

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

ROBERTO CARLOS SABADINI

INVESTIGAÇÃO DA APLICABILIDADE DE INSERTOS DE METAL DURO
REVESTIDOS NO TORNEAMENTO DA LIGA Ti-15Mo

SÃO CARLOS
2025

ROBERTO CARLOS SABADINI

INVESTIGAÇÃO DA APLICABILIDADE DE INSERTOS DE METAL DURO
REVESTIDOS NO TORNEAMENTO DA LIGA Ti-15Mo

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

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

São Carlos - SP
2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

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

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Roberto Carlos Sabadini, realizada em 26/02/2025.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Carlos Eiji Hirata Ventura (UFSCar)

Prof. Dr. Alessandro Roger Rodrigues (EESC/USP)

Prof. Dr. João Gustavo Pereira da Silva (UFSCar)

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

DEDICATÓRIA

À minha esposa, Luceile, meus filhos, Felipe e Fernanda, que sempre me incentivam e são a razão de sempre acreditar num futuro melhor.

A todos aqueles que, igual a mim, mesmo nas dificuldades, sempre procuram novos conhecimentos visando crescimento profissional e pessoal.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, à Deus pela vida e pela oportunidade de poder realizar esse trabalho de pesquisa.

Ao meu orientador, Carlos Ventura, por ter me acolhido nesse trabalho e por toda dedicação e apoio.

Aos colegas de mestrado que muito contribuíram com os estudos durante as disciplinas, Mateus, Shalom e Valter.

Aos colegas de pesquisa, Juan Camilo e Uéliton, que também contribuíram em algumas etapas dessa pesquisa.

Aos colegas de trabalho, técnicos e docentes do Departamento de Física da UFSCar, que colaboraram quando precisei deles, em especial ao Francisco, que me auxiliou em vários momentos.

Ao companheiro de instituição e técnico do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSCar, Leonildo Pivotto, que contribuiu na realização dos testes de torneamento e coleta de dados.

À CAPES e à FAPESP pelo apoio financeiro para a disponibilização dos equipamentos e materiais necessários à pesquisa.

À Oerlikon Balzers Revestimentos Metálicos Ltda. pela contribuição para o desenvolvimento da pesquisa.

RESUMO

A baixa densidade e a elevada resistência à corrosão e à fadiga de ligas de titânio favorecem sua utilização nos setores aeroespacial, de implantes médicos e ortodônticos. Porém, sua usinagem é um processo desafiador, devido à sua baixa condutividade térmica, baixo módulo de elasticidade e afinidade química com o material da ferramenta. Altas temperaturas são geradas na região de corte, prejudicando o acabamento da peça e reduzindo a vida útil da ferramenta. Na tentativa de superar essas dificuldades, novas técnicas de usinagem vêm sendo desenvolvidas, como o uso de novos lubrificantes e aplicação de diferentes revestimentos para ferramentas. Neste contexto, a presente pesquisa propõe uma análise comparativa do desempenho de insertos não revestidos e de insertos com três tipos de revestimento (AlTiN/TiSiXN, AlCrN e TiCN), de maneira a se determinar o mais adequado ao processo de torneamento da liga Ti-15Mo. Para isso, insertos de metal duro da classe ISO S10 foram retificados em laboratório, revestidos comercialmente pelo processo de deposição física a vapor (PVD) e submetidos a testes de vida, após os quais os principais mecanismos de desgaste foram avaliados. Em termos de desgaste da ferramenta, os resultados menos satisfatórios foram encontrados para os insertos revestidos com AlTiN/TiSiXN, enquanto os mais satisfatórios foram verificados para os insertos revestidos com AlCrN. Em todos os casos, a adesão foi o mecanismo de desgaste predominante e valores de rugosidade similares foram obtidos, indicando que a aplicação de revestimentos sem titânio pode aumentar o desempenho da ferramenta.

Palavras-chave: Usinagem; Liga de titânio; Desgaste; Vida da ferramenta

ABSTRACT

The low density and high corrosion and fatigue resistance of titanium alloys favor their use in the aerospace, medical implant and orthodontic industries. However, their machining is a challenging process due to their low thermal conductivity, low modulus of elasticity and chemical affinity with the tool material. High temperatures are generated in the cutting region, damaging surface finish and reducing tool life. In an attempt to overcome these difficulties, new machining techniques have been developed, such as the use of new lubricants and the application of different tool coatings. Within this context, this research proposes a comparative analysis of the performance of uncoated inserts and inserts with three types of coatings (AlTiN/TiSiXN, AlCrN and TiCN), in order to determine the most suitable for the turning process of the Ti-15Mo alloy. For this purpose, cemented tungsten carbide inserts ISO grade S10 were ground in laboratory, commercially coated by physical vapor deposition (PVD) and subjected to life tests, after which the main wear mechanisms were evaluated. In terms of tool wear, the least satisfactory results were found for the AlTiN/TiSiXN coated inserts, while the most satisfactory were verified for the AlCrN coated inserts. In all cases, adhesion was the predominant wear mechanism and similar roughness values were obtained, indicating that the application of coating without titanium can increase tool performance.

Keywords: Machining; Titanium alloy; Wear; Tool life

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura cristalográfica das fases (a) α e (b) β do titânio	15
Figura 2 - Influência dos elementos de liga na temperatura de transição	16
Figura 3 - Retificação plana transversal de mergulho de insertos de corte e parâmetros de processo.....	20
Figura 4 - Evolução dos materiais de revestimento para ferramentas de corte.....	22
Figura 5 - Modelo de câmara de revestimento para deposição de filmes finos por processo PVD	23
Figura 6 - Imagens externa e interna da retificadora Agathon Dom Plus	33
Figura 7 - Indicação de uma aresta ideal e real em um inserto de corte, assim como a diferença entre elas (Δr).....	35
Figura 8 - Templates do software para medição da rugosidade R_z	36
Figura 9 - Templates do software para medição do lascamento Δr	36
Figura 10 - Corpo de prova de Ti-15Mo utilizado nos testes de torneamento (medidas em mm)	38
Figura 11 - Imagens de insertos após retificação.....	39
Figura 12 - Rugosidade máxima R_z da superfície de folga em todas as pontas retificadas.....	40
Figura 13 - Rugosidade R_z máxima da superfície de saída em todas as pontas retificadas.....	40
Figura 14 - Ilustração do sentido de escoamento do cavaco em relação às marcas de retificação na superfície de saída: (a) perpendicular e (b) paralelo.....	41
Figura 15 - Lascamento da aresta Δr em todas as pontas retificadas.....	42
Figura 16 - Insertos após a deposição dos revestimentos: (a) AlTiN/TiSiXN, (b) TiCN e (c) AlCrN.....	43
Figura 17 - Rugosidade máxima R_z da superfície de folga das pontas retificadas e revestidas.....	44
Figura 18 - Rugosidade máxima R_z da superfície de saída das pontas retificadas e revestidas.....	45
Figura 19 - Lascamento da aresta Δr das pontas retificadas e revestidas	46
Figura 20 - Evolução do desgaste de flanco máximo em insertos sem revestimento	47

Figura 21 - Evolução do desgaste de flanco máximo em insertos revestidos por AlTiN/TiSiXN	48
Figura 22 - Evolução do desgaste de flanco máximo em insertos revestidos por TiCN	48
Figura 23 - Evolução do desgaste de flanco máximo em insertos revestidos por AlCrN.....	49
Figura 24 - Insertos de corte (a) sem revestimento e revestidos por (b) AlTiN/TiSiXN, (c) TiCN e (d) AlCrN, todos em fim de ensaio	50
Figura 25 - Imagens resultantes da sobreposição de pontas novas e usadas de insertos de corte (a) sem revestimento e revestidos por (b) AlTiN/TiSiXN, (c) TiCN e (d) AlCrN, todos em fim de ensaio.	52
Figura 26 - Evolução do volume de material aderido para os insertos sem e com revestimento.....	53
Figura 27 - Imagem de MEV e análise EDS de inserto sem revestimento (Teste1)..	54
Figura 28 - Imagem de MEV e análise EDS de inserto revestido com AlTiN/TiSiXN (Teste 1).....	54
Figura 29 - Imagem de MEV e análise EDS de inserto revestido com TiCN (Teste 1)	55
Figura 30 - Imagens de MEV e análise EDS de inserto revestido com AlCrN (Teste 1)	55
Figura 31 - Evolução da rugosidade máxima Rz em testes realizados com insertos sem revestimento	57
Figura 32 - Evolução da rugosidade máxima Rz em testes realizados com insertos revestidos com AlTiN/TiSiXN	57
Figura 33 - Evolução da rugosidade máxima Rz em testes realizados com insertos revestidos com TiCN	58
Figura 34 - Evolução da rugosidade máxima Rz em testes realizados com insertos revestidos com AlCrN.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre os valores médios de rugosidade máxima.....	46
---	----

LISTA DE SÍMBOLOS

Al	Alumínio
AlCrN	Nitreto de Cromo Alumínio
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio
AlTiN/TiSiXN	Nitreto de Titânio Alumínio/Nitreto de Titânio Silício e X
a _p	profundidade de usinagem (mm)
nc	Nanocompósitos
°C	Graus Célcus
C	Carbono
Co	Cobalto
f	Avanço (mm/rot.)
Ra	Rugosidade média (μm)
rpm	rotações por minuto
Rz	Rugosidade máxima (μm)
TiCN	Carbonitreto de Titânio
TiN	Nitreto de Titânio
VB _{max}	Desgaste de flanco máximo (μm)
v _c	Velocidade de corte (m/min)
V _{cd}	Velocidade tangencial do dressador (m/s)
V _{fa}	Velocidade de avanço axial (mm/min)
V _{fad}	Velocidade de avanço do dressador (μm/s)
V _R	Velocidade de rotação do inserto para obtenção do raios de ponta (°/s)
WC-Co	Carboneto de tungstênio ao cobalto
α	Fase alfa
β	Fase beta
Δr	Lascamento da aresta (μm)

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APC	Aresta Postiça de Corte
ASTM	<i>American Society for Testing in Materials</i>
CCC	Cúbico de Corpo Centrado
CNC	Comando Numérico Computadorizado
cp-Ti	Titânio comercialmente puro
CVD	Deposição Química a Vapor
EDS	Espectroscopia por Energia Dispersiva
HC	Hexagonal Compacto
HV	Dureza Vickers
ISO	<i>International Standard Organization</i>
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MQL	Mínima Quantidade de Lubrificadorrefrigerante
PVD	Deposição Física a Vapor
SCE	Energia Específica de Corte

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	14
1.1.1 OBJETIVO GERAL	14
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
2 REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1 LIGAS DE TITÂNIO	15
2.2 FERRAMENTAS DE METAL DURO REVESTIDAS	19
2.3 TORNEAMENTO DE LIGAS DE TITÂNIO	25
3 MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1 RETIFICAÇÃO DOS INSERTOS DE CORTE	33
3.2 REVESTIMENTO DOS INSERTOS	34
3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS INSERTOS	35
3.4 TESTES DE TORNEAMENTO	37
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS INSERTOS DE CORTE APÓS A RETIFICAÇÃO	39
4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS INSERTOS DE CORTE APÓS A DEPOSIÇÃO DOS REVESTIMENTOS	42
4.3 VIDA DA FERRAMENTA E MECANISMOS DE DESGASTE	47
4.4 ANÁLISE DA SUPERFÍCIE DA PEÇA USINADA	56
5 CONCLUSÕES	59
6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	61
REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

Segundo Leyens e Peters (2003), o titânio foi encontrado pela primeira vez na Inglaterra, no final do século XVIII, por um britânico chamado William Gregor, mas só foi produzido em escalas maiores em 1932, por Guilherme Justin Kroll, que é conhecido como o pai da indústria do titânio. Em seguida, surgiram as ligas de titânio, que encontraram principal aplicação na indústria aeroespacial e se estenderam para outros segmentos, como a medicina, o esporte, a ortodontia, entre outros. Os mesmos autores destacam que o elemento não é considerado raro, mas apresenta dificuldades na sua extração, principalmente por não ser encontrado no estado puro, o que torna seu custo bastante elevado.

Tais ligas, por apresentarem elevada resistência mecânica, baixa densidade, resistência a temperaturas elevadas, resistência à corrosão e biocompatibilidade, têm sido muito utilizadas na fabricação de próteses ortopédicas e implantes ortodônticos (Koizumi *et al.*, 2019). Ligas de titânio são classificadas como alfa, beta e alfa-beta, sendo as ligas beta as que apresentam melhor relação resistência/peso e que oferecem maior versatilidade (Terlinde e Fischer, 2003). Estas, por utilizarem como elementos de liga o nióbio, o tântalo e o molibdênio, apresentam maior biocompatibilidade, devido a esses materiais serem inofensivos à saúde humana (Kaur e Singh, 2019).

Tais características, interessantes para diferentes aplicações, levam, no entanto, a dificuldades durante a usinagem, processo frequentemente utilizado para fornecer acabamento adequado à peça. Assim, diferentes métodos de lubrificação (Rubio, 2023), diferentes geometrias (Paris, 2021) e revestimentos (Bouzakis *et al.*, 2012; Chim *et al.*, 2009; Liu *et al.*, 2013) têm sido investigados, de modo a se melhorar sua usinabilidade. Neste último caso, novos revestimentos de base cerâmica, aplicados por deposição física a vapor (PVD), têm sido desenvolvidos e oferecem grande potencial de aumento da vida da ferramenta, já que contribuem para o aumento da dureza superficial, redução do coeficiente de atrito e aumento da resistência à transferência de calor ao substrato.

Frente às dificuldades encontradas na usinagem das ligas de titânio, esse estudo teve como foco a análise do desempenho de insertos revestidos por deposição física a vapor (PVD) no torneamento da liga beta Ti-15Mo, a fim de determinar o mais

adequado, por meio de testes e avaliação dos mecanismos de desgaste utilizando parâmetros de corte constantes.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Esse estudo tem como principal objetivo a determinação da vida de insertos de metal duro com diferentes revestimentos no torneamento da liga Ti-15, no sentido de encontrar alternativas que possam contribuir com o aumento de sua usinabilidade.

1.1.2 Objetivos específicos

Dentre os objetivos específicos, encontram-se:

- Determinar os valores de rugosidade dos insertos de corte antes e após o processo de revestimento.
- Determinar os mecanismos de desgaste de ferramentas sem cobertura e cobertas com três diferentes revestimentos comerciais (AlTiN/TiSiXN, AlCrN e TiCN) no torneamento da liga Ti-15Mo.
- Determinar a evolução da rugosidade da peça ao longo do tempo de usinagem.

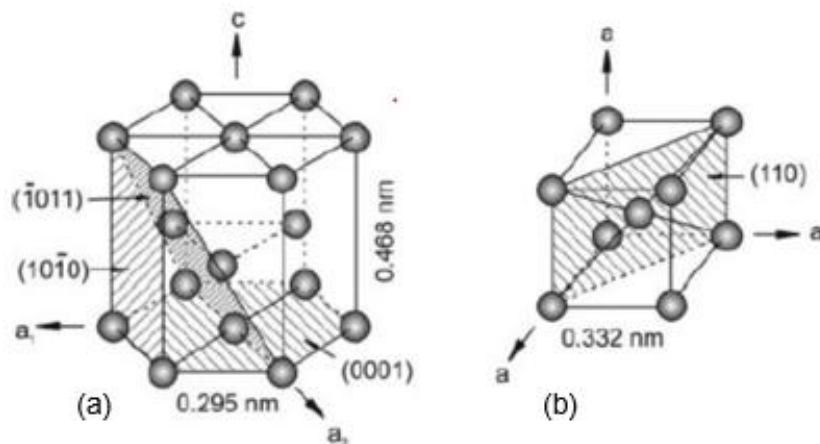
2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Ligas de titânio

O titânio é um material produzido a partir de TiO_2 (dióxido de titânio) por meio do processo Kroll, no qual ele é convertido em TiCl_4 (tetracloreto de titânio), que é posteriormente reduzido a titânio metálico pelo sódio ou magnésio, adquirindo aparência de esponja. Para atender a cada tipo de necessidade, elementos de liga são acrescentados e é realizada a fusão a arco sob vácuo (Askeland *et al.*, 2003). Não sendo encontrado em grandes concentrações ou em estado puro, torna-se caro, devido à dificuldade de processamento (Leyens e Peters, 2003).

Como diversos outros metais, o titânio em estado puro pode se cristalizar em diferentes estruturas. A transformação completa de uma estrutura cristalina em outra é chamada de transformação alotrópica e a temperatura de transformação é chamada de linha *transus* no diagrama de fases. O titânio puro em baixas temperaturas é conhecido como titânio alfa (α) e apresenta estrutura cristalina hexagonal compacta (HC); em temperaturas elevadas (aproximadamente 882 °C), torna-se o titânio beta (β) e passa a ter estrutura cúbica de corpo centrado (CCC) (Leyens e Peters, 2003). A Figura 1 ilustra os arranjos cristalinos alfa e beta, conforme as faixas de temperatura de transição.

Figura 1 - Estrutura cristalográfica das fases (a) α e (b) β do titânio

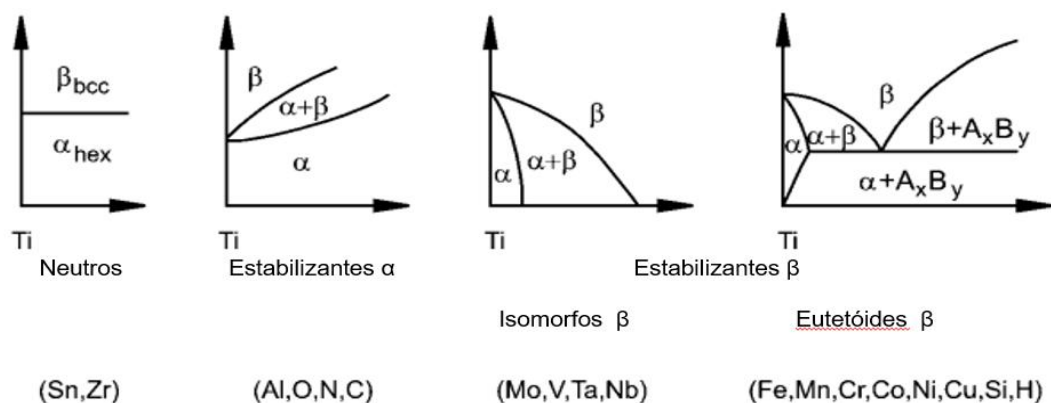


Fonte: Adaptado de Leyens e Peters (2003).

Relatos encontrados na literatura sobre a primeira aplicação de ligas de titânio na medicina, por exemplo, remontam à década de 1940, segundo Sarraf *et al.* (2022), dando início a partir de então a outras descobertas relacionadas à sua biocompatibilidade com os tecidos moles e também com ossos de animais, devido à sua resistência à corrosão e propriedades não citotóxicas. Atualmente, são utilizadas como biomateriais estruturais metálicos em implantes, como articulações artificiais de quadril e raízes dentárias. São usadas principalmente em implantes que substituem tecidos duros (Niinomi, 2008). Comparadas a outros materiais de uso comum utilizados pela indústria aeroespacial, as ligas de titânio apresentam, em média, resistência mecânica compatível à dos aços, porém, cerca de metade de sua densidade e cerca de dois terços a densidade do alumínio (Jaffee e Burte, 1973).

Elementos de liga são adicionados para melhorar a resistência ao desgaste, à corrosão e as propriedades mecânicas das ligas de titânio. Na temperatura *transus* podem ser classificados como neutros, estabilizantes alfa ou estabilizantes beta. Os estabilizantes alfa estendem o campo da fase alfa para temperaturas mais altas, enquanto os estabilizantes beta mudam o campo da fase beta para temperaturas mais baixas. Os elementos neutros têm influência menor na temperatura *transus* (Leyens e Peters, 2003). As ligas são diferenciadas conforme a estabilidade promovida pelos elementos na matriz em temperatura ambiente (Boyer e Briggs, 2005). Essa estabilização das fases permite que a temperatura para a transformação seja alterada (Koizumi *et al.*, 2019). Os diagramas de fase são apresentados na Figura 2, conforme os diferentes tipos de estabilizantes.

Figura 2 - Influência dos elementos de liga na temperatura de transição



Fonte: Adaptado de Leyens e Peters, (2003).

