

**Universidade Federal de São Carlos
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica**

Trabalho de Conclusão de Curso

**Influência de diferentes preparações de aresta de corte de um inserto de
 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ no torneamento de um aço endurecido**

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

**Aluna:
Maysa Freitas Mainardes Nardy**



São Carlos - SP – 2023

**Universidade Federal de São Carlos
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica**

Trabalho de Conclusão de Curso

**Influência de diferentes preparações de aresta de corte de um inserto de
 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ no torneamento de um aço endurecido**

Prof. Dr.-Ing. Carlos Eiji Hirata Ventura
Assinatura do Orientador

Maysa Freitas Mainardes Nardy
Assinatura da Aluna

DEDICATÓRIA

Aos meus queridos e amados pais, Pedro e Rosane, por todo suporte dado durante a graduação, por todo amor e por estarem sempre por mim nos momentos mais difíceis. Também aos meus irmãos, Júlia e Pedro, que são parte de mim. Obrigada, minha família! Tudo é por vocês.

Á Deus, por abençoar minha vida com pessoas maravilhosas e por todas as bençãos.

Às minhas avós, Elvira e Maria, que não estão mais nesse plano, por serem, assim como minha mãe, exemplos de mulheres fortes e fontes de inspiração para mim.

Às minhas amigas da República Só Fadinhas, pelos anos de amizade, companheirismo e por todos os momentos aprendendo juntas, vocês foram essenciais para mim.

Aos meus amigos da Atlético UFSCar, por todas as experiências e por ajudarem no meu desenvolvimento tanto pessoal como profissional.

Às minhas amigas amadas de longa data, Talissa e Beatriz, por todo suporte emocional, carinho e pela linda amizade que cultivamos. Ao meu amigo, Koga, meu companheiro de estudos, pela ajuda de sempre e pelo ombro nos momentos mais difíceis. Ao meu namorado, Rafael, por todo amparo emocional que me deu ao longo desses anos e por fazer parte da minha vida.

Ao meu professor orientador, Carlos Ventura, por toda ajuda, aprendizado e paciência que sempre teve comigo, serei sempre grata ao senhor.

RESUMO

A geometria de aresta de um inserto de corte tem grande influência nas temperaturas e forças envolvidas no processo, além da longevidade da ferramenta. Visando uma maior qualidade das peças produzidas, bem como maior produtividade durante a usinagem, é indispensável que a preparação de aresta seja realizada de forma adequada. Baseado nisso, foi realizada uma investigação com relação a diferentes preparações de uma ferramenta cerâmica de Al_2O_3 -MgO, desenvolvida em laboratório. Materiais frágeis, como o mencionado, devem ter sua aresta reforçada, de forma a resistir ao impacto com a peça sem que haja ruptura. Por se tratar de um material recentemente desenvolvido e não havendo informações disponíveis, este trabalho serviu como uma primeira investigação acerca deste tema e teve como objetivo encontrar a preparação de aresta que aumentasse a durabilidade do inserto, bem como determinar os mecanismos de desgaste da ferramenta e o acabamento da peça usinada com as diferentes preparações realizadas. Para isso, insertos de corte do material mencionado tiveram suas arestas preparadas com quatro diferentes geometrias por meio do processo de retificação e aplicadas com parâmetros constantes no torneamento do aço 4140 tratado termicamente (50 HRC). A fim de se gerar subsídios para análise do processo, os mecanismos e tipos de desgaste foram analisados a partir de microscopia óptica. Após análise dos resultados, foi constatado que o inserto com $K = 2$ se mostrou mais efetivo do que todas as outras geometrias utilizadas. Este, além de usinar maiores volumes de material em comparação com as outras ferramentas, também teve um tempo de vida maior e em ambos os ensaios não houve rompimento da aresta. Em contrapartida, o inserto com chanfro único usinou os menores volumes e fraturou ao final dos testes. As ferramentas com $K = 1$ e aresta sem preparação permitiram a usinagem de volumes intermediários. Com relação aos mecanismos de desgaste da ferramenta, a abrasão, adesão e lascamentos foram os mais predominantes, além da quebra da ferramenta, que aconteceu em 75% dos casos. Por fim, em todos os casos, o aumento do desgaste da ferramenta levou a um aumento da rugosidade, devido a possíveis variações da microgeometria.

Palavras-chave: Retificação de cerâmica. Torneamento. Microgeometria.

ABSTRACT

The cutting edge geometry has a great influence on the temperatures and forces developed during metal cutting processes, as well as on tool life. Aiming at obtaining high quality components and high productivity, proper edge preparation is essential. Within this context, the applicability of Al₂O₃-MgO ceramic cutting inserts with different edge geometries was investigated in hard turning. Such brittle materials must have a resistant edge to resist the impact without breaking. As it is a recently developed material and there is no information available, this work serves as a first investigation on this topic and has the goal of determining the most appropriate edge preparation regarding tool life and workpiece surface quality. For this, cutting inserts of the mentioned material had their edges prepared with four different geometries through grinding process and were applied with constant parameters in turning of hardened AISI 4140 steel (50 HRC). To analyze wear types and mechanisms, the used tools were observed in an optical microscope. From the obtained results, it was verified that the microgeometry with form factor $K = 2$ was the most effective in terms of tool life. In contrast, the insert with a single chamfer machined lower material volumes and fractured at the end of the tests. Tools with $K = 1$ and unprepared cutting edge allowed the machining of intermediate volumes. Regarding tool wear mechanisms, abrasion, adhesion, and chipping were predominant, in addition to tool breakage, which occurred in 75% of the experiments. Furthermore, in all cases, increased tool wear led to increased surface roughness, due to possible variations in microgeometry.

Keywords: Ceramic grinding. Turning. Microgeometry.

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 6 |
| 2. REVISÃO DA LITERATURA | 8 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS..... | 14 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 17 |
| 4.1. PREPARAÇÃO DAS FERRAMENTAS | 17 |
| 4.2. TIPOS E MECANISMOS DE DESGASTE | 20 |
| 4.3. QUALIDADE SUPERFICIAL | 22 |
| 5. CONCLUSÕES | 26 |
| 6. REFERÊNCIAS | 27 |

1. INTRODUÇÃO

Durante a retificação de cerâmicas, deve-se levar em conta que este tipo de material possui alta dureza e baixa tenacidade, propriedades que afetam a qualidade superficial do produto final (RIBEIRO, 2020). Segundo Pereira (2019), as forças de retificação correspondem a outro fator que prejudica o acabamento do material, sendo o maior limitante na sua aplicabilidade a baixa tenacidade, que pode gerar fraturas. A cerâmica, geralmente, tem seu desgaste gerado por abrasão ou de forma química, pois os lascamentos aumentam de forma súbita, o que torna o material da ferramenta dispensável e conseqüentemente prejudica a peça usinada (RIBEIRO, RIBEIRO, MALÈRE, 2006).

Os mesmos autores ainda mencionam que o emprego das cerâmicas como inserto de corte é uma grande tendência dentro da usinagem, tendo em vista que, em comparação a outros tipos de material, como o metal duro, há a vantagem da reafiação, ou seja, é possível restaurar o perfil das ferramentas, o que reduz os custos de projeto pela diminuição da necessidade de compra de novas ferramentas. Além disso, para determinados materiais, como o ferro fundido e os aços endurecidos, a cerâmica tem a vantagem de fazer com que os mesmos tenham a propensão de produzir cavacos curtos.

O $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ utilizado nesta pesquisa, desenvolvido por pesquisadores do Departamento de Materiais e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista (UNESP), campus Guaratinguetá, é um material com resistência superior à da alumina comercial aplicada em insertos de corte. Os autores Carter e Norton (2007), afirmam que o óxido de magnésio é acrescentado para estabilizar o tamanho de grão do material, ou seja, ele vai inibir o crescimento do grão de Al_2O_3 e vai permitir a obtenção de um produto de alta densidade por sinterização sem pressão. Este material cerâmico possui densidade relativa de 98,5%, dureza de 1968 VH e vem sendo aplicado com sucesso no torneamento de superligas (KONDO et al., 2018), ferro fundido (SOUSA et al., 2017) e aço inoxidável de elevada dureza (PAULA et al., 2019).

