

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

LARA SOUZA MARTINS FERNANDES

**AVALIAÇÃO DO DESGASTE DE UMA PONTA
ABRASIVA DIAMANTADA NA RETIFICAÇÃO DO
METAL DURO**

SÃO CARLOS -SP
2024

LARA SOUZA MARTINS FERNANDES

**AVALIAÇÃO DO DESGASTE DE UMA PONTA ABRASIVA DIAMANTADA NA
RETIFICAÇÃO DO METAL DURO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Carlos Eiji Hirata Ventura

São Carlos-SP
2024

A Deus, a Jesus Cristo e minha mãezinha, Nossa Senhora, por todas as graças que me concederam para a conclusão desta etapa.

AGRADECIMENTO

Agradeço à Santíssima Trindade e a Nossa Senhora por me concederem durante estes cinco anos tudo o que jamais sonhei e por me ajudarem a superar todos os obstáculos. Sem Ele eu não seria nada!

Agradeço a toda minha família, em especial minha mãe, Clarice, símbolo de amor, fé e dedicação; a meu pai, Paulo, símbolo de generosidade e garra; e a meu irmão, Igor, símbolo de perseverança e cuidado. Tudo por vocês.

Agradeço ao meu orientador, Carlos Eiji Hirata Ventura, por todo o apoio, ensinamento, dedicação e paciência nestes cinco anos de trabalho. O senhor me ajudou a realizar muitos sonhos, serei sempre grata por tudo!

Gostaria de agradecer ao Uéilton Carvalho Alves e ao Leonildo Bernardo Pivotto por todo apoio na realização dos experimentos, sem a ajuda de vocês a conclusão do trabalho não seria possível.

A todos os professores da Universidade Federal de São Carlos e ao professor Pedro Rosa, da Universidade de Lisboa, por todos os ensinamentos transmitidos com excelência.

A todos os meus amigos que pude conhecer durante o curso e que tornaram esta jornada mais prazerosa.

RESUMO

A retificação é um processo de usinagem que utiliza rebolos com partículas abrasivas de alta dureza para a remoção de material, empregado na fabricação de componentes que exigem superfícies com acabamento de alta qualidade e precisão dimensional. A retificação por ponta abrasiva é uma variante dentro das diversas operações possíveis, em que se aplicam ferramentas superabrasivas de pequenas dimensões com camada única para a usinagem precisa de superfícies tridimensionais complexas. Apesar de sua flexibilidade, o processo enfrenta diversos desafios. A redução no diâmetro da ferramenta pode ocasionar aumento da vibração, desgaste excessivo da ponta abrasiva, baixa precisão e aumento da rugosidade superficial da peça. Neste sentido, tem se buscado maneiras para otimização deste processo, mas a literatura sobre a retificação com pontas abrasivas é limitada, focada principalmente em sua aplicação para ligas de níquel e titânio. A partir do exposto, o estudo teve como objetivo caracterizar o desgaste da ponta abrasiva e determinar o comportamento da rugosidade superficial durante a retificação de canais em uma liga WC-5%Co. Para isso, dois níveis de velocidade de corte foram testados e um método de determinação do desgaste baseado na curva de Abbott-Firestone utilizado. De maneira geral, uma maior velocidade de corte aumentou o volume de remoção de material até o fim de vida, levando a uma menor taxa de desgaste da ferramenta. A rugosidade da peça diminuiu com o aumento do volume removido, sendo que as maiores protruções iniciais de grão provocaram maiores sulcos na peça, prejudicando a rugosidade.

Palavras-chave: Retificação, ponta abrasiva, metal duro, desgaste.

ABSTRACT

Grinding is a machining process that uses wheels with high-hardness abrasive grains to remove material. It is employed in manufacturing components requiring high-quality surfaces and dimensional accuracy. Grinding with a point grinding wheel is a variant within the various possible operations, in which small, single-layer superabrasive tools are applied for the precise machining of complex three-dimensional surfaces. Despite its flexibility, the process faces several challenges. Reducing the tool diameter can cause increased vibration, excessive tool wear, form and dimensional deviations and damages to the surface. Therefore, different ways of process optimization have been investigated, but the literature on grinding with point grinding wheels is limited, focusing mainly on its application to nickel and titanium alloys. Based on the above, this study aimed to characterize the wear of the point grinding wheel and determine the behavior of surface roughness during grinding of WC-5%Co alloy. For this purpose, two cutting speeds were tested and a wear-determination method based on the Abbott-Firestone curve was used. A higher cutting speed increases the material removal volume until tool life end, leading to a lower tool wear rate. The workpiece roughness decreased with the increase in the material removal volume, and greater initial grain protrusions caused higher values of surface roughness.

Keywords: Grinding, point grinding wheel, cemented carbide, wear.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	3
2.2 DESGASTE DA SUPERFÍCIE DE CORTE DO REBOLO.....	6
2.3 CARACTERIZAÇÃO DO REBOLO	7
2.4 RETIFICAÇÃO COM PONTA ABRASIVA.....	8
3 MATERIAIS E MÉTODOS	11
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PONTA ABRASIVA.....	12
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	16
4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS PONTAS ABRASIVAS.....	16
4.2 DESGASTE DA SUPERFÍCIE DE CORTE DAS PONTAS ABRASIVAS	17
4.3 QUALIDADE SUPERFICIAL	22
5 CONCLUSÃO	25
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	26
6 REFERÊNCIAS	27

1 INTRODUÇÃO

Tomando como exemplo um setor que tem motivado o desenvolvimento de novas tecnologias, a demanda global por viagens aéreas tem aumentado acentuadamente nos últimos anos, com previsões de crescimento contínuo para os próximos 20 anos (BOEING, 2024). Para atender a essa crescente demanda, os fabricantes de componentes aeroespaciais precisam continuamente aprimorar os materiais utilizados, o design dos componentes e as técnicas de fabricação, com foco em garantir qualidade e melhorar o desempenho. Essas exigências frequentemente levam à adoção de novas técnicas de fabricação, o que significa que processos que anteriormente não eram adequados ou acessíveis podem agora oferecer uma solução promissora para os desafios de fabricação emergentes. Um exemplo de tal processo é a retificação com ponta abrasiva (PIETROW et al., 2021).

A retificação é um processo de usinagem que utiliza rebolos com partículas abrasivas de alta dureza para a remoção de material. Esse método é empregado na fabricação de componentes que exigem superfícies com acabamento de alta qualidade e precisão dimensional (MALKIN, 2008). No mercado, há uma ampla variedade de rebolos, com diferentes formas, tamanhos e tipos de abrasivos, incluindo os rebolos superabrasivos de camada única, comumente utilizados em processos de que exigem ferramentas de pequeno diâmetro, como o processo de retificação com ponta abrasiva. Tal variante utiliza ferramentas superabrasivas, muitas vezes diamantadas, em miniatura, com camada única, para usinar com precisão superfícies tridimensionais complexas (PIETROW et al., 2021).

A principal diferença entre a retificação convencional e a retificação com ponta abrasiva está no diâmetro do rebole. A retificação convencional utiliza rebolos de diâmetro maior, geralmente entre 100 e 300 mm, enquanto a retificação com ponta abrasiva utiliza ferramentas com dimensões menores que 15 mm (CURTIS et al., 2016). O tamanho reduzido da ponta abrasiva confere uma vantagem significativa, que permite a retificação de geometrias tridimensionais pequenas ou de perfis complexos, par as quais o uso de um rebole convencional seria inviável (HOOD et al., 2019).

Apesar dos benefícios destacados, o processo enfrenta desafios. A redução no tamanho da ferramenta apresenta uma série de desvantagens, limitando principalmente a velocidade de corte máxima alcançável, bem como o número de arestas de corte efetivas, o que pode levar a efeitos prejudiciais, como aumento da vibração, desgaste excessivo da ponta, baixa precisão e aumento da rugosidade superficial da peça (HOOD et al., 2019).

Neste cenário, diversos estudos têm buscado maneiras para otimização deste processo. No entanto, a literatura sobre usinagem com pontas abrasivas ainda é limitada, sendo a maioria dos estudos focada em ligas aeroespaciais de níquel e titânio (DEEPA et al., 2023). Tendo isso em vista, o presente estudo visa caracterizar o desgaste de uma ponta abrasiva utilizada na retificação de canais em uma liga WC-5%Co e determinar o comportamento da rugosidade com o aumento do volume de material removido. Para isso, o efeito de dois níveis de velocidade de corte foi investigado e um método de determinação do nível de desgaste baseado na curva de Abbott-Fires-tone, utilizado. A partir das imagens do rebolo geradas, pretende-se ainda obter uma maior compreensão dos fenômenos envolvidos, contribuindo, assim, para a otimização e maior eficiência do processo de retificação de metal duro com pontas abrasivas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 ASPECTOS DA RETIFICAÇÃO DO METAL DURO

Para que uma ferramenta atenda aos requisitos de um processo de manufatura economicamente viável e que produza peças de alta qualidade, é necessário que o material possua certas propriedades-chave. Estas incluem dureza a quente, tenacidade suficiente para evitar falhas por fratura, resistência ao desgaste abrasivo, resistência à compressão, resistência ao cisalhamento e estabilidade química (MACHADO et al., 2009). Dado o seu custo relativamente mais baixo em comparação com materiais cerâmicos e superduros, como o diamante policristalino (PCD) e o nitreto cúbico de boro (CBN), o metal duro é amplamente utilizado na indústria, especialmente em processos de torneamento, fresamento e furação (STEPHENSON e AGAPIOU, 2005).