Boyer e Briggs (2005) definem ligas como aquelas que contêm estabilizador suficiente para reter 100% da fase após a têmpera acima da temperatura *transus*. As ligas de titânio podem ser classificadas como:

- Ligas alfa (α): são as ligas de titânio mais comuns e contêm 5% Al e 2,5% Sn. Com estrutura hexagonal compacta (HC), apresenta boa resistência mecânica, tenacidade à fratura, alto módulo de elasticidade, baixa ductilidade e elevada resistência à corrosão. Essas ligas apresentam como estabilizadores de fase o oxigênio, o ferro, o alumínio e o estanho (Leyens e Peters, 2003). Devido à predominância do Al na fase alfa, as ligas de titânio apresentam menor densidade nessa fase do que na fase beta, na qual há predominância do Mo ou V (Veiga, Davim e Loureiro, 2012).
- Ligas beta (β): ligas de Ti do tipo beta são a escolha preferida para materiais biomédicos (Chen, Cui e Zhang, 2020). São as ligas que oferecem a maior relação resistência/peso, sendo a classe mais versátil de ligas de titânio, tendo a tenacidade e a resistência à fadiga como um diferencial. Possuem conteúdo suficiente de estabilizador, como Mo, V, Fe, Cr, Nb, para anular a transformação martensítica em têmpera à temperatura ambiente (Terlinde e Fischer, 2003). Elementos que são inofensivos à saúde, como Nb, Zr, Ta, Mo, são utilizados nas ligas beta para resolver o problema da toxicidade (Hulka *et al.*, 2022). Segundo os mesmos autores, a resistência à corrosão e o baixo módulo de elasticidade favorecem a boa osseointegração. Podem também ser aplicadas em fixadores de alta resistência, vigas e outros acessórios para aplicações aeroespaciais (Boyer e Briggs, 2005). Essas características, combinadas ao alongamento superior em relação ao titânio alfa, favorecem sua aplicação também em próteses ortopédicas em virtude de seu menor módulo de elasticidade, além de sua excelente resistência à corrosão e biocompatibilidade (Leyens e Peters, 2003).
- Ligas alfa-beta ($\alpha + \beta$): possuem balanceamento adequado de fases alfa e beta em temperatura ambiente. Um exemplo dessa liga é a Ti-6Al-4V, uma das mais utilizadas nos últimos anos, possui elevado valor de limite de resistência à tração (entre 900 e 1200 MPa), boa resistência à corrosão e biocompatibilidade (Leyens e Peters, 2003). Conforme Campbell Jr. (2011), suas propriedades apresentam melhor equilíbrio, sendo que a liga Ti-6Al-4V supera as demais em termos de aplicação. Porém, estudos têm demonstrado que a presença do Al e do V leva a condições impróprias para a utilização em implantes. Assim, novas ligas com

elementos não tóxicos e não alérgicos, como Nb, Zr, Ta, Mo, estão sendo desenvolvidas para tais aplicações (Hulka *et al.*, 2022).

Segundo Rack e Qazi (2006), ligas de titânio têm trazido muitos benefícios em aplicações de dispositivos de fixação para trauma e coluna vertebral. Os autores apontam que aproximadamente 272.000 substituições totais de quadril devem ser realizadas anualmente até 2030 nos Estados Unidos. Isso graças ao seu menor módulo de elasticidade, excelente resistência à corrosão, biocompatibilidade e capacidade de osseointegração, conforme Kaur e Singh (2019). Esses números reforçam ainda mais a necessidade do desenvolvimento de novas tecnologias neste segmento. Embora as ligas de titânio do tipo beta tenham módulo de elasticidade mais baixo do que outros tipos de ligas, estes ainda são maiores do que o dos ossos humanos (Chen, Cui e Zhang, 2020). Segundo Bezerra *et al.* (2017), quando o módulo de elasticidade é muito elevado em comparação ao do osso humano, pode haver transferência inadequada de esforços entre prótese e ossos da região, causando rejeição e perda do implante.

A aplicação do titânio e suas ligas neste segmento tem sido limitada à liga Ti-6Al-4V e ao cp-Ti (Titânio comercialmente puro) (Eisenbarth *et al.*, 2004), porém, estudos mostram que esse primeiro material pode trazer consequências, como Alzheimer, osteomalácia e neuropatias, tornando o projeto de novas ligas de titânio com elevada biocompatibilidade, sem o uso de metais raros, e baixo custo para aplicações em implantes, um desafio (Abdel-Hady Gepreel e Niinomi, 2013).

Assim, ligas de sistema binário Ti-Mo têm sido objeto de estudo de muitos pesquisadores. Uma comparação feita por Ho (2008) entre o cp-Ti e as ligas Ti-7.5Mo, Ti-15Mo e Ti-6Al-4V, em relação às propriedades mecânicas e resistência à corrosão, indicou que a liga Ti-15Mo oferece o melhor potencial de corrosão em comparação aos outros biomateriais e apresenta menor módulo de elasticidade, apenas atrás do Ti-7.5Mo, demonstrando ser apropriada para aplicações no campo da medicina, podendo substituir o Ti-6Al-4V. Adicionalmente, as ligas Ti-Mo, segundo Arrazola *et al.* (2009), apresentam propriedades mecânicas mais elevadas em comparação às ligas tradicionais, como limite de resistência à tração e endurecimento por envelhecimento, conforme a porcentagem de material adicionado. Uma comparação entre uma liga experimental Ti-Mo e o cp-Ti para fabricação de placas e parafusos em cirurgias de mandíbula demonstrou maior resistência mecânica da primeira, provavelmente porque, quando a placa de cp-Ti entra no processo de deformação

permanente (deformação plástica), a placa de Ti-15Mo ainda está em processo de deformação elástica. Além disso, sugere-se o uso do mesmo material tanto na placa quanto nos parafusos (Guastaldi, Hochuli-Vieira e Guastaldi, 2014). Ao investigar a liga Ti-15Mo, Xu *et al.* (2019) ressaltam que ela apresenta condição ideal de alta resistência e baixo módulo de elasticidade e é considerada a principal candidata a aplicações de implantes biomédicos, já que suprime a necessidade de elementos tóxicos, como Al e V.

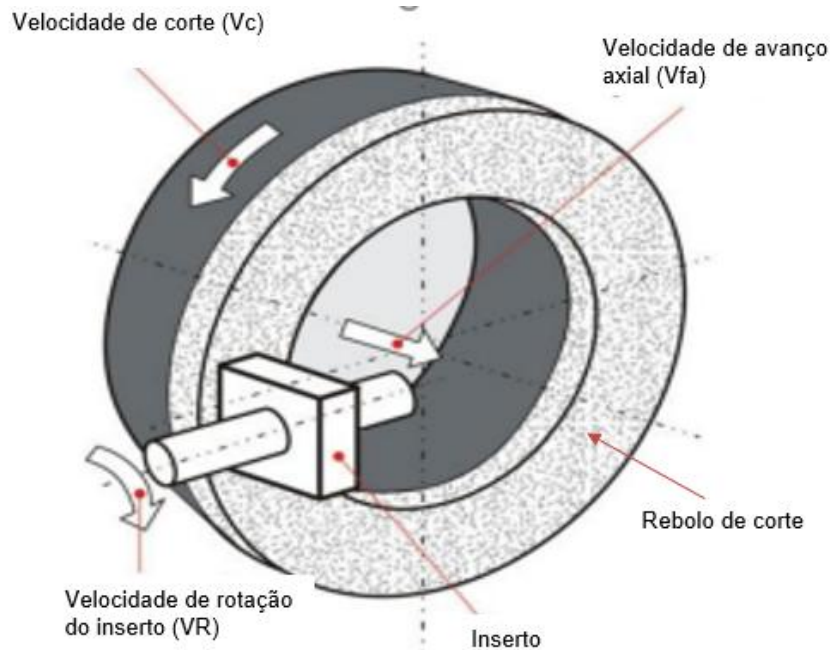
2.2 Ferramentas de metal duro revestidas

De acordo com Sandvik (2024), o metal duro com cobertura representa atualmente 80-90% de todas as pastilhas das ferramentas de corte, apresenta bom desempenho nesse segmento devido à exclusiva combinação de resistência ao desgaste e tenacidade. O metal duro foi descoberto na Alemanha por volta de 1920, quando Schröter produziu o carboneto de tungstênio (WC) em pó em laboratório pela primeira vez (Coelho e Silva, 2018). O composto WC-Co, mais conhecido como metal duro, é o material mais comumente utilizado na fabricação de ferramentas de corte (Hegeman, De Hosson e De With, 2001). A alta dureza dos grãos de carboneto de tungstênio combinada com a tenacidade do cobalto, frequentemente utilizado como ligante, proporciona excelentes propriedades mecânicas, como resistência a altas temperaturas e desgaste. Se comparado ao aço rápido, por exemplo, o metal duro permite trabalhar com velocidades de corte até 10 vezes maiores, proporcionando aumento da produtividade e significativa melhora dos resultados (Wolf Brasil, 2023).

Esse tipo de ferramenta é produzido pelo processo de prensagem e sinterização, sendo o material em pó compactado e submetido a aquecimento controlado para a formação da geometria desejada. Após o processo metalúrgico, a ferramenta é retificada com rebolos diamantados para adequação da geometria e acabamento (Diniz, Marcondes e Coppini, 2014). Conforme Cruz, Sordi e Ventura (2020), o processo de retificação das pastilhas de corte após a sinterização evita irregularidades e melhora o acabamento das superfícies de saída e de folga, aumentando a vida útil da ferramenta em operações de corte de metais. A Figura 3 apresenta um esquema do processo de retificação plana transversal de mergulho, aplicado na definição da geometria e acabamento de insertos de corte. Além da retificação das superfícies de saída e de folga, são produzidos os raios de ponta,

processo em que ocorre a rotação do inserto ao ser posicionado quando do distanciamento adequado do rebolo, conforme o tamanho do raio e ângulo de folga, determinados por parâmetros pré-estabelecidos na programação da máquina.

Figura 3 - Retificação plana transversal de mergulho de insertos de corte e parâmetros de processo



Fonte: Adaptado de Cruz, Sordi e Ventura (2020).

Conforme estudo realizado por Zhang *et al.* (2019), sobre os efeitos da concentração de cobalto (0, 8, 15 e 20 wt%) nas características das ferramentas de WC-Co retificadas, concluíram que, quanto maior a porcentagem de cobalto, menor a qualidade da superfície da ferramenta. Eles constataram que a adição do ligante Co contribui para a melhoria da tenacidade da ferramenta, porém, sua remoção leva à geração de micro cavidades e ao lascamento das arestas pela queda dos grãos de WC, devido à falta de suporte.

A aplicação de revestimentos em ferramentas é uma tecnologia que vem sendo muito utilizada para aumentar sua vida útil e alcançar maiores índices de produtividade por meio da elevação dos parâmetros de corte (Lemes, 2021). Uma ferramenta pode receber várias camadas de revestimento. Por exemplo, a camada externa possui resistência elevada ao desgaste e a camada subsequente pode ter uma função de dissipação térmica (Sousa e Silva, 2020) tornando as ferramentas revestidas mais atraentes por apresentar maior versatilidade. Os mesmos autores destacam ainda que revestimentos com camadas mais finas tendem a apresentar

maior resistência ao desgaste do que revestimentos com camadas mais espessas. O uso de revestimentos tende a reduzir as forças de corte, a temperatura e o desgaste da ferramenta (Sousa e Silva, 2020) diminuindo, assim, as paradas para substituição de ferramentas e o tempo de usinagem. Embora a deposição de revestimentos prolongue a vida da ferramenta, (Ghani *et al.*, 2016) constataram que, após a perda do revestimento, a ferramenta falha de forma semelhante à da ferramenta sem revestimento.

Segundo Oerlikon (2024a), a solução de problemas de desgaste, os quais ocorrem também nas ferramentas revestidas, começa com um exame detalhado do sistema tribológico, com todos os fatores de influência envolvidos. A partir disso, deve-se deduzir quais condições de atrito e mecanismos de desgaste deverão ser considerados. Na prática, mais de um desses efeitos estão ativos a qualquer momento ou ocorrem simultaneamente durante o processo de desgaste. Ainda segundo o fabricante de revestimentos, qualquer sistema tribológico pode ser otimizado através da escolha correta do revestimento.

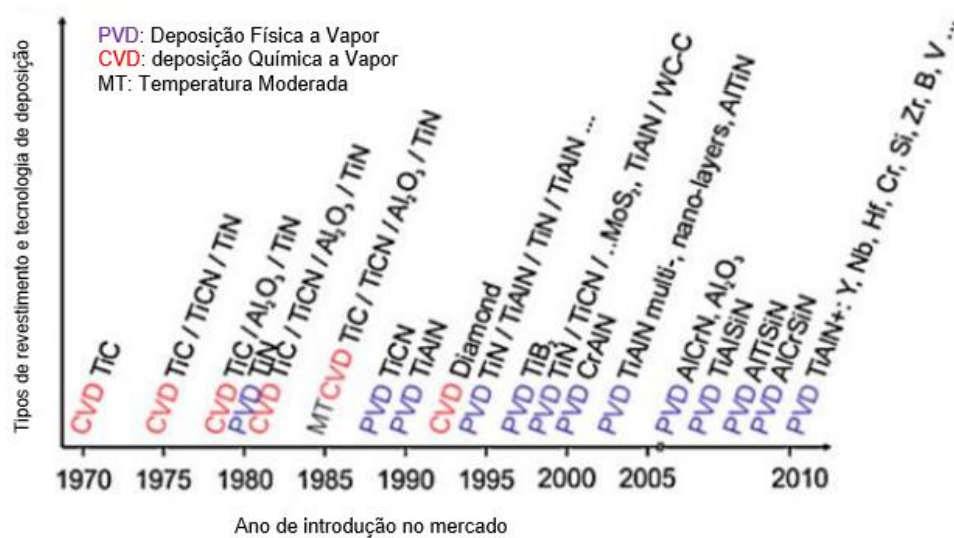
Conforme estudo sobre o desempenho tribológico de ferramentas de corte revestidas com AlTiN na usinagem da liga Ti6Al4V (Grzesik, Niesłony e Habrat, 2019), o desgaste da ferramenta está fortemente associado à energia específica de corte (SCE) e ao efeito do amaciamento térmico, dependendo da velocidade de corte. Quando o índice de desgaste da ferramenta se aproxima de 0,1-0,2 mm, a região de consumo mínimo de energia é detectada. As temperaturas de corte neste momento propiciam o início da oxidação do Al presente no revestimento AlTiN.

O processo de revestimento é uma tecnologia que consiste na aplicação de uma camada fina (entre 0,5 μm e 4,0 μm) de determinado material que seja mais resistente ao desgaste do que o material do qual a ferramenta é produzida. O material do revestimento, em geral, possui alta dureza, baixo coeficiente de atrito, é quimicamente inerte e antioxidante (Deng *et al.*, 2020). Tais características levam à redução da abrasão, da difusão e da oxidação, permitindo a utilização de velocidades de corte mais altas, devido à taxa de desgaste da ferramenta tornar-se relativamente baixa até que o revestimento se desgaste (Stephenson e Agapiou, 2018).

Conforme Denkena e Breidenstein (2008) e Diniz, Marcondes e Coppini (2014), esses processos são aplicados desde a década de 1960. Ainda segundo esses autores, os processos mais comuns são a deposição química a vapor (CVD) e a deposição física a vapor (PVD), por meio dos quais finos filmes metálicos ou

cerâmicos são depositados na superfície do substrato por um processo de vaporização em câmaras especiais, com controle de aquecimento, sob alto vácuo e temperaturas. Para processos PVD, estas podem variar entre 150 °C e 500 °C (Silva Junior e Sachetto, 2022). A Figura 4 demonstra um histórico dos tipos de revestimentos desenvolvidos ao longo do tempo e as tecnologias de deposição aplicadas.

Figura 4 - Evolução dos materiais de revestimento para ferramentas de corte

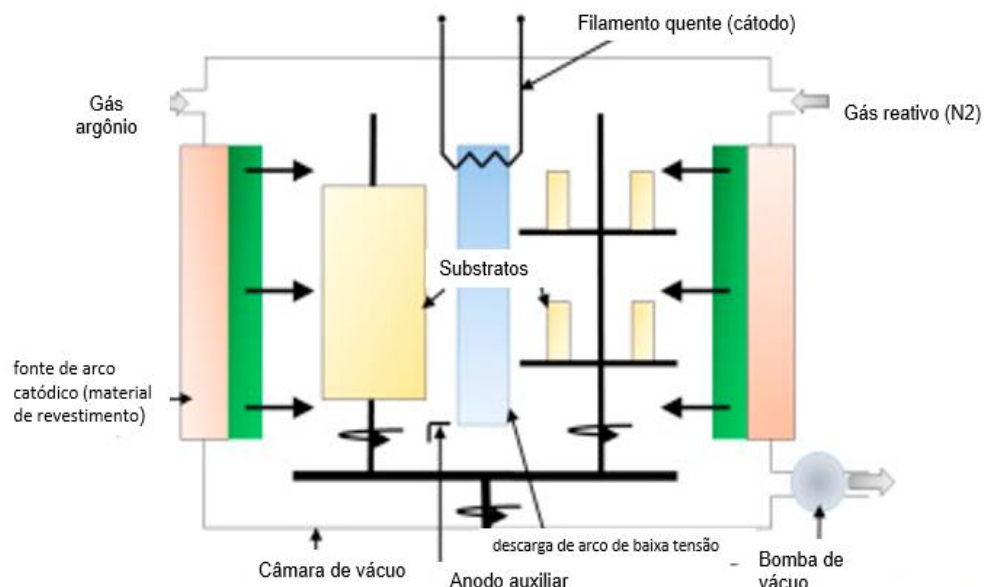


Fonte: Adaptado de Bouzakis *et al.* (2012).

Um dos tipos de revestimento mais comuns corresponde ao TiN (Nitreto de Titânio), cuja aplicação em escala industrial começou no início da década de 1960, pelo processo CVD (Diniz, Marcondes e Coppini, 2014). Porém, era utilizado apenas em ferramentas de metal duro, pois é realizado a temperaturas na ordem de 1000 °C, não sendo possível ser aplicado em aços rápidos, pois tal temperatura poderia alterar as propriedades do material da ferramenta. Com o desenvolvimento do processo de deposição física a vapor (PVD), por volta de 1980, passou-se a aplicar revestimentos também em aços rápidos, pois esse novo processo é realizado a cerca de 500 °C. Revestimentos de TiN por PVD são utilizados também para melhorar os comportamentos de corrosão e desgaste, além de melhorar a bioatividade de materiais metálicos, sobretudo em prótese dentárias e implantes ortopédicos (Çaha *et al.*, 2020).

A Figura 5 apresenta a esquematização de uma câmara utilizada para a deposição de revestimentos de filmes finos por processo PVD. Esse processo não é utilizado apenas em ferramentas de corte, mas pode ser aplicado aos mais variados tipos de produtos, inclusive de grandes dimensões. Porém, conforme Silva Junior e Sachetto (2022), a deposição em moldes pesados e complexos, além de cara, é complicada, devido à necessidade de movimentação e os ajustes da montagem desses moldes. Neste tipo de processo, o material do revestimento, como o titânio, o cromo ou o alumínio, pode ser evaporado pelo calor ou bombardeado com íons (*sputtering*), ao mesmo tempo em que um gás reativo é introduzido (nitrogênio ou gás que contenha carbono). O composto formado com o vapor metálico se deposita na superfície a ser revestida em forma de filme fino e altamente aderente. Os processos PVD contemplam evaporação por arco voltaico, *sputtering*, galvanização iônica e *sputtering* incrementado, que é similar ao processo de pulverização catódica no qual uma descarga por um arco de baixa tensão localizada no centro da câmara aumenta a intensidade do plasma em várias vezes, fazendo com que o grau de ionização produzido seja muito maior (Oerlikon, 2024).

Figura 5 - Modelo de câmara de revestimento para deposição de filmes finos por processo PVD



Fonte: Adaptado de Sateesh Kumar e Kumar Patel (2017).

A partir da década de 1990, revestimentos nanoestruturados foram desenvolvidos em nível atômico, primeiro os revestimentos de nanocamadas, como

TiN/VN, AlN/TiN, AlTiN/TiN e AlTiSiN/TiN, seguido por revestimentos de nanocompósitos, como Ti-Si-N, Al-Ti-Si e Ti-B-N (Inspektor e Salvador, 2014).

Conforme Liu *et al.* (2013), os revestimentos nanocompósitos apresentam nanodureza e resistência ao calor extremamente altas, o que pode melhorar significativamente a dureza em altas temperaturas, a propriedade de isolamento térmico, a estabilidade térmica e a resistência ao impacto.

Atualmente, a aplicação de revestimentos em ferramentas de usinagem é prática comum, devido aos benefícios para o aumento de sua vida, aumento de produtividade e qualidade das peças produzidas. A deposição de revestimentos tornou-se parte do processo de produção de ferramentas de corte e a variedade de alternativas é vasta. Conforme já destacado e segundo Chim *et al.* (2009), o TiN, que é a primeira geração de revestimentos duros PVD, ainda é amplamente utilizado para proteção de ferramentas de corte.

Comparando o mecanismo de desgaste de ferramentas de metal duro revestidas com TiN e não revestidas, (Ghani, Choudhury e Masjuki, 2004) observaram que o tempo necessário para a aresta de corte das ferramentas de metal duro com cobertura de TiN iniciar a trinca e a fratura é mais longo do que para as ferramentas não revestidas, especialmente em combinações de alta velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem.

