

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE ENGENHARIA CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

**IVAN MICHELETTI BABERGE**

**DESEMPENHO DE COBERTURAS DE FERRAMENTAS DE CORTE NO  
TORNEAMENTO INTERNO DE IMPLANTES DENTÁRIOS DE TITÂNIO ASTM F67**

ILHA SOLTEIRA - SP

2024

**IVAN MICHELETTI BABERGE**

**DESEMPENHO DE COBERTURAS DE FERRAMENTAS DE CORTE NO  
TORNEAMENTO INTERNO DE IMPLANTES DENTÁRIOS DE TITÂNIO ASTM F67**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

Área de conhecimento: Materiais e Processos de Fabricação

**Orientador:** Prof. Dr. Cleiton Lazaro Fazolo de Assis

**Coorientador:** Prof. Dr. Wyser José Yamakami

Ilha Solteira - SP

2024

FICHA CATALOGRÁFICA  
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

B113d Baberge, Ivan Micheletti.  
Desempenho de coberturas de ferramentas de corte no torneamento interno de implantes dentários de titânio ASTM F67 / Ivan Micheletti Baberge. - Ilha Solteira: [s.n.], 2024  
90 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Materiais e Processos de Fabricação, 2024

Orientador: Cleiton Lazaro Fazolo de Assis.  
Co-orientador: Wyser José Yamakami  
Inclui bibliografia

1. Implantes odontológicos. 2. Torneamento interno. 3. Titânio grau 4. 4. Revestimentos. 5. Desgaste.

  
**Amanda Sertori dos Santos**

Bibliotecária - CRB/8-9061  
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao  
Usuário e Documentação  
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**

**Câmpus de Ilha Solteira**

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:** DESEMPENHO DE COBERTURAS DE FERRAMENTAS DE CORTE NO TORNEAMENTO INTERNO DE IMPLANTES DENTÁRIOS DE TITÂNIO ASTM F67

**AUTOR:** IVAN MICHELETTI BABERGE

**ORIENTADOR:** CLEITON LAZARO FAZOLO DE ASSIS

**COORIENTADOR:** WYSER JOSE YAMAKAMI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em null, área: Materiais e Processos de Fabricação pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. CLEITON LAZARO FAZOLO DE ASSIS (Participação Virtual)  
Câmpus Votuporanga / Instituto Federal de São Paulo - IFSP

Prof. Dr. ALESSANDRO ROGER RODRIGUES (Participação Virtual)  
Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade de São Paulo - USP

Dr. ALEX CAMILLI BOTTENE (Participação Virtual)  
Instituto de Ensino e Pesquisa - INSPER

Ilha Solteira, 08 de agosto de 2024



Documento assinado digitalmente  
CLEITON LAZARO FAZOLO DE ASSIS  
Data: 08/08/2024 21:24:13-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

À minha esposa, meus pais, meus  
irmãos e amigos.

## AGRADECIMENTOS

Eu gostaria de expressar minha profunda gratidão a todos que, de alguma forma, me incentivaram e apoiaram nessa conquista.

Agradeço ao senhor Antônio Cavaglieri, sócio-proprietário da empresa Implalife Biotecnologia Ltda pelo incentivo e patrocínio da pesquisa.

Ao Prof. Dr. Cleiton Lazaro de Assis, pela orientação, apoio, dedicação, parceria e amizade durante esses anos de trabalho conjunto. Sou grato pela paciência e dedicação demonstradas ao longo desse mestrado, especialmente diante das dificuldades enfrentadas.

Ao Prof. Dr. Wyser José Yamakami, pela orientação nas pesquisas bibliográficas e revisão do trabalho. Agradeço também pela paciência e dedicação ao longo desse período.

Ao Prof. Dr. Juno Gallego, pela orientação nas etapas iniciais do meu mestrado, pelo auxílio e atenção.

Ao Núcleo de Pesquisa e Ensino em Microfabricação (Nupem) do Instituto Federal de São Paulo, Campus Votuporanga, pelo suporte técnico e científico a pesquisa.

Ao *Msc.* Guilherme Rosatti Mecelis e ao Laboratório de Processos Avançados e Sustentabilidade (Lapras) da USP, Campus São Carlos, pelo uso do microscópio laser 3D.

Aos membros da banca, Prof. Dr. Alessandro Roger Rodrigues e Prof. Dr. Alex Camilli Bottene pela disponibilidade em participar da minha defesa.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Unesp, Campus Ilha Solteira, pela concessão de recursos que possibilitaram minha participação em congressos.

E agradeço minha equipe de trabalho na Implalife Biotecnologia Ltda, pela dedicação e apoio contínuos.

“Através das dificuldades, com disciplina e estudo contínuo, encontramos o caminho para a excelência ” (Zig Ziglar).

## RESUMO

O titânio e suas ligas são importantes em diversas aplicações das indústrias aeronáutica, aeroespacial, automobilística e biomédica devido às suas propriedades, tais como, boa relação resistência-peso, alta resistência a corrosão, baixo coeficiente de expansão térmica e biocompatibilidade. Embora essas características favoreçam a aplicação do titânio na fabricação de componentes biomédicos, a sua usinagem apresenta alguns problemas causados pela baixa condutividade térmica, baixo módulo de elasticidade, alta reatividade química em temperaturas elevadas e instabilidade termoplástica durante o processo de corte. Tendo em vista estas limitações, este trabalho buscou avaliar o desempenho de ferramentas de carboneto de tungstênio, com estrutura de micro grão, sem revestimento e com revestimentos monocamada de (AlCrN) e multicamadas (AlCrN sobre TiCN). Os desgastes de três ferramentas de corte sem cobertura e três de cada cobertura foram analisados nos intervalos de 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 e 1000 m de comprimento de corte. A usinagem das peças foi realizada com velocidade de corte de 25 m/min, avanço de 0,015 mm/rotação e profundidade de usinagem de 0,100 mm. Os desgastes das ferramentas de corte e a rugosidade das peças usinadas, gerados no final de cada intervalo de comprimento de corte, foram avaliados por meio de microscopia óptica e microscopia laser 3D. Os resultados revelaram que o revestimento AlCrN proporciona uma redução significativa de 40% no desgaste de flanco das ferramentas de corte em comparação com as ferramentas sem revestimento. As ferramentas de corte revestidas com TiCN + AlCrN não apresentaram desgaste visível nos comprimentos de corte avaliados. A combinação das coberturas AlCrN sobre TiCN apresenta maior resistência ao desgaste, em relação as ferramentas sem revestimento e o revestimento mono camada AlCrN.

**Palavras-chave:** implantes odontológicos; torneamento interno; titânio grau 4; revestimentos; desgaste.

## ABSTRACT

Titanium and its alloys are important in various applications within the aerospace, automotive, and biomedical industries due to their properties, such as a good strength-to-weight ratio, high corrosion resistance, low thermal expansion coefficient, and biocompatibility. Although these characteristics favor the application of titanium in the manufacturing of biomedical components, its machining presents some issues caused by low thermal conductivity, low modulus of elasticity, high chemical reactivity at elevated temperatures, and thermoplastic instability during the cutting process. Considering these limitations, this work aimed to evaluate the performance of tungsten carbide tools with micro-grain structure, uncoated and with monolayer (AlCrN) and multilayer (AlCrN over TiCN) coatings. The wear of three uncoated cutting tools and three of each coating type were analyzed at intervals of 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, and 1000 m of cutting length. The machining of the parts was performed with a cutting speed of 25 m/min, feed rate of 0.015 mm/revolution, and cutting depth of 0.100 mm. The wear of the cutting tools and the roughness of the machined parts, generated at the end of each cutting length interval, were evaluated using optical microscopy and 3D laser microscopy. The results revealed that the AlCrN coating provides a significant reduction of 45% in flank wear of the cutting tools compared to uncoated tools. The cutting tools coated with TiCN + AlCrN showed no visible wear at the evaluated cutting lengths. The combination of AlCrN coatings on TiCN presents greater wear resistance compared to uncoated tools and the single-layer AlCrN coating

**Keywords:** dental implants; internal turning; grade 4 titanium; coatings; wear.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sistema de fixação do corpo de prova e da ferramenta de corte .....	39
Figura 2: Microscópio laser 3D e sistema de aquisição .....	39
Figura 3: Medidor óptico e sistema de aquisição de imagens .....	40
Figura 4: Desenho técnico do corpo de prova .....	41
Figura 5: Ferramenta de Corte Torneiar Interna .....	42
Figura 6: Medição do raio de ponta utilizando o medidor óptico .....	46
Figura 7: Medição da área e do desgaste de flanco (VB) .....	46
Figura 8: Desgaste apresentado na ferramenta de corte FS1 sem cobertura .....	50
Figura 9: Desgaste apresentado na Ferramenta FS2 sem cobertura .....	51
Figura 10: Desgaste apresentado na ferramenta de corte FS3 sem cobertura .....	54
Figura 11: Imagens de microscopia laser da superfície de folga primária (SFP), superfície de folga secundária (SFS) e superfície de saída (SS) das ferramentas de corte sem revestimento após usinar 1000 m de comprimento de corte. ....	56
Figura 12: Desgaste de flanco das ferramentas de corte sem revestimento .....	57
Figura 13: Raio de ponta das ferramentas sem revestimento .....	57
Figura 14: Área do desgaste de flanco das ferramentas sem revestimento .....	58
Figura 15: Imagens de microscopia laser 2D das superfícies usinadas com ferramentas de corte sem revestimento. ....	60
Figura 16: Imagens de microscopia laser 2D das superfícies usinadas com ferramentas de corte sem revestimento nos comprimentos de corte de 200 a 400 m .....	61
Figura 17: Rugosidade Rz das superfícies usinadas com ferramentas de corte sem revestimento .....	62
Figura 18: Rugosidade Rq das superfícies usinadas com ferramentas de corte sem revestimento .....	63
Figura 19: Desgaste apresentado na ferramenta de corte FC1 revestida com AlCrN (Nitreto de Cromo e Alumínio) .....	63
Figura 20: Desgaste apresentado na ferramenta de corte FC2 revestida com AlCrN (Nitreto de Cromo e Alumínio) .....	65
Figura 21: Imagens de microscopia laser da superfície de folga primária (SFP), superfície de folga secundária (SFS) e superfície de saída (SS) das ferramentas de corte revestidas com AlCrN após usinar 1000 m de comprimento de corte. ....	67

Figura 22: Desgaste de flanco das ferramentas de corte revestida com AlCrN .....	68
Figura 23: Raio de ponta da ferramenta de corte com revestimento AlCrN .....	69
Figura 24: Área do desgaste de flanco das ferramentas revestida com AlCrN .....	69
Figura 25: Imagens de microscopia laser 2D das superfícies usinadas com ferramentas de corte revestidas com AlCrN.....	71
Figura 26: Rugosidade Rz das superfícies usinadas com ferramentas de corte revestidas com AlCrN.....	72
Figura 27: Rugosidade Rq das superfícies usinadas com ferramentas de corte revestidas com AlCrN.....	73
Figura 28: Aresta principal de corte, ponta de corte e superfície de saída da ferramenta de corte com revestimento duplo (TiCN+AlCrN) .....	74
Figura 29: Imagens de microscopia laser da superfície de folga primária (SFP), superfície de folga secundária (SFS) e superfície de saída (SS) das ferramentas de corte revestidas com TiCN+ AlCrN após usinar 1000 m de comprimento de corte...	75
Figura 30: Imagens de microscopia laser 2D das superfícies usinadas com ferramentas de corte revestidas com TiCN+AlCrN. ....	76
Figura 31: Rugosidade Rz das superfícies usinadas com ferramentas de corte revestidas com TiCN+AlCrN. ....	77
Figura 32: Rugosidade Rq das superfícies usinadas com ferramentas de corte revestidas com TiCN+AlCrN. ....	78
Figura 33: Avaliação do desgaste da ferramenta com revestimento duplo na velocidade de corte de 25m/min.....	80
Figura 34: Avaliação do desgaste da ferramenta com revestimento duplo na velocidade de corte de 25m/min.....	81
Figura 35: Avaliação do desgaste da ferramenta com revestimento duplo na velocidade de corte de 30m/min.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 36: Análise do desgaste da ferramenta com revestimento duplo com a velocidade de corte de 35m/min.....	83

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Usinagem Sustentável de ligas de titânio .....	22
Tabela 2: Causas e ações para minimização de avarias e desgaste da ferramenta.	31
Tabela 3: Vantagens do processo CVD e PVD .....	37
Tabela 4: Composição química do material dos corpos de prova .....	40
Tabela 5: Etapas de usinagem dos corpos de prova. ....	44
Tabela 6: Parâmetros de usinagem adotados nos experimentos.....	45

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	15
2	OBJETIVO .....	17
2.1	Objetivos Específicos .....	17
3	JUSTIFICATIVA .....	18
4	REVISÃO DA LITERATURA .....	20
4.1	Usinabilidade do titânio e suas ligas .....	20
4.2	Rugosidade .....	24
4.3	Ferramentas e revestimentos para Usinagem do titânio .....	27
4.4	Desgaste e avarias .....	30
4.5	Processos de revestimentos .....	35
5	MATÉRIAS E MÉTODOS .....	38
5.1	Aparato experimental .....	38
5.2	Corpos de prova .....	40
5.3	Ferramentas de corte .....	41
5.4	Planejamento Experimental .....	44
5.4.1	<i>Matriz experimental .....</i>	<i>44</i>
5.4.2	<i>Avaliação do desgaste das ferramentas de corte.....</i>	<i>45</i>
5.4.3	<i>Análise do efeito da velocidade de corte .....</i>	<i>47</i>
5.4.4	<i>Avaliação da rugosidade das superfícies usinadas.....</i>	<i>47</i>
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	49
6.1	Avaliação do desgaste das ferramentas de corte sem revestimento ....	49
6.2	Avaliação da superfície usinada pelas ferramentas de corte sem revestimento. ....	59
6.3	Desgaste das ferramentas de corte revestidas com cobertura de mono camada de AlCrN.....	63
6.4	Análise da superfície usinada pelas ferramentas de corte revestidas com AlCrN.....	70
6.5	Desgaste das ferramentas de corte revestidas com cobertura de multicamada de TiCN+AlCrN.....	73

6.6	Avaliando a superfície usinada das ferramentas de corte revestidas com TiCN+AlCrN.....	76
6.7	Variação da velocidade de corte para as ferramentas de corte revestidas com cobertura de multicamadas de TiCN+AlCrN .....	78
7	CONCLUSÕES .....	84
7.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	85
	REFERÊNCIAS.....	86

## 1 INTRODUÇÃO

O titânio é o nono elemento na tabela periódica e o quarto metal com maior abundância na crosta terrestre (Gupta, 2017), perdendo para o alumínio, ferro e magnésio (Mruthunjaya, 2021).

Além de uma importante propriedade (baixa densidade), a adição de elementos de ligas ao Titânio possibilita a obtenção de características mecânicas (alta relação resistência mecânica-peso) e químicas (boa resistência à corrosão), além da biocompatibilidade, desejadas em várias peças e componentes empregados ou fabricados nos setores aeronáutico, automotivo, aeroespacial, biomédico, equipamentos esportivos e petrolífero (Çelik, 2017; Li, 2006; Li, 2016; Chowdhury, 2021a).

As ligas de titânio grau 2 e 4 são comercialmente puros, e representam cerca de 50% das ligas mais utilizadas pelos diversos setores produtivos. Devido suas características de resistências a corrosão, o titânio grau 2 é utilizado em trocadores de calor, enquanto o Titânio grau 4 é aplicado na área biomédica devido às propriedades mecânicas, além da resistência à corrosão (Gupta, 2017).

No entanto, o titânio e suas ligas são considerados materiais difíceis de usar devido sua baixa condutividade térmica, reatividade química a altas temperaturas e instabilidade termoplástica. A aplicação de revestimentos que aumentem sua resistência ao desgaste e a vida útil da ferramenta, permitem maiores velocidades de corte e, conseqüentemente, aumentam a produtividade, sem, contudo, prejudicar a qualidade superficial e dimensional das peças usinadas (Çelik, 2017; Li, 2006; Li, 2016; Chowdhury, 2021a).

Contudo, revestimentos a base de TiN, TiAlN, cBN+TiAlN, e TiN/TiCN/TiN apresentaram melhor desempenho na usinagem da liga de titânio grau 5 (TiAl6V4). Os tipos de desgaste mais comuns no processo de usinagem do titânio é o desgaste de flanco e de cratera (Li, 2016; Chowdhury, 2021a; Rahman, 2016; Chowdhury, 2021b).

Os revestimentos possuem características específicas: - O TiN é geralmente aplicado para minimizar o atrito na interface cavaco-ferramenta; o TiC e o TiCN tendem a reduzir o desgaste de cratera e possuem maior dureza; o Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> é refratário

e reduz o desgaste de cratera, o TiAlN possui alta dureza e resistência a oxidação (Vereschaka, 2018).

O Diboreto de Titânio ( $TiB_2$ ), possui boa dureza e resistência à abrasão que beneficiam sua aplicação em ferramentas para materiais de baixa usinabilidade, como o titânio e suas ligas. Durante a usinagem, o  $TiB_2$  reage com os elementos presentes no ambiente de corte, formando um filme de Trióxido de Boro ( $B_2O_3$ ), o qual atua como um lubrificante sólido na interface ferramenta de corte-cavaco, reduzindo o atrito e, conseqüentemente, melhorando a eficiência deste processo (Chowdhury, 2021a). Observa-se que os diversos tipos de revestimentos apresentam características que afetam de forma diferente nos fenômenos que ocorrem no processo de usinagem durante a interação ferramenta-cavaco e ferramenta-peça.

Alguns parâmetros podem ser mensurados ou avaliados a fim de determinar o desempenho destes revestimentos nas ferramentas, e compará-lo com a ferramenta sem revestimento, tais como: - A Vida útil da ferramenta; Taxa de remoção de cavaco; Forças de usinagem; Acabamento superficial; Formato do cavaco (Batista Ponce, 2019).

No caso das ferramentas de metal duro, as pesquisas aplicando coberturas a base de óxidos, nitretos e carbonetos, tais como AlTiN,  $Al_2O_3$ , HfN, TiC, TiCN, TiN/TiC, TiN/TiC/TiN e  $Al_2O_3/TiC$ , evidenciaram resultados pouco promissores e, em alguns casos, o metal duro sem revestimento apresentou uma melhor performance em relação à ferramenta revestida (Chowdhury, 2021a).

As pesquisas sobre a aplicação de diferentes coberturas nas ferramentas de corte visam minimizar o desgaste, aumentar a vida útil, reduzir o número de trocas de ferramenta e a necessidade de preparação da máquina ferramenta, permitir maiores velocidades de corte e, conseqüentemente, aumentar a produção, a produtividade, e a eficiência do processo de usinagem (Vereschaka, 2018).

## 2 OBJETIVO

O objetivo desta pesquisa é determinar os desgastes, bem como os seus mecanismos, apresentado nas ferramentas de corte de carboneto de tungstênio (metal duro K40UF-S), com estrutura de micro grão, sem revestimento, com revestimento mono camadas (AlCrN) e multicamadas (AlCrN sobre TiCN) durante o torneamento interno de implantes odontológicos de Titânio Grau 4 (ASTM F67).

### 2.1 Objetivos Específicos

- Avaliar qualitativamente e quantitativamente área e o desgaste do flanco (VBmax) das ferramentas de corte, para diferentes intervalos de comprimentos de corte;
- Determinar os mecanismos de desgaste das ferramentas de corte ocorridos durante a usinagem do Titânio Grau 4;
- Avaliar a rugosidade (Rq e Rz) da superfície usinada, para os diferentes comprimentos de corte, e correlaciona-la com o desgaste das ferramentas.
- Indicar qual condição de revestimento (sem revestimento, com revestimento mono camadas e multicamadas) permitiu maior resistência ao desgaste durante a usinagem do Titânio Grau 4.

### 3 JUSTIFICATIVA

A pesquisa proposta nesta dissertação de mestrado foi realizada, em parte, na Implalife Biotecnologia, que emprega processos de usinagem para fabricação de peças a base de ligas de Titânio utilizadas em implantes odontológicos.

Conforme mencionado, a baixa usinabilidade do Titânio e suas Ligas representa um desafio para diversas indústrias, quanto ao incremento da produtividade e competitividade, durante os processos de usinagem destes materiais para obtenção de peças e componentes.

A utilização de revestimento em ferramentas de corte, que possibilitem maiores velocidade de corte e resistência à abrasão, é uma das alternativas para minimizar os problemas causados pela baixa usinabilidade do Titânio e suas Ligas, permitindo um aumento da produção e produtividade.

No entanto, cada tipo de revestimento tem um campo de atuação específico, ou seja, se restringe à determinados materiais, sob condições e parâmetros de usinagem, predeterminados pelos fabricantes de ferramentas, nem sempre factíveis de forma plena devido às condições das máquinas-ferramenta, dimensões e geometrias das peças e ferramentas de corte, acesso do fluido de corte na região de corte, dentre outras variáveis que afetam os processos de usinagem.

Neste contexto, a Empresa Implalife Biotecnologia tem fabricado ferramentas com diferentes tipos e combinações de revestimentos a fim de aumentar sua produtividade, por meio do aumento da resistência ao desgaste, a determinada velocidade de corte, durante a usinagem de ligas de titânio, para produção de peças utilizadas em implantes odontológicos.

Para isso, testes e ensaios de desgaste se fazem necessários para avaliar qual tipo e combinação de revestimento permite aumentar a resistência ao desgaste, sem comprometer as tolerâncias dimensional e geométrica, e o acabamento superficial especificado no projeto das referidas peças.

Espera-se que esta pesquisa contribua na formulação e obtenção de um revestimento que permita uma maior resistência ao desgaste, bem como aumentar a velocidade de corte, de modo a contribuir com o aumento da produtividade obtida pela ferramenta revestida, bem como contribuir para um maior conhecimento do

comportamento dos revestimentos testados e analisados durante a usinagem das peças de Titânio produzidas pela Implalife Biotecnologia Ltda.

## 4 REVISÃO DA LITERATURA

O titânio e suas ligas são materiais importantes para aplicação em peças e componentes fabricados pelos vários seguimentos da indústria, em particular na área biomédica. (Selvakumar, 2021), com o Ti6Al4V representando cerca de 50% da produção total destas ligas (Younas, 2021)

Considerando que o Titânio e suas ligas possuem baixa usinabilidade, faz-se necessário analisar o comportamento desta propriedade tecnológica durante a usinagem dos mesmos.

### 4.1 Usinabilidade do titânio e suas ligas

Apesar de suas características desejadas pelos setores biomédico, aeroespacial, automotivo, tais como boa resistência mecânica, resistência à corrosão a alta temperaturas, pela relação resistência/peso (Çelik, 2017; Li, 2006; Li, 2016; Chowdhury, 2021a; Chowdhury, 2021b), o Titânio possui baixa usinabilidade devido às suas propriedades físicas (baixa condutividade térmica), químicas (alta reatividade) e mecânicas (baixo modulo de elasticidade) (Chowdhury, 2021a; Chowdhury, 2021b; Gupta, 2017; Li, 2006).

A sua reatividade química em elevadas temperaturas pode gerar o fenômeno de “aderência localizada” durante a interação cavaco-ferramenta-peça, proporcionando um aumento do desgaste, ocorrência de lascamento e falhas prematuras da ferramenta (Gupta, 2017).

A baixa condutividade térmica faz com que o calor gerado no corte não seja dissipado pelos cavaco e peça, fazendo com que significativa parte dele seja transferido para a ferramenta durante a interação cavaco-ferramenta-peça, o que contribui para um desgaste excessivo da mesma (Lemes; Diniz, 2021; Qiuqin Li, 2022).

A melhoria do processo de usinagem por meio do aumento da resistência ao desgaste da ferramenta de corte, da minimização do consumo de energia durante o corte, da obtenção de uma melhor qualidade superficial da peça usinada e de uma maior taxa de remoção de material possibilita, quando obtidos parcialmente ou

plenamente, o aumento da produção e produtividade, minimizando os custos totais deste processo (Gupta, 2017).

Pesquisadores têm se concentrado na usinabilidade do titânio, abordando mecanismos de desgaste, desempenho de ferramentas de corte revestidas, análises tribológicas e otimização de parâmetros. No entanto, a usinabilidade do titânio ainda é um ponto crítico, visto que otimizar a vida útil das ferramentas de corte e minimizar o consumo de energia durante a usinagem são metas essenciais (Younas, 2021).

Nesse sentido, a determinação de uma velocidade de corte adequada para usinagem do Titânio pode minimizar o calor gerado na região de corte, reduzir o desgaste da ferramenta e, conseqüentemente, possibilitar um aumento da eficácia do processo (Lemes, 2021).

Foi constatado que, em geral, a velocidade de corte para ferramentas de aço rápido não pode ultrapassar os 30m/min, podendo chegar a 60m/min para ferramentas de carboneto de tungstênio (Selvakumar, 2021).

Com relação à geração de calor, o uso de nanofluidos com alta condutividade térmica e excelente dissipação de calor, em relação aos fluidos convencionais, possibilita menores desgaste da ferramenta e consumo de energia, melhor acabamento e, conseqüentemente, uma maior eficácia da usinagem do Titânio e suas ligas (Younas, 2021).

O revestimento das ferramentas também pode aumentar a resistência ao desgaste gerado pelas altas temperaturas na interface cavaco-ferramenta-peça, bem como pela maior reatividade química induzida por estas elevadas temperaturas durante a usinagem do Titânio (Qiuqin Li, 2022). Nessas condições, observou-se que a interação ferramenta-peça é predominantemente de natureza química, ao contrário das ligas ferrosas, que é de natureza mecânica (Younas, 2021).

O entendimento dos tipos e mecanismos de desgaste e avarias nas ferramentas, e suas formas de atuação nas diversas classes de materiais usinados, é importante na determinação dos parâmetros de usinagem, adequados às diversas condições de usinagem, que possibilitem a minimização da energia específica de corte, por meio de um menor desgaste de flanco, viabilizando assim uma maior vida útil e/ou produtividade da mesma (Younas, 2021).

A Tabela 1 contém informações técnicas sobre os estudos realizados na usinagem do Titânio, abordando diferentes estratégias e técnicas para melhorar sua usinagem.

Tabela 1: Usinagem Sustentável de ligas de titânio

(Continua)

Estratégia	Metodologia	Descrição
Seleção de condições ótimas de usinagem	Otimizando a velocidade de corte, taxa de avanço e profundidade de corte	Condições ótimas de corte, ou seja, valores ótimos de velocidade de corte, taxa de avanço e profundidade de corte, para uma condição de usinagem específica, ajudam a melhorar a usinabilidade em termos de baixo desgaste da ferramenta, alta taxa de remoção de material e melhor qualidade da peça
Seleção de material e geometria de ferramentas adequadas	Uso de carbonetos, PCD, insertos de ferramentas CBN e revestimentos de ferramentas.	Uso de ferramentas de corte de materiais duros como PDC e CBN e revestimentos resistente ao desgaste, por exemplo, TiN, AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> e TiCN, podem efetivamente minimizar significativamente o desgaste da ferramenta.
	Preparações de ponta, ângulos de ataque apropriados	As geometrias da ferramenta podem ter influência significativa na vida útil da ferramenta, arestas da ferramenta corretamente preparadas, ângulo de inclinação e formato da ferramenta apropriados pode reduzir as forças de corte e aumentar a vida útil da ferramenta.
Adotando processo de usinagem híbridos	Usinagem assistida por laser (LAM)	LAM utiliza um feixe de laser como fonte externa de calor para amolecer a peça de trabalho antes de ser usinada pela ferramenta, a fim de aumentar a facilidade de ser usinada. O LAM resulta em força de corte reduzida, maior vida útil das ferramenta e maior integridade da superfície de trabalho.
	Usinagem assistida por vibração ultrassônica (UVAM)	UVAM utilizou vibrações ultrassônicas de alta frequência para fornecer assistência à usinagem convencional para facilitar o corte. Pode melhorar significativamente a usinabilidade de materiais difíceis de cortar

Tabela 1 - Usinagem Sustentável de ligas de titânio

(Concluída)

Estratégia	Metodologia	Descrição
Usando métodos avançados de lubrificação e resfriamento	Quantidade mínima de lubrificação (MQL)	Essa técnica é baseada em direcionar uma pequena quantidade (10-150ml/h) de lubrificante ecológico sob alta pressão na zona de usinagem para reduzir a geração de calor por lubrificação efetiva da ferramenta-interface do chip. As vantagens do MQL são menor consumo de energia, maior vida útil da ferramenta, emissão e desperdício reduzidos para o meio ambiente e melhor valor de reciclagem, segurança e flexibilidade dos cavacos.
	Resfriamento criogênico	O resfriamento criogênico é baseado no direcionamento de um fluido de corte, geralmente nitrogênio líquido, sob pressão e a baixa temperatura na zona de corte sendo uma maneira eficiente de manter a temperatura de corte bem abaixo da temperatura de amolecimento do material da ferramenta. Essa técnica aumenta a vida útil da ferramenta, reduz a poluição ambiental e melhora a produtividade.
	Resfriamento e lubrificação combinada	Abrange resfriamento simultâneo (por CO2 ou N2 comprimido de baixa temperatura) e lubrificação (através de névoa de óleo em quantidade mínima) para garantir redução significativa na temperatura da zona de usinagem e melhoria na vida útil da ferramenta.

