões residuais, sendo então necessário o estudo das melhores estratégias de corte para que a qualidade da aresta e superfícies retificadas não seja comprometida (BASKA *et al.*, 2018; TÖNSHOFF *et al.*, 2001).

Em geral, os materiais de fabricação dos insertos são frágeis e de difícil usinabilidade. Denkena *et al.* (2014) apontam que a retificação de materiais frágeis é dominada pela formação de micro trincas e ruptura de fragmentos do material. Com a penetração das arestas dos grãos abrasivos, são formadas trincas laterais (responsáveis pela remoção de material), trincas radiais e axiais (responsáveis por danos permanentes na superfície), como pode ser observado na Figura 3. Tönshoff *et al.* (2001) recomendam que, para se alcançar uma alta qualidade de aresta de corte, é necessário reduzir a carga mecânica durante a retificação por meio de rebolos com granulometria mais fina. Nesta mesma direção, Ventura *et al.* (2013)

concluíram que, na retificação de insertos de PCBN, deve-se escolher cuidadosamente o tipo de rebolo, já que o tamanho de grão influencia diretamente a espessura de cavaco por grão e, por fim, a qualidade do inserto.

Figura 3 - Remoção de material no regime frágil



Fonte: Adaptado de Klocke *et al.* (2016)

Cruz *et al.* (2020) avaliaram os efeitos da variação dos parâmetros de corte na retificação de insertos da liga WC-5%Co. Como resultado, a variação da velocidade de corte e avanço não teve influência significativa sobre a rugosidade e qualidade da aresta. Foi observado ainda que o aumento da espessura de cavaco, por gerar remoção de material no modo frágil, leva a um menor consumo energético. Em contrapartida, a superfície final teve maiores valores de rugosidade e presença de trincas. Houve um ligeiro aumento da rugosidade com a utilização do rebolo com ligante vitrificado devido ao menor número de arestas ativas e maiores valores de temperatura em função do atrito quando comparado com o ligante resinoide. Denkena *et al.* (2014) também não observaram influência significativa da variação da velocidade de corte e de avanço na qualidade dos insertos de PCBN retificados com rebolo de diamante e ligante resinoide. Já Ventura *et al.* (2013) perceberam, na preparação de arestas de insertos de PCBN, um leve aumento da incidência de lascamentos nas arestas com o aumento da velocidade de avanço e redução da velocidade de corte.

Como já citado, o rebolo possui uma grande quantidade de grãos com

geometrias e disposições aleatórias, o que torna a análise do processo muito difícil. O caminho para a sua simplificação é tomar como exemplo a ação de um único grão em sua passagem pela superfície do material. Nesse sentido, o modelo de espessura média de cavaco por grão é capaz de determinar o quanto o grão penetra no material e, portanto, a espessura do cavaco gerado de acordo com as condições de corte utilizadas na retificação transversal plana de mergulho. Denkena *et al.* (2014) afirmam que a espessura de cavaco por grão descreve muito bem as relações de contato entre rebolo e peça, permitindo a caracterização da influência da combinação de diferentes parâmetros de corte.

Na retificação de materiais frágeis, como o vidro, Bifano *et al.* (1991) demonstraram que espessuras de cavaco menores que um determinado valor limite favorecem a remoção de material no modo dúctil, já que a energia para se deformar a superfície plasticamente será maior do que aquela necessária para a propagação da trinca, livrando o material do regime frágil, que é prejudicial à qualidade da superfície.

Na retificação de chanfros ao longo do raio de ponta de insertos de PCBN, Ventura *et al.* (2014) notaram maior incidência de lascamentos nas regiões onde a espessura de cavaco por grão era maior. Em um trabalho anterior, Ventura *et al.* (2013) mostraram que pequenos grãos de diamante levam a uma melhor qualidade da aresta da pastilha de PCBN, pois uma diminuição do tamanho do grão reduz a espessura média de cavaco por grão e, conseqüentemente, as forças por grão.

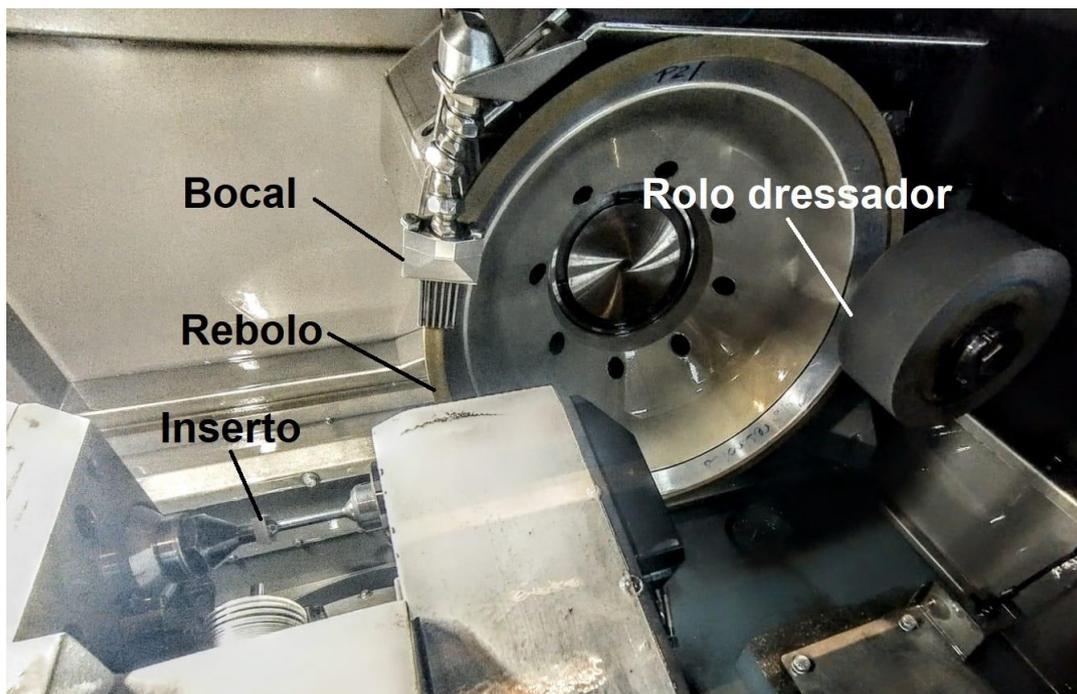
Com isso, a menos da cinemática do processo, que leva a uma formulação específica para o cálculo da espessura média de cavaco por grão, que, por sua vez, contribui para uma maior compreensão da influência das condições de processo sobre a qualidade do inserto, verifica-se que os conceitos gerais reportados pela literatura para diferentes processos de retificação também são válidos neste caso. Adicionalmente, quando se analisa a retificação de insertos, não apenas a superfície deve ser levada em conta, mas também a qualidade das arestas geradas, já que lascamentos e irregularidades podem prejudicar seu desempenho quando o inserto é utilizado em processos de usinagem.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ENSAIOS DE RETIFICAÇÃO

Para análise da eficiência energética do processo e avaliação da qualidade dos insertos de corte produzidos, foram retificadas as superfícies de folga de insertos de metal duro com geometria SNGN1204- (quadrado, sem raio de ponta e sem preparação de aresta) e composição WC-5%Co com a aplicação de óleo mineral integral como fluido lubrificante. Foi utilizada uma máquina retificadora para preparação de insertos Agathon DOM Plus, com rotação máxima de 2400 rpm e potência máxima de 16 kW, equipada com rebolo e dressador do tipo copo, como demonstrado na Figura 4, a qual está alocada no Laboratório de Processos de Fabricação (LPF) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

Figura 4 - Sistema de retificação



Fonte: Próprio autor

Tendo em vista o menor efeito da velocidade de avanço axial na qualidade do inserto, decorrente da pequena quantidade de material removido, associada à aceleração e desaceleração da máquina, e do aumento aproximadamente linear das

forças com maiores valores desse parâmetro, este fator foi variado apenas em dois níveis extremos ($v_{fa} = 2$ e 12 mm/min). Já a velocidade de corte, em função de sua magnitude elevada e influência significativa sobre a potência e a qualidade do inserto, foi variada em três níveis ($v_c = 12, 40$ e 60 m/s). A vazão de fluido lubrificante foi variada em dois níveis, já que o controle manual através do ajuste da válvula de saída alterou muito pouco seu valor. Sendo assim, a vazão foi variada em um nível máximo e um mínimo ($\dot{Q} = 16,2$ e $12,6$ l/min).

Durante os testes, foi retificada uma camada de $0,1$ mm de cada lado do inserto, resultando em um volume removido de aproximadamente 23 mm³. A combinação dos parâmetros de retificação (12 experimentos) foi testada para cada tipo de rebolo, os quais possuem tipo de abrasivo (diamante) e concentração ($C100 = 0,88$ g/cm³) constantes: rebolo com grão abrasivo de 15 μ m e ligante resinoide (D15R); rebolo com grão abrasivo de 15 μ m e ligante vitrificado (D15V); rebolo com grão abrasivo de 46 μ m e ligante resinoide (D46R); rebolo com grão abrasivo de 46 μ m e ligante vitrificado (D46V). A investigação da influência do tipo de rebolo esteve ligada ao fato de que uma combinação de menor tamanho de grão e ligante resinoide permite redução dos valores de rugosidade, mas eleva a energia específica, devido à menor espessura do cavaco e à maior quantidade de grãos ativos, enquanto o contrário é observado para uma combinação entre maior tamanho de grão e ligante vitrificado (VENTURA *et al.*, 2013).

A fim de se garantir a topografia inicial da camada abrasiva, o rebolo foi dressado com condições constantes: velocidade tangencial do dressador $v_{cd} = 10$ m/s, velocidade de avanço axial do dressador $v_{fad} = 3$ μ m/s, velocidade de corte do rebolo durante a dressagem $v_c = 20$ m/s e percurso total de dressagem $l_d = 15$ μ m. Rebolos com diferentes tamanhos de grão devem ser condicionados por dressadores com diferentes granulometrias, de modo a permitir que os grãos abrasivos do dressador removam material do ligante entre os grãos de diamante do rebolo. O rebolo D46 exigiu um rolo dressador com tamanho de grão 180#, enquanto o rebolo D15, um rolo com tamanho de grão 220#. Em ambos os casos, o dressador é composto por óxido de alumínio (Al₂O₃). Devido ao pequeno volume de material removido (~ 23 mm³), desprezou-se o desgaste do rebolo durante a retificação dos quatro lados do inserto e, assim, cada lado pôde ser considerado uma repetição do ensaio.