Segundo Bouzakis *et al.* (2012), o surgimento de novos materiais para peças, ferramentas e filmes, a evolução de métodos sofisticados de caracterização de revestimentos e as crescentes exigências de melhores resultados de produtividade, mantêm vivo o interesse industrial e científico para avançar ainda mais neste campo.

Para Inspektor e Salvador (2014), o custo das ferramentas gira em torno de 2 e 5% do custo total de fabricação, porém, o aumento da produtividade por meio do aumento da taxa de remoção de material, reduzindo o tempo ocioso do processo produtivo e possibilitando outras técnicas de fabricação econômica, deve ser levado em conta para se demonstrar o valor real do ferramental com aplicação de revestimento.

Com isso, reforça-se o entendimento de que dificilmente esse tema se esgotará a curto prazo e que ainda há muito o que se explorar. Assim, essa pesquisa se apresenta como um desafio na obtenção de novos resultados que contribuam com a descoberta de métodos que minimizem as dificuldades na usinagem de ligas de titânio.

2.3 Torneamento de ligas de titânio

As ligas de titânio apresentam propriedades que dificultam sua usinabilidade. Sua baixa condutividade térmica leva a elevadas temperaturas na região de corte, fazendo com que cerca de 80% do calor gerado durante o corte seja transferido para a ferramenta. Já sua elevada afinidade química com os materiais utilizados na fabricação de ferramentas favorece o desgaste por difusão (Diniz, Marcondes e Coppini, 2014). A elevada resistência mecânica, alta ductilidade e a baixa condutividade térmica das ligas de titânio favorecem diversos mecanismos de desgaste da ferramenta como difusão, abrasão, aderência, aresta postiça de corte e desgaste de entalhe gerado pela rebarba encruada, tornando a vida das ferramentas mais curta em comparação àquelas obtidas na usinagem de aços comuns (Korkut *et al.*, 2004). Além disso, seu baixo módulo de elasticidade causa deflexão excessiva da peça de trabalho, a qual se afasta da ferramenta de corte. Quando a aresta de corte se move para frente, a peça de trabalho se desloca para trás. Isso leva à deflexão, vibração e trepidação e consequente aumento dos mecanismos de desgaste da ferramenta (Pramanik, 2014).

Na maioria dos estudos referentes a ferramentas de corte nos processos de usinagem, os esforços são direcionados para o desenvolvimento de ferramentas que promovam qualidade ao produto e que atinjam o maior tempo de trabalho sem perder suas características iniciais (Coelho e Silva, 2018; Sartori *et al.*, 2018). Assim, um dos principais desafios da indústria é otimizar a vida útil da ferramenta de corte para aumentar tanto a produtividade do processo quanto a qualidade da superfície do produto e novas estratégias têm sido desenvolvidas nesse sentido.

Em uma revisão sobre processos de torneamento usando ferramentas revestidas, Sousa e Silva (2020) destacaram a importância desse processo de usinagem e o crescimento nas pesquisas buscando melhorar os resultados juntamente com o desenvolvimento de novas tecnologias e ferramentas.

Magar, Singh e Goyal (2023) afirmam que o processo de usinagem de ligas de titânio apresenta problemas relacionados ao desgaste da ferramenta, como o desgaste de flanco, além da aresta postiça, fenômeno que ocorre devido à afinidade química do titânio com os materiais da ferramenta de corte, inclusive com o revestimento, o que tem afetado o atendimento à demanda de componentes à base desses materiais.

A liga Ti-6Al-4V é a mais utilizada e, segundo Shokrani e Newman (2019) é de difícil usinagem, já que promove baixa vida da ferramenta e baixa produtividade. Considerando que o custo da usinagem é elevado e muitas vezes as tolerâncias dimensionais e de acabamento são bastante rígidas (Ribeiro, Moreira e Ferreira, 2003) realizaram o torneamento da liga Ti-6Al-4V utilizando ferramentas revestidas e não revestidas, a fim de observar o comportamento do material usinado e as melhores condições de corte. Um fenômeno observado por eles foi a variação constante da rugosidade da peça usinada, associada provavelmente à adesão do titânio ao material da ferramenta. Os testes foram realizados a seco e isso pode ter contribuído para a ocorrência de desgaste de cratera por adesão, principalmente quando utilizadas velocidades de corte mais altas. Fenômeno semelhante ocorreu quando (Paris *et al.*, 2020) estudaram a influência da aresta postiça sobre a rugosidade da superfície da peça torneada na liga Ti-15Mo. Os autores concluíram que, devido à variação da geometria da ferramenta quando da formação ou desprendimento da aresta postiça, há uma variação na rugosidade superficial.

Ao realizarem testes de torneamento a seco da liga Ti-6Al-4V utilizando pastilhas revestidas, (Malik *et al.*, 2023) utilizaram diferentes parâmetros de usinagem ($n = 450 - 800$ rpm, $a_p = 0,5 - 1,5$ mm, $f = 0,1 - 0,3$ mm) e chegaram à conclusão que estes devem ser menores que os aplicados na pesquisa, devido à alta geração de calor. Concluíram também que uma combinação de elevada velocidade de corte e profundidade de usinagem gera forças de corte maiores, favorecendo o desgaste da ferramenta.

Em um estudo realizado sobre a caracterização da rugosidade superficial na usinagem da liga Ti-6Al-4V usando ferramentas revestidas e não revestidas com raio de ponta de 0,4 e 0,8 mm e parâmetros de corte variáveis, (Mazid *et al.*, 2023) alcançaram valores de rugosidade menores com taxa de avanço e velocidade de corte mais baixas, independentemente da profundidade de corte e da ferramenta com ou sem revestimento. No caso do inserto revestido e com raio de ponta de 0,8 mm, uma rugosidade menor foi alcançada ao se utilizar profundidades de usinagem maiores, enquanto a rugosidade da superfície foi mais alta quando utilizadas profundidades menores. De todo modo, os autores demonstraram que as relações entre as condições de usinagem e os parâmetros de rugosidade não seguem padrões lineares.

Segundo Ghani *et al.* (2016), em processos de usinagem, a maior parte da energia consumida é transformada em calor, gerando altas temperaturas na zona de

corte. Esse fenômeno está relacionado com a velocidade de corte que, quanto maior, mais calor é gerado e, conseqüentemente, maiores as temperaturas. Quando estes autores realizaram testes de torneamento na liga de titânio Ti-6Al-4V utilizando ferramentas não revestidas e mínima quantidade de lubrificação (MQL), o desgaste na superfície de folga, no raio de ponta e na superfície de saída, ativado pela alta temperatura gerada na região de corte (acima de 800 °C), foi decorrente de reações químicas, pelas quais os átomos do material da ferramenta se difundiram para o cavaco. Ainda conforme os autores, utilizar altas velocidades de corte para aumentar a produtividade com o mínimo desgaste da ferramenta é um grande desafio, principalmente na usinagem de ligas de titânio.

A usinagem com refrigeração aliada a uma velocidade de corte relativamente moderada poderá oferecer uma temperatura de corte mais baixa, preservando a vida da ferramenta, pois, altas velocidades de corte e temperaturas elevadas na região de corte não são favoráveis à usinagem de ligas de titânio, devido às suas propriedades, que proporcionam elevados desgastes da ferramenta (Diniz, Marcondes e Coppini, 2014).

O resfriamento lubrificante híbrido é classificado por Gupta *et al.* (2022), como uma técnica recente em resfriamento e lubrificação na área de usinagem. Em estudo sobre o torneamento da liga Ti-3Al-2.5V grau 9, que apresenta potencial de aplicação em setores como o biomédico, o aeroespacial e o esportivo, utilizando insertos sem revestimento e aplicando nitrogênio líquido (LN2), MQL e LN2-MQL na comparação com a usinagem a seco, o desgaste de flanco foi analisado. O resfriamento híbrido LN2-MQL obteve destaque, com desgaste de flanco VB = 0,6 mm, enquanto na condição a seco, atingiu-se um VB = 1,04 mm. Percentualmente, a redução do desgaste de flanco em comparação com a usinagem a seco é de 89,4%, 92,3% e 94,2% devido às estratégias de corte MQL, LN2 e híbrido LN2-MQL. Em relação ao desgaste de cratera, a melhoria foi de 87,7%, 90,4% e 90,8%, respectivamente. Esses resultados foram encontrados por meio de análise microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia por energia dispersiva (EDS). Os autores consideram ainda que o sistema híbrido LN2-MQL apresenta superioridade em todos os aspectos e que os desgastes por adesão e difusão se apresentam de forma diferente em variados ambientes de resfriamento, porém, mais acelerados no corte a seco.

Ao comparar o comportamento de duas ferramentas com e sem revestimento, com raio de ponta 0,4 mm, utilizando corte a seco, com refrigeração, com LN₂ e N₂ no

torneamento da liga Ti-6Al-4V, (Sartori *et al.*, 2018) alcançaram melhor resultado utilizando inserto não revestido resfriado com N₂ a -100 °C, tendo obtido menor desgaste de flanco. Porém, todas as ferramentas apresentaram algum tipo de desgaste, independentemente da refrigeração utilizada. Os pesquisadores entendem que o excesso de resfriamento proporcionado pelo LN₂ causa endurecimento e fragilização do material da peça, aumentando o efeito abrasivo. Já no corte a seco com inserto revestido, maior desgaste de cratera foi observado.

Para Venugopal, Paul e Chattopadhyay (2007), o torneamento criogênico da liga Ti-6Al-4V permitiu redução significativa no desgaste de cratera e de flanco quando comparado ao torneamento com fluido abundante e a seco. Neste caso, jatos de nitrogênio líquido foram injetados nas superfícies de saída e de folga da ferramenta. Os autores consideram que, além da redução do desgaste da ferramenta, esse tipo de resfriamento aumenta a produtividade e favorece o meio ambiente.

Como alternativa à aplicação de fluido criogênico de forma convencional, no torneamento da liga Ti-6Al-4V, (Dhananchezian e Pradeep Kumar, 2011) testaram pastilhas de metal duro com furos nas superfícies de saída e de folga por onde o nitrogênio líquido foi introduzido, proporcionando redução da temperatura de corte na ordem de 60% em relação à usinagem com fluido abundante. Isso resultou em melhoria significativa na força de corte, além de reduzir o desgaste da ferramenta e melhorar a rugosidade da peça.

A preocupação com o meio ambiente deve ser levada em consideração ao utilizar técnicas de refrigeração nos processos de usinagem. Pensando nisso Deiab, Raza e Pervaiz (2014) executaram testes de torneamento da liga Ti-6Al-4V variando as técnicas de refrigeração, como a criogênica, o MQL, o MQL com resfriamento (MQCL) e a usinagem a seco. Além de concluírem que a refrigeração com MQL é mais adequada à preservação do meio ambiente, sugeriram que o uso de revestimento nos insertos pode ser um aliado na preservação da vida da ferramenta em comparação com a ferramenta sem revestimento utilizada no referido experimento.

Também em testes de torneamento da liga Ti-6Al-4V com objetivo de comparar resfriamento por inundação e resfriamento criogênico, (Arunprasath *et al.*, 2022) analisaram as forças de corte, a qualidade da superfície e o desgaste da ferramenta, a fim de comparar o desempenho na usinagem. Os autores concluíram que o resfriamento criogênico é superior em todos os aspectos. As forças de corte

foram reduzidas tanto em avanços mais baixos quanto em condições mais severas e o desgaste da ferramenta foi reduzido, proporcionando maior vida útil por meio de temperaturas de corte mais baixas. Para eles, a criogenia poderia ser uma excelente opção na substituição da inundação convencional em benefício do meio ambiente e da qualidade do processo. Na usinagem da liga Ti-15Mo com o uso de LN2, fluido abundante e a seco, comparativamente, (Rubio, 2023) também verificou aumento significativo da vida da ferramenta com uso de LN2, embora a rugosidade não tenha apresentado tendência clara.

Executando testes de torneamento da liga Ti-10V-2Fe-3Al, que é uma liga de titânio metaestável forjada a quente e posteriormente recozida e temperada em água, (Machai e Biermann, 2011) utilizaram o gás CO₂ para resfriamento da ferramenta e concluíram que, com a aplicação deste método de resfriamento próximo à aresta de corte, há diminuição do desgaste, devido às baixas temperaturas do fluxo de CO₂. Os autores avaliaram ainda que, em especial, o desgaste de entalhe é suprimido até uma velocidade de corte máxima $v_c = 100$ m/min, mas a reatividade química do titânio não é reduzida, mesmo com o uso desta técnica.

O comportamento de desgaste das ferramentas pode variar sob as mesmas condições de usinagem se utilizados diferentes tipos de revestimento. Ao torneiar ligas de titânio Ti-6Al-4V a seco e com MQL (Liu *et al.*, 2013) compararam insertos sem revestimento com insertos revestidos por dois tipos de nanocompósitos (nc) combinados a nitreto de silício amorfo (a): (nc-AlTiN)/(a-Si₃N₄) e (nc-AlCrN)/(a-Si₃N₄). De modo geral, eles observaram que a condição MQL melhorou significativamente a vida útil da ferramenta em comparação à usinagem a seco, na qual a ferramenta revestida por (nc-AlTiN)/(a-Si₃N₄), porém, teve melhor desempenho, apresentando apenas desgaste por adesão, mostrando que o fluido utilizado deve ser escolhido de acordo com o material do revestimento.

Investigando o desgaste de cratera da ferramenta durante a usinagem de ligas de titânio Ti-54M (composição nominal em % em peso é 5Al, 4V, 0,8Mo, 0,5Fe, bal. Ti) e Ti-6246 (6Al, 2Sn, 4Zr, 6Mo, bal. Ti), (Hatt, Crawforth e Jackson, 2017) constataram que ligas com alto teor de molibdênio são menos suscetíveis à formação de TiC na interface ferramenta-peça e que a formação dessa camada durante a usinagem reveste e protege a ferramenta do desgaste de cratera, aumentando sua vida útil. Neste caso, a ferramenta utilizada na usinagem de ligas de alto teor de molibdênio apresentaria um desgaste de cratera maior.

Visando à otimização da rugosidade após o torneamento de titânio grau 5 utilizando pastilhas de metal duro com cobertura PVD, de composição não informada, (Raghavendra *et al.*, 2018) utilizaram o método de Taguchi para determinar os parâmetros de corte ideais. Para eles, o método pode ser um grande aliado para alcançar valores mínimos de rugosidade da peça e desgaste da ferramenta. De acordo com os autores, para a avaliação da rugosidade, a velocidade de corte contribui com 88,92%, a profundidade de usinagem com 5,7% e a taxa de avanço com apenas 0,72%. Essa baixa contribuição da taxa de avanço pode estar relacionada aos baixos valores utilizados (entre 0,046 e 0,125 mm/volta). Em relação à força de corte, os parâmetros de maior influência são a taxa de avanço, que contribui com 48,1%, a profundidade de usinagem, com 26,47%, e a velocidade de corte, com 22,25%. A rugosidade da liga Ti-6Al-4V após o processo de torneamento foi também avaliada por (Moura, da Silva e Oliveira, 2013), que utilizaram insertos de metal duro sem revestimento e compararam o desempenho de testes a seco, com fluido e também com lubrificante sintético com sistema MQL, obtido por soluções contendo 20% em peso de lubrificantes sólidos (grafite com 20 μ m e 40 μ m e Bissulfeto de Molibdênio (MoS_2)). Este último foi o que apresentou melhor resultado, com menores valores de rugosidade, segundo os autores, os quais concluíram também que uma maior velocidade de corte diminui a rugosidade média, enquanto o aumento do avanço gera maiores valores.

O torneamento de ligas de titânio com ferramentas revestidas por processo Arc-PVD foi testado por (Blinkov *et al.*, 2021), que utilizaram ferramentas de metal duro não revestidas e com revestimento Ti-Mo-Al-Ni-Si-N e TiAlN. O desgaste de flanco foi utilizado como critério de análise, com destaque para a ferramenta revestida com Ti-Mo-Al-Ni-Si-N, a qual teve vida 3,6 vezes maior que a ferramenta não revestida e 1,8 vez maior que a ferramenta revestida com TiAlN.

Considerando que as ligas de titânio geram alto calor no processo de corte, favorecendo o desgaste da ferramenta e a imprecisão no processo, (You, Lee e Oh, 2019) aplicaram o método de Taguchi para avaliar o desempenho de insertos de metal duro e cermet no torneamento a seco da liga Ti-6Al-4V e citaram a adesão como principal responsável pelo desgaste da ferramenta. Apontaram também que uma velocidade de corte adequada, aliada a uma taxa de avanço mais lenta, favorece a preservação da ferramenta e a qualidade da superfície usinada.

Outro fator que pode exercer influência sobre as operações de usinagem é o acabamento dos insertos obtidos durante o processo de retificação. Com o objetivo de analisar o comportamento dos insertos com diferentes acabamentos no torneamento da liga Ti-15Mo, (Pivotto, 2020) realizou a retificação de insertos com raio de ponta de 0,8 mm e ângulo de folga de 5° e aresta afiada, utilizando rebolos diamantados com tamanho de grão de 15 μm (D15) e 46 μm (D46). Ele verificou que a variação da rugosidade do inserto entre os dois tipos de rebolo é pouco significativa e os mecanismos de desgaste apresentados foram similares para os dois tipos de inserto. Um comprimento de contato menor do cavaco com a superfície de saída do inserto, porém, foi observado nos insertos com marcas de retificação perpendiculares ao escoamento do cavaco, diminuindo a intensidade da adesão do material da peça sobre a ferramenta.

Conforme Ricardo Signorelli *et al.* (2022), a geometria da ferramenta de corte também possui papel considerável na solução de problemas relativos a materiais de baixa usinabilidade, principalmente quando submetidas a condições severas de usinagem, que é o caso da usinagem de ligas de titânio. Ao investigar qual seria a influência da geometria da ferramenta em relação à rugosidade no torneamento da liga Ti-15Mo, (Paris, 2021) utilizou insertos de metal duro com ângulos de folga de 5°, 7° e 11° e raios de ponta de 0,4 mm, 0,8 mm e 1,2 mm. Os parâmetros de usinagem foram mantidos constantes, com $v_c = 100\text{m/min}$, $f = 0,2\text{ mm/rev}$ e $a_p = 0,5\text{ mm}$. O autor observou que o ângulo de folga não exerceu influência significativa nas rugosidades média (R_a) e máxima (R_z) da peça, mas sim o tamanho do raio de ponta do inserto, sendo que maiores raios levaram à redução dos parâmetros de rugosidade. Já Pivotto, Ventura e Endo (2019), variaram a preparação de aresta a partir da produção de chanfros com diferentes ângulos e observaram que ângulos de chanfro maiores tendem a reduzir a rugosidade de aresta, pois favorecem a sustentação dos grãos de carboneto de tungstênio ao cobalto, porém, causam valores maiores de rugosidade da superfície usinada, pois dificultam o cisalhamento do cavaco devido ao ângulo de saída se tornar mais negativo.

Os resultados mencionados destacam que o aumento da vida da ferramenta na usinagem de ligas de titânio tem sido buscado a partir, principalmente, da aplicação de diferentes técnicas de lubrificação-refrigeração, da otimização dos parâmetros de corte e geometria da ferramenta e aplicação de diferentes revestimentos. Embora diferentes estratégias tenham sido utilizadas, os resultados alcançados ainda indicam baixa

produtividade na usinagem desse tipo de material. Assim, o desenvolvimento de novas pesquisas deve continuar contribuindo para o prolongamento da vida da ferramenta.

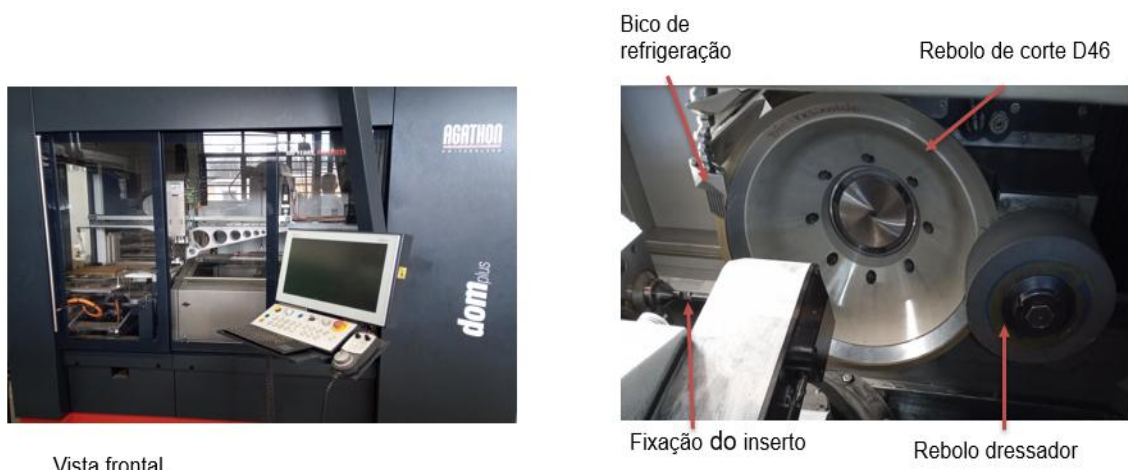
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Apresenta-se aqui a metodologia aplicada para a execução do trabalho, com descrição dos equipamentos e procedimentos utilizados.

