

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

PAULO HENRIQUE DA SILVA RODRIGUES

**EFEITO DA PREPARAÇÃO DE ARESTA EM FERRAMENTAS DE
CBN NA USINAGEM DE AÇOS LIGA**

SÃO CARLOS
2025

PAULO HENRIQUE DA SILVA RODRIGUES

**EFEITO DA PREPARAÇÃO DE ARESTA EM FERRAMENTAS DE
CBN NA USINAGEM DE AÇOS LIGA**

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

SÃO CARLOS
2025

Dedico este trabalho ao Paulo Henrique adolescente, que sonhou um dia se tornar engenheiro. Sonhos, no fim, podem mesmo virar realidade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, que foram fundamentais nessa longa caminhada, pela paciência e por todo o apoio necessário para que o caminho fosse mais fácil. Sem vocês, isso nunca seria possível.

Agradeço à Ana Rúbia, minha companheira, por sempre estar ao meu lado, principalmente nos dias mais difíceis, por acreditar no meu potencial e ser meu ombro amigo.

Agradeço ao meu orientador, Carlos Eiji Hirata Ventura, pelos conselhos e ensinamentos, pelas oportunidades oferecidas e pela confiança na minha capacidade de executá-las, mesmo quando eu duvidava dela.

Agreço à Fundação de Apoio Institucional ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FAI-UFScar) e à empresa Hanna Tools pela bolsa concedida e pelo material disponibilizado para realização desta pesquisa.

Por fim, agradeço ao Leonildo Bernardo Pivotto, Uéilton Carvalho Alves e Virgílio Pereira Ricci que ajudaram na realização dos experimentos que compõe este trabalho.

RESUMO

Devido às elevadas cargas termomecânicas em processos de usinagem, uma preparação de aresta adequada é fundamental para a obtenção de maiores vidas de ferramenta e bons acabamentos superficiais nas peças produzidas. A escolha correta da microgeometria pode melhorar a distribuição de esforços, diminuir a geração de calor e aumentar a resistência da aresta. Diante do exposto, neste trabalho é investigado o efeito da preparação de aresta em ferramentas de nitreto cúbico de boro (CBN) na usinagem de aço liga. Insertos com diferentes valores de raio de aresta nominais (afiada, 20 μm , 40 μm) foram produzidos e tiveram sua microgeometria caracterizada. Testes de torneamento foram conduzidos utilizando aços 4340 recozido e 4140 endurecido e o desgaste da ferramenta foi avaliado. Os resultados indicam ocorrência pouco significativa de lascas nas ferramentas afiadas e assimetria no arredondamento das arestas preparadas por escovamento. Com relação aos testes de vida, as ferramentas com arestas afiadas e com raio nominal de 20 μm não apresentaram diferença de desempenho na usinagem do aço recozido. No caso do aço endurecido, o inserto com preparação de 40 μm apresentou o melhor desempenho, com desgaste 22% menor comparado aos demais casos. Conclui-se que a escolha adequada da microgeometria da aresta pode otimizar o desempenho das ferramentas de CBN, principalmente no torneamento de aços endurecidos, proporcionando maior eficiência e previsibilidade do processo.

Palavras-chave: Preparação de aresta, usinagem, CBN, aço liga, vida de ferramenta

ABSTRACT

Due to the high thermomechanical loads in machining processes, proper edge preparation is essential for achieving longer tool life and good surface finishes on the produced parts. The correct choice of microgeometry can improve stress distribution, reduce heat generation, and increase edge strength. In light of this, the present work investigates the effect of edge preparation on cubic boron nitride (CBN) tools in the machining of alloy steels. Inserts with different nominal edge radii (sharp, 20 μm , 40 μm) were produced and had their microgeometry characterized. Turning tests were conducted using annealed 4340 and hardened 4140 steels, and tool wear was evaluated. The results indicate minimal chipping on sharp tools and asymmetry in the edge rounding produced by brushing. Regarding tool life tests, the sharp-edge and 20 μm radius tools showed no performance difference when machining the annealed steel. For the hardened steel, the insert with a 40 μm preparation showed the best performance, with 22% less wear compared to the other cases. It is concluded that the appropriate choice of edge microgeometry can optimize the performance of CBN tools, especially in the turning of hardened steels, providing greater efficiency and process predictability.

Keywords: Edge preparation, machining, CBN, alloy steels, tool life.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ferramentas da Idade Paleolítica	11
Figura 2 – Tipos de aresta segundo a norma DIN 6582	13
Figura 3 – Classificações de arestas possíveis segundo Tikal (2006)	13
Figura 4 – Efeitos da preparação de aresta	14
Figura 5 – Parâmetros de caracterização da aresta de corte	15
Figura 6 – Materiais das ferramentas de corte	17
Figura 7 – Mecanismos de desgaste em um processo de corte	19
Figura 8 – Tipos de desgaste em ferramentas de corte: a) flanco; b) cratera; c) entalhe; d) aresta postiça de corte; e) lascamento; f) trincas térmicas; g) deformação plástica; h) quebra da aresta	20
Figura 9 – Relação entre o desgaste de flanco e o tempo de corte para diferentes velocidades	21
Figura 10 – Insertos de CBN	23
Figura 11 – Geometria das ferramentas de CBN	24
Figura 12 – Microscópio óptico Alicona InfiniteFocusSL	25
Figura 13 – Dimensões dos corpos de prova	25
Figura 14 – a) Torno, b) porta ferramentas e c) rugosímetro utilizados nos testes	26
Figura 15 – Parâmetros a) Rugosidade média Ra e b) Rugosidade máxima Rz medidos após torneamento	26
Figura 16 – Imagens dos insertos conforme recebido: a) preparação afiada; b) raio nominal de 20 μm	28
Figura 17 – Imagens dos insertos conforme recebido: a) preparação afiada; b) raio nominal de 20 μm ; c) raio nominal de 40 μm	29
Figura 18 – Curvas de desgaste durante o torneamento do aço 4340 recozido	30
Figura 19 – Desgaste das ferramentas após primeiro e último passe no torneamento do aço 4340 recozido	31
Figura 20 – Imagens de MEV e mapa EDS das ferramentas em fim de vida após torneamento do aço 4340 recozido	31
Figura 21 – Curvas de desgaste durante o torneamento do aço 4140 endurecido	32
Figura 22 – Desgaste das ferramentas após primeiro e último passe no torneamento do aço 4140 endurecido	32
Figura 23 – Imagens de MEV e mapa EDS das ferramentas após os testes de torneamento no aço 4140 endurecido	33
Figura 24 – Comparativo entre o torneamento de aço 4340 recozido e 4140 endurecido	34
Figura 25 – a) Rugosidade média Ra e b) Rugosidade máxima Rz nos testes de torneamento do aço 4340 recozido após primeiro passe	35

Figura 26 – Rugosidade média Ra nos testes de torneamento do aço 4340 recozido .	36
Figura 27 – Rugosidade máxima Rz nos testes de torneamento do aço 4340 recozido	36
Figura 28 – a) Rugosidade média Ra e b) Rugosidade máxima Rz nos testes de torneamento do aço 4140 endurecido após primeiro passe	37
Figura 29 – Rugosidade média Ra nos testes de torneamento do aço 4140 endurecido	38
Figura 30 – Rugosidade máxima Rz nos testes de torneamento do aço 4140 endurecido	39

LISTA DE TABELAS

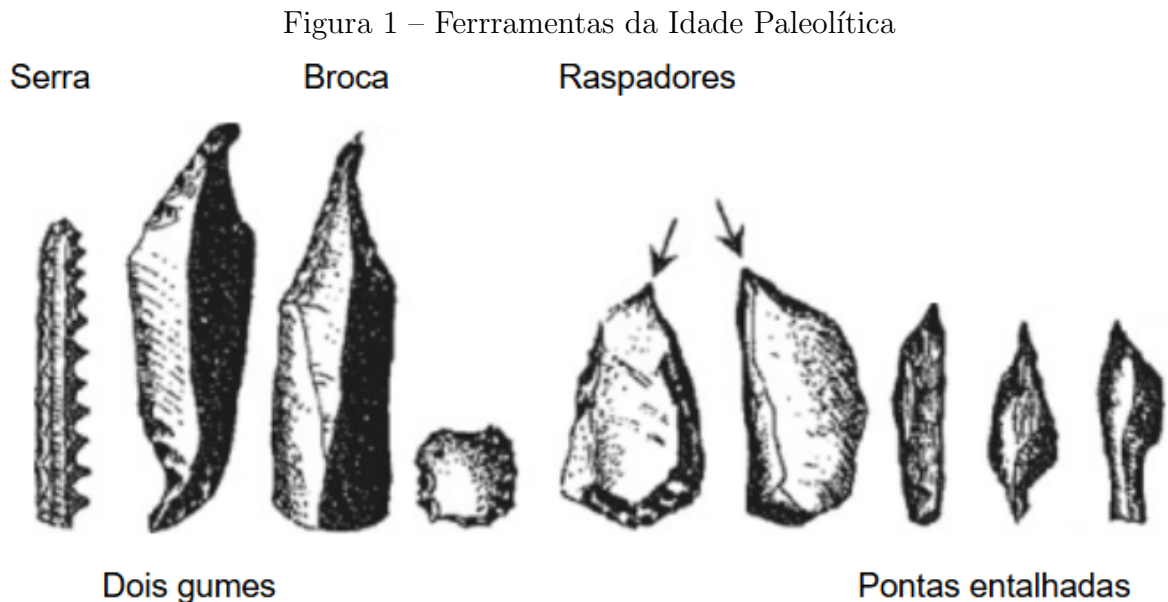
Tabela 1 – Propriedades das ferramentas de PCBN e CBN	18
Tabela 2 – Composição química dos aços 4340 e 4140 (% em peso)	23
Tabela 3 – Insertos preparados utilizados nos testes com aço 4340 recozido	28
Tabela 4 – Insertos preparados utilizados nos testes com aço 4140 endurecido . . .	29

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivos	12
1.2 Estrutura do Texto	12
2 – REVISÃO DA LITERATURA	13
2.1 Preparação de aresta	13
2.2 Nitreto Cúbico de Boro	16
2.3 Mecanismos de desgaste	18
3 – MATERIAIS E MÉTODOS	23
4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
4.1 Caracterização das arestas de corte	28
4.2 Testes de torneamento	29
4.3 Qualidade superficial da peça	35
5 – CONCLUSÃO	40
REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

Os processos de usinagem existem, em termos cronológicos, desde a Idade da Pedra, quando o homem primitivo os praticava sem ter consciência de que estava realizando um processo de usinagem (CASARIN, 2018). De aproximadamente 12.000 a 50.000 anos atrás, os seres humanos já eram capazes de adaptar ferramentas de pedra com arestas intencionalmente produzidas para tarefas específicas de corte, variando a geometria da aresta de corte (Figura 1), como demonstram os primeiros achados de ferramentas da Idade Paleolítica (KLOCKE, 2011).



Fonte: Adaptado de Klocke (2011)

Com o avanço das ferramentas de corte, especialmente na indústria metalme-cânica, tornou-se indispensável a adoção de técnicas que otimizassem seu desempenho. A preparação de aresta é um dos processos que pode ser aplicado e, se realizado de maneira adequada, pode melhorar significativamente as condições mecânicas e térmicas da ferramenta durante o processo de usinagem, reduzindo seu desgaste (KHAN et al., 2018), prolongando sua vida útil (DENKENA; LUCAS; BASSETT, 2011), aumentando a estabilidade no corte (ZHAO; QIN; FENG, 2021) e melhorando a qualidade superficial das peças usinadas (SONG et al., 2023). Para ferramentas revestidas, a preparação da aresta como etapa preliminar proporciona uma melhor condição da superfície para o tratamento de revestimento (UHLMANN; RICHARZ; MIHOTOVIC, 2009).

Em ferramentas de Nitreto Cúbico de Boro (CBN), devido à sua alta fragilidade, de acordo com Ventura, Köhler e Denkena (2013), a preparação adequada de aresta torna-se

essencial para evitar lascamento no início do processo de torneamento e, conseqüentemente, aumentar a vida útil da ferramenta e a confiabilidade do processo. No entanto, microgeometrias grandes contribuem para o aumento das forças de corte e das temperaturas ao passo que pequenos chanfros ou arredondamentos possuem o potencial de reforçar a aresta sem comprometer o processo.

Diante desse contexto, este trabalho busca investigar a influência da preparação da aresta em ferramentas de CBN no torneamento de aço liga, analisando como diferentes valores de raio de aresta afetam o desempenho da ferramenta e a qualidade do processo. Para isso, foram realizadas caracterizações detalhadas das ferramentas, testes experimentais de usinagem e análises do desgaste utilizando técnicas de microscopia óptica e eletrônica de varredura, além de espectroscopia de energia dispersiva.

1.1 Objetivos

O objetivo geral desse trabalho é determinar a influência da preparação da aresta de corte em ferramentas de CBN no torneamento do aço 4340 no estado recozido e do aço 4140 no estado endurecido, com foco na vida útil da ferramenta e nos mecanismos de desgaste.

Para que esse objetivo fosse atingido, os seguintes objetivos específicos foram propostos:

- Obtenção das dimensões reais da microgeometria das ferramentas por meio de microscopia óptica;
- Determinação do desempenho das ferramentas em relação ao desgaste;
- Identificação dos mecanismos de desgaste predominantes através de microscopia óptica e eletrônica.

