

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE-FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**INFLUÊNCIA DA CAMADA DE COBERTURA DE FERRAMENTAS DE METAL
DURO NO FRESAMENTO DE TOPO DE UM AÇO PATINÁVEL**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

BRUNO SOARES LANER

RIO GRANDE, RS
2025

BRUNO SOARES LANER

**INFLUÊNCIA DA CAMADA DE COBERTURA DE FERRAMENTAS DE METAL
DURO NO FRESAMENTO DE TOPO DE UM AÇO PATINÁVEL**

Dissertação de mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal do Rio
Grande-FURG como requisito para obtenção
do título de “Mestre em Engenharia
Mecânica”

Orientador: Prof. Dr. Fábio Augusto Dornelles
do Amaral

RIO GRANDE, RS

2025

Ficha Catalográfica

L267i Laner, Bruno Soares.

Influência da camada de cobertura de ferramentas de metal duro no fresamento de topo de um aço patinável / Bruno Soares Laner. – 2025. 92 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Rio Grande/RS, 2025.

Orientador: Dr. Fábio Augusto Dornelles do Amaral.

1. Desgaste de ferramentas. 2. Fresamento. 3. Revestimento em ferramentas de corte. 4. Consumo de potência. 5. Rugosidade superficial. I. Amaral, Fábio Augusto Dornelles do. II. Título.

CDU 621.9

Catálogo na Fonte: Bibliotecária Sabrina Vaz da Silva CRB 10/2243



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
PPGEMec



Ata nº **03/2025** da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos dezessete dias do mês de março de dois mil e vinte e cinco, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, às oito horas, online via web conferência, a que se submeteu o mestrando **BRUNO SOARES LANER**, nacionalidade brasileiro, dissertação ligada a linha de pesquisa de Simulação e Controle de Processos de Fabricação, com o seguinte título: **INFLUÊNCIA DA CAMADA DE COBERTURA DE FERRAMENTAS DE METAL DURO NO FRESAMENTO DE TOPO DE UM AÇO PATINÁVEL**. Referendada pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores Doutores: Fábio Augusto Dornelles do Amaral, Luciano Volcanoglo Biehl e o convidado Rodrigo Jorge Macedo, sob a presidência do Professor Fábio Augusto Dornelles do Amaral. Analisando o trabalho, os Professores da Banca Examinadora o consideraram:

1. Fábio Augusto Dornelles do Amaral: APROVADO
2. Luciano Volcanoglo Biehl: APROVADO
3. Rodrigo Jorge Macedo: APROVADO

Foi concedido um prazo de 60 dias para o candidato efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora (anexo) e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. A ata foi lavrada e vai assinada pelos membros da Comissão.

Assinaturas:

Documento assinado digitalmente
gov.br **FABIO AUGUSTO DORNELLES DO AMARAL**
Data: 17/03/2025 10:41:02-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

1. _____
CPF: 905.700.220-53

Documento assinado digitalmente
gov.br **LUCIANO VOLCANOGLO BIEHL**
Data: 17/03/2025 09:52:42-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

2. _____
CPF: 575.195.100-00

Documento assinado digitalmente
gov.br **RODRIGO JORGE MACEDO**
Data: 17/03/2025 09:58:59-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

3. _____
CPF: 805.181.920-91

Documento assinado digitalmente
gov.br **BRUNO SOARES LANER**
Data: 17/03/2025 10:44:26-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Bruno Soares Laner: _____

AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradeço ao Professor Dr. Fábio Augusto Dornelles do Amaral pela orientação que me foi concebida de forma excepcional nos momentos em que mais precisei.

Aos amigos Cristiano Celente, Jorge Airton Badin de Oliveira e Thais Andrezza Passos, pelo companheirismo ao longo destes anos.

Aos professores que de uma forma ou de outra contribuíram para a realização deste trabalho através do conhecimento que me foi concebido ao longo deste caminho que percorri desde a minha profissionalização até minha graduação e até aqui.

