

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS - UFSCar
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA - CCET
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA - DEMec

**Caracterização mecânica dos revestimentos
AlTiN/TiSiN, TiCN e AlCrN depositados por processo
PVD**

Matheus Felipe da Silva

SÃO CARLOS -SP
2026

MATHEUS FELIPE DA SILVA

**Caracterização mecânica dos revestimentos AlTiN/TiSiN, AlCrN e TiCN depositados
por processo PVD**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado como requisito parcial para a
obtenção do título de bacharel em
Engenharia Mecânica pela Universidade
Federal de São Carlos.

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

São Carlos-SP
2026

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus na pessoa de Cristo Jesus, que em sua infinita graça e sabedoria me deu vida e salvação. À minha família — Elias, Alzira, Ana Carolina, Noemi e André —, que sempre me apoiou e suportou minhas peculiaridades.

À minha namorada, Anita, que me apoiou e foi muito atenciosa e compreensiva durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos da faculdade — João, Enrico, Hugo e Vitor —, que tornaram o curso de engenharia mecânica uma experiência ainda mais rica e alegre, mesmo nos momentos de maior pressão.

Ao Uélinton, à Luana, ao Leonildo e à Lara, que me auxiliaram na execução e obtenção dos resultados apresentados nesta pesquisa, e a quem sou profundamente grato por terem tido a paciência e a calma de me explicar conceitos e procedimentos que eu não compreendia.

À UFSCar, instituição pela qual me graduo e que forneceu o contato com pesquisadores e professores excepcionais, infraestrutura de qualidade e experiências das mais variadas, as quais me moldaram para além da engenharia.

Por fim, agradeço ao professor e meu orientador Dr Carlos Ventura, que foi um verdadeiro mestre durante o período de orientação. Apreendi muito com ele e espero ser, em minha carreira futura, um profissional tão aplicado e com tanto domínio sobre sua área quanto ele demonstrou.

A todos, muito obrigado.

RESUMO

Com o desenvolvimento da indústria e aplicação de materiais de difícil usinabilidade somados a usinagens que empregam velocidades de processo cada vez maiores vem se tornando cada vez mais necessário estudos que busquem aumento da vida das ferramentas de corte e melhor desempenho mecânico destas. Sendo assim, presente trabalho apresenta a caracterização mecânica e tribológica dos revestimentos AlTiN/TiSiN, AlCrN e TiCN, depositados via PVD por arco catódico sobre substratos de metal duro (WC-Co) da classe ISO S10. A metodologia envolveu a caracterização da superfície por microscopia confocal para determinação da rugosidade e microscopia eletrônica de varredura (MEV) para medição de espessura e análise morfológica. A adesão foi avaliada por ensaios de riscamento com carga progressiva e a integridade da interface, por indentação Rockwell C, fundamentada na norma VDI 3198. O comportamento tribológico foi analisado por meio de ensaios de pino-sobre-placa recíproco (ASTM G133) com contracorpo de alumina, monitorando-se o coeficiente de atrito (CoF) e os mecanismos de desgaste via MEV e espectroscopia por energia dispersiva (EDS). Os resultados demonstraram que o revestimento AlTiN/TiSiN apresentou a menor rugosidade e a maior carga crítica de falha (15 N), indicando superioridade em relação à adesão e potencial vantagem quando se considera o escoamento de cavaco sobre a superfície revestida. No ensaio Rockwell C, embora o AlCrN tenha exibido melhor desempenho inicial sob carga de 588 N, todos os sistemas apresentaram falhas severas sob a carga de 1471 N. Os ensaios de pino-sobre-placa indicaram que os revestimentos à base de alumínio favorecem a formação de tribofilmes protetores (Al_2O_3 e Cr_2O_3), que estabilizam o CoF. As análises por EDS revelaram que o AlCrN manteve sua integridade após 100 m de deslizamento, enquanto o AlTiN/TiSiN permitiu a exposição do substrato.

Palavras-chave: REVESTIMENTO; RUGOSIDADE; ADESÃO; ENSAIO TRIBOLÓGICO; METAL DURO ISO S10.

ABSTRACT

With the development of industry and the application of difficult-to-machine materials, combined with machining processes that employ increasingly higher speeds, studies seeking to increase cutting tool life and improve their mechanical performance have become ever more necessary. Therefore, the present work presents the mechanical and tribological characterization of AlTiN/TiSiN, AlCrN, and TiCN coatings deposited via cathodic arc PVD onto ISO S10 grade cemented carbide (WC-Co) substrates. The methodology involved surface characterization using confocal microscopy to determine roughness, and scanning electron microscopy (SEM) for thickness measurement and morphological analysis. Adhesion was evaluated through progressive-load scratch testing, and interface integrity was assessed by Rockwell C indentation based on the VDI 3198 standard. The tribological behavior was analyzed using reciprocal pin-on-plate testing (ASTM G133) with an alumina counter-body, monitoring the coefficient of friction (CoF) and wear mechanisms via SEM and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS). The results demonstrated that the AlTiN/TiSiN coating exhibited the lowest roughness and the highest critical failure load (15 N), indicating superior adhesion and a potential advantage regarding chip flow over the coated surface. In the Rockwell C test, although AlCrN showed better initial performance under a 588 N load, all systems exhibited severe failure under a 1471 N load. The pin-on-plate tests indicated that the aluminum-based coatings promote the formation of protective tribofilms (Al_2O_3 and Cr_2O_3), which stabilize the CoF. EDS analyses revealed that the AlCrN coating maintained its integrity after 100 m of sliding, whereas the AlTiN/TiSiN coating allowed exposure of the substrate.

Keyword: COATING; ROUGHNESS; ADHESION; TRIBOLOGICAL TEST; ISO S10 CEMENTED CARBIDE.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Classificação da adesão revestimento-substrato de acordo com VDI 3198.....	p. 9
Figura 2: Célula de carga montada no centro de usinagem.....	p. 14
Figura 3: Representação do posicionamento dos inserts na célula de carga.....	p. 15
Figura 4: Riscos feitos no inserto com o revestimento AlTiN/TiSiN.....	p. 15
Figura 5: Máquina de indentação Rockwell Wolpert Testor HT.....	p. 16
Figura 6: Equipamento de pino-sobre-disco realizando trilha na face de folga do inserto revestido com AlTiN/TiSiN.....	p. 17
Figura 7: Plano de análise da trilha no Alicona InfiniteFocus SL.....	p. 18
Figura 8: Imagem MEV do revestimento AlTiN/TiSiN.....	p. 20
Figura 9: Imagem MEV do revestimento AlCrN seção transversal.....	p. 20
Figura 10: Imagem MEV do TiCN seção transversal.....	p. 21
Figura 11: Sa dos revestimentos AlTiN/TiSiN, AlCrN e TiCN.....	p. 21
Figura 12: Sz dos revestimentos AlTiN/TiSiN, AlCrN e TiCN.....	p. 22
Figura 13: Força tangencial por deslocamento no revestimento AlTiN/TiSiN.....	p. 23
Figura 14: Atrito por deslocamento no revestimento AlTiN/TiSiN.....	p. 24
Figura 15: Carga na direção vertical por deslocamento no revestimento AlTiN/TiSiN.....	p. 24
Figura 16: Força tangencial por deslocamento no revestimento AlCrN.....	p. 25
Figura 17: Atrito por deslocamento no revestimento AlCrN.....	p. 26
Figura 18: Carga na direção vertical por deslocamento no revestimento AlCrN...	p. 26
Figura 19: Força tangencial por deslocamento no revestimento TiCN.....	p. 27
Figura 20: Atrito por deslocamento no revestimento TiCN.....	p. 28
Figura 21: Carga na direção vertical por deslocamento no revestimento TiCN....	p. 28
Figura 22: Testes de indentação Rockwell C da Daimler-Benz de revestimentos de (a) TiCN (b) AlTiN/TiSiN e (c) AlCrN em diferentes cargas.....	p. 29
Figura 23: Perfil da trilha 2 feita no revestimento AlTiN/TiSiN.....	p. 32
Figura 24: EDS da trilha n do revestimento AlTiN/TiSiN.....	p. 32
Figura 25: Perfil da trilha 2 feita no revestimento AlCrN.....	p. 33

Figura 26: Dados do EDS da trilha n do revestimento AlCrN.....	p. 34
Figura 27: Perfil da trilha 2 feita no revestimento TiCN.....	p. 35
Figura 28: Dados do EDS da trilha n do revestimento TiCN.....	p. 35
Figura 29: Coeficiente de atrito ao longo de 100 m de deslizamento sob carga normal de 25 N.....	p. 36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Medidas das espessuras dos revestimentos na região esquerda, central e direita da amostra.....	p. 19
Tabela 2: Dados do EDS do teste de indentação feito com carga de 588 N, 980 N e 1471 N do inserto revestido com TiCN.....	p. 30
Tabela 3: Dados do EDS do teste de indentação feito com carga de 588 N, 980 N e 1471 N do inserto revestido com AlTiN/TiSiN.....	p. 30
Tabela 4: Dados do EDS do teste de indentação feito com carga de 588 N, 980 N e 1471 N do inserto revestido com AlCrN.....	p. 31
Tabela 5: Dados do EDS da trilha n do revestimento AlTiN/TiSiN.....	p. 33
Tabela 6: Dados do EDS da trilha n do revestimento AlCrN.....	p. 34
Tabela 7: Dados do EDS da trilha n do revestimento TiCN.....	p. 36

LISTA DE ABREVIATURAS

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

BUE – *Aresta Postiça (Built-Up Edge)*

CNC – *Comando Numérico Computadorizado*

CoF – *Coeficiente de Atrito (Coefficient of Friction)*

DCMS – *Direct Current Magnetron Sputtering*

EA – *Emissão Acústica*

EDS – *Espectroscopia de Energia Dispersiva*

HiPIMS – *High-Power Impulse Magnetron Sputtering*

ISO – *International Organization for Standardization*

MEV – *Microscopia Eletrônica de Varredura*

MQL – *Mínima Quantidade de Lubrificarrefrigerante*

PVD – *Deposição Física a Vapor (Physical Vapor Deposition)*

VDI – *Verein Deutscher Ingenieure*

XPS – *Espectroscopia de Fotoelétrons de Raios X*

LISTA DE SÍMBOLOS

V_{fa} – Velocidade de avanço axial

V_R – Velocidade de rotação do inserto

L_c – Carga crítica

S_a – Rugosidade média aritmética da superfície (área)

S_z – Altura máxima do perfil

F_x – Força tangencial

F_z – Força normal

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DA LITERATURA	3
2.1 Revestimento para ferramentas	3
2.2 Processo de deposição física a vapor	5
2.3 Caracterização de revestimentos cerâmicos	6
2.3.1 Teste de riscamento	6
2.3.2 Teste de adesão Rockwell C.....	8
2.3.3 Teste de pino-sobre-placa.....	10
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	12
3.1 Substrato	12
3.2 Revestimentos e caracterização superficial	13
3.3 Teste de riscamento.....	13
3.4 Teste de indentação.....	16
3.5 Teste de pino-sobre-disco	17
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	19
4.1 Caracterização do revestimento	19
4.2 Teste de riscamento.....	22
4.3 Teste de indentação Rockwell C	29
4.5 Teste de pino-sobre-placa	31
5 CONCLUSÕES.....	38
REFERÊNCIAS.....	39

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento e a aplicação de materiais de alto desempenho, como as ligas de titânio e os aços inoxidáveis, têm crescido significativamente devido às demandas de setores de ponta, como o aeroespacial e o biomédico (Sabadini, 2025). Contudo, a usinabilidade desses materiais permanece um desafio crítico, pois eles exigem elevadas forças de corte e geram temperaturas extremas na interface ferramenta-peça (Benti; Woldeyohannes; Yigezu, 2022; He et al., 2021). No caso do titânio, esse fenômeno é agravado por sua baixa condutividade térmica, que impede a dissipação eficiente do calor, e por sua alta reatividade química, que acelera o desgaste prematuro por adesão e difusão (Beake et al., 2017; He et al., 2021).

Para mitigar esses efeitos, a aplicação de filmes finos via deposição física a vapor (PVD) consolidou-se como uma solução técnica eficaz (Cadena et al., 2013; Claver et al., 2021). Esses revestimentos, com espessuras que variam tipicamente entre 0,5 μm e 4,0 μm , atuam como barreiras físicas e térmicas que aumentam a dureza superficial do sistema e reduzem o coeficiente de atrito (CoF) (Sabadini, 2025). Como exemplo, a aplicação de revestimentos cerâmicos à base de nitreto permite otimizar o escoamento do cavaco e melhorar o acabamento superficial, protegendo o substrato de metal duro contra as severas solicitações termomecânicas do processo de corte (Alves et al., 2025; Claver et al., 2021; He et al., 2021).

Com a adoção de práticas sustentáveis na indústria metalmeccânica, como a usinagem a seco ou com mínima quantidade de lubrificador (MQL) (Cadena et al., 2013; Claver et al., 2021), que levam a altas temperaturas de processo, ferramentas revestidas com nitretos à base de alumínio ou titânio têm se destacado por sua elevada estabilidade química e proteção via tribo-oxidação (Claver et al., 2021; Mo; Zhu, 2008; Zhu et al., 2019). Sendo essa tribo-oxidação correspondente à formação de óxidos estáveis (como a alumina) e de um tribofilme lubrificante, que reduz o desgaste adesivo severo e isola termicamente o substrato (Beake et al., 2017; Gupta; Manoj Kumar, 2022; Mo; Zhu, 2008).

O presente trabalho tem como foco a investigação do desempenho de três sistemas de revestimento distintos — AlTiN/TiSiN, AlCrN e TiCN — aplicados sobre insertos de metal duro classe ISO S10 e comparação de seus desempenhos. Sendo

assim, será feito ensaios e testes por microscopia confocal da superfície revestida, a teste de riscamento para avaliação da adesão e a indentação Rockwell C (VDI 3198) para análise qualitativa da falha interfacial. Complementarmente, são realizados ensaios de pino-sobre-placa e análises por MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) e EDS (Espectroscopia de Energia Dispersiva).

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo dedica-se à revisão da literatura sobre as tecnologias de modificações de superfície aplicadas a ferramentas de corte, estabelecendo a base teórica para a compreensão dos mecanismos de ganho de desempenho físico e mecânico. Inicialmente, apresenta-se um panorama sobre os principais revestimentos cerâmicos comerciais (TiN, AlTiN/TiSiN, AlCrN e TiCN) e suas respectivas propriedades microestruturais. Em seguida, são discutidos os fundamentos do processo de deposição física a vapor (PVD), com foco na técnica de evaporação por arco catódico e na influência de defeitos topográficos, como os *droplets*, na rugosidade superficial do sistema. Por fim, abordam-se as metodologias consolidadas de caracterização laboratorial empregadas para a avaliação desses filmes finos sobre substratos de metal duro, detalhando os princípios e modos de falha do teste de riscamento (*scratch test*), do ensaio de adesão Rockwell C (norma VDI 3198) e do ensaio tribológico de pino-sobre-placa (norma ASTM G133).