3.1 Retificação dos insertos de corte

Insertos de metal duro foram obtidos a partir de processo de acabamento em uma retificadora de quatro eixos Agathon DOM Plus, com potência máxima de 16 kW e rotação máxima de 3400 rpm. Os parâmetros de retificação foram mantidos constantes, sendo a velocidade de corte (v_c) de 20 m/s, a velocidade de avanço axial (v_{fa}) de 6 mm/min e a velocidade de rotação do inserto para a retificação do raio de ponta (v_R) de 35°/s. O processo de retificação do raio de ponta se dá pelo movimento combinado de rotação do inserto em seu ponto central e de posicionamento do rebolo em relação ao inserto na direção de avanço. Fluido de corte a base de óleo mineral integral foi aplicado de forma abundante, com vazão de 12,6 l/min. Na retificação dos insertos, foi aplicado um rebolo diamantado do tipo copo, com ligante resinoide, tamanho de grão D46 e concentração C100 (0,88 g/cm³). A Figura 6 apresenta imagens externa e interna da retificadora utilizada neste trabalho.

Figura 6 - Imagens externa e interna da retificadora Agathon Dom Plus



Vista frontal

Fonte: Elaboração própria

Anteriormente à retificação de cada inserto, a fim de se evitar efeitos do eventual desgaste do rebolo, este foi dressado por um rolo dressador de Al₂O₃ do tipo

copo, com tamanho de grão de 180 #. Tal granulação foi escolhida conforme especificação do fabricante para o tamanho de grão do rebolo em questão. Os parâmetros da dressagem também foram mantidos constantes, sendo a velocidade tangencial do dressador (v_{cd}) de 10 m/s, a velocidade de avanço axial do dressador (v_{fad}) de 3 $\mu\text{m/s}$ e o percurso total de dressagem de 15 μm .

Este processo de retificação de insertos de metal duro é chamado de retificação plana transversal de mergulho. Em um primeiro momento, o excesso de material das superfícies de folga é removido e, a seguir, é realizado o acabamento dos raios de ponta. Sendo o caso, pode-se realizar ainda a preparação das arestas por meio de chanfros.

Os insertos foram confeccionados a partir de blanks de metal duro quadrados com dimensões de 13 mm x 13 mm x 5 mm e composição WC-5%Co, equivalente à classe ISO S10, segundo especificação do fabricante. A geometria final consiste de um ângulo de folga de 5°, um raio de ponta de 0,8 mm e aresta afiada, ou seja, sem preparação específica (código SBGN 120408). As superfícies de saída, sem quebra-cavacos, foram retificadas com os mesmos parâmetros.

3.2 Revestimento dos insertos

Para os testes de usinagem, os insertos receberam revestimentos por processo de deposição física a vapor (PVD), realizado comercialmente. Os revestimentos a serem testados foram escolhidos com base em recomendações do fabricante e suas características, as quais são apresentadas a seguir (Oerlikon, 2024):

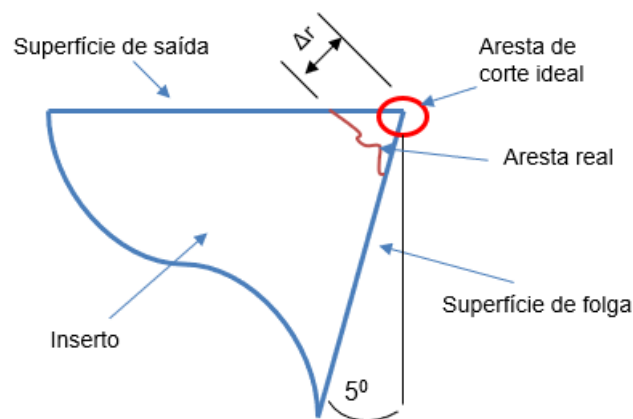
- AlTiN/TiSiXN: com dureza do revestimento aproximada de 38 GPa, é recomendado para corte de materiais de difícil usinabilidade, como ligas de titânio. Oferece resistência à oxidação devido à camada de TiSiXN e sua temperatura de operação está na faixa de 1100 °C, proporcionando estabilidade térmica e redução significativa do desgaste adesivo.
- TiCN multicamada: possui dureza de aproximadamente 37 GPa e suporta temperaturas na faixa de 400 °C. É resistente ao desgaste e possui baixo coeficiente de atrito.
- AlCrN multicamada: também indicado para usinagem de ligas de titânio, possui dureza de aproximadamente 38 GPa e suporta temperaturas maiores que 1100 °C. Possui alta resistência à oxidação e superfície bastante lisa.

3.3 Caracterização dos insertos

Para o processo de caracterização dos insertos antes e após a deposição dos revestimentos, utilizou-se um microscópio com variação de foco Alicona InfiniteFocus SL, que permite, por meio das lentes disponíveis, ampliação de até 500x e geração de imagens tridimensionais. O microscópio é conectado a um computador pessoal com o software Alicona Metrology Measurement, que possibilita o tratamento das imagens e medição dos parâmetros de qualidade de superfície e de aresta.

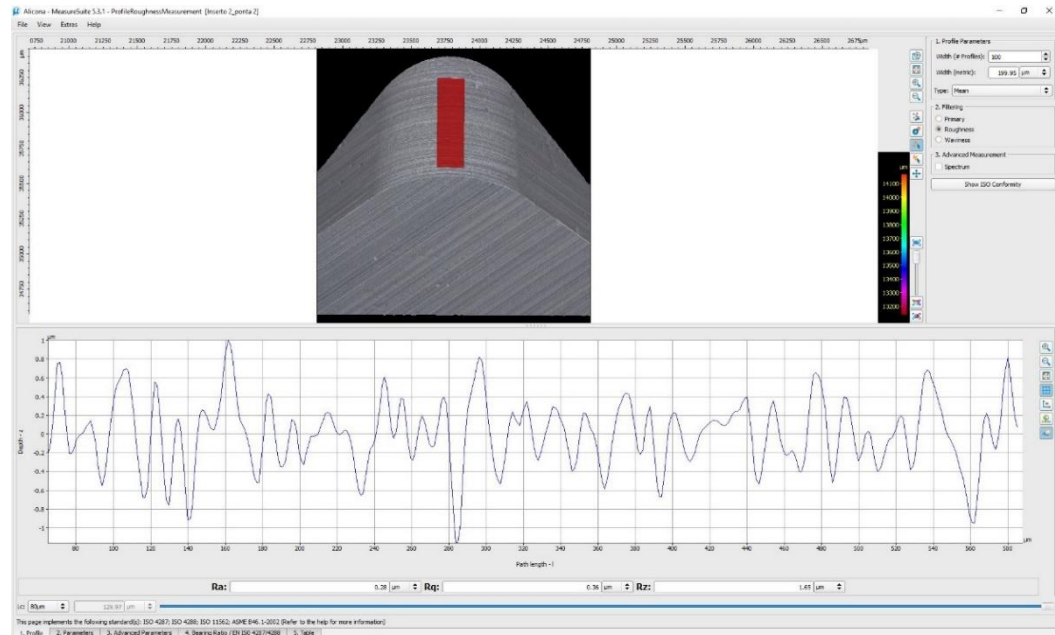
Na região central do raio de ponta dos insertos, mediu-se a rugosidade nas superfícies de folga e de saída, além do lascamento na aresta. No primeiro caso, com a aplicação de um *cut-off* de 800 μm , obteve-se o parâmetro de rugosidade máxima R_z (média de cinco distâncias de pico a vale dentro do comprimento de amostragem). O parâmetro R_z foi escolhido por se entender que ele caracteriza de forma mais direta a superfície resultante do processo de retificação de materiais frágeis. No segundo caso, utilizou-se o parâmetro Δr , que corresponde à menor distância entre os perfis real e ideal (intersecção entre as superfícies de folga e de saída), conforme Figura 7. As medições de 100 perfis foram realizadas perpendicularmente às marcas de retificação e valores médios foram utilizados para análise. A Figura 8 mostra o *template* do software para medição da rugosidade e a Figura 9, o *template* relacionado à medição do lascamento na aresta.

Figura 7 - Indicação de uma aresta ideal e real em um inserto de corte, assim como a diferença entre elas (Δr)

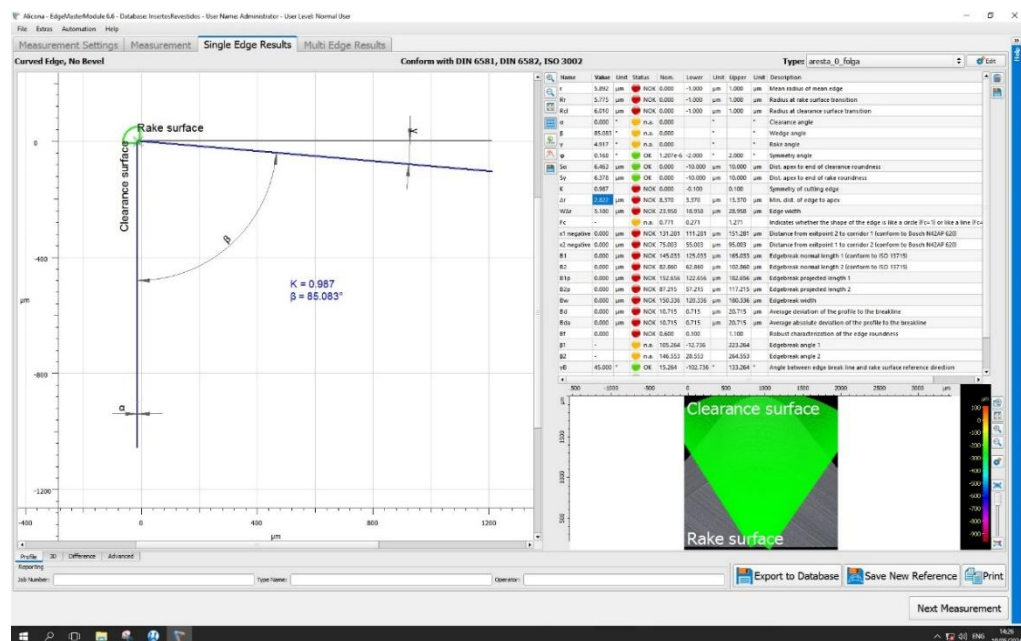


Fonte: Elaboração própria.

Figura 8 - Templates do software para medição da rugosidade Rz



Fonte: Elaboração própria

Figura 9 - Templates do software para medição do lascamento Δr 

Fonte: Elaboração própria

Um valor muito elevado de Δr pode significar uma fragilidade maior da ferramenta, devido a irregularidades na aresta e pontos de concentração de tensão, porém, a eliminação completa do lascamento é impossível.

3.4 Testes de torneamento

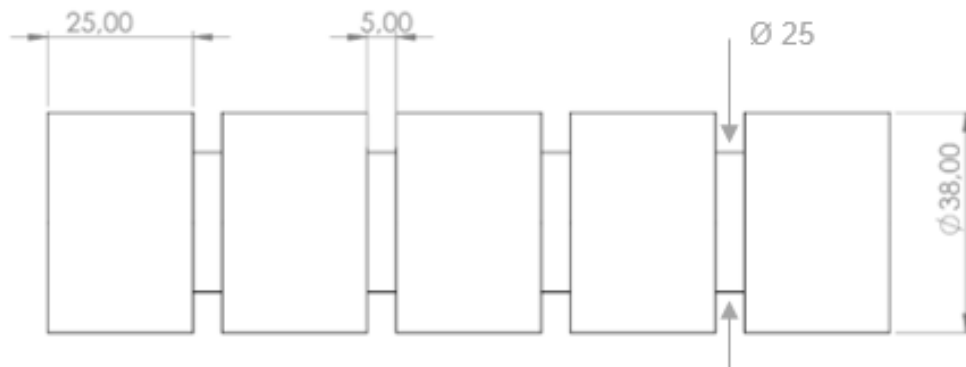
Para a determinação da vida dos insertos sem e com aplicação de diferentes revestimentos e análise do desgaste, foram torneados corpos de prova da liga Ti-15Mo. A caracterização deste material foi realizada por (Rubio, 2023) e os dados demonstram que a referida liga contém 15,39 wt% de molibdênio. Apresenta ainda dureza Vickers 306,2 HV, incrementada pela maior dureza do molibdênio. A partir das curvas de tensão-deformação, levantadas em temperatura ambiente, observou-se uma tensão de deformação de 1129,62 MPa e ductilidade de 8,81%. Um coeficiente de resistência de 6411,9 MPa e um coeficiente de encruamento de 0,6471 foram encontrados, o que demonstra que o material possui grande capacidade de aumentar sua resistência por deformação plástica.

A Figura 10 apresenta as dimensões iniciais do corpo de prova. Os canais correspondem às regiões de saída da ferramenta, sendo apenas os trechos de maior diâmetro usinados durante os testes. Após o torneamento de cada trecho, a rugosidade máxima R_z foi medida por um rugosímetro portátil digital Mitutoyo SJ210 em três regiões da peça, distantes aproximadamente 120° entre si, e o inserto de corte foi removido para a análise do desgaste, avaliado no microscópio confocal mencionado (Alicona InfiniteFocus SL).

As curvas de vida da ferramenta foram levantadas a partir da medição do desgaste máximo de flanco (VB_{Bmax}), sendo o critério de fim de vida definido como um desgaste de 0,3 mm ou ruptura do inserto. Um volume de material removido entre 14000 mm^3 e 15000 mm^3 foi utilizado como parâmetro de fim de teste, pois alguns insertos não atingiram o nível de desgaste estipulado.

No mesmo microscópio, medidas do volume de material aderido na ferramenta após cada passe também foram obtidas por meio da comparação de imagens das ferramentas nova e usada, o que fornece um indicativo da tendência dos diferentes revestimentos à adesão.

Figura 10 - Corpo de prova de Ti-15Mo utilizado nos testes de torneamento (medidas em mm)



Fonte: elaboração própria

Os testes de torneamento foram realizados em um torno CNC Romi Centur 30D, com potência máxima de 9 kW e rotação máxima de 4000 rpm. O porta-ferramenta utilizado corresponde ao modelo CSDBN 2020 K12, o qual possui ângulo de posição de 45°, ângulo de saída e inclinação 0° e fixação por grampo. O ângulo de folga de 5° é determinado na retificação do inserto.

Os parâmetros de usinagem utilizados foram escolhidos com base em trabalhos anteriores (Pivotto, 2022; Paris, 2021; Rubio, 2023), de maneira a possibilitar comparações entre os resultados. A fim de se comparar apenas o desempenho dos diferentes revestimentos, os parâmetros foram mantidos constantes: velocidade de corte $v_c = 100$ m/min, avanço $f = 0,2$ mm/volta e profundidade de usinagem $a_p = 0,5$ mm. Como fluido de corte, utilizou-se uma emulsão de óleo mineral com concentração de 10% aplicada em abundância.

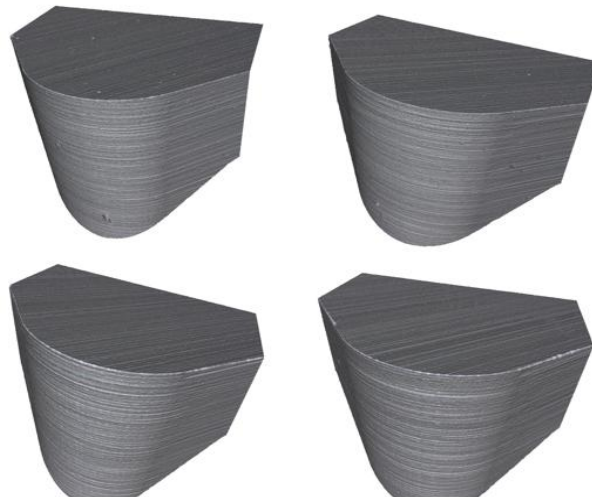
Após o fim dos ensaios, insertos de corte selecionados, foram analisados por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia por energia dispersiva (EDS) no microscópio Philips XL-30 FEG, de modo a se determinar os mecanismos de desgaste para as diferentes ferramentas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização dos insertos de corte após a retificação

De acordo com Carreira (2022) e Denkena, Köhler e Ventura (2013), insertos de corte são fabricados com materiais muito frágeis e de difícil usinabilidade, podendo haver a formação de micro trincas e ruptura de fragmentos durante seu processo de acabamento. Assim, análises visuais e quantitativas são fundamentais para a avaliação da qualidade das superfícies e arestas. A Figura 11 apresenta imagens representativas dos insertos retificados.

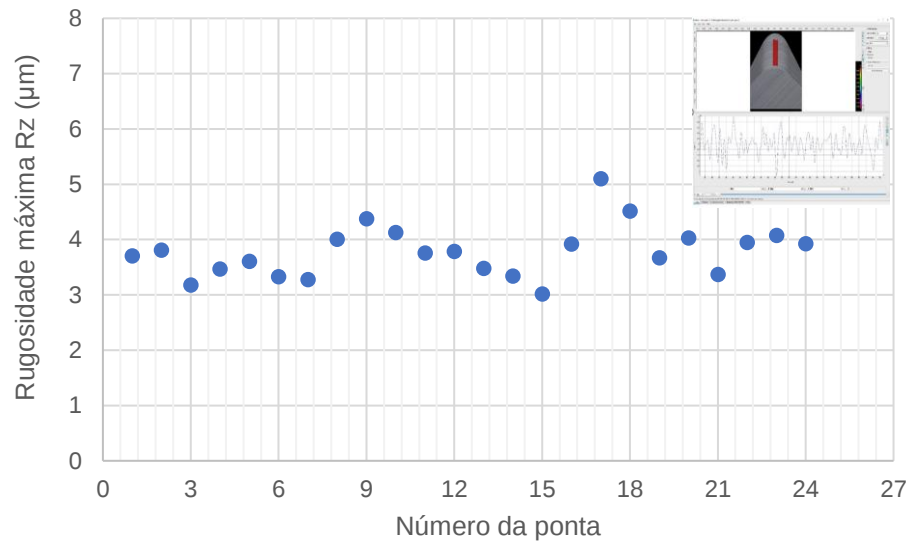
Figura 11 - Imagens de insertos após retificação



Fonte: Elaboração própria.

Qualitativamente, o acabamento se encontra dentro do esperado, com pequenas imperfeições na aresta de corte inerentes ao processo de retificação, que, porém, não devem afetar a vida da ferramenta ou a adesão do revestimento. Da mesma forma, entende-se que a variação da rugosidade máxima R_z na superfície de folga considerando-se todas as pontas não gera efeito negativo sobre o desempenho das diferentes ferramentas. Conforme a Figura 12, o valor médio global é de $3,79 \pm 0,46 \mu\text{m}$, similar aos encontrados por (Pivotto, 2020; Rubio, 2023).

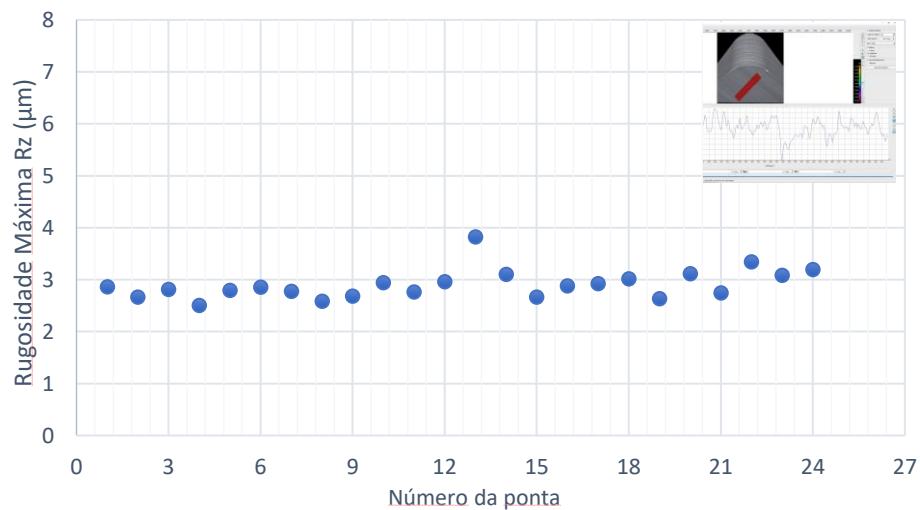
Figura 12 - Rugosidade máxima Rz da superfície de folga em todas as pontas retificadas



Fonte: Elaboração própria.