1.2 Estrutura do Texto

Esta monografia está organizada da seguinte forma:

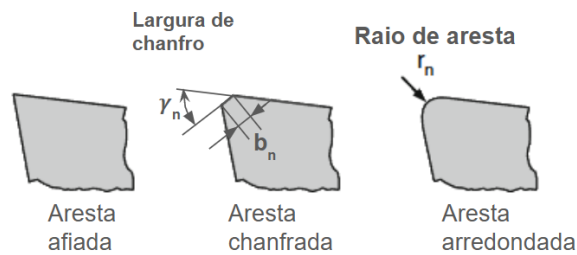
- O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica abordando a preparação de aresta, o nitreto cúbico de boro e os possíveis mecanismos de desgaste;
- O capítulo 3 descreve os materiais utilizados e os métodos aplicados no desenvolvimento do trabalho;
- O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos e as discussões relacionadas;
- O capítulo 5 contém as conclusões do trabalho.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Preparação de aresta

A norma DIN 6582 (1988) determina os possíveis tipos de aresta para as ferramentas de corte (Figura 2). Uma aresta de corte arredondada é aquela formada por uma transição curva entre as superfícies de saída e de folga. O raio nominal da aresta de corte arredondada, medido no plano normal à aresta de corte, é r_n . Já uma aresta de corte chanfrada possui uma transição retilínea e angulada entre essas duas superfícies. Também no plano normal à aresta de corte, ela pode ser caracterizada a partir da largura de chanfro b_n e de seu ângulo em relação à superfície de saída γ_n .

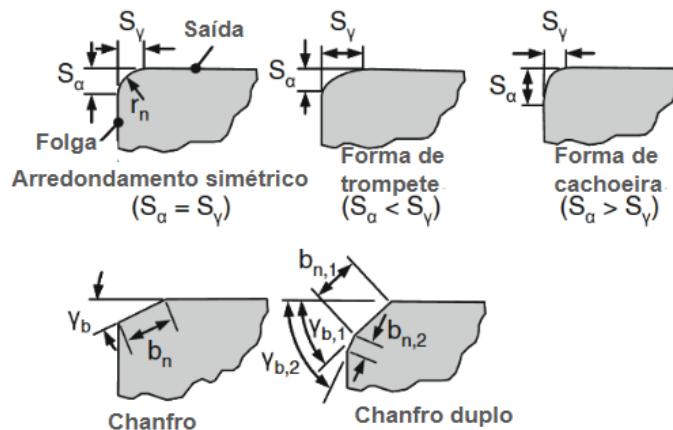
Figura 2 – Tipos de aresta segundo a norma DIN 6582



Fonte: DIN 6582 (1988)

Uma diferenciação mais detalhada é apresentada na Figura 3. Nela são consideradas arestas arredondadas assimétricas, bem como a combinação de chanfros e arredondamentos.

Figura 3 – Classificações de arestas possíveis segundo Tikal (2006)

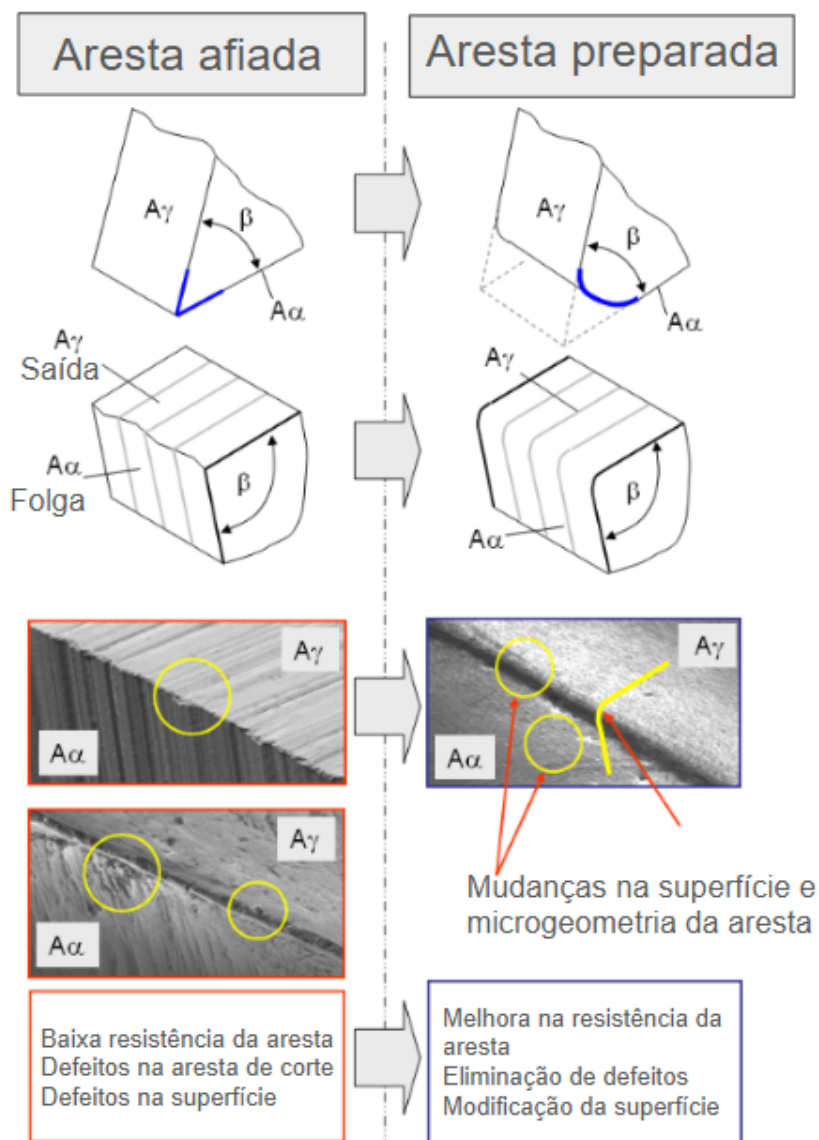


r_n : Raio de aresta
 S_α, S_γ : Comprimento da tangente ao arredondamento nas superfícies de folga e de saída, respectivamente
 b_n : Largura de chanfro
 γ_b : Ângulo do chanfro

Fonte: Adaptado de Wyen, Knapp e Wegener (2012) apud Tikal e Holsten (2006)

A configuração da ferramenta de corte pode ser melhorada com relação à sua macrogeometria (perfil da ferramenta, ângulos, etc.) ou microgeometria. A microgeometria da ferramenta de corte é influenciada pelo material de corte e pela fina camada de cobertura, que afeta a rugosidade da superfície usinada e também o raio da aresta. Para a preparação da aresta de corte, são utilizados diferentes métodos, como escovação, acabamento por arraste, microjateamento a seco, microjateamento com fluido, acabamento magnético, laser, entre outros (FULEMOVA; JANDA, 2014). A preparação da aresta de corte consiste na fabricação da geometria da aresta de corte e na modificação da microtopografia da aresta, assim como a mudança na rugosidade e textura das superfícies da ferramenta (saída e flanco) nas proximidades da aresta, com a consequente eliminação de defeitos oriundos do processo de retificação, como mostra a Figura 4 (RODRIGUEZ, 2009).

Figura 4 – Efeitos da preparação de aresta



Fonte: Adaptado de Rodriguez (2009)

A partir da modelagem computacional 3D do processo de torneamento e de testes na usinagem do aço 4340 com ferramentas de PcBN com geometria uniforme e variável, Özel (2009) constatou que uma menor concentração de atrito é observada para as ferramentas de aresta variável, reduzindo significativamente a geração de calor e a concentração de tensões ao longo da aresta, melhorando a vida útil da ferramenta. O autor acrescenta que a aresta de corte com microgeometria variável induz menos deformação plástica na peça usinada, o que pode ser benéfico para a qualidade superficial.

Utilizando insertos de PcBN com preparação da aresta de corte assimétrica na usinagem interrompida de um aço endurecido, Ventura, Köhler e Denkena (2015) concluíram que um chanfro único reforça a aresta de corte sem aumentar de maneira excessiva as cargas mecânicas e térmicas, resultando em menor desgaste comparado às demais preparações estudadas. Os autores acrescentam que a redução do fator de forma das arestas arredondadas discretizadas leva ao aumento do comprimento de contato entre a aresta de corte e a peça de trabalho, o que eleva a carga sobre a ferramenta, bem como o seu desgaste. Por outro lado, uma aresta de corte sem uma preparação específica também resulta em maior desgaste da ferramenta, apesar de apresentar as menores cargas mecânicas no processo.

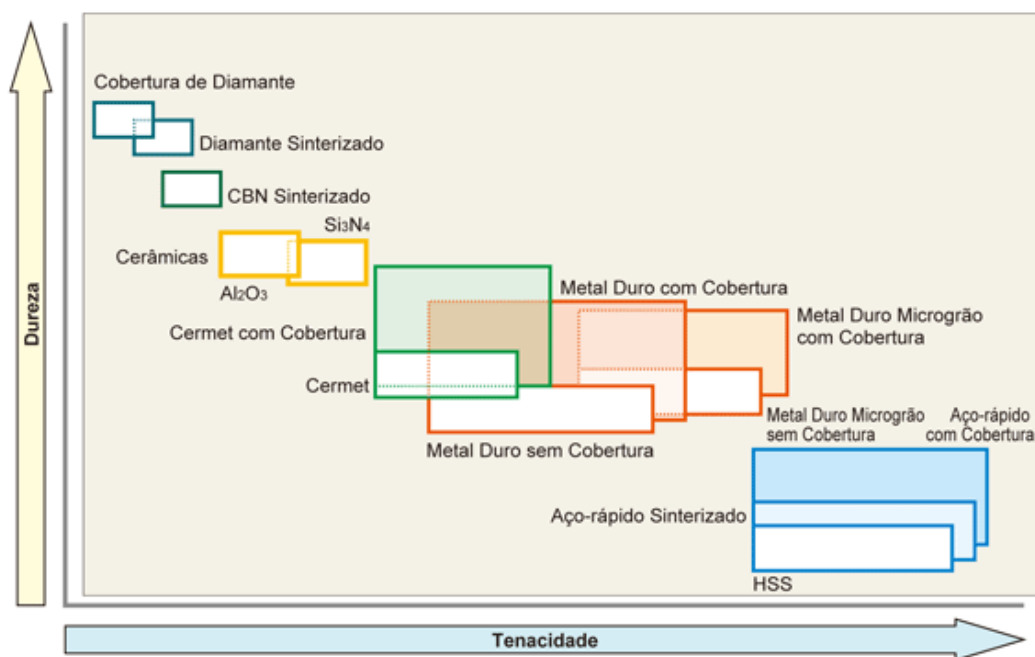
2.2 Nitreto Cúbico de Boro

Segundo a classificação de Klocke (2011), os materiais de ferramentas de corte para usinagem com geometria definida são divididos em quatro grandes classes.

- Ferramentas de aço: aços para trabalho a frio e aços rápidos;
- Carbetos de tungstênio: WC-Co, WC-(Ti,Ta,Nb)C-Co, TiC/TiN-(Co,Ni);
- Cerâmicas de corte: cerâmica à base de óxidos, cerâmica mista e cerâmica de nitreto de silício;
- Materiais de corte superduros: nitreto de boro e diamante;

As pesquisas em larga escala sobre sinterização de diamante em ultra alta pressão começaram na década de 1950 na busca pelo desenvolvimento de ferramentas com ampla variedade de formas. Em 1955, a General Electric conseguiu realizar a primeira síntese artificial de diamante. A partir de processos similares, em 1957 o primeiro CBN foi sinterizado e sua produção comercial teve início em 1969 (MITSUBISHI, 2024). Os materiais utilizados na fabricação de ferramentas de corte são apresentados na 6, mapeando-os com relação à dureza e tenacidade.

Figura 6 – Materiais das ferramentas de corte



Fonte: Mitsubishi (s.d.)

A tenacidade é a capacidade de um material absorver energia e se deformar plasticamente antes de fraturar (CALLISTER, 2008). Apesar de ser menos tenaz do que as ferramentas de aço, carbetos e cerâmicas, o CBN possui excelentes propriedades mecânicas, como alta resistência, dureza e capacidade de manter sua forma a temperaturas elevadas, sendo superado apenas pelo diamante. A dureza do material CBN na escala de Knoop é de 4800 kgf/mm², enquanto a de um aço endurecido corresponde a aproximadamente 600 kgf/mm² (55 HRC) (POULACHON et al., 2004).

Trent (2015) aponta que a grande vantagem do CBN em comparação ao diamante corresponde à sua maior estabilidade a altas temperaturas, tanto em contato com o ar quanto em contato com o ferro (diferente do diamante, o CBN não possui carbono em sua composição) e outros metais, sendo estável no ar por longos períodos a temperaturas superiores a 1000 °C. Seu comportamento como ferramenta de corte na usinagem de aços em alta velocidade demonstra que ele não reage rapidamente com o material a temperaturas consideravelmente mais altas. Em seu processo de produção, compósitos à base de CBN são sinterizados a partir da mistura de grãos finos de CBN misturados com o aglutinante sob condições de alta pressão e temperatura, sendo o aglutinante fator crucial durante o processo (LI et al., 2018). De acordo com Kumar et al. (2019), as ferramentas de CBN são geralmente classificadas em ferramentas de alto teor de CBN (cerca de 90%) e de baixo teor de CBN (cerca de 60%), com base na porcentagem de CBN e de elementos de liga ou aglutinantes, como cobalto e cerâmicas (TiC, TiN, etc.), que afeta diretamente as propriedades da ferramenta, como condutividade térmica, dureza, resistência à ruptura,

entre outros.

Neo et al. (2003) realizaram experimentos com ferramentas de CBN puro produzidas a partir da conversão direta de hBN sob alta pressão e temperatura. Os resultados mostraram que as ferramentas de PCBN em faixas mais altas de velocidade apresentaram acabamento superficial superior e resistiram melhor ao desgaste quando comparadas com as ferramentas convencionais de CBN, possuindo maior dureza à temperatura ambiente e maior condutividade térmica (Tabela 1).