O metal duro, composto majoritariamente por carboneto de tungstênio (WC) e cobalto (Co), é caracterizado por uma combinação de alta dureza, resistência ao desgaste, tenacidade, resistência a altas temperaturas e resistência à corrosão (MACHADO et al., 2009). A composição das ferramentas de metal duro influencia diretamente seu desempenho durante o processo de corte, variando conforme o material a ser usinado. De acordo com a norma ISO 513 (2012), as ferramentas de metal duro são classificadas em diferentes categorias, dependendo dos elementos em sua composição e da aplicação específica. As ferramentas da classe K são constituídas predominantemente por carboneto de tungstênio e cobalto, oferecendo alta resistência ao desgaste, mas com uma tendência à difusão e conseqüente desgaste de cratera. Assim, são utilizadas principalmente na usinagem de materiais que produzem cavacos curtos, como ferros fundidos. Já as classes P e M incluem também carbonetos de titânio, tântalo e/ou nióbio, proporcionando maior dureza a quente e resistência à oxidação. As ferramentas da classe P são utilizadas principalmente na usinagem de aços, enquanto as da classe M são mais adequadas para aços inoxidáveis. Recentemente, a classificação foi expandida com a inclusão de novas classes: a classe N, destinada à usinagem de metais e ligas não ferrosas, a classe S, para ligas resistentes ao calor e a classe H, para aços endurecidos (MACHADO et al., 2009). Essas

classes são ainda subdivididas por números, que indicam maior dureza (números menores) ou maior tenacidade (números maiores), conforme a composição do metal duro.

As ferramentas de metal duro são produzidas por metalurgia do pó e passam pela etapa de sinterização, na qual o material é contraído. Conseqüentemente, faz-se necessária a realização de um processo subsequente de acabamento para obtenção de forma geométrica e precisão dimensional. Com esta finalidade, pastilhas de metal duro são comumente retificadas com o uso de rebolos de diamante (MACHADO et al., 2009).

Os rebolos superabrasivos, muitas vezes, apresentam apenas uma camada de grãos abrasivos em sua superfície. Segundo Rowe (2013) e Ding et al. (2017), essa configuração oferece várias vantagens em relação aos rebolos convencionais, incluindo uma melhor retenção de forma em longos períodos de retificação, a ausência de necessidade de preparação do rebolo, como dressagem, e a possibilidade de reutilização do rebolo após desgaste severo por meio da reaplicação dos grãos. Além disso, o espaçamento relativamente maior entre os grãos nos rebolos de camada única ajuda a reduzir a temperatura de retificação, permitindo a utilização de taxas de remoção de material mais altas.

O processo de formação de cavaco na retificação de materiais frágeis, como o metal duro, pode ocorrer de duas maneiras: dúctil e frágil, enquanto que em materiais dúcteis só ocorre remoção dúctil. Na remoção de material de forma dúctil, há predominância da ocorrência de deformações plásticas em detrimento da propagação de trincas. Já a forma frágil, mais comum em materiais como o metal duro, é marcada pela predominância da formação de trincas em relação à deformação plástica. As trincas podem ser radiais ou laterais, sendo que as últimas são responsáveis pela remoção efetiva do material e as primeiras danificam a camada superficial (KLOCKE e KÖNIG, 2005). Segundo Bifano et al. (1991), a remoção de material de maneira dúctil contribui para a redução da rugosidade da peça e ela é possível em materiais frágeis, desde que certa espessura crítica de cavaco em cada grão abrasivo não seja ultrapassada.

Além da formação de trincas, na retificação de metal duro com rebolos de diamante observa-se também a ruptura e a pulverização dos grãos do material. Uma parte dos grãos de carboneto é removida, levando a rupturas na superfície. A outra parte é comprimida e deformada plasticamente pelos grãos abrasivos do rebolo. O ligante do metal duro é em parte comprimido junto com os carbonetos pulverizados e em parte removido. Essa adesão de ligante e carbonetos forma uma fina camada deformada e danificada contendo carbonetos fragmentados e microfissuras sobre a superfície, que prejudica a rugosidade (HEGEMAN et al., 2001; REN et al., 2009; YANG et al., 2015).

A espessura de corte tem sido muito usada como um dos parâmetros para a avaliação dos resultados da retificação e a maioria dos efeitos fundamentais pode ser explicada tendo ela como base. Se a velocidade de corte for aumentada e as outras variáveis do processo assumirem valores constantes, haverá redução da espessura do cavaco, o que, conseqüentemente, reduzirá os sulcos na peça e a força que atua sobre cada aresta. Nesse sentido, Marinescu et al. (2007) sugerem o uso de maiores velocidades de corte para a obtenção de menores rugosidades das superfícies retificadas. Menores espessuras de cavaco por grão obtidas pelo aumento da velocidade de corte levam à redução das forças de retificação, da rugosidade da peça e dos erros de forma (KOPAC e KRAJNIK, 2006). Além disso, pode-se aumentar a produtividade, já que o aumento da velocidade de corte possibilita o aumento da velocidade de avanço sem alteração da espessura do cavaco (KLOCKE et al., 1997).

Em convergência com Marinescu et al. (2007), Abdullah et al. (2007) demonstraram a relevância que a velocidade de corte possui sobre a rugosidade de superfícies de metal duro obtidas através do processo de retificação. Os autores concluíram que o aumento da velocidade de corte reduz os valores da rugosidade superficial e reduz o desgaste do rebolo. Além disso, os autores notaram que a rugosidade é afetada mais pela velocidade de corte do que pela velocidade de avanço.

Ademais, pesquisadores têm observado que a tendência para o desenvolvimento de trincas superficiais diminui com a diminuição da espessura do cavaco. Komanduri, et al. (1997) provaram tal efeito levando em conta a diminuição do avanço e da pro-

fundidade de corte na retificação de materiais cerâmicos. Com a redução destes parâmetros, o material passar a ser removido através de escoamento plástico e não por fratura, caracterizando uma remoção dúctil.

2.2 DESGASTE DA SUPERFÍCIE DE CORTE DO REBOLO

Os principais mecanismos de desgaste dos grãos abrasivos do rebolo incluem a fratura, a remoção e o achatamento dos grãos. Zhan et al. (2009) investigaram o desgaste do rebolo durante a retificação do metal duro e observaram que ele é influenciado diretamente pelas cargas termomecânicas do processo. À medida que o processo de retificação avança, o número de grãos inteiros diminui rapidamente e o número de grãos fraturados, achatados e removidos aumenta. Em decorrência disso, a altura média da protrusão dos grãos de diamante diminui com o aumento do volume acumulado de remoção e cai significativamente já no início do processo.

De maneira complementar, Heymann (2014) provou que a redução no tamanho dos grãos de diamante levou a um aumento no desgaste do rebolo. Abdullah et al. (2007) concluíram que o aumento da velocidade de avanço resultou em um maior desgaste do rebolo, enquanto o aumento da velocidade de corte o diminuiu. Zhan et al. (2009) notaram que o aumento de grãos inteiros e a diminuição de grãos fraturados, achatados e removidos resultaram na redução das forças e temperaturas de retificação.

Na investigação da influência de diferentes especificações do metal duro sobre o desgaste do rebolo, Wirtz et al. (2018) observaram que a retificação de metais duros com altas frações de cobalto tende a aumentar o desgaste radial do rebolo. Ademais, maiores tamanhos médios dos grãos de WC resultaram em maiores cargas termomecânicas, o que também contribuiu para o aumento do desgaste radial do rebolo.

Yu et al. (2016), ao compararem rebolos com grãos dispostos aleatoriamente e rebolos com grãos ordenados, observaram que os rebolos com grãos ordenados sofreram menos os efeitos do desgaste. Apesar de rebolos com essa configuração não serem produzidos comercialmente devido à sua alta complexidade, os autores observaram que uma disposição ordenada dos grãos permite seu uso de forma mais eficiente, evitando-se a sobreposição de cortes e atrito excessivo.

Durante a retificação, a autoafiação também pode ocorrer, devido à ruptura parcial dos grãos abrasivos, que produz novas arestas afiadas, ou ao desgaste do material do ligante, o que, por sua vez, possibilita o surgimento de novos grãos/arestas na camada abrasiva do rebolo (STANIEWICZ-BRUDNIK, 2018).

Em todos os casos, a topografia do rebolo pode ser corrigida por meio da operação de dressagem, que tem o objetivo de uniformizar a superfície abrasiva removendo e/ou afiando os grãos desgastados e removendo o ligante e as partículas que aderiram durante o processo de retificação (MACHADO et al., 2011). No entanto, ao contrário dos rebolos de diamante com ligantes resinoides ou vitrificados, onde o desempenho de retificação é restaurado por meio de dressagens periódicas, os rebolos de camada única não podem ser dressados. Consequentemente, o desempenho desses rebolos varia significativamente à medida que eles se desgastam e sua topografia muda ao longo de sua vida útil (ZHAN et al., 2009).

2.3 CARACTERIZAÇÃO DO REBOLO

A superfície do rebolo é composta por milhares de arestas de corte com formas e distribuições aleatórias, que influenciam significativamente a qualidade da superfície da peça, a transferência de calor e o consumo de energia do processo (DARAFON et al., 2013). Vários métodos de medição da topografia de rebolos foram revisados por Verkerk (1977), incluindo a contagem de grãos, a perfilometria e o método de impressão cônica. Em 1996, Lonardo et al. (1996) também revisaram as técnicas de medição de rebolos e as classificaram como métodos de contato ou sem contato. No caso dos métodos de contato, uma ponteira toca a superfície para fazer as medições.

Métodos de medição sem contato podem ser classificados como não ópticos ou ópticos. Técnicas não ópticas incluem, por exemplo, o uso de microscópios eletrônicos de varredura e sensores de emissão acústica para caracterizar a superfície do rebolo. Por sua vez, técnicas de medição ópticas incluem o uso de microscópios ópticos convencionais, sistemas de autofoco, interferômetros de luz branca e visão estereoscópica binocular (DARAFON et al., 2013).