2.1 Revestimento para ferramentas

Muitos são os materiais empregados como revestimentos de ferramentas de corte com substrato de metal duro. O TiN, revestimento clássico, um dos primeiros a ser comercializado, mostrou diversas vantagens de sua aplicação, tais como alta dureza, boa resistência ao desgaste abrasivo, baixo coeficiente de atrito, alta estabilidade química, excelente resistência à formação de aresta postiça (APC) e alta adesão ao substrato. Embora eficiente em diferentes aspectos, possui a limitação de começar a falhar em temperaturas acima de 500°C, formando uma camada frágil de dióxido de titânio (TiO₂) (He et al., 2021; Groover, 2019). Sendo assim, em processos a altas velocidades, ele é comumente substituído por revestimentos como AlTiN/TiSiN, AlCrN e TiCN.

O AlTiN/TiSiN é frequentemente empregado em materiais de difícil usinabilidade, como ligas de titânio e aços endurecidos, onde ferramentas comuns falhariam rapidamente (Grupo Oerlikon, 2026). Algumas das características desse revestimento são:

- Elevada dureza: frequentemente entre 38 GPa e 50 GPa, podendo chegar a 80 GPa (Cheng et al., 2010);

- Estabilidade térmica: mantém suas propriedades mecânicas e resiste à oxidação até temperaturas de 1100°C (Grupo Oerlikon, 2026);
- Baixa condutividade térmica: age como isolante térmico e protege o substrato de metal duro das altas temperaturas presentes durante o corte (Beake et al., 2017).

O revestimento de AlCrN é uma solução de alto desempenho que evoluiu a partir do CrN, sendo projetado para usinagem em condições extremas (Mo; Zhu, 2008). Dentre as características desse revestimento, as principais que podem ser destacadas são:

- Dureza elevada: cerca de 44 GPa (Oerlikon, 2026);
- Estabilidade térmica superior: suporta temperaturas de operação maiores que 1100°C, superando o AlTiN em sua capacidade de conter alumínio sem perder estabilidade estrutural (Mo; Zhu, 2008);
- Resistência à oxidação: durante o corte, o cromo e o alumínio reagem para formar óxidos protetores estáveis, que atuam como uma barreira térmica e química (Mo; Zhu, 2008);
- Propriedades tribológicas: possui baixo coeficiente de atrito e excelente resistência ao impacto e à abrasão (Mo; Zhu, 2008).

Já o TiCN é uma solução de alto desempenho que combina as melhores propriedades do TiN e do TiC, sendo uma evolução direta da primeira geração de revestimentos (Siow et al., 2013). Suas características são:

- Dureza elevada: apresenta uma dureza significativamente superior à do TiN, geralmente na faixa de 2500 a 3500 HV (aproximadamente 37 GPa), o que aumenta a resistência ao desgaste abrasivo (Siow et al., 2013);
- Baixo coeficiente de atrito: possui propriedade de lubricidade superior (Siow et al., 2013);
- Alta tenacidade: apesar da sua dureza, mantém uma boa tenacidade, o que o torna resistente a impactos (Siow et al., 2013);
- Estabilidade química: é quimicamente estável e possui um ponto de fusão elevado (3050°C), embora sua resistência à oxidação seja limitada a cerca de 400°C, sendo inferior a revestimentos como AlCrN ou AlTiN (Siow et al., 2013);

2.2 Processo de deposição física a vapor

A deposição física a vapor (PVD) é um grupo de processos nos quais os materiais são convertidos para a fase de vapor em uma câmara de vácuo e condensados na superfície de um substrato (Groover, 2019). O processo Arc PVD (evaporação por arco catódico) é uma das técnicas que consiste na evaporação do material do revestimento por meio de um arco elétrico de alta energia. Essa técnica promove excelente adesão do substrato com o revestimento, aumenta a microdureza da ferramenta e permite a criação de arquiteturas de multicamadas com propriedades mecânicas superiores (Benti; Woldeyohannes; Yigezu, 2022). Porém, a técnica também apresenta desvantagens, como a presença de gotículas de material fundido, que se condensam na superfície e acabam gerando defeitos (Benti; Woldeyohannes; Yigezu, 2022). Estas micropartículas, conhecidas como *droplets* (gotículas), aderem à superfície da ferramenta, criam picos ou defeitos no revestimento, aumentando, por consequência, a rugosidade da ferramenta, como relatado nos trabalhos de Alves et al. (2025) e He et al. (2021).

No trabalho de Benti et al. (2022), é relatado que uma quantidade excessiva de gotículas pode gerar uma superfície com rugosidade inaceitável, já que esses defeitos podem reduzir a força adesiva do revestimento e atuar como pontos de nucleação de trincas.

É documentado por Panjan et al. (2020) que o tratamento mecânico dado ao substrato antes do revestimento influencia sua topografia, pois o filme em crescimento replica as características topográficas do substrato. No mesmo trabalho, há a comparação entre três tipos de técnicas de revestimentos PVD: evaporação por arco termiônico, pulverização catódica por magnetron e evaporação por arco catódico. Nos processos de deposição por arco catódico, os defeitos de crescimento originaram-se principalmente de gotículas formadas durante a deposição do revestimento. Os defeitos em forma de gotícula são significativamente menores na técnica arc PVD do que nas outras duas técnicas, mas sua densidade é duas ordens de magnitude maior (Panjan et al., 2020).

O trabalho de He et al. (2021) registrou valores de S_a de 0,13 a 0,16 μm para o revestimento AlTiN, tendo a variação de S_a sido correlacionada à proporção de Al e Ti no revestimento. O trabalho de Sabadini (2025) registrou os seguintes valores de R_z (rugosidade máxima): entre 2,10 e 2,22 μm para AlTiN/TiSiN, entre 2,10 e

3,14 μm para TiCN e entre 2,34 e 3,19 μm para AlCrN.

2.3 Caracterização de revestimentos cerâmicos

No âmbito do desenvolvimento e validação de engenharia de superfícies, a avaliação do desempenho mecânico e funcional de filmes finos depende substancialmente de metodologias padronizadas de ensaios laboratoriais. Sendo assim, é revisada a literatura para a fundamentação teórica dos métodos utilizados neste trabalho para a caracterização mecânica e tribológica de sistemas revestidos sobre substratos de alta rigidez. Para tanto, detalham-se os princípios operacionais, variáveis de influência e respectivos modos de falha associados ao ensaio de riscamento (scratch test), ao teste de adesão por indentação Rockwell C (conforme diretrizes da norma VDI 3198) e, por fim, ao ensaio tribológico de pino-sobre-placa operando em regime alternado recíprocante (regido pela norma ASTM G133).

2.3.1 Teste de riscamento

O teste de riscamento consiste em produzir um risco na superfície de um material revestido utilizando-se um indentador, geralmente de diamante, sob uma carga progressiva. A força normal na qual ocorre a falha do revestimento é denominada carga crítica L_c .

Segundo a literatura, a carga crítica pode ser determinada de cinco formas distintas:

- Inspeção visual (microscopia óptica e eletrônica de varredura): é o método mais comum e consiste na análise da trilha após os testes para identificar falhas como trincas coesivas L_{c1} , lascamento nas bordas L_{c2} ou exposição total do substrato L_{c3} (Bull; Berasetegui, 2006,; Claver et al., 2021). Bull e Berasetegui (2006) relataram que, em alguns casos, a exposição do substrato pode ser detectada visualmente por uma mudança de coloração no interior da trilha.
- Emissão acústica (EA): utiliza transdutores para detectar ondas de energia elástica liberadas repentinamente durante eventos de fratura ou descolamento. Picos súbitos e acentuados no sinal de EA são indicadores precisos de falhas internas ou interfaciais (Bull; Berasetegui, 2006,; Claver et al., 2021).

- Monitoramento do coeficiente de atrito (CoF): analisa as variações na força lateral durante o risco. Mudanças abruptas no gradiente da curva de atrito ou o início de grandes flutuações sinalizam o momento em que o revestimento começou a falhar ou a ser removido (Allsopp; Hutchings, 2001; Berasetegui, 2006,; Claver et al., 2021).
- Profundidade de penetração: sensores medem o deslocamento vertical do indentador. Um "degrau" ou alteração repentina na profundidade de penetração sob carga indica que a ponta rompeu a camada revestida ou que o substrato começou a sofrer deformação plástica severa (Beake et al., 2017; Claver et al., 2021).
- Análise química (EDS): quando a inspeção visual é inconclusiva devido à semelhança cromática entre o filme e a base, utiliza-se a espectroscopia por energia dispersiva (EDS) para confirmar o desvendamento do substrato, identificando elementos químicos do material base (como tungstênio e cobalto) no fundo da trilha (Bull; Berasetegui, 2006).

Além da escolha do método de detecção da carga crítica, as propriedades e parâmetros que influenciam diretamente o resultado do teste exigem atenção, tais como: as propriedades mecânicas do sistema (dureza e rugosidade do substrato), a espessura do revestimento, as tensões residuais e a geometria do indentador (Bull; Berasetegui, 2006; Beake et al., 2017). Sob a perspectiva da validade do teste, Bull e Berasetegui (2006) apontaram a importância de evitar a sobreposição de regiões deformadas, mantendo as trilhas dos riscos suficientemente afastadas para eliminar interferências mútuas. Complementarmente, Beake et al. (2017) ressaltaram a necessidade de utilizar raios de ponta de indentador compatíveis com a espessura do revestimento ensaiado. Isso evita que os campos de tensões sejam deslocados precocemente para o interior do substrato, o que reduziria a sensibilidade do teste em relação à interface de adesão. Adicionalmente, deve-se evitar a utilização do valor da carga crítica como uma medida absoluta de adesão, sem correlacioná-la com as propriedades elásticas e plásticas globais do sistema (Bull; Berasetegui, 2006; Beake et al., 2017).

No que tange aos tipos de falhas registradas, a literatura apresenta diversas classificações. Uma divisão clássica proposta por Bull e Berasetegui (2006)

categoriza-as entre falhas por fratura e falhas por deformação plástica. Na falha por fratura, a energia mecânica do indentador é dissipada quase inteiramente pela criação e propagação de trincas ao longo da espessura, manifestando-se como trincas de tração (atrás do indentador), conformais (dentro da trilha) ou hertzianas (em formato de anel). Em cenários extremos, ocorre a fratura volumétrica, na qual as trincas penetram profundamente no substrato frágil. Por outro lado, na falha por deformação plástica, o material flui ao redor da ponta do indentador, resultando na formação de sulcos profundos, rebarbas pronunciadas nas bordas da trilha e afinamento contínuo do filme sem a presença expressiva de trincas até que cargas muito elevadas sejam atingidas.

Outras nomenclaturas também descrevem esses fenômenos. Bull e Berasetegui (2006) abordaram as falhas adesivas como destacamento, ao passo que Carreira et al. (2021) e Claver et al. (2021) registraram o lascamento de borda e o aparecimento do substrato para sistemas de aços e metais duros revestidos com AlCrN (via PVD) e AlTiN-TiSiN (depositado por DCMS/HiPIMS), respectivamente.

O tipo de falha esperado no presente trabalho é caracterizado por deformações plásticas mínimas e amplamente dominado por fraturas. Como as camadas utilizadas consistem em nitretos de alta dureza depositados sobre substratos de metal duro (também altamente rígidos), o sistema enquadra-se no comportamento descrito por Bull e Berasetegui (2006), no qual conjuntos compostos por substrato duro e revestimento duro tendem a falhar preferencialmente por mecanismos de fratura frágil.

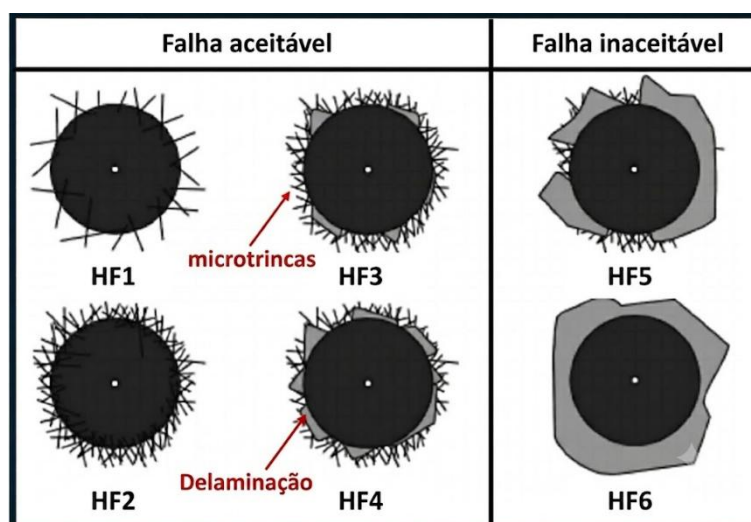
2.3.2 Teste de adesão Rockwell C

O ensaio de indentação Rockwell C, padronizado pela norma VDI 3198, consiste na aplicação de um indentador cônico de diamante — dotado de um ângulo de 120° e ponta hemisférica com raio de 200 µm — contra a superfície do material revestido, utilizando-se uma carga estática de 1471 N (150 kgf) (Vidakis; Antoniadis; Bilalis, 2003). A introdução dessa carga induz uma severa deformação plástica no substrato, gerando campos de tensões que resultam na fratura localizada do revestimento no entorno da impressão residual (Vidakis; Antoniadis; Bilalis, 2003). A análise visual da topografia da falha, realizada via microscopia óptica, permite classificar qualitativamente a resistência à adesão do filme em uma escala que varia

de HF1 a HF6, como mostrada na figura 1, dividida em dois grupos fundamentais:

- HF1 a HF4 (falhas aceitáveis): caracterizam-se pela presença exclusiva de microtrincas radiais ou pequenas regiões restritas de delaminação nas bordas da impressão (Vidakis; Antoniadis; Bilalis, 2003).
- HF5 e HF6 (falhas inaceitáveis): definem-se pela ocorrência de delaminações severas, defeitos extensos e destacamento generalizado da camada protetora (Vidakis; Antoniadis; Bilalis, 2003).

- Figura 1 - Classificação da adesão revestimento-substrato de acordo com VDI 3198.



- Fonte: Adaptado de (Alves et al., 2025).