As componentes normal e tangencial da força de retificação foram obtidas por meio de um sistema de medição e tratamento de sinais de corrente elétrica (taxa de aquisição de 50 Hz) conectado diretamente aos motores da máquina, sendo maiores detalhes confidenciais e não compartilhados pelo fabricante. Com os valores de força tangencial (F_t), será possível calcular a energia específica de corte u_i para cada face retificada, com área A_i , por meio da Equação 1. De acordo com Cruz (2021), este valor de energia pode ser utilizado como um parâmetro da eficiência do corte e depende principalmente da afiação dos grãos e da usinabilidade do material.

$$u_i = \frac{F_t \cdot v_c}{v_{fa} \cdot A_i} \quad (1)$$

3.2 CÁLCULO DA ESPESSURA DE CAVACO POR GRÃO

Cruz *et al.* (2020) adaptaram o modelo de Friemuth (1999) para levar em consideração o tipo de ligante e chegaram à Equação 2, na qual $C_1 = 4/3 \times (d_G)^{1/2}$, $C_2 = 1,5$ (fatores de correção para a geometria do grão, considerado esférico), d_G = tamanho médio do grão, v_{fa} = velocidade de avanço axial, v_c = velocidade de corte, N_k = número de arestas/volume (Equação 3) e f_c = fator de correção (1 para ligante resinoide e 0,7 para vitrificado, de acordo com Cruz *et al.* (2020)).

$$h = \left(\frac{1}{C_2 + 1} \right)^{\frac{1}{C_2}} \cdot \left[\frac{(C_2 + 1) \cdot v_{fa}}{N_{GV} \cdot f_c \cdot C_1 \cdot v_c} \right]^{\frac{1}{C_2 + 1}} \quad (2)$$

$$N_{GV} = \frac{6 \cdot c}{\rho \cdot \pi \cdot d_G^3} \quad (3)$$

As velocidades de avanço e de corte estão relacionadas à cinemática do processo, enquanto o tamanho do grão e a concentração contribuem para descrever a camada abrasiva do rebolo. Na Equação 2, c = concentração em massa do rebolo ($C100 = 0,88 \text{ g/cm}^3$), ρ = densidade do diamante ($3,52 \text{ g/cm}^3$) e

d_G = tamanho do grão.

3.3 CÁLCULO DA FORÇA POR GRÃO

As forças por grão durante a retificação de cada face F_{Gi} foram determinadas por meio da Equação 4, proposta por Cruz *et al.* (2021), que leva em consideração a quantidade aproximada de grãos ativos na camada abrasiva do rebolo.

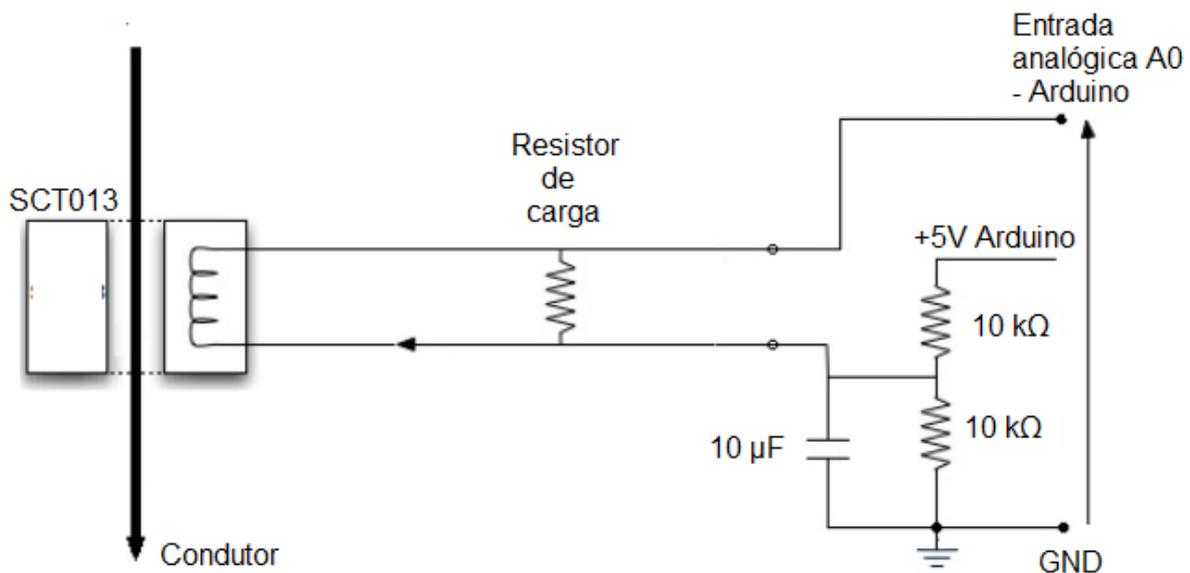
$$F_{Gi} = \frac{F_i}{N_k \cdot z \cdot A_i \cdot f_c} \quad (4)$$

Na equação, a variável F_i = força (tangencial ou normal) medida na retificação do i -ésimo lado, z = prostrusão do grão abrasivo ($\cong 0,3 \times d_G$, de acordo com Tönshoff e Denkena (2013)), A_i = área do i -ésimo lado e f_c = fator de correção (1 para ligante resinoide e 0,7 para vitrificado, de acordo com Cruz *et al.* (2020)).

3.4 MEDIÇÃO DE POTÊNCIA E CÁLCULO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A corrente elétrica requerida pela máquina durante o processo de retificação foi obtida por meio de um sensor de efeito Hall SCT013 (com capacidade de até 100 A), o qual funciona como um transformador de corrente. Este foi acoplado a uma das fases de alimentação de energia da máquina, cujo sistema é trifásico, com tensão entre fases de 220 V. A outra extremidade do sensor foi ligada a um circuito construído em uma *proto-board*, que teve por objetivo transformar o sinal de corrente fornecido pelo sensor (0 a 50 mA) em um sinal de tensão (0 a 5 V) para então ser processado pela placa Arduino MEGA 2560 a uma taxa de amostragem de 60 Hz (Figura 5). O circuito é composto por um resistor de carga de 330 Ω , responsável por transformar a corrente lida pelo sensor em um sinal de tensão variando entre 2,5 e -2,5 V. O capacitor de 10 μF juntamente com os dois resistores de 10 k Ω são responsáveis por adicionar 2,5 V ao sinal de tensão obtido, já que o Arduino não lê valores de tensão negativa, assim o sinal de tensão passa a variar entre zero e 5 V.

Figura 5 - Sistema de medição de potência



Fonte: Adaptado de <https://portal.vidadesilicio.com.br/sct-013-sensor-de-corrente-alternada/>

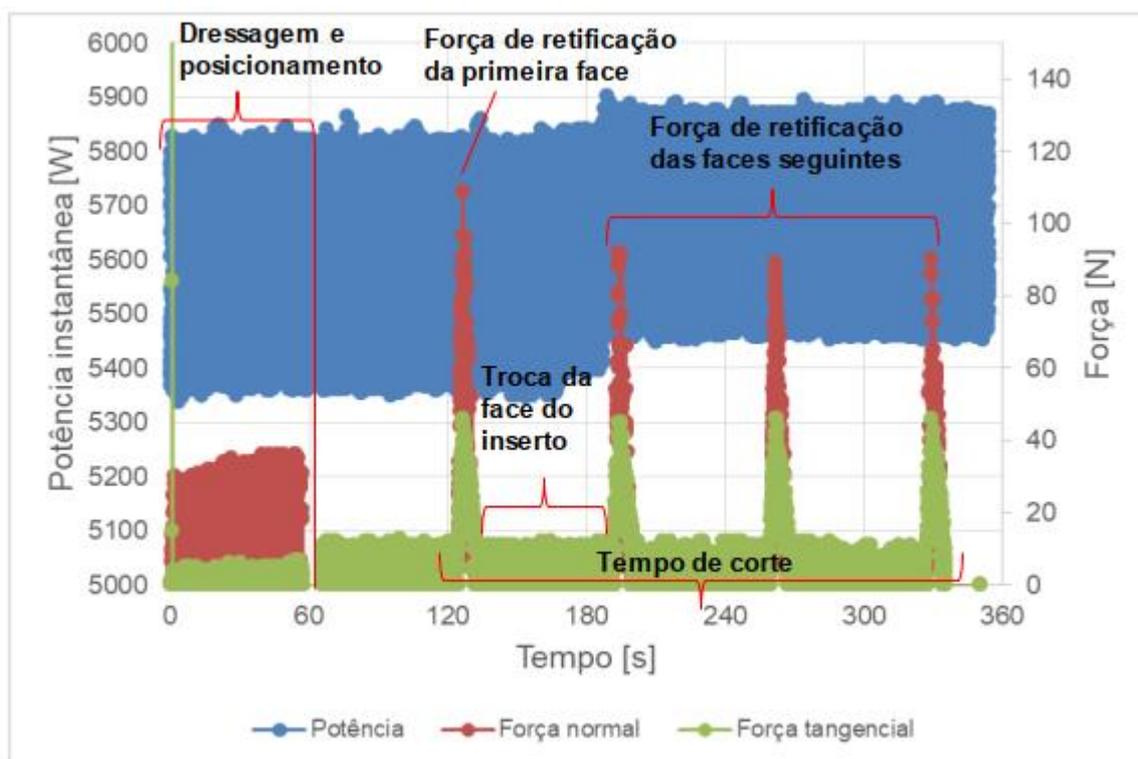
O programa foi responsável por calcular a corrente eficaz I_{rms} a partir de 80 leituras, de maneira a se obter maior precisão, e a potência instantânea P_i foi obtida pela Equação 5, sendo V a tensão entre fases padrão da rede elétrica do laboratório utilizado ($= 220 \text{ V}$). Por meio dela, pôde-se obter o consumo energético de cada teste realizado.

$$P_i = I_{rms} \cdot V \cdot \sqrt{3} \quad (5)$$

Durante os experimentos, a aquisição era disparada manualmente assim que o programa de retificação era iniciado, enquanto a ordem de parada era dada aproximadamente um segundo após o término da retificação. A fim de se identificar os níveis de potência referentes aos diferentes estágios do processo, para análise, os sinais adquiridos foram alinhados com os sinais das forças tangencial e normal medidas durante os respectivos testes, como exemplificado na Figura 6. Sabendo-se que nos 60 segundos iniciais são correspondentes ao processo de retificação do rebolo e medição e posicionamento do inserto, as forças de corte foram posicionadas após os 60 segundos iniciais, garantindo que assim que a potência

utilizada para os cálculos posteriores correspondesse ao período onde o corte acontece.

Figura 6 - Sinais de força e potência durante a retificação de inserto de metal duro com rebolo D15/vitrificado, $v_c = 60$ m/s, $v_{fa} = 2$ mm/min, $\dot{Q} = 12,6$ l/min e sistema de refrigeração de fluido ligado



Fonte: Próprio autor

O consumo energético de cada teste foi obtido pela multiplicação da potência média desenvolvida durante o momento em que o corte acontece pelo respectivo tempo de processamento que engloba a aproximação da ferramenta, corte da superfície e afastamento do rebolo para as quatro faces usinadas, assim como é apontado na Figura 6. Desde que o rebolo toca inicialmente a primeira face até o momento em que ele deixa de tocar a última face usinada são decorridos 350 segundos com a velocidade de avanço axial de 2 mm/s e 130 segundos com a velocidade de 12 mm/s, estes valores foram obtidos manualmente por meio dos gráficos de potência e forças de corte, subtraindo-se o valor de tempo do último ponto onde a força de corte cai para um valor constante na retificação da última

face, pelo tempo correspondente ao ponto onde a força de corte inicia seu aumento na retificação da primeira face. Foi constatado que esse valor de tempo se repetia para todos os gráficos testados e, portanto, se mostraram confiáveis na representação do tempo de corte. Como mostrado na Figura 6, os dados de potência medidos possuem muitos ruídos e percebeu-se que os valores requeridos correspondiam aos valores de pico. Assim, a potência média utilizada para o cálculo do consumo energético foi obtida por meio da média entre os valores de potência maiores que 5.700 W no intervalo de tempo correspondente ao tempo de corte, sendo obtido um desvio da ordem de no máximo 1%.