A todos os colegas e amigos que ao longo desta jornada, me foram essenciais.

À FURG, por ser uma Universidade transformadora na vida de muitos que assim como eu, pautaram suas ações profissionais graças aos conhecimentos técnicos e morais adquiridos nesta instituição pública gratuita e de excelente qualidade.

E por fim, à minha esposa Bianca Swensson Pereira Laner, que com amor, sempre esteve ao meu lado, torcendo por mim e me incentivando na busca pelo conhecimento.

RESUMO

A usinagem é um setor fundamental da manufatura no Brasil e no mundo. Dada sua relevância, a otimização do uso de máquinas, equipamentos, ferramentas e insumos é essencial para melhorar o desempenho e reduzir custos nos processos produtivos. Com o desenvolvimento contínuo de novas tecnologias, máquinas e ferramentas, novos materiais também surgem, demandando estudos para avaliar sua usinabilidade. Este trabalho tem como objetivo contribuir para a usinagem de um novo material em fase de pré-lançamento comercial, auxiliando na seleção da ferramenta mais adequada. Para isso, foram realizados ensaios em uma fresadora universal com parâmetros fixos de usinagem: rotação de 1120 RPM, avanço de 100 mm/min, largura de corte de 50 mm e profundidade de corte de 1,0 mm. Foram testadas duas ferramentas de metal duro com camadas de cobertura distintas: uma delas com revestimento por deposição química a vapor (CVD) $\text{TiCN}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$, e outra com revestimento por deposição física a vapor (PVD) TiAlSiN . Durante os ensaios, monitoraram-se a formação do cavaco, o consumo de potência e a rugosidade média superficial, permitindo a comparação entre as ferramentas. Além disso, os desgastes foram avaliados a cada 10 minutos de usinagem, com análises complementares em Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS). Do ponto de vista da rugosidade superficial, o menor valor apresentado pela ferramenta CVD foi de $0,19\text{ }\mu\text{m}$, enquanto menor valor apresentado pela ferramenta PVD foi de $0,21\text{ }\mu\text{m}$. As amostras de cavaco não apresentaram variações significativas ao longo dos testes. A meia vida útil ($VB_{Bm\acute{a}x}=300\mu\text{m}$) da ferramenta CVD foi atingida aos 100 minutos de usinagem. Os resultados obtidos em MEV apresentaram fenômenos de desgaste do tipo abrasivo e adesivo e oxidativo, para ambos os revestimentos. Os resultados indicaram que aos 80 minutos de usinagem, a ferramenta PVD sofreu 39,6% menos desgaste e consumiu 21,28% menos de potência.

Palavras-chave: Desgaste de Ferramentas, Fresamento, Revestimento em Ferramentas de Corte, Consumo de Potência, Rugosidade Superficial.

ABSTRACT

Machining is a fundamental sector of manufacturing in Brazil and worldwide. Given its relevance, optimizing the use of machines, equipment, tools, and consumables is essential to enhance performance and reduce production costs. With the continuous development of new technologies, machines, and tools, new materials also emerge, requiring studies to assess their machinability. This study aims to contribute to the machining of a new material in the pre-commercial launch phase, assisting in the selection of the most suitable tool. To achieve this, tests were conducted on a universal milling machine with fixed machining parameters: 1120 RPM spindle speed, 100 mm/min feed rate, 50 mm cutting width, and 1.0 mm depth of cut. Two carbide tools with different coatings were tested: one coated via Chemical Vapor Deposition (CVD) with $\text{TiCN}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$, and the other coated via Physical Vapor Deposition (PVD) with TiAlSiN . During the tests, chip formation, power consumption, and average surface roughness were monitored to compare tool performance. Additionally, wear was assessed every 10 minutes of machining, with complementary analyses performed using Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy Dispersive Spectroscopy (EDS). In terms of surface roughness, the lowest value recorded for the CVD tool was $0.19\text{ }\mu\text{m}$, while the PVD tool presented a minimum of $0.21\text{ }\mu\text{m}$. Chip samples showed no significant variations throughout the tests. The CVD tool reached its half-life ($VB_{Bmax}=300\mu\text{m}$) at 100 minutes of machining. SEM results revealed abrasive, adhesive, and oxidative wear phenomena for both coatings. The findings indicate that at 80 minutes of machining, the PVD tool exhibited 39.6% less wear and consumed 21.28% less power.