Fonte: Adaptado de Gupta (2017).

Observa-se nas propostas de melhoria na usinagem do Titânio, sintetizados na Tabela 1, que a escolha adequada dos parâmetros de usinagem (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) e da geometria e material da ferramenta, a utilização de lubrificante e refrigerante mais eficazes, a minimização das vibrações, o

monitoramento em tempo real e a aplicação de revestimentos são de grande importância para melhorar a usinabilidade deste material (Gupta, 2017). No entanto, se faz necessário a organização, coordenação e controle destes diferentes elementos, que se interagem durante a usinagem do Titânio, de forma a minimizar as adversidades neste processo e, conseqüentemente, viabilizar menores custos de produção (Gupta, 2017).

## 4.2 Rugosidade

A rugosidade da superfície é influenciada por uma série de fatores críticos, incluindo o avanço da ferramenta, raio de ponta, o ângulo de posição da ferramenta, a velocidade de corte, o desgaste da ferramenta, a uniformidade do material da peça, vibrações e os danos provocados pelo contato do cavaco. Esses elementos desempenham papéis significativos na formação de irregularidades finas ou defeitos microgeométricos na superfície usinada (Telles, 2018)

O aumento da rugosidade média Ra, comumente adotado pela indústria para avaliar a qualidade superficial, tende a contribuir para um maior coeficiente de atrito, maior desgaste das superfícies e menor resistência à corrosão (Mello, 2021).

O avanço (mm/rotação) afeta significativamente a rugosidade, sendo esta a influência avaliada em 98,9% e 96,55% sobre Ra (rugosidade média) e Rz (rugosidade máxima), respectivamente, tornando-o muito importante para melhorar a qualidade superficial das ligas de titânio usinadas (Mello, 2021).

Na usinagem de titânio, é fundamental reconhecer que o mecanismo predominante de desgaste é a difusão, sendo exacerbado pelas elevadas temperaturas geradas durante o processo de corte. Para minimizar esse desgaste, uma sequência de fatores influencia diretamente a rugosidade, classificados em ordem de importância, do mais relevante ao menos relevante: ângulo de saída, avanço e profundidade de corte (Mello, 2021).

A demanda por acabamento controlado em peças tem crescido devido às conseqüências adversas que falhas nesse aspecto podem acarretar. Ramesh (2012) destacou em sua pesquisa que componentes de ligas de titânio Grau 5 (Ti-6Al-4V) para aplicações aeroespaciais sofrem falhas graves e, por vezes, catastróficas devido ao acabamento superficial inadequado, resultando em custos substanciais. Através

da análise de superfície RSM e confirmação pela análise de variância (ANOVA), foi evidenciado que o aumento da velocidade de corte e do avanço contribuem para o aumento da rugosidade. Por outro lado, a redução da velocidade de corte e o aumento do avanço aumentam o desgaste da ferramenta, prejudicando a qualidade superficial (Ramesh, 2012; Telles, 2018).

Os principais parâmetros que influenciam a rugosidade superficial ( $R_a$ ) durante a usinagem de titânio são o avanço, que contribui com 44,29% e 67,50% para as ferramentas sem revestimentos e com revestimentos de TiAlN/TiN, respectivamente, seguido pela velocidade de corte e a profundidade de corte. O aumento do avanço tem um impacto significativo na rugosidade devido ao maior comprimento de contato entre a ferramenta e a peça, o que resulta em um aumento do atrito na interface (Ramana; Aditya, 2017).

As ferramentas sem revestimento produzem uma rugosidade menor em comparação com as ferramentas revestidas com TiAlN/TiN. Isso ocorre porque as ferramentas revestidas possuem maior resistência ao desgaste por difusão, maior resistência à oxidação, elevada dureza a quente, além de propriedades lubrificantes que reduzem o atrito nas interfaces ferramentas-cavaco e ferramenta-peça (Ramana; Aditya, 2017).

Segundo Tayebi (2004), superfícies com curtose alta e assimetria positiva apresentam menor coeficiente de atrito em comparação com distribuição gaussiana. Além disso, a elevada curtose diminui o coeficiente de atrito estático com menores forças externas. Valores elevados de curtose resultam em aspereza mais acentuada, reduzindo assim a força de atrito.

O alto desgaste da ferramenta de corte está correlacionado a um alto valor de rugosidade superficial média ( $R_a$ ). O parâmetro mais eficaz para controlar a rugosidade é a taxa de avanço, representando 94,57% da variabilidade. Para obter uma superfície desejável, os parâmetros de corte recomendados incluem alta velocidade de corte, profundidade de corte moderada e baixa taxa de avanço. Estes parâmetros estão linearmente conectados: aumento do desgaste da ferramenta resulta em aumento da rugosidade ( $R_a$ ) e consumo de energia (Akkus; Yaka, 2022).

Aslantas (2020) observou que se o avanço for menor que o raio de ponta da ferramenta, a rugosidade aumentará. Além disso, o tamanho do grão da peça também afeta a rugosidade, onde profundidades de corte próximos ao tamanho do grão deterioram a qualidade da superfície.

A análise da rugosidade superficial, especialmente o parâmetro Ra, é crucial para avaliar a qualidade da superfície usinada. Menores valores de Ra indicam menos defeitos e adesão de partículas estranhas, resultando em melhorias na resistência a ataques superficiais, como corrosão e fadiga (Agrawal *et al.*, 2021).

A redução da rugosidade pode ser atribuída ao desgaste da ferramenta de corte, especialmente pelo aumento do raio de ponta da ferramenta devido ao desgaste do flanco, que transforma a linha da aresta em uma superfície arredondada, semelhante ao alisador (Lindvall *et al.*, 2020).

Para a obtenção de uma rugosidade Ra reduzida com ferramentas sem revestimentos, as condições ideais envolvem uma velocidade de corte baixa, um avanço baixo e uma profundidade de corte em nível médio. Já para as ferramentas revestidas, os parâmetros ideais são: alta velocidade de corte, baixo avanço e alta profundidade de corte (Ramana; Aditya, 2017; Zha *et al.*, 2024).

A obtenção de uma superfície de peça usinada de qualidade superior é de suma importância, especialmente em aplicações biomédicas, uma vez que contribui para melhorar significativamente a resistência à corrosão. Manter uma qualidade de superfície ótima é essencial para garantir a durabilidade e a integridade de componentes utilizados em contextos biomédicos críticos (Mello, 2021).

A rugosidade dos implantes dentários é de extrema importância, uma vez que superfícies com maior rugosidade favorecem a osseointegração. Esse tipo de superfície promove uma melhor adesão e fixação de células fibroblásticas e osteoblásticas, facilitando o processo de incorporação do implante ao tecido ósseo (Telles, 2018).

Por outro lado, para componentes cardíacos, é fundamental que a rugosidade superficial seja a menor possível. Superfícies excessivamente rugosas podem induzir turbulências no fluxo sanguíneo, o que pode comprometer a eficiência hemodinâmica e aumentar o risco de formação de trombos. Portanto, nesses casos, superfícies lisas são preferíveis para evitar complicações cardiovasculares (Telles, 2018).

De acordo com Telles (2018), o tipo de refrigeração utilizado no processo de usinagem também exerce influência significativa sobre a rugosidade da peça. O autor analisou três métodos de usinagem: a seco, com MQL (Mínima Quantidade de Lubrificação) e com RQL (Quantidade Reduzida de Lubrificação). Para alcançar um acabamento superficial superior, o processo de refrigeração com RQL é recomendado quando se utiliza uma velocidade de corte baixa.

Entretanto, ao optar por uma velocidade de corte mais elevada, o processo de usinagem a seco ou com MQL torna-se mais adequado. Isso ocorre devido às diferentes interações entre a ferramenta, a peça e os mecanismo de dissipação de calor, que variam conforme a técnica de refrigeração aplicada.

### 4.3 Ferramentas e revestimentos para Usinagem do titânio

Elevadas dureza a quente e resistência ao cisalhamento são requeridas para o material da ferramenta na usinagem do Titânio (Gupta, 2017; Telles, 2018), tendo em vista a sua reatividade química em altas temperaturas (Mello, 2021; Telles, 2018).

Segundo Mello (2021) a usinagem das ligas Ti-6Al-4V e Ti-6Al-7Nb com ferramentas sem revestimentos proporcionaram superfícies usinadas com menor rugosidade e força de corte em relação àquelas com revestimento por processo CVD.

Outras pesquisas demonstraram que o metal duro, sem revestimento, é preferível em relação ao PCBN (Nitreto de Boro Cúbico Policristalino) na usinagem do Ti-6Al-4V em alta velocidade de corte. Isto pode ser atribuído à boa resistência ao desgaste a altas temperaturas de usinagem, nas quais o titânio tende a ser mais quimicamente reativo, à melhor qualidade da superfície usinada e maior vida útil da ferramenta, tornando o metal duro mais vantajoso economicamente em relação ao PCBN (Gupta, 2017).

Apesar dos aspectos positivos do metal duro sem revestimento, pesquisas com aplicação de coberturas, tais como Nitreto de Titânio, Nitreto de Titânio e Alumínio, Nitreto de Alumínio e Cromo, Revestimento multicamadas de Nitreto de Titânio/Carbonitreto de Titânio buscam melhorar o desempenho da ferramenta durante a usinagem das ligas de Titânio (Lemes, 2021), aumentando a resistência ao desgaste e dureza a quente, dentre outras propriedades importantes para a usinagem, em particular, para as ferramentas de torneamento.

Os revestimentos de Nitreto, tais como TiN, TiAlN, CrN, ZrN, TiSiN, TiAlSiN, CrAlN, TiAlCrN e cBN são conhecidos por sua resistência e durabilidade, sendo aplicados em diversas condições de usinagem (Sousa, 2020; Ichou *et al.*, 2024).

Os carbonetos (TiC, CrC e WC) são igualmente relevantes, proporcionando alta dureza e resistência ao desgaste, enquanto os óxidos, como Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, oferecem inércia química, baixa condutividade térmica em velocidade de corte acima de 60 m/min,

porém leva ao desgaste, adesão do material e desagregação do revestimento (Sousa, 2020).

O AlTiN é empregado em vários setores da indústria, enquanto o CrN é indicado para usinagem de não ferrosos devido à sua baixa afinidade química com estes materiais, além de sua alta estabilidade química, conferindo boa resistência à corrosão e oxidação, menor coeficiente de atrito e melhor tenacidade (Chowdhury, 2020).

O revestimento CrN tem boa aderência ao substrato da ferramenta e elevada resistência ao desgaste adesivo, sendo recomendado para usinagem com baixa velocidade de corte (Chowdhury, 2020).

Alguns revestimentos possuem características específicas: - TiN é geralmente aplicado para minimizar o atrito na interface cavaco-ferramenta; TiC e o TiCN tendem a reduzir o desgaste de cratera e possuem dureza mais elevadas; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> também reduz o desgaste de cratera e é refratário; TiAlN possui dureza elevada e resistência a oxidação (Vereschaka, 2018), menor temperatura de corte, menor taxa de difusão ferramenta-peça, menor desgaste da ferramenta, baixo coeficiente de atrito em velocidade de corte alta (Gupta, 2017); CrN possui alta estabilidade química, boa resistência à corrosão e oxidação, maior tenacidade e menor coeficiente de atrito (Chowdhury, 2021a).

Mishra (2021) observou que os valores médios das forças de corte utilizando metal duro revestido com uma camada de AlCrN ou AlTiN, e com dupla camada (AlCrN sobre AlTiN aderido ao substrato) foram 25%, 13% e 9% menores, respectivamente, que o valor médio registrado para a ferramenta sem revestimento. Está menor redução da força de corte (9%) para o revestimento duplo se deve ao raio de aresta gerado pela maior espessura do revestimento.

Apesar de sua baixa resistência ao desgaste, o revestimento de AlCrN possui uma boa resistência à oxidação até 1000 °C, tendo em vista a formação de uma camada protetora de óxido composta por Cr e Al que tende a dificultar a difusão de íons metálicos (Xiao, 2022).

Apesar de sua elevada dureza, acima de 40 GPa, e excelente estabilidade térmica, suportando temperaturas de até 1000 °C, o AlTiN tem sua resistência à oxidação reduzida rapidamente acima de 900 °C. Assim, a combinação da camada de AlCrN, com boa resistência à oxidação e AlTiSiN, com dureza atingindo 39,4 GPa e boa estabilidade térmica, favorece diversas aplicações industriais (Xiao, 2022).

A comparação entre ferramentas revestidas com TiAlN (Nitreto de Titânio e Alumínio) e ferramentas não revestidas revelou resultados divergentes, dependendo da velocidade de corte aplicada. Em velocidade de corte menor, observou-se um desempenho superior das ferramentas não revestidas, enquanto em altas velocidade de corte, as ferramentas revestidas com TiAlN demonstraram desempenho na usinagem superior (Gupta, 2017).

A seleção do revestimento desempenha um papel crítico na minimização do desgaste das ferramentas. Os revestimentos que se destacaram na redução do desgaste incluem TiAlN, TiN (Nitreto de Titânio),  $Al_2O_3$  (Óxido de Alumínio) e AlCrN (Nitreto de Cromo e Alumínio) (Gupta, 2017).

Na análise comparativa dos revestimentos AlCrN e AlTiN para a usinagem de materiais de difícil usinabilidade no estudo de Kumar (2018), observou-se que ambos os revestimentos demonstraram estabilidade térmica durante o processo de usinagem de materiais endurecidos. Entretanto, o revestimento de AlCrN evidenciou características significativas em relação à oxidação e ao desgaste da ferramenta.

Quando os dois revestimentos, AlCrN e TiAlN, foram submetidos a uma análise de desempenho quanto ao desgaste da ferramenta, constatou-se que as ferramentas com revestimentos de TiAlN apresentaram maior resistência ao desgaste por craterização. Em taxas de avanço mais elevadas, os fenômenos de desgaste mais prevalentes foram abrasão e adesão (Kumar, 2018).

Os revestimentos TiN e CrN são revestimentos binários concebidos para proteger as ferramentas de corte, porém sua dureza e resistência à oxidação revelaram-se insuficientes para as exigências dos processos de usinagem contemporâneos (Chang, 2017). O revestimento TiN exibe alta dureza, contudo não é adequado para operações de usinagem que envolvem temperaturas superiores a  $500^{\circ}C$ . No que concerne ao revestimento CrN, embora apresente boa resistência à oxidação, sua dureza é relativamente baixa (Chang, 2017).

Os revestimentos CrAlN e CrSiN apresentam características superiores quando comparados aos TiN e CrN, sobretudo em termos de estabilidade térmica e desempenho mecânico. Tal superioridade é atribuída à formação de camadas de óxido nas superfícies desgastadas, que contribuem para a elevada resistência desses revestimentos (Chang, 2017).

No que se refere aos revestimentos de camadas duplas, estes exibem uma resistência ao desgaste superior em relação aos revestimentos de camada única, em

virtude das interfaces específicas presentes. Exemplos de revestimentos de camadas duplas, como TiN/VN, TiAl/TiVN, TiAlN/CrSiN, CrAlN/VN e CrAlSiN/W<sub>2</sub>N, possuem propriedades mecânicas e tribológicas superiores (Chang, 2017).

No estudo de Chang (2017), o revestimento que apresentou o menor coeficiente de atrito foi o TiVN, mesmo não sendo o mais duro entre os revestimentos depositados. No entanto, o TiVN não demonstrou resistência ao desgaste abrasivo. Por outro lado, o revestimento AlCrN/TiVN mostrou o menor desgaste na ponta e no flanco da ferramenta devido à sua maior dureza (Chang, 2017).

A microestrutura do revestimento desempenha um papel crucial na adesão do revestimento, exercendo influência em diversos fatores que podem resultar em desgaste por fraturas posteriores. As propriedades mecânicas dos revestimentos desempenham um papel fundamental na mitigação de desgastes específicos, sendo a dureza, o módulo de elasticidade e o estado de tensão fatores que alteram os padrões de desgaste dos revestimentos (Sousa, 2020).

Os revestimentos baseados em AlTiN e AlCrN têm sido objetivos de estudo devido às melhorias em suas propriedades mecânicas, especialmente quando aplicados em altas temperaturas. Dentre esses revestimentos, destacam-se algumas combinações específicas que utilizam AlTiN e AlCrN como base, tais como AlTiN/MON, AlTiN/CrAlTiN, AlCrN/TiAlSiN, AlCrN/VN e AlCrN/AlCrO (Xiao, 2018). Essas combinações visam explorar e aprimorar as propriedades mecânicas para otimizar o desempenho dos revestimentos em condições desafiadoras, como altas temperaturas durante o processo de usinagem.

#### **4.4 Desgaste e avarias**

Os desgastes de ferramentas é um processo comum na usinagem devido as tensões mecânicas, químicas e térmicas, este fenômeno é devido a deterioração progressiva da ferramenta de corte após o processo de formação do cavaco (Soori, 2022). Na Tabela 2 pode-se verificar os tipos de desgaste apresentado e avarias, com os desgastes detectados pode-se analisar as possíveis causas e aplicar uma ação paliativa no processo de fabricação (Diniz, 2014).

Nos estudos sobre usinagem de matérias os três principais influenciadores de desgaste de ferramentas de corte são: Velocidade de corte, taxa de avanço e profundidade de corte (Soori, 2022).

Tabela 2: Causas e ações para minimização de avarias e desgaste da ferramenta

Tipo de desgaste e/ou avaria	Possíveis causas	Ações para minimização
Desgaste de flanco	Velocidade de corte muito alta ou muito baixa (se a causa for a presença de APC). Resistência ao desgaste insuficiente da ferramenta. Abrasão Aresta postiça de corte	Redução da velocidade de corte Seleção de classe de ferramenta mais resistente ao desgaste Aumento da velocidade de corte se o desgaste for causado pelo APC
Desgaste de entalhe	Oxidação	Seleção de fluido de corte com agentes oxidantes Redução da velocidade de corte
Desgaste de cratera	Difusão	Seleção de classe da ferramenta que possua cobertura de óxido de alumínio
Deformação plástica	Altas temperaturas combinados com altas pressões na região do corte	Seleção de classe da ferramenta com maior dureza a quente Redução da velocidade de corte
Trincas de origem mecânica	Variação excessiva de esforço na aresta de corte	Seleção de uma classe de ferramenta mais tenaz Redução do avanço Suavização do primeiro contato da ferramenta com a peça Aumento da estabilidade
Trincas de origem térmica	Excessiva variação de temperatura	Seleção de classe de ferramenta mais tenaz Aplicação de fluido de corte em abundância ou não-aplicação
Lascamento	Classe da ferramenta muito frágil Geometria da ferramenta muito fraca Choques da ferramenta com a peça	Seleção de classe de ferramenta mais tenaz Aumento do ângulo de ponta, raio de ponta e /ou do ângulo de cunha (chanframento da aresta) Suavização do primeiro contato da ferramenta com a peça

Fonte: Adaptado de Diniz, 2014, pg. 118

O método de Elementos Finitos (MEF) emerge como uma ferramenta especial na análise de problemas relacionados a processo de usinagem, notadamente na avaliação de fenômenos de transferências de calor, taxas de deformação, que podem culminar em falhas prematuras das ferramentas e modificações microestruturais substanciais no substrato da peça (Liang, 2020; Soori, 2022).

A análise termomecânica de cargas sobre as ferramentas de corte se destaca como um dos objetos primordiais do MEF, visando discernir os padrões de desgaste das ferramentas e possibilitando a identificação de oportunidades para o refinamento das geometrias destas (Liang, 2020; Soori, 2022).

Entretanto, a análise dos parâmetros acarretou divergências substanciais, atribuíveis à intrincada natureza do processo em questão, caracterizado pelo aumento significativo do coeficiente de atrito na interface ferramenta-cavaco e na interface ferramenta-peça, ocasionado pelo desgaste adesivo e a difusão dos elementos (Liang, 2020).

De acordo com a exposição feita por Soori 2022, é pertinente discutir as principais fontes de degradação em ferramentas de corte e seus efeitos. As principais fontes de desgaste são: desgaste por abrasão, um fenômeno caracterizado pelo desgaste progressivo decorrente da interação de materiais sólidos em contato sob condições de alta fricção, desgaste por erosão, que envolve a remoção de material devido à ação de partículas sólidas em alta velocidade, e desgaste por interações químicas, notadamente desgaste por corrosão, que implica em reações químicas adversas no ambiente de usinagem. Conforme o desgaste da ferramenta aumenta, alguns parâmetros são afetados tais como: o acúmulo de tensões residuais induzidas, deformações, variações na energia subsuperficial e prejudicando a qualidade superficial usinada (Soori, 2022).

Quando a ferramenta atinge um estágio crítico de degradação, ocorre um significativo aumento na rugosidade da superfície das peças usinadas. Contudo, de maneira concomitante, há um substancial aumento nas forças de corte e na temperatura durante o processo de usinagem, o que pode ter implicações prejudiciais na precisão e qualidade das peças usinadas (Soori, 2022).

O estudo conduzido por Younas (2021) visa avaliar o impacto do aumento da velocidade de corte no processo de torneamento a seco da liga Ti6Al4V de titânio. O objetivo principal é analisar as mudanças em parâmetros críticos durante o processo de usinagem em alta velocidade. Constatou-se que ao empregar velocidade de corte

superiores a 125m/min, há um aumento expressivo na taxa de remoção de material, com um acréscimo notável de até 127%. Essa melhoria na eficácia do processo resulta em uma quantidade de material removido por unidade de tempo. Além disso, observou-se um incremento de aproximadamente 16% na energia específica de corte.

A formação da aresta postiça representa um fenômeno complexo no contexto do desgaste de ferramentas de corte, sendo preponderante em condições de velocidade baixa. Inicialmente, sua formação atua como uma camada de proteção na superfície da ferramenta, buscando salvaguardar contra desgaste iniciais. Contudo, essa estrutura, por ser instável, ao se desprender da superfície de corte, contribui para danificar a ferramenta, impactando negativamente sua vida útil. Simultaneamente, a aresta postiça cria uma barreira térmica dinâmica de TiC na interface da ferramenta. Esse elemento adiciona complexidade ao fenômeno de desgaste, sendo notável que o mecanismo de desgaste sofre alterações significativas conforme mudanças na velocidade de corte (Chowdhury, 2020).

A barreira térmica formada pela presença de TiC, no entanto, não consegue proteger eficazmente a interface ferramenta-peça, resultando em uma mudança no mecanismo de desgaste para o fenômeno de craterização, influenciado pela difusão rápida (Chowdhury, 2020).

Ferramentas com revestimentos de superfície apresentam diversas características associadas a mecanismos de desgaste, como desgaste abrasivo, trincas térmicas, desgaste adesivo, formação de borda de acúmulo (BUE) ou falhas na estrutura do revestimento, levando a lascamentos ou rachaduras. Esses mecanismos de desgaste variam de acordo com o tipo de revestimento, sendo influenciados, por exemplo, pelo aumento da força de corte, que pode indicar desgaste abrasivo ou problemas na aresta de corte (Sousa, 2020).

A literatura destaca como principais mecanismos de desgaste adesão e abrasão. Em grande parte, os desgastes ocorrem na face de flanco, apresentando desgaste por abrasão na ferramenta, formação de entalhes e colapso da aresta de corte. O desgaste de flanco demonstra variações irregulares com o aumento da velocidade de corte e do avanço, afetando também a geometria da aresta de corte (Toubhans, 2020).

Xiao (2022) observou que ferramentas revestidas com AlCrN e AlTiSiN apresentaram desgaste de flanco de 0,337 mm e 0,325 mm, respectivamente, após

400 metros de usinagem, enquanto aquela com revestimento duplo (AlCrN/ AlTiSiN) apresentou um desgaste de 0,312 mm após 800 metros.

As ferramentas de metal duro com uma (AlCrN ou AlTiN) ou duas (AlCrN e AlTiN) camadas de revestimento apresentaram desgastes de flanco menores que a ferramenta sem revestimento. No entanto, a ferramenta com dupla camada sofreu um desgaste significativamente menor em relação às aquelas com camada única devido à melhor adesão e força de coesão destas camadas evitando a geração de tensões não uniformes e o lascamento e danos nas arestas (Mishra, 2021).

Este mesmo comportamento para estas ferramentas sem revestimento e aplicando AlCrN e AlTiN em camada única e dupla foi observado para o desgaste de cratera, tendo em vista às maiores dureza, módulo de elasticidade, resistência à deformação plástica e adesão ao substrato da dupla camada (Mishra, 2021).

Devido ao constante deslizamento de cavacos, alta reatividade química do material usinado e intensa interação térmica, uma camada de material aderente à superfície de saída se forma e cresce continuamente sobre esta superfície da ferramenta não revestida. O calor acumulado com o aumento da duração do corte promove as formas de desgaste sensíveis ao calor e causa a dissolução do cobalto do substrato (Mishra, 2021). Observa-se na ferramenta não revestida o desgaste por aderência e a formação de aresta postiça de corte.

Para ferramentas revestidas o início do desgaste de cratera pode ser retardo devido à sua maior resistência ao atrito, maiores forças de adesão e coesão (Mishra, 2021). As tensões de cisalhamento e a diferença da expansão térmica na interface revestimento-substrato causam o início do processo de delaminação (Mishra, 2021).

O calor intenso e as tensões de cisalhamento ampliam a delaminação e o revestimento falha devido à diminuição da força de adesão (Mishra, 2021). O desgaste da cratera favorece a formação de uma superfície em forma de arco, o que facilita o curvamento do cavaco e reduz o comprimento do contato, intensificando a carga térmica na zona da cratera (Mishra, 2021). Isso aumenta a falha do revestimento e, por fim, leva à exposição do substrato após alguns minutos de usinagem (Mishra, 2021).

No final do comprimento de contato, onde o cavaco deixa a zona da cratera, aparece uma transição súbita de uma zona de alta tensão para uma sem tensão (Mishra, 2021). O ciclo contínuo de engate e desengate da interação do cavaco nesta zona leva à fadiga e à fratura do revestimento (Mishra, 2021).

Segundo Kosaraju, Anne e Popuri (2012), destacam que os problemas enfrentados por ferramentas de corte incluem desgaste da aresta de corte, geração de calor durante o processo de corte e choque térmico. No torneamento de ligas de titânio, os principais mecanismos de desgaste são abrasão, adesão (attrition) e atrito (aderência e arrasto), com o desgaste de flanco sendo o mais predominante. Esses mecanismos de desgaste raramente ocorrem de forma isolada, geralmente aparecendo em combinação (Silva *et al.*, 2019)

O titânio interage de maneira agressiva com o material da ferramenta a altas temperaturas, induzidos pelo atrito e pela tensão normal, além de exibir um comportamento catalítico que contribui para o desgaste da aresta de corte. O arredondamento da aresta de corte na usinagem de precisão favorece a adesão do material, o que também causa desgaste na ferramenta. Com o tempo, o material aderido é removido, promovendo o fluxo lateral do cavaco e aumentando o arrancamento, o que afeta negativamente a qualidade da superfície (Zareena; Veldhuis, 2012)

De acordo com Zareena (2012), a liga de titânio atua como um catalizador para a grafitização, iniciando o desgaste da aresta. Isso aumenta o raio da aresta de corte e as condições para que ocorra a adesão de material.

#### **4.5 Processos de revestimentos**

A otimização da vida útil das ferramentas de corte é uma consideração crítica na usinagem, requerendo a aplicação de revestimentos adaptados a materiais usinados específicos e às operações de corte correspondentes. A seleção do revestimento é influenciada pela usinabilidade do material em questão, bem como pelos principais modos de desgaste e avarias observado durante o processo de usinagem (Lemes, 2021; Boing, 2020, Ichou *et al.*, 2024).

O processo de revestimento por CVD (Deposição Química de Vapor) é conhecido por resultar em ferramentas com arestas de corte arredondadas devido à sua alta espessura de revestimento. Isso pode torná-las inadequadas para algumas aplicações de usinagem, sendo mais adequados para processos de desbaste. Por outro lado, o processo de revestimento por PVD (Deposição Física de Vapor) é

caracterizado por produzir ferramentas com arestas de corte afiadas, nas quais as tensões compressivas são vantajosas (Chang, 2017; Boing, 2020, Ichou *et al.*, 2024).

Dois dos métodos de revestimento mais proeminentes são a Deposição Química a Vapor (CVD) e a Deposição Física de Vapor (PVD). No procedimento de PVD, a temperatura é controlada dentro da faixa de 150 a 500°C. Neste contexto, materiais de alta pureza como Titânio, Cromo e Alumínio, são submetidos a evaporação térmica ou bombardeado por íons (sputtering), ao mesmo tempo em que um gás reativo, como nitrogênio ou um gás contendo carbono, é introduzido na câmara. Simultaneamente, a ferramenta de corte é montada em um dispositivo rotativo dentro do forno para assegurar uma distribuição uniforme do material de revestimento, mantendo as dimensões especificadas e propriedades controladas (Balzers, 2023).

Por contraste, no processo CVD, as ferramentas de corte são pré-aquecidas e, em seguida, imersas em uma atmosfera gasosa contendo o material do revestimento. Neste cenário, a reação química induz a formação da camada de revestimento (Lemes, 2021).