Nesse contexto, as microtrincas radiais representam falhas coesivas estruturais do revestimento, geradas quando as tensões normais desenvolvidas superam a resistência mecânica do filme fino. Essas trincas se propagam radialmente a partir do centro da cratera e atuam como indicadores diretos da fragilidade e da tenacidade do material depositado (Vidakis; Antoniadis; Bilalis, 2003). Por sua vez, as delaminações constituem falhas adesivas caracterizadas pelo descolamento do revestimento em relação ao substrato, promovidas por tensões de cisalhamento severas na interface que rompem as ligações químicas e mecânicas locais. Fenomenologicamente, manifestam-se como o desprendimento de porções do filme ao redor do perímetro exposto, expondo a interface e tornando visíveis, em certos casos, as marcas de retificação originais do substrato (Vidakis; Antoniadis; Bilalis, 2003).

Com o intuito de aprofundar a avaliação quantitativa e qualitativa dos danos gerados pelo ensaio, técnicas avançadas de caracterização microestrutural tornam-

se indispensáveis. A microscopia eletrônica de varredura (MEV) viabiliza uma resolução espacial significativamente superior à da microscopia óptica convencional, permitindo mapear detalhadamente a morfologia de trincas circunferenciais e o grau de lascamento nas bordas da impressão residual (Vidakis; Antoniadis; Bilalis, 2003). Associada ao MEV, a espectroscopia por energia dispersiva (EDS) possibilita a determinação da composição química elementar das regiões afetadas. Essa análise monitora a presença de elementos constituintes do filme ou do substrato, confirmando com precisão os locais onde houve a exposição total da base devido ao descolamento completo da interface (Vidakis; Antoniadis; Bilalis, 2003).

Complementarmente, variações na carga de indentação podem ser empregadas para avaliar a progressão do dano mecânico superficial, conforme metodologia proposta por Alves et al. (2025). Em seu estudo sobre revestimentos de TiAlN/TiN e TiSiN/AlTiN depositados sobre substratos de metal duro, foram adotadas cargas de 588 N (60 kgf), 980 N (100 kgf) e 1471 N (150 kgf). Sob a carga inicial de 588 N, o sistema TiSiN/AlTiN exibiu excelente comportamento de adesão, sendo enquadrado na classe HF1. No entanto, ao atingir a carga máxima de 1471 N, o filme sofreu severo processo de delaminação, culminando em uma classificação insatisfatória HF6. Em contrapartida, o sistema TiAlN/TiN apresentou predominantemente trincas circunferenciais para os diferentes carregamentos, recebendo as classificações HF3 sob 980 N e HF4 sob 1471 N. Esse comportamento evidenciou um desempenho superior de resistência mecânica e tolerância ao dano para o revestimento de TiAlN/TiN em comparação ao sistema composto por TiSiN/AlTiN.

2.3.3 Teste de pino-sobre-placa

O teste de pino-sobre-placa (ou pino-sobre-plano) é um ensaio tribológico laboratorial utilizado para determinar o desgaste por deslizamento e o coeficiente de atrito (CoF) de materiais metálicos e cerâmicos, sendo regido pela norma ASTM G133. Este ensaio se caracteriza pelo contato entre um contracorpo esférico e uma superfície plana. Diferentemente do ensaio de pino-sobre-disco, que possui geralmente sentido único, o sistema pino-sobre-placa opera em movimento linear alternado (reciprocante), no qual o sentido do deslizamento é revertido periodicamente, fazendo com que o pino percorra a mesma trilha, em um movimento de ida e volta.

Estudos como o de Mo e Zhu (2008) demonstraram que o comportamento do CoF é sensível aos parâmetros de ensaio. No modo recíproco, constatou-se que o aumento da carga normal resulta em uma redução do CoF (de 0,55 para 0,44), devido à aceleração do polimento das asperezas superficiais. Em contrapartida, no ensaio de pino-sobre-disco — considerado uma variante de deslizamento com sentido único —, observou-se que o aumento da velocidade de deslizamento eleva o atrito, atingindo valores de até 0,85.

A eficiência dos revestimentos também é influenciada por tratamentos térmicos e pela química de superfície. Cadena et al. (2013) relataram que o revestimento de AlCrN monocamada apresenta um CoF médio de 0,70. Contudo, ao submetê-lo a um tratamento térmico de recristalização, o desempenho foi significativamente otimizado, reduzindo o CoF para 0,30. Complementarmente, Siow et al. (2013) verificaram que a redução do atrito está mais associada à lubricidade intrínseca do material do que à sua rugosidade superficial inicial.

Outro fator determinante na estabilização do atrito é a tribo-oxidação. O calor gerado pelo contato ativa reações químicas entre os elementos do revestimento (Al, Ti, Cr) e o oxigênio atmosférico, conforme confirmado por análises de EDS e XPS, que detectam oxigênio nas trilhas de desgaste, mesmo em temperatura ambiente. Esse processo resulta na formação de óxidos complexos que se compactam na trilha, originando um tribofilme ou camada de transferência. Tais óxidos atuam como lubrificantes sólidos e barreiras térmicas, promovendo a transição do contato de dois corpos para um sistema a três corpos, o que explica a queda e a subsequente estabilização do CoF após o estágio inicial de amaciamento.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a metodologia experimental e os materiais empregados para a realização desta pesquisa, detalhando as etapas que vão desde a preparação do substrato até os ensaios de caracterização funcional das ferramentas. Inicialmente, descreve-se o processo de retificação plana e dressagem para a obtenção dos insertos de metal duro (classe ISO S10), seguidos pelas especificações das três configurações de revestimentos cerâmicos aplicados (AlTiN/TiSiN, AlCrN e TiCN) e as técnicas de microscopia (confocal e eletrônica de varredura) para medição de rugosidade e espessura dos filmes. Na sequência, detalham-se os parâmetros operacionais, normas de calibração e arranjos instrumentais mobilizados para a execução dos ensaios mecânicos e tribológicos, que compreendem o teste de riscamento (*scratch test*) adaptado em centro de usinagem, o teste de indentação Rockwell C sob cargas progressivas e o ensaio de pino-sobre-placa em regime alternado recíprocante.

3.1 Substrato

O substrato utilizado nesta pesquisa consiste em insertos de metal duro (WC - Co) com teor de 5% de cobalto, correspondentes à classe ISO S10. Os insertos foram confeccionados a partir de *blanks* com dimensões iniciais de 13 mm x 13 mm x 5 mm. A preparação para a obtenção das superfícies finais envolveu o processo de retificação plana transversal de mergulho, realizado em uma retificadora de quatro eixos Agathon DOM Plus com potência máxima de 16 kW.

Para a operação de retificação, empregou-se um rebolo diamantado do tipo copo, com ligante resinoide, tamanho de grão D46 e concentração C100. Os parâmetros de processo foram mantidos constantes, utilizando uma velocidade de corte (v_c) de 20 m/s e velocidade de avanço axial (v_{fa}) de 6 mm/min. O resfriamento foi garantido pela aplicação abundante de fluido de corte à base de óleo mineral integral, com vazão de 12,6 l/min.

Visando assegurar a repetibilidade e a integridade superficial, o rebolo era dressado antes da retificação de cada inserto. Para isso, utilizou-se um rolo dressador de alumina (Al_2O_3) com granulometria 180 #, sob velocidade tangencial

de 10 m/s e velocidade de avanço de 3 $\mu\text{m/s}$.

3.2 Revestimentos e caracterização superficial

No presente estudo, foram analisadas três configurações de revestimentos depositados via PVD por arco catódico: AlTiN/TiSiN, AlCrN e TiCN. Segundo as especificações técnicas do fabricante (Grupo Oerlikon), os revestimentos possuem as seguintes características:

- AlTiN/TiSiN: dureza de 38 GPa e temperatura máxima de operação de 1100 °C;
- AlCrN: dureza de 44 GPa e temperatura máxima de operação de 1100 °C;
- TiCN: dureza de 37 GPa e temperatura máxima de operação de 400 °C.

A medição da rugosidade foi realizada por meio de microscopia óptica confocal, com o equipamento Alicona InfiniteFocus SL. Fazendo a seleção de uma área retangular nas superfícies de folga e de saída dos insertos após aplicação dos revestimentos, em software vinculado ao Alicona, o equipamento realizou as medições S_a (rugosidade média aritmética) e S_z (média de cinco distâncias de pico a vale).

Adicionalmente, foram mensuradas as espessuras dos revestimentos. Sendo assim, para a realização da fratura e análise MEV dos insertos, colocou-se o inserto na morsa de forma a deixar metade do mesmo exposto, o mesmo foi coberto com uma manta pequena (dimensões semelhantes a de uma toalha de rosto) e realizou-se o choque do martelo na metade do inserto, que não estava em contato com a morsa.

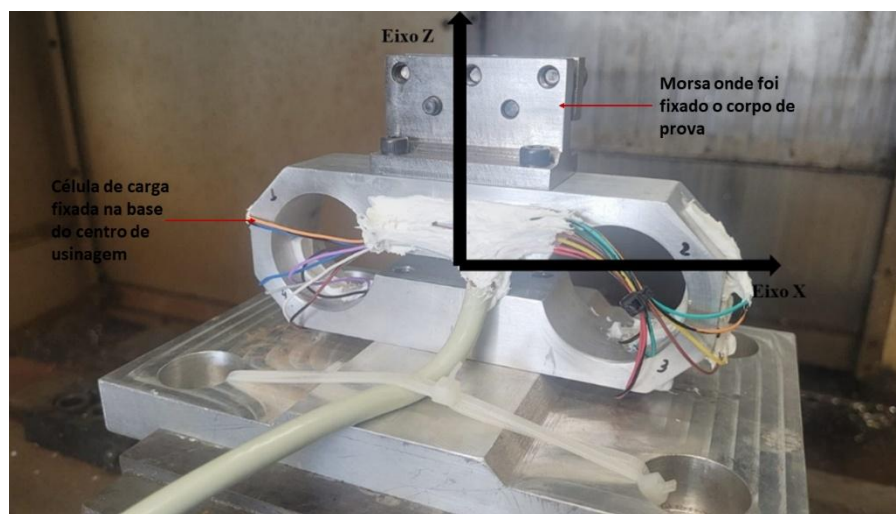
Em seguida as amostras fraturadas foram selecionadas buscando-se visualmente, amostras que conteriam substrato e revestimento, para a análise MEV e geração das imagens, com aumento de 30000x. A quantificação final das espessuras foi realizada com o auxílio do software ImageJ, processando as micrografias geradas para garantir a precisão dos dados.

3.3 Teste de riscamento

Visando à determinação da adesão entre o revestimento e o substrato, conduziu-se o ensaio de riscamento. Para a execução deste teste, utilizou-se um

centro de usinagem vertical CNC Romi D600, equipado com uma célula de carga instrumentada com extensômetros para a medição simultânea das forças normal e tangencial. A aquisição dos dados foi viabilizada por um sistema da National Instruments (Módulo NI9234 Série C), conectado a um computador pessoal com o software Labview 8.1, o qual permitiu o monitoramento e a análise posterior dos sinais coletados. A montagem experimental da célula de carga no centro de usinagem é detalhada na Figura 2.

Figura 2 - Célula de carga montada no centro de usinagem.



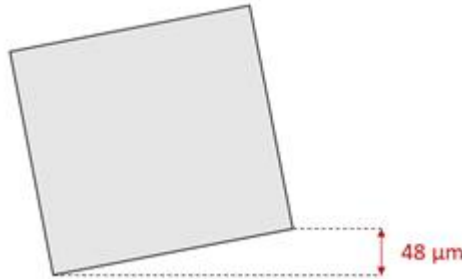
Fonte: Autoria própria, 2026.

No que concerne ao procedimento operacional, após a devida calibração da célula de carga, realizaram-se em cada revestimento três riscos com profundidade de penetração crescente. Esse processo foi executado por meio do deslocamento linear do fuso da máquina a uma velocidade constante de 10 mm/min, ao longo de uma trajetória de 10 mm. Tal configuração foi adotada para garantir que a região central de cada trilha não sofresse influências dos efeitos transitórios de aceleração e desaceleração, tornando-a ideal para a análise dos mecanismos de falha.

Ademais, para assegurar o incremento progressivo da carga aplicada ao inserto, o inserto revestido foi fixado de forma inclinada na célula de carga, apresentando um gradiente de altura de 48 μm (Figura 3). O posicionamento do inserto é feito de forma manual e checada a diferença de altura da extremidade esquerda em relação a direita com um relógio comparador.

Foram realizados 3 riscos em uma única superfície de folga de cada um dos insertos, totalizando 9 riscos feitos. Na Figura 4, é possível observar o aspecto final dos três riscos realizados na superfície de saída do inserto revestido com AlTiN/TiSiN.

Figura 3 – Representação do posicionamento dos inserto na célula de carga.



Fonte: Autoria própria, 2026.

Figura 4 - Riscos feitos no inserto com o revestimento AlTiN/TiSiN.



Fonte: Autoria própria, 2026.

Posteriormente à etapa de ensaios, as trilhas de desgaste foram submetidas a uma inspeção visual por meio do microscópio confocal Alicona InfiniteFocus SL. Esta análise permitiu a verificação das características geométricas dos riscos, tais como largura e profundidade, possibilitando a correlação desses dados com os tipos de revestimento testados.

Por fim, o critério adotado para a determinação da falha do revestimento baseou-se na análise conjunta da variação do coeficiente de atrito (CoF) em função do deslocamento e da inspeção visual das imagens tridimensionais. Nesse contexto, o ponto de falha foi definido pelo surgimento da primeira instabilidade significativa nos sinais de força, sinalizando o início do descolamento ou da falha coesiva do

filme (Bull; Berasetegui, 2006).

3.4 Teste de indentação

O ensaio de indentação Daimler-Benz Rockwell C foi realizado utilizando-se o dispositivo Wolpert Testor HT1 (Figura 5), equipamento localizado no departamento de engenharia de materiais da UFSCar. O teste empregou um indentador cônico de diamante com ângulo de ponta de 120° e raio de $200\text{ }\mu\text{m}$ para caracterizar a adesão do revestimento ao substrato, em conformidade com a norma VDI 3198.

Figura 5 - Máquina de indentação Wolpert Testor HT1.



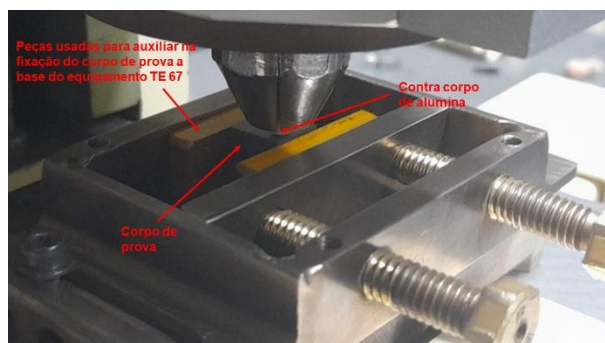
Fonte: Autoria própria, 2026.