Keywords: Tool Wear, Milling, Cutting Tools Coatings, Power Consumption, Surface Roughness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo de desgaste analisado nas ferramentas.....	22
Figura 2 - Desgaste abrasivo PVD TiAlN.....	24
Figura 3 - Curva comportamental do desgaste em ferramentas.....	25
Figura 4 - Desgaste por adesão de cavacos	26
Figura 5 - Representação do mecanismo de desgaste por abrasão e adesão observado em MEV	27
Figura 6 - Desgaste de flanco em insertos	28
Figura 7 - Distribuição dos tipos de desgastes nas superfícies e arestas das ferramentas.....	29
Figura 8 - Relação entre tempo de usinagem e desgaste para diferentes lubrificantes.....	33
Figura 9 - Distribuição das camadas de revestimento	33
Figura 10 - Representação esquemática do desgaste de ferramentas	34
Figura 11 - Esquemática de ligação e instalação do equipamento Analisador de Rede	37
Figura 12 - Fluxograma do procedimento experimental.....	39
Figura 13 - Porta ferramenta utilizado nos ensaios	40
Figura 14 - Inserto CVD com tripla camada de cobertura.....	41
Figura 15 - Inserto PVD com única camada de cobertura	42
Figura 16 - Procedimento experimental no fresamento	43
Figura 17 - Procedimento experimental de Fresagem	44
Figura 18 – Analisador de rede Fluke 435 Série 2.....	45
Figura 19 - Amostra do material submetido ao ensaio de espectrometria	47
Figura 20 - Relação entre tempo de usinagem e desgaste	48
Figura 21 - Relação entre consumo de potência e desgaste.....	50
Figura 22 - Comparativo de desgaste das ferramentas (a)CVD e (b)PVD	53
Figura 23 - Relação entre rugosidade e tempo de usinagem	54
Figura 24 - Desgaste por Abrasão e Entalhe.....	56
Figura 25 - Aspecto do cavaco ao longo de 120 minutos	57
Figura 26 – Comparativo geral entre as ferramentas CVD e PVD.....	58
Figura 27 - EDS da ferramenta CVD 30 min.....	60

Figura 28 - Espectro do EDS da ferramenta CVD 30 min.....	61
Figura 29 - EDS da ferramenta CVD 60 min.....	63
Figura 30 - Espectro do EDS da ferramenta CVD 60 min.....	64
Figura 31 - EDS da ferramenta CVD 120 min.....	66
Figura 32 - Espectro do EDS da ferramenta CVD 120 min.....	67
Figura 33 - EDS da ferramenta PVD 30 min.....	69
Figura 34 - Espectro do EDS da ferramenta PVD 30 min.....	70
Figura 35 - EDS da ferramenta PVD 60 min.....	72
Figura 36 - Espectro do EDS da ferramenta PVD 60 min.....	73
Figura 37 - EDS da ferramenta PVD 120 min.....	75
Figura 38- Espectro do EDS da ferramenta PVD 120 min.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quadro resumo do procedimento experimental	43
Tabela 2 - Ensaio de dureza Vickers da amostra do material.....	46
Tabela 3 - Composição química do material patinável	47
Tabela 4 - Composição por EDS da ferramenta CVD 30 min.....	62
Tabela 5 - Composição por EDS da ferramenta CVD 60 min.....	65
Tabela 6 - Composição por EDS da ferramenta CVD 120 min.....	68
Tabela 7 - Composição por EDS da ferramenta PVD 30 min	71
Tabela 8 - Composição por EDS da ferramenta PVD 60min	74
Tabela 9 - Composição por EDS da ferramenta PVD 120min	77