Análise semelhante pode ser realizada em relação à superfície de saída, para a qual a amplitude e a variação foram ainda menores, conforme demonstra o gráfico da Figura 13, com valor médio global de $2,90 \pm 0,28 \mu\text{m}$, reforçando a confiabilidade do processo de retificação utilizado

Figura 13 - Rugosidade Rz máxima da superfície de saída em todas as pontas retificadas

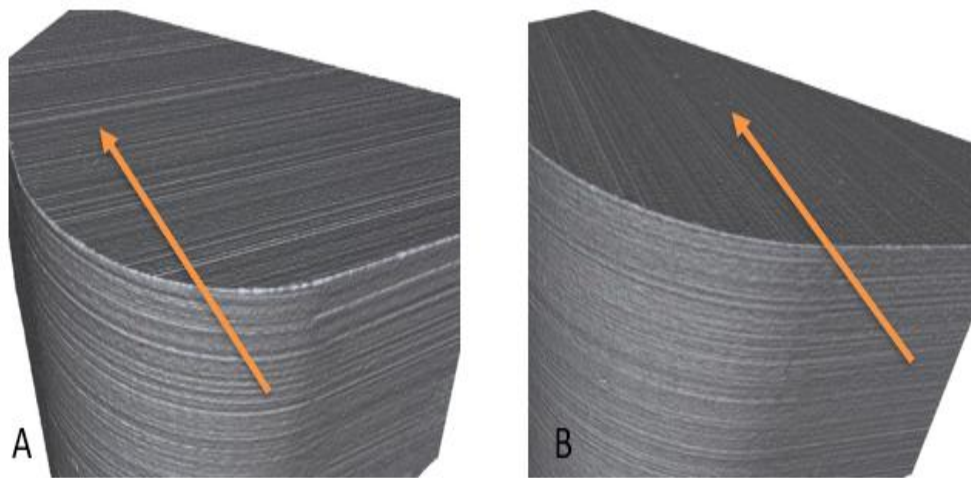


Fonte: Elaboração própria.

Cabe ressaltar que, neste trabalho, não foram utilizadas as pontas dos insertos para as quais a direção de escoamento do cavaco é paralela às marcas de

retificação, já que, de acordo com Pivotto (2020), comparativamente, resultados desfavoráveis de vida da ferramenta foram obtidos. A Figura 14 apresenta imagens de duas pontas de insertos, com marcas perpendiculares e paralelas. As setas indicam o sentido do escoamento do cavaco durante o processo de corte, considerando um ângulo de posição de 45° .

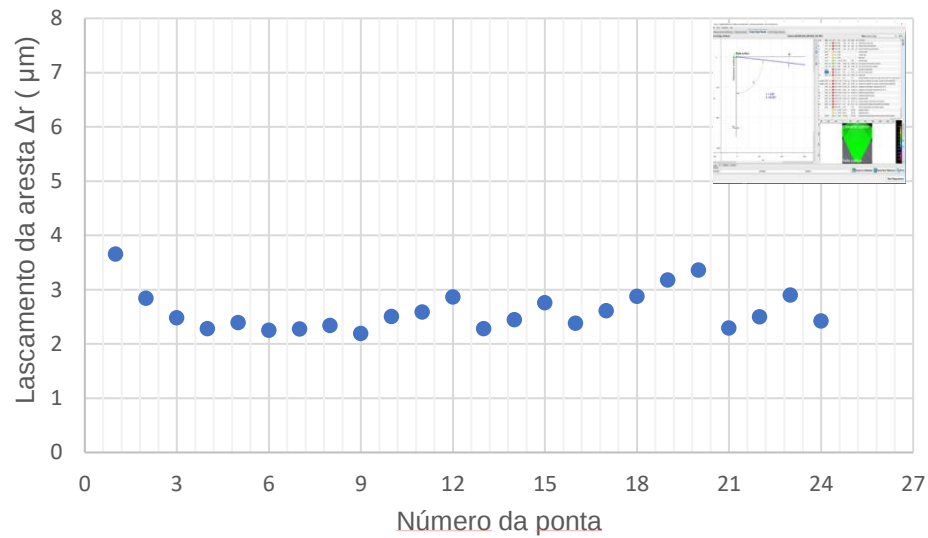
Figura 14 - Ilustração do sentido de escoamento do cavaco em relação às marcas de retificação na superfície de saída: (a) perpendicular e (b) paralelo



Fonte: Elaboração própria.

Para o lascamento da aresta (Δr), a média total obtida foi de $2,62 \pm 0,37 \mu\text{m}$ e os valores medidos para todas as pontas retificadas podem ser observados na Figura 15. Os dados encontrados confirmam a confiabilidade do processo de retificação ao apresentarem uma variação pouco significativa nos valores obtidos.

Figura 15 - Lascamento da aresta Δr em todas as pontas retificadas



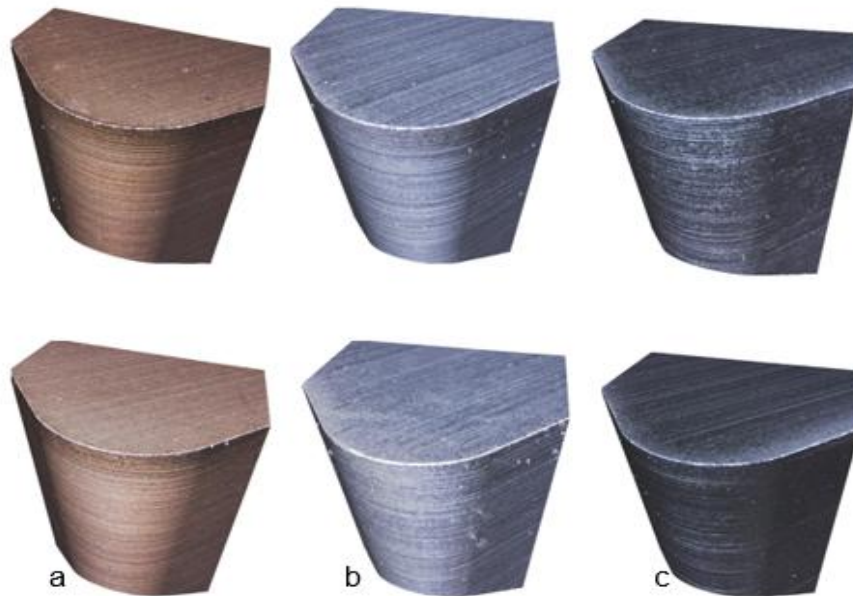
Fonte: Elaboração própria.

Na região da aresta de corte, a ancoragem dos grãos de WC no ligante Co é prejudicada em função do menor contato entre os elementos, o que promove dispersão dos resultados e dificuldade em se reduzir tal parâmetro, mesmo com a otimização do processo de retificação, conforme apontado por (Cruz, Sordi e Ventura, 2020).

4.2 Caracterização dos insertos de corte após a deposição dos revestimentos

Após a aplicação dos revestimentos, os insertos foram novamente analisados por microscopia óptica. Na Figura 16, pode-se observar algumas das pontas dos insertos revestidos.

Figura 16 - Insertos após a deposição dos revestimentos: (a) AlTiN/TiSiXN, (b) TiCN e (c) AlCrN

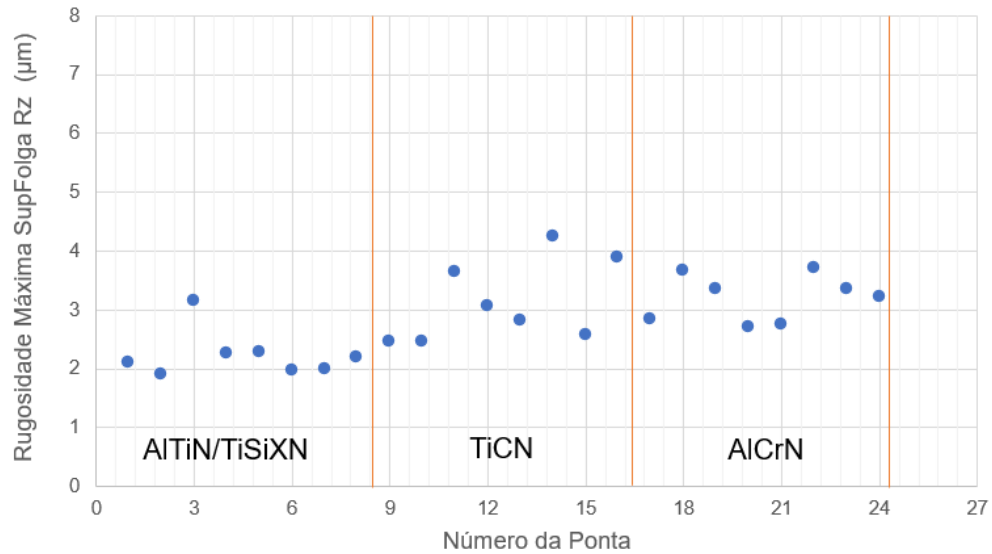


Fonte: Elaboração própria.

A Figura 17 apresenta a rugosidade máxima obtida na superfície de folga de todas as pontas. Na primeira faixa do gráfico estão os valores referentes aos insertos revestidos com AlTiN/TiSiXN, cuja média ficou em $2,22 \pm 0,37 \mu\text{m}$, valores abaixo dos encontrados antes da aplicação do revestimento. Na segunda faixa, estão os valores referentes aos insertos revestidos com TiCN, que também mantiveram média baixa, porém com leve aumento, ficando com $3,14 \pm 0,65 \mu\text{m}$.

No caso do revestimento AlCrN, cujos valores estão representados na terceira faixa do gráfico, a média encontrada foi de $3,19 \pm 0,37 \mu\text{m}$. O valor médio total da rugosidade Rz encontrado entre todos os insertos foi de $2,85 \pm 0,66 \mu\text{m}$, apresentando leve redução em relação à média entre todas as pontas encontrada antes do revestimento, sendo um valor relativamente baixo e que poderá contribuir favoravelmente para a integridade da ferramenta durante o processo de usinagem.

Figura 17 - Rugosidade máxima Rz da superfície de folga das pontas retificadas e revestidas

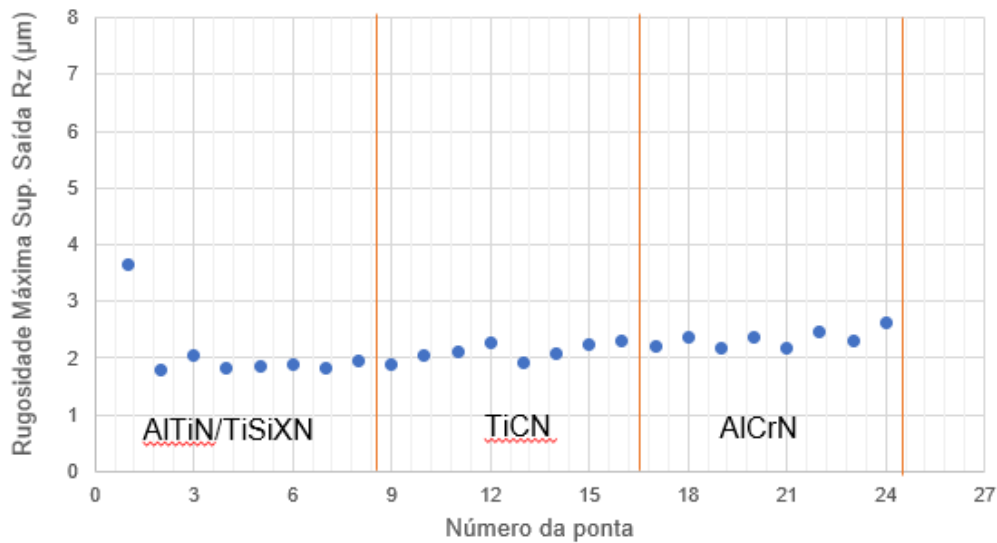


Fonte: Elaboração própria.

No caso da superfície de saída, as medidas de rugosidade máxima são apresentadas na Figura 18. O valor médio total encontrado foi de $2,18 \pm 0,38 \mu\text{m}$, que, além de menor do que a alcançada antes do revestimento, se manteve regular.

Em relação a cada revestimento, na primeira faixa, que representa o inserto revestido com AlTiN/TiSiXN, a média ficou em $2,10 \pm 0,59 \mu\text{m}$, com apenas um ponto visivelmente fora da média. Na segunda faixa, que representa o revestimento TiCN, a média também ficou baixa, com $2,10 \pm 0,14 \mu\text{m}$ e variação muito pequena entre as pontas. Na terceira faixa, onde estão os valores referentes ao revestimento AlCrN, também se percebe pouca variação, com leve aumento na média, de $2,34 \pm 0,14 \mu\text{m}$.

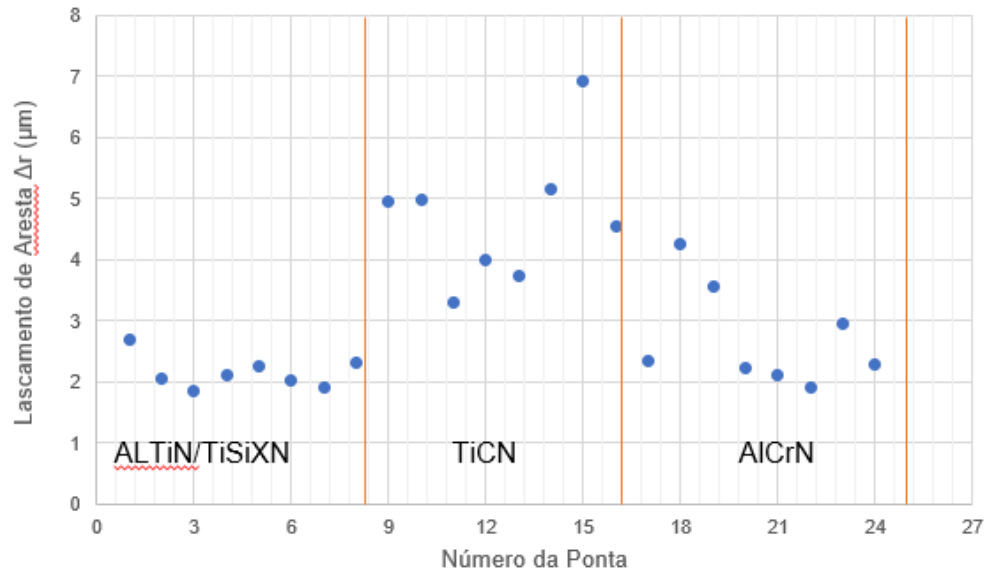
Figura 18 - Rugosidade máxima Rz da superfície de saída das pontas retificadas e revestidas



Fonte: Elaboração própria

Quanto ao lascamento da aresta (Δr), a média global obtida foi de $3,19 \pm 1,33$ µm. Os dados se encontram na Figura 19. O primeiro intervalo do gráfico, onde estão contidos os valores dos insertos revestidos com AlTiN/TiSiXN, teve uma média de $2,16 \pm 0,27$ µm, com pouca variação entre as pontas. No segundo intervalo, a média encontrada na avaliação do revestimento TiCN ficou em $4,70 \pm 1,05$ µm, sendo a mais alta entre os três tipos, para o qual uma das pontas se destacou com 6,93 µm, bem acima do maior valor encontrado antes a aplicação do revestimento. No terceiro intervalo, onde se apresentam os valores referentes aos insertos revestidos com AlCrN, a média ficou em $2,71 \pm 0,77$ µm, próxima à média anterior ao revestimento.

Cabe lembrar que o que foi chamado de lascamento da aresta (Δr) corresponde à menor distância entre os perfis real e ideal da aresta de corte. Assim, logo após a retificação, tal parâmetro corresponde, de fato, a uma medida das irregularidades na aresta. Porém, com a aplicação do revestimento e um possível arredondamento e suavização da aresta, devido à sua espessura, tal parâmetro passa a ser um indicativo da formação de um raio, o que torna a ferramenta cega e explica os maiores valores encontrados em comparação aos medidos antes do processo de deposição.

Figura 19 - Lascamento da aresta Δr das pontas retificadas e revestidas

Fonte: Elaboração própria

Para melhor visualização dos resultados, a Tabela 1 apresenta um resumo dos parâmetros de qualidade obtidos após a retificação e após a deposição dos diferentes revestimentos. Pode-se observar que, tanto nas superfícies de folga quanto nas superfícies de saída, houve uma redução das médias gerais e na média de cada tipo de revestimento. O mesmo não ocorreu em relação ao lascamento da aresta (Δr). A média geral ficou mais alta e a maior contribuição para esse resultado se deve principalmente à média obtida no revestimento TiCN, que pode ter apresentado maior espessura e, portanto, não ter acompanhado as irregularidades.

Tabela 1 - Comparação entre os valores médios de rugosidade máxima

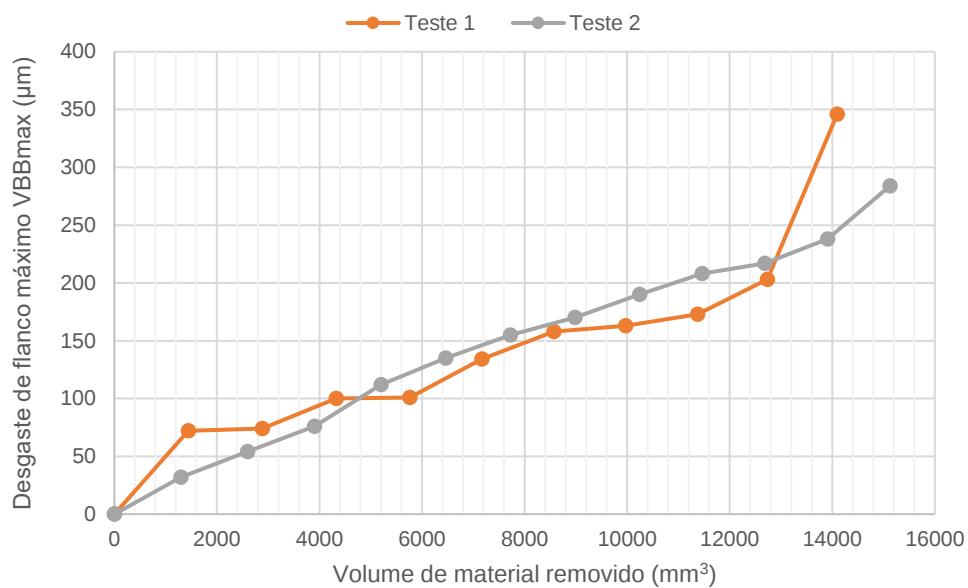
Rugosidade	S/ revest. geral	C/ revest. geral	ALTiN/TiSiXN	TiCN	AlCrN
Aresta (Δr)	2,62	3,19	2,16	4,70	2,71
Sup. Folga	3,79	2,85	2,22	3,14	3,19
Sup. Saída	2,9	2,18	2,10	2,10	2,34

Fonte: Elaboração própria

4.3 Vida da ferramenta e mecanismos de desgaste

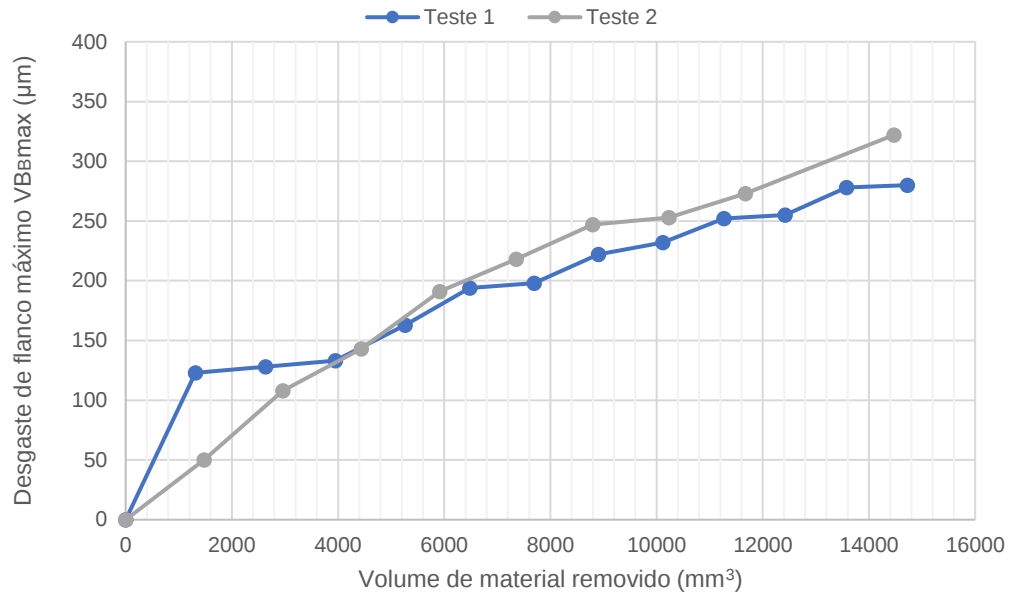
As curvas de desgaste obtidas após o torneamento dos corpos de prova são apresentadas nas Figuras 20 a 23, para os insertos sem revestimento e revestidos com AlTiN/TiSiXN, TiCN e AlCrN, respectivamente. Em todos os casos, nota-se uma evolução regular do desgaste de flanco, com a presença do primeiro trecho característico da curva, que possui taxa de desgaste elevada, mas baixa amplitude. O segundo trecho característico também pode ser observado, com taxa de desgaste moderada e aumento regular. Uma tendência à ocorrência do terceiro trecho é observada apenas para o inserto sem revestimento após um volume removido de aproximadamente 12500 mm³. A remoção incompleta do revestimento nos demais casos pode ter propiciado maior proteção do inserto até o fim do teste.