Este trabalho servirá como investigação pioneira acerca da usinagem do aço AISI 4140 endurecido com a aplicação dos referidos insertos de corte, os quais terão suas arestas preparadas com quatro geometrias diferentes através da retificação, que, segundo Ventura, Denkena e Köhler (2013), oferece vantagens com relação a outros processos, como maior flexibilidade para otimização do acabamento e possibilidade de se executar a retificação da superfície de folga e da aresta em uma única fixação do inserto, diminuindo-se o tempo do

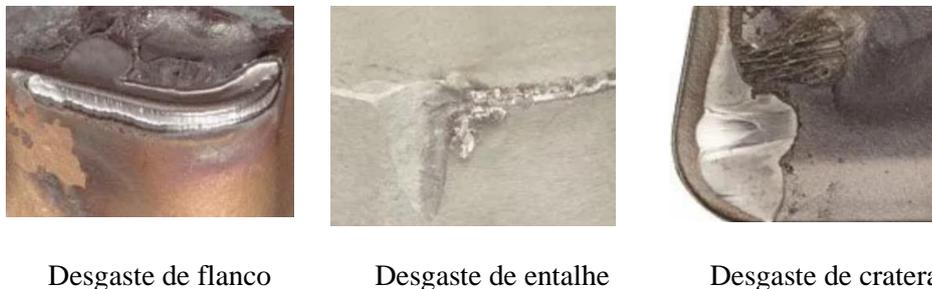
processo. Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo principal determinar geometrias de aresta que tragam durabilidade à ferramenta e boa qualidade superficial às peças usinadas.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Foi mostrado por Kumar, Durai e Sornakumar (2006b) que as ferramentas de corte de cerâmica à base de alumina têm resistência à abrasão e dureza a quente bastante elevadas. Quimicamente, são mais estáveis do que os aços e carbonetos, tendo assim menor propensão à aderência aos metais durante a usinagem e à formação de arestas postiças. Isso dá às peças de aço um bom acabamento superficial e precisão dimensional após a usinagem. Os autores afirmaram ainda que os tipos de desgaste de ferramentas cerâmicas mais comuns são os desgastes de flanco, cratera e entalhe, sendo que o primeiro tipo afeta a vida útil da ferramenta em velocidades mais baixas, enquanto os outros são predominantes a velocidades mais altas, acima de 200 m/min.

Sandvik (2022) explica que, na usinagem de aços endurecidos, o desgaste do flanco ocorre principalmente por conta da abrasão causada por elementos duros no material usinado, o desgaste de cratera ocorre por reação química entre peça e ferramenta e o desgaste de entalhe ocorre por conta da adesão e da superfície endurecida no limite da região da profundidade de corte. Estes tipos de desgaste são ilustrados na Figura 1.

Figura 1. Tipos de desgaste em ferramentas de corte



Fonte: Adaptado de Sandvik, 2022.

A norma ISO 3685 (1997) afirma que, em situações práticas, o fim da vida útil da ferramenta é determinado pelo tempo em que ela para de produzir peças com as dimensões e qualidade superficiais esperadas. No entanto, as razões para o fim da vida útil são diferentes em cada caso, podendo depender, por exemplo, das condições de corte.

Kumar, Durai e Sornakumar (2006a) investigaram o comportamento de desgaste de ferramentas de corte de cerâmica à base de alumina com adição de SiC e TiCN na usinagem de um aço inoxidável martensítico 410 endurecido (60 HRC) e de um aço EN 24 endurecido a 45 HRC. Os autores verificaram que o desgaste de flanco aumentou com a velocidade de corte em

ambos os tipos de ferramenta, embora tenham sido maiores na usinagem do aço inoxidável martensítico e ocorrido juntamente aos desgastes de cratera e de entalhe, o que se deve à maior dureza deste material. Brandt e Mikus (1987) mostraram que o desgaste de cratera em ferramentas de cerâmica à base de alumina durante a usinagem de aços depende majoritariamente da deformação plástica superficial, que pode ser afetada por reações químicas com o material da peça usinada.

Bartarya e Choudhury (2011) demonstraram que, na usinagem do aço AISI 5140, o material da ferramenta, a geometria da aresta de corte e os parâmetros de corte afetam a eficiência do processo também em termos de força e integridade superficial. Os autores observaram que o aumento do raio de aresta tende a aumentar a rugosidade da superfície e a força passiva, devido ao aumento da deformação do material. O VAT 32®, que, segundo Bonhin (2015), é um material à base de ferro e níquel endurecido por precipitação da fase Ni_3 [Al, Ti, Nb], teve seu torneamento analisado por Kondo et al. (2018) utilizando-se uma ferramenta experimental de cerâmica à base de Al_2O_3+MgO . Os autores encontraram que maiores valores de avanço e profundidade de corte levam, de forma significativa, a uma maior potência, enquanto apenas o avanço tem efeito sobre a rugosidade. Mandal, Mondal e Singh (2016) investigaram a aplicabilidade de um inserto de corte à base de alumina, com adição de zircônia dopada com óxido de cromo, no torneamento a alta velocidade do aço AISI 4340 e encontraram como condições ideais para a otimização do desgaste, da rugosidade e dos esforços uma velocidade de corte de 420 m/min combinada a um avanço de 0,12 mm/rev e uma profundidade de corte de 0,5 mm.

Camuscu (2005) apresentou resultados de uma investigação experimental sobre o efeito da velocidade de corte nos resultados do processo de torneamento de ferros fundidos nodulares com ferramentas cerâmicas à base de alumina. Maiores valores da variável de entrada levaram ao aumento do desgaste, mas, a princípio, redução da força principal de corte, devido às altas temperaturas geradas. Todavia, a progressão do desgaste de flanco levou ao crescimento das componentes da força de usinagem durante o processo. Tratando da usinabilidade do aço 100Cr6 endurecido para rolamentos, utilizando insertos de corte de cerâmica mista e alumina reforçada com whiskers, Benga e Abrão (2003) avaliaram a vida útil da ferramenta e o acabamento superficial de peças torneadas. Os resultados obtidos mostraram que a velocidade de corte é o fator que mais afeta a vida útil da ferramenta e o avanço o que mais influencia a rugosidade, independentemente da ferramenta aplicada.

Um estudo foi realizado por Barry e Byrne (2001) para investigar os mecanismos de desgaste de uma ferramenta de $Al_2O_3+TiC+MgO$ no torneamento de aços endurecidos e foi verificado que a taxa de desgaste desta é determinada pelo teor de carboneto no material trabalhado. Além disso, notou-se que a elevada frequência decorrente da formação de cavacos segmentados gera oscilação nas forças, o que também afeta o desgaste. Shalaby et al. (2014) avaliaram o desempenho de diferentes materiais de ferramenta no torneamento do aço AISI D2 endurecido. Os resultados revelaram que o inserto de cerâmica mista pode superar o PCBN (nitreto cúbico de boro policristalino) em diferentes critérios de usinabilidade, sendo que o comportamento de atrito entre cada material da ferramenta e da peça controla o desgaste da ferramenta. O inserto de cerâmica mista permitiu vida útil mais longa e menores componentes de força, o que foi atribuído à sua maior estabilidade química e térmica. El Hakim et al. (2011) também compararam o desempenho de ferramentas de cerâmica mista e PCBN na usinagem de aço rápido e verificaram que a alta estabilidade química e térmica dos tribo-filmes de Al_2O_3 formados nas ferramentas protege seu substrato, evitando que o calor gerado na interface penetre em seu núcleo.