As cargas de indentação aplicadas foram de 588 N, 980 N e 1471 N, visando avaliar a evolução dos danos superficiais nos sistemas AlTiN/TiSiN, AlCrN e TiCN depositados sobre metal duro, seguindo a metodologia experimental de Alves et al. (2025). Após a execução das indentações, as impressões residuais foram analisadas via MEV e EDS para a posterior classificação visual do grau de adesão, em uma escala de HF1 a HF6.

3.5 Teste de pino-sobre-disco

Conduziu-se o ensaio de pino-sobre-placa nas faces de folga dos insertos utilizando-se o equipamento TE 67 COMPENDX, localizado no departamento de engenharia de materiais da UFSCar, sob condições de deslizamento a seco, conforme ilustrado na Figura 6. Realizaram-se três trilhas para cada sistema de revestimento, adotando-se frequência de 5 Hz, velocidade de deslizamento de 0,1 m/s, distância total de 100 m e carga normal de 25 N. O procedimento seguiu as diretrizes da norma ASTM G133, com exceção do comprimento do curso, que foi reduzido de 10 mm para 5 mm. Essa alteração se justifica pelas dimensões reduzidas dos insertos, visando evitar que as trilhas se aproximassem excessivamente das bordas das ferramentas. Ressalta-se que a própria norma prevê a possibilidade de ajustes em parâmetros como curso e carga, desde que tais modificações sejam devidamente reportadas.

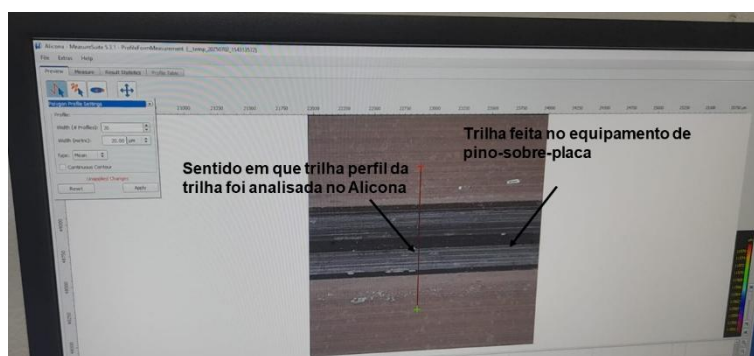
Figura 6 - Equipamento de pino-sobre-placa realizando trilha na face de folga do inserto revestido com AlTiN/TiSiN.



Fonte: Autoria própria, 2026.

Em cada ensaio, utilizou-se um novo contracorpo esférico de alumina (Al_2O_3) de alta pureza, com raio de ponta de 2,7 mm e dureza de $1560 \pm 70 \text{ HV}_{0,3}$. Sendo a elevada dureza e a inércia química a presença de óxidos os fatores para se optar pelo uso de alumina ao invés da utilização de contracorpo de outro material. Os pinos de alumina não sofreram nenhum tipo de análise registrada neste trabalho, porém foram armazenados para análises em futuros trabalhos.

Figura 7 - Plano de análise da trilha no Alicona InfiniteFocus SL.



Fonte: Autoria própria, 2026.

As curvas do coeficiente de atrito (CoF) em função da distância foram geradas por sensores de medição de força integrados ao tribômetro. Os perfis e as áreas de desgaste foram obtidos por meio do microscópio confocal Alicona InfiniteFocus SL, conforme demonstrado na Figura 7. Finalmente, a caracterização morfológica e química das trilhas de desgaste foi executada via MEV e EDS.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir, apresentam-se e discutem-se os resultados experimentais obtidos na caracterização dos revestimentos de AlTiN/TiSiN, AlCrN e TiCN depositados sobre insertos de metal duro. A avaliação do desempenho e das propriedades físicas e mecânicas desses filmes finos foi realizada por meio de uma sequência de testes e análises por imagem. Inicialmente, determinou-se a morfologia, a espessura e os parâmetros de rugosidade (S_a e S_z) das superfícies via MEV e perfilometria. Na sequência, a resistência à delaminação e a qualidade da adesão interface/substrato foram investigadas quantitativamente e qualitativamente através dos ensaios de riscamento e de indentação Rockwell C. Por fim, o comportamento tribológico e o desgaste de cada sistema foram mapeados pelo teste de pino-sobre-placas, correlacionando a evolução do coeficiente de atrito com a integridade estrutural e a formação de tribofilmes protetivos.

4.1 Caracterização do revestimento

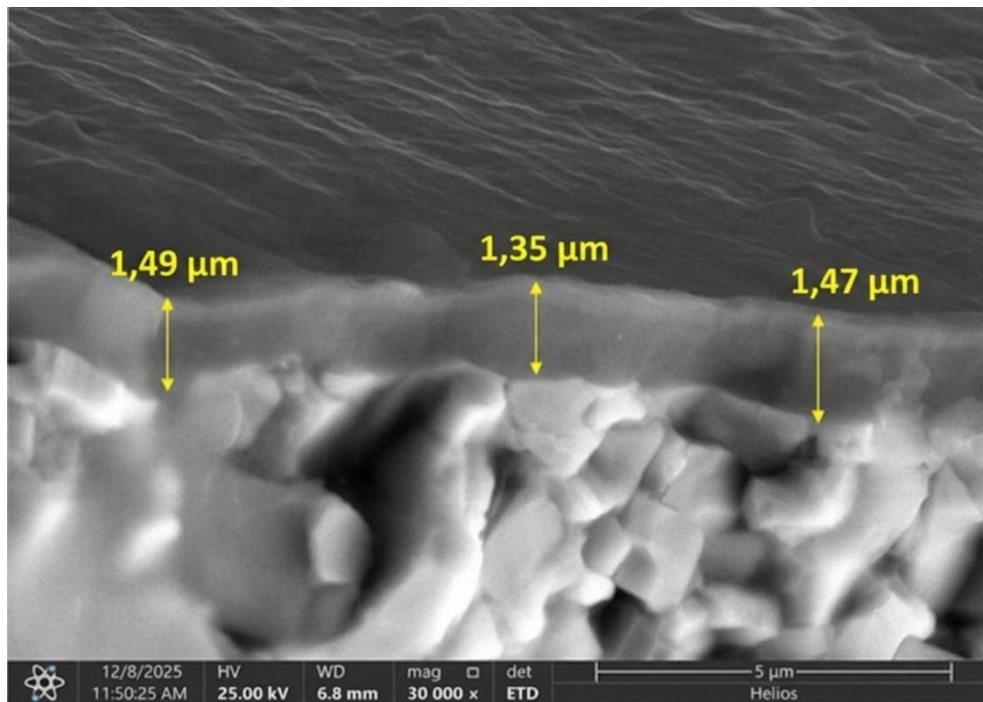
A espessura dos revestimentos, obtida através de imagens geradas no MEV e medidas com o software ImageJ, está apresentada nas Figuras 8, 9 e 10. Vê-se que o revestimento que apresentou a maior variação da espessura foi o TiCN (16%). O revestimento com menor variação da sua espessura foi o AlCrN (13%), o que indica um melhor controle de aplicação. A Tabela 1 traz as medidas tomadas de cada um dos revestimentos.

Tabela 1 - Medidas das espessuras dos revestimentos na região esquerda, central e direita da amostra.

Revestimento	Esquerda	Central	Direita	Média
AlTiN/TiSiN	1,49 μm	1,34 μm	1,47 μm	1,43
AlCrN	0,47 μm	0,45 μm	0,41 μm	0,44
TiCN	1,01 μm	1,19 μm	1,07 μm	1,09

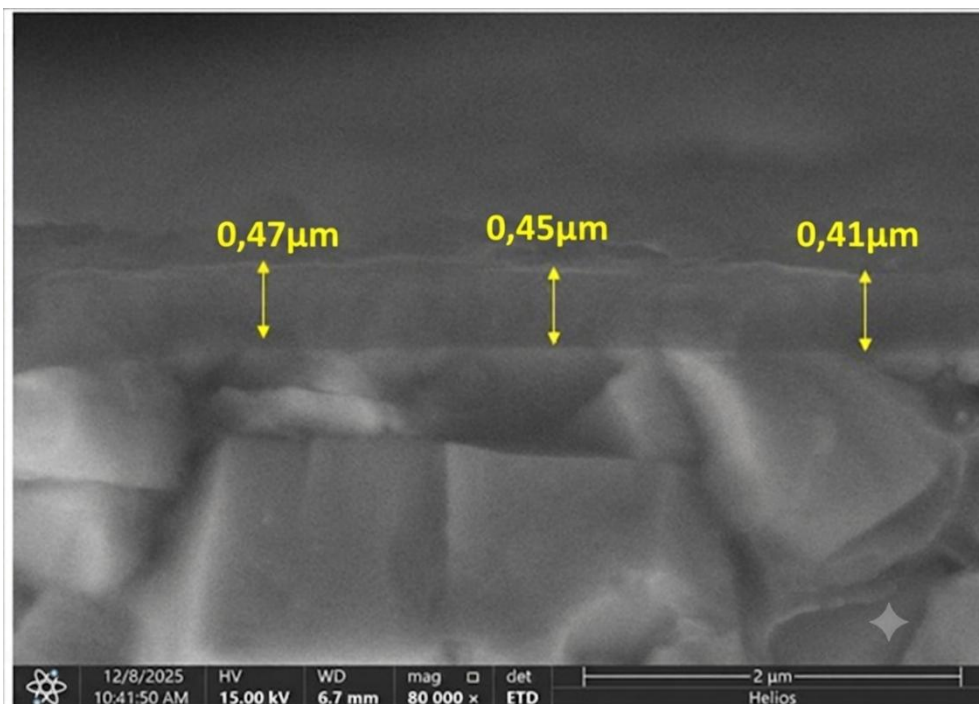
Fonte: Autoria própria, 2026.

Figura 8 - Imagem MEV da seção transversal do inserto de metal duro revestido com AlTiN/TiSiN.



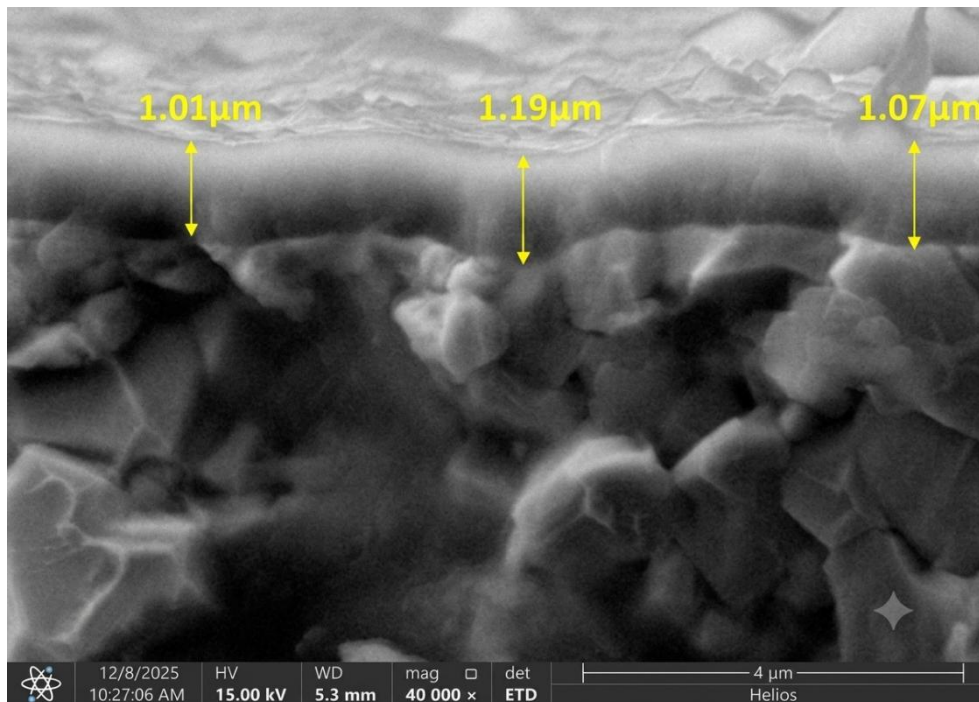
Fonte: Autoria própria, 2026.

Figura 9 - Imagem MEV da seção transversal do inserto de metal duro revestido com AlCrN.



Fonte: Autoria própria, 2026.

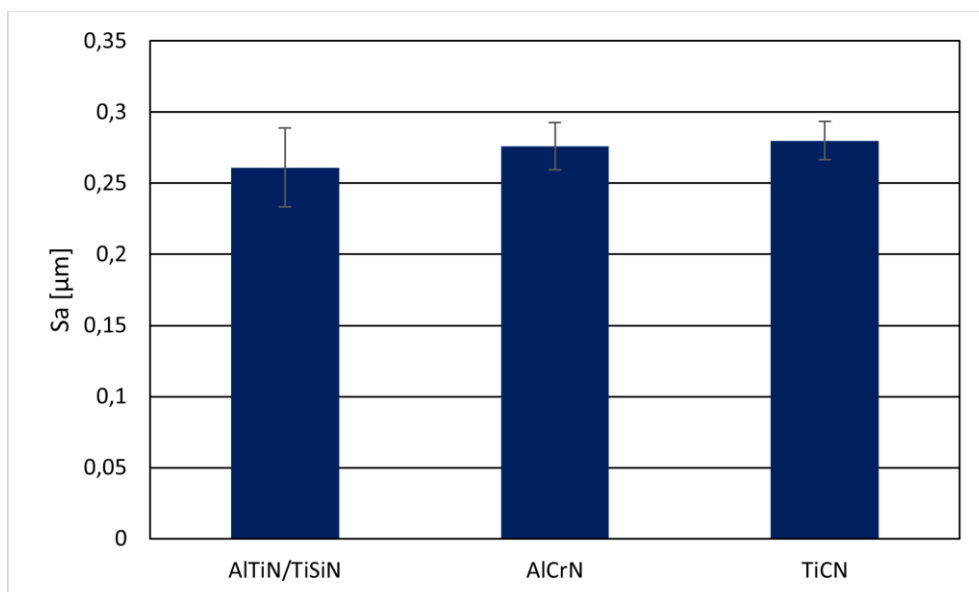
Figura 10 - Imagem MEV da seção transversal do inserto de metal duro revestido com TiCN.



Fonte: Autoria própria, 2026.