Obtidos os valores de potência durante a retificação P_i , estes foram relacionados à respectiva potência efetiva de corte P_c (Equação 6) para a obtenção da eficiência energética η , através da Equação 7.

$$P_c = F_t \cdot v_c \quad (6)$$

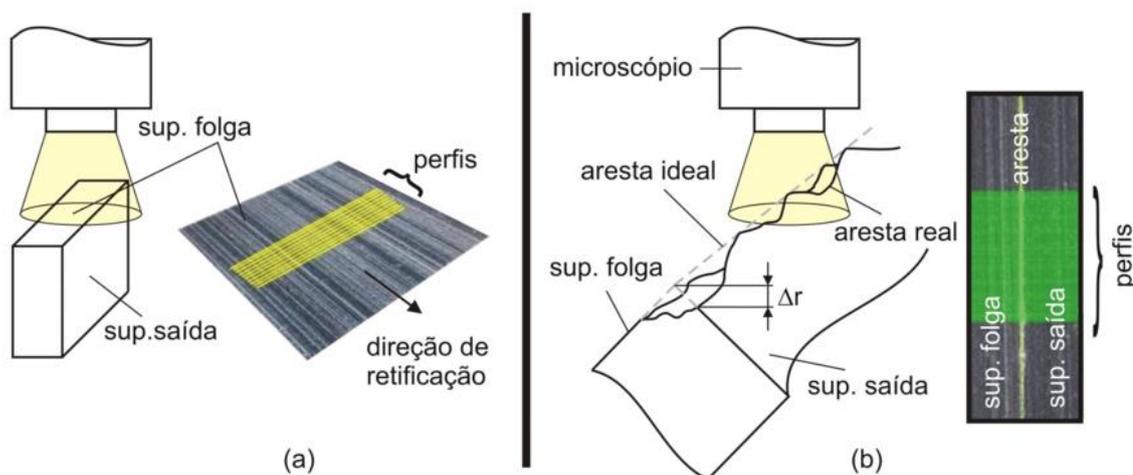
$$\eta = \frac{P_i}{P_c} \quad (7)$$

3.5 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ARESTA E DA SUPERFÍCIE DO INSERTO

Após os ensaios de retificação, os insertos tiveram sua integridade avaliada pelo microscópio Alicona InfiniteFocus SL (ampliação máxima de 500x com as lentes disponíveis), conectado a um computador pessoal com o software de tratamento de imagens Alicona Metrology Measurement.

Com base nos resultados obtidos no trabalho de Cruz *et al.* (2020), a superfície de folga dos insertos foi analisada por meio do parâmetro de rugosidade R_z (média das distâncias de pico a vale em cinco diferentes trechos), medido na direção perpendicular à direção de retificação, com a aplicação de 100 perfis (Figura 7a). Já a qualidade da aresta foi avaliada pelo parâmetro de rugosidade de aresta Δr , que corresponde à menor distância entre o perfil ideal da aresta (intersecção das superfícies de folga e de saída) e o perfil real (Figura 7b), também com a aplicação de 100 perfis por medição.

Figura 7 - Esquema para avaliação da (a) rugosidade na superfície de folga e (b) lascamento na aresta após o processo de retificação



Fonte: Próprio autor

3.6 CÁLCULO DO ÍNDICE DE SUSTENTABILIDADE

O mesmo método apresentado por Priarone (2016) será utilizado neste trabalho a fim de se analisar as condições de corte que possuam o melhor balanço entre a qualidade do produto final, no caso o inserto de corte, e o consumo energético. O índice de sustentabilidade (IS) é calculado pela Equação 8, onde Y_i corresponde ao parâmetro de qualidade (R_z ou Δr) obtido com o i -ésimo conjunto de condições de corte e Y' corresponde ao menor valor obtido entre todos os testes. A variável E_i corresponde ao consumo energético obtido pelo mesmo conjunto de condições de corte e E' corresponde ao menor consumo obtido entre todos os testes. Os parâmetros k_1 e k_2 atribuem pesos conforme o objetivo do índice de sustentabilidade e seguem o padrão da Equação 9. No presente estudo, foi atribuído valor 0,5 a ambos. Portanto, quanto mais próximo IS estiver da unidade, maior é o equilíbrio entre consumo energético e qualidade.

$$IS_i = \frac{1}{k_1 \cdot \frac{Y_i}{Y'} + k_2 \cdot \frac{E_i}{E'}} \quad (8)$$

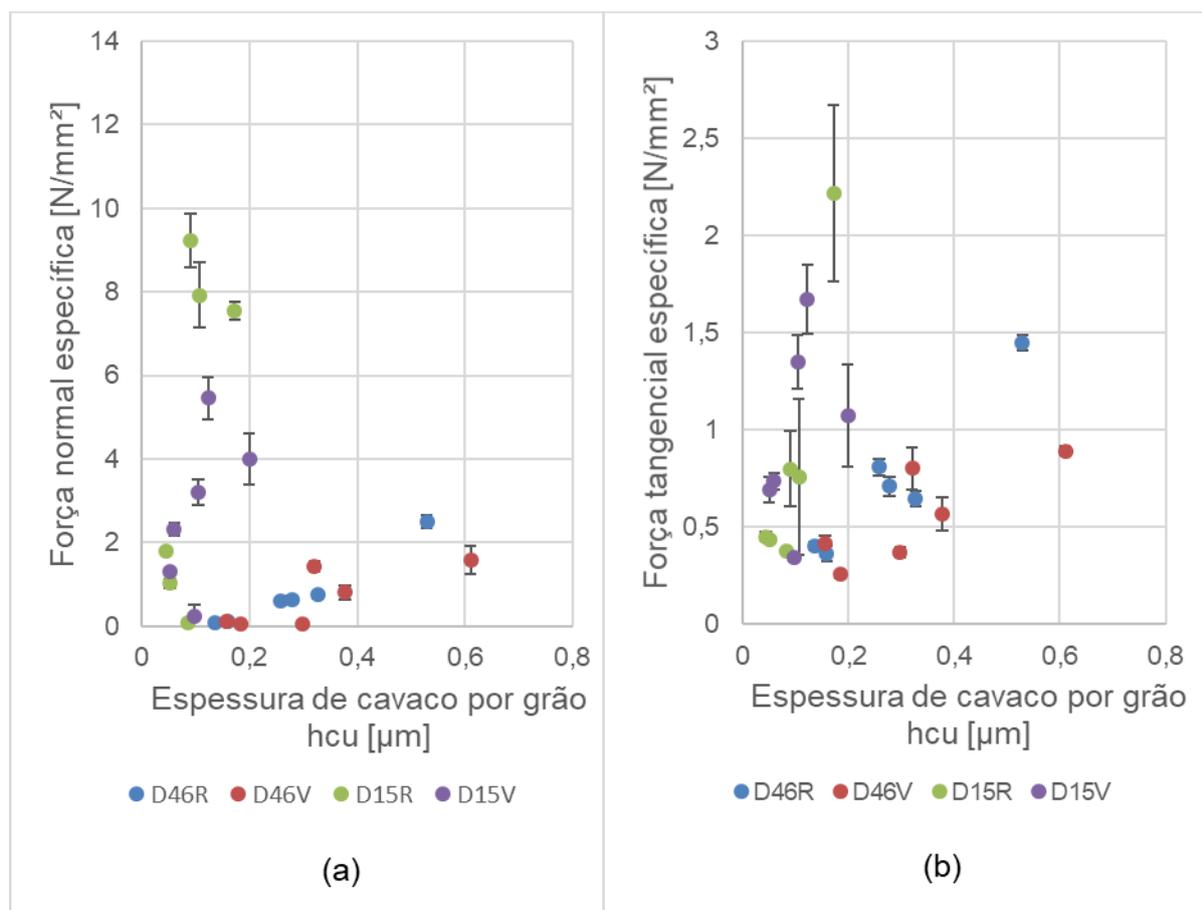
$$k_1 + k_2 = 1 \quad (9)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 FORÇAS DE RETIFICAÇÃO E ENERGIA ESPECÍFICA

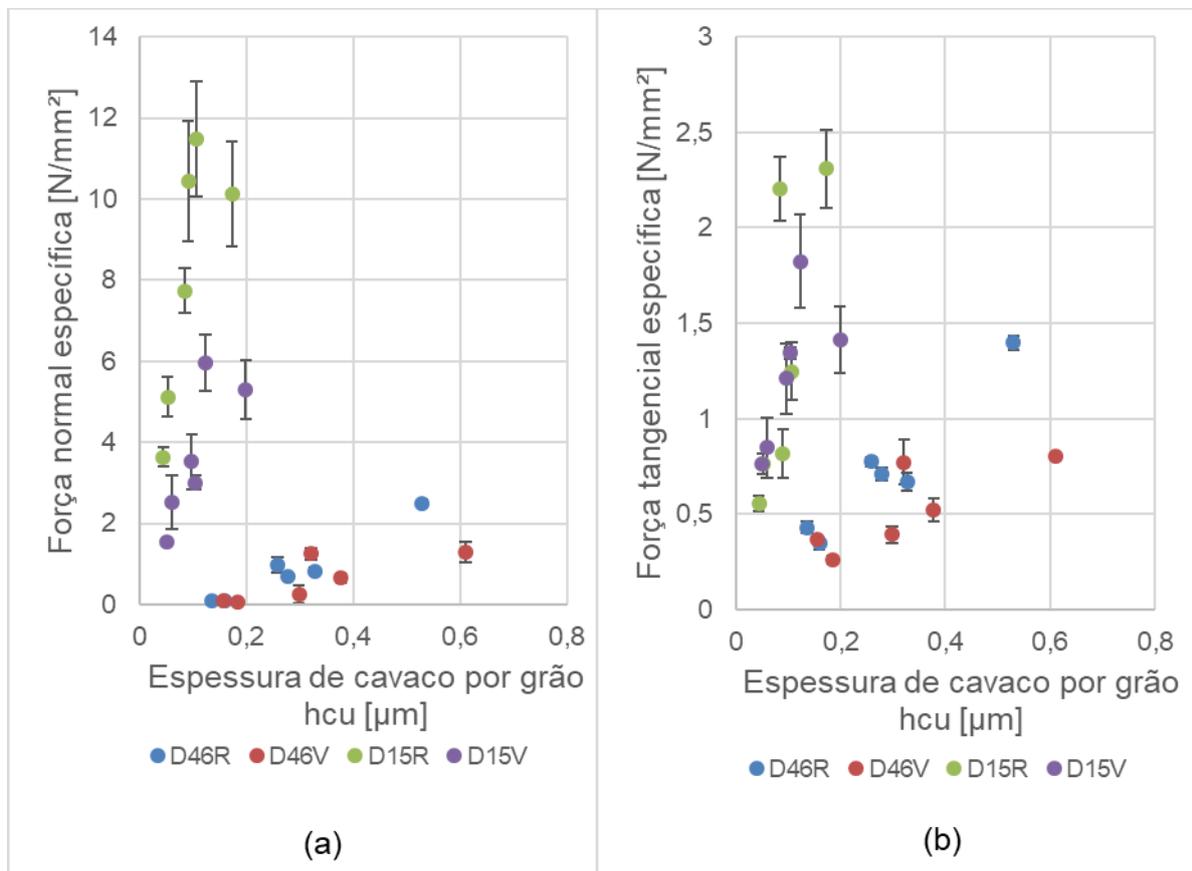
Após a retificação de determinado lado, o lado seguinte do inserto passa a apresentar uma área diferente, assim, para uma análise justa, as forças normal e tangencial foram divididas pela área correspondente, dando origem às forças normal e tangencial específicas, as quais podem ser visualizadas nas Figuras 8 e 9. Optou-se por utilizar a espessura de cavaco por grão no eixo das abscissas por esse parâmetro combinar as características do rebolo e as condições de corte, tornando a análise dos resultados mais clara.