Lachance et al. (2003) usaram um microscópio óptico convencional com iluminação coaxial e uma câmera posicionada perpendicularmente à superfície do rebolo

para identificar arestas de corte com áreas desgastadas, através da reflexão de luz dos grãos. Apesar dos avanços obtidos, os autores não conseguiram identificar arestas de corte afiadas nem determinar as alturas de protrusão das arestas de corte. Xie et al. (2011) usaram sistemas de autofoco 3D baseados no princípio de que a intensidade da luz refletida de um objeto que está em foco é maior do que quando está fora de foco. Dessa forma, a distância em foco pode ser usada para determinar a altura da aresta de corte. Yan et al. (2011) usaram um interferômetro de luz branca para medir uma amostra do rebolo. Com essa técnica, a altura de um objeto é determinada examinando o padrão de interferência produzido quando a luz branca de uma única fonte é refletida tanto do objeto de interesse quanto de um objeto de referência móvel. Darafon et al. (2013) apresentaram um sistema automatizado de escaneamento 3D de rebolos, sem contato. O sistema incorporou um sensor cromático de luz branca com um sistema de posicionamento, permitindo determinar as distribuições do tamanho da aresta de corte, espaçamento e altura de protrusão.

Denkena, Köhler e Ventura (2014) utilizaram um microscópio confocal para avaliar a topografia de um rebolo de diamante após a retificação de insertos de PCBN. A superfície de corte do rebolo foi moldada com uma resina fotopolimerizável e o negativo resultante foi analisado no microscópio. Os autores avaliaram o desgaste dos grãos por meio do parâmetro de perfil de rugosidade R_{pk} (altura reduzida de pico), que possui relação com a protrusão de grão e é obtido a partir da curva de Abbott-Firestone. Rodrigues e Ventura (2023) e Cruz et al. (2020) também utilizaram um microscópio confocal, mas para avaliação direta da superfície do rebolo. Os autores avaliaram os parâmetros Spk (altura reduzida de pico) e S_{mr1} (fração da superfície abrasiva, que consiste em picos acima do núcleo do material). O primeiro parâmetro fornece uma medida da protrusão dos grãos e o segundo possibilita a avaliação da quantidade de arestas ativas.

2.4 RETIFICAÇÃO COM PONTA ABRASIVA

Considerando que o metal duro é aplicado principalmente como ferramenta de corte, seu acabamento após o processo de sinterização tem como foco a obtenção de macro e microgeometrias precisas e com bom acabamento. Um dos desafios corresponde à produção de geometrias de aresta, que, comumente exige processos adicionais. De acordo com Denkena e Biermann (2014), por meio da retificação, porém,

é possível a produção de uma ampla variedade de geometrias de aresta simétricas e assimétricas, utilizando-se, para isso, um método de sobreposição de múltiplos chanfros. Devido às limitações cinemáticas de retificadoras de insertos de corte, arredondamentos contínuos não são possíveis de serem realizados (VENTURA et al., 2013), da mesma forma que geometrias complexas, como quebra-cavacos. Neste contexto, encontra-se uma motivação para a utilização do processo de remoção de material por ponta abrasiva em metal duro.

Além das vantagens (HOOD et al., 2019; PIETROW et al., 2021) e desvantagens (HOOD et al., 2019) já mencionadas, um outro aspecto relevante na retificação com ponta abrasiva corresponde às alterações da superfície de corte durante o processo. A configuração de camada única dos rebolos reduz o número de grãos disponíveis, contribuindo para uma rápida degradação da superfície da ferramenta durante a retificação, o que compromete significativamente sua vida útil em comparação com ferramentas de tamanho convencional (PIETROW et al., 2022).

Tendo isso em vista, diversos estudos têm sido desenvolvidos para maior compreensão dos fenômenos e otimização do processo. No trabalho desenvolvido por Aspinwall et al. (2001), investigou-se o efeito do grão abrasivo (material, tamanho e resistência), da velocidade de corte, da profundidade de corte, da taxa de avanço e da pressão do fluido no desgaste da ferramenta e na rugosidade da superfície de corpos de prova de Udimet 720 e Inconel 718. Os autores constataram que o tamanho do grão teve a maior influência na rugosidade da superfície, seguido pela profundidade de corte, taxa de avanço e velocidade de corte, enquanto os demais fatores não demonstraram efeito significativo.

Em concordância, Hood et al. (2019) observaram que pontas abrasivas com tamanhos de grão menores resultaram em superfícies com menor rugosidade e prolongaram a vida útil da ferramenta de corte durante a retificação de peças de aço ferramenta. Além disso, os autores observaram que a combinação entre baixas taxas de avanço e altas profundidades de corte gerou altos valores de rugosidade superficial.

Por sua vez, Curtis et al. (2016) analisaram os efeitos da variação da profundidade de corte, do tipo de grão e da velocidade de avanço durante a remoção de

material com ponta abrasiva das ligas Ti-6Al-4V e Inconel 720. Os autores observaram que as maiores rugosidades superficiais, bem como a maior adesão de material e o maior desgaste da ponta abrasiva, foram encontrados para as amostras de Ti-6Al-4V, independentemente do tipo de grão ou dos parâmetros de corte utilizados.

A partir do modelo desenvolvido por Gong et al. (2009), verificou-se que o aumento da velocidade de corte durante a remoção de material com pontas abrasivas pode levar a uma redução nas taxas de desgaste da ferramenta e da rugosidade da superfície, o que ocorre devido à redução da espessura do cavaco por grão (WANG et al., 2014).

Assim, nota-se que os estudos desenvolvidos até o momento relacionados à retificação com ponta abrasiva são focados em ligas de níquel, titânio e aço ferramenta. Desse modo, a pesquisa disponível sobre a retificação de metal duro com pontas abrasivas é limitada (DEEPA et al., 2023). Além disso, não foram encontrados trabalhos sobre a influência da velocidade de corte na vida útil da ponta abrasiva na retificação de materiais frágeis. Dessa forma, o presente estudo tem como principal objetivo a caracterização da evolução do desgaste de uma ponta abrasiva diamantada durante a retificação de canais em corpos de prova de metal duro, assim como a determinação do efeito da velocidade de corte sobre a vida da ferramenta e o acabamento da peça.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Em um centro de usinagem com três eixos Romi D600 (potência máxima de 14 kW e rotação máxima de 10000 rpm), pontas abrasivas do tipo PM DIAMOND BUR 21F (Poul Sorensen), com diâmetro e espessura do rebolo de 5,7 mm e 1,65 mm, respectivamente, e camada única de grãos de diamante de tamanho médio de $45\ \mu\text{m}$ foram utilizadas para a produção de canais em insertos de corte de metal duro (95%p WC e 5%p Co) quadrados, com dimensões de 11,5 mm x 11,5 mm x 4,7 mm. Detalhes da ponta abrasiva e dos canais produzidos são apresentados nas Figuras 1 e 2, respectivamente.

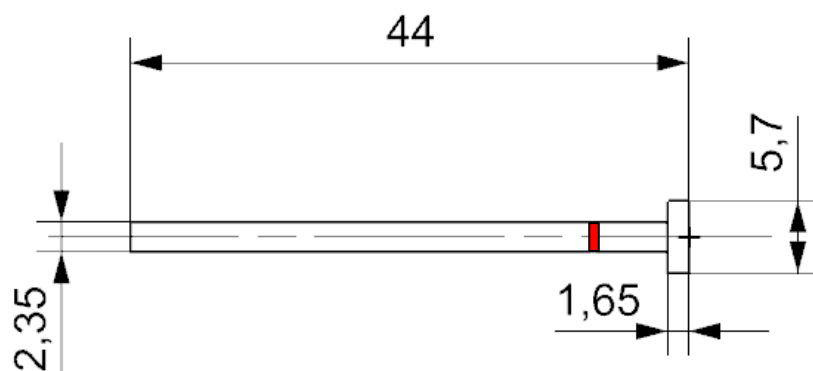


Figura 1- Dimensões das pontas abrasivas utilizadas (em milímetros)

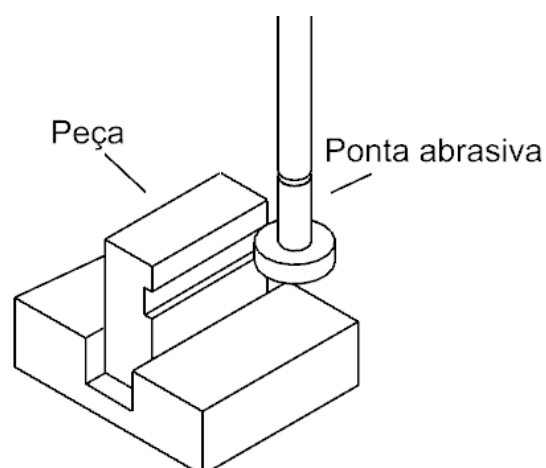


Figura 2- Detalhe dos canais produzidos

Para avaliar a influência da velocidade de corte na qualidade superficial dos canais produzidos e no desgaste da ponta abrasiva, dois diferentes valores foram utilizados: 150 m/min e 170 m/min, com execução de dois testes por condição. Os demais parâmetros de corte, como penetração de trabalho ($a_e = 70 \mu\text{m}$) e avanço ($f_z = 0,5 \mu\text{m/volta}$), permaneceram constantes. Após a retificação de cada canal (comprimento de 11,5 mm), a ponta abrasiva era removida e avaliada no microscópio Alicona InfiniteFocus SL, o qual permite um aumento máximo de 500x com as lentes disponíveis. O critério de fim de vida da ponta abrasiva foi a remoção completa dos grãos de diamante, determinada visualmente.

Após esta etapa, os canais foram caracterizados no microscópio para análise tridimensional de imagens Alicona InfiniteFocus SL. A partir da média de 100 perfis perpendiculares à direção de avanço de retificação, tanto a rugosidade máxima R_z quanto a rugosidade média R_a do fundo dos canais foram medidas.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PONTA ABRASIVA

A caracterização da topografia da ponta abrasiva após a retificação de cada canal foi realizada com base na análise de uma área de 4 mm^2 da camada abrasiva da ferramenta, na qual, a partir da curva de Abbot-Firestone, os parâmetros S_{pk} (altura reduzida de pico) e S_{mr1} (fração da superfície abrasiva que consiste em picos acima do núcleo do material) foram obtidos.