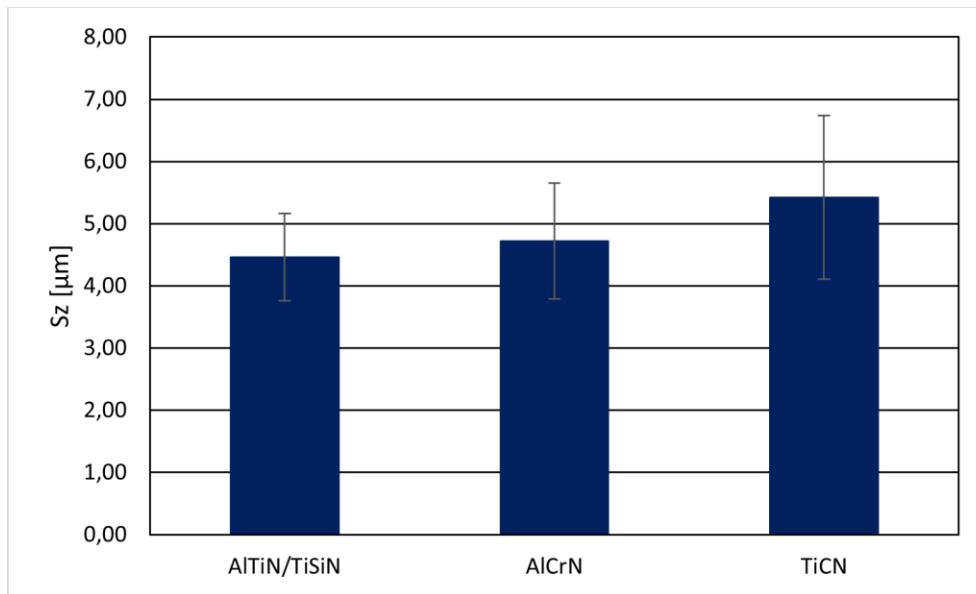
Nas Figuras 11 e 12, são mostrados os valores médios de S_a e S_z para cada revestimento. Os altos valores de S_z podem ser atribuídos as imperfeições superficiais, que podem ser vistas nas imagens MEV geradas dos revestimentos (Figuras 8, 9 e 10).

Figura 11 – Rugosidade média S_a dos revestimentos AlTiN/TiSiN, AlCrN e TiCN.



Fonte: Autoria própria, 2026.

Figura 12 – Rugosidade máxima S_z dos revestimentos AlTiN/TiSiN, AlCrN e TiCN.



Fonte: Autoria própria, 2026.

Dentre os três revestimentos, o que apresentou maiores valores de rugosidade foi o TiCN, ($S_a = 0,28 \mu\text{m}$ e $S_z = 5,42 \mu\text{m}$). Na Figura 10, é possível observar os defeitos da superfície que influenciam nos parâmetros de rugosidade do TiCN.

Já o revestimento que apresentou menores valores de S_a e S_z foi o AlTiN/TiSiN, o que, do ponto de vista de usinagem, resultaria em melhor escoamento de cavaco, minimização dos riscos de trincas no revestimento e estabilidade das forças de corte.

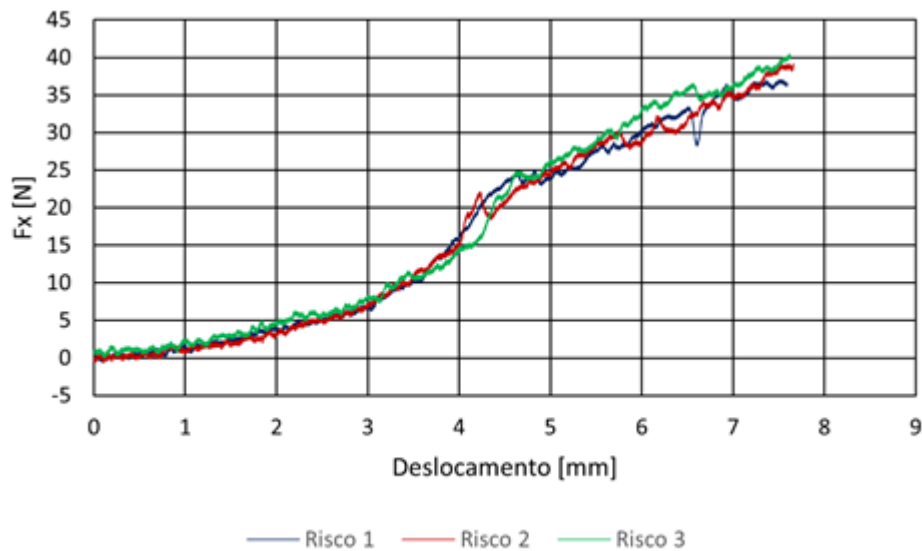
4.2 Teste de riscamento

O teste de riscamento busca demonstrar a qualidade da adesão entre substrato e revestimento. O momento de falha, como mostrado por Bull e Berasetegui (2006), pode ser determinado assim que ocorrem mudanças abruptas nas curvas de carga por deslocamento ou atrito por deslocamento.

A Figura 13 apresenta o gráfico de F_x por deslocamento sobre o revestimento de AlTiN/TiSiN. De 0 a 4 mm, nota-se um comportamento muito próximo ao de uma reta neste intervalo. A força se comporta de maneira linear neste trecho. Em seguida, no intervalo de 4 mm a 5 mm, é aferida uma instabilidade em F_x , que, em 4 mm, possui o valor de 15 N. A esta instabilidade atribui-se a falha do revestimento. Na Figura 14, o gráfico do coeficiente de atrito por deslocamento também evidencia

esta instabilidade, sendo mais perceptível. Logo em sequência, quando as tensões na região de falha se acomodam, F_x volta a crescer de maneira relativamente estável.

Figura 13 - Força tangencial por deslocamento no revestimento AlTiN/TiSiN.

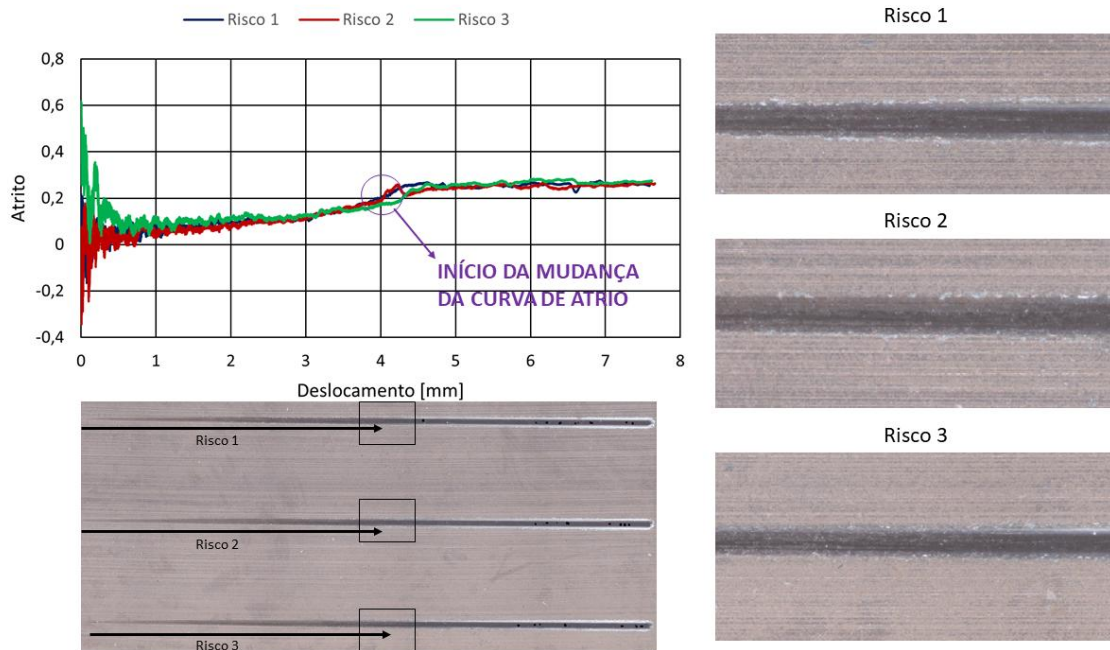


Fonte: Autoria própria, 2026.

Apesar de os três riscos terem sido feitos sobre o mesmo revestimento, todos apresentando o ponto de falha em 4 mm e L_c de 15 N, o comportamento deles se diferencia após este ponto. O risco 1, por exemplo, tem uma instabilidade muito mais sutil que os demais. Na curva de atrito (Figura 14), nota-se que ele atinge um platô de estabilidade mais rápido. Já o risco 2 apresenta uma subida abrupta seguida de uma queda também abrupta, formando um pico nos gráficos das Figuras 13 e 14. O risco 3 mostra um crescimento muito mais lento até a acomodação das tensões, mas mantém o período de instabilidade entre 4 mm e 5 mm.

A Figura 14 traz o gráfico de atrito, imagens dos riscos e imagens ampliadas na região de falha do revestimento. Nas imagens da região de falha, as bordas dos riscos apresentam lascamento, sendo possível ver pontos em cinza metálico (característico do metal duro). Isso também ocorre na mesma região no fundo das trilhas, porém de maneira mais discreta, podendo ser classificado como uma falha adesiva do revestimento. Os pontos pretos, localizados no final da trilha, são pontos de falhas na geração da imagem.

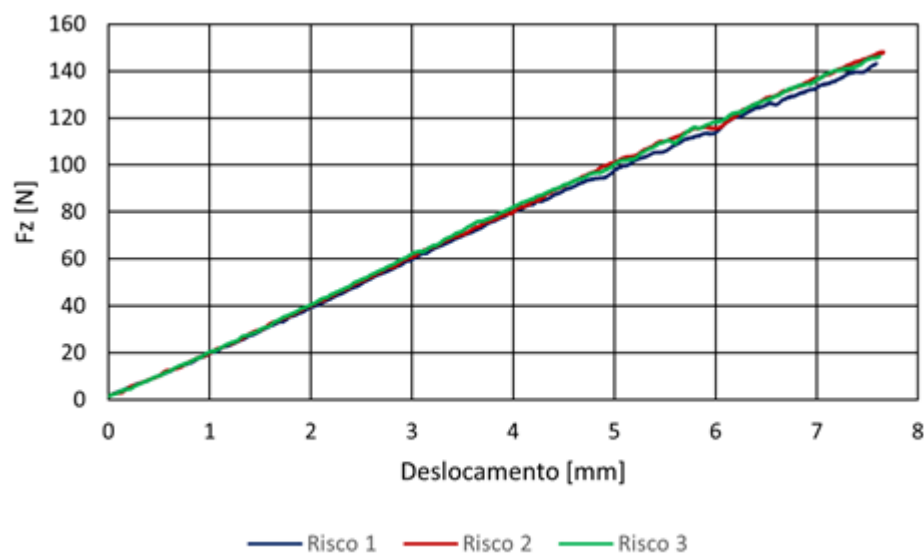
Figura 14 – Coeficiente de atrito por deslocamento no revestimento AlTiN/TiSiN.



Fonte: Autoria própria, 2026.

Na Figura 15, tem-se a força na direção vertical (F_z) em função do deslocamento. Seu comportamento, como esperado, é uma reta sem grandes variações. Nesse gráfico, percebe-se que, até o deslocamento de 4 mm, os três riscos possuem comportamentos muito semelhantes. Após esse ponto, há uma pequena divergência no crescimento dos três riscos. O valor de F_z é de 80 N no ponto de 4 mm.

Figura 15 - Carga na direção vertical por deslocamento no revestimento AlTiN/TiSiN.

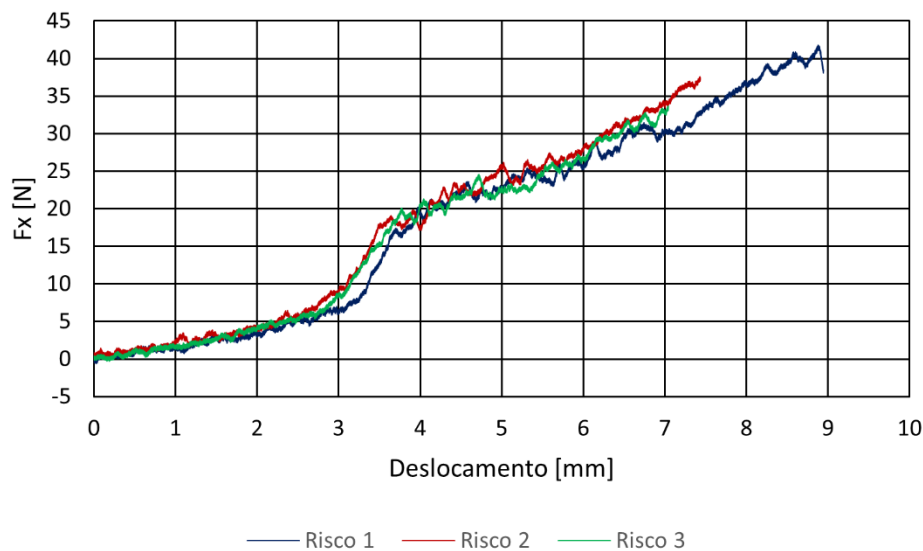


Fonte: Autoria própria, 2026.

As Figuras 16 e 17 apresentam as curvas de F_x por deslocamento e de atrito por deslocamento, respectivamente, quando do riscamento do inserto revestido por AlCrN. O revestimento apresenta falha no ponto de 3 mm, evidenciada por uma mudança na curva de atrito, na qual ocorre um aumento expressivo seguido de estabilização em um patamar superior ao registrado anteriormente.

O valor registrado de L_c para os riscos 2 e 3 é de 10 N, enquanto para o risco 1 registra-se um valor ligeiramente inferior, em torno de 7 N. Como relatado por Bull e Berasetegui (2006) e Beake et al. (2017), o teste de riscamento é semiquantitativo, portanto, considerar o L_c como um valor universal é um equívoco. Neste trabalho, por exemplo, obtiveram-se duas medidas para L_c para o mesmo inserto, próximas, porém distintas.

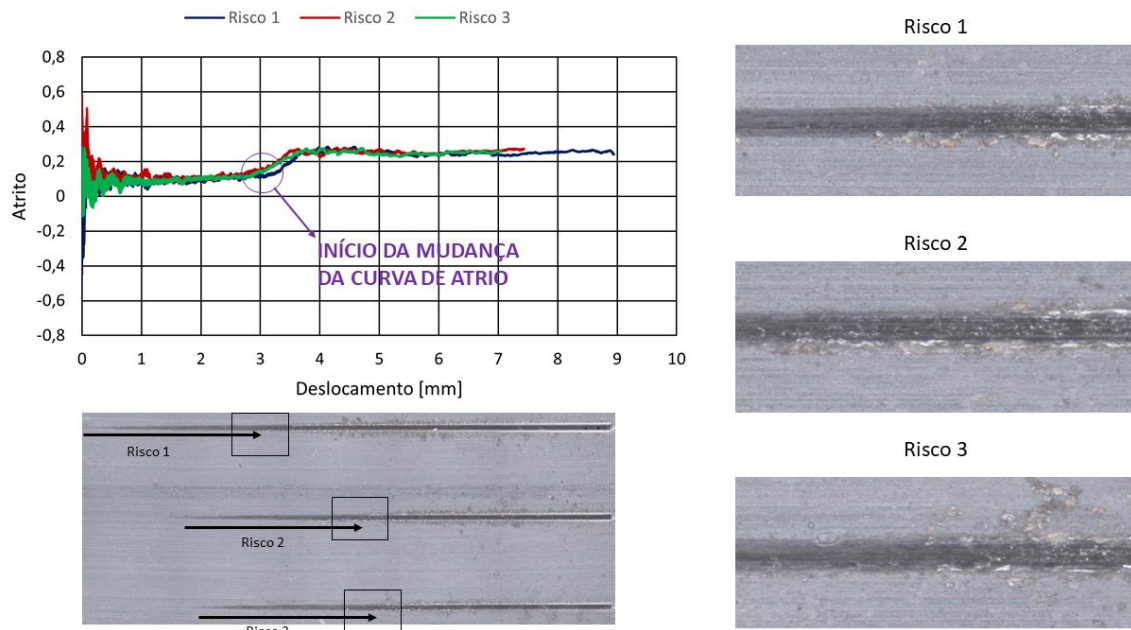
Figura 16 - Força tangencial por deslocamento no revestimento AlCrN.