LISTA DE ABREVIATURAS

AISI	American Iron and Steel Institute
µm	Micrometros
Ap	Profundidade de corte
ASTM	American Society for Testing and Materials
BUE	Gume postiço ou aresta postiça de corte
BUL	Superfície postiça
CBN	Nitreto de Boro cúbico
Cermet	Ferramenta de cerâmica e metal
CNC	Comando numérico computadorizado
CorTen	Corrosion Resistance
CP's	Corpos de prova
CVD	Deposição química a vapor
DIN	Instituto Alemão de Normalização
EDS	Espectroscopia de raios X por dispersão de energia
ESP	Espessura
f	Avanço
FURG	Universidade Federal de Rio Grande
fz	Avanço por dente
HB	Hardness Brinell
HRA	Hardness Rockwel A
HRC	Hardness Rockwel C
HSM	Fresamento de alta velocidade
HV	Hardness Vickers
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ISO	International Organization for Standardization
kgf	Quilograma força
LabSurf	Laboratório de Superfícies
LE	Tensão limite de escoamento
LN2	Nitrogênio líquido
LR	Tensão limite de ruptura
m	Metro

m/min	Metros por minuto
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
min	Minuto
mm/volta	Milímetro por volta
mm/z	Milímetro por dente
MPa	Mega Pascal
MQL	Mínima quantidade de lubrificante
MVF	Microscopia de variação de foco
PIB	Produto Interno Bruto
PVD	Deposição física a vapor
SAE	American society of automotive engineers
VB_B	Desgaste de flanco médio
$VB_{Bmáx}$	Desgaste de flanco máximo
Vc	Velocidade de corte
W	Potência ativa
Ws	Weathering Steel

LISTA DE SÍMBOLOS

Al	Alumínio
C	Carbono
Cr	Cromo
Cu	Cobre
Fe	Ferro
Mn	Manganês
Nb	Nióbio
Ni	Níquel
P	Fósforo
S	Enxofre
Si	Silício
Ti	Titânio
W	Tungstênio
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
AlCrN	Nitreto de alumínio e cromo
CO ₂	Dióxido de carbono
Ti-6Al-4V	Liga de Titânio alfa-beta
TiAlCrN	Nitreto de titânio, alumínio e cromo
TiAlN	Nitreto de titânio e alumínio
TiAlSiN	Nitreto de titânio alumínio e silício
TiCN	Carbonitreto de titânio
WC	Carboneto de Tungstênio
CrN	Nitreto de cromo
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro
TiN	Nitreto de titânio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos gerais	18
1.2	Objetivos específicos	18
2	ESTADO DA ARTE	19
2.1	Aços patináveis	19
2.2	Parâmetros de usinagem em aços de elevada resistência	20
2.3	Desgaste em ferramentas	21
2.3.1	Desgaste por abrasão	24
2.3.2	Desgaste por adesão	26
2.3.3	Desgaste por difusão	27
2.3.4	Desgaste por oxidação	28
2.4	Coberturas das ferramentas.....	29
2.5	Lubri-refrigeração das ferramentas	30
2.6	Vida da ferramenta.....	32
2.7	Rugosidade superficial	35
2.8	Consumo de potência na usinagem	36
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	38
3.1	Materiais.....	38
3.2	Máquinas e equipamentos	38
3.3	Fluxograma do procedimento experimental	38
3.4	Ensaio de dureza do aço patinável	39
3.5	Ensaio de tração	39
3.6	Seleção do suporte/ferramenta de corte	40
3.7	Corpos de prova.....	42
3.8	Ensaio de usinagem	44
3.9	Potência Consumida	45