O desgaste de ferramentas abrasivas é comumente avaliado pelo fator de retificação G , que equivale à relação entre o volume de material removido da peça e o volume de rebolo desgastado, obtido por meio da medição de seu diâmetro. No entanto, essa abordagem apresenta certas limitações, especialmente para ferramentas de camada única, cuja variação dimensional ocorre apenas devido ao desgaste dos grãos. Assim, para a obtenção do volume acumulado de desgaste da ferramenta, o estudo fez uso do método proposto por Aguirre et al. (2019). Nele, utilizam-se as curvas de Abbott-Firestone para estimar a perda de volume de material abrasivo por unidade de área após a retificação de cada canal. A seguir, o método é explicado em três etapas principais:

1. **Comparação inicial das curvas:** A comparação das curvas de Abbott-Firestone da ponta abrasiva nova e desgastada é feita a partir de sua sobreposição, como apresentado na Figura 3. A região acima do plano médio, definido na altura de 0 μm , representa a distribuição de material abrasivo que se projeta acima da superfície do ligante da ponta abrasiva.

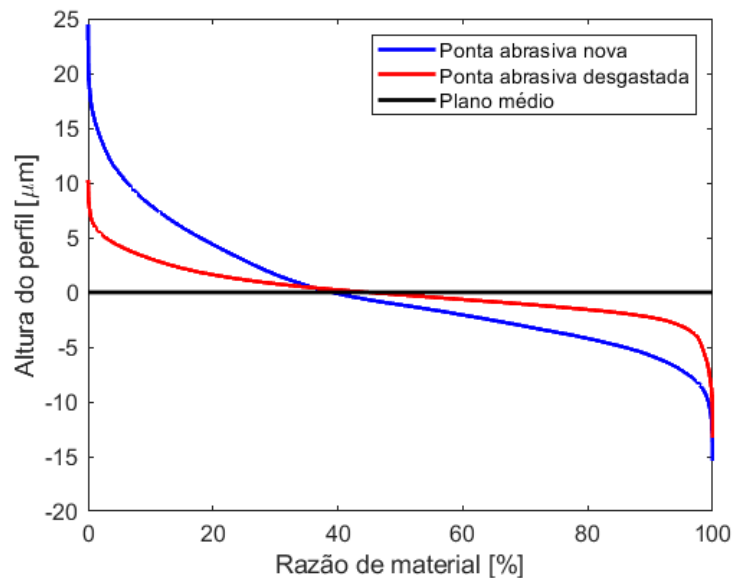


Figura 3- Comparação das curvas de Abbott-Firestone

2. **Ajuste das curvas de ferramentas desgastadas:** À medida que a ferramenta abrasiva é utilizada, os grãos abrasivos sofrem desgaste. Este desgaste resulta em uma diminuição da quantidade de grãos expostos acima do plano médio. A porcentagem de material abrasivo não pode aumentar à medida que o desgaste avança. Em decorrência disso, qualquer aumento na curva de Abbot-Firestone durante o desgaste indicaria um erro de interpretação. Por exemplo, em um detalhe da Figura 3, ampliado na Figura 4, verifica-se que a curva da ponta desgastada intersecta o plano médio após a curva da ponta nova, indicando que a quantidade de grãos acima do ligante aumentou com o desgaste da ferramenta, o que não condiz com a realidade. Dessa forma, faz-se necessário o ajuste da curva desgastada, de maneira que ela intercepte a curva da condição nova exatamente no plano médio (0 μm de altura). Esse

ajuste garante que a curva desgastada não mostre erroneamente uma quantidade maior de grãos abrasivos do que a curva nova. A comparação entre a curva nova e a ajustada é apresentada na Figura 5.

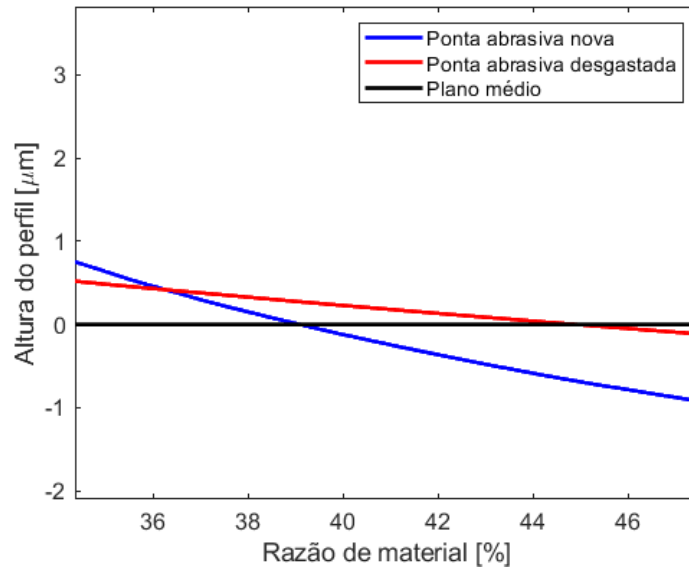


Figura 4- Comparação das curvas das pontas nova e desgastada sem o ajuste (detalhe da Figura 3)

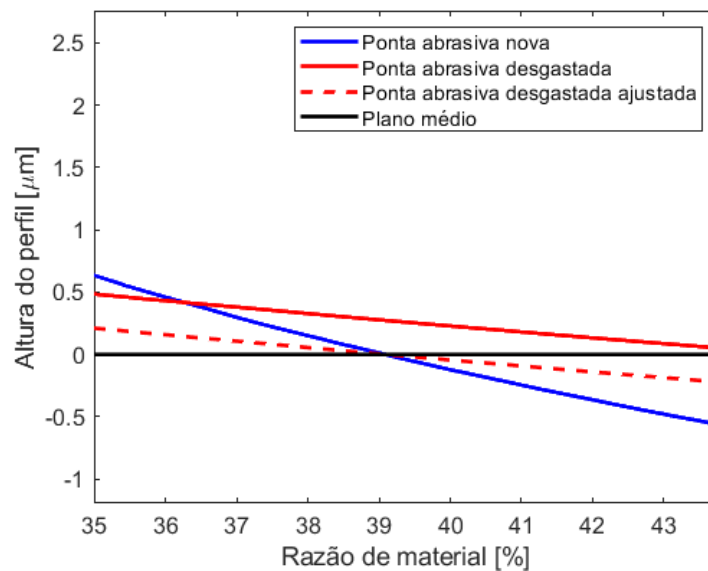


Figura 5- Comparação das curvas das pontas nova e desgastada sem ajuste e ajustada

3. **Cálculo do volume de desgaste:** A área da região entre a curva ajustada da ferramenta desgastada e a curva da ferramenta nova acima do plano médio, apresentada na Figura 6, é então calculada. A região preenchida representa o volume de material abrasivo perdido por unidade de área. Multiplicando o valor encontrado pela área da superfície de corte da ferramenta (perímetro vezes largura da ponta abrasiva), obtém-se o volume total de material abrasivo removido.

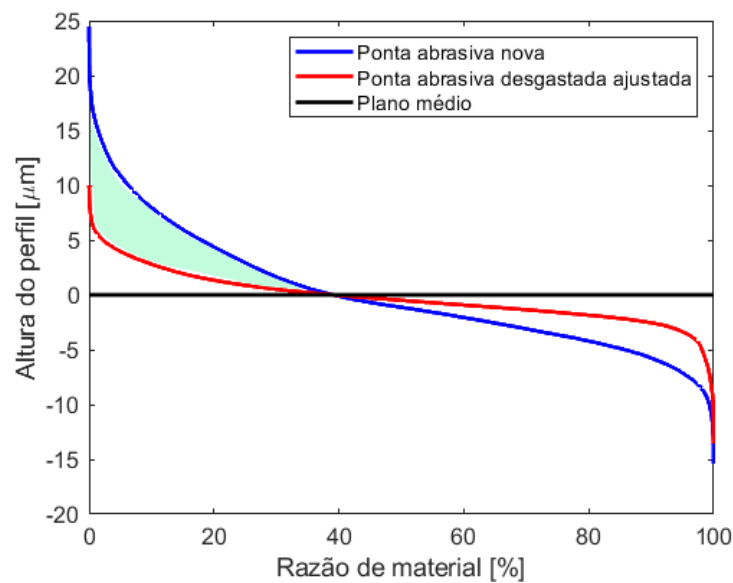


Figura 6- Região entre as curvas das pontas abrasivas nova e desgastada ajustada acima do plano médio

O código desenvolvido pela autora para utilização do método apresentado pode ser visto no Apêndice 1.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS PONTAS ABRASIVAS

Para caracterização das pontas abrasivas novas, foram analisados o diâmetro médio equivalente dos grãos abrasivos, a concentração de grãos por mm^2 e a altura de protrusão do grão.

Na Figura 7, vê-se imagens dos grãos das ferramentas novas que posteriormente foram utilizadas nas condições com velocidade de corte de 150 m/min (ferramenta 1) e 170 m/min (ferramenta 2). O diâmetro médio equivalente dos grãos da ferramenta 1 é de 33,35 μm , com um desvio-padrão de 2,55 μm . Já para a ferramenta 2, o diâmetro médio equivalente dos grãos é de 37,98 μm , com um desvio-padrão de 3,59 μm . Dessa forma, nota-se que a ferramenta 2, possui, em média, grãos maiores, embora tal variação não cause alterações significativas no desempenho do processo. É importante ressaltar, no entanto, que ambos os valores obtidos são menores do que o tamanho máximo especificado pelo fornecedor.