Fonte: Autoria própria, 2026.

A Figura 17 apresenta também as imagens dos riscos e as ampliações de suas regiões de falha. Percebe-se a delaminação nas bordas da trilha e, na parte interna, notam-se trincas no revestimento e mudança de coloração para o tom do substrato.

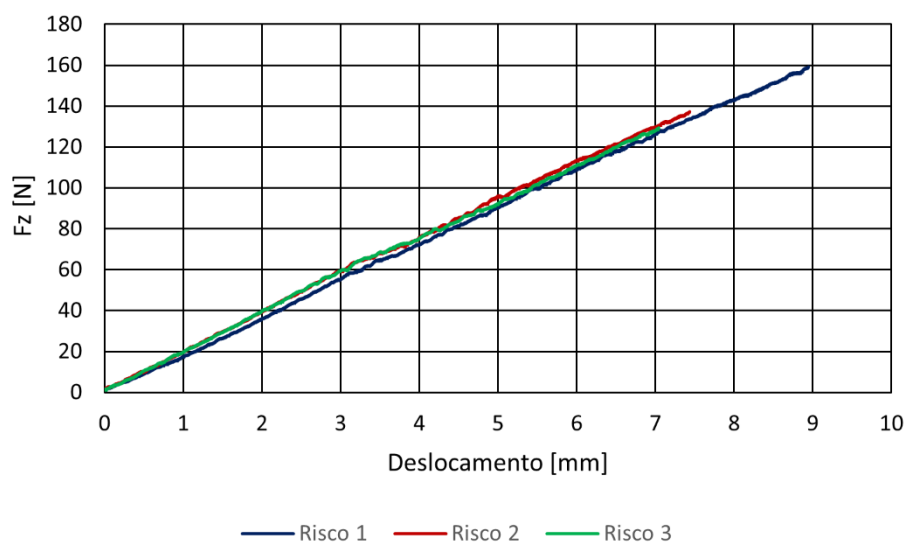
Figura 17 – Coeficiente de atrito por deslocamento no revestimento AlCrN.



Fonte: Autoria própria, 2026.

A Figura 18 mostra o comportamento de F_z por deslocamento. A força em z para a região de rompimento é de 60 N para os riscos 2 e 3 e de 58 N para o risco 1. Assim como para o revestimento de AlTiN/TiSiN, o comportamento da curva é linear.

Figura 18 - Carga na direção vertical por deslocamento no revestimento AlCrN.



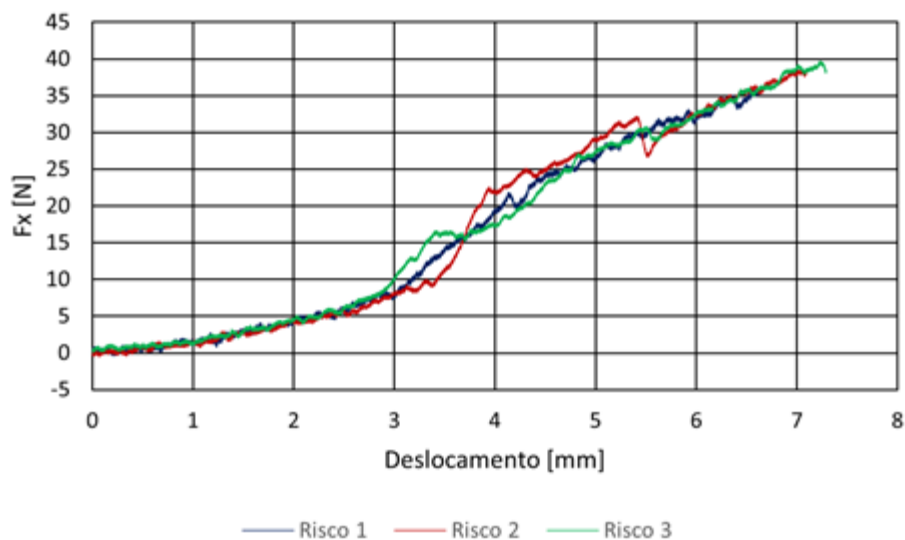
Fonte: Autoria própria, 2026.

O revestimento TiCN teve suas curvas de F_x por deslocamento (Figura 19) e de atrito por deslocamento (Figura 20) com comportamento próximo aos dos revestimentos de AlTiN/TiSiN e AlCrN. O ponto de falha do revestimento, assim como para AlCrN, também foi de 3 mm, mas, diferentemente do revestimento de AlCrN, que teve 10 N registrado para dois de três dos riscos feitos, no TiCN apenas um risco alcançou 10 N na falha, tendo os outros dois ficado com L_c de 7 N.

Ao se observar a Figura 19, mais especificamente a curva de atrito, verifica-se uma demora um pouco maior para que o sistema revestimento/substrato se reacomode após a falha. Os riscos 1 e 3 só voltam a ter um valor de atrito próximo de constante em torno de 4,5 mm.

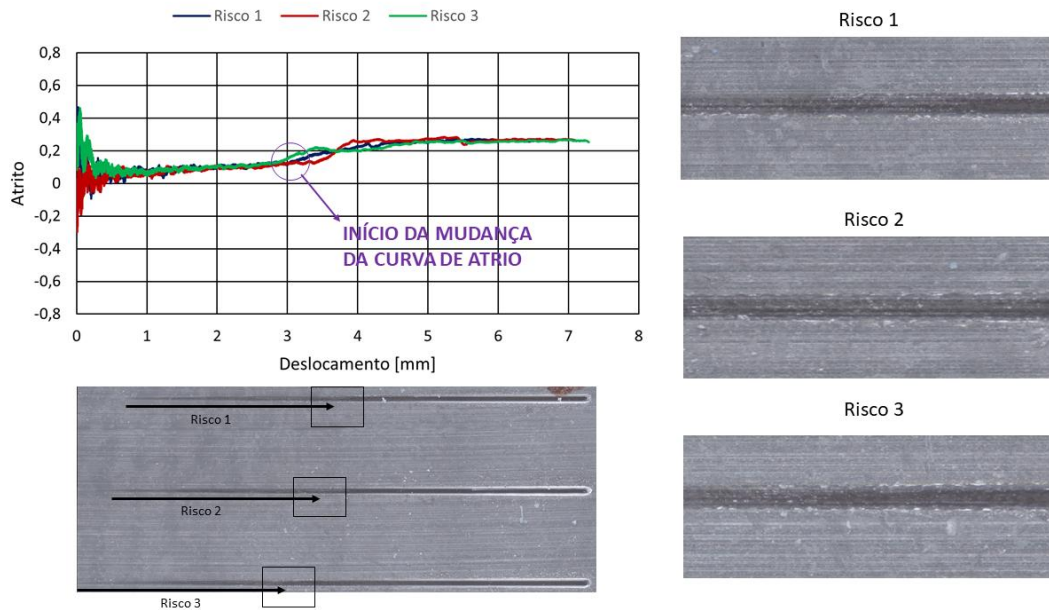
Analisando as imagens da região de falha (Figura 20), vemos uma deterioração modesta das bordas do risco, muito semelhante ao que ocorreu com o revestimento de AlTiN/TiSiN. No interior dos riscos é possível ver mudanças de tonalidade das cores do revestimento, como as vistas no revestimento de AlCrN, porém mais discretas.

Figura 19 - Força tangencial por deslocamento no revestimento TiCN.



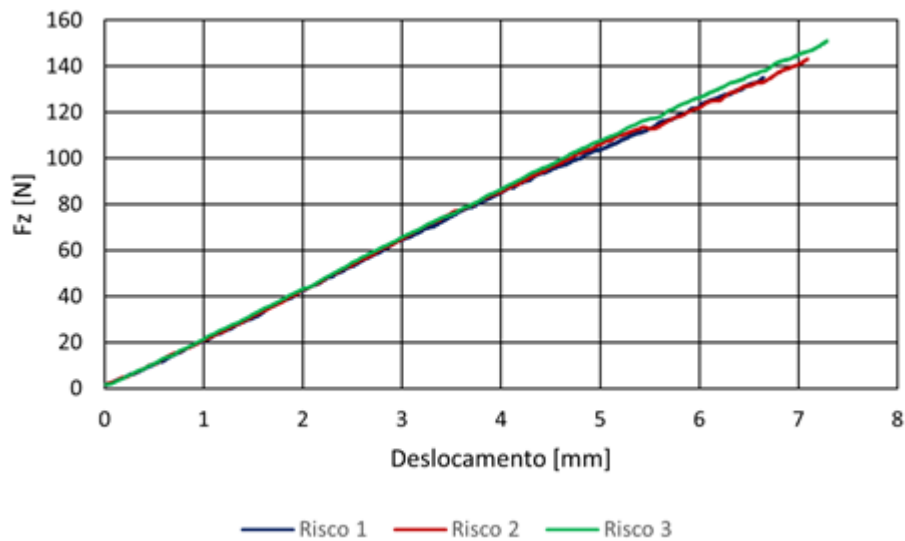
Fonte: Autoria própria, 2026.

Figura 20 – Coeficiente de atrito por deslocamento no revestimento TiCN.



Fonte: Autoria própria, 2026.

Figura 21 - Carga na direção vertical por deslocamento no revestimento TiCN.



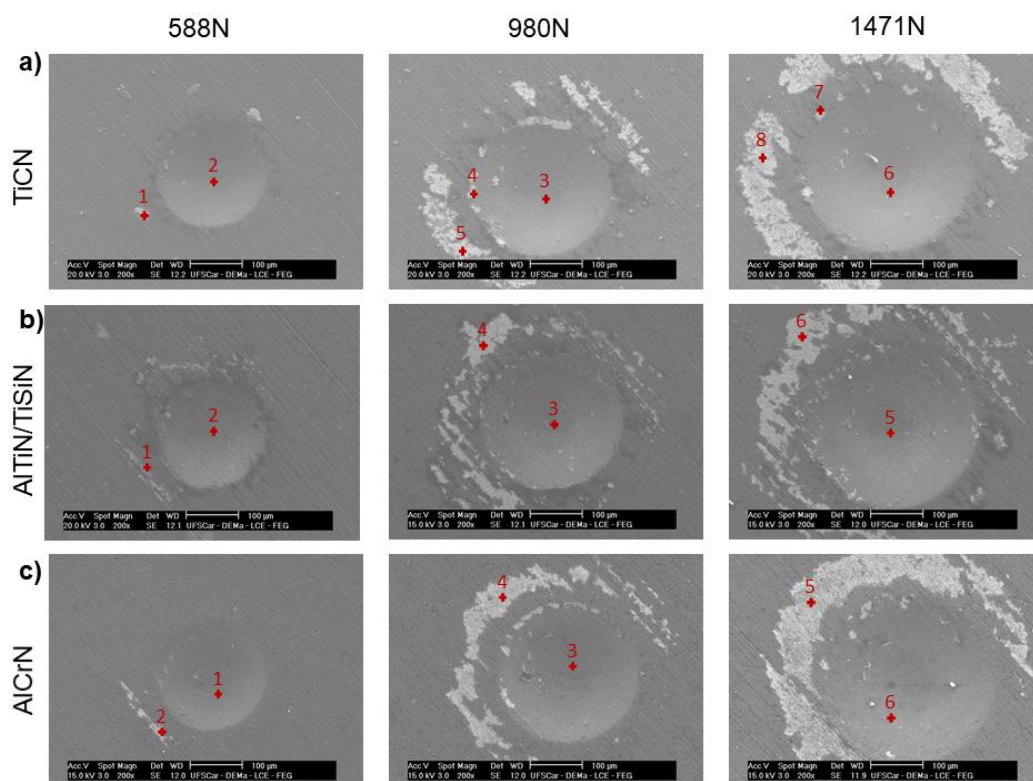
Fonte: Autoria própria, 2026.

A Figura 21 mostra o comportamento de F_z por deslocamento. A força em z para a região de rompimento é de 65 N. Diferentemente do que foi observado para o revestimento de AlCrN, para o qual foram obtidos dois valores de F_z para o ponto de 3 mm, aqui os três riscos alcançaram o mesmo valor.

4.3 Teste de indentação Rockwell C

O teste de indentação Rockwell C com diferentes cargas foi realizado para avaliar a qualidade da adesão revestimento/substrato. A Figura 1, mostrada na parte de revisão bibliográfica, mostra um sistema de classificação da adesão do revestimento ao substrato adaptado da VDI 3198, sendo os graus HF1 à HF4 classificações satisfatórias de adesão entre substrato e revestimento, enquanto as classificações HF5 e HF6 exibem adesão inadequada do revestimento ao substrato. Na Figura 22 têm-se imagens de MEV das indentações, assim como pontos de análise de EDS.

Figura 22 - Testes de indentação Rockwell C da Daimler-Benz de revestimentos de (a) TiCN (b) AlTiN/TiSiN e (c) AlCrN em diferentes cargas.



Fonte: Autoria própria, 2026.

Analisando-se as indentações feitas com carga de 588 N, observa-se que os três revestimentos tiveram delaminação e exposição do substrato nos pontos 1 para o TiCN e AlTiN/TiSiN e 2 para AlCrN, algo que é corroborado pelos dados do EDS expostos nas Tabelas 2 a 4. No ponto de delaminação, todos os inserts demonstram um alto teor de tungstênio (W), acima de 70%.

Usando a classificação da Figura 1, pode-se rotular os três revestimentos como HF3, já que os revestimentos apresentam marcas de delaminação. Mas, comparando-se as imagens de AlCrN e TiCN, pode-se atribuir ao primeiro revestimento um melhor desempenho. No revestimento de AlCrN não ocorrem trincas quando submetido à carga de 588 N. No caso do TiCN, além da delaminação, é possível ver trincas ao longo da borda da região de penetração do indentedor.