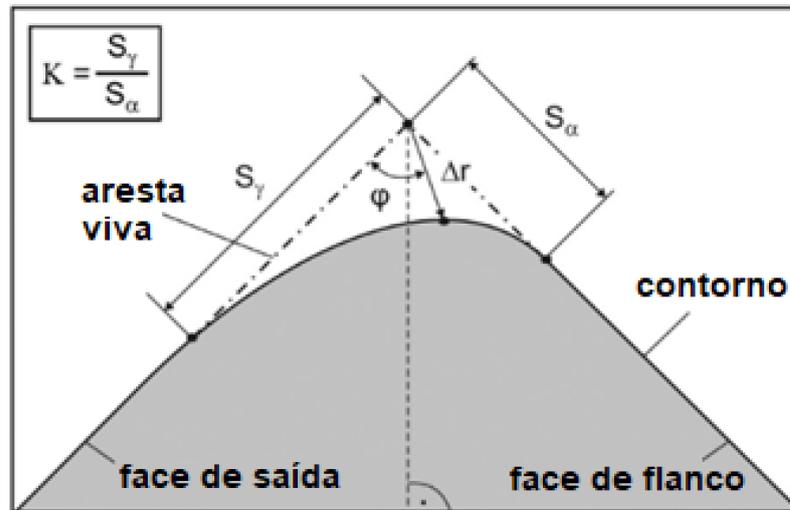
Em seu estudo, Sobiya et al. (2015) analisaram o comportamento ao desgaste de uma ferramenta de corte cerâmica durante o torneamento do aço inoxidável AISI 440B em diferentes condições de usinagem. Os resultados mostraram que o desgaste de flanco cresce com o aumento da velocidade de corte, sendo predominante o mecanismo de desgaste por abrasão, o qual é apenas moderado na superfície de saída. Outros mecanismos, como lascamento, adesão e deformação plástica, também foram observados. Já Cui et al. (2020) estudaram os mecanismos de desgaste de ferramentas de cerâmica mista no torneamento do Inconel 718 e constataram que a abrasão e a adesão são predominantes para a geração de desgaste de flanco e entalhe. Estudos de usinagem com ferramentas de cerâmica mista também foram conduzidos por Khan (2018) na usinagem de aços endurecidos. O autor observou desgaste de flanco concentrado na ponta e na região da aresta secundária da ferramenta de corte, o que pode prejudicar o acabamento superficial da peça usinada. Buscando inovações em relação ao material de ferramenta, Dutta, Chattopadhyaya e Ray (2006) avaliaram o desempenho de insertos de corte de alumina com adição de prata e notaram que, dentro da faixa investigada, a abrasão e a deformação plástica corresponderam aos mecanismos ativos de desgaste para as pastilhas desenvolvidas.

Conforme mencionado, a preparação de aresta também possui efeito relevante sobre o desempenho da ferramenta no processo e diversos estudos têm sido realizados para uma maior compreensão dos fenômenos envolvidos. Ventura et al. (2017) verificaram que a presença de

um raio ou chanfro em uma ferramenta de corte, assim como suas dimensões, pode alterar principalmente as forças e a vida útil da ferramenta, bem como a qualidade superficial da peça usinada. A geometria da aresta de corte afeta principalmente as forças de avanço e passiva, enquanto a força de corte, a energia específica e a temperatura de corte não são drasticamente alteradas. Hua et al. (2005) mostraram que, no torneamento do aço AISI 52100, a adição de um chanfro a uma aresta já arredondada tem efeito similar sobre as tensões residuais àquele obtido com o uso de raios de brunimento de aresta maiores. Já Özel, Karpaz e Srivastava (2008) propuseram microgeometrias variáveis ao longo da ponta da ferramenta para manter constante a relação entre a espessura nominal do cavaco e o raio da aresta e este tipo de preparação mostrou reduzir a geração de calor ao longo da aresta, além de induzir uma menor deformação plástica na peça usinada e reduzir o desgaste da ferramenta.

Denkena, Köhler e Ventura (2013) demonstram que arestas de corte afiadas são geralmente consideradas inadequadas para processos de alto desempenho, por conta de sua baixa resistência à carga. Por conta disso, a preparação da aresta de corte para aumentar a vida útil e o desempenho da ferramenta é de extrema importância. Neste contexto, um novo método para geração de arestas de corte personalizadas por meio de retificação foi apresentado pelos autores, tendo sido proposta a discretização de arredondamentos em diversos chanfros. Os parâmetros considerados na aresta de corte são K , $S\alpha$, $S\gamma$, Δr e φ , conforme mostrado na Figura 2, onde: $S\alpha$ é a distância entre o ponto de intersecção das tangentes das superfícies de folga e de saída e o ponto de separação entre a superfície de folga e o perfil da microgeometria; $S\gamma$ é a distância entre o ponto de intersecção das tangentes das superfícies de folga e de saída e o ponto de separação entre a superfície de saída e o perfil da microgeometria; K corresponde à relação entre $S\gamma$ e $S\alpha$ e determina a tendência da aresta para a face de folga ($K < 1$) ou de saída ($K > 1$); o parâmetro Δr quantifica a afiação da aresta, sendo que um valor baixo indica uma aresta afiada e um valor elevado, uma geometria que se assemelha a um chanfro; por fim, o ângulo φ , entre a superfície de saída e a distância Δr , descreve a localização do ponto mais alto da aresta.

Figura 2. Caracterização de um raio assimétrico na aresta de corte



Fonte: Adaptado de Denkena, Köhler e Ventura, 2013.

Ventura, Denkena e Köhler (2013) investigaram a aplicabilidade, no torneamento de um aço endurecido, de insertos de corte de nitreto cúbico de boro policristalino com geometrias de aresta preparadas por retificação. Neste estudo, os arredondamentos propostos foram discretizados por chanfros e um estudo da influência da sua quantidade no comportamento do processo foi realizado. O uso de microgeometrias assimétricas mostrou-se adequado, levando ao aumento da vida útil da ferramenta e a tensões residuais compressivas, embora tenham sido obtidas maiores forças de corte. Foi verificado também que pequenos chanfros ou arredondamentos têm o potencial de reforçar a aresta sem danificar o processo.

Um estudo posterior realizado por Ventura e Denkena (2015) analisou o desempenho de ferramentas de cerâmica mista, também com arredondamentos nas arestas de corte discretizados, no torneamento de um aço endurecido e mostrou que uma preparação de aresta adequada pode superar as desvantagens associadas à sua fragilidade. Assim, verificou-se que o arredondamento de aresta com $K = 2$ e discretizado com três chanfros foi o mais adequado, ponderando-se a rugosidade da peça e a vida da ferramenta. Ventura, Köhler e Denkena (2015) utilizaram insertos de PCBN também preparados com arredondamentos assimétricos por retificação no torneamento interrompido de um aço endurecido e observaram que, neste caso, uma aresta de corte com chanfro único é a mais adequada em relação ao desgaste de flanco da ferramenta, pois reforça a aresta de corte sem aumentar excessivamente as cargas mecânicas e térmicas geradas durante o processo. Eles notaram ainda que a diminuição do fator de forma dos arredondamentos discretizados levou a um aumento do comprimento de

contato entre a aresta de corte e a peça, o que aumentou a carga sobre a ferramenta, bem como seu desgaste.

Com base no exposto, nota-se que ferramentas à base de alumina e aditivos podem apresentar bom desempenho no torneamento de aços com dureza elevada, desde que parâmetros de corte sejam escolhidos adequadamente e que uma preparação de aresta apropriada seja realizada. Com isso, demonstra-se a importância do assunto a ser investigado no presente trabalho, que tem como objetivo a determinação, para uma ferramenta de $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO}$, de uma geometria de aresta produzida por retificação que leve à maior vida útil, sem se desprezar, no entanto, o acabamento superficial da peça torneada.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização dos experimentos de torneamento, insertos de $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO}$ (Figura 3), com 97,75% de Al_2O_3 e 0,25% de MgO , código SNMA120408 (quadrado, com comprimento de aresta aproximado de 12,7 mm, espessura de 4,8 mm e raio de ponta de 0,8 mm) e diferentes geometrias de aresta, foram preparados (superfícies de saída e de folga + preparação de aresta) em uma retificadora CNC de quatro eixos Agathon DOM Plus (rotação máxima de 3400 rpm e potência máxima de 16kW), equipada com rebolo do tipo copo de ligante vitrificado, grãos abrasivos de diamante com tamanho aproximado de 15 μm (D15) e concentração C100. As condições de corte foram mantidas constantes: velocidade de corte $v_c = 60$ m/s, velocidade de avanço axial $v_{fa} = 10$ mm/min, velocidade de rotação do inserto para retificação do raio de ponta $v_R = 57,63$ °/min e aplicação de óleo mineral de forma abundante.

Figura 3. Insertos de $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO}$ utilizados nos experimentos



Fonte: Própria autora.