Tabela 1 – Propriedades das ferramentas de PCBN e CBN

	PCBN	CBN
Volume de CBN (%)	99,9%	85-90
Tamanho de grão (um)	0,5	3-5
Outros constituintes	Composição hBN	Ligantes (Co etc.)
Processo	Conversão direta	CBN + ligantes
Dureza (GPa) à temperatura ambiente	50-55	35-40
Dureza (GPa) a 1273 K	2	12
Condutividade térmica (W/mK)	360-44	100-130
Estabilidade térmica (K)	1620	1270

Fonte: Adaptado de Neo et al. (2003)

2.3 Mecanismos de desgaste

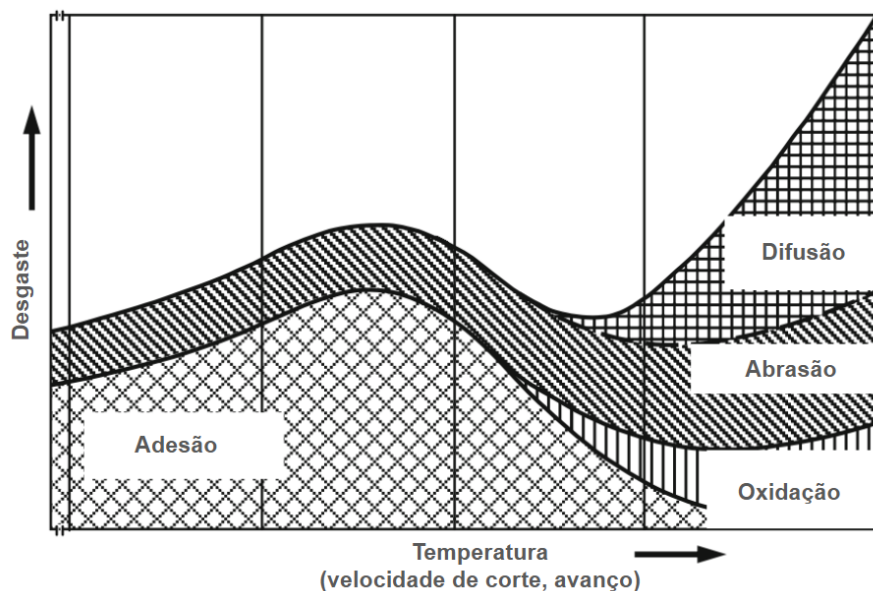
O desgaste é o resultado da remoção de material, devido a microfaturas, dissolução química ou adesão na interface de contato. Além disso, existem vários mecanismos de desgaste: adesivo, abrasivo, por fadiga e corrosivo. O modo de desgaste dominante pode mudar devido a fatores como alterações nas propriedades do material e respostas dinâmicas da superfície causadas pelo aquecimento por atrito, formação de filmes químicos e desgaste. Os mecanismos são descritos considerando as mudanças complexas que ocorrem durante o contato e, de modo geral, o desgaste não ocorre por um único mecanismo isolado (KATO; ADACHI, 2000).

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013), a velocidade de corte é o parâmetro de maior influência no desgaste, seguido pelo avanço e, por último, pela profundidade de usinagem. Os autores afirmam que, com o aumento da velocidade de corte, mais energia (calor) é dirigida ao processo, sem aumento da área da ferramenta que recebe este calor. Já no caso do avanço, há aumento do calor, mas também aumenta a área da ferramenta que o recebe.

A Figura 7 apresenta um diagrama dos mecanismos de desgastes e sua relação com a temperatura em um processo de corte. Em baixas temperaturas, apenas os mecanismos de adesão e abrasão estão presentes e a adesão é predominante, enquanto em temperaturas

elevadas, a adesão perde lugar para os novos mecanismos de difusão e oxidação. Observa-se que esses dois mecanismos vão crescendo em participação com o aumento da temperatura, e que a difusão cresce em escala exponencial. Esse diagrama também salienta que o desgaste total cresce muito com o aumento da temperatura de corte (MACHADO et al., 2013).

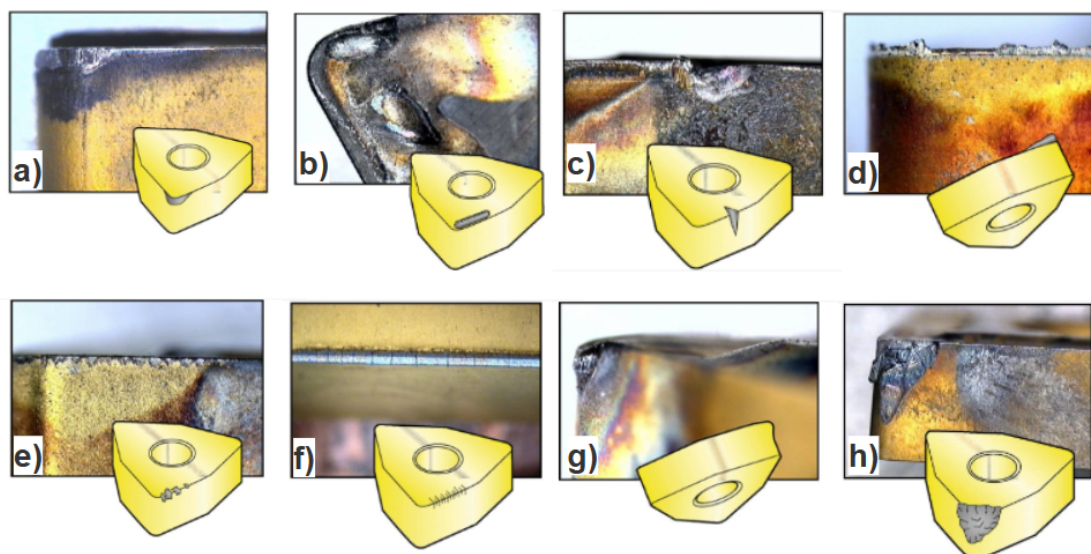
Figura 7 – Mecanismos de desgaste em um processo de corte



Fonte: Adaptado de Klocke (2011)

Os mecanismos de desgaste deterioram as características da ferramenta e podem influenciar a qualidade da peça usinada. A Figura 8 ilustra os tipos de desgaste que podem ocorrer nas ferramentas.

Figura 8 – Tipos de desgaste em ferramentas de corte: a) flanco; b) cratera; c) entalhe; d) aresta postiça de corte; e) lascamento; f) trincas térmicas; g) deformação plástica; h) quebra da aresta



Fonte: Adaptado de Seco Tools (s.d.)

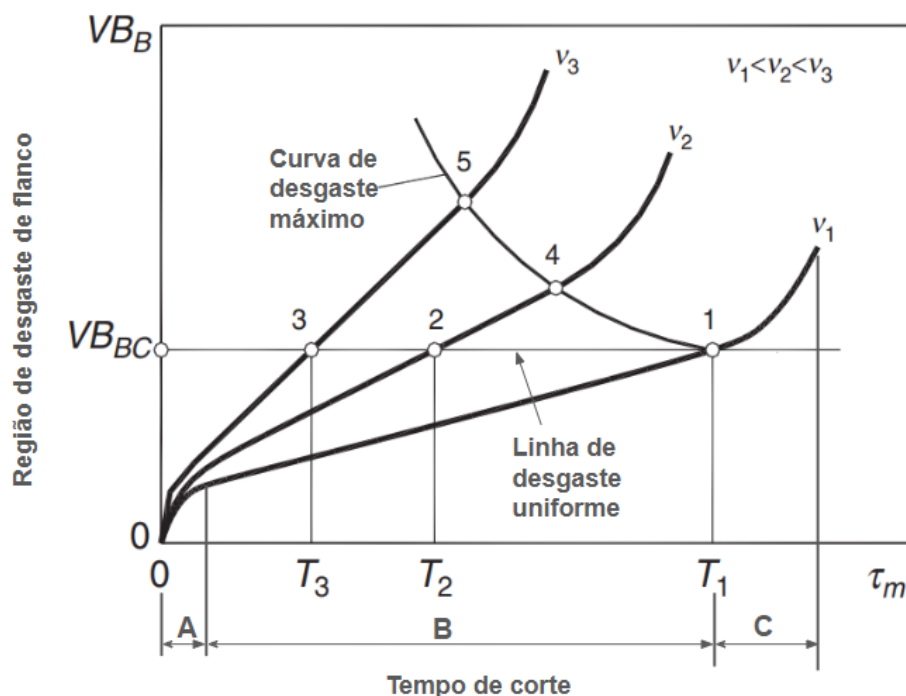
Segundo Sheikh-Ahmad e Davim (2012), o desgaste de flanco (8a) e o desgaste de cratera (8b) são os tipos mais importantes de desgaste de ferramenta a serem medidos. O desgaste de flanco é geralmente causado por abrasão, devido ao atrito entre a superfície de folga e a peça de trabalho e é caracterizado por pequenos sulcos paralelos à direção de corte. O desgaste de cratera (8b) é comumente causado por difusão e geralmente está associado à usinagem de aços a altas velocidades de corte com ferramentas de WC-Co. O desgaste de cratera aparece na superfície de saída da ferramenta, por onde o cavaco escoava, e se localiza a certa distância da aresta de corte. Essa posição coincide com o local de temperatura máxima na ferramenta.

O desgaste da ferramenta depende não apenas do tempo de corte ou do comprimento do trajeto de corte, mas também dos parâmetros da geometria da ferramenta (ângulos de saída, de folga, raio da aresta de corte, etc.), das condições de corte (velocidade de corte, avanço, profundidade de corte), das propriedades do material da peça (dureza, tenacidade, etc.), da presença e das propriedades do fluido de corte, entre muitos outros parâmetros do sistema de usinagem. Na prática, entretanto, a velocidade de corte é o fator de maior relevância na análise do desgaste da ferramenta. Na Figura 9, são apresentadas três curvas características de desgaste (valores médios) para três velocidades de corte distintas: v_1 , v_2 e v_3 . Como v_3 é maior que as outras duas, ela corresponde à taxa de desgaste mais rápida. Quando o desgaste atinge o valor admissível VB_{BC} , considera-se que a ferramenta está desgastada. Tipicamente, o valor de VB_{BC} é escolhido na faixa de 0,15 a 1,00 mm, dependendo do tipo de operação de usinagem, das condições da máquina-ferramenta e dos requisitos de qualidade da operação. T_1 representa a vida útil

da ferramenta quando se usa a velocidade de corte v_1 ; T_2 , para v_2 ; e T_3 , para v_3 .

Quando a qualidade da superfície resultante da usinagem ainda atende aos requisitos funcionais da peça, mesmo com maior desgaste da ferramenta, deve-se usar a curva de desgaste máximo em vez da linha de desgaste uniforme. Isso faz com que a diferença na vida útil da ferramenta entre velocidades de corte baixas e altas se torne menos significativa. Como resultado, pode-se alcançar uma maior taxa de produtividade, o que é especialmente importante no uso de máquinas CNC de alta velocidade (ASTAKHOV, 2006).

Figura 9 – Relação entre o desgaste de flanco e o tempo de corte para diferentes velocidades



Fonte: Adaptado de Astakhov (2006)

Em velocidades de corte mais baixas, a principal causa do desgaste de flanco corresponde à abrasão. Nas velocidades de corte mais elevadas, difusão costuma ser a principal causa, porque velocidades de corte mais altas geram temperaturas mais elevadas, criando condições favoráveis para sua ocorrência (SANDVIK, 2012).

De acordo com Sheikh-Ahmad e Davim (2012), o desgaste começa a uma taxa elevada (Região A), devido à ruptura inicial de cantos vivos e pontos de concentração de tensão. Em seguida, a aresta de corte se estabiliza e o desgaste ocorre por remoção gradual do material da ferramenta (Região B), até o momento em que a geometria da aresta de corte se torna disfuncional e ocorre um desgaste rápido ou catastrófico (Região C).

Utilizando ferramentas com composição de 50% de CBN, ligante à base de TiC e cerca de 5% de Al, Lin, Liao e Wei (2008) conduziram testes de usinagem no aço 4340 endurecido, mantendo fixo o avanço ($f = 0,1$) e a profundidade de usinagem ($ap = 0,2$ mm) e variando a velocidade de corte entre 58 e 180 m/min. Os autores realizaram medições de temperatura e esforços de corte no processo e constataram que a vida útil da ferramenta

aumenta com o aumento da velocidade de corte até que se atinja um valor máximo (com $v_c = 82$ m/min), após o qual ela começa a diminuir. Em cortes a baixa velocidade, o mecanismo de desgaste principal corresponde à abrasão. Em altas velocidades de corte, o amaciamento do material da peça se torna significativo, resultando na redução das forças de corte e no aparecimento de uma camada de óxido, que protege a ferramenta. Quando a temperatura de corte atinge valores muito altos, a camada aderente se desgasta. Além disso, a ligação entre as partículas de CBN é enfraquecida devido à difusão, sendo essas partículas então arrancadas. Subsequentemente, a aresta de corte é enfraquecida e o desgaste na superfície de folga aumenta.

Utilizando ferramentas de CBN de baixo e alto teor com duas microgeometrias diferentes (aresta chanfrada e aresta arredondada) no corte contínuo, semi-interrompido e interrompido do aço 4340 com dureza de 56 HRc, Diniz e de Oliveira (2008) mostraram que a maior vida útil foi obtida quando a ferramenta de baixo teor de CBN foi utilizada, independentemente do tipo de corte. De modo geral, o corte interrompido levou à maior vida útil, devido à menor temperatura durante o processo. Os autores concluíram que o principal mecanismo de desgaste foi a abrasão e que a temperatura não foi alta o suficiente para causar desgaste de cratera, devido à elevada estabilidade química do material da ferramenta.