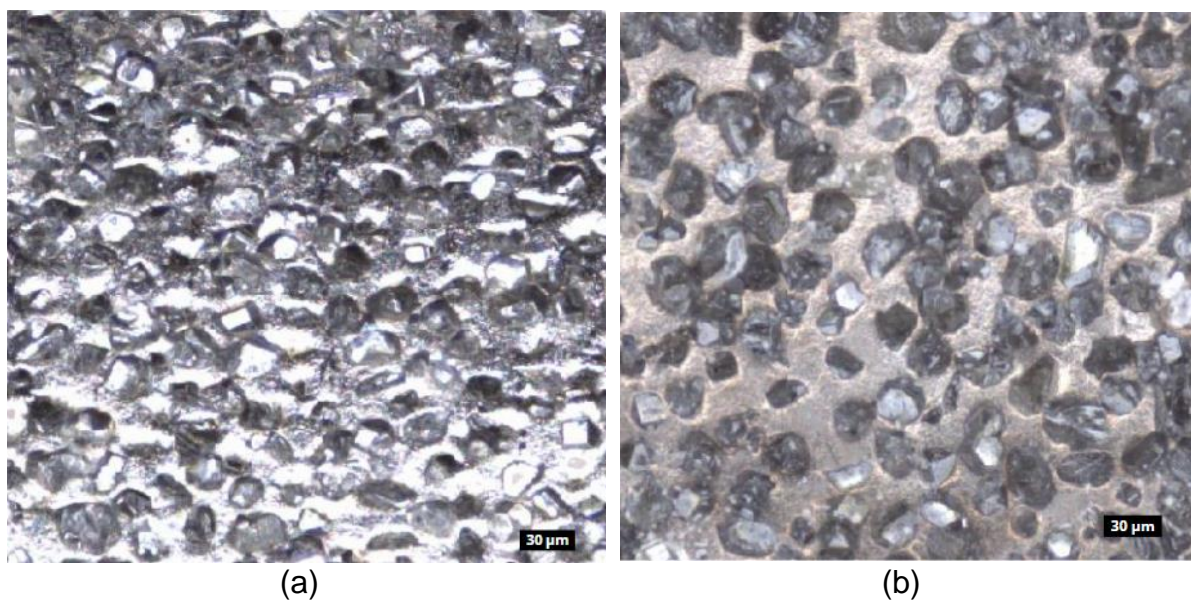


Figura 7- Exemplos de grãos medidos para as ferramentas (a) 1 e (b) 2

De maneira a caracterizar a topografia das superfícies, foram medidos os valores de $S_p k$ e S_{mr1} das ferramentas. As curvas de distribuição de material das ferramen-

tas são apresentadas na Figura 8. A partir delas, verifica-se que a ferramenta 1 apresentou um valor de Spk de 9,45 μm e de Smr1 de 18,3%. Por sua vez, a ferramenta 2 apresentou um valor de Spk de 9,11 μm e Smr1 de 21,4%. Assim, nota-se que altura de protrusão de grão é semelhante para as duas ferramentas, mas espera-se que a ferramenta 2 possua uma quantidade pouco maior de arestas ativas.

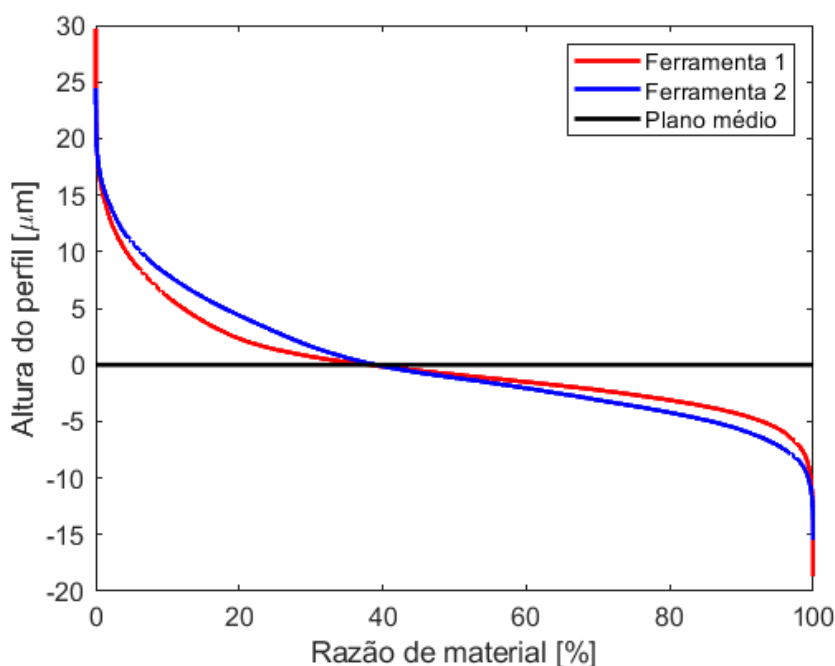


Figura 8- Curva de distribuição de material para as ferramentas 1 e 2

O resultado apresentado é comprovado através da avaliação da quantidade média de grãos por unidade de área. Para as ferramentas 1 e 2, a quantidade média de grãos por mm^2 é de 341,3 e 366,7, respectivamente. Assim, a ferramenta 2 apresenta uma concentração de grãos 7,4% superior.

4.2 DESGASTE DA SUPERFÍCIE DE CORTE DAS PONTAS ABRASIVAS

A evolução do volume de material removido da peça em relação ao volume de material removido da ferramenta 1 é apresentado na Figura 9. Nota-se que, até o fim de vida, o volume máximo de material removido da peça foi de 7,49 mm^3 e o volume máximo de material removido da ferramenta foi de 0,86 mm^3 . A partir do ajuste de uma reta ($R^2 = 0,95$), obtém-se que a relação de retificação G para a ferramenta 1 é de aproximadamente 8,37.

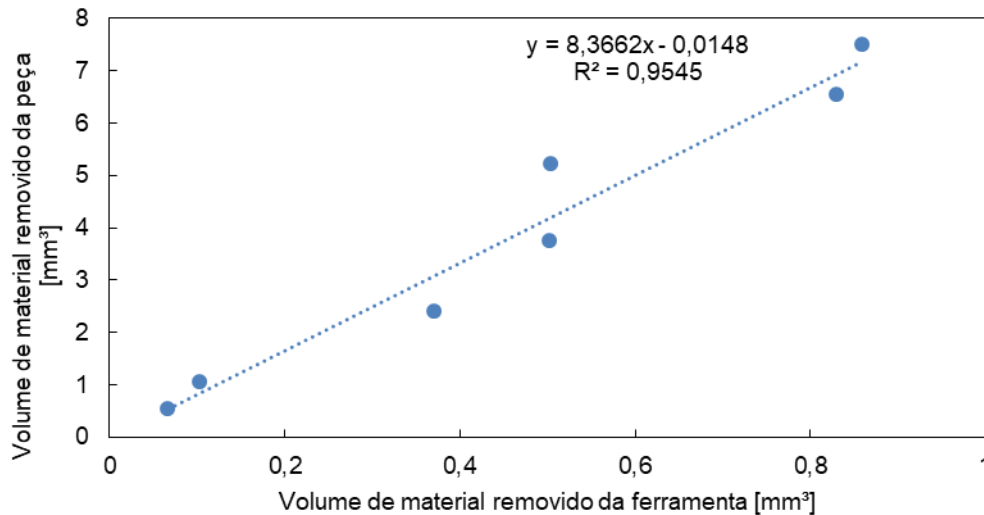


Figura 9- Evolução do volume de material removido da peça em relação ao volume de material removido da ferramenta 1

De modo geral, o desgaste de componentes em sistemas tribológicos ocorre em três diferentes estágios. No primeiro, há desgaste acelerado, com adaptação do sistema; no segundo, o desgaste evolui de maneira estável, com uma taxa de crescimento reduzida; no terceiro, a taxa aumenta e o desgaste cresce rapidamente até o fim de vida (BLAU, 2005). Tendo isso em vista, percebe-se que o coeficiente linear da equação gerada não possui significado físico, já que a reta de onde se obtém a relação de retificação está ligada apenas ao segundo estágio. Entre a origem do gráfico e o primeiro ponto experimental, outra reta teria que ser ajustada.

Para a ferramenta 2, a evolução do volume de material removido da peça em relação ao volume de material removido da ferramenta é apresentada na Figura 10. Nela, nota-se que o volume máximo de material removido da peça foi de 20,83 mm³ e o volume máximo de material removido da ferramenta foi de 1,26 mm³. Novamente, a partir do ajuste de uma reta ($R^2 = 0,70$), obtém-se que a relação de retificação G para a ferramenta 2 é de aproximadamente 17,01.

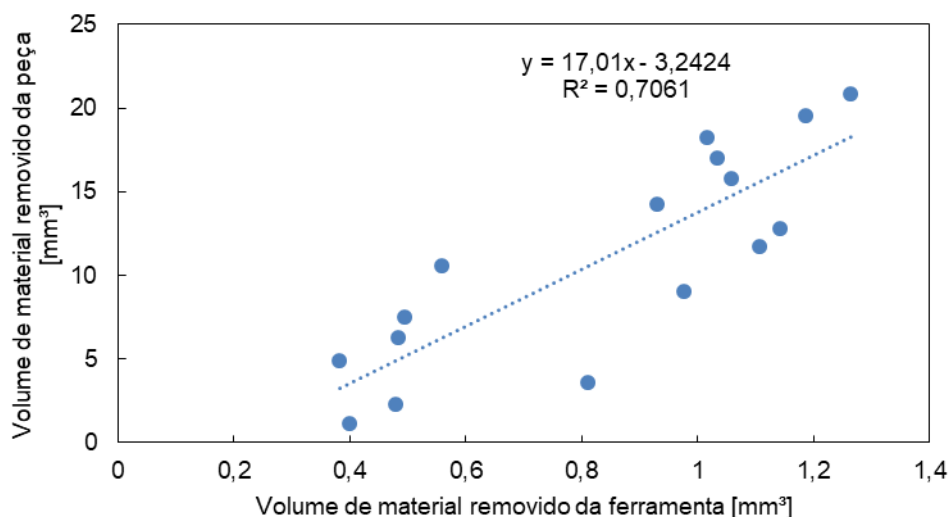


Figura 10- Evolução do volume de material removido da peça em relação ao volume de material removido da ferramenta 2

Embora no caso da ferramenta 2 a relação de retificação tenha sido aproximadamente o dobro da obtida para a ferramenta 1, nota-se que o coeficiente de ajuste dos pontos à reta (R^2) foi menor, o que indica maior dispersão dos dados coletados e maior variação no comportamento do desgaste da ponta abrasiva. Também é digno de nota que a penetração de trabalho apresentou um desvio médio de $10,72 \mu\text{m}$. No contexto do trabalho, o desvio pode estar condicionado a diversos fatores como mudanças nas condições da máquina ou pequenas variações no ajuste da ferramenta. Assim, visto que, as variações ocorreram aleatoriamente e não causarem um padrão consistente de erro, elas não levaram a alterações sistemáticas na qualidade ou na desempenho do trabalho.