A fim de se reduzir os efeitos que o desgaste do rebolo poderia causar nos insertos, antes da preparação de cada um deles o rebolo foi condicionado por rolo dressador, também do tipo copo, de alumina, com granulometria 220#, velocidade de corte do dressador $v_{cd} = 10$ m/s, velocidade de corte do rebolo $v_c = 20$ m/s, velocidade axial do dressador $v_{fad} = 5$ $\mu\text{m/s}$ e percurso de dressagem $l_d = 15$ μm .

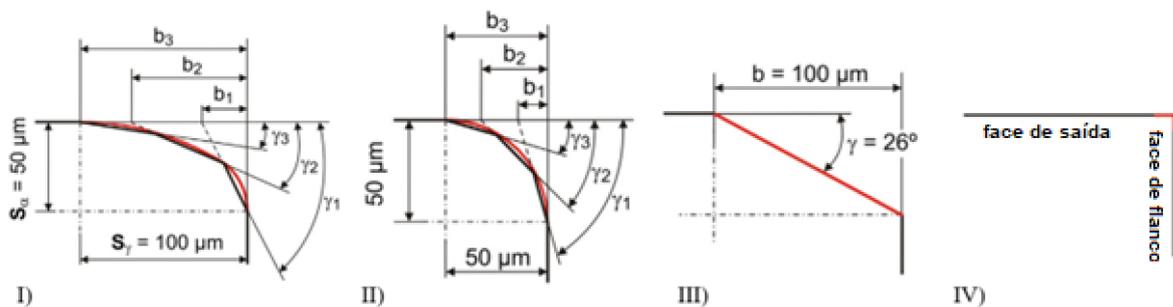
Através do método de discretização de arredondamentos por meio de chanfros, desenvolvido por Denkena, Köhler e Ventura (2013), foram preparadas quatro diferentes microgeometrias nas ferramentas. As características de cada inserto são apresentadas na Tabela 1, conforme Figura 4, sendo b a largura e γ o ângulo de cada um dos chanfros, S_γ e S_α as mesmas variáveis mostradas na Figura 2.

Tabela 1. Características das diferentes microgeometrias

| Inserto | Características | S_a [μm] | S_y [μm] | r_β [μm] | b [μm] | γ [$^\circ$] |
|---------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|---|--|
| I | K = 2 3 chanfros | 50 | 100 | - | $b_1 = 25$ $b_2 = 69$ $b_3 = 100$ | $\gamma_1 = 63,1$ $\gamma_2 = 22,7$ $\gamma_3 = 7,6$ |
| II | K = 1 3 chanfros | 50 | 50 | 50 | $b_1 = 13$ $b_2 = 32$ $b_3 = 50$ | $\gamma_1 = 75$ $\gamma_2 = 45$ $\gamma_3 = 15$ |
| III | Chanfro único | 50 | 100 | - | $b = 100$ | $\gamma = 26$ |
| IV | Aresta sem preparação | - | - | - | - | - |

Fonte: Própria autora.

Figura 4. Parâmetros dos chanfros para discretização dos arredondamentos



Fonte: Adaptado de Ventura, Kohler e Denkena (2015).

Após sua retificação, os insertsos foram analisados e tiveram suas microgeometrias caracterizadas através do microscópio de análise tridimensional de imagens Alicona InfiniteFocus SL (Figura 5a), com aumento máximo de 500x, conectado a um computador pessoal com o software Alicona Metrology Measurement. Estes insertsos foram utilizados para torneamento de um eixo do aço AISI 4140 tratado termicamente (50 HRC), com diâmetro inicial de 68 mm e trechos lineares com comprimento de 25 mm, conforme Figura 5b. Ensaio e réplica foram realizados em um torno CNC Romi Centur 30D (rotação máxima de 3000 rpm e potência máxima de 9 kW) (Figura 5c) e, de maneira a se possibilitar uma comparação exclusiva das diferentes geometrias de aresta, as condições de corte foram mantidas constantes, sendo velocidade de corte $v_c = 200$ m/min, avanço $f = 0,1$ mm/rev e profundidade de usinagem $a_p = 0,1$ mm. Após o corte de cada trecho da peça, o inserto era removido e seu

desgaste de flanco medido por meio do referido microscópio. Adicionalmente, a rugosidade de cada parte torneada foi medida para caracterização da qualidade superficial da peça. Os ensaios foram finalizados após verificação de avaria no inserto ou após o sexto passe, que representa um volume de aproximadamente 3695 mm³.

A fim de se evitar a retirada e nova fixação da peça na máquina, o que poderia causar desvios de batimento e afetar o processo como um todo, a medição de rugosidade foi realizada com a peça presa à placa do torno através de um rugosímetro portátil digital Mitutoyo SJ210 (Figura 5d) em três diferentes regiões da peça, distantes aproximadamente 120° entre si. A cada passagem de ferramenta, foram adquiridos os valores de rugosidade máxima Rz e rugosidade média Ra.

Figura 5. (a) Microscópio para análise de imagens, (b) corpo de prova usinado, (c) torno e (d) rugosímetro utilizados



(a)



(c)



(b)



(d)

Fonte: Própria autora.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. PREPARAÇÃO DAS FERRAMENTAS

Considerando-se o tamanho dos chanfros a serem preparados e as variações decorrentes do processo de retificação, relacionadas a erros de fixação e desvios de planicidade nas superfícies de saída, deformações elásticas do sistema de fixação e do rebolo, assim como diferentes protrusões de grão, destaca-se que os valores nominais das microgeometrias, na maioria dos casos, não são atingidos (DENKENA, KÖHLER e VENTURA, 2013; VENTURA, KÖHLER e DENKENA, 2013). Porém, a partir de ajustes iterativos dos parâmetros programados, torna-se possível a obtenção das geometrias de aresta próximas às previstas. Tendo isso em vista, a Tabela 2 apresenta os valores medidos para os diferentes insertos. Os valores associados às pontas selecionadas para os testes de torneamento são destacados em vermelho.

Tabela 2. Medidas das geometrias de aresta preparadas.

| Microgeometria | Ponta | Chanfro | b [μm] | γ [$^\circ$] |
|------------------------|----------|----------|---------------------|-----------------------|
| K = 2 | 1 | 1 | 31,50 | 58,07 |
| | | 2 | 62,87 | 25,51 |
| | | 3 | 105,83 | 4,80 |
| | 2 | 1 | 27,56 | 61,89 |
| | | 2 | 62,98 | 26,24 |
| | | 3 | 112,28 | 8,45 |
| | 3 | 1 | 25,93 | 59,62 |
| | | 2 | 55,55 | 18,95 |
| | | 3 | 89,94 | 2,99 |
| | 4 | 1 | 22,18 | 65,19 |
| | | 2 | 57,74 | 20,48 |
| | | 3 | 84,05 | 7,18 |
| K = 1 | 1 | 1 | 17,83 | 73,18 |
| | | 2 | 33,32 | 44,86 |
| | | 3 | 66,87 | 16,24 |
| | 2 | 1 | 19,54 | 73,65 |
| | | 2 | 36,54 | 46,2 |
| | | 3 | 83,6 | 13,99 |
| | 3 | 1 | 16,45 | 72,65 |
| | | 2 | 29,83 | 46,54 |
| | | 3 | 55,18 | 17,49 |
| | 4 | 1 | 12,82 | 79,02 |
| | | 2 | 29,27 | 44,74 |
| | | 3 | 48,58 | 15,33 |
| Chanfro único (K=2) | 1 | 1 | 103,96 | 25,69 |
| | 2 | 1 | 108,80 | 24,92 |
| | 3 | 1 | 95,98 | 24,90 |
| | 4 | 1 | 95,07 | 24,99 |

Fonte: Própria autora.

As arestas sem preparação resultam diretamente da intersecção das superfícies de saída e de folga retificadas e foram utilizadas de insertos que tiveram sua face oposta preparada por uma geometria de aresta específica. Verifica-se, porém, a ocorrência de lascamentos nesta intersecção e a aresta, portanto, não pode ser considerada plenamente afiada, já que certo arredondamento é verificado, conforme aponta a Tabela 3.