Como podemos notar na Tabela 3 Temos as vantagens de cada processo de revestimento, e utilizando cada processo em sua melhor aplicação (Lemes, 2021).

O estudo conduzido por Martinho (2019) abordou uma investigação experimental na qual forma aplicadas dois processos distintos de revestimentos superficial, a saber, o processo de Deposição Física de Vapor (PVD) e o processo de Deposição Química a Vapor (CVD). No contexto do processo CVD, foram empregadas pastilhas com revestimentos composto por múltiplas camadas, notadamente TiN/TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Em contrapartida, no âmbito do processo PVD, os revestimentos utilizados consistiam de AlTiN. Ambos esses revestimentos foram submetidos a teste de fresamento de aço inoxidável duplex. As conclusões obtidas a partir das análises efetuadas por Martinho em (2019), revelaram que o processo de revestimento PVD exhibe propriedade favoráveis para operações de acabamento. Por outro lado, o processo CVD demonstrou potencial promissor para aplicações relacionadas a operações de desgaste (Martinho, 2019)

No estudo conduzido por Kumar (2018), observou-se que as ferramentas revestidas com multicamadas pelo processo PVD demonstraram desempenho superior em comparação com aquelas revestidas pelo processo CVD. Os revestimentos

utilizados no estudo incluíram TiAlN/TiCN pelo processo PVD e TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pelo processo CVD.

Tabela 3: Vantagens do processo CVD e PVD

	CVD – Deposição Química de Vapor	PVD- Deposição Física de Vapor
Temperatura de revestimento	~1000°C	~500°C
Tenacidade	Reduzida	Não é afetada
Aresta de corte	Arredondamento requerido	Pode ser aresta viva
Espessura do Revestimento	Até 12 µm	Até 4 µm
Camadas	Multicamadas de TiC-TiN, TiN-TiCN-TiN, TiC-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiN-TiC-TiAl
Principais aplicações	Torneamento e mandrilhamento	Fresamento, roscamento, furação
Vantagens	Maior resistência ao desgaste Maior resistência à craterização Cobertura uniforme Coberturas espessas Ótima aderência ao substrato Resistência térmica	Substitui ferramentas sem revestimento com mesma tenacidade e pouca interferência na geometria da aresta Reduz APC Maior tenacidade

Fonte: Adaptado de Lemes 2021, pag. 41

No diz respeito ao processo de revestimento de AlCrN, constatou-se uma maior densidade de partículas na superfície da ferramenta em comparação com o revestimento de AlTiN (Kumar, 2018).

A resistência ao desgaste de revestimento PVD (Deposição Física de Vapor) representa um desafio significativo para os pesquisadores, pois a adesão intensa de titânio na superfície de saída da ferramenta pode resultar no desprendimento do revestimento depositado. Em alguns cenários, ferramentas sem revestimento demonstram resultados superiores, uma vez que a usinagem de titânio envolve fenômenos complexos que demandam uma abordagem meticulosa (Chowdhury, 2020)

## 5 MATÉRIAS E MÉTODOS

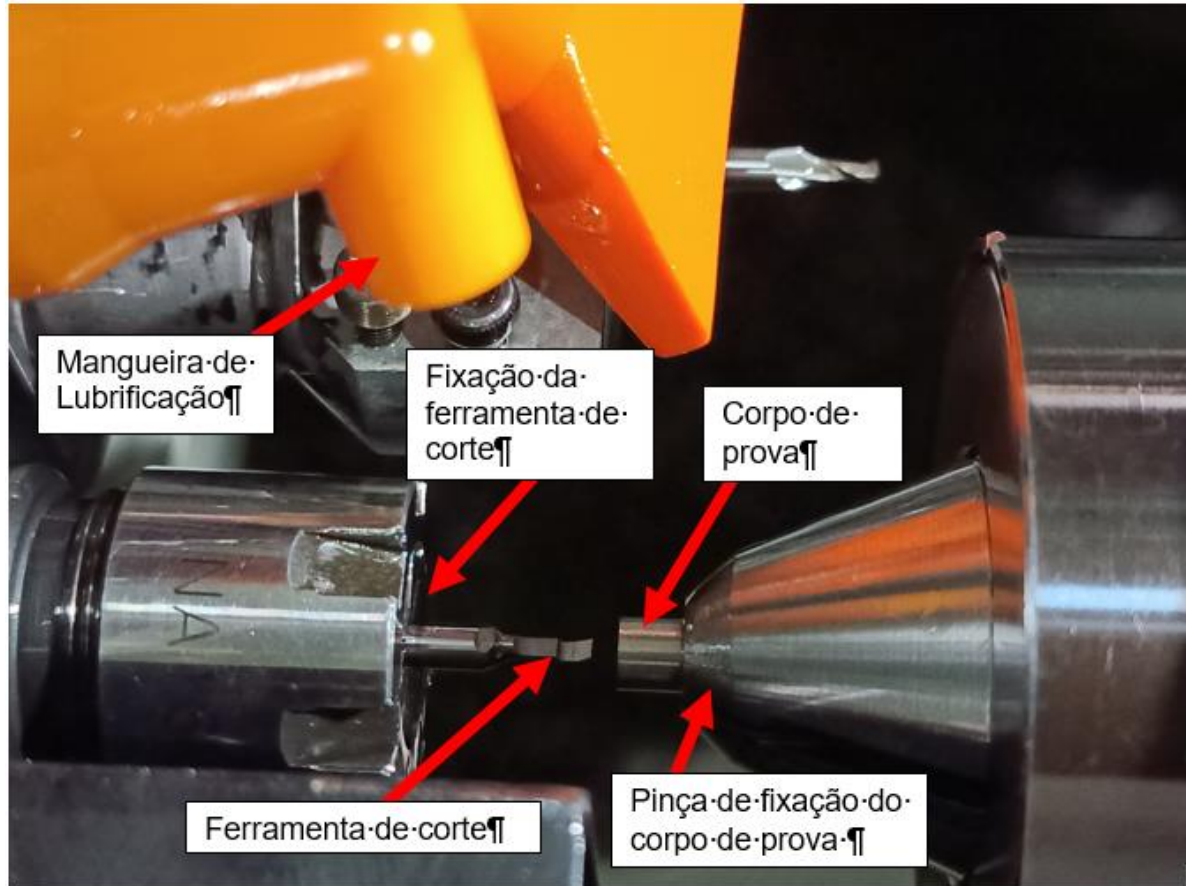
Nessa seção são apresentadas as informações relativas ao aparato experimental, corpos de prova, ferramentas de corte, medição da rugosidade e medição do desgaste das ferramentas de corte e planejamento experimental. Todos os experimentos de usinagem conduzidos nas instalações da Implalife Biotecnologia Ltda, demandante desse projeto de pesquisa. Localizada em Jales, no noroeste paulista, é uma empresa especializada no setor médico odontológico, fabricando implantes dentários e demais componentes protéticos. Sendo assim, para os ensaios de usinagem, foi utilizado o titânio de grau 4, conforme especificado pela norma ASTM F67. Os ensaios de desgaste das ferramentas de corte foram realizados seguindo as especificações da norma ABNT NBR ISO 3685.

### 5.1 Aparato experimental

A máquina-ferramenta utilizada nos experimentos de usinagem foi um torno CNC com cabeçote móvel, tipo suíço, equipado com 5 eixos, fabricado pela marca STAR, modelo 20R11, apresentando rotação máxima de 8000 rpm. A disposição da máquina-ferramenta para o experimento está ilustrada na Figura 1. A ferramenta de corte foi fixada no sistema porta ferramentas com auxílio de uma pinça ER16. Foi empregado um sistema de lubrificação com óleo mineral aplicado em abundância. Os corpos de prova também foram fixados com auxílio de pinça, visando garantir precisão e estabilidade durante o processo de usinagem. A operação realizada foi a de torneamento interno, visando simular uma das etapas de fabricação de implantes dentários de titânio.

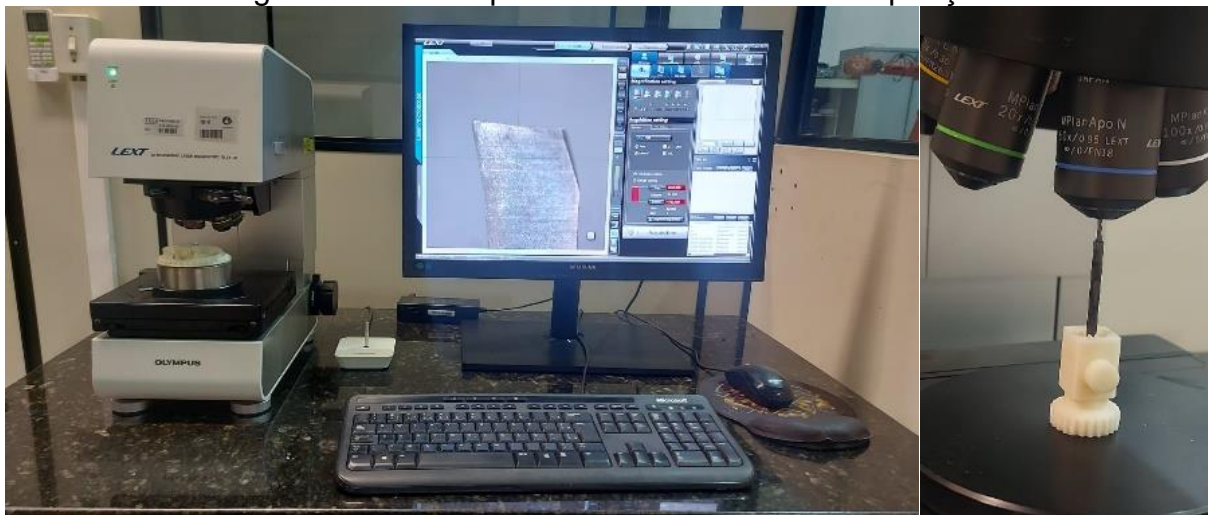
As ferramentas de corte e a superfície usinada das peças foram avaliadas com auxílio de um microscópio laser 3D LEXT da marca Olympus, modelo OLS 4100, como mostrado na Figura 2. As imagens capturadas foram analisadas por meio de um software específico que acompanha o equipamento. As ferramentas de corte foram avaliadas por microscopia laser 3D após a usinagem de 1000 m de comprimento de corte e as imagens das superfícies usinadas foram geradas a cada usinagem de 100 m.

Figura 1: Sistema de fixação do corpo de prova e da ferramenta de corte



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 2: Microscópio laser 3D e sistema de aquisição

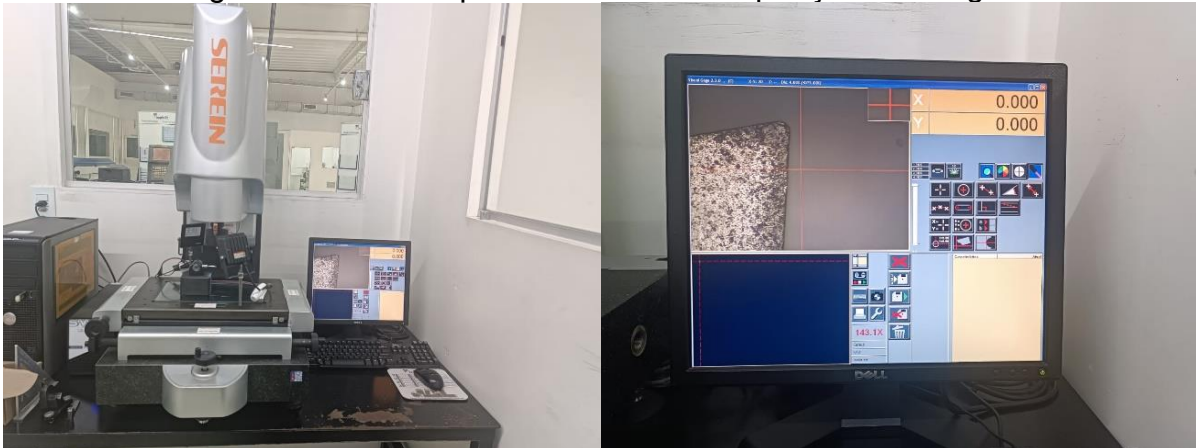


Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Durante os experimentos de usinagem, as ferramentas de corte foram periodicamente retiradas da máquina-ferramenta a cada 100 m de comprimento de corte usinados para geração de imagens ópticas, avaliação das superfícies e aresta

de corte que compõem a ferramenta de corte, assim como medição do desgaste. As imagens foram capturadas por um medidor óptico da marca TESA, modelo View Inspect V2515, utilizando o software Visual GAGE, versão 2.2.0, com resolução de 0,001mm, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3: Medidor óptico e sistema de aquisição de imagens



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

## 5.2 Corpos de prova

O material utilizado para fabricação dos implantes odontológicos é um Titânio puro GRAU 4, conforme especificações da norma ASTM F67. Foi recebido na forma de barra redonda, com acabamento retificado e tratado termicamente por recozimento. As propriedades mecânicas são alongamento de 36%, limite de escoamento de 574 MPa e resistência a tração de 800 MPa. O tamanho médio de grão é de 10  $\mu\text{m}$ , medido conforme norma ASTM E112. A composição química do material é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4: Composição química do material dos corpos de prova

Elemento	C	Fe	O	N	Ti	H
% peso	0,052	0,17	0,36	0,007	Balanço	0,0030

Fonte: Adaptado Norma ASTM F67

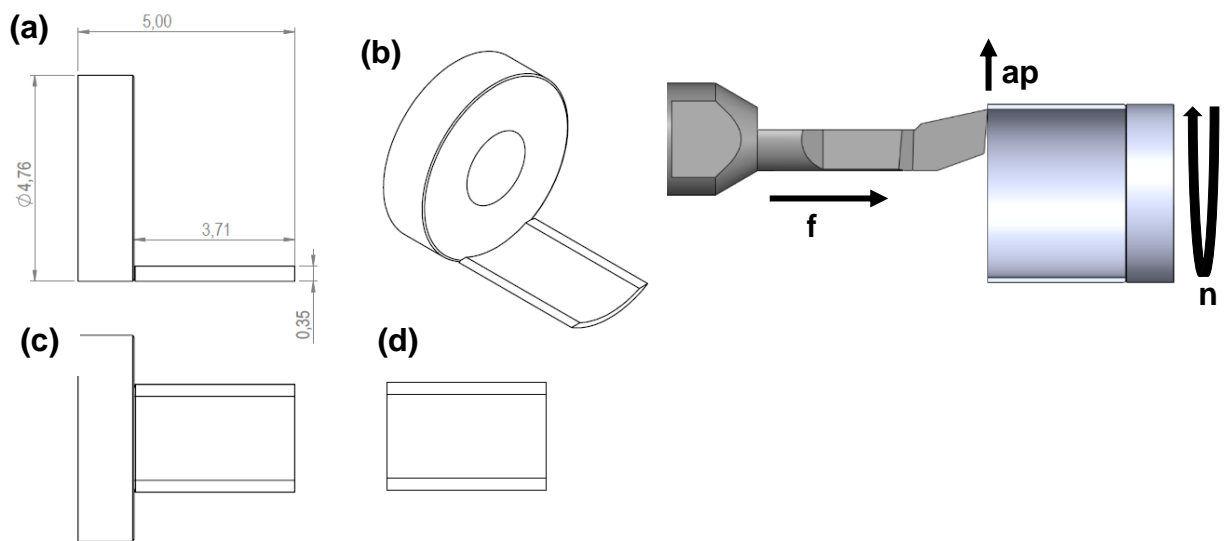
Na usinagem dos corpos de provas, foram utilizadas barras cilíndricas retificadas com  $\varnothing 4,76\text{mm}$ . O processo de usinagem dos corpos de prova consiste em uma sequência de operações e ciclos de torneamento, incluindo faceamento, furação

com  $\varnothing 1,90\text{mm}$ , torneamento e fresamento. Durante o torneamento, o processo é repetido sequencialmente no mesmo corpo de prova, resultando em um comprimento total usinado de 33,33418 m por corpo de prova. Dessa forma, a cada 100 m usinados, são produzidos 3 corpos de prova, totalizando 30 corpos de prova para cada 1000 m usinados.

A Figura 4 apresenta as cotas e vistas do corpo de prova. Na imagem (a), são apresentadas as cotas do corpo de prova; a imagem (b) fornece a vista lateral; a imagem (c) apresenta a vista superior do corpo de prova após o processo de fresamento; e, por fim, a imagem (d) mostra o corpo de prova preparado para as medições da superfície.

Os corpos de provas passaram pelo processo de lavagem por ultrassom, para a remoção de resíduos de óleo e cavacos.

Figura 4: Desenho técnico do corpo de prova



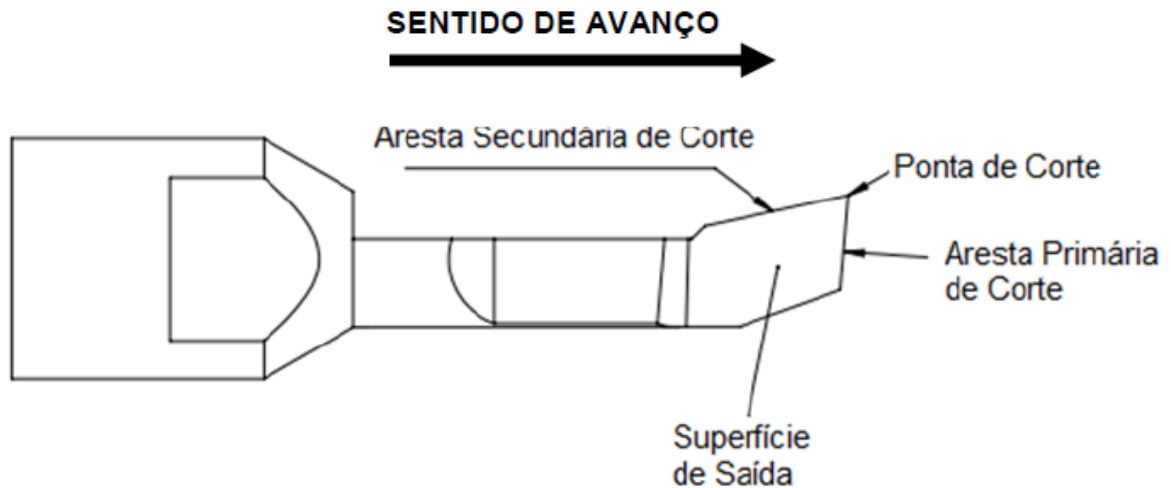
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

### 5.3 Ferramentas de corte

As ferramentas de corte, conforme ilustrada na Figura 5, foram fabricadas com barras cilíndricas de 3 mm de diâmetro de carboneto de tungstênio K40UF-S. As ferramentas de corte foram produzidas nas instalações da empresa Implalife Biotecnologia Ltda, utilizando uma máquina afiadora CNC, 5 eixos, marca Schutte, modelo 305 linear. Nesse sentido, apresentam um ângulo de saída de  $2^\circ$ , aresta

secundária de corte de  $12^\circ$ , aresta primária de corte de  $93,5^\circ$ , superfície secundária de folga de  $20^\circ$  e superfície primária de folga de  $20^\circ$ .

Figura 5: Ferramenta de Corte Torneiar Interna



Fonte: Elaborada pelo próprio autor

Parte das ferramentas de corte produzidas na empresa demandante foram submetidas a aplicação de revestimentos na empresa Oerlikon Balzers pelo método PVD. O processo de deposição física de vapor (PVD) é um método de deposição de revestimento sólido de alta dureza, com uma temperatura de deposição variando entre  $150^\circ$  e  $500^\circ\text{C}$ . Este processo envolve a pulverização ou bombardeamento de metais como titânio, cromo e alumínio com íons, juntamente com um gás reagente, que pode ser nitrogênio ou gás contendo carbono. Através do PVD, é possível controlar diversas propriedades do revestimento, incluindo dureza, resistência química, resistência à temperatura e aderência (Lemes, 2021; Balzers, 2023). Duas condições de revestimentos foram selecionadas nessa pesquisa. Um grupo de ferramentas de corte receberam um revestimento único de AlCrN (Nitreto de Cromo e Alumínio). O outro grupo de ferramentas de corte recebeu um revestimento duplo de TiCN (Carbonitreto de Titânio) na interface de contato com o metal duro e posteriormente foi aplicada uma camada de AlCrN (Nitreto de Cromo e Alumínio), representando um recobrimento duplo para combinação das propriedades de ambos revestimentos.

Os revestimentos de AlCrN e TiCN são utilizados em ferramentas de corte de metal duro para melhorar o desempenho e a durabilidade durante a usinagem de titânio e outros materiais de difícil usinabilidade. Ambos revestimentos têm funções específicas que contribuem para viabilidade da usinagem de titânio:

### 1. Revestimento de AlCrN (Nitreto de Cromo e Alumínio):

- Resistência ao desgaste: O revestimento de AlCrN possui uma excelente resistência ao desgaste, importante para usinar titânio, um material que pode ser abrasivo e causar desgaste prematuro nas ferramentas de corte;
- Alta temperatura de operação: O AlCrN é capaz de suportar temperaturas de corte elevadas, comuns na usinagem de titânio. Isso ajuda a manter a integridade da ferramenta em altas velocidades de corte;
- Redução de atrito: A cobertura de AlCrN também pode reduzir o atrito entre a ferramenta de corte e o material da peça, o que melhora a vida útil da ferramenta e a qualidade da superfície usinada.

### 2. Revestimento de TiCN (Carbonitreto de Titânio):

- Dureza: O TiCN é conhecido por sua dureza elevada, o que ajuda a resistir ao desgaste abrasivo durante a usinagem de titânio;
- Tenacidade: Além de ser duro, o TiCN é relativamente tenaz, o que significa que pode absorver choques e impactos sem quebrar facilmente. Isso é importante quando a ferramenta está sujeita a forças variáveis durante a usinagem;
- Melhorar a vida útil da ferramenta: A combinação de dureza e tenacidade do TiCN resulta em uma vida útil mais longa da ferramenta de corte em condições de usinagem de titânio.

A seleção dos revestimentos levou em consideração as condições específicas de usinagem, como a velocidade de corte, a profundidade de corte, a refrigeração e o tipo de titânio a ser usinado. A combinação dos revestimentos, aplicados as ferramentas de corte, visou combinar as vantagens de diferentes materiais de revestimento e atender às necessidades da aplicação (Yan Li, 2023; T. Polcar, 2005; T. Polcar, 2006). Aplicados os revestimentos, três condições de ferramentas de corte foram utilizadas nos experimentos de usinagem: ferramentas de metal duro sem revestimento, ferramentas de metal duro revestidas com AlCrN e ferramentas de metal duro revestidas com TiCN+AlCrN. Na análise das ferramentas de corte com auxílio de microscopia laser 3D antes da realização dos ensaios de usinagem, as ferramentas sem revestimento apresentaram um raio de ponta  $30,751 \pm 0,47 \mu\text{m}$  e raio de aresta de corte de  $7,396 \pm 0,28 \mu\text{m}$ . As ferramentas de metal duro com revestimento

apresentaram um raio de ponta de  $21,565 \pm 1,27 \mu\text{m}$  e raio de aresta de corte de  $7,921 \pm 0,70 \mu\text{m}$ .

## 5.4 Planejamento Experimental

### 5.4.1 Matriz experimental

Neste experimento, utilizamos a matriz experimental descrita na Tabela 5. Os ensaios de usinagem foram realizados com três réplicas para cada condição de ferramenta de corte, sendo FS (ferramentas sem revestimento), FC (ferramenta com revestimento) e FMC (ferramenta com multicamadas). Sendo assim, cada ferramenta de corte usinou um comprimento de corte de 1000 m, com monitoramento do desgaste a cada 100 m usinados. A ferramenta de corte era removida da máquina-ferramenta para medições do desgaste de flanco, área do desgaste de flanco e rugosidade da superfície usinada. As ferramentas de corte também eram avaliadas quanto a possibilidade de ocorrência de outros tipos de desgaste ou avarias.

Tabela 5: Etapas de usinagem dos corpos de prova.

Etapas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
FS1/FC1/FMC1	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
FS2/FC2/FMC2	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
FS3/FC3/FMC3	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

De acordo com o catálogo de ferramentas de corte da Sandvik Coromant, edição 2011, as ferramentas de corte indicadas para usinagem do titânio e suas ligas devem ser do grupo de materiais S (superligas e ligas resistentes ao calor), classe de metal duro H10F. A ferramenta de corte do catálogo mais próxima das adotadas nessa pesquisa é a CoroTurn® XS, própria para a usinagem interna de alta qualidade de pequenas características. Sendo assim, a Tabela 6 apresenta os parâmetros de usinagem para ligas de titânio de resistência máxima média de 800 MPa.

Tabela 6. Parâmetros de usinagem adotados nos experimentos.

Parâmetro de usinagem	Valores
Velocidade de corte [m/min]	25
Avanço [mm/rotação]	0,015
Profundidade de usinagem [mm]	0,100

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A velocidade de corte de 25 m/min é 25% maior que a indicada pelo catálogo (20 m/min), visando aumento de produtividade, e 11% maior que a prevista pela norma ISO 3685 de ensaio de desgaste de ferramentas de corte (22,4 m/min). O avanço foi estimado com base no valor de raio de ponta das ferramentas de corte, norma de desgaste e indicação do catálogo. Nesse sentido, considerando que o menor raio de ponta das ferramentas de corte é  $21,565 \pm 1,27 \mu\text{m}$ , o avanço estimado corresponde a 70% desse valor, respeitando o limite máximo de 80% do raio de ponta estabelecido pela norma de desgaste e ficando dentro da faixa limite sugerida pelo catálogo. A profundidade de usinagem adotada também respeita a norma de desgaste e a faixa recomendada pelo catálogo, sendo também superior a espessura da camada de óxido de titânio presente no titânio grau 4, a qual varia de 5 a 50  $\mu\text{m}$  quando exposto ao ar atmosférico na faixa de temperatura de 650 a 980°C.

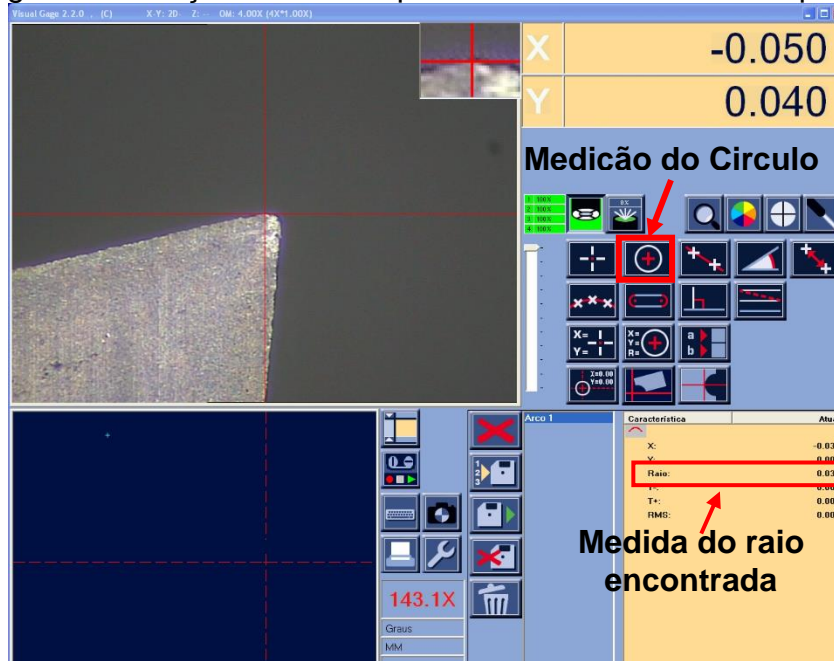
#### **5.4.2 Avaliação do desgaste das ferramentas de corte**

Neste experimento, foi utilizado um medidor óptico para medir o desgaste de flanco e raio de ponta das ferramentas de corte. Para a medição da área do desgaste de flanco, empregou-se o software ImageJ. A Figura 6 ilustra o procedimento de medição do raio de ponta da ferramenta de corte. O software oferece uma opção de medição de círculo; ao selecionar esta opção, é necessário identificar os pontos específicos do raio da ponta da ferramenta. Após a seleção desses pontos, o software calcula e exibe a medida do raio, conforme demonstrado na Figura 6.

A Figura 7 demonstra o método de medição da área e do desgaste de flanco. A ferramenta de corte é posicionada no equipamento com a superfície principal de folga orientada para a medição. A ferramenta é alinhada na aresta principal de corte e o eixo Y é zerado. Após o zeramento, o eixo é deslocado até a medida do desgaste de flanco, observando-se o valor do eixo Y. Este valor é registrado em uma tabela do Excel.

Para a medição da área de desgaste, também ilustrada na , não se utilizou o medidor óptico, mas sim o software ImageJ. Este software foi aplicado para inserir as escalas das imagens obtidas pelo medidor óptico. Utilizamos o recurso Freehand no ImageJ, que permite contornar manualmente a área de desgaste de flanco, facilitando a medição precisa da área de desgaste.