Diante do exposto, fica evidente que a preparação de aresta exerce papel fundamental no desempenho de ferramentas de corte. No caso das ferramentas de CBN, cujo alto custo é compensado por seu excelente desempenho em condições severas, compreender o impacto da preparação de aresta torna-se ainda mais relevante. A modificação controlada da geometria da aresta pode influenciar significativamente os mecanismos de desgaste, a geração de calor, as forças de corte e a qualidade superficial — fatores diretamente relacionados à eficiência e ao custo do processo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os testes foram realizados em dois tipos de materiais diferentes: aço 4340 no estado recozido e aço 4140 no estado endurecido. A Tabela 2 apresenta a composição química dos materiais, sem tratamento, segundo a norma AISI.

Tabela 2 – Composição química dos aços 4340 e 4140 (% em peso)

Grau	C	Mn	P (máx.)	S (máx.)	Si	Ni	Cr	Mo
4340	0,38-0,43	0,6-0,8	0,035	0,04	0,15-0,35	1,65-2,0	0,7-0,9	0,2-0,3
4140	0,38-0,43	0,75-1,0	0,035	0,04	0,15-0,35	-	0,8-1,1	0,15-0,25

Fonte: Adaptado de ASTMSteel (2024)

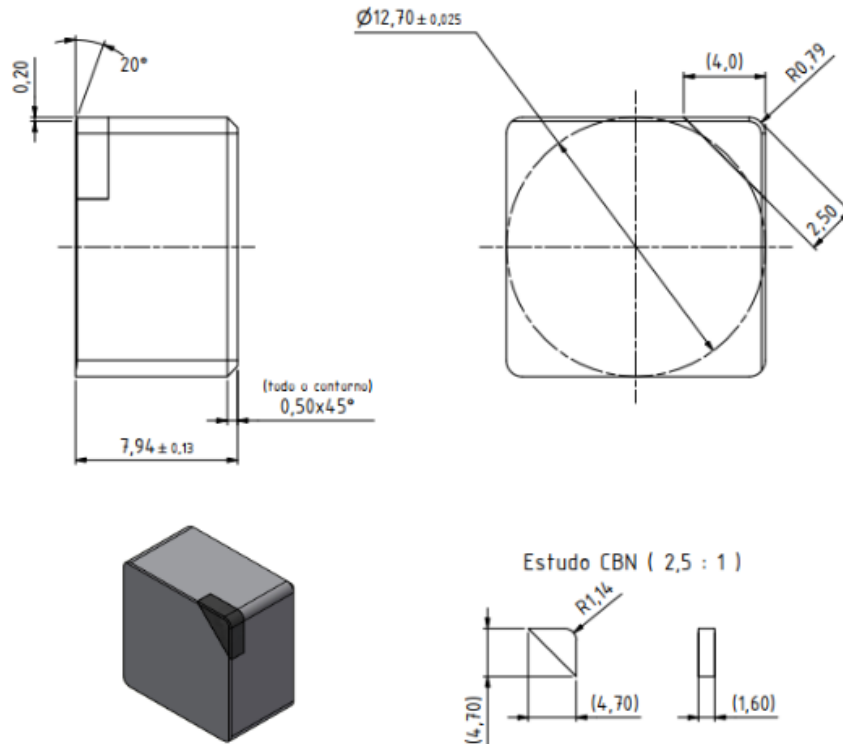
Para a realização dos ensaios de torneamento, foram utilizados insertos SNGN 120708, com ponta única de CBN (Figura 10), fornecidos pela empresa Hanna Tools. Para os testes no aço 4340 recozido, foram recebidos dois insertos por preparação (afiada e preparação nominal de 20 μm) e para os testes no aço 4140 endurecido, um inserto por preparação (afiada, preparação nominal de 20 e 40 μm). A Figura 11 ilustra a geometria dos insertos.

Figura 10 – Insertos de CBN



Fonte: Elaborada pelo autor

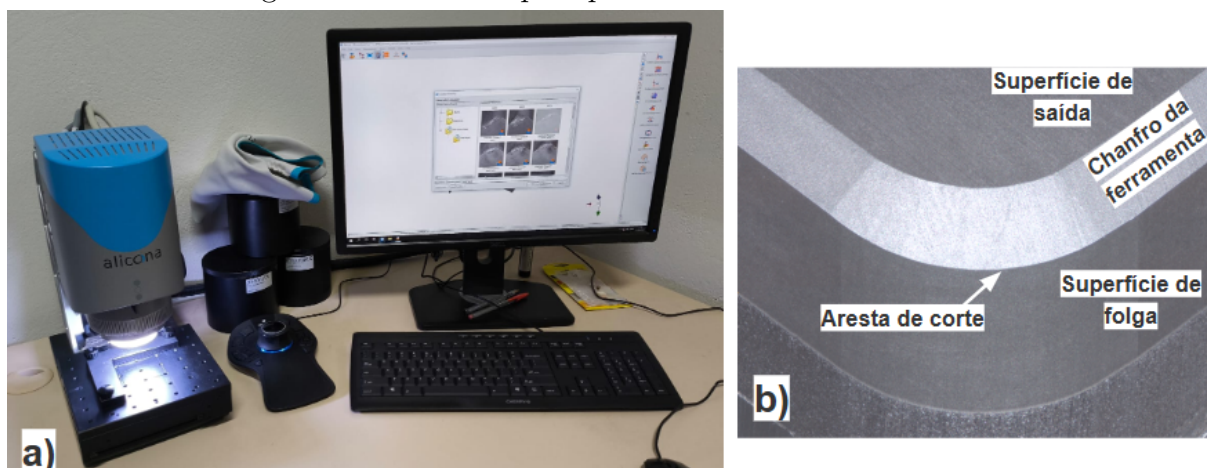
Figura 11 – Geometria das ferramentas de CBN



Fonte: Adaptado de Hanna Tools (2024)

As ferramentas foram caracterizadas no microscópio com variação infinita de foco Alicona InfiniteFocus SL. Para a obtenção das imagens, utilizou-se lente de 10x e o módulo EdgeMaster, com aplicação de 200 perfis perpendiculares à aresta de corte. Para as arestas com preparação, foram medidos os segmentos S_γ e S_α , além do raio médio de aresta. Para as arestas consideradas afiadas (sem preparação), além dos parâmetros mencionados, mediu-se o lascamento da aresta Δr . A Figura 12 apresenta a) o microscópio utilizado e b) a localização das superfícies de folga e saída, além do chanfro e da aresta de corte da ferramenta nas imagens obtidas em microscopia óptica.

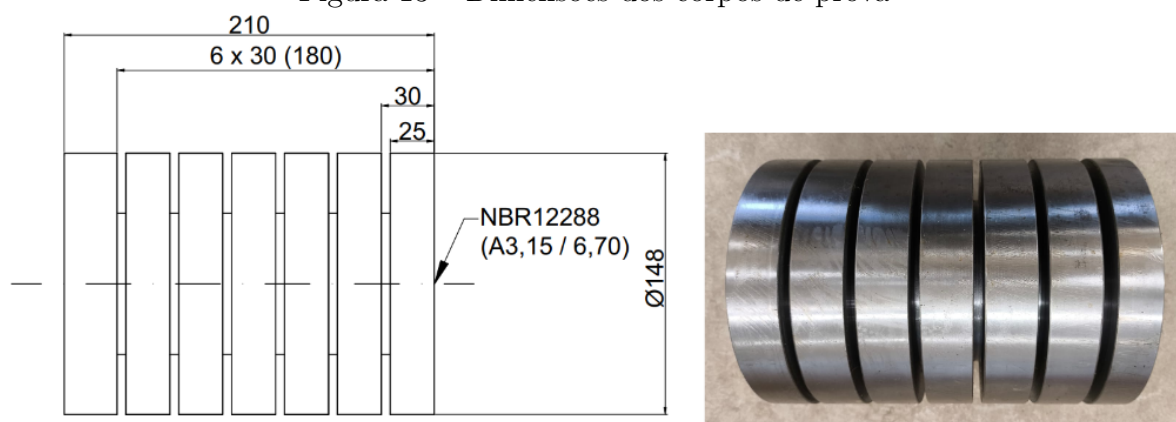
Figura 12 – Microscópio óptico Alicona InfiniteFocusSL



Fonte: Elaborada pelo autor

Os corpos de prova foram preparados, ambos com trechos lineares de 25 mm de comprimento e canal de 5 mm entre os trechos para saída da ferramenta, fixados em placa universal de três castanhas e contra-ponta rotativa, conforme Figura 13.

Figura 13 – Dimensões dos corpos de prova

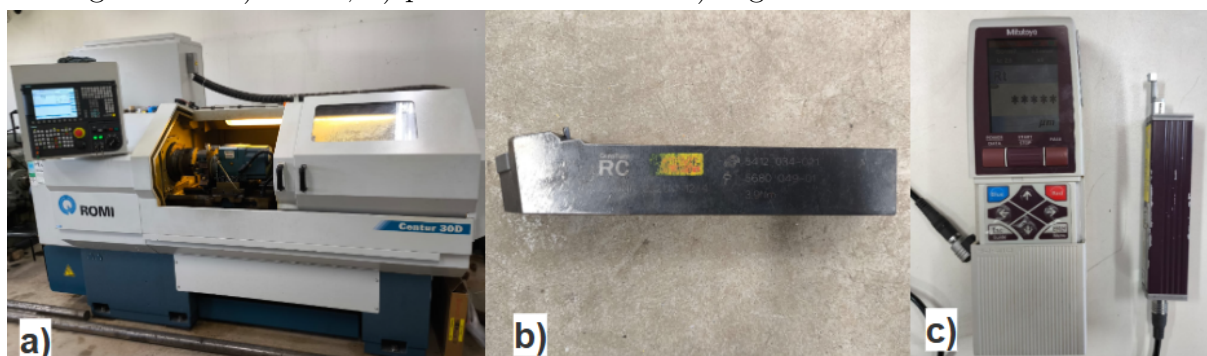


Fonte: Elaborada pelo autor

Testes de medição de dureza Rockwell C foram realizados em uma amostra do corpo de prova de aço 4340 recozido, a partir dos quais obteve-se um valor médio de 17,6 HRC. Para o aço 4140 no estado endurecido, o valor de dureza foi fornecido junto com o material e corresponde a 48 HRC.

Os ensaios de torneamento foram realizados em um torno CNC Romi Centur 30D (Figura 14a), com comando numérico Siemens SINUMERIK 828D, faixa de velocidades de 4 a 4000 rpm e potência máxima de 9 kW, utilizando um porta-ferramenta CSDNN 2525M 12-4 (Figura 14b). Os parâmetros de corte utilizados foram mantidos constantes: velocidade de corte $v_c = 100$ m/min, avanço $f = 0,1$ mm/volta e profundidade de usinagem $a_p = 0,5$ mm. Durante os ensaios, não se utilizou fluido de corte.

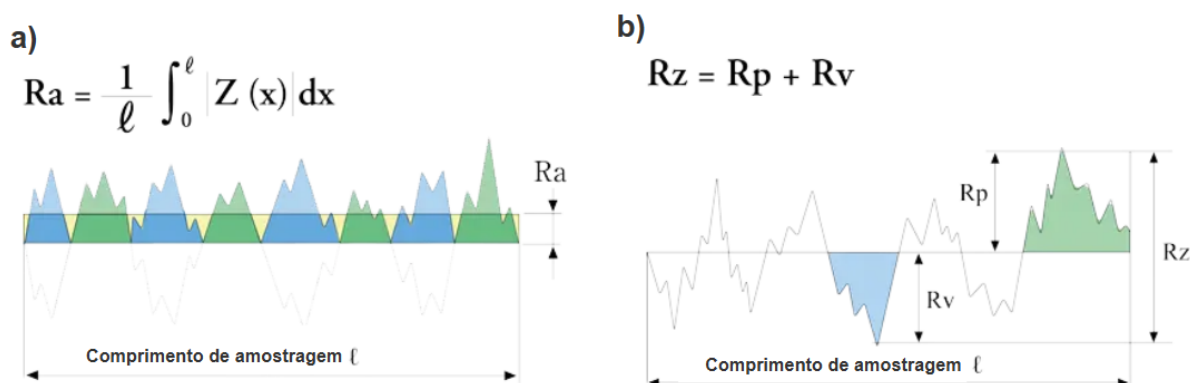
Figura 14 – a) Torno, b) porta ferramentas e c) rugosímetro utilizados nos testes



Fonte: Elaborada pelo autor

Após a usinagem de cada trecho, a rugosidade foi medida por um rugosímetro portátil Mitutoyo SJ210 (Figura 14c), sem a remoção da peça da máquina, de modo a se minimizar desvios do processo e evitar erros de batimento. Foram realizadas três medições de rugosidade em pontos equidistantes radialmente, a cerca de 120°, tendo sido as médias e os respectivos desvios-padrões calculados. Os valores obtidos foram Ra (rugosidade média, representa a média aritmética da ordenada absoluta $Z(x)$ dentro do comprimento de amostragem) e Rz (rugosidade máxima, representa a soma da altura máxima do pico R_p e da profundidade máxima do vale R_v de um perfil dentro do comprimento de amostragem). A Figura 15 ilustra os parâmetros utilizados na medição da rugosidade.