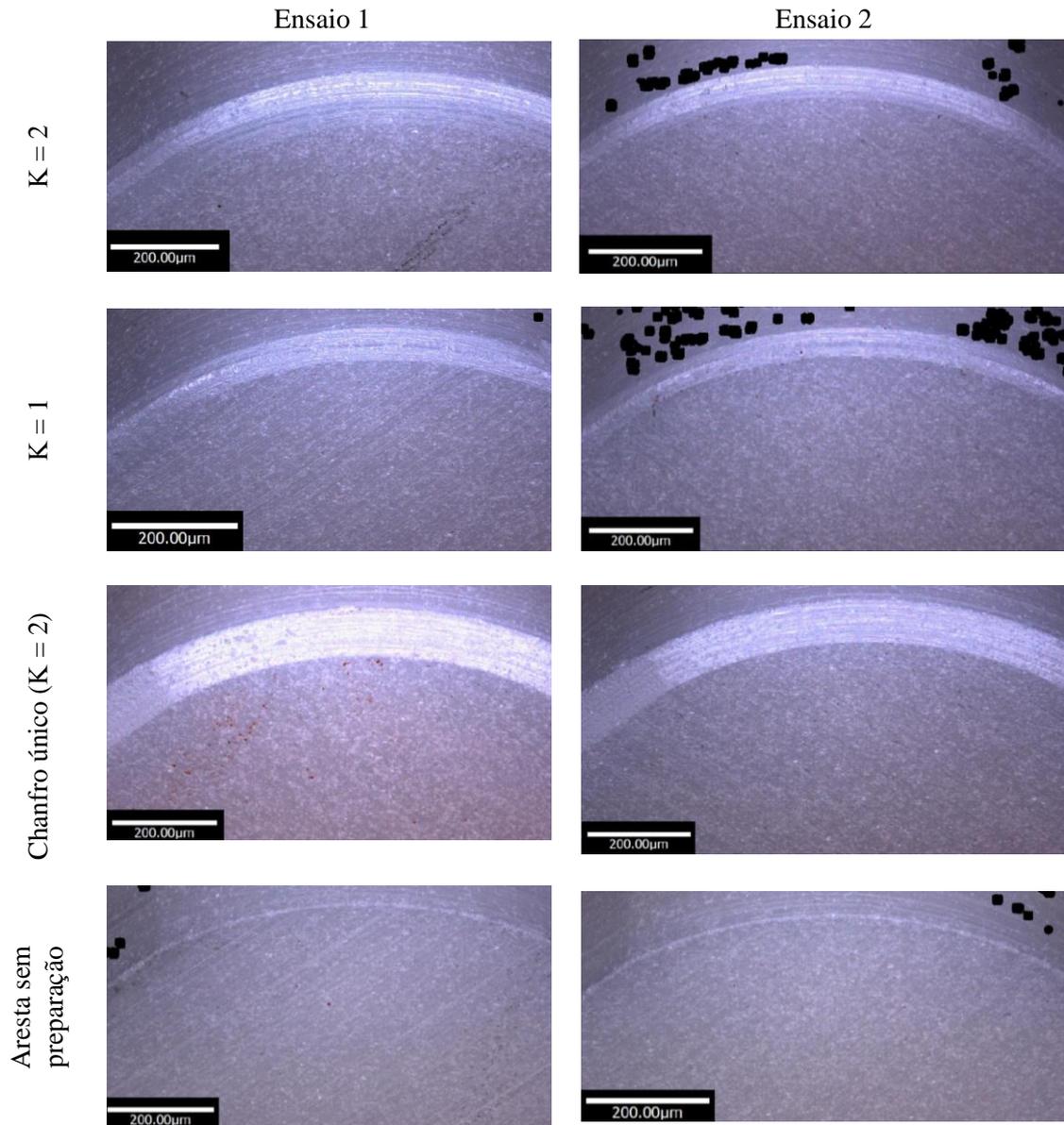
Tabela 3. Medidas das arestas sem preparação.

| Ponta | S γ [μm] | S α [μm] | r β médio [μm] |
|----------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | 17,07 | 14,68 | 13,72 |
| 2 | 20,12 | 15,95 | 15,24 |
| 3 | 13,3 | 12,35 | 12,66 |
| 4 | 18,38 | 15,24 | 17,86 |

Fonte: Própria autora.

A Figura 6 mostra imagens obtidas em microscópio das pontas utilizadas nos testes de torneamento após sua caracterização. Manchas escuras são decorrentes de problemas de reflexo, em virtude da intensa iluminação de superfícies brancas.

Figura 6. Imagens dos insertos com diferentes preparações de aresta.

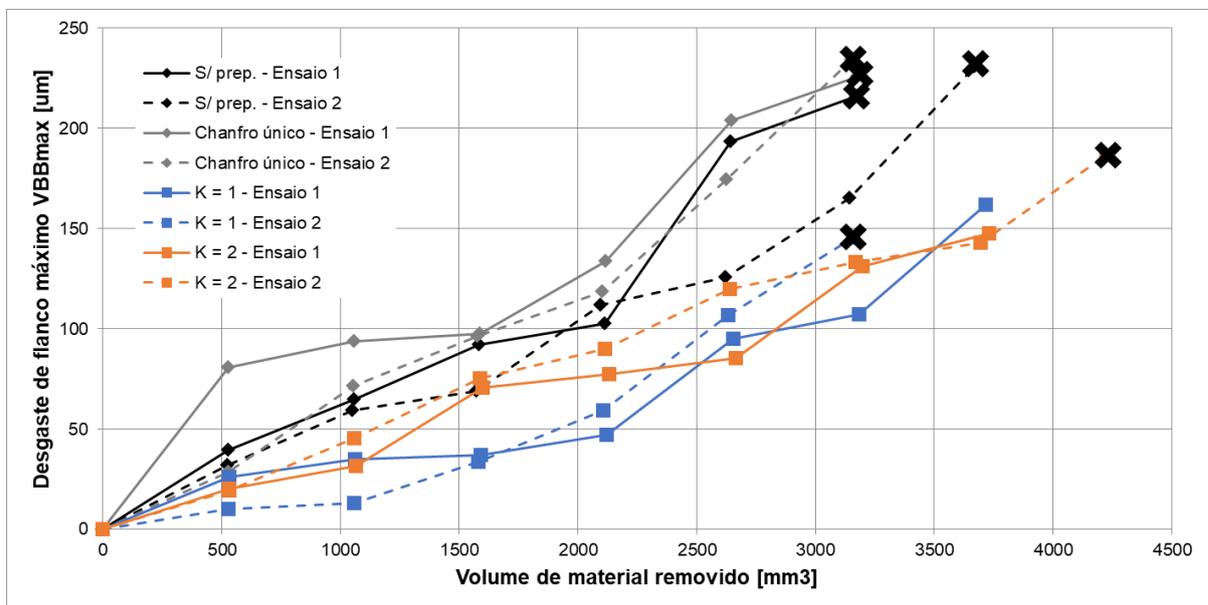


Fonte: Própria autora.

4.2. TIPOS E MECANISMOS DE DESGASTE

A Figura 7 apresenta os valores de desgaste máximo de flanco em função do volume de material removido durante o processo de torneamento. Nota-se em todos os casos um crescimento inicial acelerado seguido de um trecho mais estável e um aumento rápido mais próximo ao final do teste. Maiores valores de desgaste após a primeira etapa e maiores taxas de crescimento foram verificados principalmente para os insertos com chanfro único e sem preparação de aresta. Os pontos marcados com “x” indicam que houve quebra do inserto, o que foi verificado em 75% dos casos.

Figura 7. Comportamento do desgaste de flanco máximo VBBmax em função do volume usinado



Fonte: Própria autora.