Figura 8 - Forças específicas (a) normal e (b) tangencial em relação à espessura de cavaco por grão (testes realizados com vazão de fluido $\dot{Q} = 12,6$ l/min)



Fonte: Próprio autor

Figura 9 - Forças específicas (a) normal e (b) tangencial em relação à espessura de cavaco por grão (testes realizados com vazão de fluido $\dot{Q} = 16,2$ l/min)



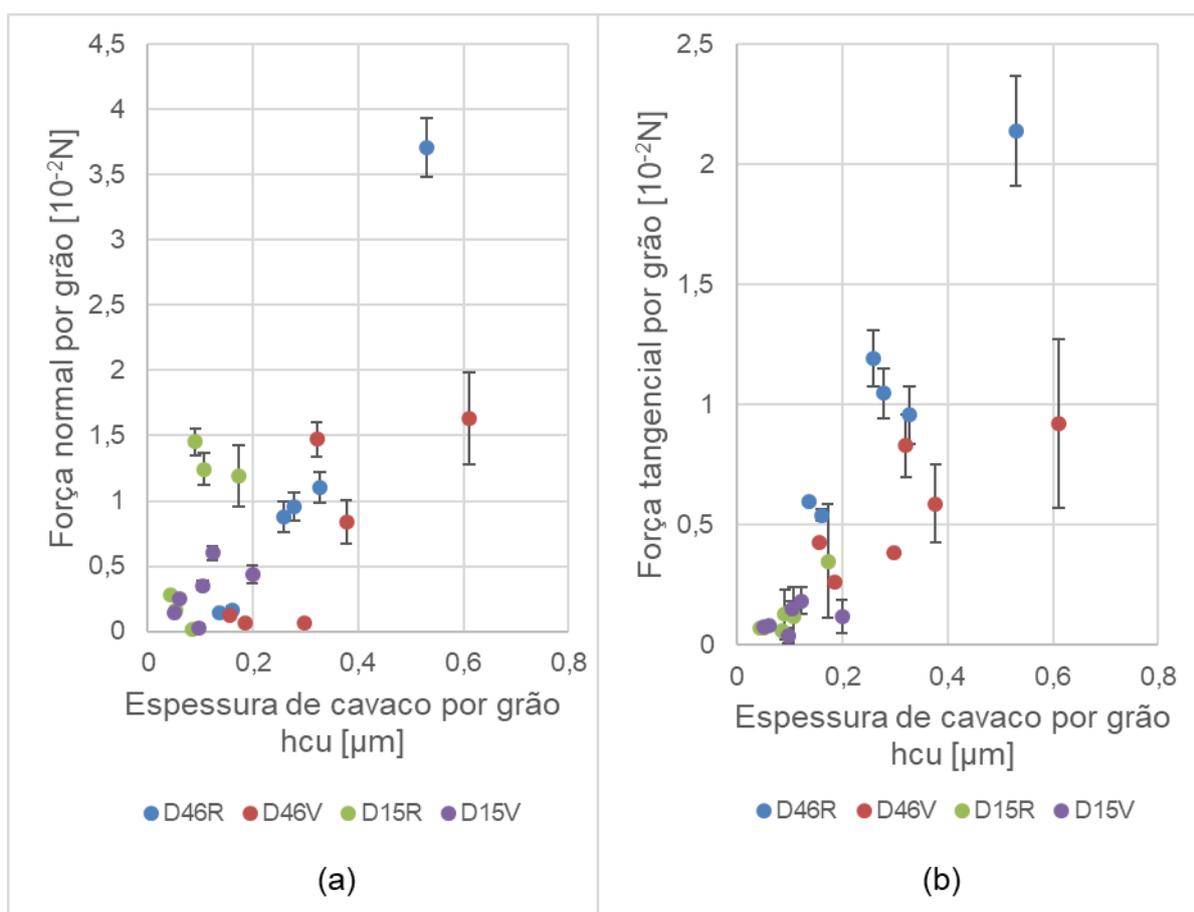
Fonte: Próprio autor

De modo geral, nota-se que, para os diferentes tipos de rebolo, o aumento da espessura de cavaco por grão leva ao aumento de ambas as componentes da força de retificação. Cinematicamente, tanto o aumento da velocidade de avanço quanto a redução da velocidade de corte levam a uma maior penetração do grão abrasivo na superfície e, conseqüentemente, a maiores cargas mecânicas.

Nota-se, porém, que os rebolos com diferentes tamanhos de grão geram diferentes tendências no crescimento das forças, as quais são maiores quando utilizada a granulometria D15 em comparação à D46, o que ocorre devido às diferentes quantidades de arestas ativas durante o corte. Cabe lembrar que, tendo os rebolos a mesma concentração nominal de massa de abrasivo por unidade de volume, grãos com menores volumes se encontram em maior quantidade. Assim, o aumento da espessura de cavaco por grão gera, no total, maiores esforços quando

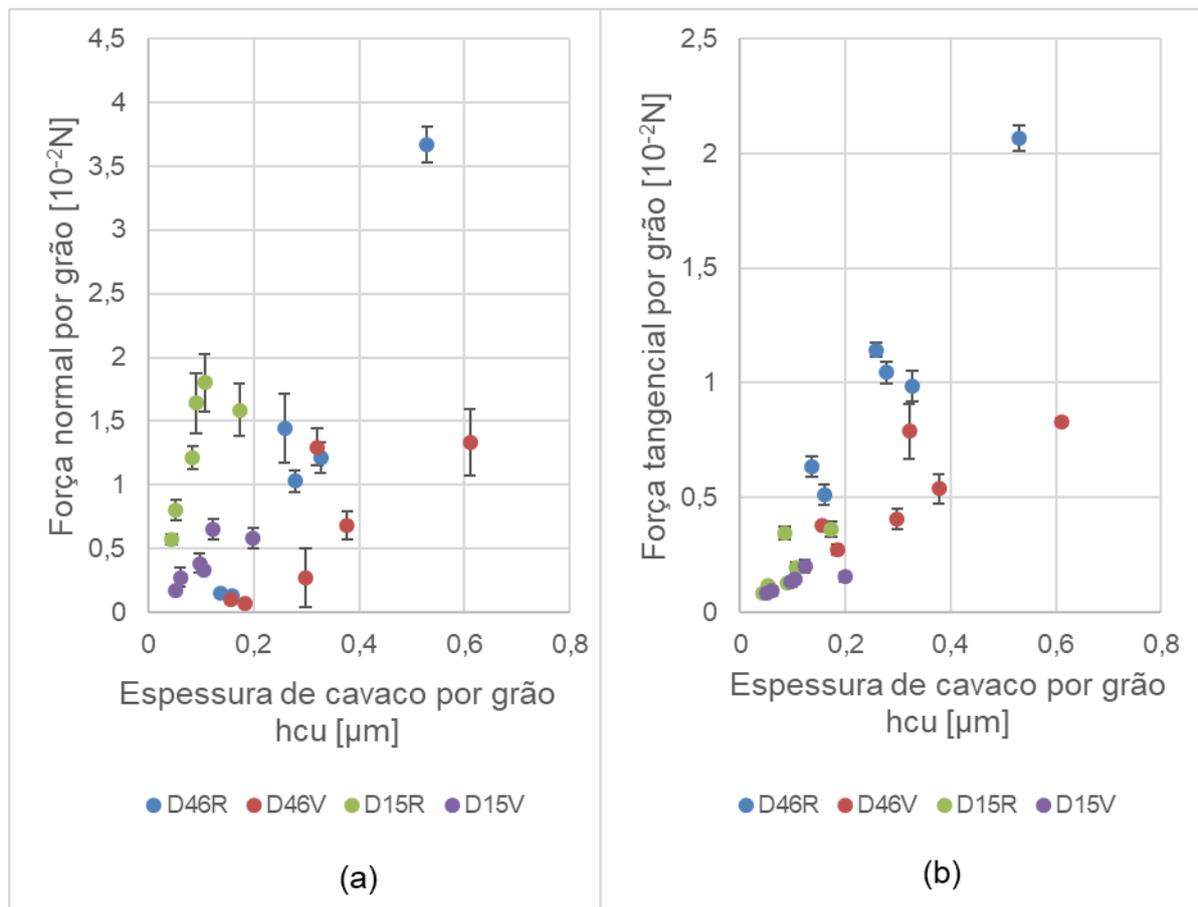
do uso de rebolos de menor granulometria como apontado pela literatura. Com o aumento da penetração do grão e, por conseguinte, dos esforços, o ligante resinoide tende a se deformar e aumentar sua área de contato real com a peça, causando maior número de arestas ativas e levando a uma maior taxa de crescimento das forças em relação aos rebolos com ligante vitrificado, o que é mais claramente observado para o rebolo com granulometria D46. Tal efeito também pode ser verificado com a dispersão dos resultados de força média por grão (Figuras 10 e 11), os quais deveriam apresentar uma tendência única, mas a formulação não consegue captar a alteração da quantidade de arestas ativas com a deformação do ligante.

Figura 10 - Forças médias por grão nas direções (a) normal e (b) tangencial em relação à espessura de cavaco por grão (testes realizados com vazão de fluido $\dot{Q} = 12,6$ l/min)



Fonte: Próprio autor

Figura 11 - Forças médias por grão nas direções (a) normal e (b) tangencial em relação à espessura de cavaco por grão (testes realizados com vazão de fluido $\dot{Q} = 16,2 \text{ l/min}$)



Fonte: Próprio autor

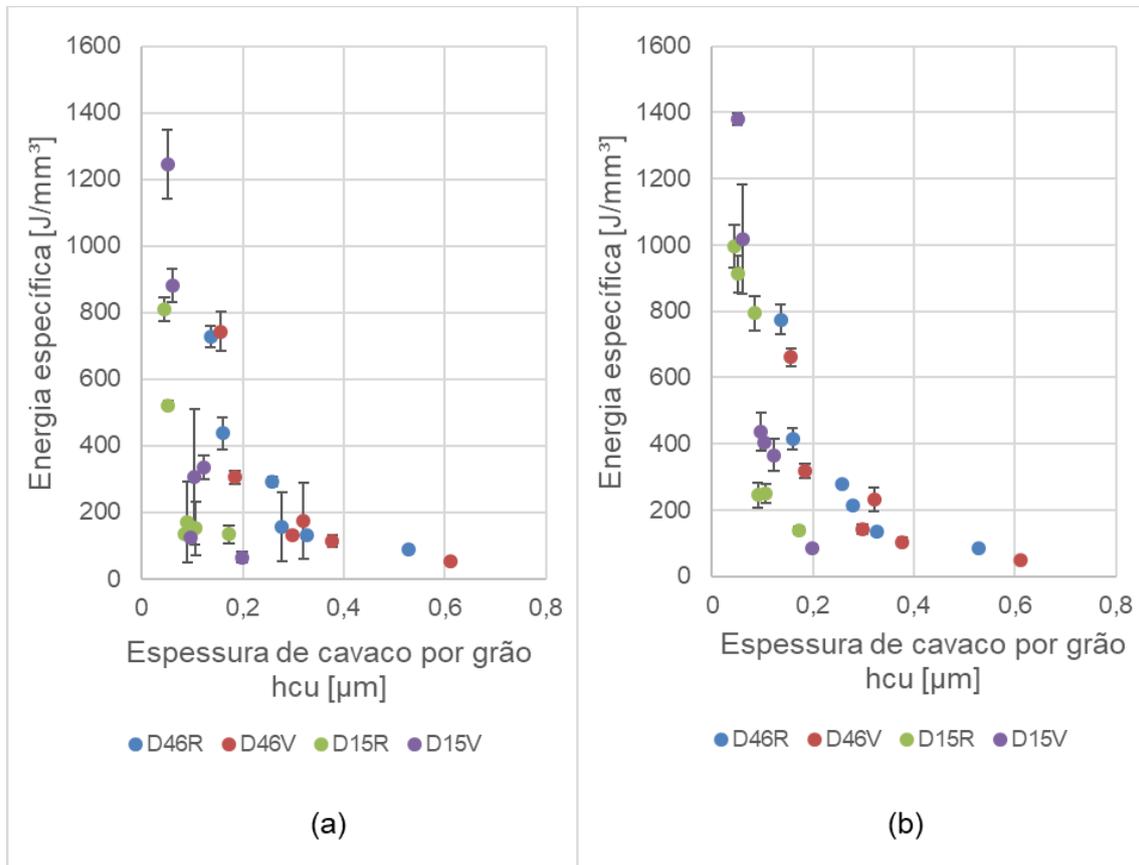
Observa-se novamente que o aumento da espessura de cavaco por grão provoca o crescimento das forças tangencial e normal por grão, mas diferentemente dos gráficos de força específica, são observados maiores valores de força e uma tendência de crescimento maior na retificação com os rebolos de granulometria D46. Isso está ligado ao fato de que rebolos com grãos maiores tendem a apresentar maiores protrusões e possuir menos arestas ativas durante o corte, aumentando assim as cargas por grão.