Figura 20 - Evolução do desgaste de flanco máximo em insertos sem revestimento



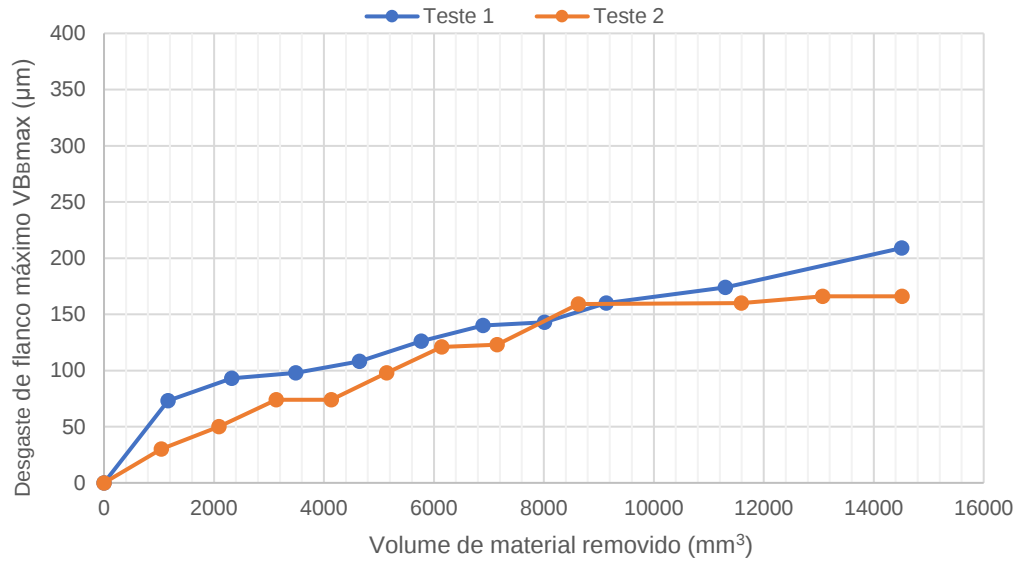
Fonte: Elaboração própria

Figura 21 - Evolução do desgaste de flanco máximo em insertos revestidos por AlTiN/TiSiXN



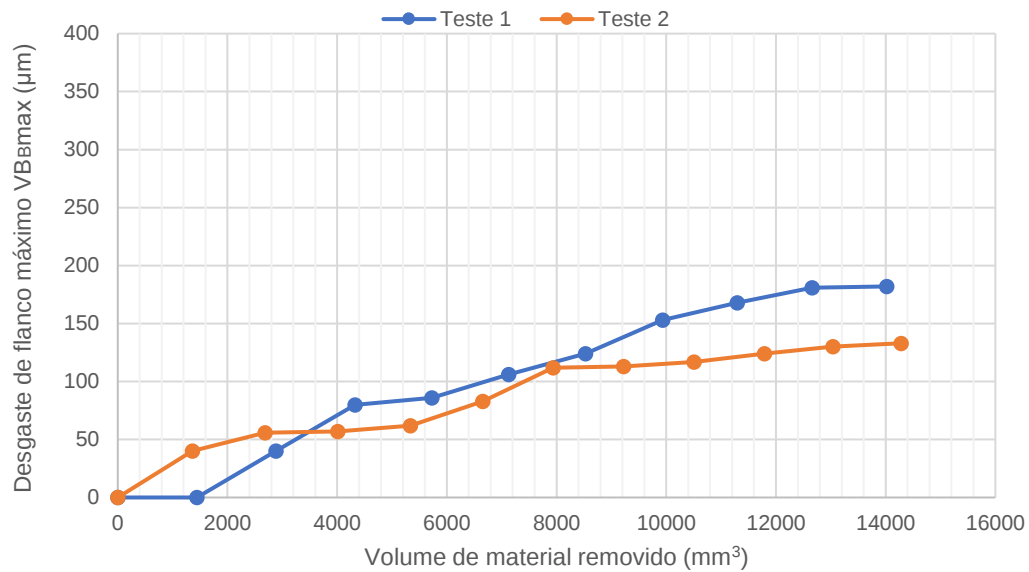
Fonte: Elaboração própria

Figura 22 - Evolução do desgaste de flanco máximo em insertos revestidos por TiCN



Fonte: Elaboração própria

Figura 23 - Evolução do desgaste de flanco máximo em insertos revestidos por AlCrN



Fonte: Elaboração própria

Os maiores valores de desgaste ao fim dos testes, de, em média, 300 μm , foram obtidos para os insertos sem revestimento e revestido por AlTiN-TiSiXN. Os outros dois tipos de inserto, revestidos por TiCN e AlCrN, apresentaram valores máximos de, em média, 175 μm e 160 μm , respectivamente, demonstrando o potencial de aumento da vida da ferramenta na usinagem da liga Ti-15Mo com a utilização de um revestimento adequado.

Embora tendo evitado a ocorrência do terceiro trecho da curva, de desgaste acelerado, o revestimento AlTiN/TiSiXN se desgastou mais rapidamente no início do teste em comparação aos outros revestimentos, o que se nota pela maior amplitude do desgaste ($> 100 \mu\text{m}$) ao término do primeiro trecho da curva. Isso pode ter levado ao maior valor de desgaste no fim do teste.

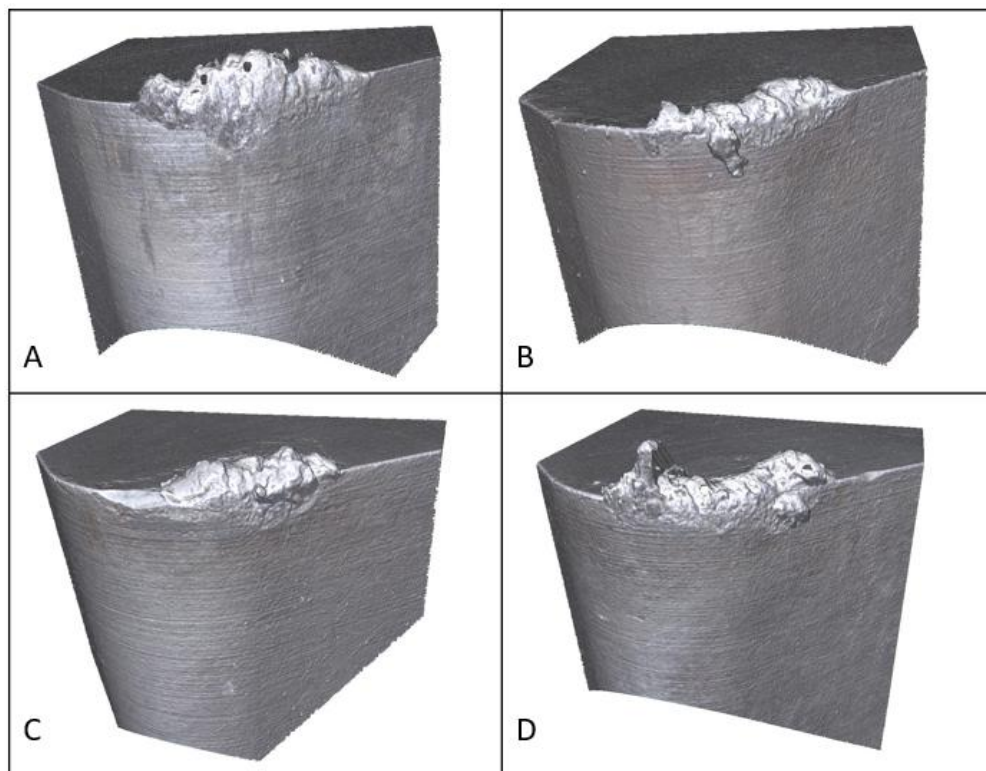
Apesar da esperada afinidade química entre os materiais do revestimento e da peça, devido à presença do titânio em ambos, verifica-se que a proteção dada à ferramenta pelas propriedades mecânicas superiores e menor atrito dos revestimentos trazem benefícios.

Com base nas imagens de microscopia óptica apresentadas na Figura 24, percebe-se a predominância de adesão em todos os casos, indicando formação de aresta postiça de corte (APC), a qual, embora tenha favorecido o desgaste de flanco, o que se observa pela remoção irregular de material da ferramenta na superfície de folga, pode ter protegido a superfície de saída, evitando a formação de desgaste de

cratera. A aresta postiça de corte (APC), normalmente ocorre em baixas velocidades de corte, que favorecem o encruamento do material usinado e aderido na ponta da ferramenta. Segundo Diniz; Marcondes e Coppini (2014), o fluxo de cavaco adere à superfície de saída e a repetição contínua desse fluxo cria camadas sobre camadas causando deformação e encruamento, transformando esse material do cavaco em aresta de corte até que haja seu rompimento, após o qual as partículas desprendidas se aderem à superfície usinada, prejudicando o acabamento da mesma.

Na borda inferior do desgaste por adesão, notam-se ainda indícios de difusão, mecanismo caracterizado pela ocorrência de uma superfície lisa, em que as marcas de retificação acabam sendo suavizadas pela remoção de pequenas partículas do material da ferramenta por ação química.

Figura 24 - Insertos de corte (a) sem revestimento e revestidos por (b) AlTiN/TiSiXN, (c) TiCN e (d) AlCrN, todos em fim de ensaio



Fonte: Elaboração própria

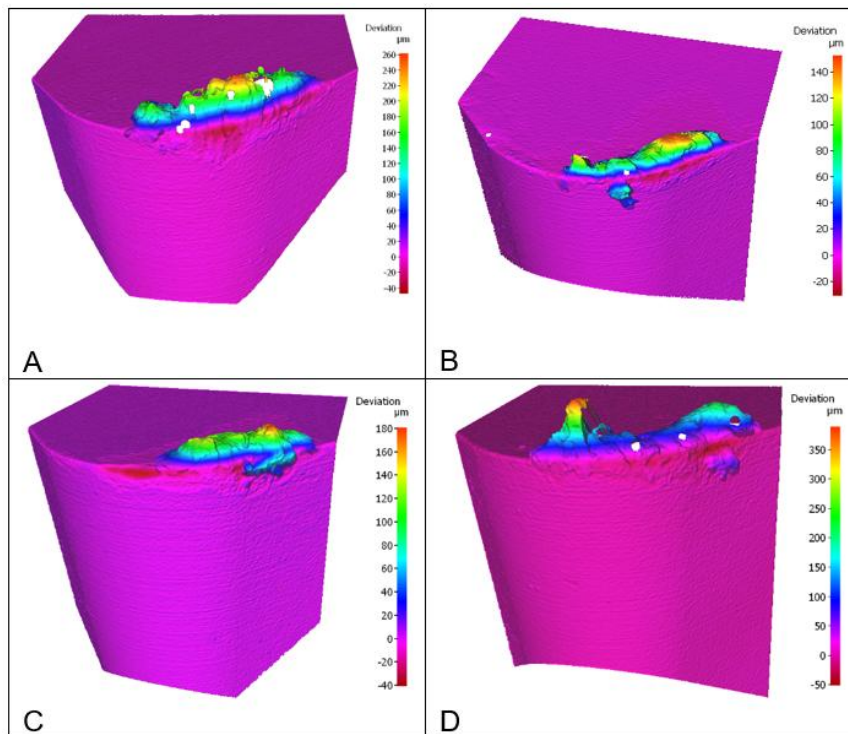
Tais características são observadas para todos os tipos de revestimento aplicados e mesmo na ferramenta sem revestimento, padrão esperado devido à afinidade química entre os materiais em contato e à reatividade do titânio. De acordo com a literatura Ghani *et al.* (2016), Sartori *et al.* (2018) e Sousa; Silva (2020), tais

mecanismos estão frequentemente presentes na usinagem deste tipo de liga e revestimentos ou materiais de ferramenta que os minimizem de forma significativa ainda não foram reportados.

O revestimento proporciona à ferramenta, características que reduzem a abrasão, a difusão e a oxidação (Stephenson e Agapiou, 2018), porém, segundo Campbell Jr (2011), as características de alta temperatura do processo de usinagem de ligas de titânio colocam a ferramenta de corte sob elevada carga térmica, pressão e abrasão, levando ao rápido desgaste de flanco.

A adesão não é um fenômeno linear, podendo variar para volumes maiores ou menores a cada passe de torneamento, o que pode explicar certa dispersão tanto na vida útil da ferramenta quanto nos parâmetros de rugosidade da peça. Seu comportamento foi observado a partir da comparação entre os volumes das pontas novas e usadas a cada passe de torneamento. As imagens resultantes da sobreposição dessas duas pontas, em escala de cores, podem ser vistas na Figura 25. As escalas demonstram o desvio em relação à imagem original (ponta nova). Valores positivos indicam adesão, enquanto valores negativos estão relacionados ao desgaste.

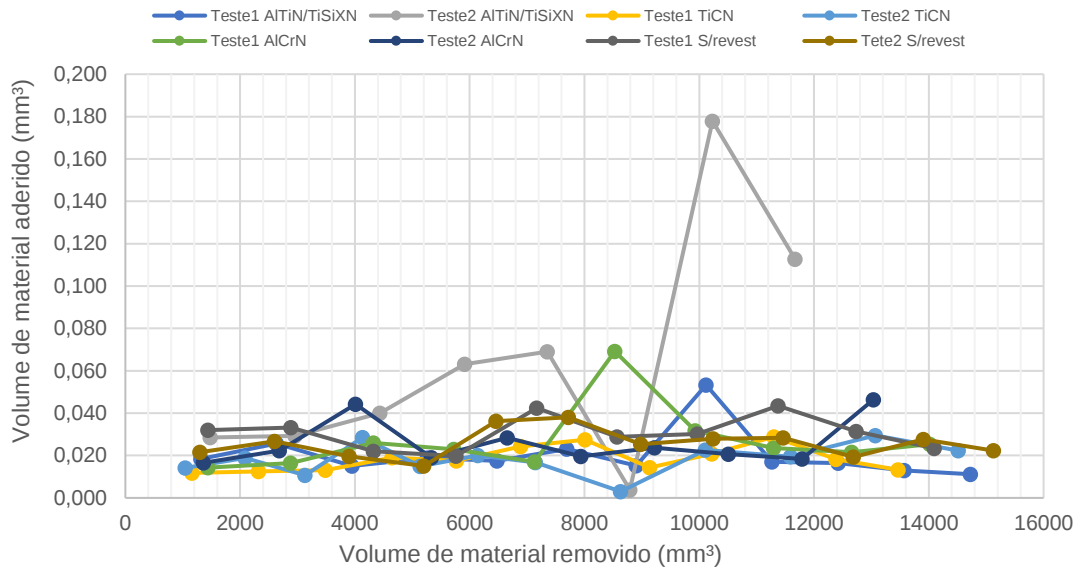
Figura 25 - Imagens resultantes da sobreposição de pontas novas e usadas de insertos de corte (a) sem revestimento e usadas por (b) AlTiN/TiSiXN, (c) TiCN e (d) AlCrN, todos em fim de ensaio.



Fonte: Elaboração própria

Na Figura 26, observa-se a evolução do volume de material aderido em cada ponta utilizada. Nota-se que esse volume sofre constante variação devido à troca do material aderido no processo de aderência-deslizamento do cavaco, conforme cada passe é executado. Assim, não foi verificada tendência clara de variação em nenhum dos casos ao longo dos testes. Destacam-se apenas maiores volumes em alguns dos passes realizados no Teste 2 do inserto revestido com AlTiN/TiSiXN, o que pode ter relação com o maior crescimento do desgaste de flanco em comparação às outras condições.

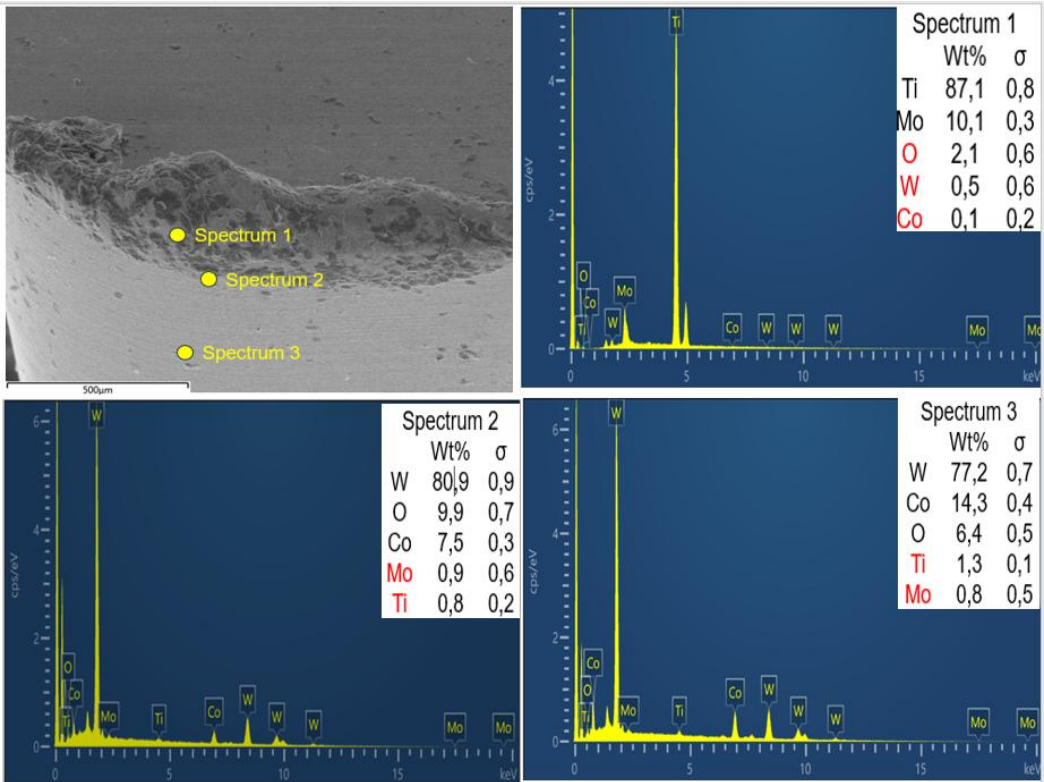
Figura 26 - Evolução do volume de material aderido para os insertos sem e com revestimento



Fonte: Elaboração própria

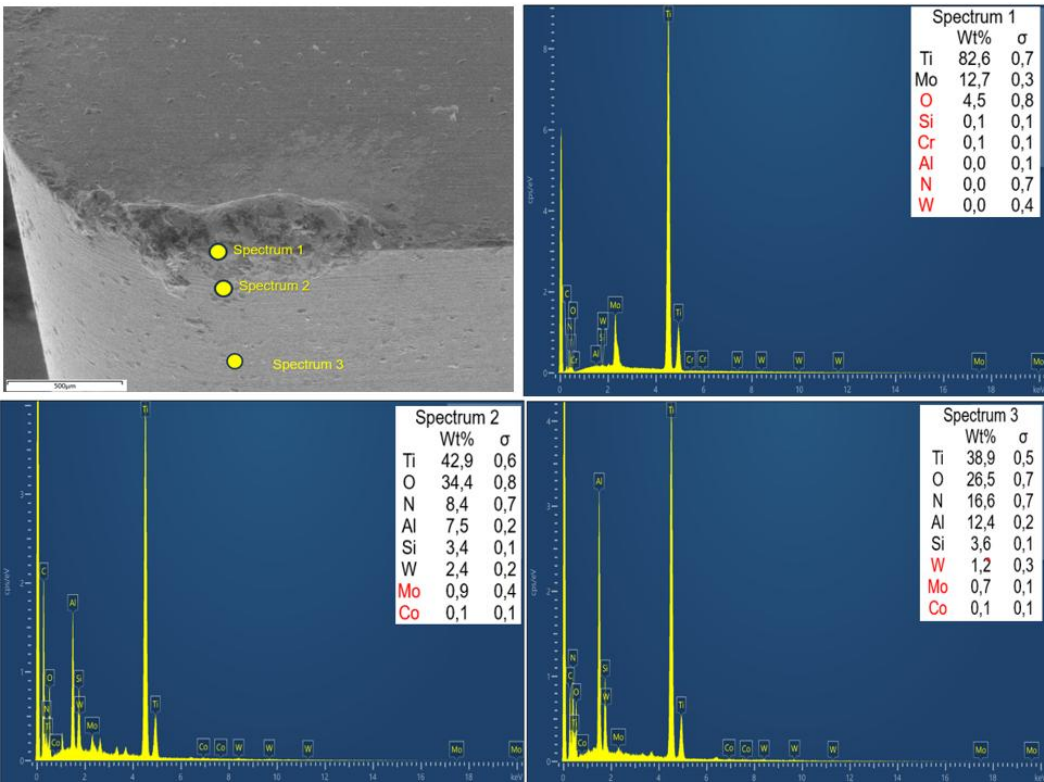
Para uma análise aprofundada dos mecanismos de desgaste e comprovação das explicações dadas, insertos em fim de ensaio foram submetidos a microscopia eletrônica de varredura (MEV) e analisados por espectroscopia por energia dispersiva (EDS). Os resultados são demonstrados nas Figuras 27 a 30 para os insertos sem revestimento e revestidos por AlTiN/TiSiXN, TiCN e AlCrN, respectivamente.