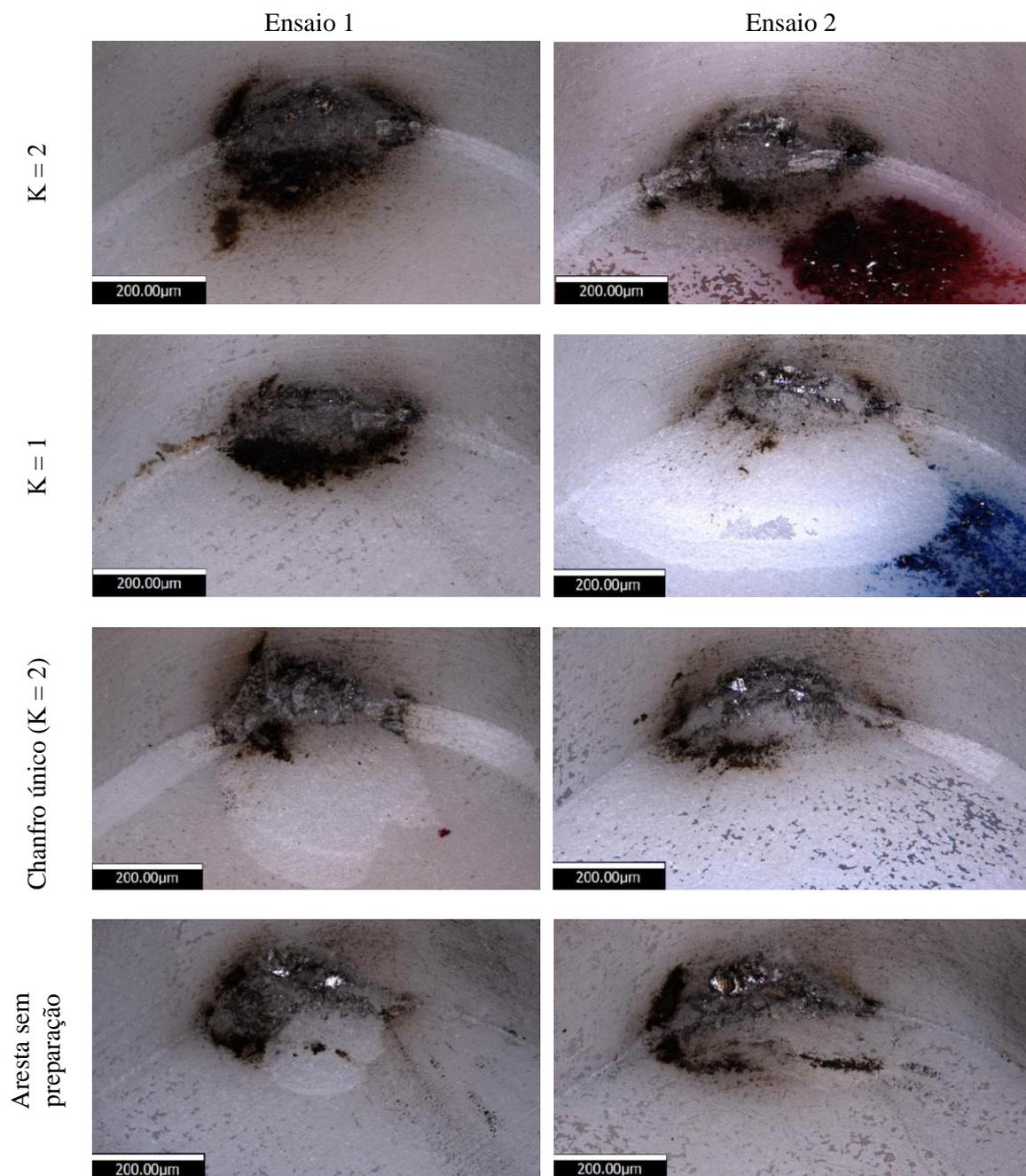
Ainda com base no gráfico, tem-se que o inserto de chanfro único foi o que obteve maiores valores de desgaste. Em ambos os ensaios com o uso desta ferramenta, ocorreu desgaste de flanco, que enfraqueceu a aresta e causou sua quebra. Assim, conclui-se que um único chanfro não foi suficiente para evitar a falha da ferramenta nas condições de corte aplicadas. Da mesma forma, isso ocorreu para a ferramenta sem preparação de aresta, que possui uma área de contato pequena, o que contribui para o aumento da pressão, favorecendo o desgaste e a consequente quebra.

Em comparação às outras ferramentas testadas, aquelas com arredondamentos de aresta discretizados com três chanfros produziram os melhores resultados, levando a ferramenta com $K = 2$ a um maior volume médio de material removido e tendo a ferramenta com $K = 1$ um

menor desgaste de flanco no último volume em que todas foram testadas, de aproximadamente 3145 mm³. Isso mostra que as preparações utilizadas foram adequadas para reforçar a aresta de corte da ferramenta, causando melhor distribuição e direcionamento dos esforços e aumentando, assim, sua vida útil.

Tendo como base de comparação este mesmo volume, observa-se na Figura 8 a condição das ferramentas no referido momento.

Figura 8. Imagens das ferramentas com diferentes preparações de arestas após a usinagem de um volume de material aproximado de 3145 mm³



Fonte: Própria autora.

No caso das arestas discretizadas com $K = 2$, observa-se a ocorrência de desgaste de flanco, o qual, segundo Das, Dhupal e Kumar (2015), é causado principalmente pela natureza abrasiva de algumas partículas duras presentes no aço. Kumar, Durai e Sornakumar (2006a) afirmam que este tipo de desgaste, caracterizado por sulcos na superfície de folga, pode ainda ser atribuído ao atrito da ferramenta com a superfície usinada e às altas temperaturas, que podem gerar adesão. Este último fenômeno também pode ter ocorrido, tendo em vista a natureza irregular do desgaste observado. Além disso, pode-se notar a presença de lascamentos ao longo da aresta de corte, causados por choque térmico e muito frequentes em ferramentas de elevada dureza.

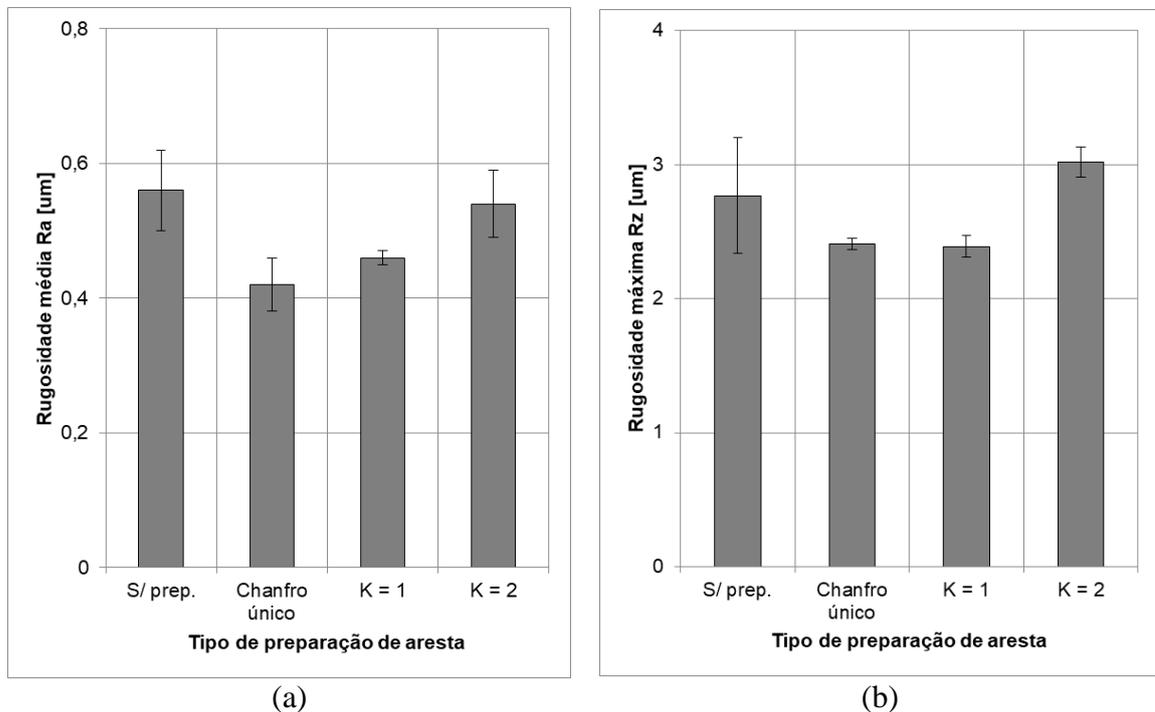
Para os ensaios com ferramentas de $K = 1$, verifica-se, além da presença de lascamentos e desgaste de flanco devido à abrasão e à adesão, a formação de uma cratera, a qual leva à quebra da ferramenta no segundo teste. Segundo Brandt (1986), a cratera pode ocorrer devido a uma excessiva deformação plástica, reação química com o material da peça e adesão de material. Este tipo de desgaste ocorre na superfície de saída da ferramenta, alterando a geometria da interface ferramenta-cavaco e, por consequência, o processo de corte.