Figura 6: Medição do raio de ponta utilizando o medidor óptico



Fonte: Elaborada pelo próprio autor

Figura 7: Medição da área e do desgaste de flanco (VB)



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

### **5.4.3 Análise do efeito da velocidade de corte**

Conforme será apresentado na seção resultados e discussão dessa pesquisa, após a avaliação dos experimentos conduzidos, foi constatada a ausência de desgastes visíveis nas ferramentas de corte com revestimento TiCN+AlCrN. Com base nesses achados, foi elaborada uma matriz experimental adicional para investigar a resistência ao desgaste oferecido por esse revestimento, visando aumento da produtividade da empresa demandante da pesquisa. Nessa abordagem, foram aplicadas as velocidades de corte de 25 m/min, 30 m/min e 35 m/min. Os demais parâmetros de usinagem foram mantidos conforme especificado na Tabela 6. O comprimento de corte foi estendido para 3000 m. O valor foi definido com base na média de comprimento de corte na qual as ferramentas de corte eram substituídas durante a fabricação da cavidade interna no torneamento dos implantes dentários.

### **5.4.4 Avaliação da rugosidade das superfícies usinadas**

Como método indireto de monitoramento do desgaste das ferramentas de corte e coleta de dados para a compreensão dos efeitos da usinagem na formação da superfície usinada dos corpos de prova, medições de rugosidade foram realizadas para esse propósito. As avaliações do acabamento da superfície usinadas das peças foram conduzidas por microscopia laser 3D. Foram realizadas sete medidas de rugosidade linear em cada superfície usinada para as análises, visando a obtenção de médias e desvios padrão, considerando um intervalo de confiança de 95%. Os parâmetros de rugosidade selecionados foram o Rz e Rq.

O parâmetro de rugosidade Rz (média da altura máxima) é particularmente útil para avaliar características de irregularidades em escalas mais longas. Ele é calculado como a média das cinco saliências mais elevadas e das cinco depressões mais profundas presentes na superfície da peça. É também considerado um parâmetro de rugosidade que revela mais rapidamente mudanças no mecanismo de formação da superfície usinada quando comparado parâmetro Ra (rugosidade média), por exemplo.

O parâmetro de rugosidade  $R_q$  (desvio médio quadrático) é uma métrica que se concentra nas irregularidades na superfície em uma escala intermediária, englobando pontos que não são nem extremamente finos e nem de grande extensão sendo estatisticamente mais sensível que o parâmetro de rugosidade  $R_a$  (rugosidade média). Outros parâmetros de rugosidade também foram testados. Contudo, os parâmetros  $R_z$  e  $R_q$  revelaram maior sensibilidade ao efeito do desgaste das ferramentas.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das análises do desgaste das ferramentas de corte, superfície usinada e rugosidade serão apresentados a seguir. As seções subsequentes visam expor os desgastes das ferramentas, os fenômenos associados ao desgaste e as características de rugosidade. Todas as médias dos resultados de rugosidade foram calculados considerando um intervalo de confiança de 95%. As análises de adesão de material nas ferramentas de corte e adesão de material nos corpos de provas, foram constatados visualmente atrás das análises das imagens.

Em todas as condições experimentais, o critério de fim de vida das ferramentas foi estabelecido com um comprimento de corte de 1000 m, sendo coletadas informações principalmente sobre o desgaste do flanco, assim como possíveis outros tipos de desgaste que pudessem surgir nos resultados. As ferramentas de corte foram avaliadas a cada comprimento de corte de 100 m. Considerando a usinagem do titânio, as análises visaram identificar a ocorrência de desgaste rápido e danos severos na ponta da ferramenta (lascamentos ou quebra), os quais são normalmente causados pela instabilidade química do material da ferramenta durante a usinagem de ligas de titânio. Essa afinidade química pode resultar na adesão do material do cavaco à ponta da ferramenta de corte (Khan; Maity, 2019).

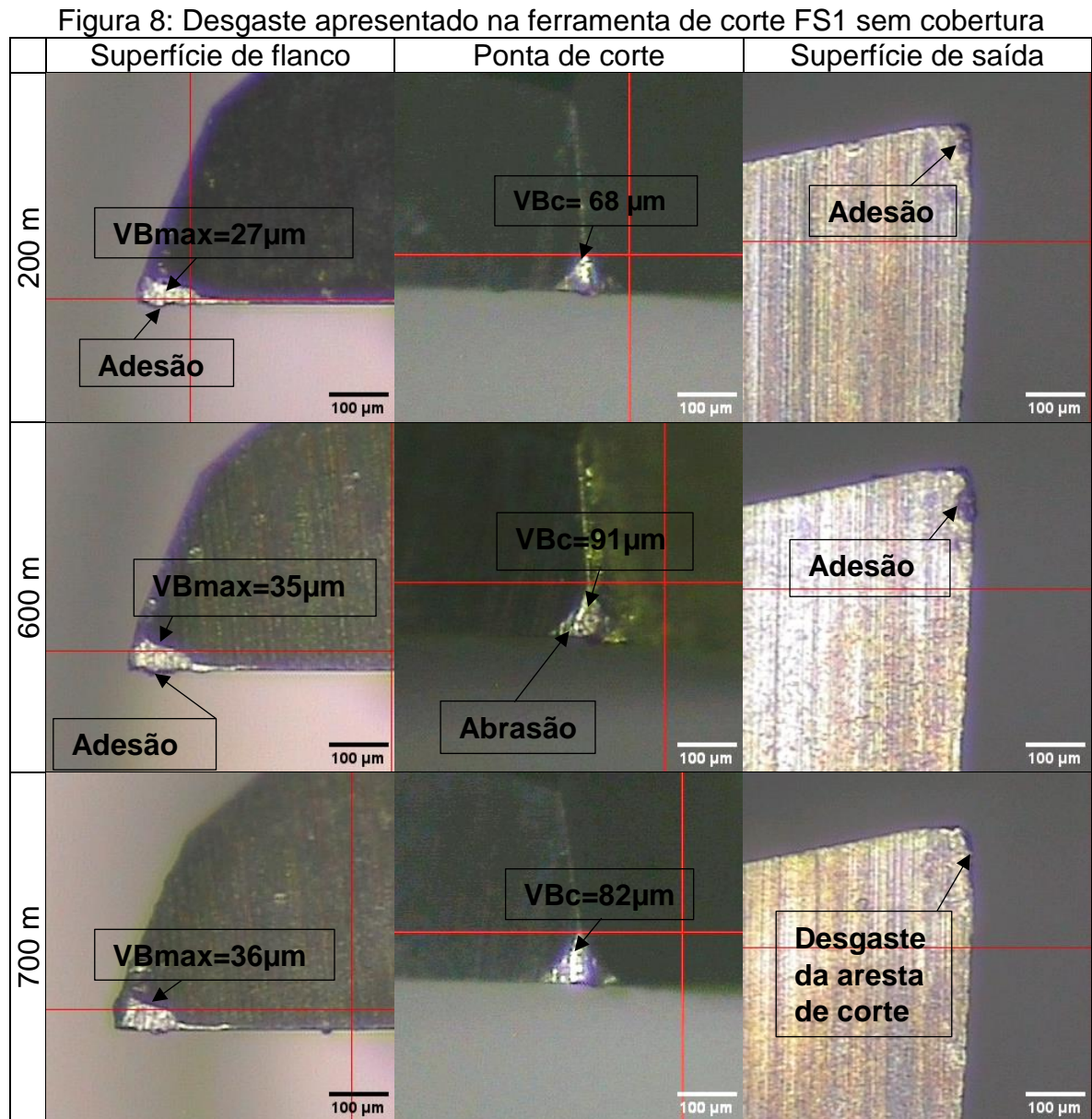
Para facilitar o entendimento das análises dos resultados, foram atribuídos códigos específicos as ferramentas utilizadas nos experimentos, de acordo com suas características. As ferramentas sem revestimentos serão apresentadas pelos códigos FS1, FS2 e FS3. As ferramentas com revestimentos monocamadas serão designadas como FC1, FC2 e FC3. Já as ferramentas com revestimentos multicamadas serão identificadas pelos códigos FMC1, FMC2 e FMC3.

### 6.1 Avaliação do desgaste das ferramentas de corte sem revestimento

A

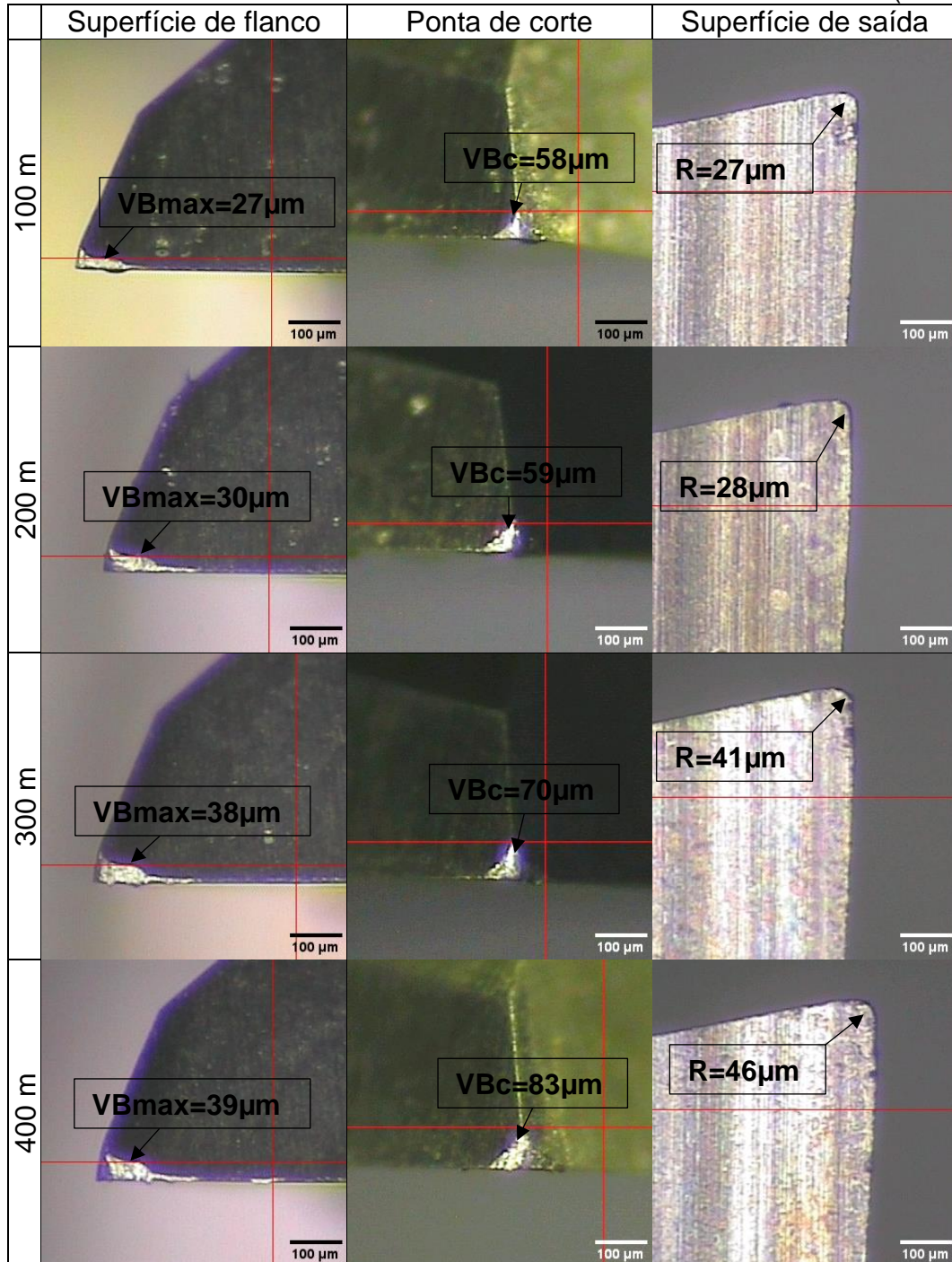
Figura 8 apresenta as imagens da FS1 que sofreram desgastes, nos comprimentos de corte de 200 e 600m e foi observado adesão de material na aresta

de corte, na superfície de saída próxima à ponta de corte, apresentando saliências e marcas escuras indicativas de adesão de material. Nos comprimentos de corte subsequentes, foram observadas adesão de material na aresta principal de corte.



A Figura 9 apresenta a evolução do desgaste observado nas ferramentas de corte sem revestimento. De acordo com as imagens, houve um aumento progressivo do desgaste de flanco (VB), do raio de ponta e ponta de corte (VBc) à medida que o comprimento de corte aumentou. Após atingir o comprimento de corte de 1000 m, a ferramenta apresentou desgaste no flanco, sem outros danos significativos.

Figura 9: Desgaste apresentado na Ferramenta FS2 sem cobertura  
(Continua)



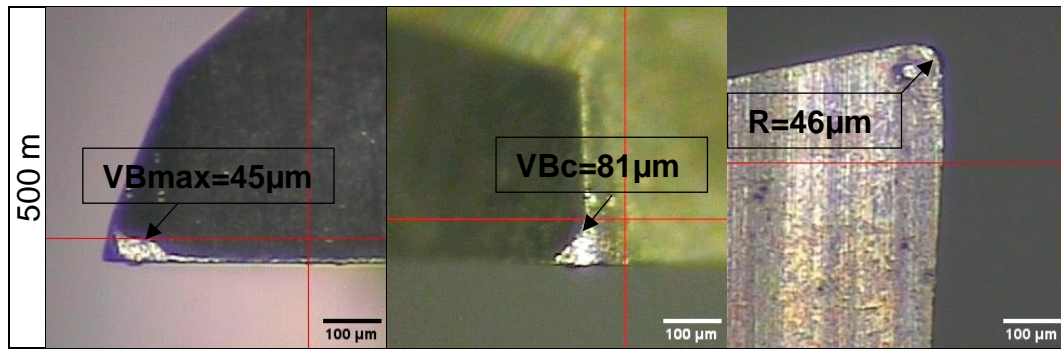
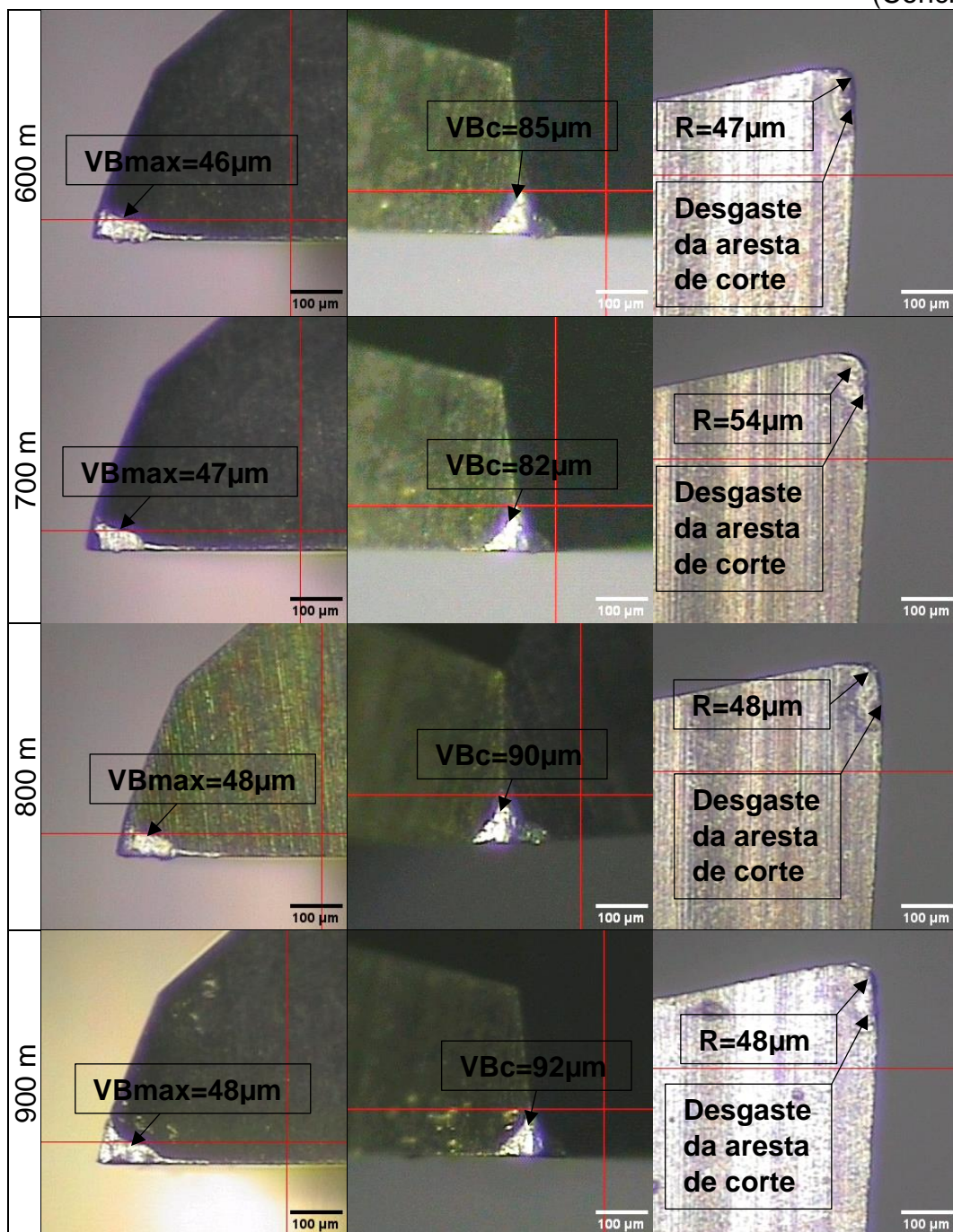
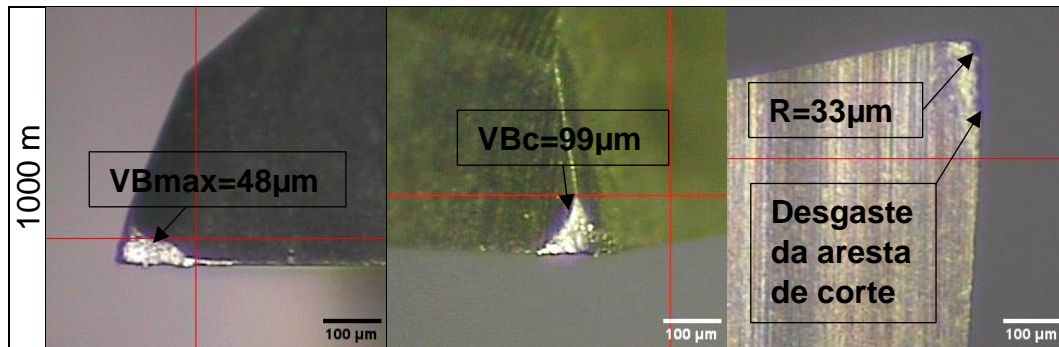


Figura 9: Desgaste apresentado na Ferramenta FS2 sem cobertura  
(Conclusão)





Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

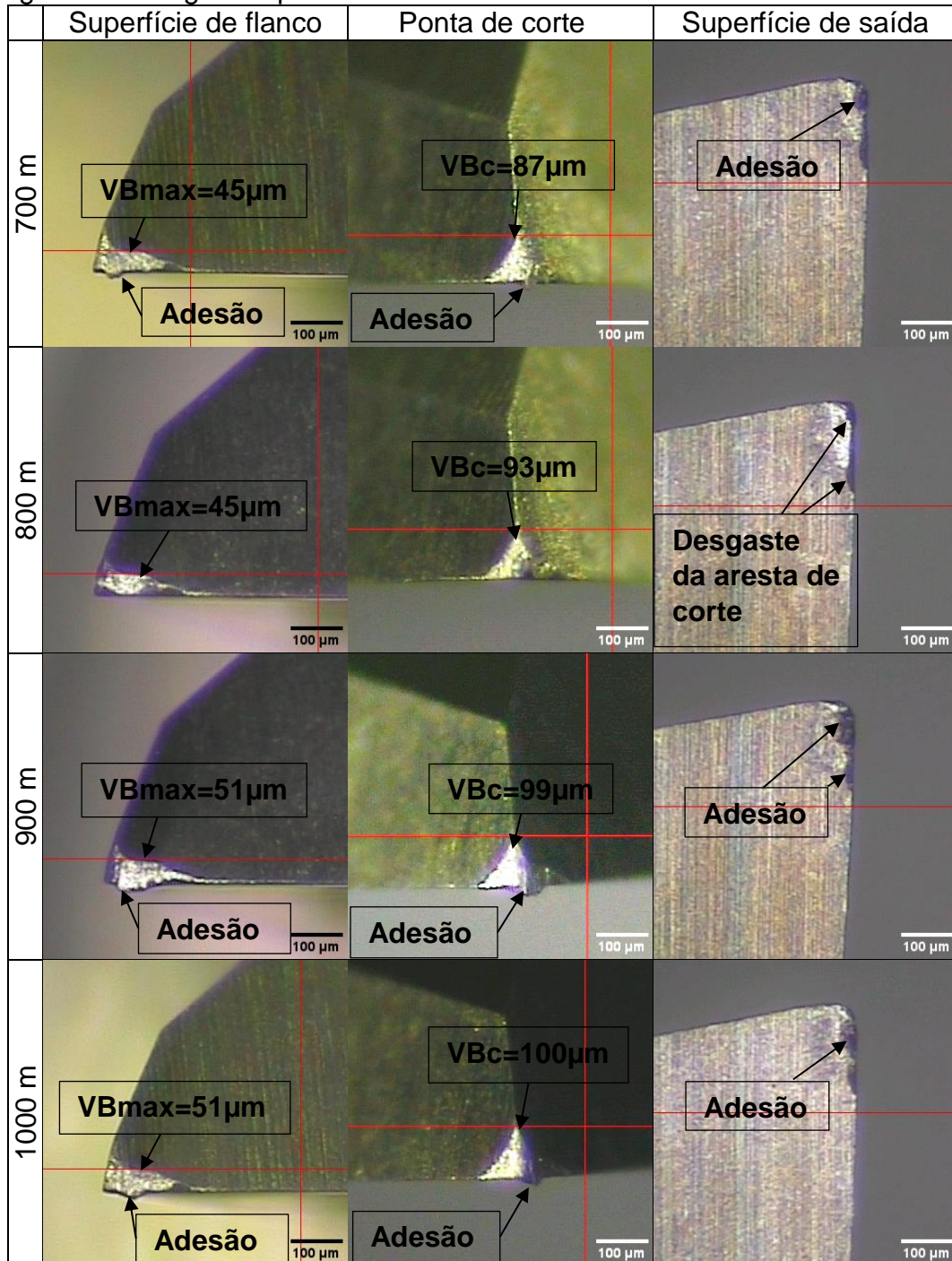
A Figura 10, apresenta as imagens da evolução do desgaste de flanco, ponta de corte ( $VB_c$ ), variação do raio de ponta, e, em alguns comprimentos de corte, o desgaste da aresta de corte principal também é visível. Observa-se que nos comprimentos de corte de 600, 700, 800, 900 e 1000 m ocorre um desgaste significativo da aresta de corte. Notavelmente, o raio de ponta da ferramenta de corte não se mantém constante, o que impede a manutenção de uma geometria de ponta adequadamente arredondada. Esse fenômeno é particularmente pronunciado nos comprimentos de 800, 900 e 1000 m, onde o desgaste da aresta de corte se torna evidente.

Na Figura 10 são exibidas as imagens da ferramenta Fs3 que apresentou avarias, nos comprimentos de corte de 700, 800, 900 e 1000 m. Nesses comprimentos, foi observada a adesão de material tanto na superfície de flanco quanto na superfície de saída da ferramenta. Na superfície de flanco, um ressalto após a aresta principal de corte evidencia a adesão de material. Além disso, na superfície de saída, uma sombra escura na aresta principal de corte corrobora a presença de material aderido. Essa adesão de material também é visível na ponta de corte da ferramenta, destacando a degradação da ferramenta devido ao acúmulo de material durante o processo de usinagem.

De acordo com o estudo de ABBS *et al.* (2021), em baixas velocidade de corte, foi observado desgaste por adesão após a análise do desgaste do flanco em ferramentas de corte de metal duro sem revestimento. Resultados semelhantes de adesão de material da peça na ferramenta de corte foram encontrados nas análises das imagens da Figura 11, confirmando os achados. Nessa pesquisa, a velocidade de corte aplicada foi de 25 m/min, inferior a indicada pela literatura científica, a qual está na faixa de 40 a 60 m/min (Lemes, 2021; Kosaraju; Anne; Popuri, 2012; Selvalumar, 2021; Rahman Rashid, 2016; Mishra, 2021; Aditya Kumar, 2024). Em pré-testes, a aplicação de velocidades de corte mais elevadas resultou em falha prematura das

ferramentas de corte, principalmente em decorrência de sua dimensão geométrica reduzida, em comparação as ferramentas de corte utilizadas por esses pesquisadores, tornando-as mais suscetíveis a instabilidades do processo de corte, tais como vibrações e deflexões.

Figura 10: Desgaste apresentado na ferramenta de corte FS3 sem cobertura



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Conforme mencionado por Machado *et al.*, (2015), o mecanismo de desgaste de adesão é conhecido como *attrition*. Na usinagem de titânio e suas ligas, o principal mecanismo de desgaste é a associação da adesão e da abrasão. Contudo, o mecanismo predominante para o desgaste de flanco é a abrasão, devido ao amolecimento do material da ferramenta em altas temperaturas de corte (Abbas *et al.*, 2021; Lindvall *et al.*, 2020). Essa explicação é corroborada por Lemes (2021), o qual afirma que os principais mecanismos de desgaste observados nas ferramentas de corte durante a usinagem de titânio são abrasão e adesão (aderência e arrastamento).

Para determinar esses mecanismos de desgaste nas ferramentas de corte, foram analisadas imagens obtidas por microscopia laser 3D. Sendo assim, a Figura 11 apresenta imagens de microscopia laser 3D das ferramentas de corte sem cobertura, evidenciando os mecanismos de desgaste. Foi observado que o mecanismo de desgaste predominante na superfície de folga primária (SFP) é o *attrition*, pois o desgaste de flanco da ferramenta de corte apresentou visualmente uma superfície áspera e não uniforme.

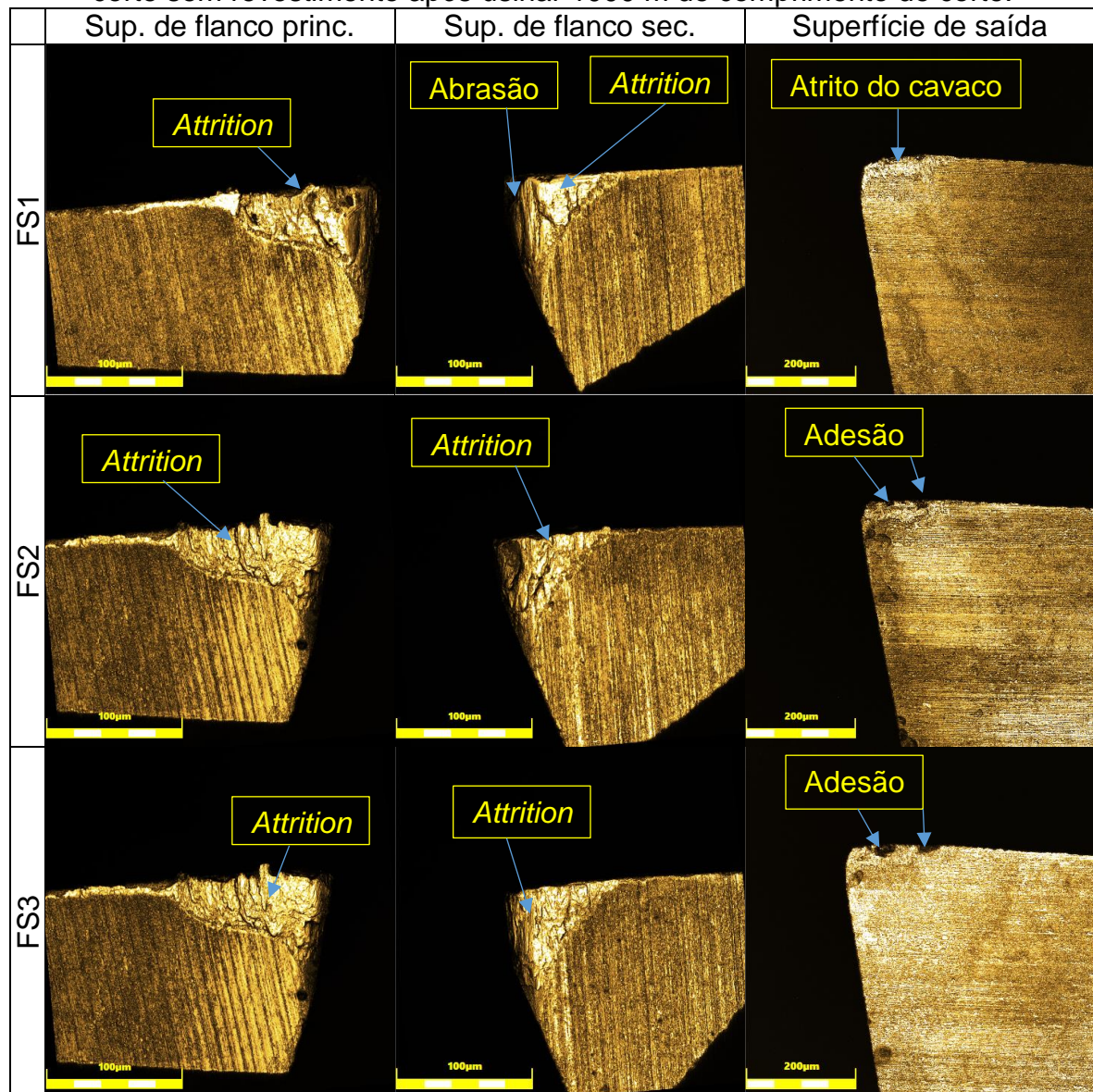
No entanto, na superfície de folga secundária (SFS) da ferramenta FS1, observou-se desgaste por abrasão, evidenciado por marcas de sulcos no sentido do fluxo do cavaco. Na superfície de saída (SS) da ferramenta FS1, foram identificadas marcas de atrito, enquanto nas ferramentas FS2 e FS3, foram observadas avarias por lascamento na resta principal de corte.