Tabela 2 - Dados de EDS do teste de indentação feito com cargas de 588N, 980N e 1471 N no inserto revestido com TiCN.

Pontos	N	Ti	W	C	Co	O	Total
1	5,5	5,1	79,3	7,9	1,5	0,7	100
2	8,9	72,3	3,4	12,8	0,1	2,5	100
3	9,5	70,3	6,2	11,4	0,3	2,3	100
4	13,9	63,4	2,4	16,7	3,5	0,1	100
5	12,3	17,6	59,9	5,7	3,3	1,3	100
6	11,2	68,4	5,3	12,7	0,4	2,1	100
7	0,4	1,5	69,3	19,0	4,2	5,6	100
8	1,1	1,7	72,3	23,6	0,7	0,6	100

Fonte: Autoria própria, 2026.

Tabela 3 - Dados de EDS do teste de indentação feito com cargas de 588N, 980N e 1471 N no inserto revestido com AlTiN/TiSiN.

Pontos	N	Ti	W	C	Co	O	Al	Si	Total
1		0,6	88,9		3,1	6,9	0,5		100
2	22,8	19,9	38,0		2,2	2,2	14,5	0,4	100
3	23,6	28,6	24,5		2,1	1,9	18,2	1,2	100
4		0,2	95,0		2,2	2,5	0,1		100
5	24,2	34,3	15,8		1,4	2,4	20,2	1,7	100
6		2,3	80,5		13,0	2,4	20,2	1,7	

Fonte1: Autoria própria, 2026.

Tabela 4 - Dados de EDS do teste de indentação feito com cargas de 588N, 980N e 1471N no inserto revestido com AlCrN.

Pontos	N	Cr	W	Co	O	Al	C	Total
1	28,3	27,6	6,9	0,2		30,3	6,8	100
2	0,1	4,2	78,3	10,0	3,3	4,1		100
3	20,8	33,3	7,0	0,3	0,5	38,1		100
4			83,1	14,4	2,5			100
5		0,1	76,4	19,5	3,6	0,3		100
6	33,1	28,7	3,7	0,2		34,2		100

Fonte: Autoria própria, 2026.

Para as cargas de 980 N e 1471 N, todos os revestimentos apresentaram falhas inaceitáveis, sendo classificados como HF5 ou HF6. Isso é evidenciado pelas grandes áreas de delaminação mostradas pelo MEV e análise EDS. Porém, para o revestimento de TiCN, na carga de 980 N, ponto 5, vê-se que a região de delaminação ainda apresenta quantidade considerável de elementos do revestimento, 17,6%.

Nos revestimentos de AlTiN/TiSiN e AlCrN, a presença do elemento W medida após a indentação com carga de 980 N é muito alta quando comparada à porcentagem de W na região delaminada do TiCN. Apesar da alta porcentagem de elementos do substrato, o revestimento que apresenta, por método visual, a menor área de delaminação é o AlTiN/TiSiN, isso ficando ainda mais evidente na indentação feita com carga de 1471N.

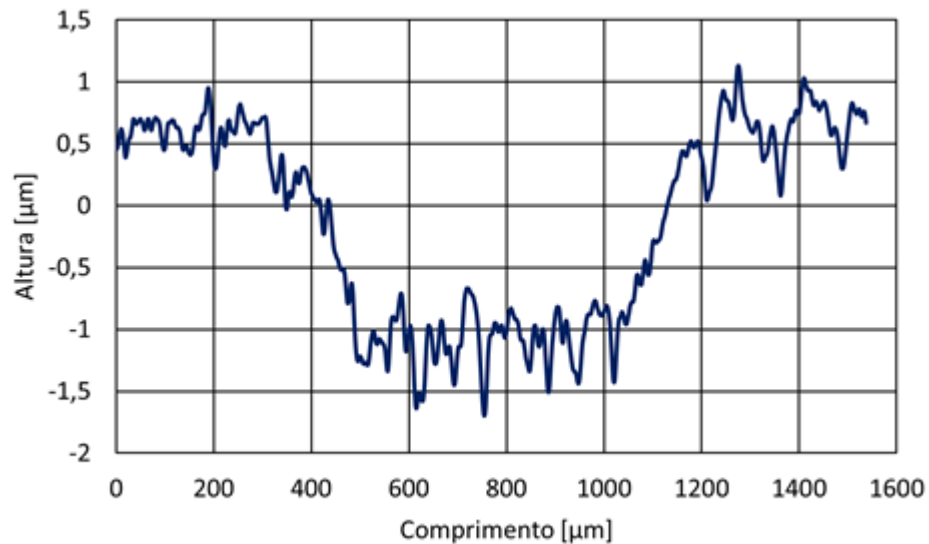
4.5 Teste de pino-sobre-placa

As Figuras 23, 25 e 27 apresentam os perfis das segundas trilhas de desgaste geradas em cada um dos três insertos, enquanto as Figuras 24, 26 e 28, associadas às Tabelas 5 a 7, reúnem os dados quantitativos das análises por EDS.

Avaliando-se a profundidade máxima alcançada pela trilha no revestimento de AlTiN/TiSiN, observa-se que o substrato de metal duro foi atingido. A trilha atingiu uma profundidade aproximada de 2,0 μm , valor superior à espessura nominal do revestimento, que é de 1,491 μm (conforme a Figura 8). Além disso, os

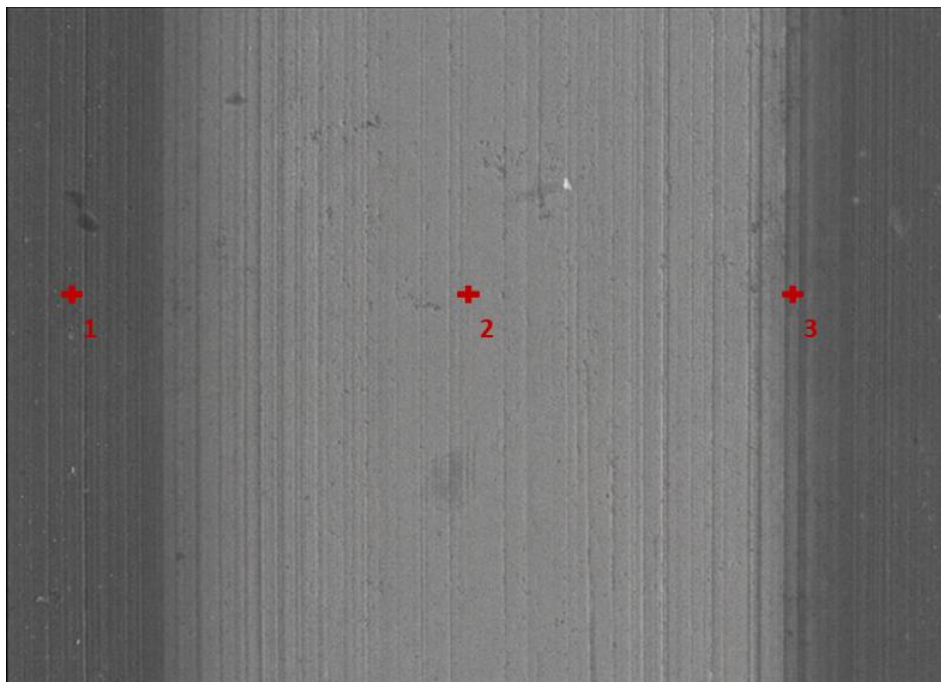
resultados de EDS corroboram essa constatação, revelando elevados teores de W (83,7%) e C (12,5%) no ponto 2 — localizado na região central da trilha de desgaste (Figura 24 e Tabela 5) —, além da ausência completa de elementos constituintes do filme nessa zona.

Figura 23 - Perfil da trilha 2 feita no revestimento AlTiN/TiSiN.



Fonte: Autoria própria, 2026.

Figura 24 - MEV da segunda trilha do revestimento AlTiN/TiSiN.



Fonte: Autoria própria, 2026.

Tabela 5 - Dados de EDS da segunda trilha do revestimento AlTiN/TiSiN.

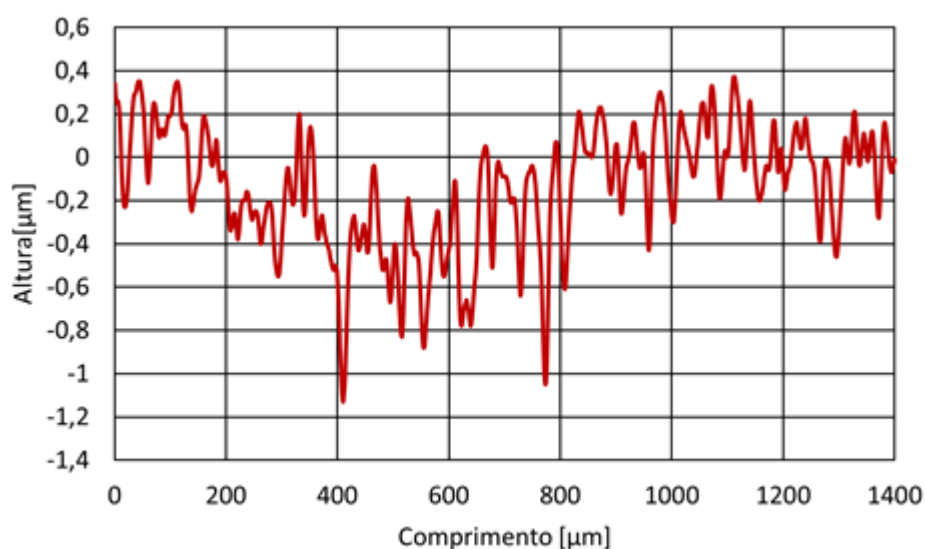
Spectrum	N	Ti	W	Al	C	Si	Co	O	Outros	Total
Spectrum 1	28,7	26,2	23,8	15,6	2,6	1,7	1,3		0,2	100
Spectrum 2			83,7		12,5		2,6	1,1		100
Spectrum 3	22,3	17,6	31,1	17	4,6		2,1	5	0,3	100

Autor: Autoria própria, 2026.

No revestimento de AlCrN, o perfil e a análise química estão dispostos nas Figuras 25 e 26 e na Tabela 6. Pela análise do perfil (Figura 25), verifica-se uma profundidade máxima de desgaste de 1,1 μm . Quando confrontado com a espessura da camada medida na Figura 9 (cujo valor máximo registrado foi de 0,468 μm), esse dado sugere, inicialmente, a exposição do substrato.

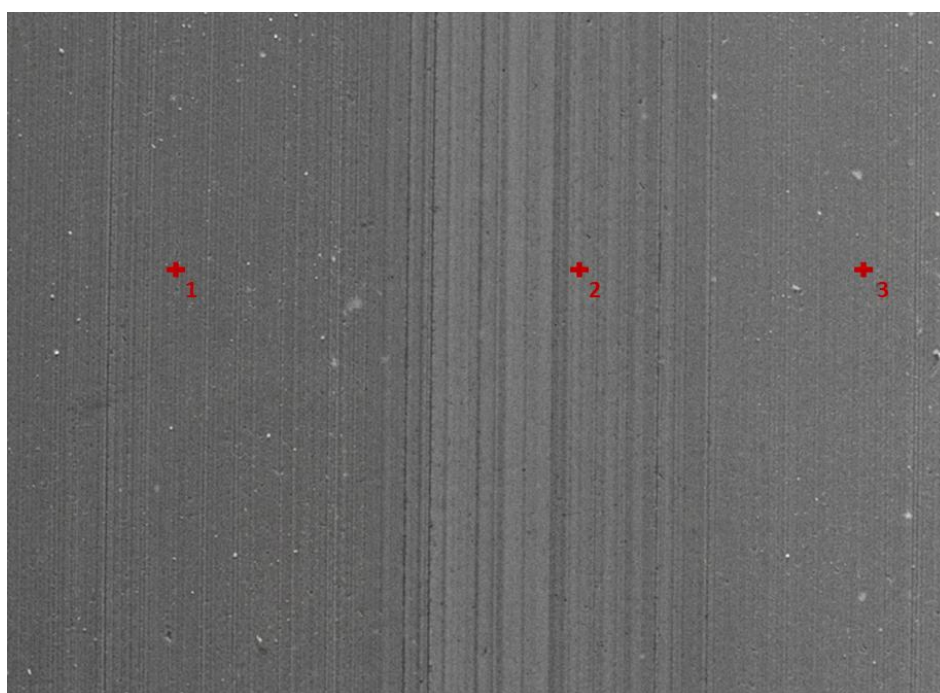
Contudo, os dados obtidos por EDS contrapõem essa dedução. A Figura 26 e a Tabela 6 demonstram a persistência dos elementos estruturais do revestimento em todas as áreas analisadas. Mesmo no Ponto 2 (centro da trilha, onde se pressupõe o desgaste mais severo), identificaram-se teores de 24,8% de nitrogênio (N), 16,2% de cromo (Cr) e 21,5% de alumínio (Al) — proporções muito similares às das regiões periféricas não desgastadas. Portanto, o ensaio de EDS não confirma o alcance do substrato.

Figura 25 - Perfil da segunda trilha feita no revestimento AlCrN.



Fonte: Autoria própria, 2026.

Figura 26 - Dados de EDS da segunda trilha do revestimento AlCrN.



Fonte: Autoria própria, 2026.

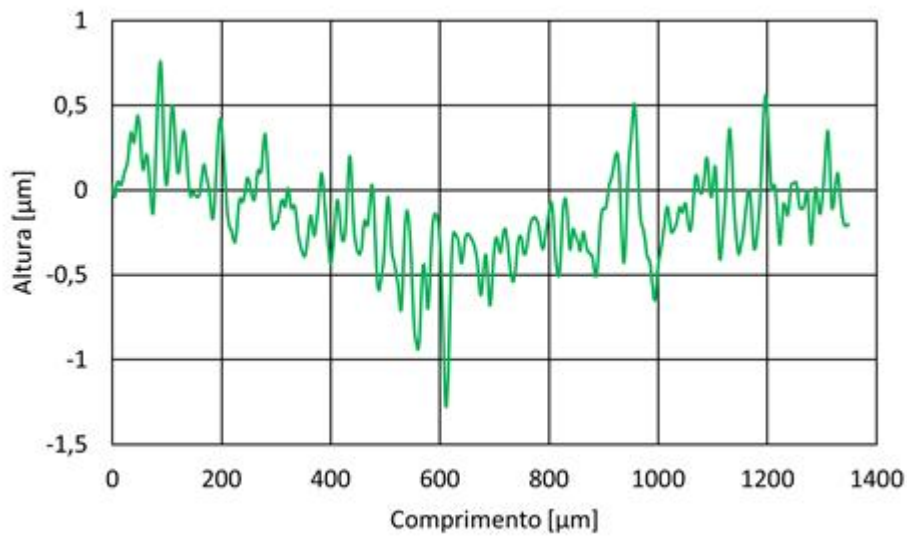
Tabela 6 - Dados do EDS da segunda trilha do revestimento AlCrN.