Figura 15 – Parâmetros a) Rugosidade média Ra e b) Rugosidade máxima Rz medidos após torneamento



Fonte: Adaptado de ISO 4287:1997 (1997)

Além da rugosidade, após a usinagem de cada trecho, o inserto foi removido do suporte e levado ao referido microcópico para medição do desgaste de flanco VB_{bmax} . Como critério de fim de teste, considerou-se um desgaste de flanco máximo $VB_{bmax} = 0,3$ mm ou a usinagem de 10 segmentos de 25 mm para o aço 4340 recozido e 7 segmentos de 25 mm para o aço 4140 endurecido, o que ocorresse primeiro.

As arestas de corte dos insertos em fim de vida foram analisadas utilizando um microscópio eletrônico de varredura Philips XL-30 FEG (Field Emission Gun) com aumento de 75x. Por fim, realizou-se um mapeamento da composição química dos insertos utilizando o sistema de espectroscopia por energia dispersiva de raio-x da marca Bruker, acoplado ao microscópio.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização das arestas de corte

Foram recebidos dois insertos para cada preparação caracterizada nominalmente pelo seu raio médio ($r_\beta = 0$ e $20 \mu\text{m}$) para torneamento do aço 4340 recozido. A Tabela 3 apresenta os valores aferidos na medição.

Tabela 3 – Insertos preparados utilizados nos testes com aço 4340 recozido

Preparação	Ferramenta	r_β [μm]	$S\alpha$ [μm]	$S\gamma$ [μm]	K [-]	Δr [μm]
Afiada	1	4,90	2,26	5,87	2,59	1,04
	2	5,16	2,57	5,20	2,03	1,09
20 μm	3	21,14	22,12	13,85	0,63	-
	4	19,84	21,69	12,89	0,59	-

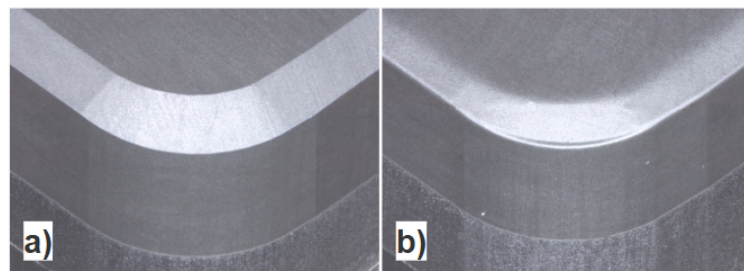
Fonte: Elaborada pelo autor

A aresta afiada ($r_\beta = 0$) é resultado da interseção das superfícies de saída e de folga que foram retificadas na preparação do inserto. O processo de retificação ocasiona pequenos lascamentos, como pode ser observado pelos valores de Δr , distância mínima entre uma aresta ideal e a aresta real de corte. Tais lascamentos influenciam o valor do raio médio, próximo de $5 \mu\text{m}$. O valor de $K > 1$ indica assimetria, com tendência para a superfície de saída (região de medição de $S\gamma$).

Entre os insertos com preparação de $20 \mu\text{m}$ nota-se, pelos valores de $S\alpha$ e $S\gamma$, assimetria, neste caso com arredondamento tendendo à superfície de folga (região de medição de $S\alpha$).

Considerando os raios médios obtidos, os valores para a aresta afiada (Figura 16a) e a aresta com raio nominal de $20 \mu\text{m}$ (Figura 16b) se apresentaram dentro do esperado.

Figura 16 – Imagens dos insertos conforme recebido: a) preparação afiada; b) raio nominal de $20 \mu\text{m}$



Fonte: Elaborada pelo autor

Para o torneamento do aço 4140 endurecido, foi recebido um inserto para cada preparação, caracterizados conforme a Tabela 4.

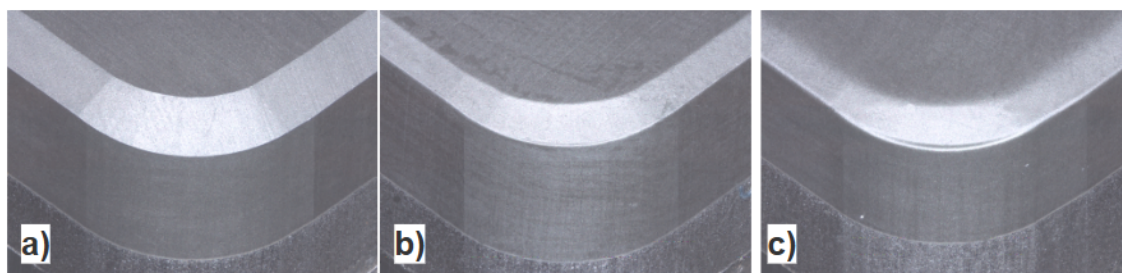
Tabela 4 – Insertos preparados utilizados nos testes com aço 4140 endurecido

Preparação	Ferramenta	r_β [μm]	$S\alpha$ [μm]	$S\gamma$ [μm]	K [-]	Δr [μm]
Afiada	5	5,64	3,30	4,78	1,45	1,24
20 μm	6	18,13	16,51	10,78	0,65	-
40 μm	7	40,83	29,41	27,17	0,92	-

Fonte: Elaborada pelo autor

Novamente, devido ao processo de retificação, pequenos lascamentos são esperados na aresta de corte. Essa característica é evidenciada pelo valor medido de $\Delta r = 1,24 \mu\text{m}$ para a aresta afiada, demonstrando a ocorrência de microdefeitos típicos desse tipo de usinagem. Além disso, foi observada certa assimetria na preparação de 20 μm ($K = 0,65$), com tendência a um maior arredondamento na superfície de folga. Por outro lado, na preparação de 40 μm , a simetria foi significativamente melhor, com um fator K próximo de 1, indicando uma distribuição mais uniforme do arredondamento da aresta. Os valores medidos para os raios encontram-se dentro do intervalo esperado, sugerindo que o processo de preparação foi realizado com boa qualidade e controle, assegurando maior previsibilidade no desempenho da ferramenta. A Figura 17 apresenta as imagens de cada uma das preparações.

Figura 17 – Imagens dos insertos conforme recebido: a) preparação afiada; b) raio nominal de 20 μm ; c) raio nominal de 40 μm

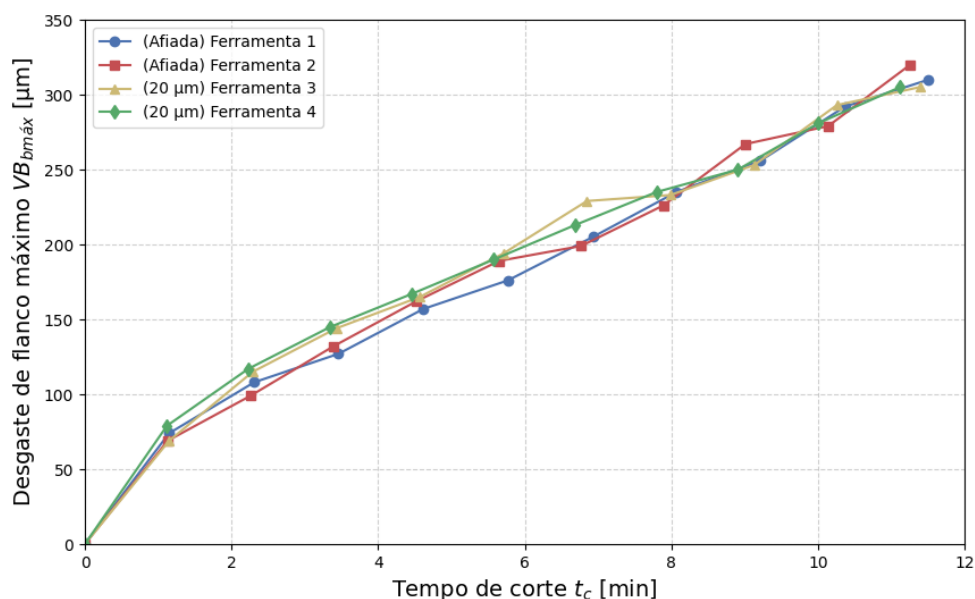


Fonte: Elaborada pelo autor

4.2 Testes de torneamento

Os testes de torneamento foram conduzidos inicialmente no corpo de prova de aço 4340 recozido, com realização de ensaio e réplica, utilizando os insertos com preparações “Afiada” e “20 μm ”. A Figura 18 apresenta as curvas de desgaste em função do tempo de corte para as diferentes situações.

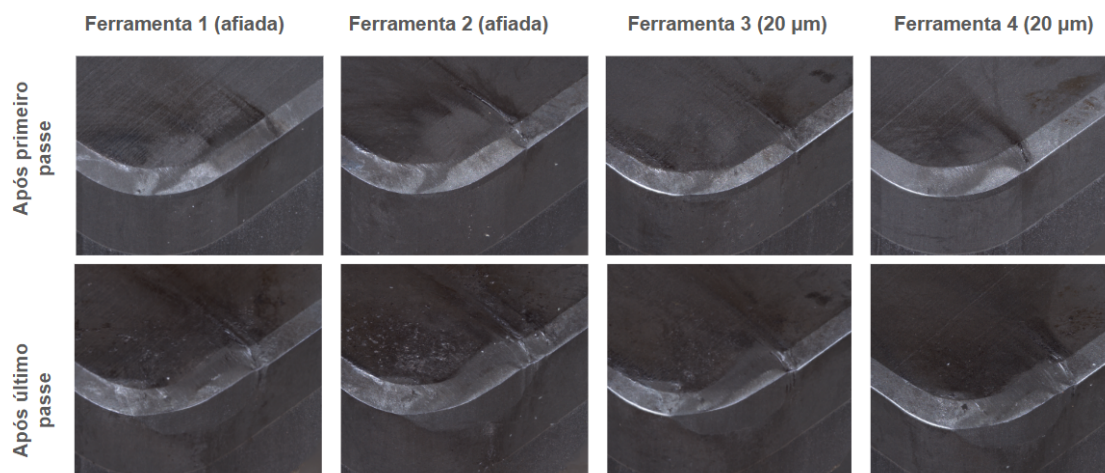
Figura 18 – Curvas de desgaste durante o torneamento do aço 4340 recozido



Fonte: Elaborada pelo autor

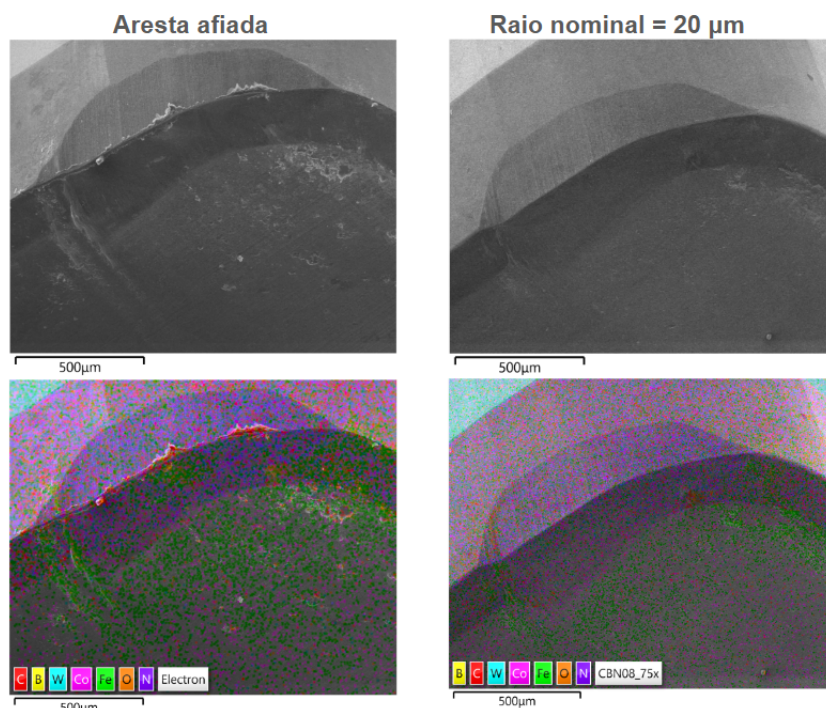
De maneira geral, nota-se um crescimento inicial acelerado dos valores de desgaste após o primeiro passe, seguido de um trecho com taxa estável até o fim de vida das ferramentas, onde valores máximos de desgaste de flanco foram atingidos. Há leve diferença entre as curvas para arestas afiladas em comparação à preparação de 20 μm até cerca de 7 min do tempo de corte, com as arestas afiladas apresentando menor valor de desgaste. Após este ponto, as curvas praticamente se sobrepõem até o fim de vida. O comportamento similar entre as curvas indica que as preparações de aresta tiveram pouca ou nenhuma influência no desempenho das ferramentas, com tempo de corte total de aproximadamente 11,1 a 11,5 min. Pela análise das imagens de microscopia óptica (Figura 19) e microscopia eletrônica de varredura (Figura 20), para ambas as arestas, notam-se marcas paralelas à direção do corte, indicando que o principal mecanismo de desgaste foi a abrasão. Nota-se formação de entalhe na região da superfície de saída, possivelmente causado pela borda do cavaco durante seu escoamento, que age como uma serra devido à sua morfologia e encruamento. Analisando-se os mapas de espectroscopia por energia dispersiva, observa-se adesão pouco significativa, com quantidade discreta do elemento Fe, tanto na superfície de saída quanto na região próxima à formação do entalhe. Quanto aos demais elementos, o tungstênio está presente no substrato de metal duro do inserto, enquanto o cobalto, o boro e o nitrogênio fazem parte da composição da pastilha de CBN.