O desgaste de flanco também foi mensurado e apresentado no gráfico da Figura 12, revelando uma tendência de aumento do desgaste de flanco com o aumento do comprimento de corte. As ferramentas de corte FS2 e FS3 apresentaram comportamentos semelhantes, enquanto a ferramenta FS1 demonstrou um desgaste de flanco menor que as demais com o aumento do comprimento de corte. O aumento do desgaste de flanco ocorre devido ao atrito entre a material peça e a ferramenta de corte durante a usinagem, resultando também no desgaste da aresta principal de corte.

Ao analisar o raio de ponta da ferramenta de corte sem revestimento (Figura 13), não houve uma tendência definida para sua variação com o aumento do comprimento de corte. De acordo com o Diniz (2014), essa variação do raio de ponta é devida ao desgaste de entalhe, o qual pode ocorrer nos limites de contato da superfície de folga da ferramenta de corte e o material da peça, alterando a geometria

da ponta de corte da ferramenta. Nessa pesquisa, o desgaste de entalhe não foi observado nas ferramentas de corte. Sendo assim, a variação do raio de ponta de corte foi devido ao desgaste de flanco associado com o desgaste da aresta de corte.

Figura 11: Imagens de microscopia laser da superfície de folga primária (SFP), superfície de folga secundária (SFS) e superfície de saída (SS) das ferramentas de corte sem revestimento após usar 1000 m de comprimento de corte.



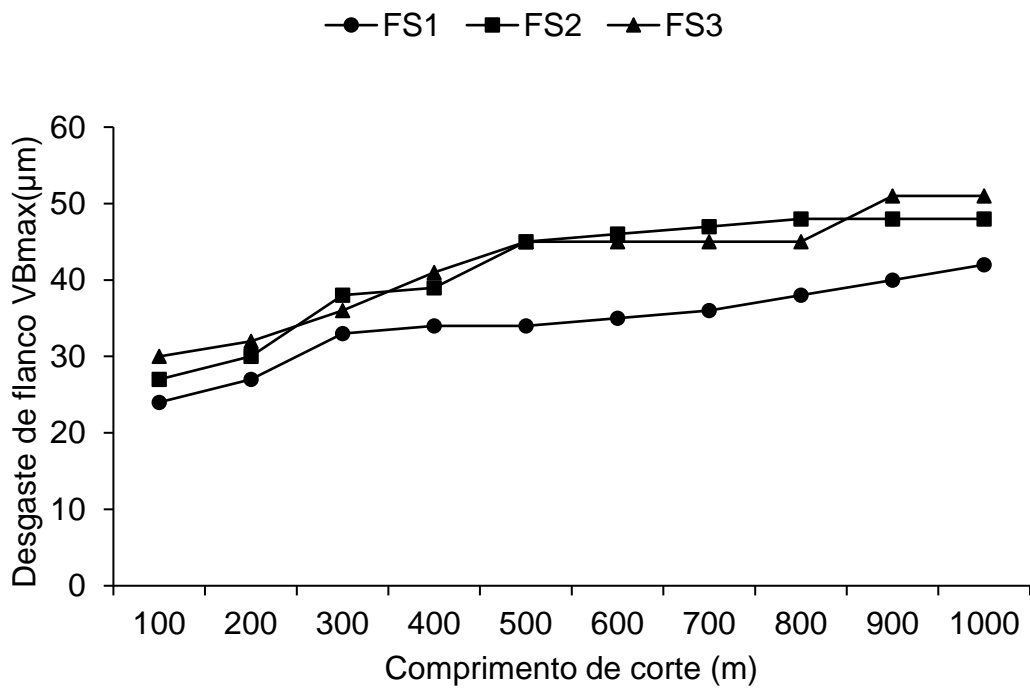
Fonte: Elaboração do próprio autor

Ainda analisando o gráfico da Figura 13, o raio de ponta apresentou um comportamento similar, pois aumentou até o comprimento de corte de 500m. A partir desse ponto, o raio diminuiu, passando a não mais revelar uma tendência definida.

Esse comportamento do raio de ponta de corte foi causado pelo desgaste do flanco e o desgaste da aresta de corte, conforme apresentado na

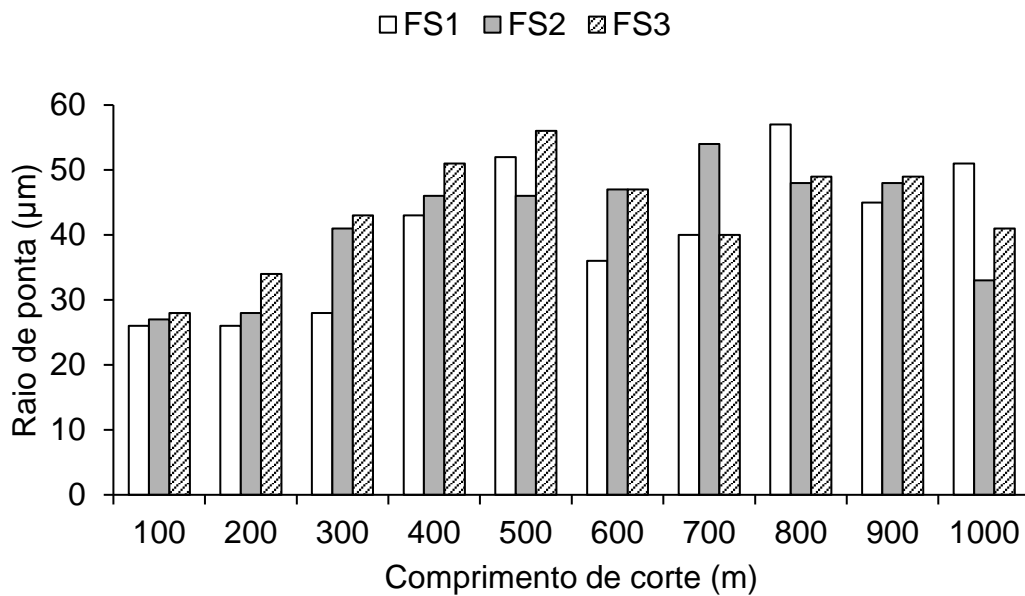
Figura 8.

Figura 12: Desgaste de flanco das ferramentas de corte sem revestimento



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

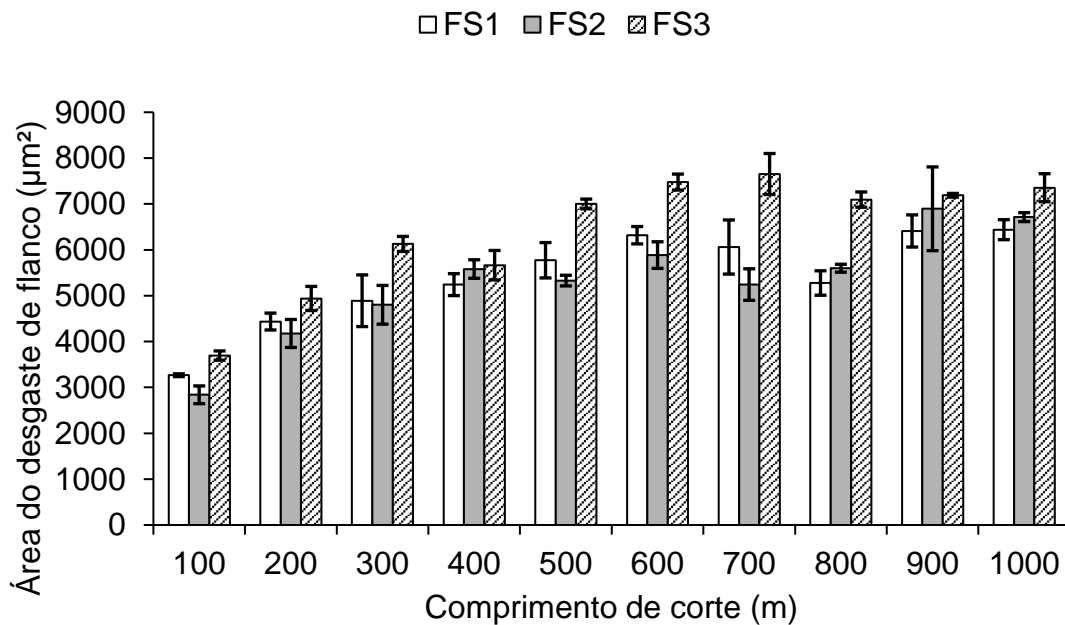
Figura 13: Raio de ponta das ferramentas sem revestimento



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A área do desgaste de flanco também foi mensurada. Nesse sentido, a Figura 14 apresenta a área do desgaste de flanco das ferramentas de corte sem revestimento. Foi observado que as ferramentas apresentaram valores de área crescentes até o comprimento de corte de 600m. A partir desse ponto, as áreas passaram a apresentar uma constância. Durante a usinagem dos corpos de prova, o desgaste de flanco tendeu a aumentar com o aumento do comprimento de corte. Contudo, a partir de 600 m a aresta de corte passou a ser desgastada com mais intensidade e assim foi perdendo sua geometria original, resultando numa virtual redução da área de desgaste de flanco. Foi notado que a ferramenta FS3 apresentou um comportamento diferente em relação as demais ferramentas. Esse fato foi devido ao desgaste da aresta de corte e adesão de material, conforme evidenciado na Figura 10.

Figura 14: Área do desgaste de flanco das ferramentas sem revestimento



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

## 6.2 Avaliação da superfície usinada pelas ferramentas de corte sem revestimento.

A Figura 15 apresenta as imagens das superfícies usinadas com as ferramentas de corte FS1, FS2 e FS3, nos comprimentos de corte de 100, 500 e 1000 m e também da primeira peça usinada. Ao examinar a primeira peça usinada e a superfície usinada após 100 m com a FS1, foi observada a ausência de marcas de avanço. Além disso, a imagem sugere a presença de adesão de material na superfície usinada. Nos comprimentos de corte de 500 e 1000 m foi observada a presença de marcas de avanço. As marcas de avanço apresentadas em 500 m são mais homogêneas em comparação com às marcas reveladas a 1000 m de comprimento de corte, cujas medidas variaram de 0,006 mm à 0,015 mm. Esta variação na qualidade da superfície usinada é devida ao desgaste da ferramenta de corte, caracterizado pelo desgaste de flanco associado ao desgaste da aresta de corte.

A ferramenta FS1 também apresentou comportamento diferente da variação do raio de ponta em relação as ferramentas FS2 e FS3, conforme mostrado na Figura 13. No entanto, as medidas das rugosidades Rz e Rq apresentadas nas Figura 17 e Figura 18 revelam variações na rugosidade após cada comprimento de corte. Essa

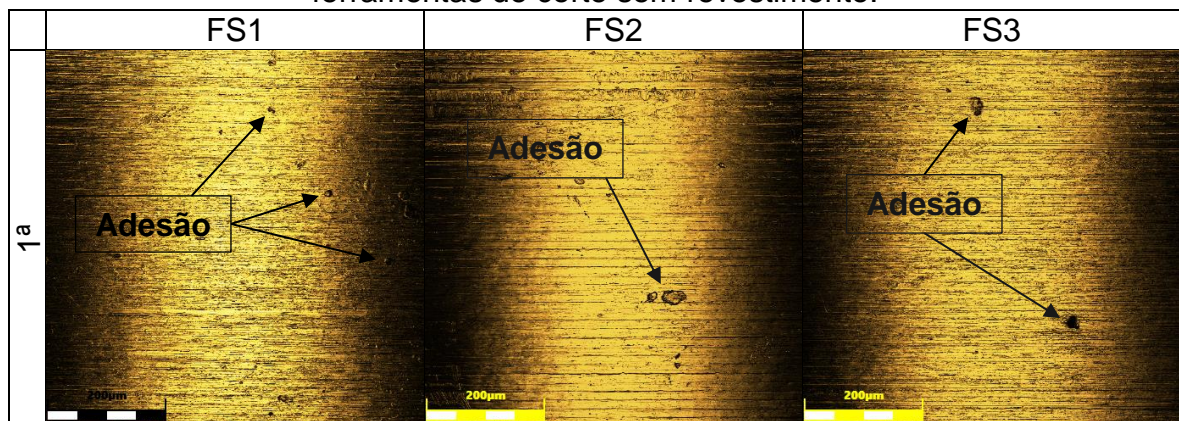
variação ocorreu devido ao desgaste da aresta de corte e o desgaste de flanco, alterando a geometria da ponta de corte, como evidenciado na

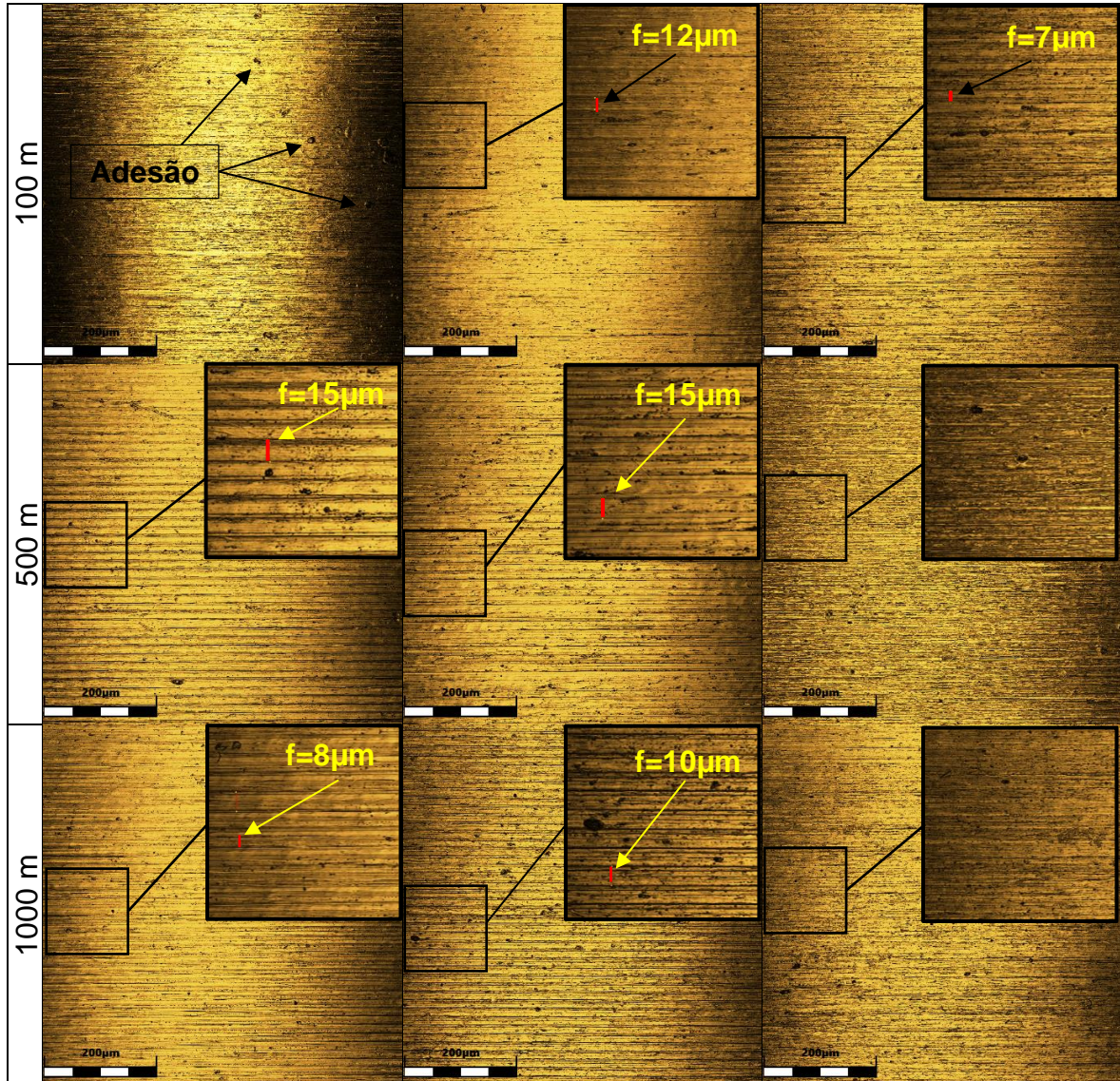
Figura 8.

Na análise das superfícies usinadas com a ferramenta FS2, na primeira peça foi observada adesão de material. Contudo, a superfície usinada após 100 m não apresentou marcas de avanço aparentes, diferentemente dos comprimentos de corte de 500 e 1000m, onde a superfície exibe marcas de avanço de  $f=0,015\text{mm/rot}$ . A Figura 16 apresenta as imagens da superfície usinada nos comprimentos de corte de 200, 300 e 400 m, com objetivo de verificar a presença de marcas de avanço na superfície usinada. Nessa análise, constatou-se a existência de marcas de avanços nesses comprimentos de corte. Observa-se, contudo, que as marcas de avanço apresentam variações, com medidas variando entre 13, 9 e  $7\mu\text{m}$ . Esse fenômeno foi devido a variação do raio de ponta de corte das ferramentas conforme revelado pela Figura 8, analisada anteriormente.

A ferramenta FS3 gerou superfícies com aspectos visuais semelhantes com o aumento do comprimento de corte, sem marcas de avanço aparentes, embora a primeira peça tenha revelado adesão de material na superfície usinada. O desgaste das ferramentas de corte afeta a integridade da superfície usinada, assim como a precisão dimensional das peças (Khan; Maity, 2019). No trabalho apresentado por Zareena (2012), na usinagem de ligas de titânio Ti-6Al-4V e CP-Ti (titânio comercialmente puro), ferramentas de corte sem revestimento apresentaram evidências de arrancamento de material e fluxo de cavaco na superfície usinada, afetando a qualidade da superfície e aumentando a rugosidade.

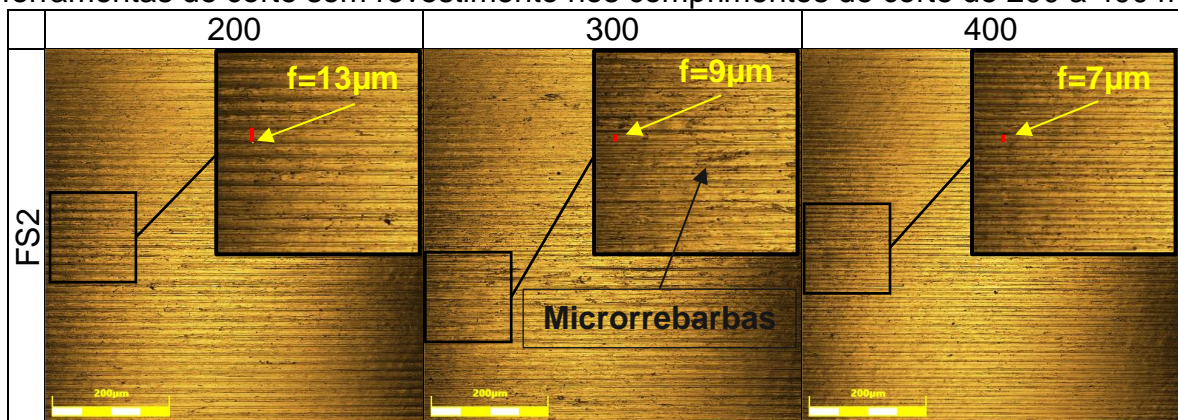
Figura 15: Imagens de microscopia laser 2D das superfícies usinadas com ferramentas de corte sem revestimento.





Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

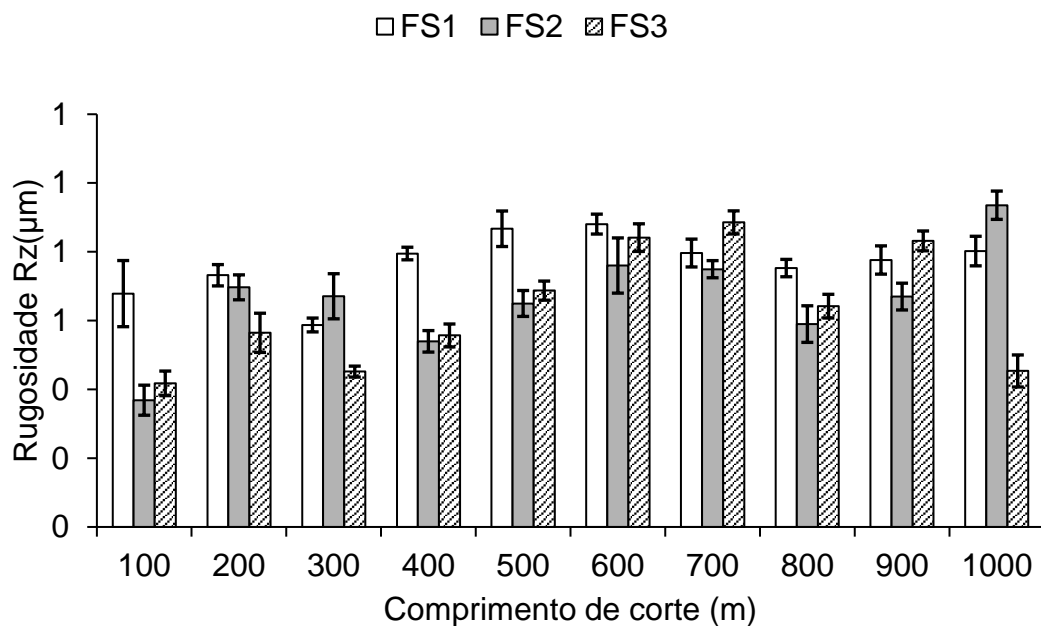
Figura 16: Imagens de microscopia laser 2D das superfícies usinadas com ferramentas de corte sem revestimento nos comprimentos de corte de 200 a 400 m



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Entretanto, após analisar as rugosidades Rz e Rq das superfícies usinadas, apresentadas nos gráficos na Figura 17 e Figura 18, respectivamente, o comportamento da rugosidade variou sem tendência definida com o aumento do comprimento de corte. Esse fenômeno pode ser atribuído a variação do raio de ponta, também sem tendência definida, associado ao desgaste de flanco, observado nas ferramentas de corte nas análises anteriores.

Figura 17: Rugosidade Rz das superfícies usinadas com ferramentas de corte sem revestimento.



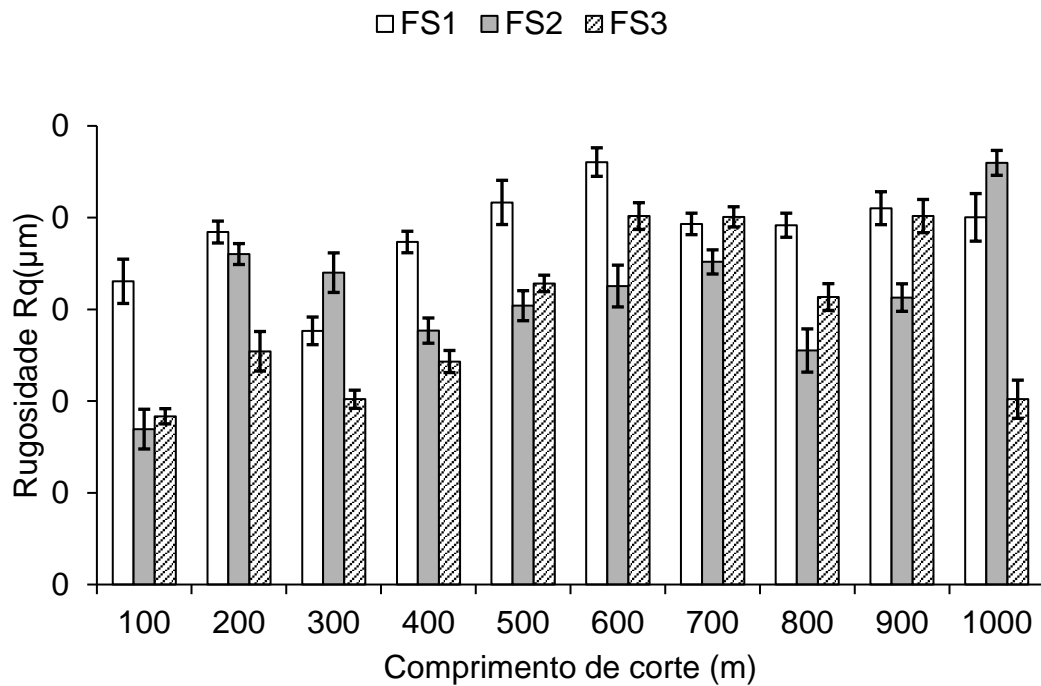
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Nas análises de rugosidade, o parâmetro Rq revelou maior sensibilidade a mudanças dos mecanismos de formação da superfície usinada em comparação ao parâmetro Rz. A maior sensibilidade de Rq em comparação a Rz ao desgaste de flanco e variação do raio de ponta de corte na usinagem das peças com o aumento do comprimento de corte pode ser atribuída à capacidade de Rq de capturar pequenas variações e irregularidades na superfície usinada, enquanto Rz, sendo uma média das maiores distâncias entre picos e vales, responde mais lentamente às variações contínuas e menos acentuadas. Portanto, Rq revelou nessa pesquisa ser um indicador mais imediato e sensível da degradação gradual da qualidade da superfície usinada à medida que o desgaste da ferramenta de corte varia.

Além disso, as diferenças de rugosidade para um mesmo comprimento de corte foram devidas as ferramentas de corte não apresentarem comportamento

regular durante a usinagem, quando comparadas uma relação as outras, consequência da falta de revestimento, inviabilizando uma proteção eficiente contra a abrasão sofrida durante o processo de corte, variando o desgaste entre as ferramentas de corte, consequentemente resultando em diferentes rugosidades.

Figura 18: Rugosidade Rq das superfícies usinadas com ferramentas de corte sem revestimento.

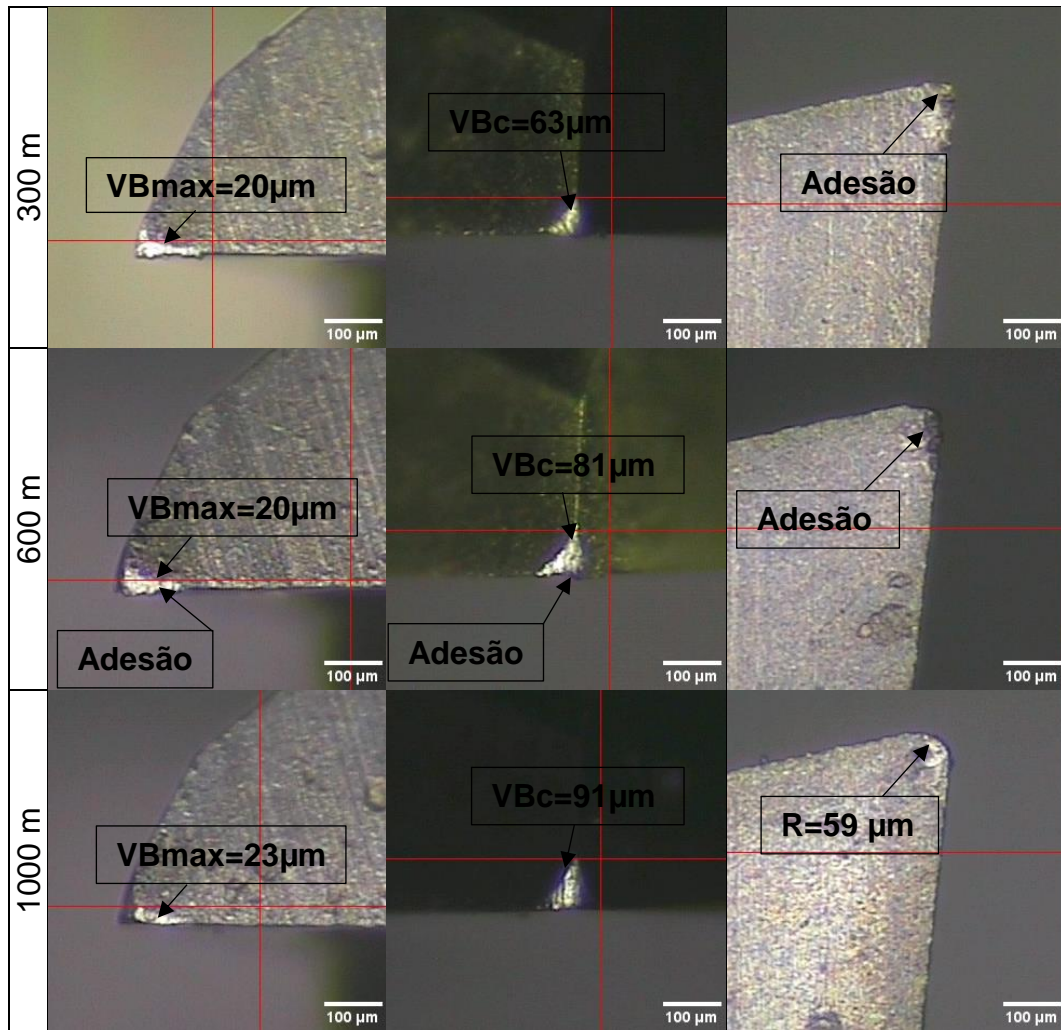


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

### 6.3 Desgaste das ferramentas de corte revestidas com cobertura de mono camada de AlCrN

Figura 19: Desgaste apresentado na ferramenta de corte FC1 revestida com AlCrN (Nitreto de Cromo e Alumínio)

Superfície de flanco	Ponta de corte	Superfície de saída
----------------------	----------------	---------------------



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A Figura 19 apresenta as imagens da superfície principal de folga (SPF), superfície de saída (SS) e ponta de corte das ferramentas revestidas com AlCrN. A análise das imagens permitiu identificar o desgaste de flanco, bem como adesão de material na superfície de flanco, evidenciado por um ressalto após a aresta principal de corte. Além disso, foi observada uma área escura na superfície de saída, indicando a presença de adesão de material, conforme demonstrado nas imagens da Figura 19.