De todo modo, em termos do volume de material removido, nota-se que a ferramenta 2 teve desempenho muito superior àquele observado para a ferramenta 1, o que foi causado apenas pelo aumento da velocidade de corte, de 150 m/min para 170 m/min . Conforme apontado pela literatura, o aumento da velocidade de corte reduz a espessura média de cavaco por grão e, com isso, a taxa de desgaste da ferramenta.

A protrusão dos grãos abrasivos é representada na Figura 11 pelo parâmetro Sp_k e pode ser considerada como o grau de afiação do rebolo. Para ambas as velo-

idades de corte testadas, o valor de Spk diminui com o aumento do volume de material removido da peça. Dessa forma, comprova-se que o desgaste predominante da ponta abrasiva se dá pelo desgaste dos grãos. Corroborando os resultados anteriores, percebe-se que o desgaste ocorre de maneira mais acelerada para a velocidade de 150 m/min. Para esta condição, atingiu-se um valor de Spk de 4,09 μm com um volume de material removido de 7,49 mm^3 . Para a condição de maior velocidade de corte, o valor de Spk de 4,61 μm foi atingido com um volume de material removido de 20,83 mm^3 .

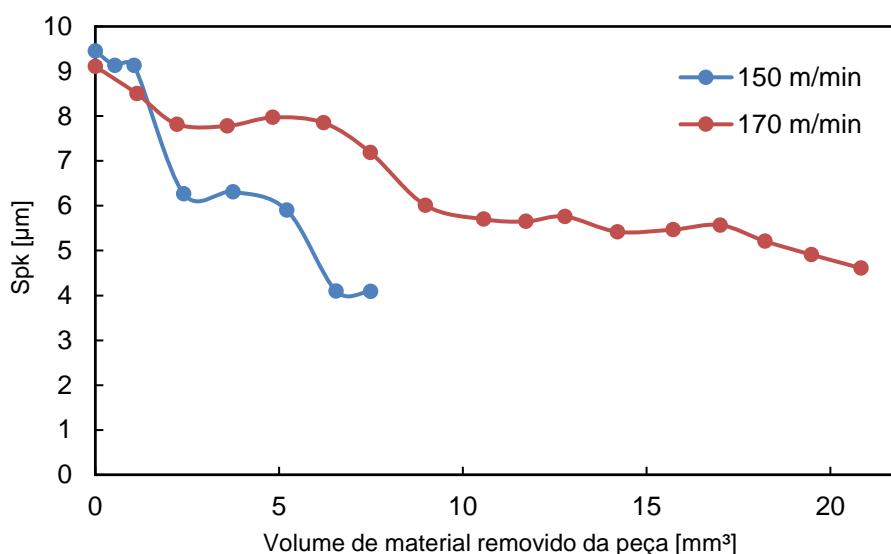


Figura 11- Evolução do parâmetro Spk em relação ao volume de material removido da peça

Adicionalmente, de modo a fornecer um indicativo da quantidade de arestas na camada abrasiva, o parâmetro Smr1 foi analisado. A Figura 12 apresenta sua evolução em relação ao volume de material removido da peça. Pode-se observar que o valor de Smr1 é reduzido com o aumento do volume de material removido da peça para a velocidade de corte de 150 m/min. Para a velocidade de corte de 170 m/min, o valor de Smr1 se mantém aproximadamente constante, com um aumento de 1,18% após a remoção de 20,83 mm^3 de material da peça.

A partir disso, nota-se que para uma maior velocidade de corte, o desgaste da ponta abrasiva não alterou de modo significativo a quantidade de arestas, ao contrário

do que ocorreu para a menor velocidade de corte, quando o desgaste se deu predominantemente pela remoção dos grãos do ligante.

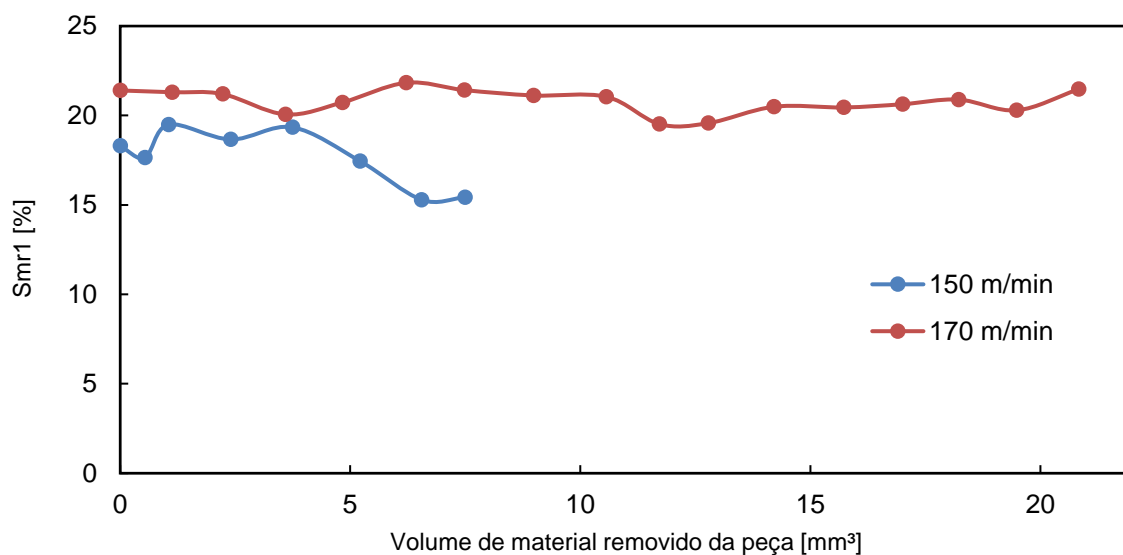


Figura 12- Evolução do parâmetro Smr1 em relação ao volume de material removido da peça

A fim de se analisar os mecanismos de desgaste das pontas abrasivas, a Figura 13 apresenta a evolução de sua superfície de corte em relação ao volume de material removido para ambas as velocidades de corte. Assim como esperado, nota-se que o mecanismo predominante para a ponta abrasiva na velocidade de corte de 150 m/min foi o arrancamento dos grãos, enquanto para a velocidade de corte de 170 m/min, o mecanismo de desgaste predominante foi a abrasão dos grãos. No entanto, a partir do volume 14,21 mm³, o arrancamento dos grãos passou a ocorrer de forma mais efetiva. Ademais, a partir da Figura 13, nota-se que para ambas as condições, houve adesão de material à ponta abrasiva.

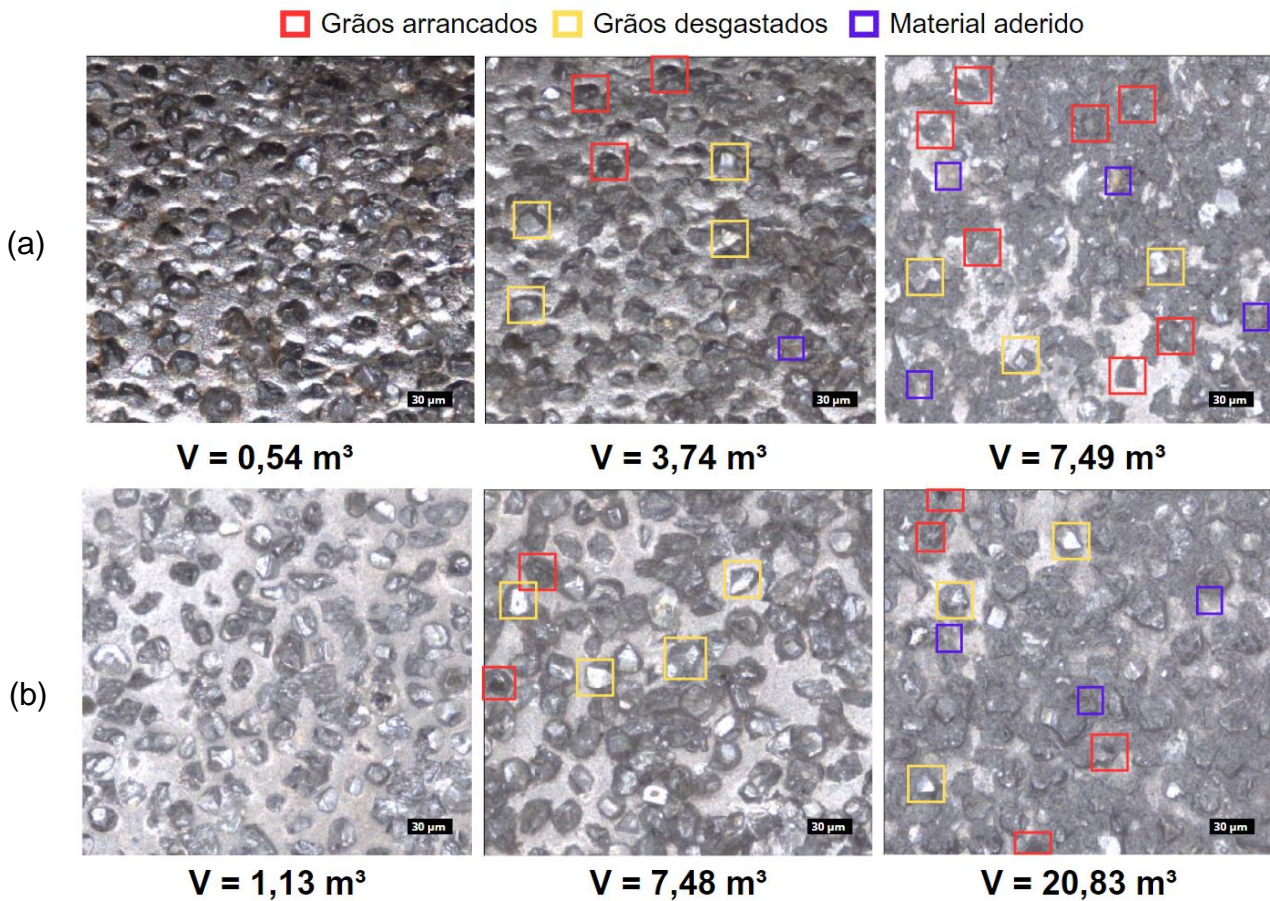


Figura 13- Evolução da superfície de corte da ponta abrasiva em relação ao volume de material removido para a velocidade de corte de (a) 150 m/min e (b) 170 m/min