Forças por grão maiores associadas ao ligante resinoide se devem à maior dificuldade de penetração do grão abrasivo no inserto devido, como mencionado, à

deformação do ligante. Além disso, o ligante resinoide possui menos poros e maior capacidade de retenção de grãos em comparação ao vitrificado, o que gera menores protruções e dificulta ainda mais a penetração do grão. Tal efeito pode ser constatado pela diferença mais visível entre as forças normais produzidas por rebolos D15 com diferentes ligantes.

A energia específica de corte média considerando-se os quatro lados retificados de cada inserto nas diferentes condições pode ser observada na Figura 12. Nota-se que o aumento da espessura de cavaco por grão levou à diminuição da energia específica, semelhante ao que foi obtido no trabalho de Cruz *et al.* (2020). Uma das possíveis explicações corresponde ao efeito escala, que se baseia no fato de que quanto menor a quantidade de material a ser retirada, menores as chances de haverem defeitos em sua estrutura e, portanto, maior é a energia requerida para a formação do cavaco. Não foi observado novamente uma alteração perceptível nos valores de energia específica quando alterada a vazão de fluido lubrificante, a lubrificação e equilíbrio da temperatura foram semelhantes para os dois valores de vazão de forma que não houve influência sobre a energia consumida no corte.

Figura 12 - Energia específica média em relação à espessura de cavaco por grão: testes realizados com vazão de fluido (a) $\dot{Q} = 12,6$ l/min e (b) $\dot{Q} = 16,2$ l/min



Fonte: Próprio autor

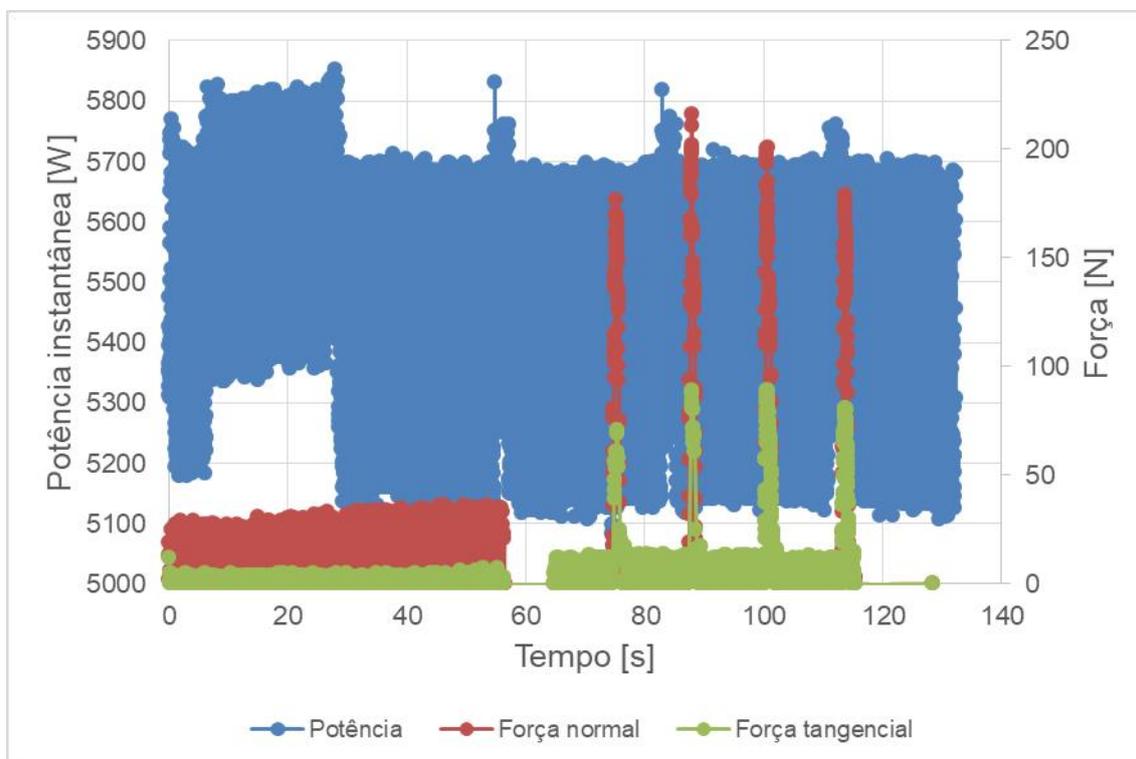
Os gráficos de energia específica permitem determinar a espessura de cavaco crítica, que limita a transição entre remoção dúctil e frágil. Na primeira, há grande consumo de energia (que aumenta exponencialmente com a diminuição da espessura de cavaco), já que o material deve ser deformado antes de sofrer ruptura, e obtenção de melhor qualidade superficial na peça; na segunda, a energia consumida é menor e varia menos com alterações da espessura do cavaco, já que o mecanismo de remoção se baseia na formação e propagação de trincas, o que acaba deteriorando a qualidade superficial do produto acabado. Por meio de uma análise visual dos gráficos, nota-se um valor de espessura crítica de aproximadamente 0,25 μm, sendo que a partir dela os valores de energia têm um grande decréscimo em relação aos anteriores e a curva tende a um valor constante.

4.2 POTÊNCIA, CONSUMO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Medindo-se a potência da máquina enquanto ligada, sem contato entre ferramenta e peça, foi possível observar que ela varia à medida que diferentes componentes são ligados ao longo do tempo, como a central de condicionamento de fluido lubrificador, o sistema de refrigeração da máquina, entre outros. Notou-se que a potência desenvolvida mantém valores entre 5600 W e 5800 W. A central de condicionamento de fluido, por exemplo, é acionada independentemente do processo de retificação, provavelmente por um sensor de temperatura do fluido lubrificador, e conta com bombas para a circulação de fluido, um sistema de refrigeração e uma centrífuga, responsável por filtrá-lo.

Não foi possível associar nenhuma alteração significativa da potência instantânea requerida pela máquina ao corte, mesmo com a variação dos parâmetros de processo e tipos de rebolo. A magnitude da potência requerida pelos componentes e sistemas citados acima acaba por reduzir a importância relativa da potência consumida pelo eixo-árvore e pelo processo de retificação. Como exemplo, observa-se na Figura 13 que a potência desenvolvida antes do momento do corte (60 segundos iniciais) é maior do que quando a retificação efetivamente ocorre. Isso mostra que, neste processo, o impacto da variação dos parâmetros de corte não está sobre a potência desenvolvida pela máquina, mas, sim, no tempo de processamento, assim como foi observado por Priarone (2016) na retificação de canais em ferramentas de aço rápido, que verificou que, mesmo com a variação do ligante do rebolo (resinoide e vitrificado) e das condições de corte, não houve alteração visível da potência e do consumo de energia, a não ser entre as condições que permitiram um menor número de passes e, conseqüentemente, um menor tempo de processamento.

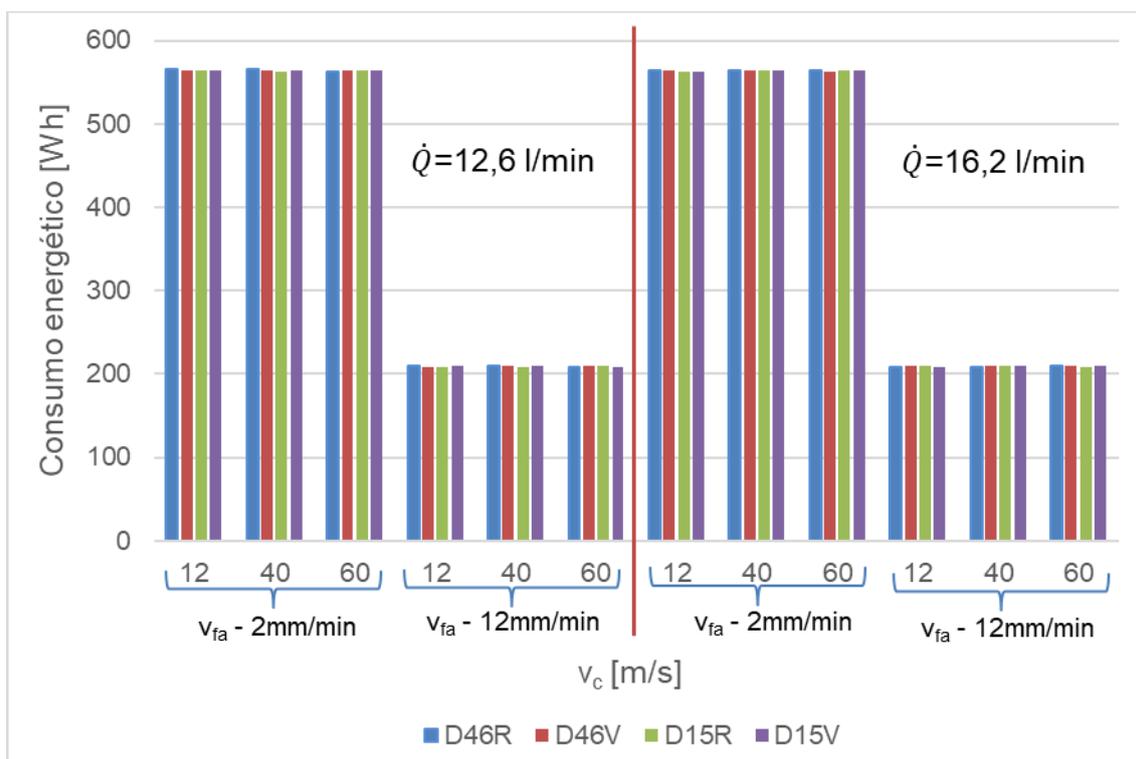
Figura 13 - Sinais de força e potência durante a retificação de inserto de metal duro com rebolo D15/vitrificado, $v_c = 60$ m/s, $v_{fa} = 12$ mm/min, $\dot{Q} = 12,6$ l/min e sistema de refrigeração de fluido desligado



Fonte: Próprio autor

Obtidas as curvas de potência em função do tempo, foi possível calcular o consumo energético de cada teste realizado (Figura 14). Nas mesmas condições de corte, não foi observada influência do tipo de rebolo utilizado ou da vazão de fluido lubrificador, sendo o único fator considerado determinante para o consumo a velocidade de avanço, pois, com seu aumento de 2 mm/min para 12 mm/min, o tempo de processamento diminuiu de 350 segundos para 130 segundos, resultando em uma diminuição média de 62,8% no consumo energético. A mudança nos valores de velocidade de corte também não exerceu influência sobre o consumo energético.