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1	Ensaio de dureza	46
4.2	Espectrometria de emissão óptica por centelha.....	46
4.3	Relação entre desgaste e tempo de usinagem	47
4.4	Relação entre potência consumida e desgaste.....	50
4.5	Desgaste observado em microscópio	51
4.6	Relação entre rugosidade e desgaste.....	54
4.7	Mecanismos de desgaste.....	55
4.8	Formato do cavaco.....	57
4.9	Análise microscópica de desgaste em MEV	58
4.10	Análise do desgaste por EDS das ferramentas CVD	60
4.11	Análise do desgaste por EDS das ferramentas PVD	69
5	CONCLUSÕES	78
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	80
7	REFERÊNCIAS	81
7.1	Referências nominais.....	81
7.2	Referências por extrato	87
7.3	Referências por qualis.....	87
7.4	Referências por data dos artigos	88
8	APÊNDICE - RELATÓRIO COMPLETO DOS ENSAIOS.....	89

1 INTRODUÇÃO

A usinagem de metais é um processo de fabricação amplamente utilizado na indústria para produzir peças com alta precisão e acabamento superficial de qualidade. Esse processo é fundamental para a produção de componentes em setores como o automotivo, aeroespacial, de máquinas e equipamentos, entre outros. No entanto, a usinagem de metais envolve desafios significativos, especialmente relacionados ao desgaste das ferramentas de corte, o que impacta diretamente os custos de produção.

O desgaste das ferramentas de usinagem é um fator crítico que influencia a eficiência do processo de manufatura. Segundo Trent e Wright (2000), o desgaste das ferramentas pode ser classificado em diferentes tipos, como desgaste por abrasão, adesão, difusão e oxidação, cada um influenciado por parâmetros específicos de usinagem. Esses desgastes não apenas reduzem a vida útil das ferramentas, mas também afetam a qualidade das peças usinadas e aumentam os custos operacionais devido à necessidade de substituição frequente das ferramentas e ajustes no processo. Além disso, o uso de ferramentas desgastadas pode levar a uma maior geração de calor, vibrações indesejadas e, eventualmente, falhas na produção.

Na economia global atual, a competitividade da indústria manufatureira depende significativamente da capacidade de otimizar processos produtivos, reduzindo custos e aumentando a eficiência. No Brasil, conforme dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE 2021), a indústria de metal mecânica responde por uma parcela de 12% do Produto Interno Bruto (PIB), ressaltando a importância de práticas produtivas eficientes e economicamente viáveis. Em um cenário de intensa competição internacional, a redução de custos operacionais é vital para a sustentabilidade e crescimento das empresas. A adoção de novas tecnologias e métodos de otimização na usinagem de metais pode representar uma vantagem competitiva significativa para as empresas brasileiras no cenário global.

A otimização dos parâmetros de usinagem pode gerar benefícios significativos, como o aumento da vida útil das ferramentas de corte, a redução do tempo de inatividade das máquinas e, por consequência, a diminuição dos custos de produção. Estudos recentes mostram que a escolha adequada de parâmetros como velocidade de corte, avanço e profundidade de corte contribui para a redução significativa do

desgaste das ferramentas e para a melhoria da eficiência do processo (Ferraresi, 2015; Sharma *et al.* (2021). Além disso, a adoção de estratégias de manutenção preditiva e o uso de materiais avançados para ferramentas de corte complementam os ganhos alcançados com a otimização dos parâmetros de usinagem.

Neste contexto, esta dissertação busca contribuir para o corpo de conhecimento existente na área de usinagem de metais, oferecendo insights práticos e teóricos que possam ser aplicados na indústria para a otimização de processos. A relevância da pesquisa é reforçada pela necessidade constante de inovação e melhoria contínua na manufatura, essenciais para a competitividade e sustentabilidade das empresas no mercado global.

1.1 Objetivos gerais

O objetivo desta dissertação é avaliar o desempenho de duas ferramentas de corte submetidas a condições idênticas de usinagem, a fim de comparar o comportamento de seus revestimentos buscando identificar as vantagens de cada ferramenta, incluindo sua vida útil, e determinar o revestimento mais eficiente em termos de resistência ao desgaste durante a usinagem de um aço patinável, conhecido como aço Corten (Corrosion Resistance) ou também conhecidos como aço para intemperismo (weathering steel), atualmente em fase de desenvolvimento pré-comercial.