Para as ferramentas de chanfro único e sem preparação de aresta, os mecanismos de desgaste observados são similares, mas se nota a ruptura da ferramenta na superfície de saída em ambos os ensaios realizados. Em comparação aos outros casos, foram as ferramentas com desgastes mais notáveis após o mesmo volume removido.

4.3. QUALIDADE SUPERFICIAL

Na Figura 9, são observados os valores de rugosidade média e máxima após o primeiro passe, de modo a se evitar maiores efeitos do desgaste e se possibilitar a comparação da influência das diferentes microgeometrias.

Figura 9. Rugosidades (a) média e (b) máxima após o torneamento com ferramentas de diferentes microgeometrias

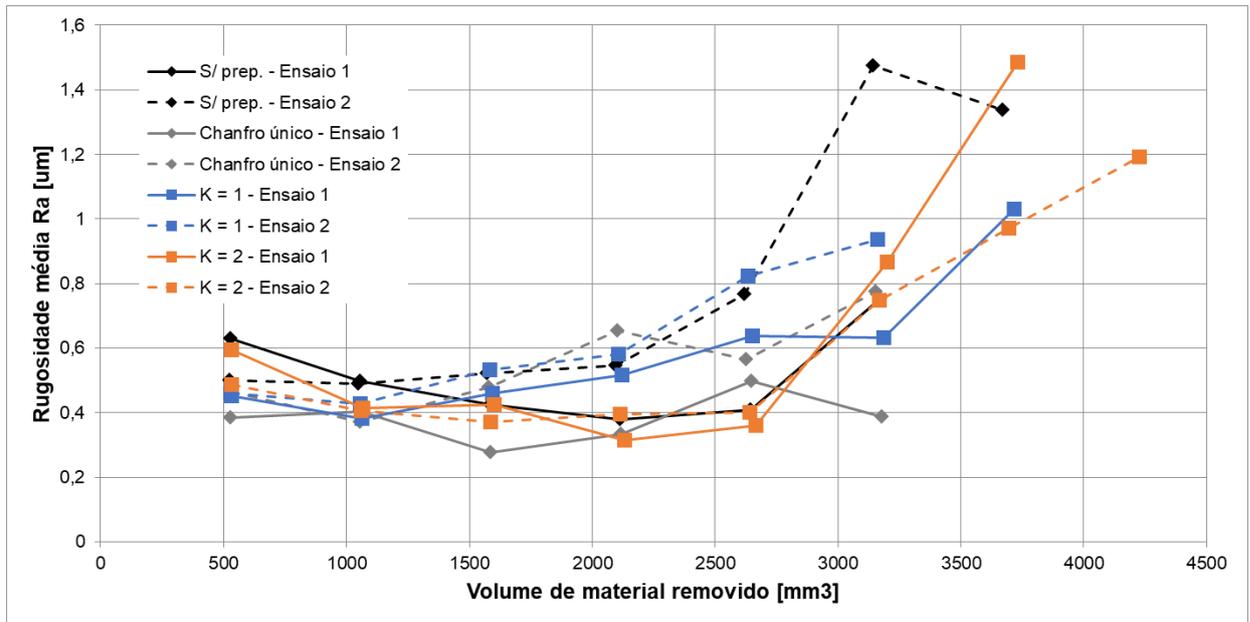


Fonte: Própria autora

Para os dois parâmetros, pode-se afirmar que os maiores valores de rugosidade são atribuídos às ferramentas com $K = 2$ e com aresta sem preparação, não havendo diferença significativa entre estes dois casos. Uma rugosidade maior na peça torneada com a ferramenta de aresta sem preparação pode ocorrer devido ao maior lascamento da aresta, uma vez que esta é mais afiada que as outras e concentra mais tensão. Já para a peça usinada com a ferramenta de $K = 2$, os maiores valores de rugosidade estão associados à maior deformação do material, devido aos ângulos de saída efetivos mais negativos, em função da formação do cavaco ocorrer em uma região próxima à aresta. Os mesmos efeitos podem ser vistos em menor escala para as ferramentas com chanfro único e $K = 1$.

Nas Figuras 10 e 11, nota-se o efeito do desgaste sobre as rugosidades média e máxima, respectivamente. Em ambos os casos, verifica-se uma primeira região de redução e/ou estabilidade da qualidade da peça seguida de uma região de crescimento acelerado da rugosidade, comparável ao comportamento observado na Figura 7. A variação da geometria de aresta enquanto ela se desgasta tem papel fundamental na oscilação dos valores e, apesar de uma evolução aparentemente similar, alterações diferentes podem ser observadas entre o ensaio e a respectiva réplica, dificultando uma análise generalizada dos resultados.

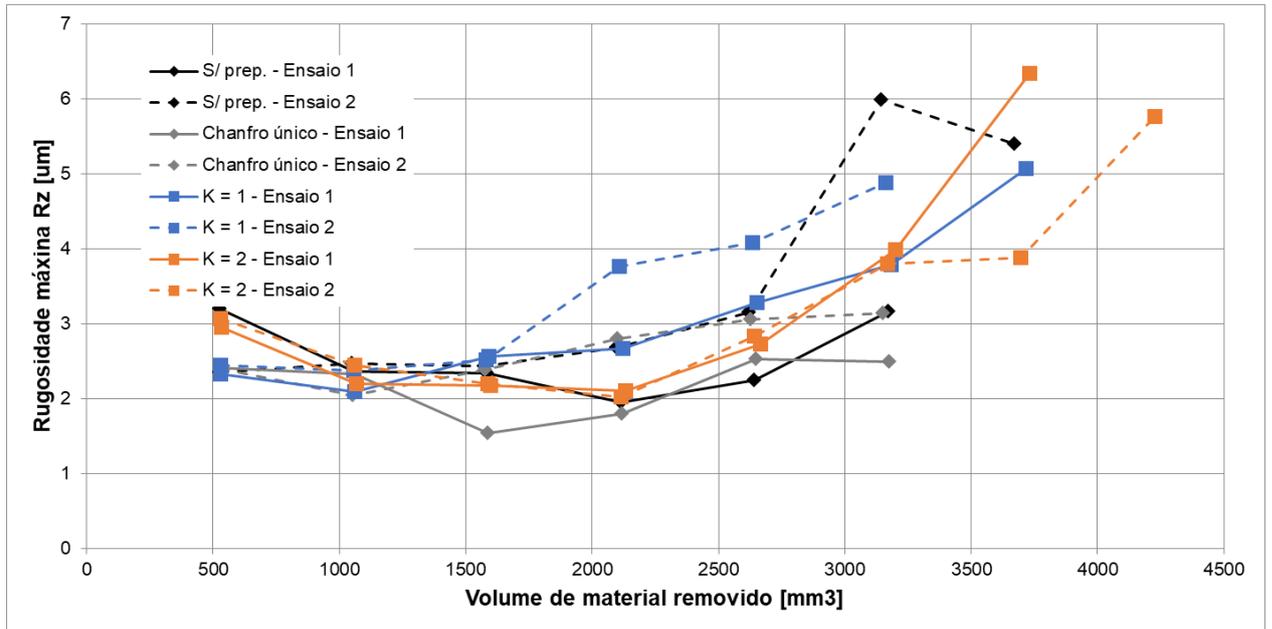
Figura 10. Comportamento da rugosidade média Ra em função do volume usinado



Fonte: Própria autora.

Após o quarto passe, a rugosidade da peça aumenta exponencialmente. Isso ocorre, pois a ponta da ferramenta altera-se a cada passagem da ferramenta, e, dessa forma, a sua microgeometria começa a apresentar um desgaste maior, impactando diretamente na superfície usinada. Isto se aplica também para a Figura 11, que mostra a Rugosidade (Rz), onde é possível observar que a rugosidade diminui com aumento do desgaste pois a geometria da ponta da ferramenta muda e, sem seguida, começa a subir novamente.

Figura 11. Comportamento da rugosidade máxima Rz em função do volume usinado



Fonte: Própria autora.