Figura 19 – Desgaste das ferramentas após primeiro e último passe no torneamento do aço 4340 recozido



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 20 – Imagens de MEV e mapa EDS das ferramentas em fim de vida após torneamento do aço 4340 recozido

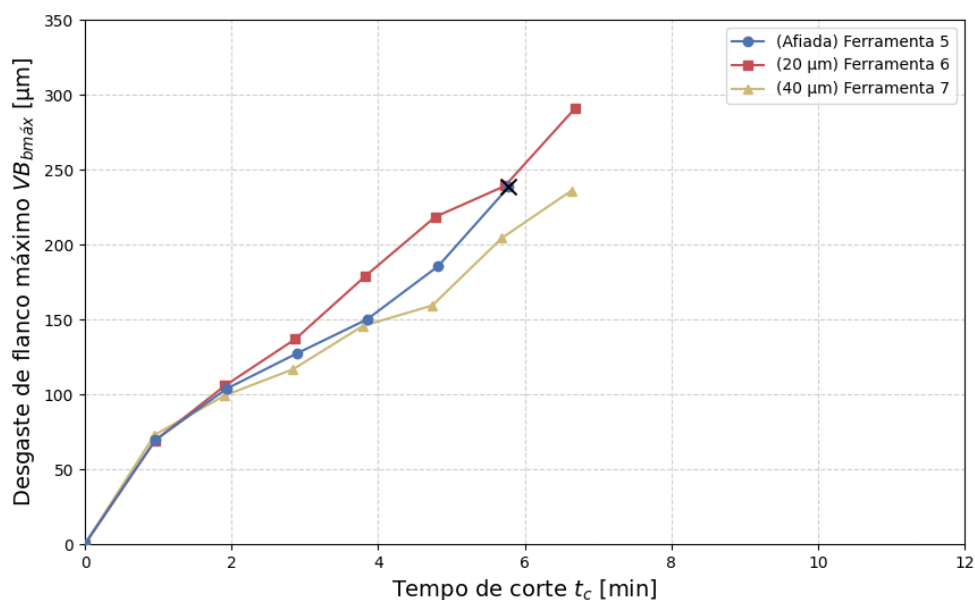


Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 21 apresenta as curvas de desgaste no torneamento do aço 4140 endurecido. Já a Figura 22 apresenta imagens de microscopia óptica das ferramentas após o primeiro e o último (sétimo) passe nos testes realizados. Para a ferramenta afiada (Ferramenta 5), foram realizados apenas seis passes, pois a ponta de CBN se despreendeu do substrato de metal duro durante a usinagem do último trecho. A hipótese é que o aumento dos desgastes

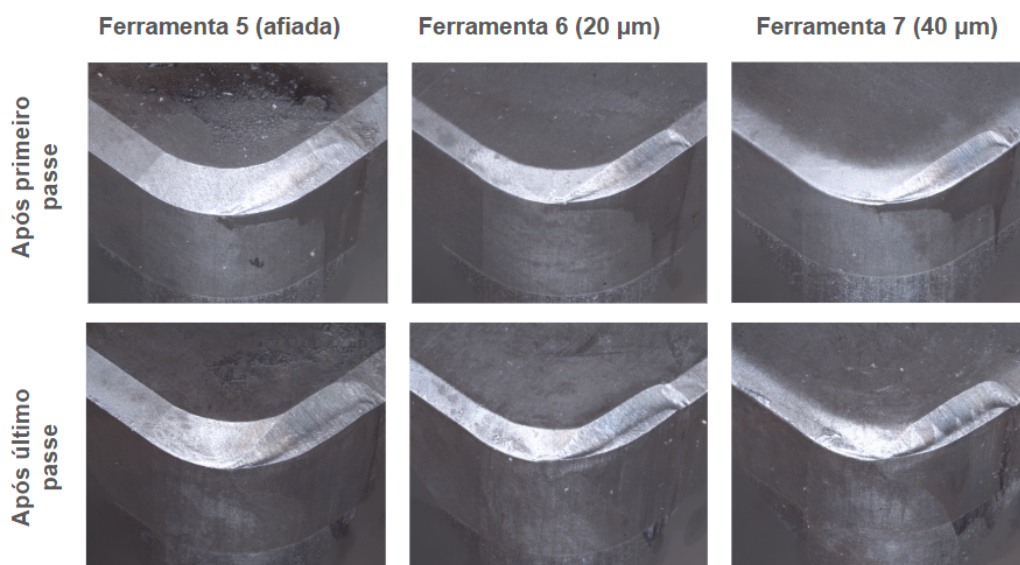
— de flanco e cratera — tenha alterado o perfil da ferramenta, modificando as forças de corte e, conseqüentemente, provocando a ruptura da solda entre o inserto e o substrato.

Figura 21 – Curvas de desgaste durante o torneamento do aço 4140 endurecido



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 22 – Desgaste das ferramentas após primeiro e último passe no torneamento do aço 4140 endurecido



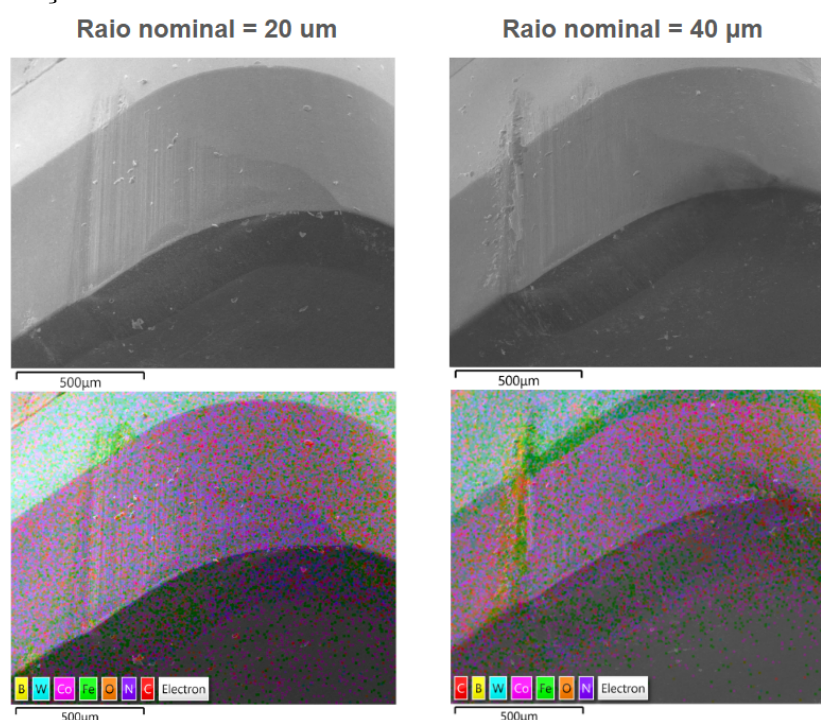
Fonte: Elaborada pelo autor

O comportamento inicial apresentou desgaste acelerado para as três ferramentas, seguido de crescimento com taxa reduzida até o fim de vida. Após dois minutos de teste

(após o segundo passe), as curvas se separam e apresentam comportamento regular, com um desgaste final 24% maior para a preparação de 20 μm em relação à preparação de 40 μm . Comparativamente, após o sexto passe, a ferramenta afiada apresentou desgaste semelhante à preparação de 20 μm e desgaste 17% maior em relação à preparação de 40 μm . Com o arrancamento da ponta de CBN, não foi possível realizar as imagens de MEV e EDS na preparação afiada.

A Figura 23 traz imagens das ferramentas em fim de vida, além da análise dos elementos químicos presentes, para as demais preparações. Observando as imagens de microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura, novamente notam-se marcas de abrasão paralelas à direção de corte, remetendo à ocorrência de desgaste de flanco. Nota-se ainda, principalmente nas imagens de microscopia óptica (Figura 22), formação de cratera na superfície de saída. Observando os mapas de EDS, há adesão pouco significativa do elemento Fe, com maior ocorrência na região próxima à formação do entalhe, para a ferramenta com raio nominal de 40 μm .

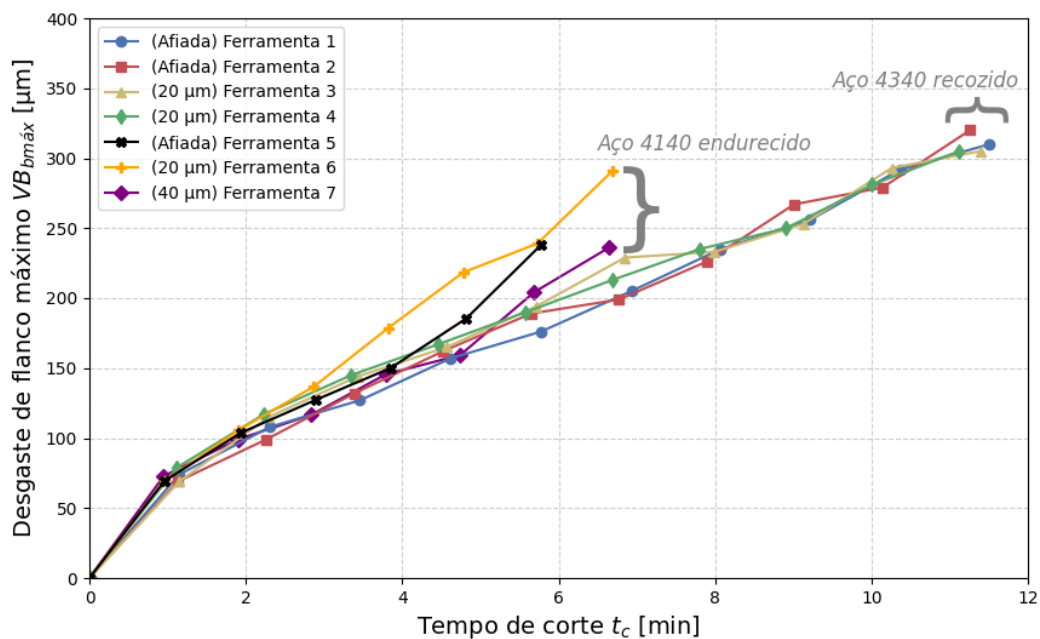
Figura 23 – Imagens de MEV e mapa EDS das ferramentas após os testes de torneamento no aço 4140 endurecido



Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 24 apresenta os desgastes de flanco medidos para as ferramentas afiadas e com preparação de 20 μm para os testes no aço 4340 recozido (teste e réplica) e 4140 endurecido (teste) em relação ao tempo de corte.

Figura 24 – Comparativo entre o torneamento de aço 4340 recozido e 4140 endurecido



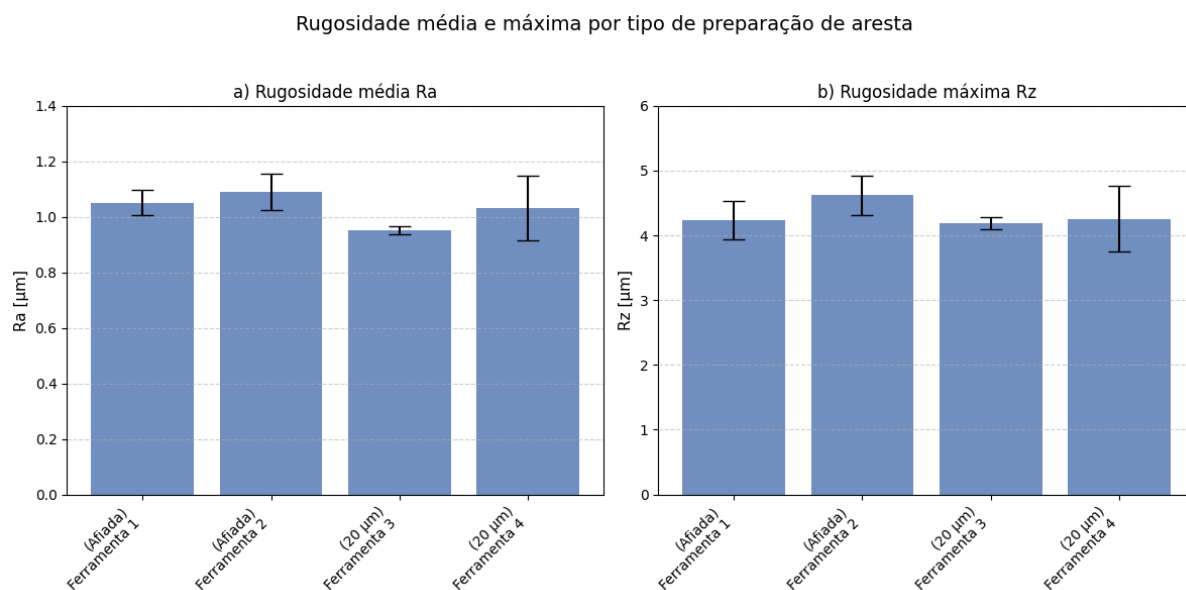
Fonte: Elaborada pelo autor

Considerando o mesmo nível de desgaste, os testes em aço endurecido apresentaram tempos de corte significativamente menores do que os testes no aço em estado recozido. Após o tratamento térmico de endurecimento, o material pode apresentar fase martensítica, o que eleva a dureza e resistência ao desgaste e pode elevar as temperaturas no processo de corte, ocasionando desgaste acelerado da ferramenta. A martensita é uma estrutura cristalina metaestável formada durante o tratamento térmico de têmpera de alguns aços (CALLISTER, 2008). O aço 4140, ao sofrer tratamento térmico, resulta na formação de martensita, como demonstrado em estudos realizados por Meysami et al. (2010) e Lorenzo-Martin e Ajayi (2015).

4.3 Qualidade superficial da peça

A Figura 25 apresenta os valores médios da Rugosidade média Ra e da Rugosidade máxima Rz, bem como os respectivos desvios-padrão relacionados aos testes realizados no aço 4340 no estado recozido, após o primeiro passe de cada ferramenta.