4.3 QUALIDADE SUPERFICIAL

A evolução da rugosidade média das alturas máximas (R_z) em relação ao volume de material removido da peça é apresentada na Figura 13. Verifica-se que os valores de rugosidade máxima para a velocidade de corte de 150 m/min se mantiveram dentro de uma faixa entre $8,07 \mu\text{m}$ e $5,87 \mu\text{m}$. Para a velocidade de corte de 170 m/min, os valores de rugosidade máxima se mantiveram entre $10,01 \mu\text{m}$ e $5,34 \mu\text{m}$. Em ambas as condições, os valores de rugosidade máxima R_z diminuíram com o aumento do volume de material removido da peça, alcançando o menor valor para o volume máximo de material retirado da peça.

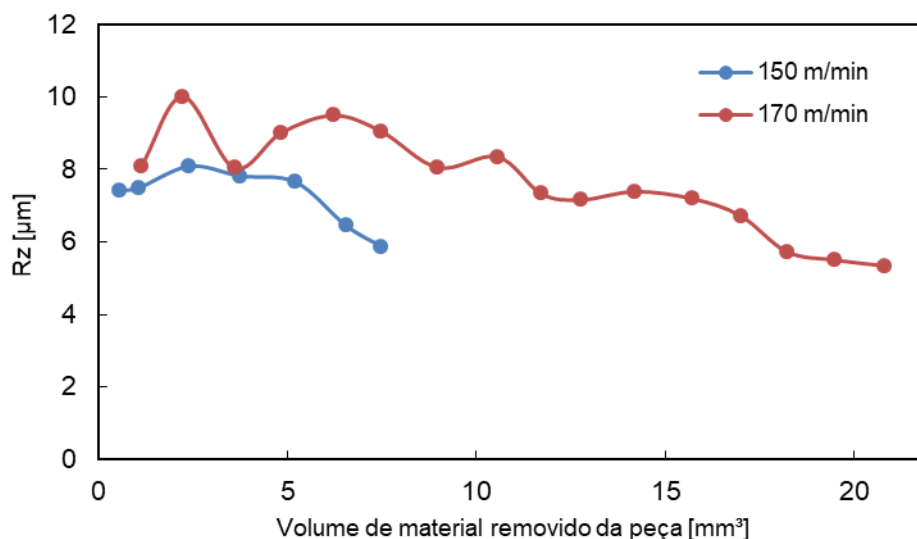


Figura 14- Evolução da rugosidade máxima Rz em relação ao volume de material removido da peça

A evolução da rugosidade média Ra em relação ao volume de material removido da peça teve comportamento similar e pode ser observado na Figura 15. Para a velocidade de corte de 150 m/min, os valores ficaram entre 1,80 µm e 1,33 µm. Para a velocidade de corte de 170 m/min, os valores se mantiveram entre 2,01 µm e 0,97 µm.

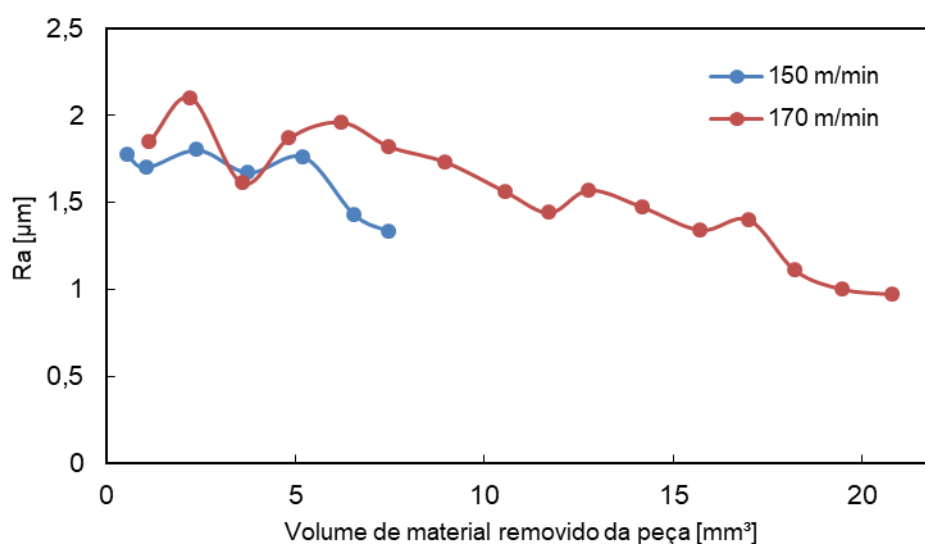


Figura 15- Evolução da rugosidade média Ra em relação ao volume de material removido da peça

Dentro do intervalo em que se pode comparar as rugosidades obtidas para as duas velocidades de corte, nota-se pouca diferença, embora os valores tenham se apresentado ligeiramente maiores para a velocidade de corte de 170 m/min. Apesar disso, após a remoção de aproximadamente 12,8 mm³ e 18 mm³ de material da peça, os valores de rugosidade média Ra e rugosidade máxima Rz, respectivamente, passaram a ser menores que os medidos para a velocidade de corte de 150 m/min.

Assim como observado por Hood et al. (2019) e Rodrigues (2021), os valores de rugosidade também dependem das características topográficas do rebolo e podem ser analisados com base nos parâmetros Spk (Figura 11) e Smr1 (Figura 12). De maneira geral, maiores protruções de grão provocam maiores sulcos na peça, assim como uma menor quantidade de grãos ativos aumenta o volume de material removido por grão, ambos aumentando o valor da rugosidade. Porém, o parâmetro Spk mostrou-se mais significativo para a rugosidade da peça.

Nesse sentido, o uso de maiores velocidades de corte nem sempre é um aspecto preponderante para redução da rugosidade, já que este parâmetro depende fortemente da topografia do rebolo. Assim o aumento da velocidade de corte de 150 m/min para 170 m/min não foi suficiente para evitar o efeito da diferença da protrução de grão nas duas ferramentas.

5 CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos por meio dos testes de retificação com pontas abrasivas em peças de metal duro, variando-se a velocidade de corte, podem ser tiradas as seguintes conclusões:

- A relação de retificação G para a maior velocidade de corte (170 m/min, $G = 17,01$) foi aproximadamente o dobro daquela obtida para a menor velocidade de corte (150 m/min, $G = 8,37$), o que pode estar relacionado à menor espessura de cavaco por grão no primeiro caso, que leva à redução da carga atuante sobre cada aresta.
- Conseqüentemente, o maior valor de velocidade de corte aplicado resultou em uma maior vida da ferramenta em termos do volume de material removido.
- Após a avaliação da evolução do parâmetro S_{pk} em relação ao volume de material removido da peça, verificou-se que o desgaste da ponta abrasiva se deu predominantemente pelo desgaste dos grãos de diamante, tendo ocorrido de forma mais acelerada para a velocidade de corte de 150 m/min.
- Para uma maior velocidade de corte (170 m/min), o desgaste da ponta abrasiva não alterou de modo significativo a quantidade de arestas, medida pelo parâmetro S_{mr1} . No entanto, para uma menor velocidade de corte (150 m/min), o desgaste da ferramenta reduziu a quantidade de arestas, o que está associado à remoção dos grãos abrasivos.
- Na análise dos mecanismos de desgaste das pontas abrasivas, verificou-se que, para a velocidade de corte de 150 m/min, o arrancamento dos grãos foi predominante, enquanto para a velocidade de 170 m/min, prevaleceu o desgaste por abrasão. Entretanto, após a remoção de $14,21 \text{ mm}^3$ de material, o arrancamento dos grãos também se intensificou na velocidade maior. Além disso, foi observada a adesão de material à ponta abrasiva em ambas as condições.
- Para ambas as velocidades de corte, houve redução dos valores de rugosidade máxima R_z e rugosidade média R_a com o aumento do volume de

material removido da peça, o que é atribuído principalmente à diminuição da protrusão de grão ao longo do tempo, avaliado pelo parâmetro Sp_k .

- O efeito da velocidade de corte sobre o comportamento da rugosidade não pôde ser elucidado, já que as ferramentas utilizadas possuíam diferentes características, que foram predominantes para a geração da qualidade superficial.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para complementação do estudo desenvolvido e determinação da aplicabilidade deste tipo de ferramenta abrasiva na retificação de metal duro, sugere-se que sejam avaliados os efeitos de maiores velocidades de corte sobre o desgaste. Havendo resultados positivos, torna-se possível o aumento do avanço e uma maior produtividade do processo. Outro aspecto relevante corresponde à investigação do comportamento da energia específica em diferentes condições, o que pode fornecer subsídios para a definição da região de transição dúctil-frágil do material no processo em questão.