Na Figura 20, são apresentadas as imagens da FC2, evidenciando a evolução do desgaste de flanco e ponta de corte. Observou-se também a variação do raio de ponta da ferramenta de corte. Esta variação pode ser atribuída ao desgaste progressivo do flanco associado ao desgaste da aresta de corte.

O mecanismo de desgaste predominante nas ferramentas revestidas com AlCrN foi a adesão (*Attrition*), como evidenciado pelas marcas ásperas na superfície de folga primária e secundária, conforme apresentado na Figura 21. Também ocorreu

o desgaste por abrasão sendo evidenciado somente na superfície de folga primária da ferramenta FC1.

A Figura 22 apresenta o gráfico do comportamento do desgaste de flanco com o aumento do comprimento de corte. A análise revelou uma tendência do aumento do desgaste de flanco e com a ferramenta FC3 apresentando o maior desgaste a partir de 400 m. Estes resultados também revelaram que o desgaste de flanco não ocorreu na mesma escala entre as três ferramentas de corte ensaiadas. Com o aumento do desgaste de flanco houve a remoção parcial da camada de revestimento aplicada as ferramentas de corte. Dessa forma, as ferramentas passaram a apresentar comportamentos dependentes do grau de cobertura ainda apresentada por cada uma, resultando nas diferenças do desgaste observadas com a variação do comprimento de corte.

A Figura 23 apresenta a análise do raio de ponta da ferramenta, onde o desgaste de flanco associado ao desgaste da aresta de corte foi responsável pela alteração da geometria da ponta de corte. A variação observada no raio de ponta ocorreu devido ao lascamento da aresta principal de corte. Além disso, observa-se na Figura 24 que a área de desgaste de flanco é similar para as três ferramentas de corte.

A variação da área do desgaste de flanco ocorre devido ao desgaste da aresta de corte. Conforme aumenta o comprimento de corte, observa-se que não há constância na área do desgaste. Isso se deve ao desgaste da aresta de corte e o desgaste de flanco, que aumenta o raio de ponta da ferramenta de corte, resultando em variações na área de desgaste de flanco.

Figura 20: Desgaste apresentado na ferramenta de corte FC2 revestida com AlCrN (Nitreto de Cromo e Alumínio)

(Continua)

	Superfície de flanco	Ponta de corte	Superfície de saída
--	----------------------	----------------	---------------------

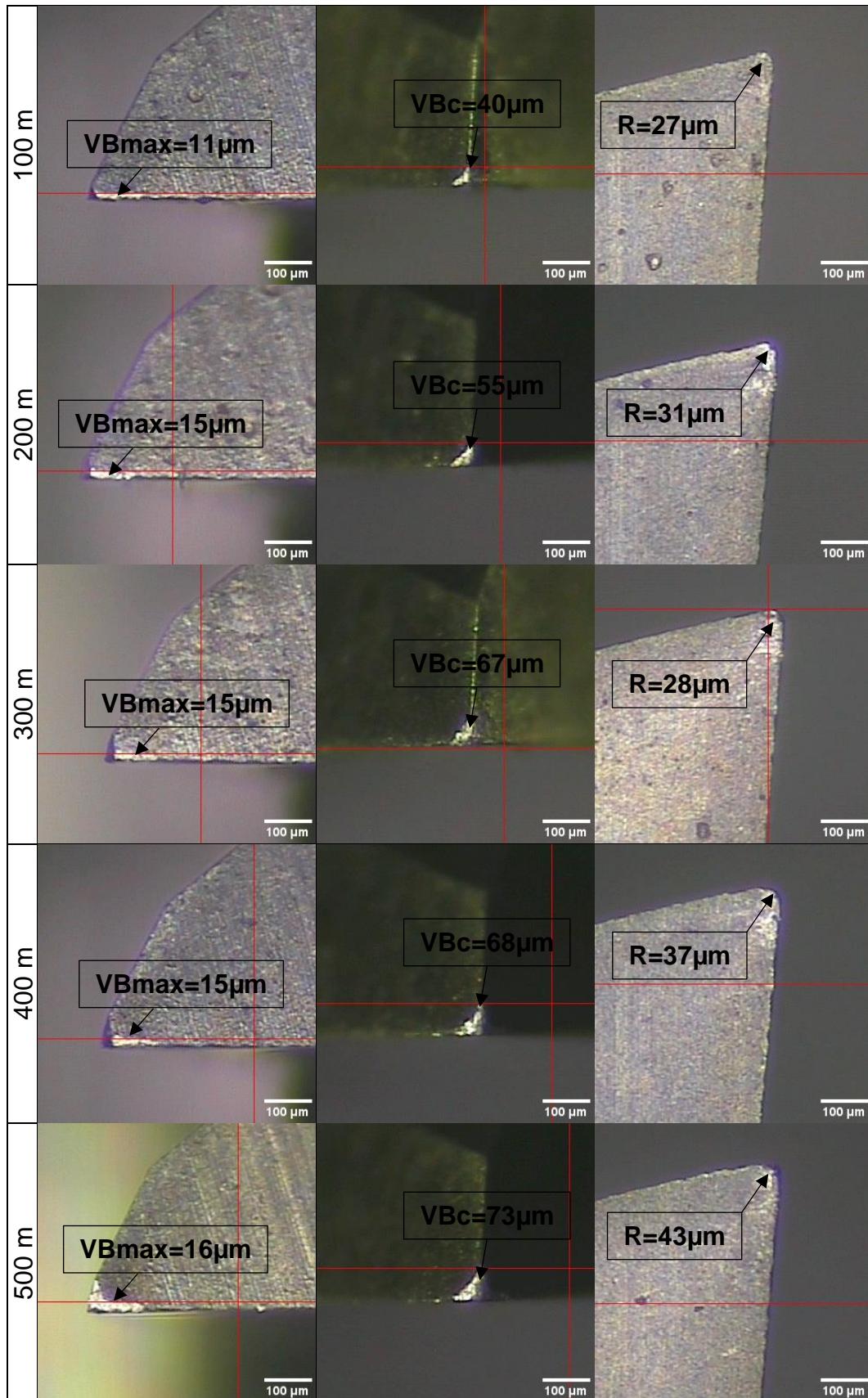
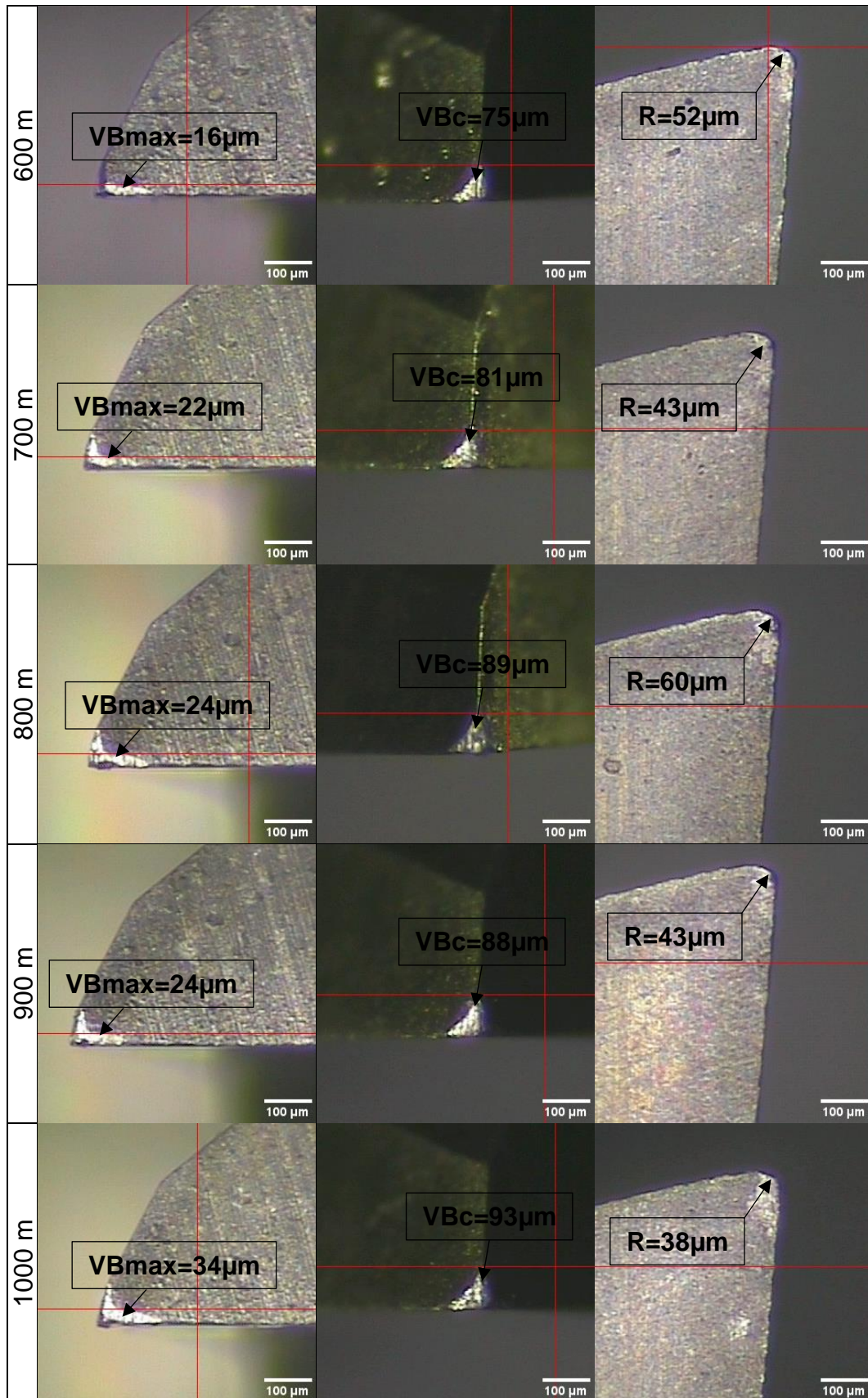


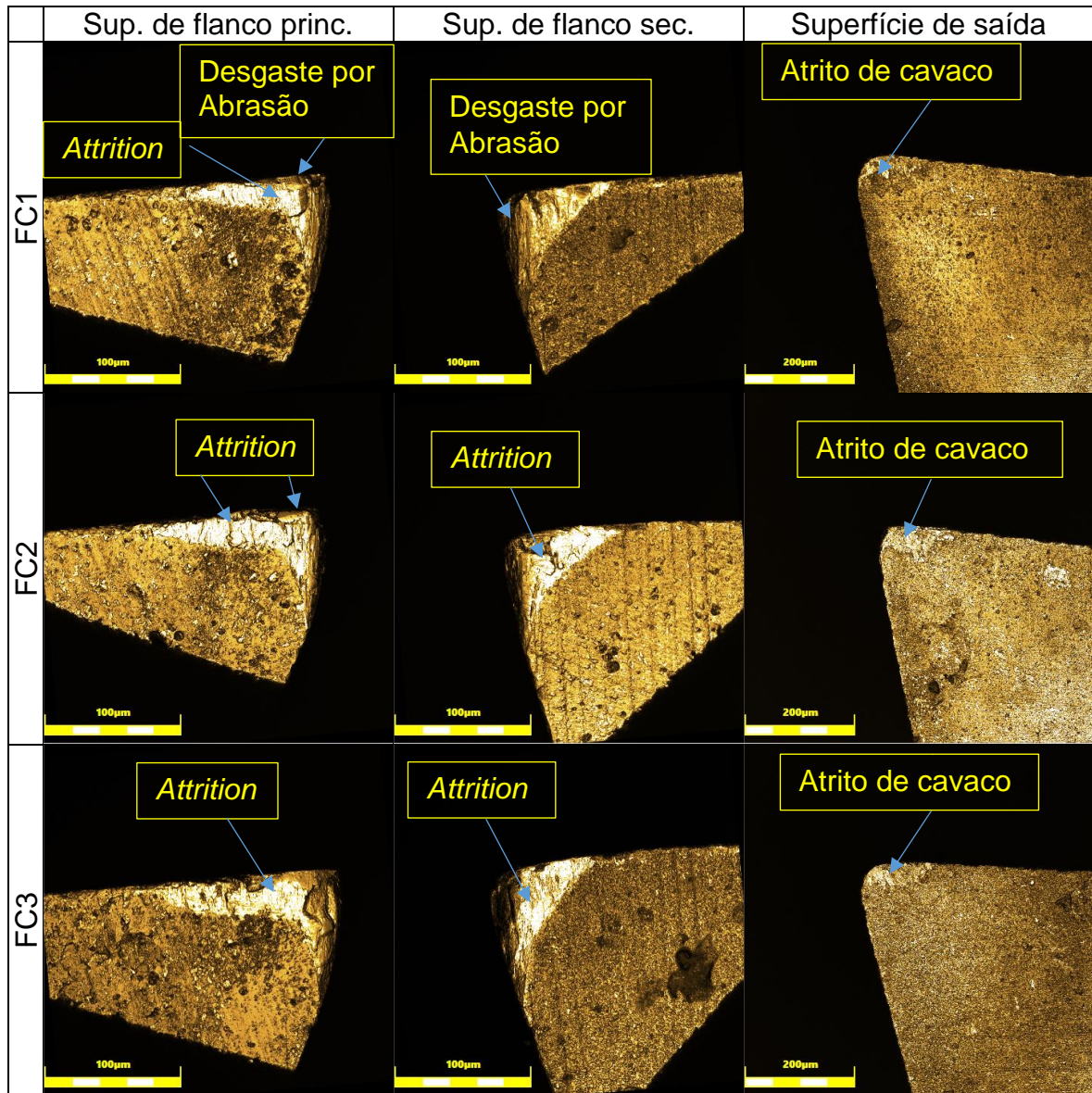
Figura 20: Desgaste apresentado na ferramenta de corte FC2 revestida com AlCrN (Nitreto de Cromo e Alumínio)

(Conclusão)



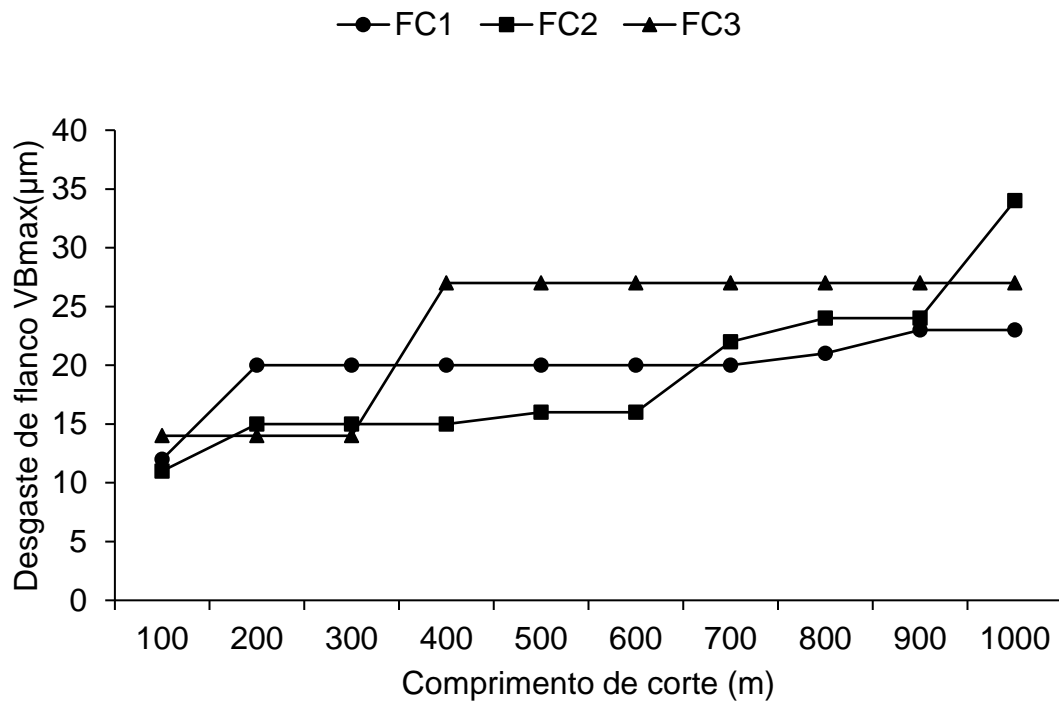
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 21: Imagens de microscopia laser da superfície de folga primária (SFP), superfície de folga secundária (SFS) e superfície de saída (SS) das ferramentas de corte revestidas com AlCrN após usar 1000 m de comprimento de corte.



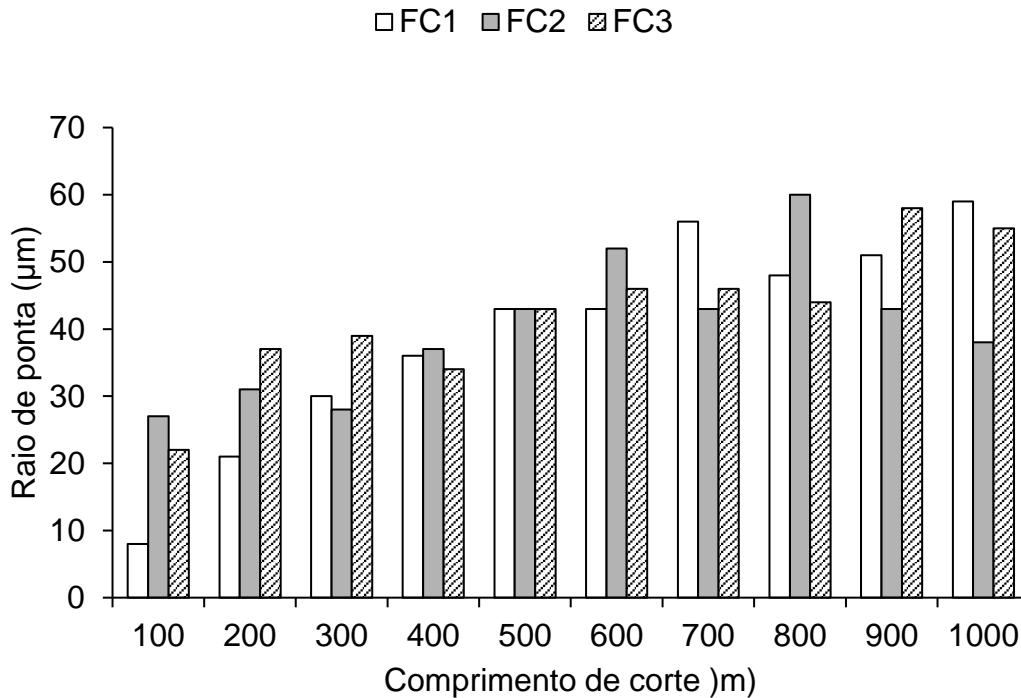
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 22: Desgaste de flanco das ferramentas de corte revestida com AlCrN



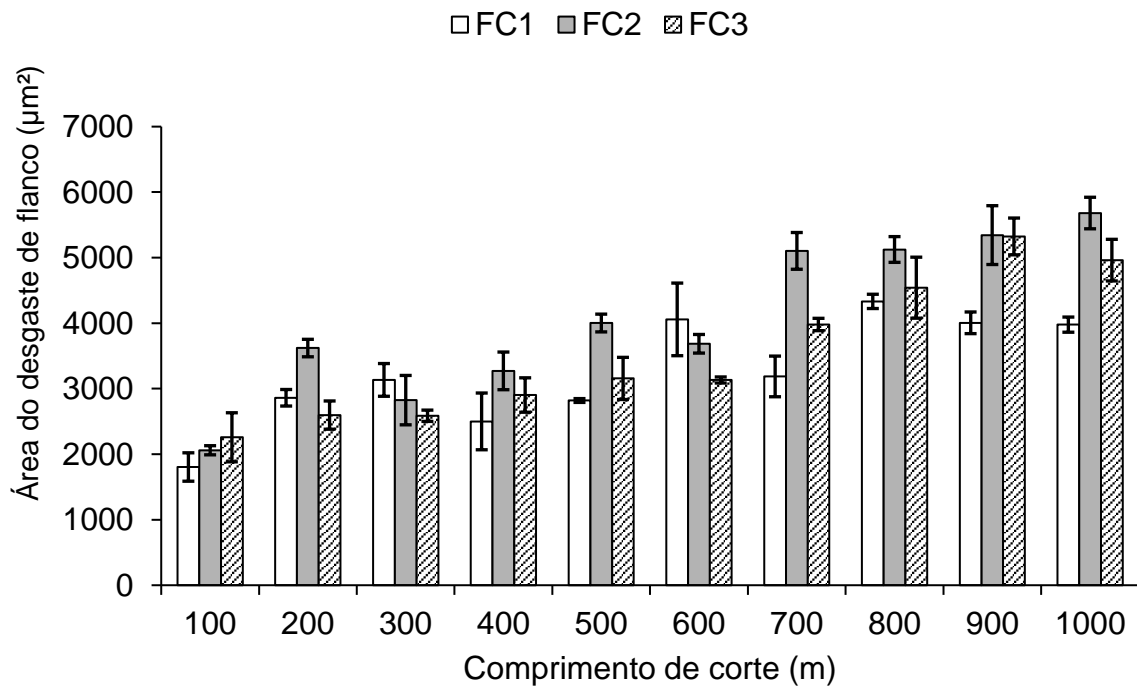
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 23: Raio de ponta da ferramenta de corte com revestimento AlCrN



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 24: Área do desgaste de flanco das ferramentas revestida com AlCrN



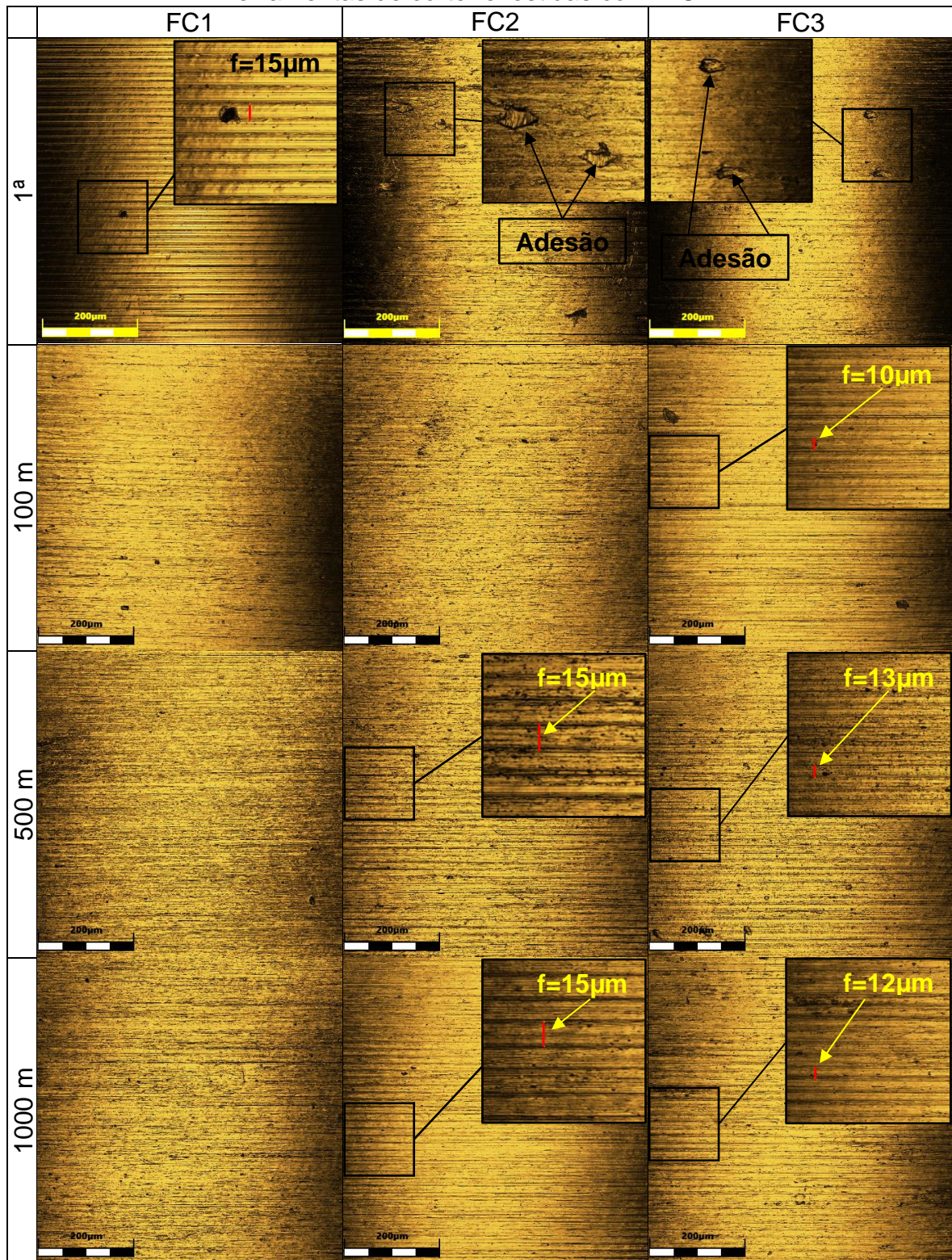
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

#### 6.4 Análise da superfície usinada pelas ferramentas de corte revestidas com AlCrN.

Na Figura 25 são apresentadas as imagens das superfícies usinadas pelas ferramentas de corte FC1, FC2 e FC3, revestidas com AlCrN. Ao analisar a FC1, a primeira peça apresentou marcas de avanço com espaçamento médio de 0,015 mm., contudo, para os demais comprimentos de corte não foram observadas marcas de avanço aparentes. Este comportamento pode ser atribuído ao desgaste de flanco associado ao desgaste da aresta de corte, resultando no arredondamento da ponta de corte, conforme aumento do raio de ponta revelado pela Figura 23

Com relação as ferramentas de corte FC2 e FC3, foram observados que as primeiras peças usinadas por cada ferramenta apresentaram adesão de material na superfície usinada, sem marcas de avanço aparentes.

Figura 25: Imagens de microscopia laser 2D das superfícies usinadas com ferramentas de corte revestidas com AlCrN.

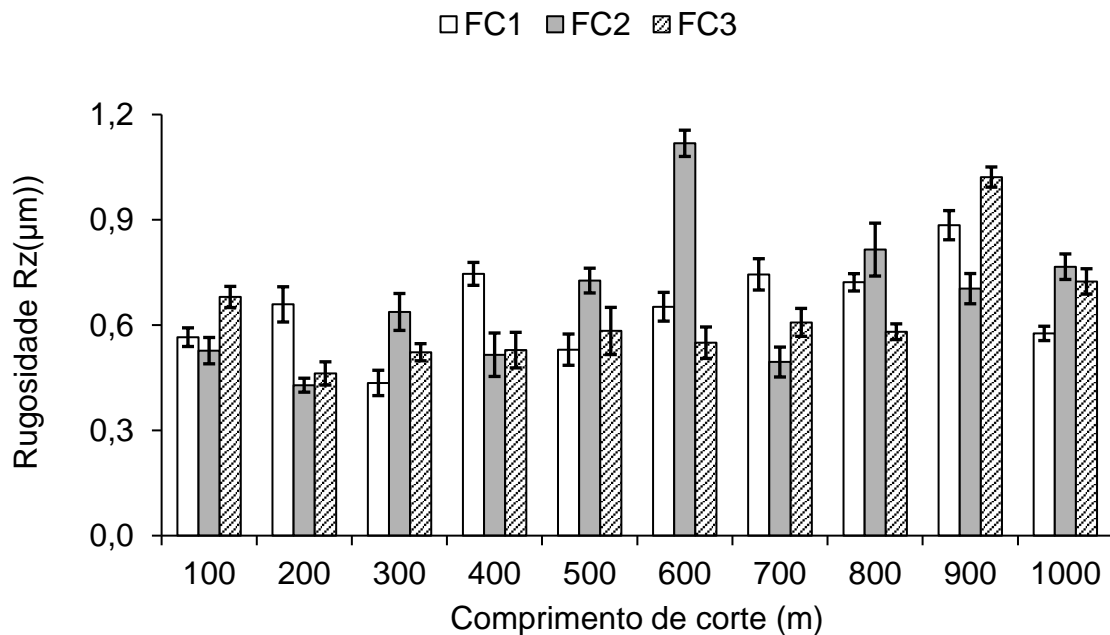


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Nos demais comprimentos de corte as marcas de avanço foram notadas, porém os espaçamentos medidos na superfície usinada pela FC3 não coincidiram com o

valor do avanço adotado nos experimentos. O fenômeno também pode ser explicado pelo aumento do raio de ponta da ferramenta de corte com o aumento do desgaste de flanco, enquanto para o FC2 a variação dos raios de ponta foi equivalente nos comprimentos de corte de 500 e 1000 m (Figura 23).