Figura 25 – a) Rugosidade média Ra e b) Rugosidade máxima Rz nos testes de torneamento do aço 4340 recozido após primeiro passe



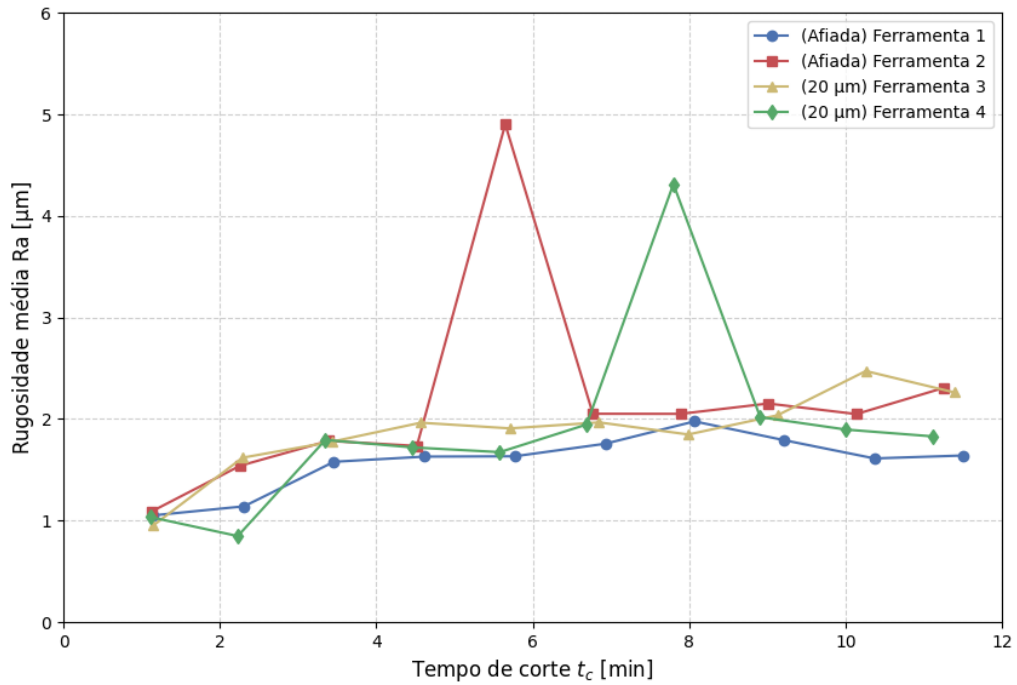
Fonte: Elaborada pelo autor

Considerando a média e desvio-padrão, a Ferramenta 2 apresenta os maiores valores para Ra e Rz após o primeiro passe, seguida da Ferramenta 1, ambas afiadas. A Ferramenta 3 apresenta os menores valores de Ra e Rz e também o menor desvio-padrão entre as medidas, indicando valores de rugosidade mais regulares para este caso. Ainda assim, devido à proximidade dos valores, não há distinção clara sobre o efeito da microgeometria na rugosidade para o caso do aço 4340 recozido.

A Figura 26 e a Figura 27 apresentam, respectivamente, os valores de rugosidade média Ra e rugosidade máxima Rz obtidos ao fim de cada passe no torneamento do aço 4340 recozido. Após o primeiro passe, a rugosidade média Ra (e também a rugosidade máxima Rz) medida para todas as ferramentas se apresenta com valores muito próximos. Após o segundo passe, não há convergência dos valores, visto que para uma ferramenta afiada (Ferramenta 2) e uma ferramenta com preparação de 20 μm (Ferramenta 3), os valores de rugosidade aumentam, enquanto que para as demais, o valor diminui (Ferramenta 4) ou se mantém inalterado (Ferramenta 1). Após o terceiro passe, todas as curvas têm tendência de pequeno crescimento até o fim dos testes, com exceção de *outliers* para a Ferramenta 2 na realização do quinto passe e da Ferramenta 4 na realização do sétimo passe, para os quais percebeu-se vibração elevada, resultando nos picos de rugosidade

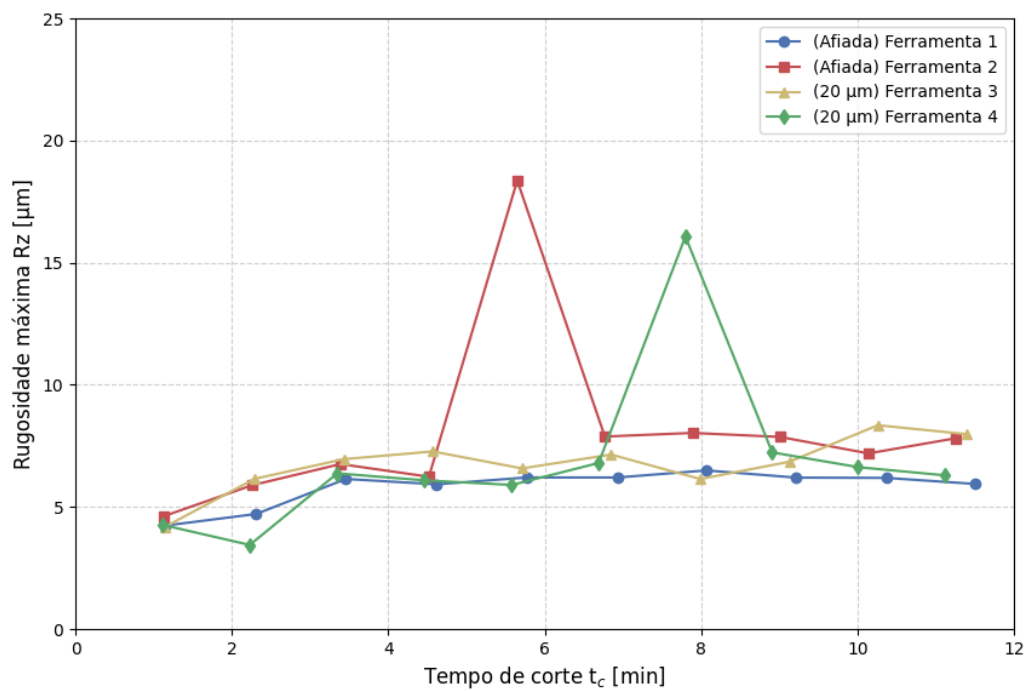
apresentados, tanto para a rugosidade média quanto para a rugosidade máxima.

Figura 26 – Rugosidade média Ra nos testes de torneamento do aço 4340 recozido



Fonte: Elaborada pelo autor

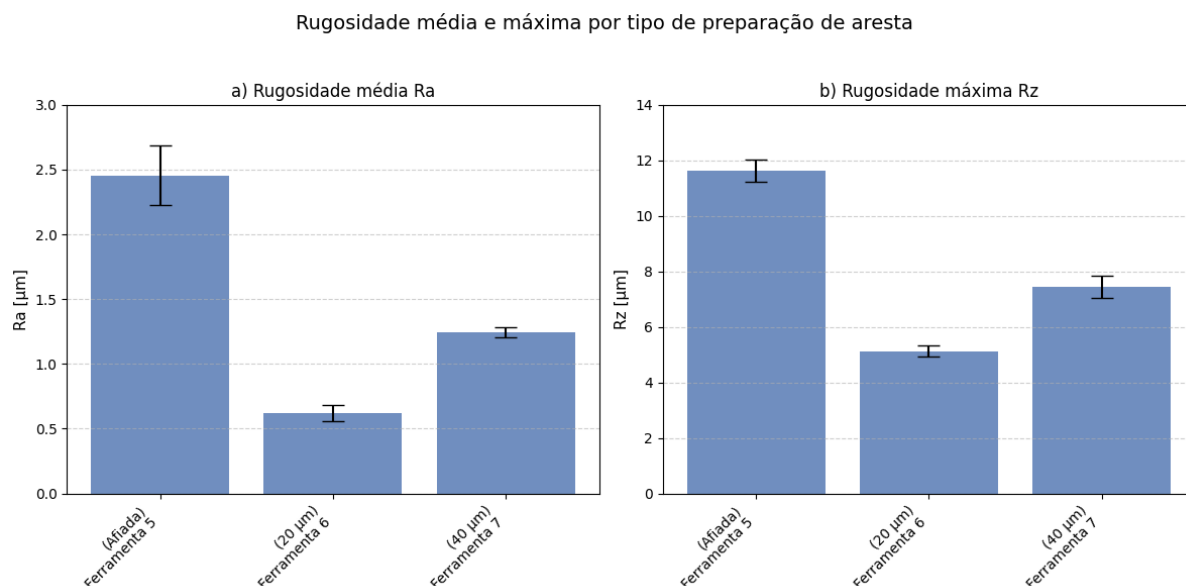
Figura 27 – Rugosidade máxima Rz nos testes de torneamento do aço 4340 recozido



Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 28 apresenta os valores médios da Rugosidade média Ra e da Rugosidade máxima Rz, bem como os respectivos desvios-padrão relacionados aos testes realizados no aço 4140 no estado endurecido, após o primeiro passe de cada ferramenta.

Figura 28 – a) Rugosidade média Ra e b) Rugosidade máxima Rz nos testes de torneamento do aço 4140 endurecido após primeiro passe



Fonte: Elaborada pelo autor

Ao contrário do aço 4340 recozido, no torneamento do aço 4140 endurecido há uma clara distinção entre os valores medidos. A ferramenta afiada apresenta os maiores valores de rugosidade média ($Ra \approx 2,4 \mu\text{m}$) e máxima ($Rz \approx 11,6 \mu\text{m}$). A elevação da rugosidade superficial observada nas ferramentas afiadas pode estar associada ao lascamento inicial da aresta de corte, decorrente de imperfeições geradas durante o processo de retificação.

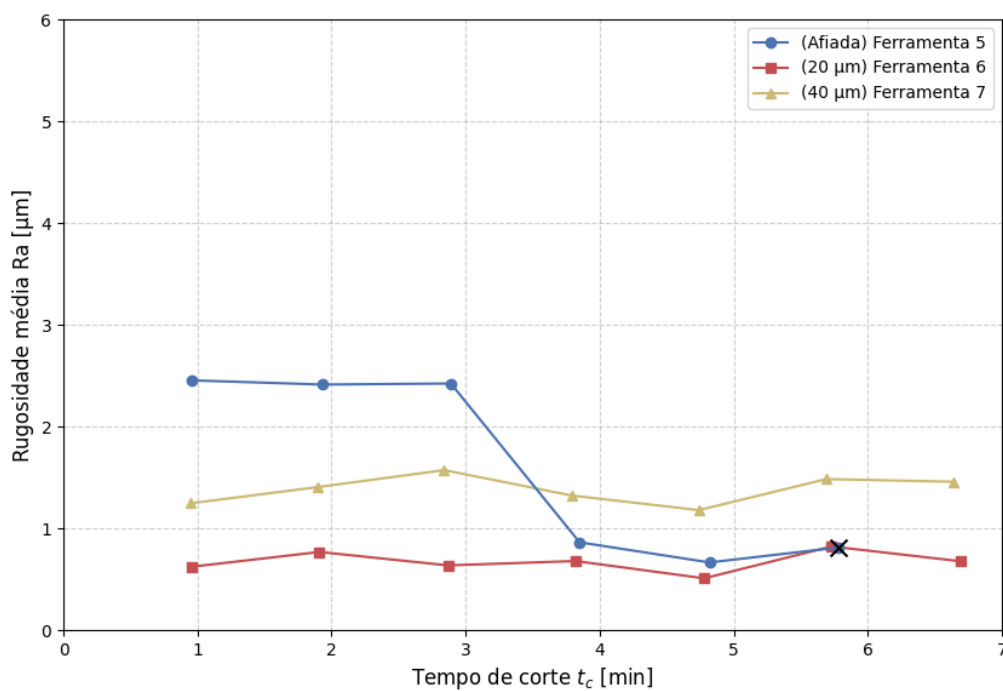
A Ferramenta 7 apresenta valores que ficam entre a preparação afiada e a de $20 \mu\text{m}$. Se por um lado ferramentas afiadas podem sofrer microlascamento devido à ausência de uma preparação adequada, por outro, grandes raios podem aumentar a área de contato, aumentar as forças de corte e causar maior deformação do material. Em comparação à Ferramenta 5, os menores valores de rugosidade são observados para a Ferramenta 6 (com preparação de $20 \mu\text{m}$): cerca de 75% abaixo no caso da rugosidade média e cerca de 62% abaixo no caso da rugosidade máxima, indicando bom equilíbrio entre reforço da aresta e capacidade de cisalhamento.

A Figura 29 e a Figura 30 apresentam, respectivamente, os valores de rugosidade média Ra e rugosidade máxima Rz obtidos ao fim de cada passe no torneamento do aço 4140 endurecido.