Figura 27 - Imagem de MEV e análise EDS de inserto sem revestimento (Teste1)



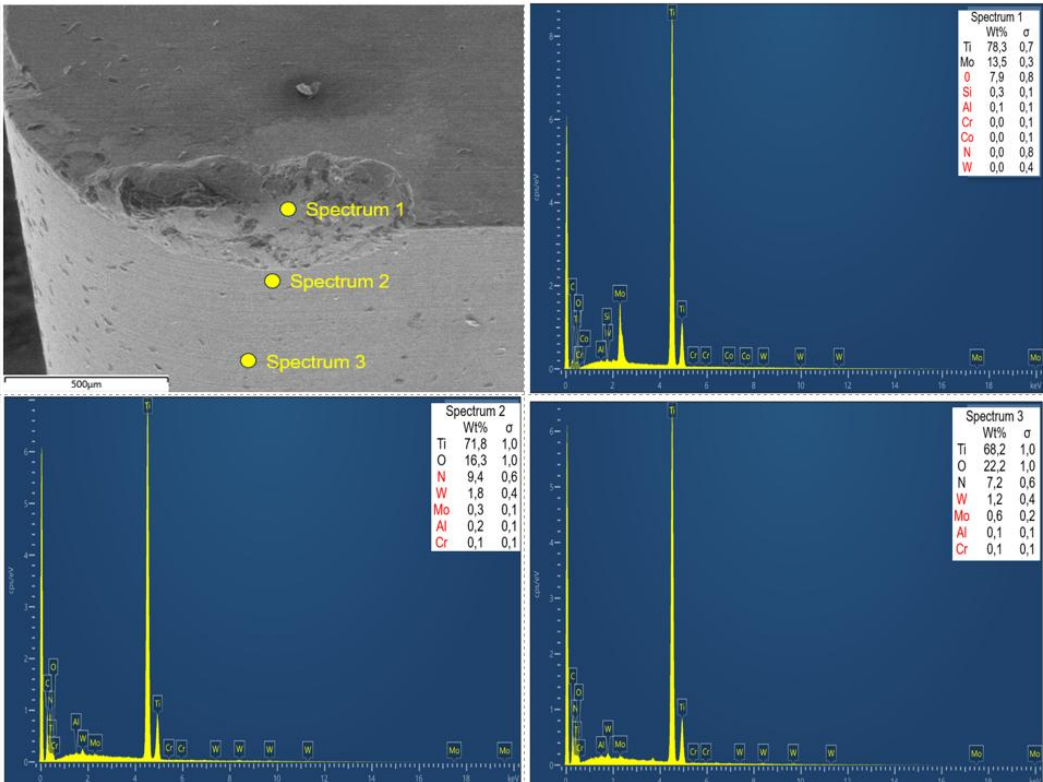
Fonte: Elaboração própria

Figura 28 - Imagem de MEV e análise EDS de inserto revestido com AlTiN/TiSiXN (Teste 1)



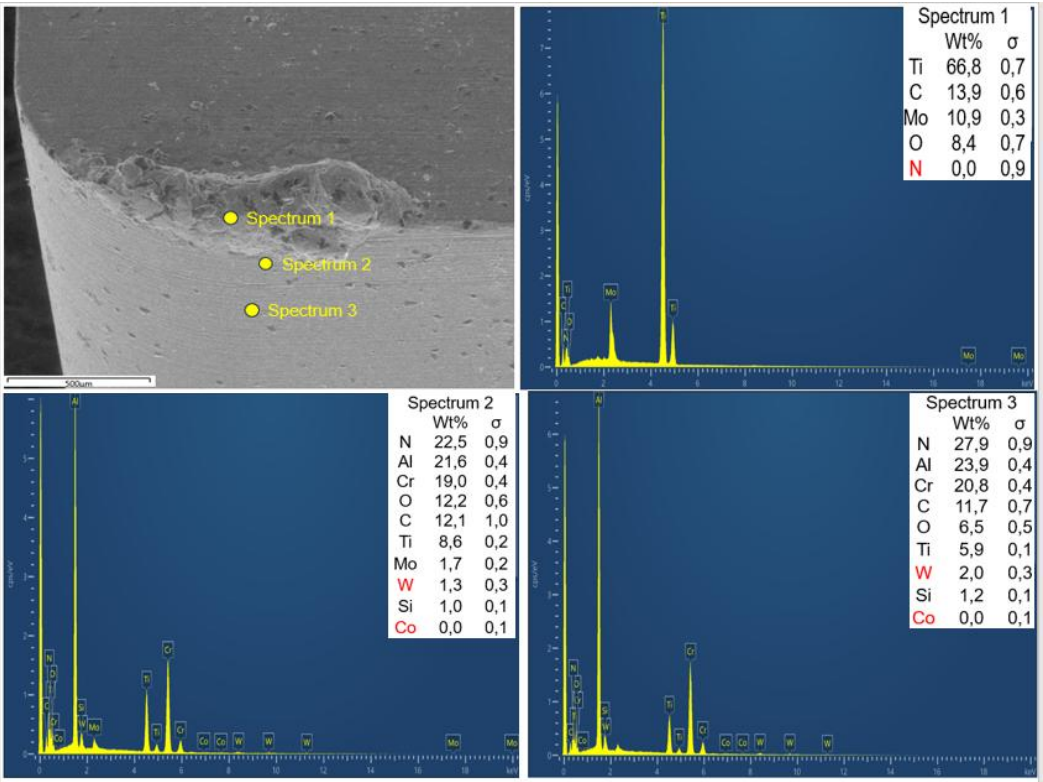
Fonte: Elaboração própria

Figura 29 - Imagem de MEV e análise EDS de inserto revestido com TiCN (Teste 1)



Fonte: Elaboração própria

Figura 30 - Imagens de MEV e análise EDS de inserto revestido com AlCrN (Teste 1)



Fonte: Elaboração própria

De maneira geral, os espectros relacionados aos pontos de número 1 trazem predominantemente elementos do material usinado, ou seja, Ti e Mo, comprovando a ocorrência de adesão. Já os espectros dos pontos 2 e 3 apresentam principalmente elementos dos respectivos revestimentos (Al, Ti, N e Si na Figura 28; N e Ti na Figura 29; Al, Cr e N na Figura 30) ou do material da ferramenta no caso do inserto sem revestimento (W e Co na Figura 27). Características específicas que comprovassem a ocorrência de difusão na região dos pontos de número 2, como redução significativa da quantidade dos elementos do revestimento ou do substrato não foram observadas.

Notou-se também a presença do oxigênio em todos os pontos 2 e 3, que pode estar relacionada à formação de camadas de óxido nas regiões sem adesão próximas ao corte, em contato com o ambiente e ainda afetadas pelas altas temperaturas.

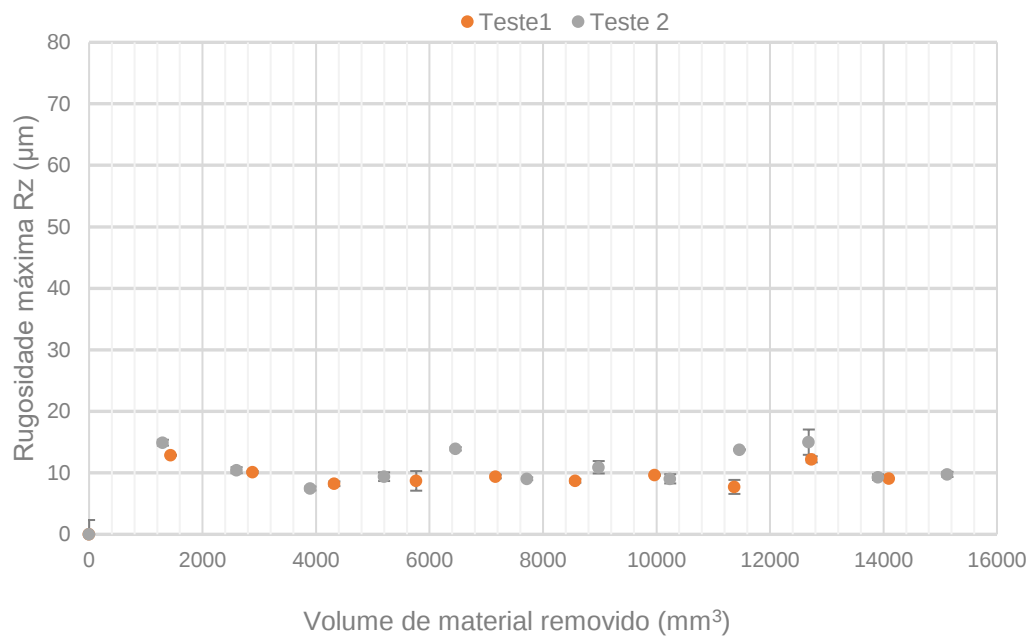
4.4 Análise da superfície da peça usinada

Os níveis de tolerância de rugosidade de uma peça são definidos de acordo com as exigências específicas de cada aplicação. Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2014), o acabamento superficial é influenciado por diversos fatores, como o avanço, o raio de ponta da ferramenta, a velocidade de corte e a profundidade de usinagem. Além disso, características do material a ser usinado, o tipo de refrigeração, o desgaste ou lascamento da aresta de corte da ferramenta, bem como instabilidades no processo, como vibrações, também podem impactar significativamente a qualidade da superfície usinada.

Os valores da rugosidade máxima R_z obtidos após cada passe de torneamento com os diferentes insertos são apresentados nas Figuras 31 a 34. Para os insertos sem revestimento e aqueles revestidos com TiCN e AlCrN, nota-se pouca variação dos valores de rugosidade, todos oscilando em torno de 10 μm e bastante regulares considerando a mesma peça. Assim, pode-se afirmar que o aumento do desgaste não teve efeito relevante sobre o acabamento da peça nestes casos. Já nos experimentos com insertos revestidos com AlTiN/TiSiXN, verifica-se o mesmo comportamento no Teste 2, mas aumento da rugosidade no Teste 1 a partir de um volume removido de aproximadamente 10000 mm^3 . Cabe destacar, porém, que, neste último teste, não se notou variação da curva de desgaste ou aumento significativo do volume de material aderido, não se podendo, portanto, correlacionar tais variáveis.

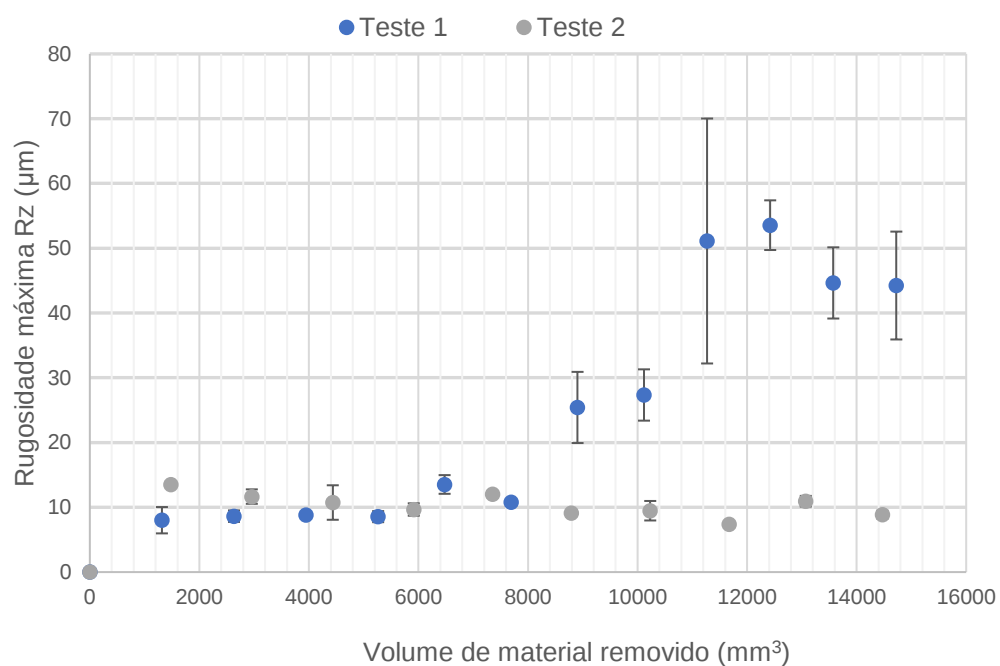
Uma análise mais detalhada da geometria do desgaste e da superfície da peça deveria ter sido feita nos passes correspondentes. Nota-se ainda o aumento do desvio padrão.

Figura 31 - Evolução da rugosidade máxima Rz em testes realizados com insertos sem revestimento



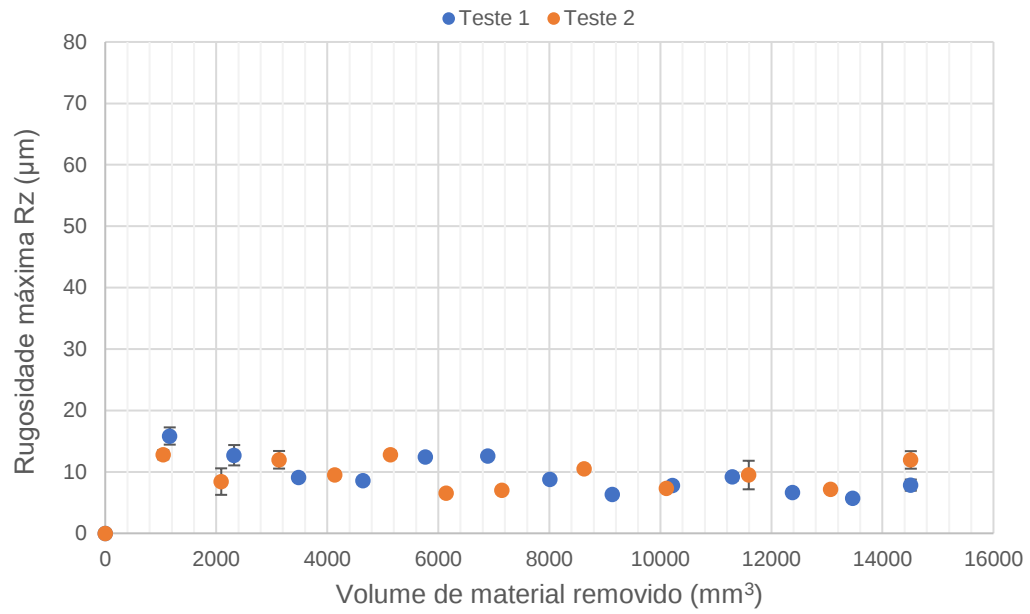
Fonte: Elaboração própria

Figura 32 - Evolução da rugosidade máxima Rz em testes realizados com insertos revestidos com AlTiN/TiSiXN



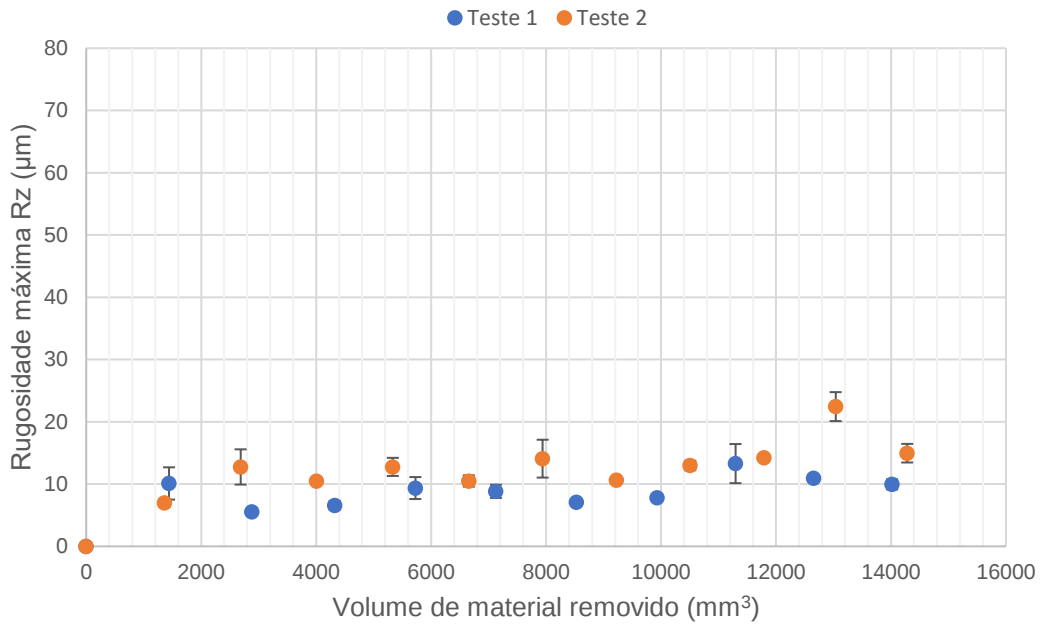
Fonte: Elaboração própria

Figura 33 - Evolução da rugosidade máxima Rz em testes realizados com insertos revestidos com TiCN



Fonte: Elaboração própria

Figura 34 - Evolução da rugosidade máxima Rz em testes realizados com insertos revestidos com AlCrN



Fonte: Elaboração própria

5 CONCLUSÕES

Testes de torneamento com insertos de corte de metal duro classe ISO S10 retificados em laboratório e retificados e revestidos com diferentes coberturas (AlTiN/TiSiXN, TiCN e AlCrN) foram realizados, de modo a verificar o potencial dos revestimentos para aumento da vida da ferramenta e analisar os mecanismos de desgaste e impactos sobre a qualidade superficial da peça. Com base nos ensaios realizados, pôde-se concluir que:

- O processo de retificação se mostrou confiável, com níveis de rugosidade dentro dos padrões normais e pouca variação entre os insertos produzidos.
- Após o revestimento dos insertos, houve pequena redução da rugosidade nas superfícies de folga e de saída e certo aumento do parâmetro considerado como lascamento da aresta (Δr), o que, na realidade, deve ser considerado como uma alteração na microgeometria, não sendo necessariamente uma piora na qualidade da aresta de corte.
- Os Insertos revestidos com AlTiN/TiSiXN foram os que apresentaram resultados menos satisfatórios, com maiores valores de desgaste de flanco ($\sim 310 \mu\text{m}$) e média global da rugosidade R_z ($\sim 25 \mu\text{m}$) acima da média obtida nas demais condições.
- Os insertos revestidos com TiCN, mesmo suportando temperaturas bem inferiores aos outros revestimentos, conforme especificação do fabricante, obtiveram resultados de desgaste de flanco ($\sim 175 \mu\text{m}$) e rugosidade da superfície usinada ($\sim 10 \mu\text{m}$), média abaixo das obtidas com os insertos revestidos com AlTiN/TiSiXN.
- Os insertos revestidos com AlCrN, de maneira geral, obtiveram resultados mais satisfatórios em relação a todos os demais por apresentarem desgaste de flanco menores ($\sim 160 \mu\text{m}$) e rugosidade de superfície usinada abaixo da média ($\sim 9 \mu\text{m}$), além de baixa aderência do material usinado, motivada pela ausência de titânio na composição do revestimento.
- Em relação aos insertos sem revestimento, a ocorrência do terceiro trecho da curva de desgaste, de maior taxa, levou a um maior valor médio de desgaste de flanco ($\sim 325 \mu\text{m}$), embora a rugosidade gerada tenha sido similar à obtida com os insertos revestidos por TiCN e AlCrN.

- A adesão foi o principal mecanismo de desgaste da ferramenta em todos os casos. Indícios de difusão foram observados por microscopia óptica, mas imagens de MEV não permitiram comprovar esta hipótese. Possivelmente devido à proteção da superfície de saída pelo material aderido, não houve desgaste de cratera, tendo a ferramenta se desgastado apenas por remoção de material da superfície de folga.