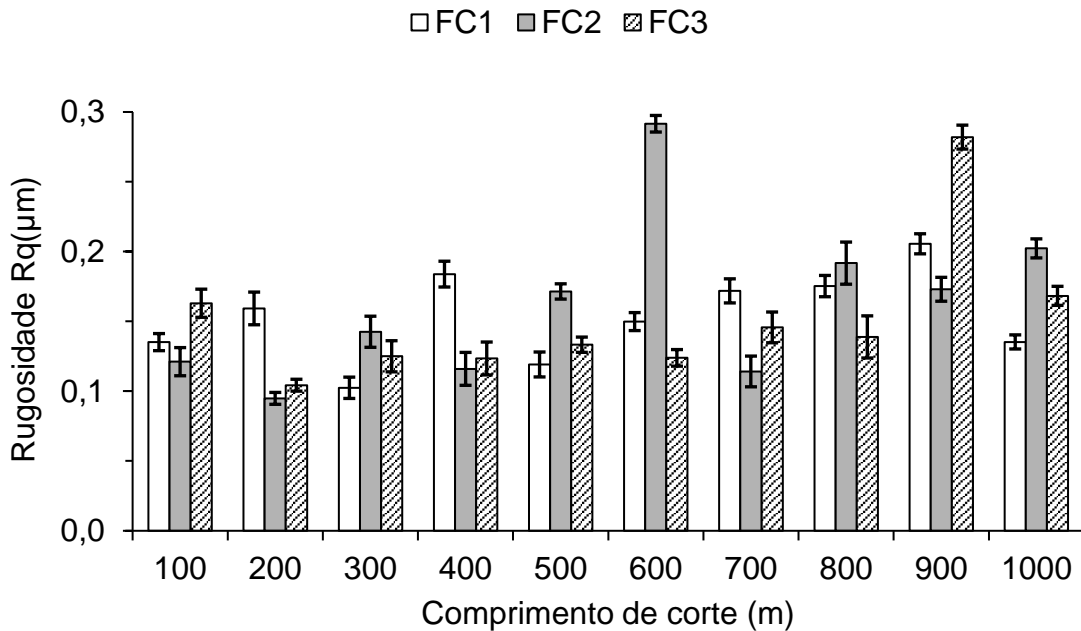
Figura 26: Rugosidade Rz das superfícies usinadas com ferramentas de corte revestidas com AlCrN.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A Figura 26 e Figura 27 apresentam os gráficos da rugosidade Rz e Rq, respectivamente, revelando a variação das irregularidades da superfície usinada. A ferramenta FC3 revelou melhor estabilidade da formação da rugosidade quando comparada as rugosidades geradas pelas demais ferramentas, pois apresentou uma variação menor do raio de ponta com o aumento do comprimento de corte (Figura 24). Além disso, diferentemente do observado na análise das rugosidades medidas nas superfícies usinadas com ferramentas sem revestimento, os parâmetros de rugosidade adotados revelaram semelhança na sensibilidade de avaliação do acabamento das peças. Esse resultado revela que as ferramentas de corte revestidas com AlCrN foram capazes de resistir mais ao desgaste quando comparadas as ferramentas de corte sem revestimento. As afirmações também são evidenciadas pelo menor desgaste de flanco apresentado pelas ferramentas de corte revestidas com AlCrN na comparação dos gráficos de desgaste de franco das Figura 12 e Figura 22.

Figura 27: Rugosidade Rq das superfícies usinadas com ferramentas de corte revestidas com AlCrN.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

## 6.5 Desgaste das ferramentas de corte revestidas com cobertura de multicamada de TiCN+AlCrN

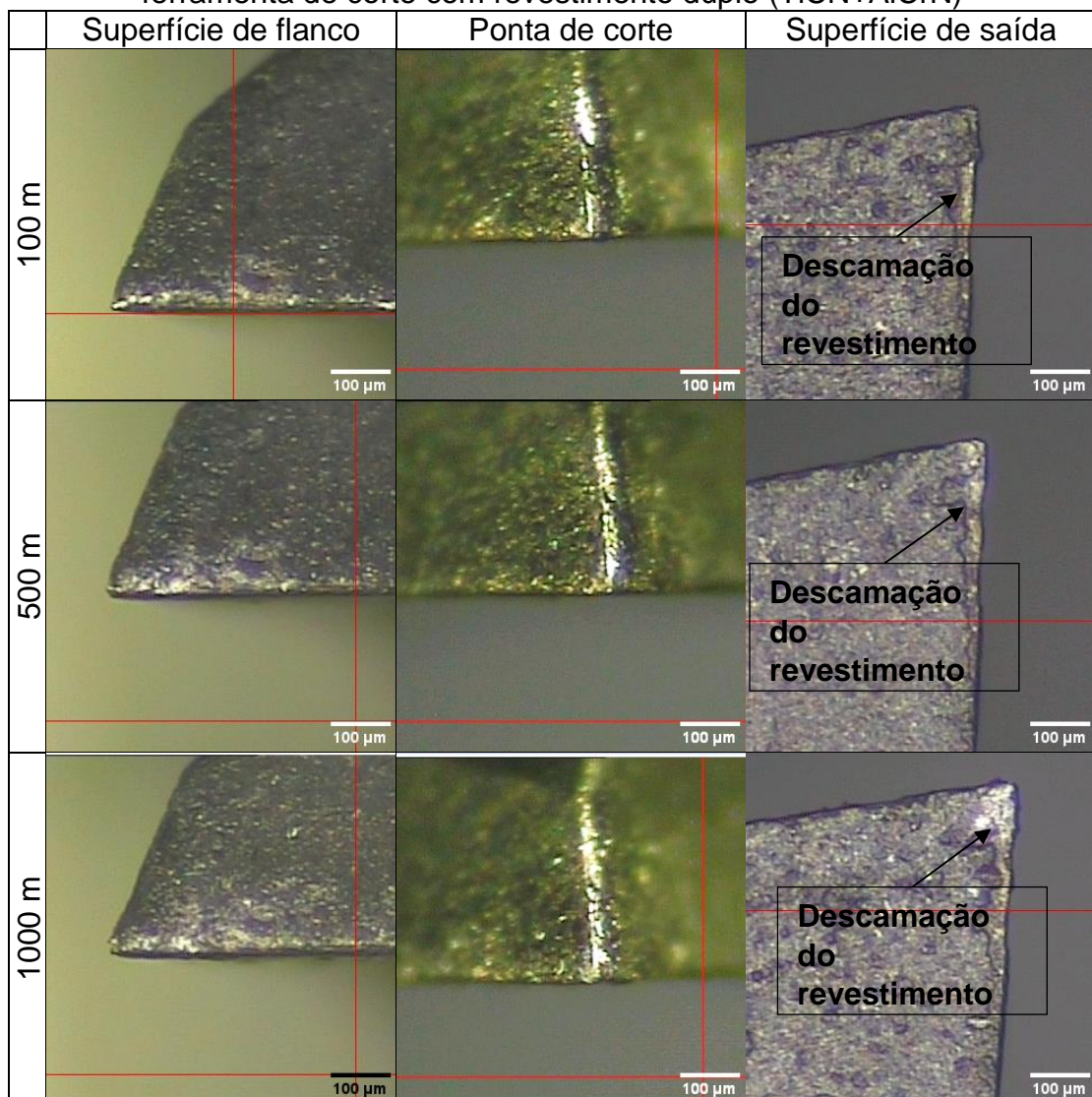
A Figura 28 apresenta imagens das superfícies de folga e saída, assim como ponta de corte das ferramentas de corte com revestimento de multicamadas de TiCN+AlCrN. A análise qualitativa das imagens revelou que as ferramentas não apresentaram desgaste. A única ocorrência observada na ferramenta foi uma aparente descamação do revestimento, a qual não indicou efeito no comportamento da ferramenta durante a usinagem, conforme será observado na análise das superfícies usinadas do tópico seguinte.

Ao examinar a Figura 29, nota-se a presença de marcas de fluxo de cavaco na superfície de saída (SS) e na superfície de folga primária (SFP). Em contrapartida, o revestimento apresentou minúsculos poros resultantes do processo de deposição, os quais podem ser atribuídos à reatividade do carbono presente na superfície do material. Além disso, esses poros podem ser causados pelo aquecimento localizado e intenso gerado pelo arco durante o processo de revestimento. originado do processo

de revestimento, podendo ser devido a reatividade do carbono (Yan Li, 2023; Ch Sateesh Kumar, 2017).

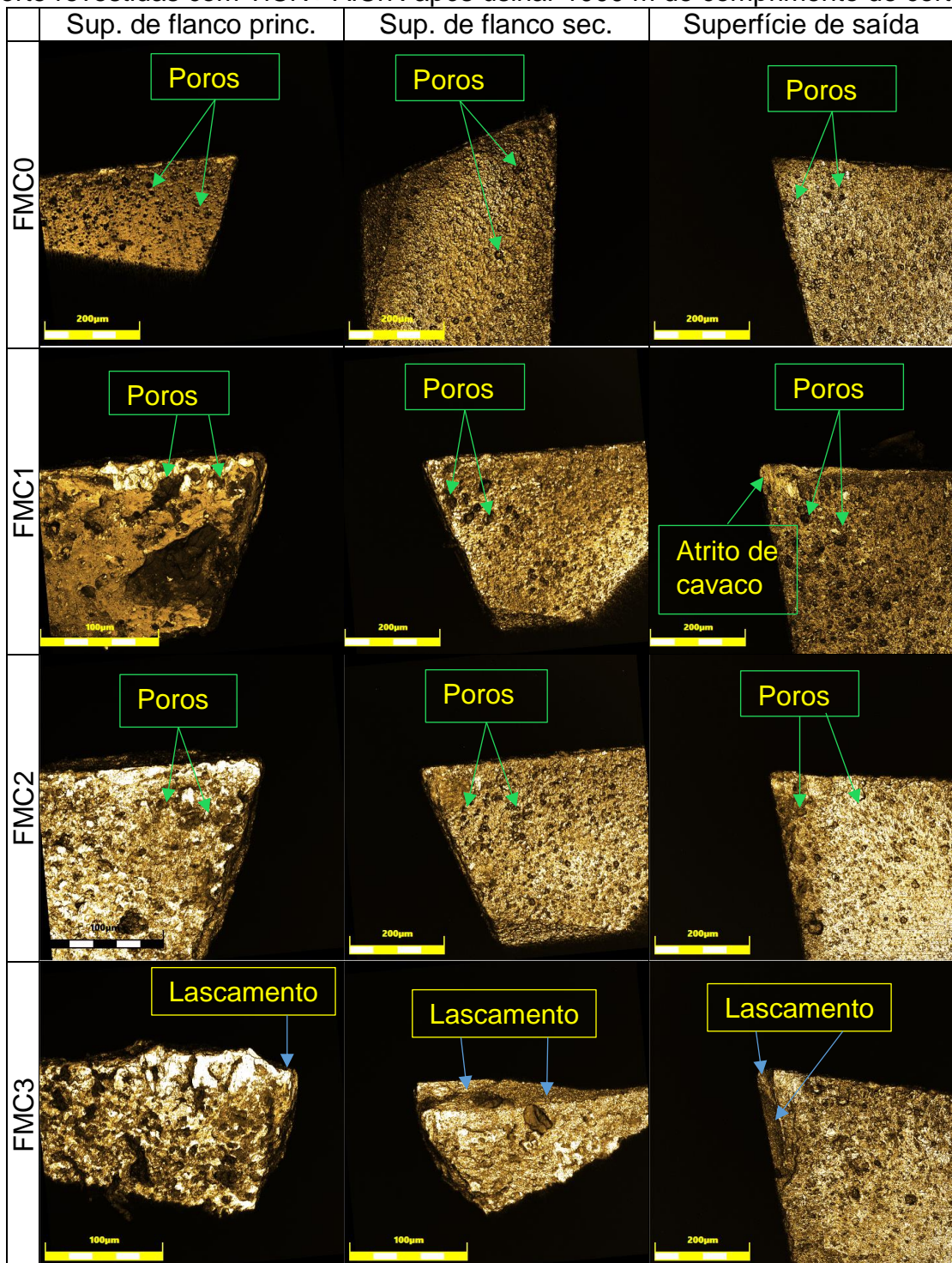
Essa análise indica que o revestimento TiCN+AlCrN foi eficaz na proteção das ferramentas de corte, minimizando o desgaste visível mesmo após longos comprimentos de corte. A presença de poros, embora identificada, não comprometeu significativamente o desempenho das ferramentas. A leve descamação observada sugere que, embora o revestimento seja robusto, há áreas que podem estar sujeitas a falhas menores sob certas condições operacionais. No entanto, esses defeitos não foram suficientes para impactar significativamente a funcionalidade das ferramentas de corte, conforme os resultados indicaram.

Figura 28: Aresta principal de corte, ponta de corte e superfície de saída da ferramenta de corte com revestimento duplo (TiCN+AlCrN)



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

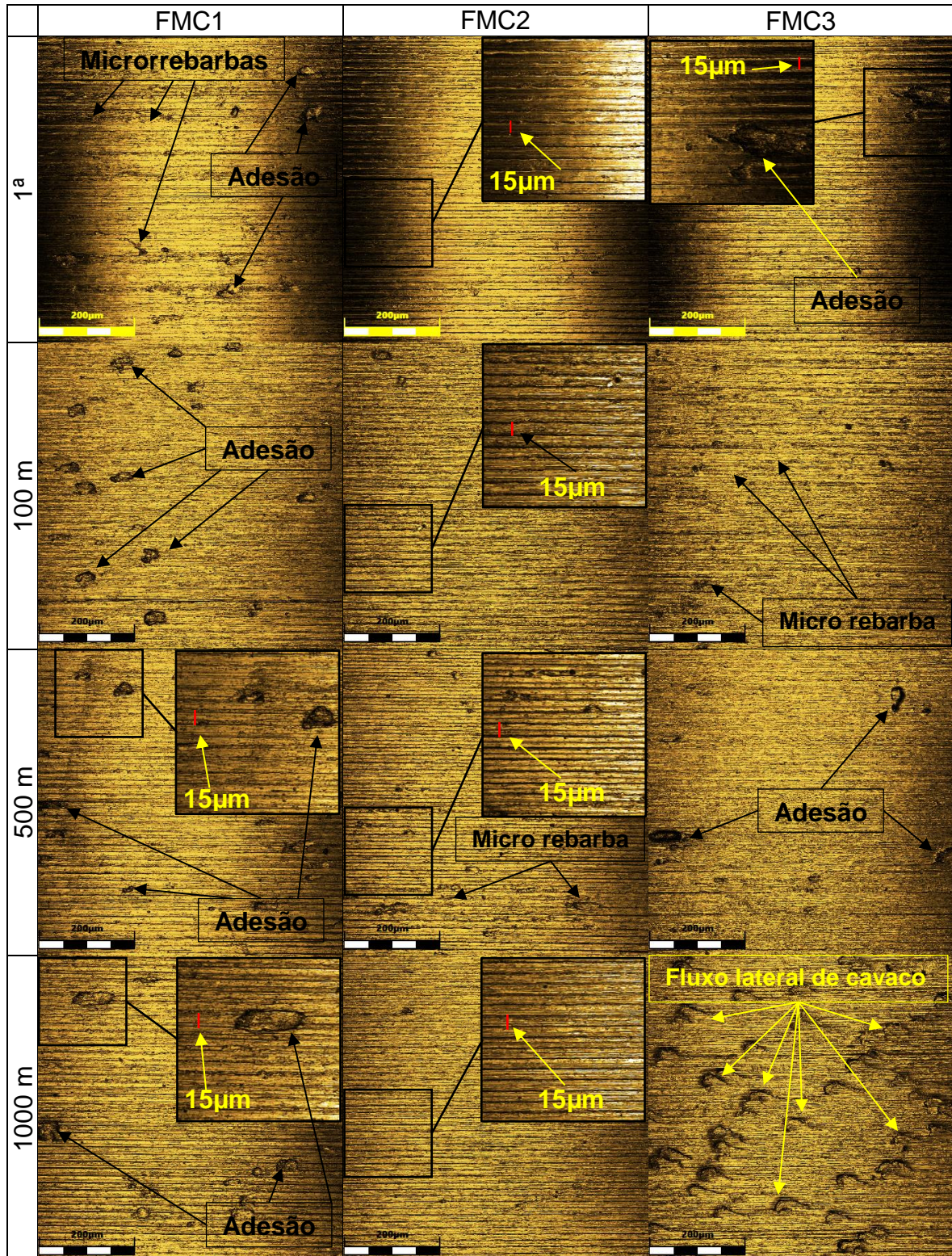
Figura 29: Imagens de microscopia laser da superfície de folga primária (SFP), superfície de folga secundária (SFS) e superfície de saída (SS) das ferramentas de corte revestidas com TiCN+ AlCrN após usinar 1000 m de comprimento de corte.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

## 6.6 Avaliando a superfície usinada das ferramentas de corte revestidas com TiCN+AlCrN

Figura 30: Imagens de microscopia laser 2D das superfícies usinadas com ferramentas de corte revestidas com TiCN+AlCrN.

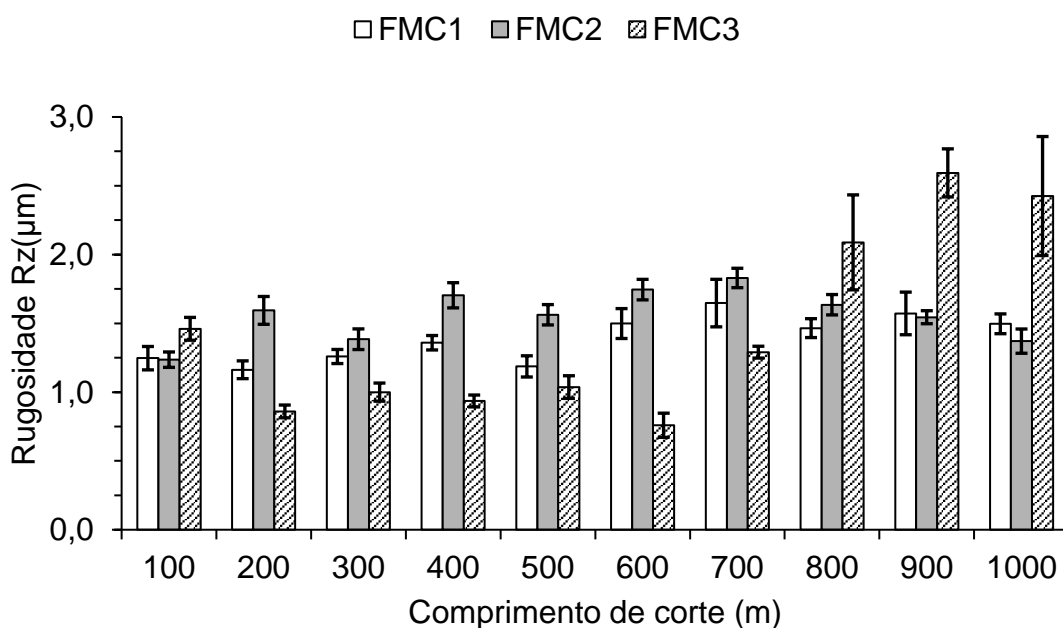


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Na Figura 30, são apresentadas as imagens das superfícies usinadas com ferramentas de corte revestidas com TiCN+AlCrN. As superfícies usinadas com a ferramenta FMC1 apresentaram adesão de material nos comprimentos de corte avaliados. Além disso, na primeira peça usinada foram observadas microrrebarbas. As superfícies usinadas com a ferramenta FMC2 apresentaram menos pontos de adesão de material quando comparadas as superfícies geradas pelas outras ferramentas de corte, e marcas de avanço definidas. A ferramenta FMC3 revelou pontos de adesão de material em alguns comprimentos de corte e microrrebarbas em 100 m usinados. No entanto, para o comprimento de corte de 1000 m, foi observado fluxo lateral de cavaco, originado do lascamento da aresta de corte secundária (Figura 29).

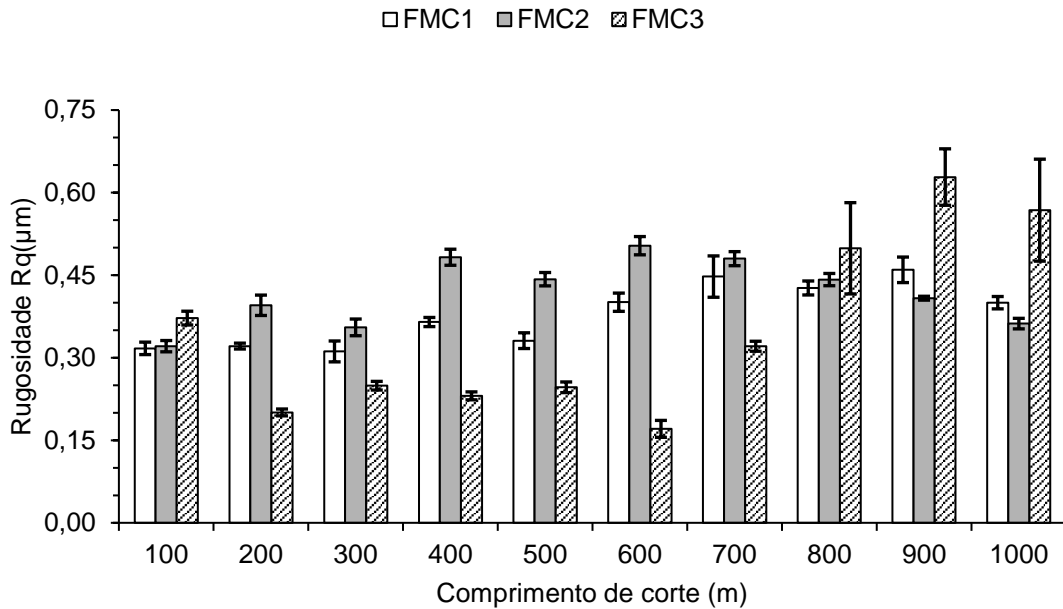
As Figura 31 e Figura 32 apresentam os gráficos de rugosidade Rz e Rq. A ferramenta FMC3 apresentou maior variação da rugosidade, principalmente nos comprimentos de corte finais devido a presença de fluxo lateral de cavaco nas superfícies usinadas, causado pelo lascamento da aresta de corte secundária. Assim como para as ferramentas de corte revestidas com AlCrN, os parâmetros de rugosidade adotados também revelaram sensibilidades semelhantes para diferenciar as superfícies usinadas em diferentes comprimentos de corte.

Figura 31: Rugosidade Rz das superfícies usinadas com ferramentas de corte revestidas com TiCN+AlCrN.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 32: Rugosidade Rq das superfícies usinadas com ferramentas de corte revestidas com TiCN+AlCrN.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

### 6.7 Variação da velocidade de corte para as ferramentas de corte revestidas com cobertura de multicamadas de TiCN+AlCrN

Conforme destacado por Kosaraju (2012), a velocidade de corte e profundidade de corte são parâmetros que influenciam a força de corte e a temperatura durante a usinagem. A força de corte desempenha um papel crucial na energia consumida e na potência necessária para a deformação da ferramenta e da peça, sendo essencial para entender a mecânica do processo de usinagem. Em especial, na usinagem de ligas de titânio, altas velocidade de corte podem ocasionar um rápido desgaste da aresta de corte, potencialmente resultando em falhas catastróficas, devido ao aumento significativo da temperatura concentrada próxima à ponta de corte. A ordem dos parâmetros que influenciam a temperatura de corte é geralmente a se seguinte: velocidade de corte, profundidade de corte e avanço.

Com o aumento da velocidade de corte há a tendência de aumento do desgaste da ferramenta de corte, uma vez que demanda maior energia mecânica, gerando, conseqüentemente, mais calor na ponta de corte (Abbas *et al.*, 2021). Dada a

ausência de desgaste visível nas ferramentas com revestimento duplo, com exceção do lascamento da aresta de corte secundária observado na ferramenta de corte FC3, experimentos adicionais com novas ferramentas de corte revestidas com TiCN+AlCrN foram conduzidos com velocidades de corte de 25, 30 e 35 m/min, com o intuito de investigar a resistência ao desgaste e a durabilidade da ferramenta com esse revestimento para fins de aumento de produtividade da empresa demandante dessa pesquisa. O comprimento de corte final de 3000 m foi escolhido levando em consideração a média final de comprimento de corte no qual as ferramentas de corte sem revestimento, atualmente empregadas pela empresa demandante, precisam ser substituídas para manter a qualidade das peças produzidas.

Nesse sentido, a Figura 33 apresenta imagens da ponta de corte (PC) e das superfícies de folga principal (SPF) e de saída (SS) da ferramenta de corte usinando com velocidade de corte de 25 m/min até o comprimento de corte de 3000 m. As imagens foram captadas a partir de 100 m e posteriormente a cada 500 m usinados. A avaliação das imagens não revelou desgastes visíveis até o comprimento de corte final do experimento.

A Figura 34 apresenta imagens da ponta de corte (PC) e das superfícies de folga principal (SPF) e de saída (SS) da ferramenta de corte usinando com velocidade de corte de 30 m/min até o comprimento de corte de 1900 m. A ferramenta não evidenciou desgaste visível até o comprimento de corte 1800 m. Entretanto, no comprimento de corte de 1900 m, a ferramenta apresentou quebra da ponta de corte. Da mesma forma, na usinagem com 35 m/min (Figura 35) também houve quebra da ponta de corte da ferramenta, porém logo após usinar um comprimento de corte de 200 m.

Ao inserir uma ferramenta com revestimento TiCN+AlCrN no processo de torneamento interno de implantes dentários da empresa demandante, aplicando uma velocidade de corte de 25 m/min, foi possível produzir 2500 peças. Apesar de corresponder a um número de peças por ferramenta de corte menor que o produzido atualmente pela empresa demandante 3000 peças, utilizando ferramentas de corte de metal duro sem cobertura, é importante destacar que a velocidade de corte empregada pela empresa era menor (16 m/min). Sendo assim, a ferramenta de corte com revestimento duplo de TiCN+AlCrN operou com velocidade de corte 36% maior que a usualmente empregada pela empresa, representando a minimização do tempo nessa etapa de fabricação do implante dentário de cerca de 43%.