A rugosidade média e máxima obtida para a ferramenta com preparação nominal de $20 \mu\text{m}$ (Ferramenta 6) foi a menor dentre as três condições, mantendo estabilidade até o fim dos testes. Considerando a preparação nominal de $40 \mu\text{m}$ (Ferramenta 7), o valor

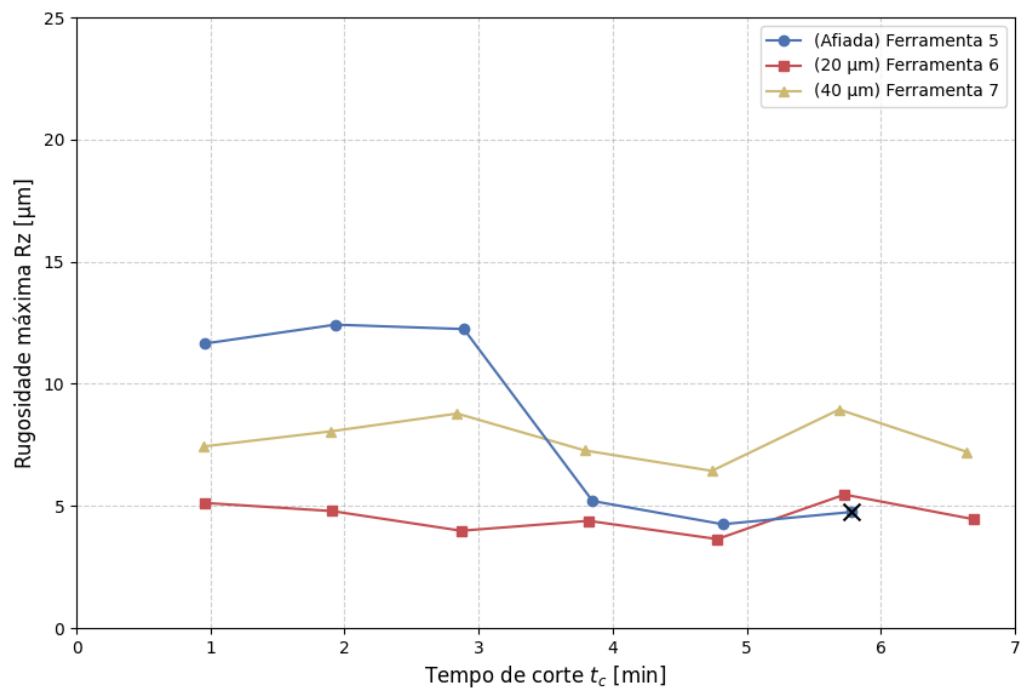
de rugosidade medido teve certa variação, principalmente ao se considerar a rugosidade máxima Rz. Apesar disso, não há um acréscimo ou decréscimo exagerado, com valores na faixa de $1,3 \mu\text{m}$ a $1,8 \mu\text{m}$ para a rugosidade média Ra e valores na faixa de $7 \mu\text{m}$ a $9 \mu\text{m}$ para a rugosidade máxima Rz. Por fim, os maiores valores medidos ($Ra \approx 2,5 \mu\text{m}$ e $Rz \approx 12,5 \mu\text{m}$) ocorreram na usinagem com a ferramenta afiada (Ferramenta 5) desde o primeiro até o terceiro passe. A partir daí, os valores têm queda brusca, se igualando aos observados para a Ferramenta 6, com preparação de $20 \mu\text{m}$, até o fim de vida. Cabe destacar que o desgaste da ferramenta afiada leva a certo arredondamento da aresta, o que estabiliza o crescimento do desgaste, conforme apresentado, e reduz as irregularidades impressas na superfície da peça.

Figura 29 – Rugosidade média Ra nos testes de torneamento do aço 4140 endurecido



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 30 – Rugosidade máxima Rz nos testes de torneamento do aço 4140 endurecido



Fonte: Elaborada pelo autor

5 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos na caracterização das microgeometrias e nos testes de torneamento com ferramentas de CBN com preparação de aresta, conclui-se:

- Comparando-se as medidas nominais (esperadas) com aquelas de fato obtidas para os insertos recebidos, os valores dos raios caracterizados se apresentaram dentro do esperado;
- Para todas as preparações, exceto a preparação de 40 μm , notou-se assimetria considerável no arredondamento;
- Para as arestas consideradas afiadas, os raios médios aproximados e os lascamentos se encontram dentro de valores aceitáveis, o que indica um processo de retificação adequado;
- O desempenho dos insertos de CBN no torneamento do aço recozido não foi afetado pelo aumento do raio de aresta dentro da faixa investigada (Afiada e raio nominal de 20 μm), tendo apresentado comportamento bastante regular nos dois casos;
- O inserto de CBN com maior raio nominal de aresta (40 μm) teve o melhor desempenho no torneamento do aço endurecido, com desgaste de flanco máximo 22% menor em relação ao inserto de 20 μm ao fim do teste;
- Devido à alta estabilidade química, o principal mecanismo de desgaste observado foi a abrasão, com predominante desgaste de flanco e aparecimento de entalhe no torneamento do aço recozido. Na usinagem do aço endurecido, notou-se a ocorrência de desgaste de cratera;
- A preparação de aresta (dentro da faixa investigada), de maneira geral, não teve efeitos significativos na qualidade superficial do aço 4340 recozido.

Para o aço endurecido, as ferramentas com menor raio de aresta levaram a menores valores de rugosidade média e máxima. A ferramenta sem preparação apresentou os maiores valores para ambos os parâmetros de rugosidade;

REFERÊNCIAS

- ASTAKHOV, V. P. **Tribology of Metal Cutting**. 1. ed. Great Britain: Elsevier, 2006.
- ASTMSTEEL. **ASTMSteel**. 2024. Acessado em 27 de fev. de 2025. Disponível em: <<https://www.astmsteel.com/product/4340-steel-aisi/>>.
- BIERMANN, D.; TERWEY, I. Cutting edge preparation to improve drilling tools for hpc processes. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 1, n. 2, p. 76–80, 2008. ISSN 1755-5817. High Performance Cutting. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1755581708000345>>.
- BOUZAKIS, K.-D. et al. The effect of substrate pretreatments and hppms-deposited adhesive interlayers' materials on the cutting performance of coated cemented carbide inserts. **CIRP Annals**, v. 59, n. 1, p. 73–76, 2010. ISSN 0007-8506. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850610000661>>.
- CALLISTER, W. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7 ed.. ed. Livros Técnicos e Científicos, 2008. ISBN 9788521615958. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=R3BwPgAACAAJ>>.
- CASARIN, S. J. **Manufatura Mecânica: Usinagem**. Londrina: Distribuidora Educacional S.A, 2018.
- DENKENA, B.; KÖHLER, J.; VENTURA, C. Customized cutting edge preparation by means of grinding. **Precision Engineering**, v. 37, n. 3, p. 590–598, 2013. ISSN 0141-6359. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141635913000093>>.
- DENKENA, B.; LUCAS, A.; BASSETT, E. Effects of the cutting edge microgeometry on tool wear and its thermo-mechanical load. **CIRP Annals**, v. 60, n. 1, p. 73–76, 2011. ISSN 0007-8506. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850611000990>>.
- DIN 6582. **Terminology of cutting; additional terms for the tool, wedge and the cutting edge**. DIN 6582 (1988-02). Berlin, Germany: German Institute for Standardization, 1988.
- DINIZ, A. E.; de Oliveira, A. J. Hard turning of interrupted surfaces using cbn tools. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 195, n. 1, p. 275–281, 2008. ISSN 0924-0136. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013607005249>>.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 8. ed. [S.l.]: Artliber, 2013. ISBN 8587296019.
- FONTANIVE, F.; ZEILMANN, R. P.; SCHENKEL, J. D. Surface quality evaluation after milling inconel 718 with cutting edge preparation. **Int. J. Adv. Manuf. Technol.**, Springer Science and Business Media LLC, v. 104, n. 1-4, p. 1087–1098, set. 2019.
- FULEMOVA, J.; JANDA, Z. Influence of the cutting edge radius and the cutting edge preparation on tool life and cutting forces at inserts with wiper geometry. **Procedia Engineering**, v. 69, p. 565–573, 2014. ISSN 1877-7058. 24th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814002732>>.

Hanna Tools. **Geometria da ferramenta de CBN**. São Paulo: 1 desenho técnico, 2024.

ISO 4287:1997. **Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Terms, definitions and surface texture parameters**. ISO 4287:1997. [S.l.]: International Organization for Standardization, 1997.

KATO, K.; ADACHI, K. Wear mechanisms. In: _____. **Modern Tribology Handbook**. [S.l.]: CRC Press, 2000. p. 273–300. ISBN 9780849384035. Publisher Copyright: © 2001 by CRC Press LLC.

KHAN, S. A. et al. Experimental investigations on wiper inserts' edge preparation, work-piece hardness and operating parameters in hard turning of AISI D2 steel. **J. Manuf. Process.**, Elsevier BV, v. 34, p. 187–196, ago. 2018.

KLOCKE, F. **Manufacturing processes 1**. 2011. ed. Berlin, Germany: Springer, 2011. (RWTHedition).

KUMAR, P. et al. Influence of different grades of cbn inserts on cutting force and surface roughness of aisi h13 die tool steel during hard turning operation. **Materials**, v. 12, n. 1, 2019. ISSN 1996-1944. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1944/12/1/177>>.

LI, L. et al. Composition, microstructure and mechanical properties of cbn-based composites sintered with aln- al- ni binder. **Ceramics International**, v. 44, n. 14, p. 16915–16922, 2018. ISSN 0272-8842. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884218315724>>.

LIN, H.; LIAO, Y.; WEI, C. Wear behavior in turning high hardness alloy steel by cbn tool. **Wear**, v. 264, n. 7, p. 679–684, 2008. ISSN 0043-1648. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164807005716>>.

LORENZO-MARTIN, C.; AJAYI, O. O. Rapid surface hardening and enhanced tribological performance of 4140 steel by friction stir processing. **Wear**, v. 332-333, p. 962–970, 2015. ISSN 0043-1648. 20th International Conference on Wear of Materials. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164815000691>>.

MACHADO, R. et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. 3. ed. [S.l.]: Blucher, 2013.

MEYSAMI, A. et al. An investigation on the microstructure and mechanical properties of direct-quenched and tempered aisi 4140 steel. **Materials Design**, v. 31, n. 3, p. 1570–1575, 2010. ISSN 0261-3069. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306909005251>>.

MITSUBISHI. **Mitsubishi Materials Corporation**. 2024. Acessado em 12 de fev. de 2025. Disponível em: <https://www.mmc-carbide.com/es/download/magazine/vol10/tec_vol10>.

MITSUBISHI. **Mitsubishi Materials Corporation**. s.d. Acessado em 12 de fev. de 2025. Disponível em: <https://www.mitsubishicarbide.net/contents/mht/pt/html/product/technical_information/information/cutting_tool.html>.

NEO, K. et al. Performance evaluation of pure cbn tools for machining of steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 140, n. 1, p. 326–331, 2003. ISSN 0924-0136. Proceedings of the 6th Asia Pacific Conference on materials Processing. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013603007465>>.

POULACHON, G. et al. Wear behavior of cbn tools while turning various hardened steels. **Wear**, v. 256, n. 3, p. 302–310, 2004. ISSN 0043-1648. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164803004149>>.

RODRIGUEZ, C. J. C. **Cutting edge preparation of precision cutting tools by applying micro-abrasive jet machining and brushing**. Tese (Tese de Doutorado) — Kassel University, Berlin, 2009. Disponível em <https://www.uni-kassel.de/upress/online/frei/978-3-89958-712-8.volltext.frei.pdf>.

SANDVIK. **Torneamento de peças duras com CBN**. 2012. Disponível em: <<https://cdn.sandvik.coromant.com/publications/076371d5-fd29-4cd6-af28-a6a8ca8ae4da.pdf?sv=2023-11-03&st=2024-06-28T22%3A18%3A37Z&se=2024-06-29T01%3A23%3A37Z&sr=b&sp=r&rscd=inline%3B+filename%3DC-2940-137.pdf&rscst=application%2Fpdf&sig=MWEldpoXC78lEftBT5MgpzURej500tS2%2FxoQtgAQncM%3D>>.

Seco Tools. **Seco Tools**. s.d. Acessado em 17 de fev. de 2025. Disponível em: <<https://www.secotools.com/article/122073>>.

SHEIKH-AHMAD, J.; DAVIM, J. P. Tool wear in machining processes for composites. In: **Machining Technology for Composite Materials**. [S.l.]: Elsevier, 2012. p. 116–153.

SONG, S. et al. Influence of cutting parameters and tool edge geometries on the machinability of alsi aisi 52100 steel in hard whirling. **Engineering Transactions**, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, v. 71, n. 3, p. 399–417, 2023.

TIKAL, F.; HOLSTEN, S. Neue anforderungen erfordern neue werkzeuge. **VDI-Z**, n. 3, p. 44–46, 2006.

TRENT, E. M. **Metal cutting: Fourth edition**. [S.l.]: Elsevier, 2015.

UHLMANN, E.; RICHAZ, S.; MIHOTOVIC, V. Substrate pre-treatment of cemented carbides using abrasive flow machining and laser beam ablation. **Prod. Eng.**, Springer Science and Business Media LLC, v. 3, n. 1, p. 81–86, mar. 2009.

VENTURA, C.; KÖHLER, J.; DENKENA, B. Cutting edge preparation of pcbn inserts by means of grinding and its application in hard turning. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 6, n. 4, p. 246–253, 2013. ISSN 1755-5817. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1755581713000564>>.

VENTURA, C.; KÖHLER, J.; DENKENA, B. Influence of cutting edge geometry on tool wear performance in interrupted hard turning. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 19, p. 129–134, 2015. ISSN 1526-6125. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612515000559>>.

WYEN, C.-F.; KNAPP, W.; WEGENER, K. A new method for the characterisation of rounded cutting edges. **Int. J. Adv. Manuf. Technol.**, Springer Science and Business Media LLC, v. 59, n. 9-12, p. 899–914, abr. 2012.

ZHAO, X.; QIN, H.; FENG, Z. Influence of tool edge form factor and cutting parameters on milling performance. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 13, n. 4, p. 16878140211009041, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/16878140211009041>>.

ÖZEL, T. Computational modelling of 3d turning: Influence of edge micro-geometry on forces, stresses, friction and tool wear in pcbn tooling. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, n. 11, p. 5167–5177, 2009. ISSN 0924-0136. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013609000922>>.