6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista os resultados obtidos, sugere-se como trabalhos futuros três vertentes. A primeira delas para uma investigação mais detalhada dos fenômenos observados:

(i) Análise dos diferentes revestimentos por meio de ensaios químicos e tribológicos, de maneira a se fundamentar os mecanismos de desgaste determinados.

Já na mesma direção deste trabalho, para melhora da usinabilidade da liga de titânio investigada, recomenda-se:

(ii) Estudo de revestimentos isentos de titânio, a fim de se reduzir o efeito da adesão sobre o desgaste, e de estratégias para extração e redução do calor da região de corte, como novas técnicas de aplicação e desenvolvimento de fluidos de corte.

(iii) Alterações da geometria e acabamento da ferramenta, como aplicação de polimento ou de texturas, de modo a se reduzir o coeficiente de atrito nas interfaces cavaco-ferramenta e ferramenta-peça.

REFERÊNCIAS

ABDEL-HADY GEPREEL, Mohamed; NIINOMI, Mitsuo. Biocompatibility of Ti-alloys for long-term implantation. **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**, [s. l.], v. 20, p. 407–415, 2013. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1751616112003268>. Acesso em: 6 maio 2024.

ARRAZOLA, P.-J. *et al.* Machinability of titanium alloys (Ti6Al4V and Ti555.3). **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 209, n. 5, p. 2223–2230, 2009.

ARUNPRASATH, K. *et al.* Cryogenic turning of titanium alloys: Machinability characteristics and environmental consequences. **Materials Today: Proceedings**, [s. l.], v. 66, p. 749–753, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214785322021551>. Acesso em: 6 maio 2024.

ASKELAND, Donald R. *et al.* The science and engineering of materials. [s. l.], 2003.

BEZERRA, Ewerton de Oliveira Teotônio *et al.* Avaliação de não conformidades de próteses de quadril fabricadas com ligas de titânio e aço inox. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [s. l.], v. 22, p. e11782, 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/nj5gLv6hNt7WCGqT59NhK4K/?lang=pt>. Acesso em: 27 set. 2024.

BLINKOV, I V *et al.* Arc-PVD coatings for titanium machining tool. **Journal of Physics: Conference Series**, [s. l.], v. 2144, n. 1, p. 012025, 2021. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2144/1/012025>. Acesso em: 6 maio 2024.

BOUZAKIS, Konstantinos-Dionysios *et al.* Cutting with coated tools: Coating technologies, characterization methods and performance optimization. **CIRP Annals**, [s. l.], v. 61, n. 2, p. 703–723, 2012. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850612002053>. Acesso em: 6 maio 2024.

BOYER, R. R.; BRIGGS, R. D. The use of β titanium alloys in the aerospace industry. **Journal of Materials Engineering and Performance**, [s. l.], v. 14, n. 6, p. 681–685, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1361/105994905X75448>. Acesso em: 9 maio 2024.

ÇAHA, I. *et al.* A Review on Bio-functionalization of β -Ti Alloys. **Journal of Bio- and Tribo-Corrosion**, [s. l.], v. 6, n. 4, p. 135, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40735-020-00432-0>. Acesso em: 13 maio 2024.

CAMPBELL JR, F.C. **Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials**. [S. l.]: Elsevier, 2011.

CARREIRA, Luan Augusto de Souza. **Avaliação da eficiência energética no processo de retificação de metal duro**. 2022. - Universidade Federal de São Carlos, [s. l.], 2022.

CHEN, Liang-Yu; CUI, Yu-Wei; ZHANG, Lai-Chang. Recent Development in Beta Titanium Alloys for Biomedical Applications. **Metals**, [s. l.], v. 10, n. 9, p. 1139, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-4701/10/9/1139>. Acesso em: 7 out. 2024.

CHIM, Y.C. *et al.* Oxidation resistance of TiN, CrN, TiAlN and CrAlN coatings deposited by lateral rotating cathode arc. **Thin Solid Films**, Netherlands, v. 517, n. 17, p. 4845–4849, 2009.

COELHO, Reginaldo T.; SILVA, Eraldo Janonne. Materiais para ferramenta de corte em usinagem. **Universidade de São Paulo-USP, São Paulo**, [s. l.], 2018. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5357590/mod_resource/content/1/8%20-%20Materiais%20para%20ferramentas%20de%20corte.pdf. Acesso em: 13 maio 2024.

CRUZ, Dennis Coelho; SORDI, Vitor Luiz; VENTURA, Carlos Eiji Hirata. Surface analysis of WC-5%Co cemented tungsten carbide cutting insert after plunge-face grinding. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 108, n. 1–2, p. 323–330, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s00170-020-05382-y>. Acesso em: 6 maio 2024.

DEIAB, Ibrahim; RAZA, Syed Waqar; PERVAIZ, Salman. Analysis of Lubrication Strategies for Sustainable Machining during Turning of Titanium Ti-6Al-4V Alloy. **Procedia CIRP**, [s. l.], v. 17, p. 766–771, 2014. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827114003734>. Acesso em: 8 maio 2024.

DENG, Yang *et al.* Physical vapor deposition technology for coated cutting tools: A review. **Ceramics International**, [s. l.], v. 46, n. 11, p. 18373–18390, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272884220311123>. Acesso em: 6 maio 2024.

DENKANA, B.; BREIDENSTEIN, B. Influence of the Residual Stress State on Cohesive Damage of PVD-Coated Carbide Cutting Tools. **Advanced Engineering Materials**, [s. l.], v. 10, n. 7, p. 613–616, 2008. Disponível em: <https://onlinelibrary-wiley.ez31.periodicos.capes.gov.br/doi/10.1002/adem.200800063>. Acesso em: 13 maio 2024.

DENKANA, B.; KÖHLER, J.; VENTURA, C. E. H. Customized cutting edge preparation by means of grinding. **Precision Engineering**, [s. l.], v. 37, n. 3, p. 590–598, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141635913000093>. Acesso em: 7 ago. 2024.

DHANANCHEZIAN, M.; PRADEEP KUMAR, M. Cryogenic turning of the Ti-6Al-4V alloy with modified cutting tool inserts. **Cryogenics**, [s. l.], v. 51, n. 1, p. 34–40, 2011. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0011227510002031>. Acesso em: 8 maio 2024.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. [S. l.]: Artliber, 2014. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/968689?guid=&returnUrl=%2fMinhaSelecao&i=1&m=1>. Acesso em: 13 maio 2024.

EISENBARTH, E *et al.* Biocompatibility of β -stabilizing elements of titanium alloys. **Biomaterials**, [s. l.], v. 25, n. 26, p. 5705–5713, 2004. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142961204000663>. Acesso em: 6 maio 2024.

GHANI, Jaharah A. *et al.* Wear mechanism of coated and uncoated carbide cutting tool in machining process. **Journal of Materials Research**, [s. l.], v. 31, n. 13, p. 1873–1879, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1557/jmr.2015.382>.

GHANI, J.A.; CHOUDHURY, I.A.; MASJUKI, H.H. Wear mechanism of TiN coated carbide and uncoated cermets tools at high cutting speed applications. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 153–154, p. 1067–1073, 2004. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013604005631>. Acesso em: 6 maio 2024.

GRZESIK, Wit; NIEŚŁONY, Piotr; HABRAT, Witold. Investigation of the tribological performance of AlTiN coated cutting tools in the machining of Ti6Al4V titanium alloy in terms of demanded tool life. **Eksploatacja i Niezawodność**, [s. l.], v. Vol. 21, n. 1, 2019. Disponível em: <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-f4097b05-5f84-4372-b45f-b20437cfc4d4>. Acesso em: 18 set. 2024.

GUASTALDI, Fernando Pozzi Semeghini; HOCHULI-VIEIRA, Eduardo; GUASTALDI, Antonio Carlos. Biomechanical study in polyurethane mandibles of different metal plates and internal fixation techniques, employed in mandibular angle fractures. **Journal of Craniofacial Surgery**, [s. l.], v. 25, n. 6, p. 2246–2250, 2014.

GUPTA, Munish Kumar *et al.* Tool wear patterns and their promoting mechanisms in hybrid cooling assisted machining of titanium Ti-3Al-2.5V/grade 9 alloy. **Tribology International**, [s. l.], v. 174, p. 107773, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X22003462>. Acesso em: 6 maio 2024.

HATT, Oliver; CRAWFORTH, Pete; JACKSON, Martin. On the mechanism of tool crater wear during titanium alloy machining. **Wear**, [s. l.], v. 374–375, p. 15–20, 2017. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043164816304367>. Acesso em: 6 maio 2024.

HEGEMAN, J.B.J.W; DE HOSSON, J.Th.M; DE WITH, G. Grinding of WC–Co hardmetals. **Wear**, [s. l.], v. 248, n. 1–2, p. 187–196, 2001. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043164800005615>. Acesso em: 6 maio 2024.

HO, Wen-Fu. A comparison of tensile properties and corrosion behavior of cast Ti–7.5Mo with c.p. Ti, Ti–15Mo and Ti–6Al–4V alloys. **Journal of Alloys and Compounds**, [s. l.], v. 464, n. 1–2, p. 580–583, 2008. Disponível em:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925838807020051>. Acesso em: 6 maio 2024.

HULKA, Iosif *et al.* Ti–Ta dental alloys and a way to improve gingival aesthetic in contact with the implant. **Materials Chemistry and Physics**, [s. l.], v. 287, p. 126343, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0254058422006496>. Acesso em: 6 maio 2024.

INSPEKTOR, Aharon; SALVADOR, Paul A. Architecture of PVD coatings for metalcutting applications: A review. **Surface and Coatings Technology**, [s. l.], v. 257, p. 138–153, 2014. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0257897214007786>. Acesso em: 6 maio 2024.

JAFFEE, Robert I.; BURTE, Harris M. (org.). **Titanium Science and Technology**. Boston, MA: Springer US, 1973. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4757-1346-6>. Acesso em: 6 maio 2024.

KAUR, Manmeet; SINGH, K. Review on titanium and titanium based alloys as biomaterials for orthopaedic applications. **Materials Science and Engineering: C**, [s. l.], v. 102, p. 844–862, 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0928493118338232>. Acesso em: 6 maio 2024.

KOIZUMI, Hiroyasu *et al.* Application of titanium and titanium alloys to fixed dental prostheses. **Journal of Prosthodontic Research**, [s. l.], v. 63, n. 3, p. 266–270, 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S188319581930204X>. Acesso em: 6 maio 2024.

KORKUT, Ihsan *et al.* Determination of optimum cutting parameters during machining of AISI 304 austenitic stainless steel. **Materials & Design**, [s. l.], v. 25, n. 4, p. 303–305, 2004. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306903002292>. Acesso em: 6 maio 2024.

LEMES, Carlos Vinicius. **Estudo da Influencia dos tipos de revestimentos em ferramentas de metal duro no torneamento do titânio comercialmente puro grau 4**. 2021. - Unicamp, [s. l.], 2021.

LEYENS, Christoph; PETERS, Manfred (org.). **Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications**. 1. ed. [S. l.]: Wiley, 2003. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/3527602119>. Acesso em: 6 maio 2024.

LIU, Zhiqiang *et al.* Wear performance of (nc-AlTiN)/(a-Si₃N₄) coating and (nc-AlCrN)/(a-Si₃N₄) coating in high-speed machining of titanium alloys under dry and minimum quantity lubrication (MQL) conditions. **Wear**, [s. l.], v. 305, n. 1–2, p. 249–259, 2013. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043164813001440>. Acesso em: 6 maio 2024.

MACHAI, Christian; BIERMANN, Dirk. Machining of β -titanium-alloy Ti-10V-2Fe-3Al under cryogenic conditions: Cooling with carbon dioxide snow. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 211, n. 6, p. 1175–1183, 2011. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013611000343>. Acesso em: 6 maio 2024.

MAGAR, Suraj R.; SINGH, Gurraj; GOYAL, Kapil Kumar. A review on minimum quantity lubrication for sustainable machining of titanium alloy. **Materials Today: Proceedings**, [s. l.], v. 80, p. 258–263, 2023.

MALIK, Anup *et al.* Experimental analysis for turning of Ti6Al4V alloy by tungsten carbide coated tool inserts. **Materials Today: Proceedings**, [s. l.], v. 92, p. 11–16, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214785323011999>. Acesso em: 6 maio 2024.

MARTINS JÚNIOR, José Roberto Severino *et al.* Preparation and characterization of Ti-15Mo alloy used as biomaterial. **Materials Research**, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 107–112, 2011. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392011000100018&lng=en&tlng=en. Acesso em: 6 maio 2024.

MAZID, Abdul Md *et al.* Characterising surface roughness of Ti-6Al-4V alloy machined using coated and uncoated carbide tools with variable nose radius by machine learning. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, [s. l.], v. 124, p. 106546, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0952197623007303>. Acesso em: 6 maio 2024.

MOURA, Ricardo Ribeiro; DA SILVA, Marcio Bacci; OLIVEIRA, Gustavo Vilela. Avaliação Da Rugosidade No Torneamento Da Liga Ti-6al-4v Com Lubrificantes Sólidos. **Avaliação Da Rugosidade No Torneamento Da Liga Ti-6al-4v Com Lubrificantes Sólidos**, [s. l.], 2013.

NIINOMI, Mitsuo. Mechanical biocompatibilities of titanium alloys for biomedical applications. **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 30–42, 2008. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1751616107000148>. Acesso em: 6 maio 2024.

OERLIKON, Grupo. **Desgaste e tribologia, efeitos tribológicos**. [S. l.], 2024a. Empresa. Disponível em: <https://www.oerlikon.com/balzers/br/br/portfolio/tecnologias-de-superficie/desgaste-e-tribologia/>. Acesso em: 20 out. 2024.

OERLIKON, Grupo. **Guia de revestimentos Oerlikon Balzers - tratamentos térmicos**. [S. l.], 2024b. Disponível em: <https://www.oerlikon.com/balzers/br/br/coating-guide/>. Acesso em: 5 ago. 2024.

OERLIKON, Grupo. **Sputtering incrementado**. [S. l.], 2024c. Disponível em: <https://www.oerlikon.com/balzers/br/br/portfolio/tecnologias-de-superficie/processos-a-base-de-pvd/sputtering-incrementado/>. Acesso em: 5 ago. 2024.

PARIS, Denny. ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS SUPERFICIAIS DA LIGA TI-15MO APÓS TORNEAMENTO COM FERRAMENTAS DE DIFERENTES GEOMETRIAS. [s. l.], 2021.

PARIS, D. *et al.* Influence of built up edge on the surface topography of Ti-15Mo. **Procedia CIRP**, [s. l.], v. 87, p. 137–141, 2020.

PIVOTTO, Leonildo Bernardo. **Aplicação de insertos de metal duro com diferentes acabamentos no torneamento da liga Ti-15Mo**. 2020. Mestrado em Projeto, Materiais e Manufatura - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18163/tde-25092020-110400/>. Acesso em: 6 maio 2024.

PIVOTTO, Leonildo Bernardo; VENTURA, C. E. H.; ENDO,. Influência do ângulo de chanfro sobre a rugosidade gerada no torneamento de uma liga de titânio. *In*: COBEF-10º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 2019, São Carlos, SP, Brasil. **Anais [...]**. São Carlos, SP, Brasil: [s. n.], 2019.

PRAMANIK, A. Problems and solutions in machining of titanium alloys. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 70, n. 5, p. 919–928, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5326-x>. Acesso em: 27 set. 2024.

RACK, H.J.; QAZI, J.I. Titanium alloys for biomedical applications. **Materials Science and Engineering: C**, [s. l.], v. 26, n. 8, p. 1269–1277, 2006. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0928493105002237>. Acesso em: 6 maio 2024.

RAGHAVENDRA, M J *et al.* Optimization of Surface Roughness in Turning Operation in Machining of TI-6AL-4V (Titanium Grade -5). **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 376, p. 012118, 2018. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/376/1/012118>. Acesso em: 8 maio 2024.

RIBEIRO, M.V.; MOREIRA, M.R.V.; FERREIRA, J.R. Optimization of titanium alloy (6Al–4V) machining. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 143–144, p. 458–463, 2003. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013603004576>. Acesso em: 6 maio 2024.

RICARDO SIGNORELLI *et al.* Avaliação de desempenho da geometria de ferramentas de corte na usinagem interna de implantes odontológicos. *In*: CBCIMAT 24º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 2022, Águas de Lindóia, SP, Br. **Anais [...]**. Águas de Lindóia, SP, Br: [s. n.], 2022. Disponível em: Acesso em: 19 fev. 2024.

RUBIO, Juan Camilo Cardenas. **Avaliação do desempenho de ferramentas de metal duro no torneamento da liga Ti-15Mo em diferentes condições de lubrificação**. 2023. - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18163/tde-30062023-172846/>. Acesso em: 6 maio 2024.

SANDVIK. **Materiais de ferramentas de corte**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/cutting-tool-materials>. Acesso em: 3 set. 2024.

SARRAF, Masoud *et al.* A state-of-the-art review of the fabrication and characteristics of titanium and its alloys for biomedical applications. **Bio-Design and Manufacturing**, [s. l.], v. 5, n. 2, p. 371–395, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42242-021-00170-3>. Acesso em: 9 maio 2024.

SARTORI, S. *et al.* Wear mechanisms of uncoated and coated carbide tools when machining Ti6Al4V using LN2 and cooled N2. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 95, n. 1–4, p. 1255–1264, 2018.

SATEESH KUMAR, Ch; KUMAR PATEL, Saroj. Hard machining performance of PVD AlCrN coated Al₂O₃/TiCN ceramic inserts as a function of thin film thickness. **Ceramics International**, [s. l.], v. 43, n. 16, p. 13314–13329, 2017. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272884217314402>. Acesso em: 6 maio 2024.

SHOKRANI, Alborz; NEWMAN, Stephen. A New Cutting Tool Design for Cryogenic Machining of Ti–6Al–4V Titanium Alloy. **Materials**, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 477, 2019. Disponível em: <http://www.mdpi.com/1996-1944/12/3/477>. Acesso em: 6 maio 2024.

SILVA JUNIOR, Ruy Ribeiro da; SACHETTO, João Paulo. EFEITOS DOS REVESTIMENTOS PVD, CVD E DUPLEX EM FERRAMENTAS PARA TRABALHO A QUENTE: pesquisa de revisão bibliográfica. **SITEFA**, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 34–40, 2022. Disponível em: <https://publicacoes.fatecsertaozinho.edu.br/sitefa/article/view/212>. Acesso em: 13 maio 2024.

SOUSA, Vitor F. C.; SILVA, Francisco J. G. Recent Advances in Turning Processes Using Coated Tools—A Comprehensive Review. **Metals**, [s. l.], v. 10, n. 2, p. 170, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-4701/10/2/170>. Acesso em: 6 maio 2024.

STEPHENSON, David A.; AGAPIOU, John S. **Metal Cutting Theory and Practice**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2018.

TERLINDE, G.; FISCHER, G. Beta Titanium Alloys. *In*: LEYENS, Christoph; PETERS, Manfred (org.). **Titanium and Titanium Alloys**. 1. ed. [S. l.]: Wiley, 2003. p. 37–57. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/3527602119.ch2>. Acesso em: 6 maio 2024.

VEIGA, C; DAVIM, J P; LOUREIRO, A J R. PROPERTIES AND APPLICATIONS OF TITANIUM ALLOYS: A BRIEF REVIEW. [s. l.], p. 133–148, 2012.

VENUGOPAL, K.A.; PAUL, S.; CHATTOPADHYAY, A.B. Tool wear in cryogenic turning of Ti-6Al-4V alloy. **Cryogenics**, [s. l.], v. 47, n. 1, p. 12–18, 2007. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S001122750600141X>. Acesso em: 8 maio 2024.

WOLF BRASIL. **Insertos de metal duro: tudo sobre pastilhas e aplicações**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://wolfbrasil.com.br/insertos-de-metal-duro/>. Acesso em: 24 set. 2024.

XU, T. W. *et al.* Microstructural and Textural Evolutions during $\beta \rightarrow \alpha/\omega$ Transformation in Biomedical Ti-15Mo Alloy and Its Effects on Mechanical Performance. **Journal of Materials Engineering and Performance**, [s. l.], v. 28, n. 11, p. 6969–6979, 2019. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s11665-019-04408-1>. Acesso em: 6 maio 2024.

YOU, Seung Hyeon; LEE, Jeong Hwan; OH, Sung Hoon. A Study on Cutting Characteristics in Turning Operations of Titanium Alloy used in Automobile. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, [s. l.], v. 20, n. 2, p. 209–216, 2019. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s12541-019-00027-x>. Acesso em: 8 maio 2024.

ZHANG, Quanli *et al.* Effects of binder concentration on the nanometric surface characteristics of WC-Co materials in ultra-precision grinding. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, [s. l.], v. 85, p. 105048, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263436819304950>. Acesso em: 20 set. 2024.