6 REFERÊNCIAS

ABDULLAH, A.; PAK, A.; FARAH, M.; BARZEGARI, M. 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, p. 165-168, 2007.

AGUIRRE, F. M.; GONZALEZ, L. S.; HOOD, R.; KONG, M. C.; NOVOVIC, D.; SOO, S. L. Assessment of advanced process configurations for improving workpiece surface finish in point grinding. **CIRP Annals**, v. 72, n. 1, p. 267-272, 2023.

ASPINWALL, D. K.; DEWES, R. C.; BURROWS, J. M.; PAUL, M. A.; DAVIES, B. J. Hybrid high speed machining (HSM): system design and experimental results for grinding/HSM and EDM/HSM. **CIRP Annals**, v. 50, n. 1, p. 145-148, 2001.

BIFANO, T.; DOW, T.; SCATTERGOOD, R. Ductile-regime grinding: a new technology for machining brittle materials. **Journal of Engineering for Industry**, v. 113, p. 184-189, 1991.

BLAU, P.J. On the nature of running-in. **Tribology International**, v. 38, p. 1007-1012, 2005.

BOEING. **Boeing prevê demanda por 44 mil novas aeronaves até 2043**. 2024. Disponível em: <https://www.boeing.com.br/news/2024/boeing-preve-demanda-por-44-mil-novas-aeronaves-ate-2043-enquant>. Acesso em: 10 set. 2024.

CURTIS, D. T.; SOO, S. L.; ASPINWALL, D. K.; MANTLE, A. L. Evaluation of Workpiece Surface Integrity Following Point Grinding of Advanced Titanium and Nickel Based Alloys. **Procedia CIRP**, vol. 45, pp. 47–50, 2016.

DARAFON, A.; WARKENTIN, A.; BAUER, R. Characterization of grinding wheel topography using a white chromatic sensor. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 70, p. 22-31, 2013.

SANTHOSH, D.; PUŠAVEC, F.; KRAJNIK, P. Grinding of Cemented Carbide Using a Vitrified Diamond Pin and Lubricated Liquid Carbon Dioxide. **Strojniški Vestnik – Journal of Mechanical Engineering**, vol. 69, no. 11-12, 21 Nov., pp. 435–443, 2023.

DENKENA, B.; BIERMANN, D. Cutting edge geometries. **CIRP annals**, v. 63, n. 2, p. 631-653, 2014.

DING, W.; LINKE, B.; ZHU, Y.; LI, Z.; FU, Y.; SU, H.; XU, J. Review on monolayer CBN superabrasive wheels for grinding metallic materials. **Chinese Journal of Aeronautics**, v. 30, n. 1, p. 109-134, 2017.

GONG, Y.; QIU, J.; LIU, Y. J.; CHENG, J.; XU, F. The Grinding Mechanism on Quick-Point Grinding Wheel Wear and Effects on Surface Quality. **Key Engineering Materials**, vol., pp. 370–374, 2009.

HEGEMAN, J.; DE HOSSON, J.; WITH, G. Grinding of WC-Co hardmetals. **Wear**, v. 248, p. 187-196, 2001.

HOOD, R.; AGUIRRE, F. M.; GONZALEZ, L. S.; NOVOVIC, D.; SOO, S. Evaluation of superabrasive grinding points for the machining of hardened steel. **CIRP Annals**, v. 68, n. 1, p. 329-332, 2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 513: Tool materials – Classification. Geneva: ISO, 2012.

KLOCKE, F.; KÖNIG, W. *Fertigungsverfahren – Schleifen, Honen, Läppen*. 4. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. 494S

KLOCKE, F.; WEBSTER, J.; STUFF, D. High-speed grinding – fundamentals and state of the art in Europe, Japan and the USA. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, v. 46, p. 715- 724, 1997.

HEYMANN, T. **Schleifen und Polierschleifen von wendelförmigen Spannuten an Vollhartmetallbohrwerkzeugen**. Vulkan-Verlag, 2014.

KOMANDURI, R.; LUCCA, D.; TANI, Y. Technological advances in fine abrasives process. **Annals of the CIRP**, v. 46, p. 545-596, 1997.

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

LACHANCE, S.; WARKENTIN, A.; BAUER, R. Development of an automated system for measuring grinding wheel wear flats. **Journal of Manufacturing**

Systems, v. 22, n. 2, p. 130-135, 2003.

LONARDO, P.; TRUMPOLD, H.; DE CHIFFRE, L. Progress in 3D surface microtopography characterization. **CIRP annals**, v. 45, n. 2, p. 589-598, 1996.

MACHADO, A.; COELHO, R.; SILVA, M. **Teoria da usinagem dos materiais**. 1ª ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 371p, 2009.

MALKIN S, GUO C. **Grinding technology: theory and application of machining with abrasives**. Second Edi. Industrial Press Inc., 2008.

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

PIETROW, N.; CURTIS, D.; GHADBEIGI, H.; NOVOVIC, D.; MCGOURLAY, J. An investigation into the challenges of the point grinding machining process. **Procedia CIRP**, v. 101, p. 190-193, 2021.

PIETROW, N.; CURTIS, D.; NOVOVIC, D.; MCGOURLAY, J.; GHADBEIGI, H. Evolution of Electroplated Cubic Boron Nitride Tool Surface Texture Parameters during Point Grinding. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, vol. 144, no. 12, 2022.

RODRIGUES, A.; VENTURA, C. Diamond grinding wheel wear characterization after finishing cemented tungsten carbide cutting inserts. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 45, n. 9, p. 450, 2023.

RODRIGUES, Aristóteles Guido. **Caracterização do desgaste do rebolo na retificação de insertos de metal duro**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos, 2021.

ROWE, W. Brian. **Principles of modern grinding technology**. William Andrew, 2013.

SOO, S.; NG, E. G.; DEWES, R.; ASPINWALL, D.; BURROWS, J. Point grinding of nickel-based superalloys. **Industrial Diamond Review**, v. 62, n. 593, p. 109-116, 2002.

STANIEWICZ-BRUDNIK, B.; KAROLUS, M.; BĄCZEK, E.; SKRABALAK, G.; LASZKIEWICZ-ŁUKASIK, J. The influence of the diamond wheel grinding process on the selected properties of boron nitride dispersion in cemented carbide (BNDCC) composites. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 95, n. 1–4, p. 1437–1450, 2018.

STEPHENSON, D.; AGAPIOU, J. **Metal cutting – Theory and Practice**. 2. ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 846 p., 2005.

VERKERK, J. Final report concerning CIRP cooperative work on the characterization of grinding wheel topography. **Annals of the CIRP**, v. 26, n. 2, p. 385-395, 1977.

WANG, K., SUN, W. C.; NIE, F.; WU, Q.; WU, H.; LI, S. Research on the Influence of NC Quick-Point Grinding Parameters to Complex Rotator Surface Roughness. **Applied Mechanics and Materials**, vol. 556-562, pp. 1083–1086, 2014.

XIE, J.; WEI, F.; ZHENG, J. H.; TAMAKI, J.; KUBO, A. 3D laser investigation on micron-scale grain protrusion topography of truncated diamond grinding wheel for precision grinding performance. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 51, n. 5, p. 411-419, 2011.

YAN, L.; RONG, Y.; JIANG, F.; ZHOU, Z. Three-dimension surface characterization of grinding wheel using white light interferometer. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 55, p. 133-141, 2011.

YANG, J.; ODÉN, M.; JOHANSSON-JÖESAAR, M. P.; LLANES, L. Grinding effects on surface integrity and mechanical strength of WC-Co cemented carbides. **Procedia CIRP**, v. 55, p. 257-263, 2015.

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

YU, H.; LU, Y.; WANG, J. Study on wear of the grinding wheel with an abrasive

ZHAN, Y. et al. Wear of brazed diamond wheel in grinding of cemented carbide. **Key Engineering Materials**, v. 416, p. 198-204, 2009.

APÊNDICE 1

Código em Matlab utilizado para obtenção do volume de material removido da ferramenta a partir das curvas de Abbott-Firestone:

```
close all;

x=0:100;
y = zeros(size(x));

dadosn = dlmread('curva nova.txt');
dados1 = dlmread('curva teste 16.txt');% variar conforme o teste

% nova
an = dadosn(:,1);
zn = dadosn(:,2);
[zero_n,index]= min(abs(zn));

% teste 1
a1 = dados1(:,1);
z1 = dados1(:,2);
z1c = z1-z1(index);

%%% Teste 1
% Interpolação para garantir o mesmo número de pontos
% Definir os pontos comuns para interpolação
common_x = intersect(an, a1);

% Interpolar as curvas para os pontos comuns
zn_interp = interp1(an, zn, common_x, 'linear', 'extrap');
z1c_interp = interp1(a1, z1c, common_x, 'linear', 'extrap');

% Calcular a diferença entre as curvas interpoladas
diff = abs(zn_interp - z1c_interp);

% Calcular a área entre as curvas
area(1) = trapz(common_x, diff);

% Filtrar apenas os pontos onde zn_interp e z1c_interp são positivos
positive_indices = (zn_interp > 0) & (z1c_interp > 0);
common_x_positive = common_x(positive_indices);
diff_positive = diff(positive_indices);

% Calcular a área entre as curvas
area_positive(1) = trapz(common_x_positive, diff_positive);

%%%%% Cálculo dos volume

area = pi*(5.69)*(1.653); % mm^2
v = (area_positive*10^3)*area; % mm^3

% Plot da curva n x teste 1
figure (1)
plot(an,zn*10^6,'b','linewidth',2); hold on;
plot(a1,z1c*10^6,'r','linewidth',2);
```

```
plot(x,y,'k','linewidth',2);  
xlabel('Razão de material [%]');  
ylabel('Altura do perfil [\mum]');  
legend('Ponta abrasiva nova','Ponta abrasiva desgastada','Plano médio');  
grid off;  
box on;  
set(gca,'fontname','arial','fontsize',12);
```