1.2 Objetivos específicos

- Realizar ensaios de fresamento frontal a seco, utilizando duas ferramentas de corte com diferentes tipos de revestimentos.
- Avaliar o comportamento do cavaco durante os ensaios.
- Medir e analisar o consumo de potência elétrica durante o processo de usinagem para cada ferramenta.
- Comparar o desgaste das ferramentas utilizadas nos ensaios, identificando os principais mecanismos de falha.
- Monitorar a evolução da rugosidade superficial em função do desgaste das ferramentas e sua relação com o aumento do consumo de potência.
- Determinar a ferramenta com maior resistência ao desgaste e menor consumo energético.
- Avaliar os mecanismos de desgaste predominantes ao longo do processo.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 Aços patináveis

Os aços patináveis, também conhecidos como "weathering steels" (WS) ou aclimáveis, fazem parte da família dos metais ferrosos e foram inicialmente projetados para uso em estruturas gerais. Sua principal inovação foi a resistência aprimorada à corrosão atmosférica, resultado de sua composição química específica. Com o passar do tempo, esses aços passaram a ser amplamente empregados em projetos arquitetônicos, devido à sua durabilidade e à coloração única que adquirem com o tempo, causada pela formação de uma camada protetora de óxido. Um dos exemplos mais conhecidos comercialmente desses aços é o COR-TEN®, desenvolvido na década de 1930 pela United States Steel Corporation, inicialmente para a fabricação de vagões ferroviários (AMARDEEP STEEL CENTRE, 2023).

Classificados como aços de baixa liga, sua principal característica é a resistência à corrosão atmosférica, em vez de uma elevada resistência mecânica. Dentre os aços patináveis mais amplamente utilizados destacam-se os tipos ASTM A242 (COR-TEN A) e ASTM A588 (COR-TEN B), além de variações como o ASTM A606 (voltado para chapas) e os tipos ASTM A847 e ASTM A423 (para tubos).

Apesar de sua ampla utilização em setores industriais diversos, os aços patináveis raramente são submetidos a processos de usinagem, o que resulta em uma relativa escassez de literatura técnica sobre essa aplicação específica. A maioria das pesquisas sobre esses materiais se concentra em ensaios de corrosão, conformação e soldagem, uma vez que a resistência mecânica costuma ser menos relevante para suas funções usuais, e os desafios associados à usinagem são considerados mínimos. No entanto, o aço investigado neste trabalho chama a atenção justamente por sua elevada resistência mecânica e, ao ser submetido a processos de usinagem, diferencia-se significativamente de outros aços patináveis.

De acordo com as normas ASTM, o aço A588 deve exibir uma resistência mínima à tração de 50 ksi (345 MPa), enquanto o ASTM A242 exige limites mínimos de escoamento e ruptura de 290 MPa e 435 MPa, respectivamente. Dessa maneira, esses aços têm uma resistência à tração inferior a 500 MPa, bastante inferior aos níveis de resistência observados no material em estudo.

A composição química dos aços COR-TEN é cuidadosamente controlada, com pequenas quantidades de carbono e adições de elementos como cobre, cromo, níquel, fósforo, manganês e silício. Esses elementos desempenham um papel crucial na formação da pátina, uma camada superficial de óxido que age como barreira protetora, aumentando significativamente sua resistência à corrosão atmosférica (AMARDEEP STEEL CENTRE, 2023).

2.2 Parâmetros de usinagem em aços de elevada resistência

Bakar *et al.* (2023) investigaram a usinagem do aço AISI H13 utilizando os seguintes parâmetros: velocidade de corte de 200 mm/min, avanço de 0,03 mm/dente e profundidade de corte (a_p) de 0,1 mm. O estudo foi realizado em condições de refrigeração criogênica com nitrogênio líquido, com o objetivo de otimizar a eficiência do processo de corte e minimizar o desgaste das ferramentas. As dimensões dos corpos de prova (CP) foram de 125 x 100 x 50 mm, com dureza de 52 HRC (Hardness Rockwell C), e foi utilizada uma fresa de quatro canais, composta por carboneto cimentado sem revestimento.