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, podem ser tiradas as seguintes conclusões:

- O inserto com $K = 2$ se mostrou mais efetivo do que todas as outras geometrias utilizadas. Este, além de usinar maiores volumes de material em comparação com as outras ferramentas, também teve um tempo de vida maior e em ambos os ensaios não houve rompimento da aresta. Em contrapartida, os menores volumes foram obtidos para o inserto com chanfro único, os quais fraturaram ao final dos testes. As ferramentas com $K = 1$ e aresta sem preparação permitiram a usinagem de volumes intermediários.
- Os mecanismos de desgaste predominantes foram abrasão, adesão e ocorrência de lascamentos, que levaram a desgastes de flanco e cratera, além da quebra da ferramenta, que ocorreu em 75% dos casos.
- Os maiores valores de rugosidade nas peças torneadas com ferramentas em início de uso são atribuídos às ferramentas com $K = 2$ e com aresta sem preparação. No primeiro caso, devido à deformação do material e no segundo, em função dos lascamentos na aresta.
- Em todos os casos, o aumento do desgaste da ferramenta levou a um aumento da rugosidade, devido a possíveis variações da microgeometria.

Por fim, para estudos futuros, sugere-se a realização do levantamento das forças de corte envolvidas no processo, bem como o estudo do cavaco obtido através de cada microgeometria, de maneira a se melhor compreender os fenômenos envolvidos no corte e fundamentar por meio de evidências os resultados obtidos.

6. REFERÊNCIAS

- Barry, J.; Byrne, G. Cutting tool wear in the machining of hardened steels Part I: alumina/TiC cutting tool wear. *Wear*, v. 247, p. 139-151, 2001.
- Bartarya, G.; Choudhury, S.K. State of the art in hard turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 53, p. 1-14, 2012.
- Benga, C.G.; Abrão, A.M. Turning of hardened 100Cr6 bearing steel with ceramic and PCBN cutting tools. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 143, p. 237-241, 2003.
- Bonhin, E.P. Estudo da usinabilidade da superliga à base de ferro/níquel VAT-32 com ferramenta cerâmica. 2015. 78f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.
- Brandt, G. Flank and crater wear mechanisms of alumina-based cutting tools when machining steel. *Wear*, v. 112, p. 39-56, 1986.
- Brandt, G.; Mikus, M. An electron microprobe and cathode luminescence study of chemical reactions between tool and workpiece when turning steel with alumina-based ceramics. *Wear*, v. 115, p. 243-263, 1987.
- Camuscu, N. Effect of cutting speed on the performance of Al₂O₃ based ceramic tools in turning nodular cast iron. *Materials and Design*, v. 27, p. 997-1006, 2005.
- Carter, C.B.; Norton, M.G. *Ceramic Materials: Science and Engineering*. 2nd ed. Springer, 2007, 766 p.
- Cui, E.; Zhao, J.; Wang, X.; Song, S. Cutting performance, failure mechanisms and tribological properties of GNPs reinforced Al₂O₃/Ti (C, N) ceramic tool in high-speed turning of Inconel 718. *Ceramics International*, v. 46, p. 18859-18867, 2020.
- Das, S.R.; Dhupal, D.; Kumar, A. Study of surface roughness and flank wear in hard turning of AISI 4140 steel with coated ceramic inserts. *Journal of Mechanical Science and Technology*, v. 29, p. 4329-4340, 2015.
- Denkena, B.; Köhler, J.; Ventura, C.E.H. Customized cutting-edge preparation by means of grinding. *Precision Engineering*, v. 37, p. 590-598, 2013.
- Dutta, A.K.; Chattopadhyaya, A.B.; Ray, K.K. Progressive flank wear and machining performance of silver toughened alumina cutting tool inserts. *Wear*, v. 261, p. 885-895, 2006.
- El Hakim, M.A.; Abad, M.D.; Abdelhameed, M.M.; Shalaby, M.A.; Veldhuis, S.C. Wear behavior of some cutting tool materials in hard turning of HSS. *Tribology International*, v. 44, p. 1174-1181, 2011.

- Hua, J.; Shivpuri, R.; Cheng, X.; Bedekar, V.; Matsumoto, Y.; Hashimoto, F.; Watkins, T.R. Effect of feed rate, workpiece and cutting edge on subsurface residual stress in the hard turning of bearing steel using chamfer hone cutting edge geometry. *Materials Science and Engineering: A*, v. 394, p. 238-248, 2005.
- International Organization for Standardization. ISO 3685: Tool-life testing with single-point turning tools. Suíça. 1997.
- Khan, M.A.; Kumar, A.S.; Kumaran, S.T.; Uthayakumar, M.; Ko, T.J. Effect of tool wear on machining GFRP and AISI D2 steel using alumina-based ceramic cutting tools. *Silicon*, v. 11, p. 153-158, 2018.
- Kondo, M.Y.; Pinheiro, C.; Souza, J.V.C.; Ribeiro, M.V.; Alves, M.C.S. Optimizing cutting parameters for cutting power and roughness in VAT32® turning with an experimental Al₂O₃-MgO ceramic tool using Taguchi's method. *Procedia CIRP*, v. 77, p. 610-613, 2018.
- Kumar, A.S.; Durai, A.R.; Sornakumar, T.A. The effect of tool wear on tool life of alumina-based ceramic cutting tools while machining hardened martensitic stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 173, p. 151-156, 2006a.
- Kumar, A.S.; Durai, A.R.; Sornakumar, T.A. Wear behavior of alumina-based ceramic cutting tools on machining steels. *Tribology International*, v. 39, p. 191-197, 2006b.
- Mandal, N.; Mondal, B.; Singh, B.K. Machinability evaluation and desirability function optimization of turning parameters for Cr₂O₃ doped zirconia toughened alumina (CrZTA) cutting insert in high-speed machining of steel. *Ceramics International*, v. 42, p. 3338-3350, 2016.
- Özel, T.; Karpat, Y.; Srivastava, A. Hard turning with variable micro-geometry PcBN tools. *CIRP Annals*, v.57, p. 73-76, 2008.
- Paula, M.A.; Sousa, T.A.; Souza, J.V.C.; Alves, M.C.S.; Ribeiro, M.V. Application of non-commercial ceramic cutting tool in machining of hardened stainless steel. *Materials Research Express*, v. 6, p. 046550, 2019.
- Pereira, W.B.C. Influência do fluido de corte e da concentração na retificação cilíndrica do aço 4240 e no desgaste do rebolo de CBN utilizando mínima quantidade de lubrificante. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Mecânica UNESP. Bauru, 2019.
- Ribeiro, L.A. Aplicação de ferramentas cerâmicas à base de óxido de alumínio no torneamento da superliga VAT 32®. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica UNESP. Guaratinguetá, 2020.
- Ribeiro, M.V., Ribeiro, J.C., Malère, E. P. Aplicação de ferramentas cerâmicas no torneamento de cilindros laminadores. Guaratinguetá, 2006.

Sandvik. Desgaste das arestas de corte, 2022. Disponível em:

<<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/pages/wear-on-cutting-edges.aspx>> Acesso em: 13 de abril de 2022.

Shalaby, M.A.; El Hakim, M.A.; Abdelhameed, M.M.; Krzanowski, J.E.; Veldhuis, S.C.; Dosbaeva, G.K. Wear mechanisms of several cutting tool materials in hard turning of high carbon-chromium tool steel. *Tribology International*, v. 70, p. 148-154, 2014.

Sobiyi, K.; Sigalas, I.; Akdogan, G.; Turan, Y. Performance of mixed ceramics and CBN tools during hard turning of martensitic stainless steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 77, p. 861-871, 2015.

Sousa, T.A.; Souza, J.V.C.; Duarte, A.K.S.; Nascimento, M.P.; Ribeiro, M.V.; Silva, O.M.M. Usinagem de ferro fundido nodular e vermicular utilizando ferramenta de alumina. In: *Anais do 9º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação*. Joinville, 2017.

Ventura, C.E.H.; Chaves, H.S.; Rubio, J.C.C.; Abrão, A.M.; Denkena, B.; Breidenstein, B. The influence of the cutting tool microgeometry on the machinability of hardened AISI 4140 steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 90, p. 2557-2565, 2017.

Ventura, C.E.H.; Denkena, B. Preparação de arestas de ferramentas de cerâmica mista por retificação e sua aplicação no torneamento de aço endurecido. In: *8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação*. Salvador, 2015.

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, p. 246-253, 2013.

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