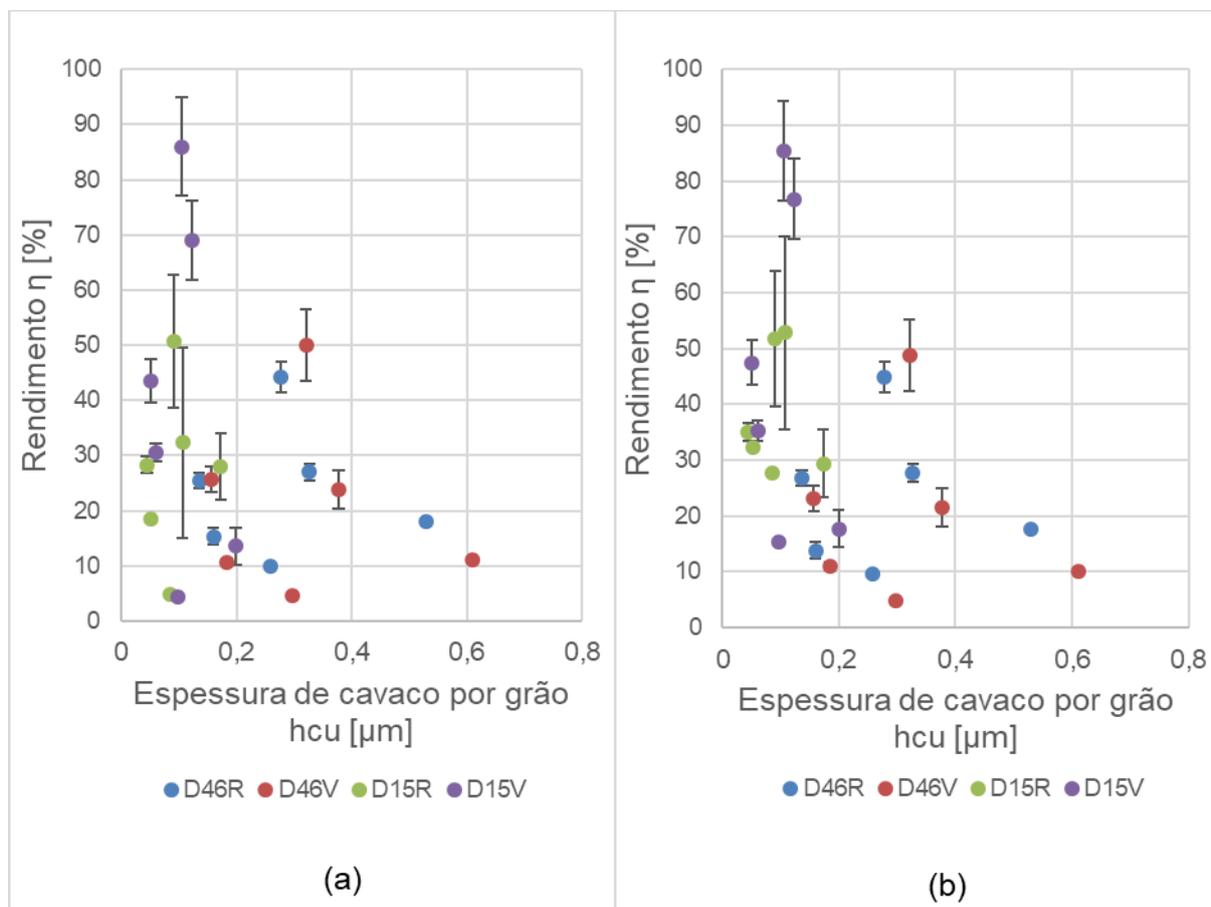
Figura 14 - Consumo energético para diferentes condições de retificação



Fonte: Próprio autor

A partir dos valores de força tangencial gerados durante a retificação dos insertos, foi possível calcular a potência de corte (Equação 6) e, juntamente à potência elétrica medida, calculou-se o rendimento energético médio para cada condição (Equação 7), mostrado na Figura 15.

Figura 15 - Rendimento médio do equipamento em relação à espessura de cavaco por grão: testes realizados com vazão de fluido (a) $\dot{Q} = 12,6$ l/min e (b) $\dot{Q} = 16,2$ l/min



Fonte: Próprio autor

Percebe-se inicialmente que os maiores rendimentos são obtidos com a utilização de rebolos com tamanho de grão D15 e eles crescem até uma espessura de cavaco por grão de aproximadamente 0,13 μm , a partir da qual há um rápido decréscimo e estabilização com elevada dispersão.

O aumento do rendimento com maiores espessuras de cavaco, indicando que maior parcela da energia fornecida à máquina está sendo efetivamente utilizada no processo, era esperado, devido à maior predominância do cisalhamento em relação ao sulcamento e ao atrito durante a formação do cavaco. Contudo, tal fenômeno não foi observado para toda a faixa testada e uma análise dos componentes do equipamento e seu consumo de energia deve ser realizada para maior compreensão da distribuição de energia durante a operação.

Embora não tenha havido tendência clara em relação à variação de potência elétrica com os diferentes parâmetros de retificação, nota-se certo aumento com maiores valores de espessura de cavaco por grão, que acabam, mesmo com o aumento das forças totais, equilibrando o rendimento médio para algo em torno de 30%. O fator mais visivelmente responsável pelo aumento do rendimento para cada rebolo testado é a velocidade de avanço, quando ela aumenta de 2 para 12 mm/min as forças de corte aumentaram para todos os casos e conseqüentemente a potência efetiva de corte, principalmente quando associado aos maiores valores de velocidade de corte. Novamente não foi observada influência da mudança na vazão de fluido lubrificadorrefrigerante.

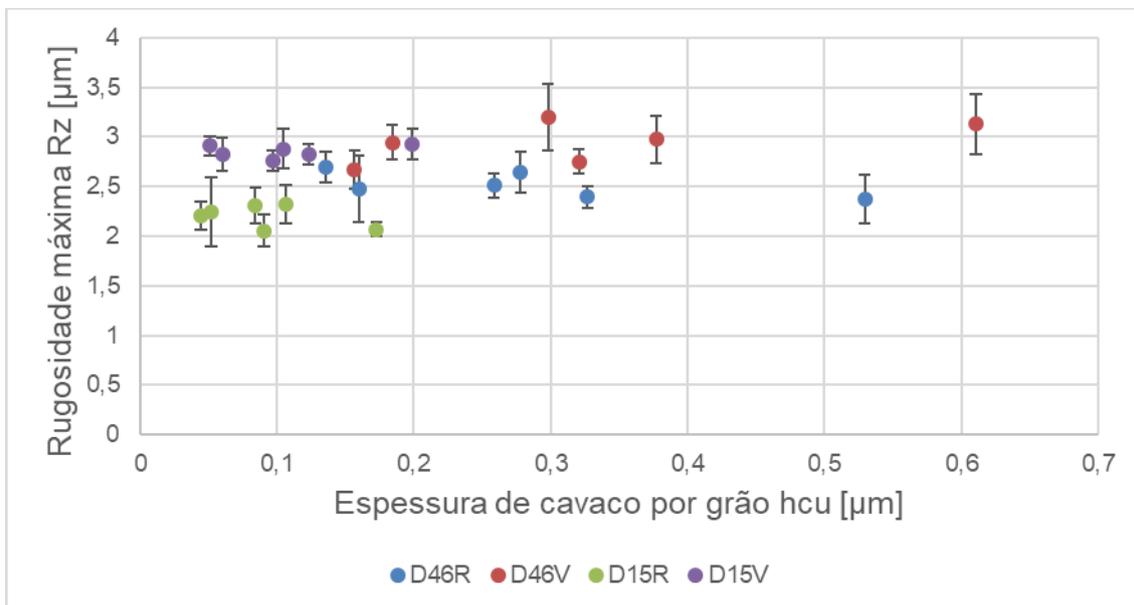
4.3 RUGOSIDADE DE SUPERFÍCIE E DE ARESTA

As Figuras 16 e 17 apresentam os valores médios de rugosidade máxima e os respectivos desvios padrão para cada inserto retificado com diferentes vazões de fluido lubrificadorrefrigerante. De modo geral, nota-se uma leve tendência de crescimento desta variável de saída com o aumento da espessura de cavaco por grão, que provoca maiores sulcos na superfície do inserto durante a passagem do grão abrasivo.

Um pequeno aumento da taxa de crescimento da rugosidade pode ser observado a partir da espessura aproximada de cavaco por grão de 0,25 μm , que corresponde à espessura crítica analisada junto ao comportamento da energia específica de corte. Tal resultado reforça a possibilidade de haver transição do processo para remoção frágil nessas condições.

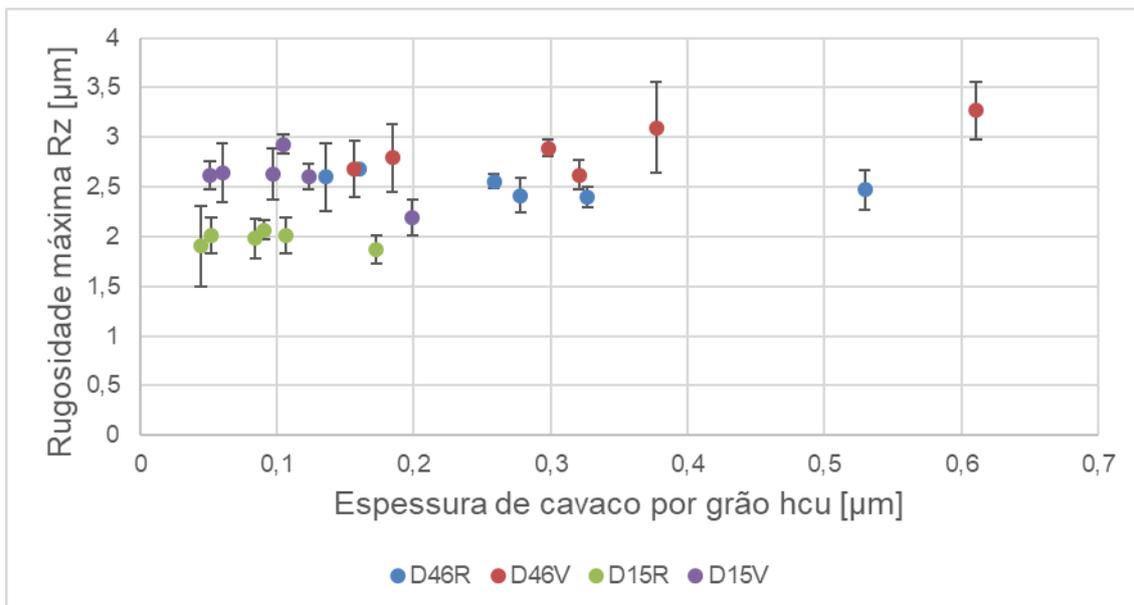
Em relação à variação da vazão de fluido lubrificadorrefrigerante, não foi observada influência significativa sobre a qualidade superficial dos insertos retificados, sendo a vazão mínima obtida com o ajuste da válvula de saída ainda suficiente para lubrificar e refrigerar o processo.

Figura 16 - Rugosidade máxima em relação à espessura de cavaco por grão (testes realizados com vazão de fluido $\dot{Q} = 12,6$ l/min)



Fonte: Próprio autor.