Spectrum	N	Cr	W	Al	C	Co	O	Outros	Total
Spectrum 1	22,6	21,6	24,3	24,2	3,8	1,9		1,4	100
Spectrum 2	24,8	16,2	31,1	21,5	4,8	1,6			100
Spectrum 3	23,5	18,2	29,1	23,7	3,2	1,7		0,6	100

Autor: Autoria própria, 2026.

Essa aparente divergência entre a perfilometria e o EDS pode ser explicada pelas características morfológicas da trilha impressa no inserto revestido com AlCrN. Ao contrário do AlTiN/TiSiN, que exibiu uma trilha mais larga e regular (acompanhando a geometria abaulada do pino), o canal de desgaste do AlCrN revelou-se menos uniforme, mais rugoso e com limites mal definidos. Observam-se picos proeminentes no interior da trilha em posições onde macroscopicamente se esperariam vales; alguns desses picos retornam à linha de altura zero (referência da superfície íntegra do filme). Logo, a resposta do EDS pode ter decorrido do posicionamento do feixe eletrônico (ponto 2) diretamente sobre uma dessas cristas remanescentes do revestimento.

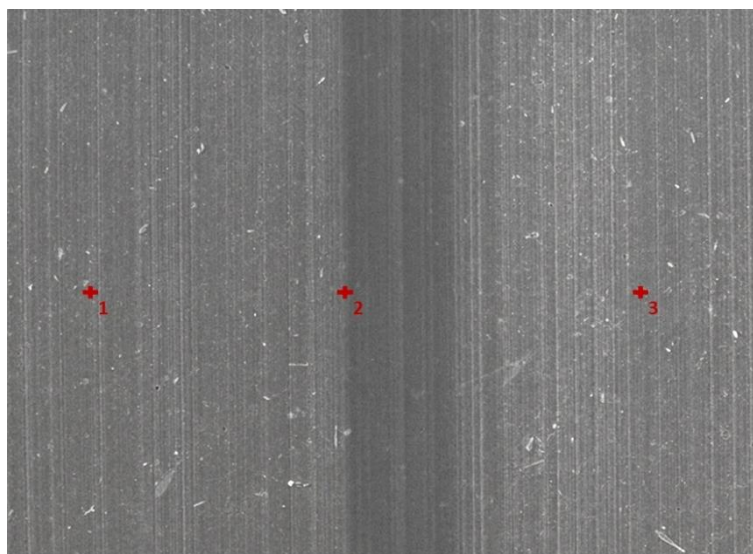
Figura 27 - Perfil da segunda trilha feita no revestimento TiCN.



Fonte: Autoria própria, 2026.

O revestimento de TiCN teve uma espessura máxima aferida em torno de 1,19 μm , conforme demonstrado na Figura 10. A Figura 27 apresenta o perfil da trilha obtida, na qual se observa um ponto de maior profundidade em torno de 1,3 μm . Dada a proximidade entre a medida de espessura e a profundidade da trilha, somada ao comportamento rugoso do canal de desgaste, não é possível afirmar com certeza que o substrato foi atingido durante o ensaio. Os dados de EDS presentes na Figura 28 e na Tabela 7 mostram apenas uma pequena variação nos teores dos elementos constituintes do revestimento.

Figura 28 - Dados de EDS da segunda trilha do revestimento TiCN.



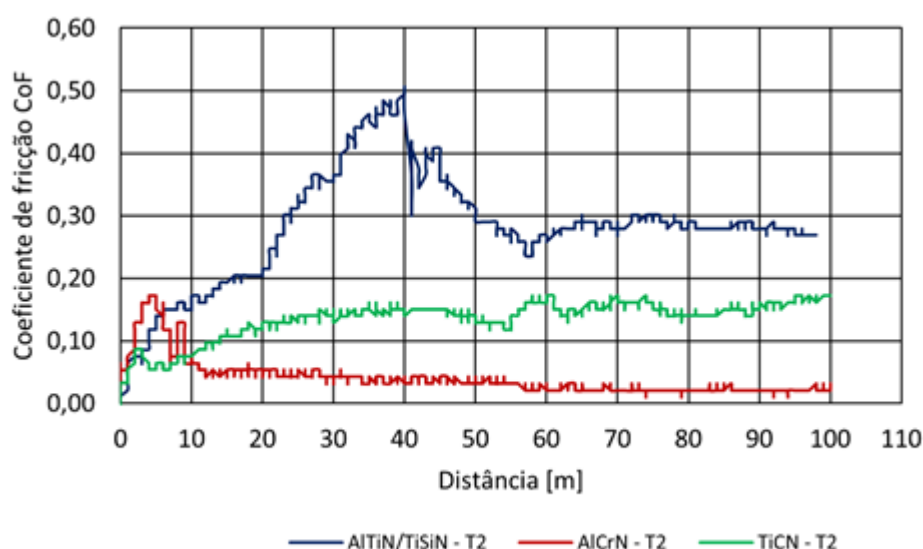
Autor: Autoria própria, 2026.

Tabela 7 - Dados de EDS da segunda trilha do revestimento TiCN.

Spectrum	N	Ti	W	C	Co	O	Outros	Total
Spectrum 1	9,8	60,1	15,6	13,3	1,2			100
Spectrum 2	8,3	54,9	16,1	11,8	0,7	7,9	0,3	100
Spectrum 3	8,6	58,4	17,7	13,9	1,2		0,3	100

Autor: Autoria própria, 2026.

Figura 29 - Coeficiente de atrito ao longo de 100 m de deslizamento sob uma carga normal de 25 N para inserts de metal duro revestidos com AlTiN/TiSiN, AlCrN e TiCN.



Autor: Autoria própria, 2026.

A Figura 29 exibe o comportamento do coeficiente de atrito (CoF) em função da distância de deslizamento para os três sistemas. Nota-se que o CoF do AlTiN/TiSiN se eleva gradativamente até atingir um valor máximo. Após esse pico, ocorre um declínio seguido de estabilização em patamares próximos a 0,3. Essa redução do atrito pode ser atribuída à formação de um tribofilme composto por óxidos complexos de alumínio e titânio induzidos pelo calor, conforme mencionado por Zhu et al. (2019) e Beake et al. (2017). A camada de transferência atua como um lubrificante sólido, facilitando o escorregamento entre o contracorpo de alumina e o inserto (Zhu et al., 2019; Beake et al., 2017). Tal mecanismo justifica a elevada resistência a altas temperaturas reportadas por Oerlikon Balzers (2026) para essa classe de revestimento. A formação dessas fases oxidadas estáveis protege a

superfície contra o desgaste adesivo severo e atenua o atrito à medida que a temperatura na zona de contato aumenta.

Já a curva de CoF do revestimento de AlCrN demonstra forte consonância à literatura. Conforme apontado por Mo e Zhu (2008), o comportamento inicial do AlCrN (até distâncias de 4 m a 10 m) possui caráter transicional — associado ao fenômeno de amaciamento —, no qual o atrito cresce até atingir um ápice para, em seguida, decair. No presente estudo, esse pico de transição ocorreu aos 5 m de ensaio. Após esse regime transiente, a queda e a estabilização do CoF podem estar atreladas à formação de um filme triboquímico de óxido de cromo (Cr_2O_3), o qual exerce papel lubrificante no contato, analogamente aos mecanismos protetivos discutidos para o sistema AlTiN/TiSiN.

Para o TiCN, o CoF, divergiu dos resultados obtidos para o AlCrN e o AlTiN/TiSiN. Para o TiCN, verifica-se apenas o estágio de amaciamento do revestimento seguido, por um estágio de estado estacionário, no qual a curva se torna suave e constante, conforme relatado por Cheng et al. (2010). Pressupõe-se que essa estabilização do atrito no TiCN ocorra devido à presença de carbono amorfo em sua estrutura, o qual promove a formação de um tribofilme lubrificante que impede o crescimento contínuo do atrito ao longo do ensaio.

Por fim, pode se dizer que o revestimento de AlTiN/TiSiN apresentou melhor desempenho, dentre os três, no quesito adesão ao substrato, fazendo a ressalva de que a espessura do AlCrN é muito menor do que a dos outros dois revestimentos testados. Já no quesito desgaste AlCrN possui melhor desempenho, com o destaque para o comportamento de atrito, que foi menor que os valores registrados para os outros dois revestimentos estudados.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho buscou caracterizar os revestimentos AlTiN/TiSiN, AlCrN e TiCN aplicados a um substrato de metal duro. A partir dos resultados, chegou-se às seguintes conclusões:

- A técnica de deposição física por arco catódico (arc PVD) demonstrou eficácia na obtenção de camadas uniformes, embora a presença de imperfeições superficiais tenha influenciado a topografia final. O revestimento TiCN apresentou os maiores índices de rugosidade ($S_a = 0,28 \mu\text{m}$ e $S_z = 5,42 \mu\text{m}$), enquanto o AlTiN/TiSiN obteve os menores valores ($S_a = 0,26 \mu\text{m}$ e $S_z = 4,46 \mu\text{m}$).
- Os ensaios de riscamento e indentação Rockwell C revelaram comportamentos distintos de adesão. O sistema AlTiN/TiSiN apresentou a maior carga crítica de falha (15 N), superando o AlCrN e o TiCN, que registraram falhas em patamares inferiores (7 a 10N). Já no teste Rockwell C, o AlCrN demonstrou um melhor desempenho inicial sob carga de 588 N (classe HF3), sem a presença de trincas circunferenciais observadas no TiCN. Contudo, sob a carga de 1471 N, todos os sistemas exibiram falhas severas (HF5/HF6), sendo que o AlTiN/TiSiN apresentou a menor área visual de delaminação.
- Nos revestimentos à base de alumínio (AlTiN/TiSiN e AlCrN) podem ter surgido de óxidos estáveis (Al_2O_3 e Cr_2O_3), durante o teste de pino-sobre-placa, que atuam como lubrificantes sólidos, reduzindo o CoF para patamares estáveis (aprox. 0,3 para AlTiN/TiSiN e 0,05 para AlCrN) após o período de amaciamento.
- A análise de EDS confirmou que o AlCrN manteve sua integridade estrutural no centro da trilha de desgaste, persistindo como barreira protetora mesmo após 100 m de deslizamento, ao contrário do AlTiN/TiSiN, no qual o substrato de metal duro foi exposto.
- Em suma, o revestimento AlTiN/TiSiN se destaca por sua superioridade em termos de adesão e menor rugosidade. Por outro lado, o AlCrN demonstrou uma resistência superior em contatos deslizantes prolongados, mantendo a camada protetora ativa por mais tempo.

REFERÊNCIAS

- ALLSOPP, D. N.; HUTCHINGS, I. M. Micro-scale abrasion and scratch response of PVD coatings at elevated temperatures. **Wear: An International Journal on the Science and Technology of Friction Lubrication and Wear**, v. 251, n. 1–12, p. 1308–1314, 2001.
- ALVES, Uéliton C. *et al.* Mechanical and tribological characterization of TiAlN/TiN and TiSiN/AlTiN coating systems for cutting tools. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 145, p. 522–535, 2025.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM G133**: Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear. West Conshohocken, PA: ASTM, 2016.
- BEAKE, B. D. *et al.* Elevated temperature repetitive micro-scratch testing of AlCrN, TiAlN and AlTiN PVD coatings. **International Journal of Refractory & Hard Metals**, v. 69, p. 215–226, 2017.
- BENTI, Hailu Gemechu; WOLDEYOHANNES, Abraham Debebe; YIGEZU, Belete Sirahbizu. Improving the efficiency of cutting tools through application of filtered Cathodic Vacuum Arc Deposition coating techniques: A review. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2022, p. 1–17, 2022.
- BULL, S. J.; BERASETEGUI, E. G. An overview of the potential of quantitative coating adhesion measurement by scratch testing. **Tribology International**, v. 39, n. 2, p. 99–114, 2006.
- CADENA, Natalia L. *et al.* Study of PVD AlCrN coating for reducing carbide cutting tool deterioration in the machining of titanium alloys. **Materials**, v. 6, n. 6, p. 2143–2154, 2013.
- CARREIRA, Luan Augusto de Souza *et al.* Surface integrity of machined AISI D2 steel and its effect on the adhesion of a PVD-AlCrN coating. **The International Journal, Advanced Manufacturing Technology**, v. 112, n. 9–10, p. 2705–2715, 2021.
- CHENG, Y. H. *et al.* Mechanical and tribological properties of nanocomposite TiSiN coatings. **Surface & Coatings Technology**, v. 204, n. 14, p. 2123–2129, 2010.
- CLAVER, Adrián *et al.* Improved adhesion and tribological properties of AlTiN-TiSiN coatings deposited by DCMS and HiPIMS on nitrided tool steels. **Coatings**, v. 11, n. 10, p. 1175, 2021.
- GROOVER, Mikell P. **Fundamentals of modern manufacturing**: Materials, processes, and systems. 7. ed. [S. l.]: Wiley, 2019.
- GRUPO OERLIKON. **Oerlikon Balzers lhe dá as boas-vindas**. Disponível em:

<https://www.oerlikon.com/balzers/br/br/>. Acesso em: 23 maio 2026.

GUPTA, Yashpal; MANOJ KUMAR, B. Venkata. ZrB₂–SiC composites for sliding wear contacts: Influence of SiC content and counterbody. **Ceramics International**, v. 48, n. 10, p. 14560–14567, 2022.

HE, Qianxi *et al.* Study of wear performance and tribological characterization of AlTiN PVD coatings with different Al/Ti ratios during ultra-high speed turning of stainless steel 304. **International Journal of Refractory & Hard Metals**, v. 96, art. 105488, p. 105488, 2021.

MO, J. L.; ZHU, M. H. Sliding tribological behavior of AlCrN coating. **Tribology International**, v. 41, n. 12, p. 1161–1168, 2008.

PANJAN, Peter *et al.* Review of growth defects in thin films prepared by PVD techniques. **Coatings**, v. 10, n. 5, p. 447, 2020.

SABADINI, Roberto C. **Investigação da aplicabilidade de insertos de metal duro revestidos no torneamento da liga Ti-15Mo**. 2025. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2025.

SLOW, Ping Chuan *et al.* Characterization of TiCN and TiCN/ZrN coatings for cutting tool application. **Ceramics International**, v. 39, n. 2, p. 1293–1298, 2013.

VIDAKIS, N.; ANTONIADIS, A.; BILALIS, N. The VDI 3198 indentation test evaluation of a reliable qualitative control for layered compounds. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 143–144, p. 481–485, 2003.

ZHU, Yebiao *et al.* Wear failure mechanism of TiSiN coating at elevated temperatures. **Applied Surface Science**, v. 487, p. 349–355, 2019.