Figura 33: Avaliação do desgaste da ferramenta com revestimento duplo na velocidade de corte de 25m/min

(Continua)

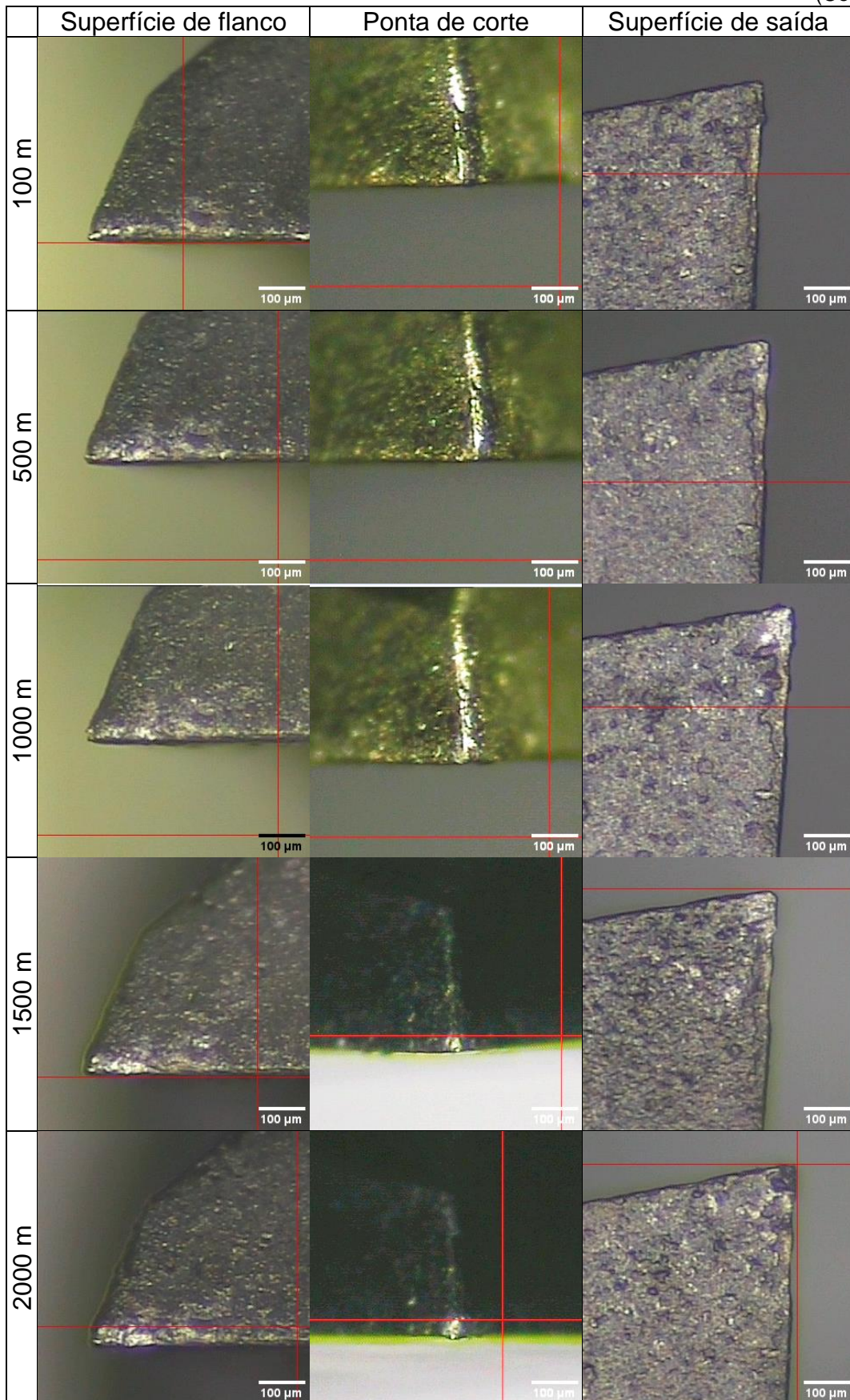
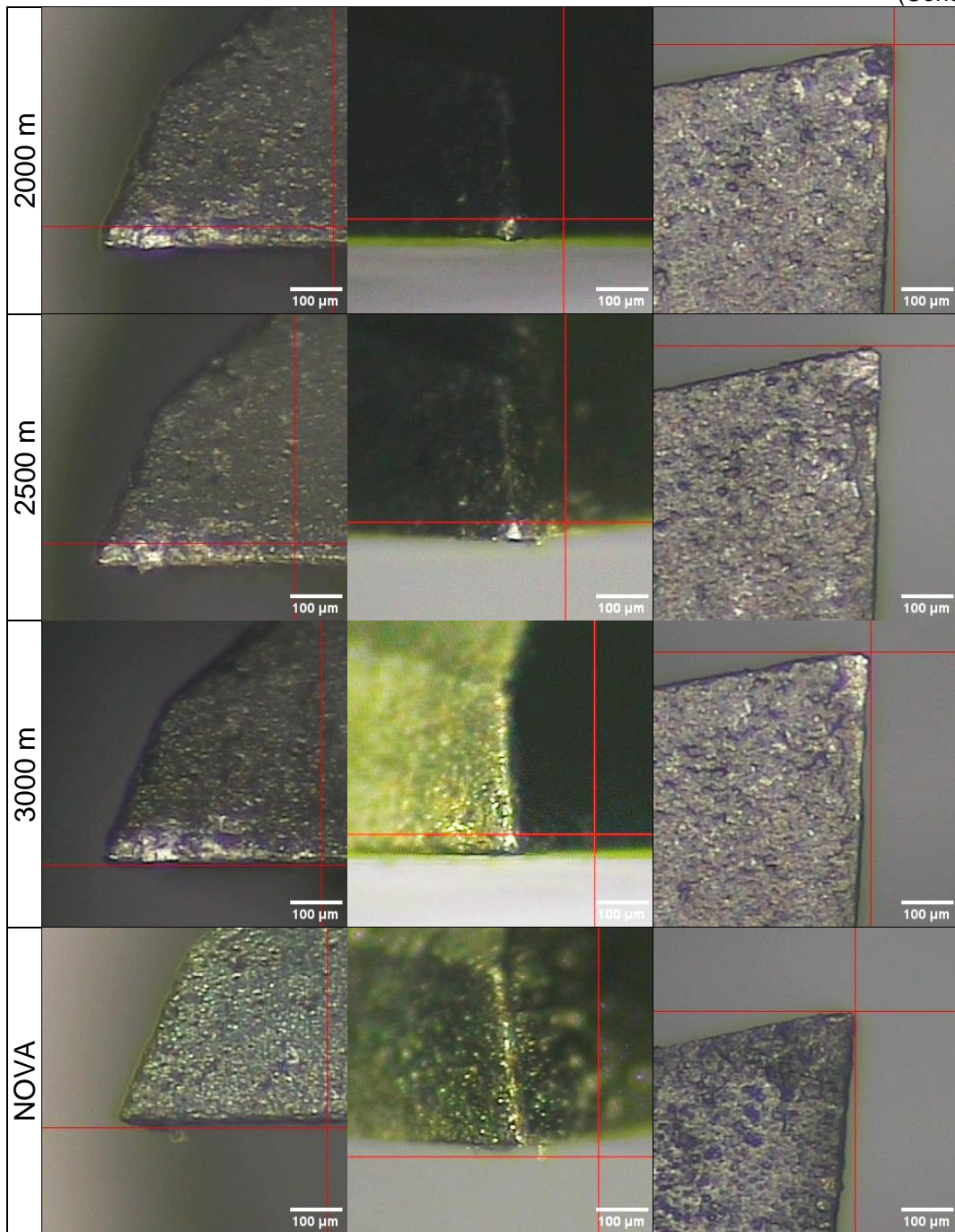


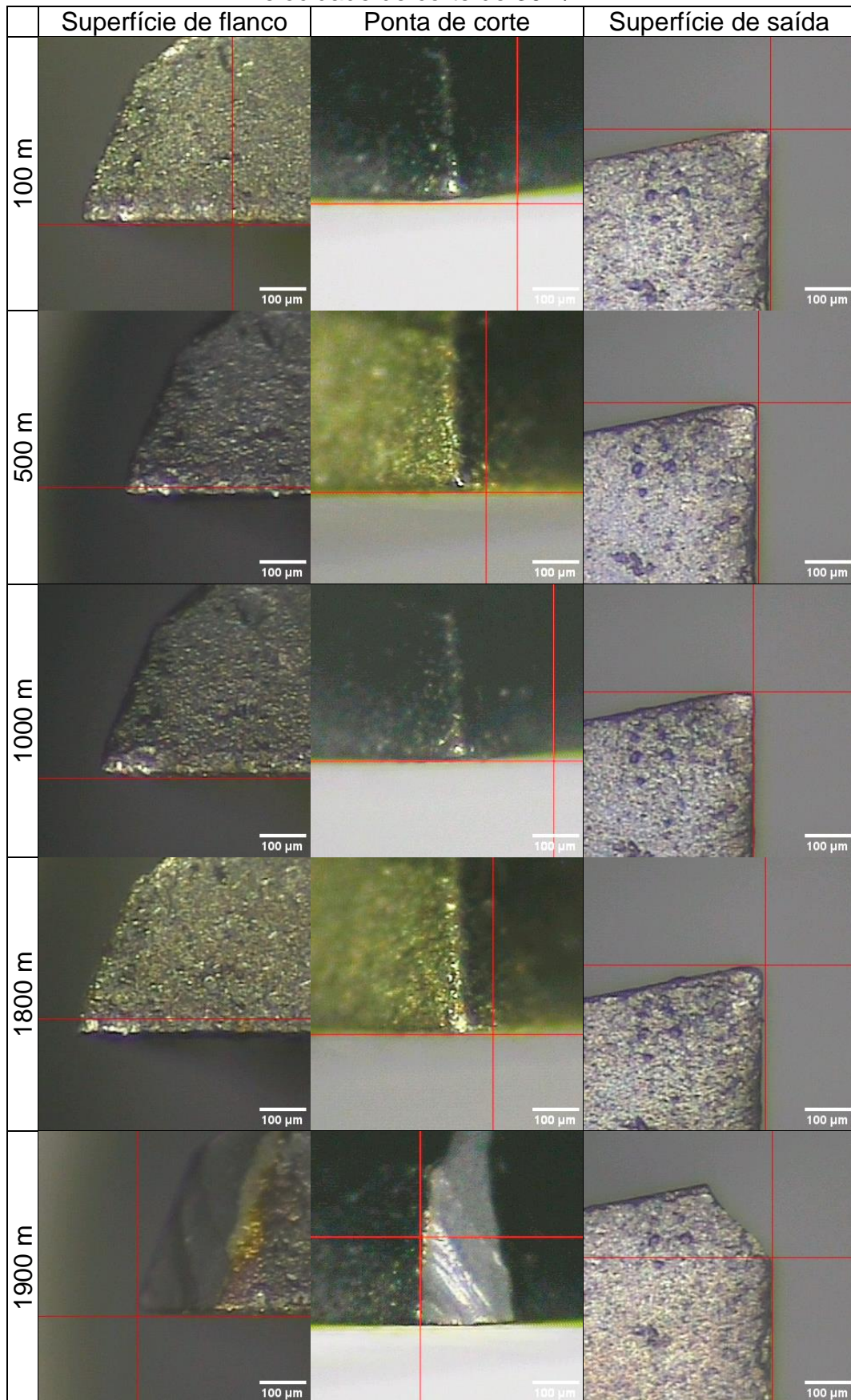
Figura 33: Avaliação do desgaste da ferramenta com revestimento duplo na velocidade de corte de 25m/min

(Conclusão)



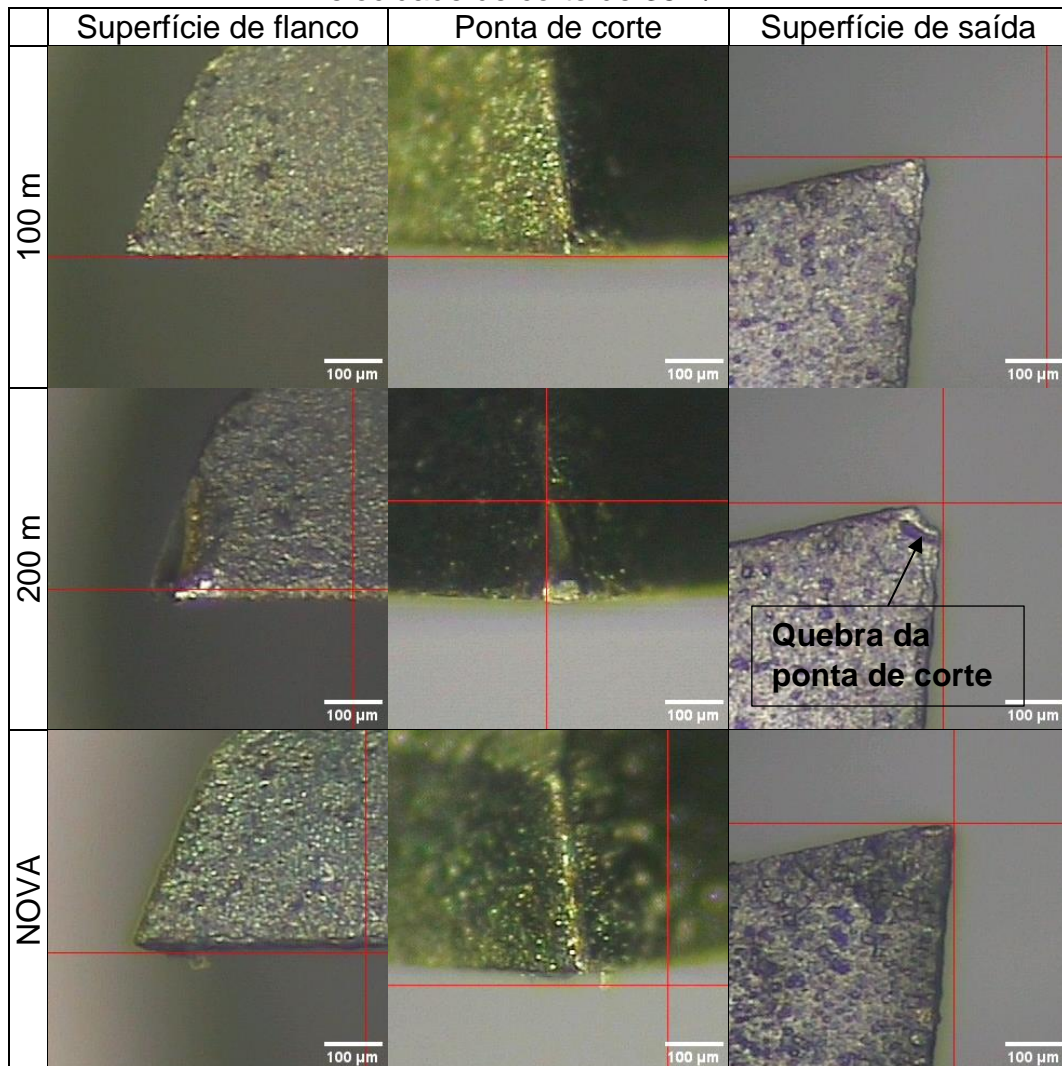
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 34: Avaliação do desgaste da ferramenta com revestimento duplo na velocidade de corte de 30m/min



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 35: Análise do desgaste da ferramenta com revestimento duplo com a velocidade de corte de 35m/min



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

## 7 CONCLUSÕES

Esta pesquisa visou contribuir para a compreensão do desempenho de ferramentas de corte de metal duro com diferentes revestimentos na usinagem de titânio biocompatível para produção de implantes dentários, mais especificamente a etapa de torneamento interno. O desgaste das ferramentas foi avaliado e com base nos resultados, as seguintes conclusões são apresentadas:

- Os desgastes de flanco observados na ferramenta de corte não revelam uma tendência no comportamento da rugosidade da superfície usinada;
- A alteração da geometria do raio de ponta da ferramenta exerce influência na rugosidade, pois variações nessa geometria refletiram diretamente na qualidade da superfície usinada;
- A ferramenta de corte sem revestimento apresentou o maior desgaste de flanco e variação do raio de ponta, indicando uma menor durabilidade em comparação com as ferramentas revestidas;
- A ferramenta revestida com AlCrN obteve resultados intermediários entre as ferramentas testadas, em termos da área e do desgaste de flanco (VBmax), obtendo 40% menor em comparação com a ferramenta não revestida;
- A ferramenta revestida com TiCN+AlCrN não apresentou desgaste aparente nas condições de usinagem aplicadas nessa pesquisa;
- A ferramenta revestida com TiCN+AlCrN apresentou a maior rugosidade devido à constância do raio de ponta, que não sofreu desgastes visíveis durante o processo de usinagem.
- Nas análises das velocidades de corte, a velocidade de corte de 25 m/min não apresenta avaria na ferramenta de corte. Contudo, para as velocidades de corte de 30 e 35m/min, ocorrem avarias com o aumento do comprimento de corte. O aumento da velocidade de corte deve ser avaliado conforme a necessidade da empresa, considerando se o objetivo é reduzir o tempo de produção ou minimizar o tempo de preparação da máquina-ferramenta.

## 7.1 Sugestões para trabalhos futuros

Após a conclusão deste trabalho, foram identificadas diversas oportunidades para a implementação e ampliação desta pesquisa, as quais se destacam:

- Realizar análises tribológicas dos revestimentos multicamadas de TiCN+AlCrN, com o objetivo de avaliar o comportamento do atrito, desgaste e resistência em condições severa de usinagem, correlacionando os resultados com a durabilidade da ferramenta
- Conduzir ensaios experimentais utilizando diferentes parâmetros de corte, especialmente variando as velocidades de corte, a fim de identificar as melhores condições operacionais para otimizar a eficiência do processo e a qualidade da superfície.
- Aumentar o comprimento de corte nos ensaios para avaliar de forma mais precisa o padrão de desgaste da ferramenta ao longo do tempo, buscando identificar mecanismo de falha predominantes sob diferentes condições.
- Realizar uma análise de custo-benefício do revestimento multicamadas TiCN+AlCrN, considerando o impacto da vida útil da ferramenta, a qualidade do acabamento superficial, a redução de paradas para troca de ferramentas e o custo dos revestimentos aplicados.

## REFERÊNCIAS

- ABBAS, Adel T. *et al.* Fundamental investigation into tool wear and surface quality in high-speed machining of Ti6Al4V alloy. **Materials**, [s. l.], v. 14, n. 23, p. 7128, 2021.
- AGRAWAL, Chetan *et al.* Comprehensive analysis of tool wear, tool life, surface roughness, costing and carbon emissions in turning Ti–6Al–4V titanium alloy: Cryogenic versus wet machining. **Tribology International**, Oxford, v. 153, p. 106597, 2021.
- AKKUŞ, H.; YAKA, H. Optimization of cutting parameters in turning of titanium alloy (grade 5) by analysing surface roughness, tool wear and energy consumption. **Experimental Techniques**, New York, v. 46, n. 6, p. 945-956, 2022.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E112**: standard test methods for determining average grain size. West Conshohocken: [S.n.], 2021. 11 p.
- AMERICAN SOCIETY TESTING AND MATERIALS. **ASTM F67**: Standard Specification for Unalloyed Titanium, for Surgical Implant Applications (UNS R50250, UNS R50400, UNS R50550, UNS R50700). West Conshohocken: [S.n.], 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR ISO 3685**: ensaio de vida da ferramenta de ponta única para torneamento. Rio de Janeiro, p. 61. 2017.
- BALZERS, O. **Oerlikon balzers**. Jundiaí: [S. n.], 2023. Disponível em: <https://www.oerlikon.com/balzers/br/br/portfolio/tecnologias-de-superficie/processos-a-base-de-pvd/>. Acesso em: 10 jul. 2023.
- BATISTA PONCE, Moises *et al.* Analysis of secondary adhesion wear mechanism on hard machining of titanium aerospace alloy. **Materials**, [s. l.], v. 12, n. 12, p. 2015, 2019.
- BOING, Denis; DE OLIVEIRA, Adilson Jose; SCHROETER, Rolf Bertrand. Evaluation of wear mechanisms of PVD and CVD coatings deposited on cemented carbide substrates applied to hard turning. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, v. 106, p. 5441-5451, 2020.
- ÇELİK, Yahya Hışman; KILICKAP, Erol; GÜNEY, Musa. Investigation of cutting parameters affecting on tool wear and surface roughness in dry turning of Ti-6Al-4V using CVD and PVD coated tools. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, Heidelberg, v. 39, p. 2085-2093, 2017.
- CHANG, Yin-Yu *et al.* High temperature oxidation and cutting performance of AlCrN, TiVN and multilayered AlCrN/TiVN hard coatings. **Surface and Coatings Technology**, Lausanne, v. 332, p. 494-503, 2017.
- CHOWDHURY, M. S. I. *et al.* Investigation of the wear behavior of pvd coated carbide tools during Ti6Al4V machining with intensive built up edge formation. **Coatings**, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 266, 2021a.

CHOWDHURY, M. S. I. *et al.* Wear performance investigation of PVD coated and uncoated carbide tools during high-speed machining of TiAl6V4 aerospace alloy. **Wear**, [s. l.], v. 446, p. 203168, 2020.

CHOWDHURY, Mohammad Shariful Islam *et al.* Investigation of the wear performance of TiB<sub>2</sub> coated cutting tools during the machining of Ti6Al4V alloy. **Materials**, [s. l.], v. 14, n. 11, p. 2799, 2021b.

DA SILVA, Leonardo Roberto *et al.* Wear mechanisms of cutting tools in high-speed turning of Ti6Al4V alloy. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, v. 103, p. 37-48, 2019.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. São Paulo: Artliber, 2014.

TELLES, F. Avaliação da rugosidade no torneamento de acabamento em titânio comercialmente puro grau 4 sob uma perspectiva de usinagem ambientalmente amigável. 93 f. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

GUPTA, Kapil; LAUBSCHER, Rudolph F. Sustainable machining of titanium alloys: a critical review. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 231, n. 14, p. 2543-2560, 2017.

ICHOU, Hamza *et al.* Exploring the advancements in physical vapor deposition coating: a review. **Journal of Bio-and Tribo-Corrosion**, Heidelberg, v. 10, n. 1, p. 3, 2024.

KHAN, Akhtar; MAITY, Kalipada. Statistical modelling and machinability assessment of commercially pure titanium (CP-Ti) grade II: an experimental investigation. **Measurement**, Amsterdam, v. 137, p. 664-672, 2019.

KUMAR, Aditya *et al.* An assessment of machining performance of CAPVD-coated carbide tools in face milling of Ti-6Al-4V. **Ceramics International**, Oxford, v. 50, n. 9, p. 16639-16649, 2024.

KUMAR, Ch Sateesh; PATEL, Saroj Kumar. Effect of chip sliding velocity and temperature on the wear behaviour of PVD AlCrN and AlTiN coated mixed alumina cutting tools during turning of hardened steel. **Surface and Coatings Technology**, Lausanne, v. 334, p. 509-525, 2018.

KUMAR, Ch Sateesh; PATEL, Saroj Kumar. Hard machining performance of PVD AlCrN coated Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiCN ceramic inserts as a function of thin film thickness. **Ceramics International**, Oxford, v. 43, n. 16, p. 13314-13329, 2017.

KUMAR, Sunil; MAITY, Saikat Ranjan; PATNAIK, Lokeswar. Morphology and wear behavior of monolayer TiAlN and composite AlCrN/TiAlN-coated plasma-nitrided DAC-10 tool steel. **Arabian Journal for Science and Engineering**, Heidelberg, v. 47, n. 12, p. 15519-15538, 2022.

KUMAR, Sunil; MAITY, Saikat Ranjan; PATNAIK, Lokeswar. Morphology and wear behavior of monolayer TiAlN and composite AlCrN/TiAlN-coated plasma-nitrided

DAC-10 tool steel. **Arabian Journal for Science and Engineering**, Heidelberg, v. 47, n. 12, p. 15519-15538, 2022.

KUMAR, T. Sampath *et al.* Metallurgical and mechanical characterization of TiCN/TiAlN and TiAlN/TiCN bilayer nitride coatings. **Surfaces and Interfaces**, v. 15, p. 256-264, 2019.

LEMES, Carlos Vinicius; DINIZ, Anselmo Eduardo. Análise dos tipos de ferramentas de metal duro com e sem revestimento no torneamento de titânio comercialmente puro grau 4. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO - COBEF, 11., 2021, Curitiba. Anais [...]. Curitiba: COBEF, 2021.

LI, Guojian *et al.* Low adhesion effect of TaO functional composite coating on the titanium cutting performance of coated cemented carbide insert. **Materials & Design**, London, v. 110, p. 105-111, 2016.

LI, Qiuqin *et al.* Enhancing the wear performance of WC-6Co tool by pulsed magnetic field in Ti-6Al-4V machining. **Journal of Manufacturing Processes**, London, v. 80, p. 898-908, 2022.

LI, Rui; SHIH, Albert J. Finite element modeling of 3D turning of titanium. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, v. 29, p. 253-261, 2006.

LI, Yan *et al.* Investigation of mountainous laser texturing for improving the adhesion and tribological properties of AlCrN coatings. **Applied Physics A**, [s. l.], v. 129, n. 9, p. 620, 2023.

LIANG, Xiaoliang *et al.* Tool wear induced modifications of plastic flow and deformed material depth in new generated surfaces during turning Ti-6Al-4V. **Journal of Materials Research and Technology**, Rio de Janeiro, v. 9, n. 5, p. 10782-10795, 2020.

LINDVALL, Rebecka *et al.* Performance and wear mechanisms of PCD and pcBN cutting tools during machining titanium alloy Ti6Al4V. **Wear**, [s. l.], v. 454, p. 203329, 2020.

LIU, Yuan *et al.* Effect of duty cycle on microstructure and mechanical properties of AlCrN coatings deposited by HiPIMS. **Vacuum**, [s. l.], v. 205, p. 111409, 2022.

MACHADO, Álisson Rocha *et al.* **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Editora Blucher, 2015.

MARTINHO, R. P. *et al.* Comparative study of PVD and CVD cutting tools performance in milling of duplex stainless steel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, v. 102, p. 2423-2439, 2019.

MELLO, Amanda Oliveira *et al.* Comparison between the machinability of different titanium alloys (Ti-6Al-4V and Ti-6Al-7Nb) employing the multi-objective optimization. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, Heidelberg, v. 43, p. 1-14, 2021.

MISHRA, Sarvesh Kumar *et al.* Micromechanical characterization and dynamic wear study of DC-Arc coated cemented carbide cutting tools for dry titanium turning. **Ceramics International**, Oxford, v. 47, n. 22, p. 31798-31810, 2021.

MRUTHUNJAYA, M.; YOGESHA, K. B. A review on conventional and thermal assisted machining of titanium based alloy. **Materials Today: Proceedings**, Amsterdam, v. 46, p. 8466-8472, 2021.

POLCAR, T. *et al.* Comparison of tribological behaviour of TiN, TiCN and CrN at elevated temperatures. **Surface and Coatings Technology**, Lausanne, v. 193, n. 1-3, p. 192-199, 2005.

POLCAR, T.; NOVÁK, R.; ŠIROKÝ, P. The tribological characteristics of TiCN coating at elevated temperatures. **Wear**, [s. l.], v. 260, n. 1-2, p. 40-49, 2006.

RAHMAN RASHID, R. A. *et al.* Tool wear mechanisms involved in crater formation on uncoated carbide tool when machining Ti6Al4V alloy. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, v. 83, p. 1457-1465, 2016.

RAHMAN RASHID, R. A. *et al.* Tool wear mechanisms involved in crater formation on uncoated carbide tool when machining Ti6Al4V alloy. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, v. 83, p. 1457-1465, 2016.

RAMANA, M. Venkata; ADITYA, Y. Shanmuka. Optimization and influence of process parameters on surface roughness in turning of titanium alloy. **Materials Today: Proceedings**, Amsterdam, v. 4, n. 2, p. 1843-1851, 2017.

RAMESH, S.; KARUNAMOORTHY, L.; PALANIKUMAR, K. Measurement and analysis of surface roughness in turning of aerospace titanium alloy (gr5). **Measurement**, Amsterdam, v. 45, n. 5, p. 1266-1276, 2012.

SATYANARAYANA KOSARAJU, Venu Gopal Anne; POPURI, Bangaru Babu. Taguchi analysis on cutting forces and temperature in turning titanium Ti-6Al-4V. **International Journal of Mechanical and Industrial Engineering (IJMIE)**, Bhubaneswar, n. 2231-6477, 2012.

SELVAKUMAR, S.; SREEBALAJI, V. S.; RAVIKUMAR, K. Machinability Analysis and Optimization in Micro turning on tool wear for Titanium Alloy. **Materials and Manufacturing Processes**, New York, v. 36, n. 7, p. 792-802, 2021.

SOORI, Mohsen; AREZOO, Behrooz. Cutting tool wear prediction in machining operations, a review. **Journal of New Technology and Materials**, Oum El-Bouaghi, 2022.

SOUSA, Vitor FC; SILVA, Francisco JG. Recent advances in turning processes using coated tools—A comprehensive review. **Metals**, [s. l.], v. 10, n. 2, p. 170, 2020.

TAYEBI, Nouredine; POLYCARPOU, Andreas A. Modeling the effect of skewness and kurtosis on the static friction coefficient of rough surfaces. **Tribology international**, Oxford, v. 37, n. 6, p. 491-505, 2004.

- TOUBHANS, Bastien *et al.* Machinability of inconel 718 during turning: Cutting force model considering tool wear, influence on surface integrity. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 285, p. 116809, 2020.
- VERESCHAKA, Alexey *et al.* Effect of adhesion and tribological properties of modified composite nano-structured multi-layer nitride coatings on WC-Co tools life. **Tribology International**, Oxford, v. 128, p. 313-327, 2018.
- XIAO, Baijun *et al.* A study of oxidation behavior of AlTiN-and AlCrN-based multilayer coatings. **Surface and Coatings Technology**, Lausanne, v. 333, p. 229-237, 2018.
- XIAO, Baijun *et al.* Mechanical, oxidation, and cutting properties of AlCrN/AlTiSiN nano-multilayer coatings. **Surface and Coatings Technology**, Lausanne, v. 433, p. 128094, 2022.
- YOUNAS, Muhammad *et al.* Development and analysis of tool wear and energy consumption maps for turning of titanium alloy (Ti6Al4V). **Journal of Manufacturing Processes**, London, v. 62, p. 613-622, 2021.
- ZAREENA, A. R.; VELDHUIS, S. C. Tool wear mechanisms and tool life enhancement in ultra-precision machining of titanium. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 212, n. 3, p. 560-570, 2012.
- ZHA, Xuming *et al.* Effect of cutting feed rate on machining performance and surface integrity in cutting process of Ti-6Al-4V alloy. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, v. 131, n. 5, p. 2791-2809, 2024.