Figura 17 - Rugosidade máxima em relação à espessura de cavaco por grão (testes realizados com vazão de fluido $\dot{Q} = 16,2$ l/min)

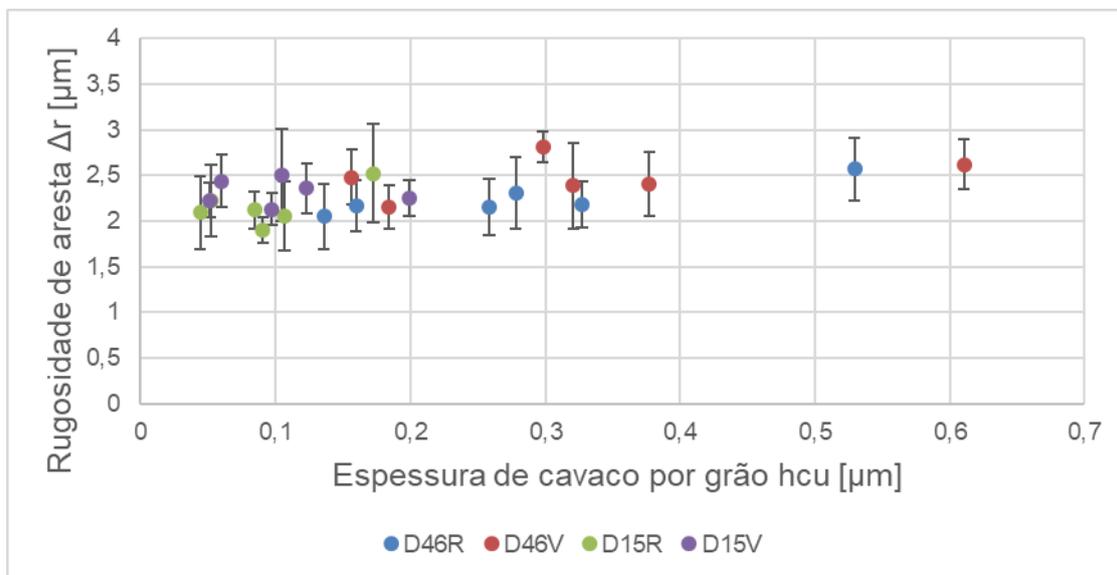


Fonte: Próprio autor

Quanto à influência do ligante do rebolo, observaram-se maiores valores de rugosidade quando utilizado o ligante vitrificado, sendo a diferença mais expressiva relacionada à utilização do rebolo com granulometria D15. Uma das possíveis explicações para os resultados observados corresponde ao maior atrito gerado com a aplicação do rebolo com ligante vitrificado, o que causa mais danos à superfície retificada em comparação ao uso do rebolo com ligante resinoide. Além disso, o menor número de arestas ativas e as maiores protruções de grão verificadas neste tipo de rebolo (CRUZ *et al.*, 2020) promove sulcos maiores durante a retirada de material, gerando, conseqüentemente, maiores valores de rugosidade.

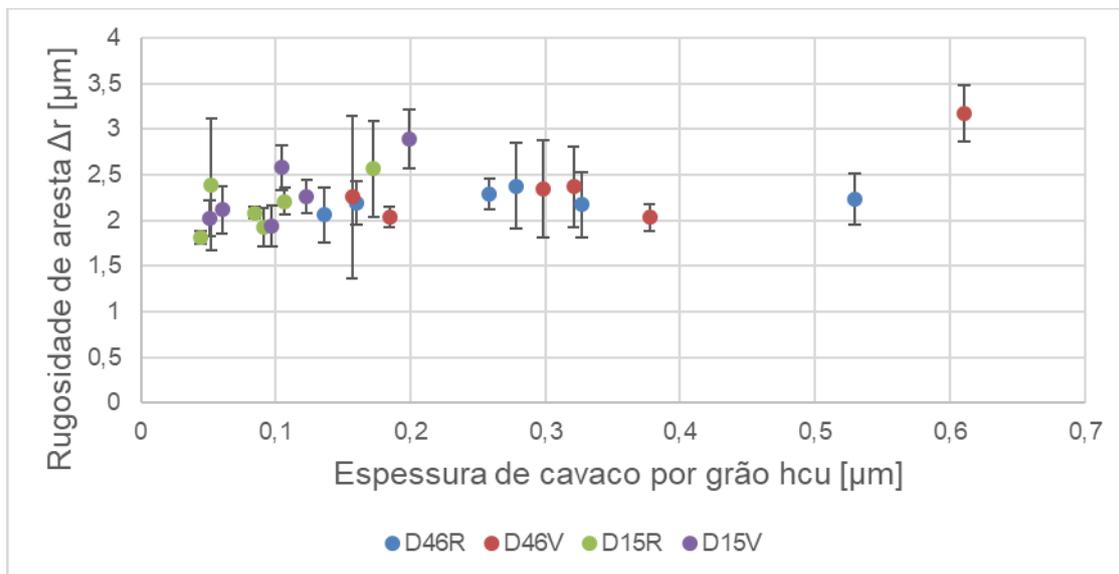
A rugosidade de aresta Δr para as vazões mínima e máxima, com comportamento similar ao verificado para a rugosidade máxima, pode ser observada nas Figuras 18 e 19, respectivamente. Adicionalmente à leve tendência de crescimento, porém, nota-se maior dispersão dos resultados, devido ao menor suporte dos grãos de WC no ligante Co na região da aresta, o que reduz a sensibilidade desta variável às condições de processo.

Figura 18 - Rugosidade de aresta em relação à espessura de cavaco por grão (testes realizados com vazão de fluido $\dot{Q} = 12,6$ l/min)



Fonte: Próprio autor

Figura 19 - Rugosidade de aresta em relação à espessura de cavaco por grão
(testes realizados com vazão de fluido $\dot{Q} = 16,2$ l/min)



Fonte: Próprio autor

Quanto ao tipo de rebolo utilizado observou-se que a utilização do rebolo vitrificado levou a maiores valores de Δr , provavelmente pela maior capacidade de retenção de grãos e, portanto, maior estabilidade durante o corte obtida com o ligante resinoide, semelhante ao que foi concluído por Cruz (2021). A utilização do tamanho de grão D46 levou a maiores valores de Δr em pouco mais da metade dos casos, não mostrando uma influência tão forte.

A variação da vazão de fluido novamente não mostrou influência sobre os valores de Δr , mesmo a vazão mínima controlada na válvula foi suficiente para lubrificar e refrigerar a região de corte de maneira semelhante à da vazão máxima.

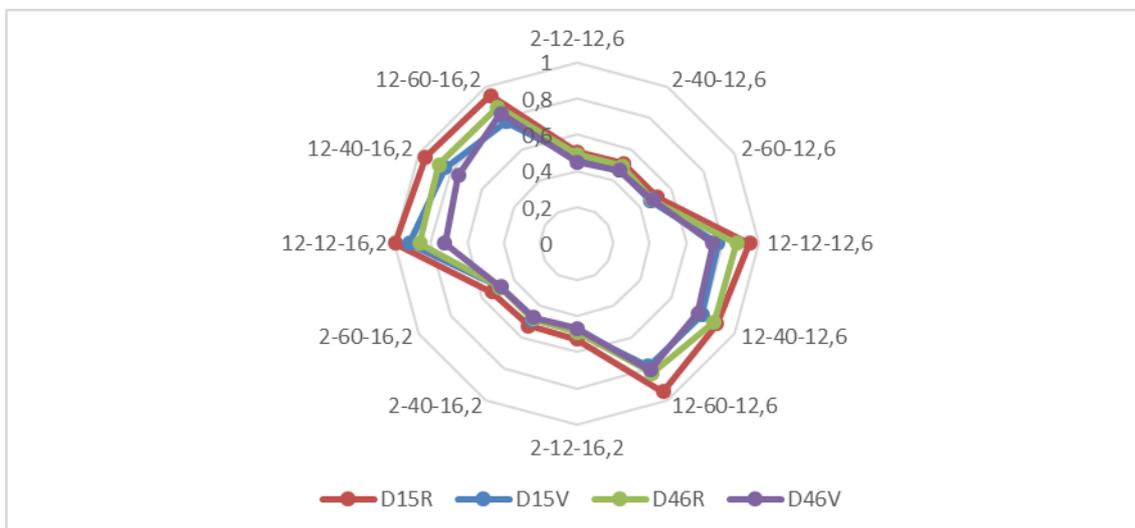
Esta proximidade nos valores de rugosidade e Δr e a dispersão visualizada também podem se relacionar com o fato de que antes de finalizar a reificação de cada face, o rebolo desacelera enquanto ainda corta material quando está perto de chegar na profundidade de corte requerida.

4.4 ÍNDICE DE SUSTENTABILIDADE

O índice de sustentabilidade foi calculado para cada rebolo e condição de corte testada, com base nas duas variáveis de qualidade do inserto analisadas: rugosidade de superfície (Figura 20) e de aresta (Figura 21). As legendas,

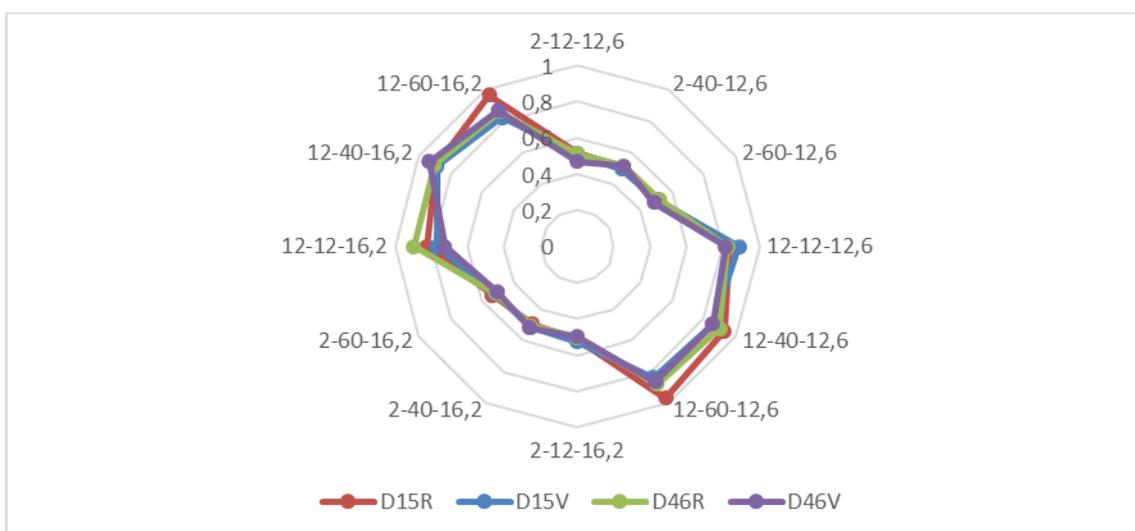
compostas por três valores diferentes, fazem referência a $v_{fa} - v_c - \dot{Q}$.

Figura 20 - Índice de sustentabilidade relacionando a rugosidade de superfície e o consumo energético nas diferentes condições de retificação



Fonte: Próprio Autor

Figura 21 - Índice de sustentabilidade relacionando a rugosidade de aresta e o consumo energético nas diferentes condições de retificação



Fonte: Próprio Autor

Percebe-se que, tanto para a rugosidade de superfície quanto para a de aresta, a velocidade de avanço de 12 mm/min é a que leva ao melhor balanceamento entre qualidade e consumo energético para todos os casos, com $IS \cong 1$. Tal fato ocorre devido principalmente à redução do tempo de retificação, que reduz o consumo de energia no processo. No caso da rugosidade de superfície, existe uma leve tendência de melhores valores para o reboło com tamanho de grão D15 e ligante resinoide, o qual levou a menores valores de rugosidade, independentemente dos outros parâmetros, devido à menor protrução de grão e maior quantidade de arestas ativas, que geram menor espessura de cavaco por grão.

Para a rugosidade de aresta, o efeito dos diferentes rebolos é semelhante, mas se observa que o reboło com granulometria D15 e ligante resinoide supera os demais casos quando combinado à velocidade de avanço de 12 mm/min e à velocidade de corte de 60 m/s, que produziram os menores valores de Δr . Disto, conclui-se que, para os casos estudados, não houve variação significativa de R_z e Δr para as diferentes condições de retificação e o consumo energético teve maior relevância, sendo possível obter qualidade similar em um processo mais rápido e, conseqüentemente, com menor gasto energético.

5 CONCLUSÕES

- O aumento da espessura de cavaco por grão levou ao aumento das forças totais, assim como das forças por grão. Já a energia específica de corte diminuiu com o aumento da referida variável de entrada pela ação do efeito escala e transição do regime dúctil para frágil de remoção de material.
- Embora a variação dos parâmetros de corte não tenha causado alteração significativa da rugosidade de superfície do inserto, o aumento da espessura de cavaco por grão, influenciada principalmente pelo tipo de rebolo, causou aumento dos valores de rugosidade. A pior condição foi observada para o rebolo com tamanho de grão D46 e ligante vitrificado.
- Com maior dispersão, devido ao pequeno ancoramento dos grãos de WC no ligante de Co, a rugosidade de aresta não apresentou tendência clara de variação com a mudança das variáveis de entrada, tendo sido apenas um pequeno crescimento observado com o aumento da espessura de cavaco por grão, também associado às características do rebolo.
- Com o aumento da velocidade de avanço de 2 mm/min para 12 mm/min, obteve-se uma diminuição de 62% no consumo energético, devido à diminuição do tempo de processo. As outras variáveis não causaram alteração significativa da potência medida.
- Os diferentes valores de vazão de fluido lubrificante não alteraram as forças de retificação, o consumo energético ou a qualidade do inserto, apresentando a faixa testada (entre 12,6 e 16,2 l/min) resultados similares.
- O aumento inicial da espessura de cavaco por grão (até um valor aproximado de 0,13 μm) causou aumento substancial da eficiência do processo, a qual foi reduzida em seguida até um patamar aproximadamente constante e disperso, de 30%.
- O índice de sustentabilidade permitiu sintetizar os dados de qualidade do

inserto e consumo energético dentro da faixa estudada e demonstrou que a redução do tempo de processo, a partir do aumento da velocidade de avanço (de 2 mm/min para 12 mm/min), e a aplicação de um rebolo com menor granulometria (D15) levaram ao melhor balanço entre qualidade do inserto e consumo energético.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realização de testes com condições que tornem o processo ainda mais rápido, aumentando-se a velocidade de avanço axial, por exemplo.
- Avaliação do desempenho do processo com o rebolo desgastado, buscando diminuir a necessidade da dressagem e o consumo energético.
- Aplicação de bocais otimizados, que possibilitem uma maior redução da vazão de fluido lubrificante.

REFERÊNCIAS

ABDULLAH, A. *et al.* Profile wear of resin-bonded nickel-coated diamond wheel and roughness in creep-feed grinding of cemented tungsten carbide. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 183, n. 2-3, p. 165-168, 2007.

BAKSA, T. *et al.* Effects of grinding conditions and strategy on the quality of the cutting edge. **Manufacturing Technology**, v. 18, n. 1, p. 3-7, 2018.

BEJU, L.D.; BRINDASU, Dan Paul; VULC, Silvia. Grinding tungsten carbide used for manufacturing gun drills. **Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering**, v. 61, n. 10, p. 571-582, 2015.

BIERMANN, D.; WÜRZ, E. A study of grinding silicon nitride and cemented carbide materials with diamond grinding wheels. **Production Engineering**, v. 3, n. 4, p. 411-416, 2009.

BRIEFING, U. Senate. International energy outlook 2013. US Energy Information Administration, v. 506, p. 507, 2013.

CERATTI, A.D. Ações de Consumo Eficiente de Energia nas empresas do setor metalmeccânico. **Espaço Sindimetal 78**, 2019. Disponível em: <https://www.sindimetalrs.org.br/acoes-de-consumo-eficiente-de-energia-nas-empresas-do-setor-metalmeccanico/>. Acesso em: 14 de dez. de 2021.

CHEN, X.; ÖPÖZ, T.T. Effect of different parameters on grinding efficiency and its monitoring by acoustic emission. **Production & Manufacturing Research**, v. 4, n. 1, p. 190-208, 2016.

CHEN, X.; ROWE, W. Brian. Analysis and simulation of the grinding process. Part II: Mechanics of grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 36, n. 8, p. 883-896, 1996.

CHOUDHARY, A.; BABU, N.R. Influence of 3D topography on tribological behavior of grinding wheel. **Procedia Manufacturing**, v. 48, p. 533-540, 2020.

CRUZ, D.C.; SORDI, V.L.; VENTURA, C.E.H. Surface analysis of WC-5% Co cemented tungsten carbide cutting insert after plunge-face grinding. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 108, p. 323-330, 2020.

CRUZ, D.C. **Avaliação da integridade superficial de insertos retificados da liga WC-Co para ferramentas de corte**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, p. 112. 2021.

DENKENA, B. *et al.* Eco-and energy-efficient grinding processes. In: **Key Engineering Materials**. Trans Tech Publications Ltd, p. 39-44, 2005.

DENKENA, B.; KÖHLER, J.; VENTURA, C.E.H. Influence of grinding parameters on the quality of high content PCBN cutting inserts. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 214, n. 2, p. 276-284, 2014.

FRIEMUTH, T. **Schleifen hartstoffverstärkter keramischer Werkzeuge**. 1999. Tese de Doutorado. Universität Hannover, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf.

GARCIA, J. *et al.* Cemented carbide microstructures: a review. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 80, p. 40-68, 2019.

GROOVER, M.P. **Introdução aos processos de fabricação**. Rio de Janeiro: LTC LIVROS TÉCNICOS E CIENTÍFICOS EDITORA SA, 2014. 737 p.

HABRAT, W.F. Effect of bond type and process parameters on grinding force components in grinding of cemented carbide. **Procedia Engineering**, v. 149, p. 122-129, 2016.

HACKSTEINER, M.; PEHERSTORFER, H.; BLEICHER, F. Energy efficiency of state-of-the-art grinding processes. **Procedia Manufacturing**, v. 21, p. 717-724, 2018.

HAHN, R.S. On the nature of the grinding process. In: INTERNATIONAL MACHINE TOOL DESIGN & RESEARCH CONFERENCE. 3., 1962, Birmingham. **Proceedings...** Birmingham, 1962. p. inicial – p. final.

HEINZEL, C.; KOLKWITZ, B. The impact of fluid supply on energy efficiency and process performance in grinding. **CIRP Annals**, v. 68, n. 1, p. 337-340, 2019.

HEGEMAN, J.B.J.W.; DE HOSSON, J.Th.M.; DE WITH, G. Grinding of WC–Co hardmetals. **Wear**, v. 248, n. 1-2, p. 187-196, 2001.

HEGEMAN, J.B.J.W. *et al.* Fundamentals of grinding: surface conditions of ground WC-Co systems. **WIT Transactions on Engineering Sciences**, v. 25, 1970.

JIA, K.; FISCHER, T.E. Abrasion resistance of nanostructured and conventional cemented carbides. **Wear**, v. 200, n. 1-2, p. 206-214, 1996.

JIA, K.; FISCHER, T.E.; GALLOIS, B. Microstructure, hardness and toughness of nanostructured and conventional WC-Co composites. **Nanostructured materials**, v. 10, n. 5, p. 875-891, 1998.

KE, Z. *et al.* Microstructure and mechanical properties of dual-grain structured WCCo cemented carbides. **Ceramics International**, v. 45, n. 17, p. 21528-21533, 2019.

KHAN, Aqib Mashood *et al.* Energy characterization and energy-saving strategies in sustainable machining processes: A state-of-the-art review. **Journal of Production Systems and Manufacturing Science**, v. 2, n. 1, p. 3-3, 2021.

KLOCKE, F. **Manufacturing Process 2: Grinding, Honing, Lapping**. 1. ed. Berlim: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009, 433 p.

KLOCKE, F. *et al.* Analysis of the material behavior of cemented carbides (WC-Co) in grinding by single grain cutting tests. **Procedia CIRP**, v. 46, p. 209-213, 2016.

LI, W. *et al.* Eco-efficiency of manufacturing processes: A grinding case. **CIRP Annals**, v. 61, n. 1, p. 59-62, 2012.

LINKE, B.S. *et al.* Sustainability indicators for discrete manufacturing processes applied to grinding technology. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 32, n. 4, p. 556-563, 2013.

MAMALIS, A.G.; HORVATH, M.; GRABCHENKO, A.I. Diamond grinding of superhard materials. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 97, n. 1-3, p. 120-125, 2000.

MARINESCU, I.D.; HITCHINER, M.; UHLMANN, E.; ROWE, W.B.; INASAKI, I. **Handbook of machining with grinding wheels**. Boca Raton: CRC Press, 2007. 596p

PELEGRINO, D. H. **Estudo do Consumo de Energia Elétrica em Máquinas-Ferramenta**. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia de São Carlos, Engenharia de Produção, Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 111. 2018.

PRIARONE, P.C. Quality-conscious optimization of energy consumption in a grinding process applying sustainability indicators. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 86, n. 5, p. 2107-2117, 2016.

REN, Y.H.; ZHANG, B.; ZHOU, Z.X. Specific energy in grinding of tungsten carbides of various grain sizes. **CIRP Annals**, v. 58, n. 1, p. 299-302, 2009.

SALONITIS, K. Energy efficiency assessment of grinding strategy. **International Journal of Energy Sector Management**, v. 9, p.20-37, 2015.

SUBRAMANIAN, K.S. *et al.* Tribology as an enabler for innovation in surface generation processes. In: **ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition**. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2015.

TÖNSHOFF, H. K.; DENKENA. **Basics of cutting and abrasive processes**. Berlin: Springer-Verlag, 2013. 399 p.

TÖNSHOFF, H. K.; FRIEMUTH, T.; HESSEL, D. Process strategies for grinding of advanced ceramic cutting tools. **Ceramic Materials and Components for Engines**, p. 411-416, 2001.

VENTURA, C.E.H.; KÖHLER, J.; DENKENA, B. Strategies for grinding of chamfers in cutting inserts. **Precision Engineering**, v. 38, n. 4, p. 749-758, 2014.

VENTURA, C.E.H.; KÖHLER, J.; DENKENA, B. Cutting edge preparation of PCBN inserts by means of grinding and its application in hard turning. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 6, n. 4, p. 246-253, 2013.

WIRTZ, C. *et al.* A Discussion on Material Removal Mechanisms in Grinding of Cemented Carbides. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 139, n. 12, 2017.

YANG, J. *et al.* Grinding-induced metallurgical alterations in the binder phase of WCCo cemented carbides. **Materials Characterization**, v. 134, p. 302-310, 2017.

YIN, L. *et al.* Planar nanogrinding of a fine grained WC-Co composite for an optical surface finish. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 26, n. 7-8, p. 766-773, 2005.

ZELWER, Ozer; MALKIN, S. Grinding of WC-Co cemented carbides. **Journal of Engineering for Industry**, v. 102, p. 209-220, 1980.

ZHAN, Y.J.; XU, X.P. An experimental investigation of temperatures and energy partition in grinding of cemented carbide with a brazed diamond wheel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 61, n. 1-4, p. 117-125, 2012.

ZHOU, Z. *et al.* Condition monitoring towards energy-efficient manufacturing: a review. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 91, n. 9, p. 3395-3415, 2017.