Silveira *et al.* (2023) conduziram uma análise dos parâmetros utilizados no processo de fresagem por faceamento do aço AISI H13 em condição recozida, com dureza variando entre 170 e 186 HV. O estudo foi realizado empregando um porta-ferramenta de diâmetro 50 mm com um ângulo de ataque de 45°, em duas classes distintas de materiais de corte: metal duro e cermet. Os parâmetros de usinagem adotados incluíram uma velocidade de corte (V_c) de 150 m/min, avanço por rotação (f) de 0,1 mm/volta e profundidade de corte (a_p) de 1,0 mm. O resultado encontrado mostra uma superioridade para a ferramenta de Cermet, na faixa de 200 m/min com 0,5 mm/volta e 0,5 mm de profundidade de corte.

De acordo com Camuşcu e Aslan (2005), na usinagem do aço AISI D3 com dureza de 35 HRC ($\approx$ 340 HV), as ferramentas de carboneto revestido e cermet revestido não apresentaram um desempenho satisfatório em condições de usinagem em alta velocidade (HSM – High Speed Machining). Dessa forma, os autores recomendam o uso dessas ferramentas em velocidades de corte mais reduzidas. Além disso, destacam a importância da utilização de revestimentos multicamadas, que devem ser priorizados na usinagem de aços de elevada resistência. Os ensaios foram

conduzidos com um único inserto montado no suporte por vez, eliminando qualquer influência de outros insertos nos resultados.

Zhang *et al.* (2023) conduziram um estudo sobre corte e rugosidade superficial no fresamento a seco em alta velocidade do aço 30CrMnSiNi2A, utilizando insertos revestidos por CVD (TiCN) e PVD (TiAlN). Os ensaios foram realizados com velocidades de corte que variaram de 50 a 1100 m/min, abrangendo uma ampla faixa operacional. Velocidades de corte superiores a 500 m/min foram classificadas como fresamento em alta velocidade (HSM). Para os testes, os insertos tinham 12 mm de aresta e 4,76 mm de espessura, enquanto a profundidade de corte (a_p) foi mantida em 0,3 mm. A largura de corte (a_e) variou entre 4 mm e 16 mm, com avanços por dente (f_z) na faixa de 0,06 a 0,24 mm/z.

Kivak (2014) conduziu uma pesquisa detalhada sobre o fresamento do aço Hadfield, utilizando duas ferramentas de corte de metal duro com diferentes tipos de revestimento. A primeira ferramenta utilizada foi revestida por PVD (TiAlN), modelo GC1020, apresentando uma dureza de 1600 HV, enquanto a segunda ferramenta foi revestida por CVD (TiCN+Al₂O₃), modelo GC3040, com dureza de 1350 HV. O experimento foi realizado sob condições de usinagem com velocidades de corte variando entre 90 e 150 m/min e avanços entre 0,09 e 0,15 mm/volta, mantendo-se constante a profundidade de corte (a_p) em 0,5 mm. Os resultados obtidos indicaram que a ferramenta com revestimento CVD apresentou um desempenho superior em termos de vida útil e qualidade do corte, levando o autor a recomendá-la para a usinagem do aço Hadfield, material que se destaca por conter altos teores de carbono e manganês. Este tipo de aço, inicialmente com dureza em torno de 200 HB $\approx$ 210 HV, apresenta um significativo aumento de dureza superficial quando submetido a trabalho a frio, podendo alcançar até 650 HB $\approx$ 690 HV. Os corpos de prova utilizados no experimento tinham dimensões de 100 x 50 x 14 mm, e o suporte de fixação das ferramentas possuía 20 mm de diâmetro, com capacidade para acomodar dois insertos de corte. Contudo, apenas um inserto foi utilizado em cada operação, a fim de eliminar a influência de múltiplos gumes de corte durante o processo.

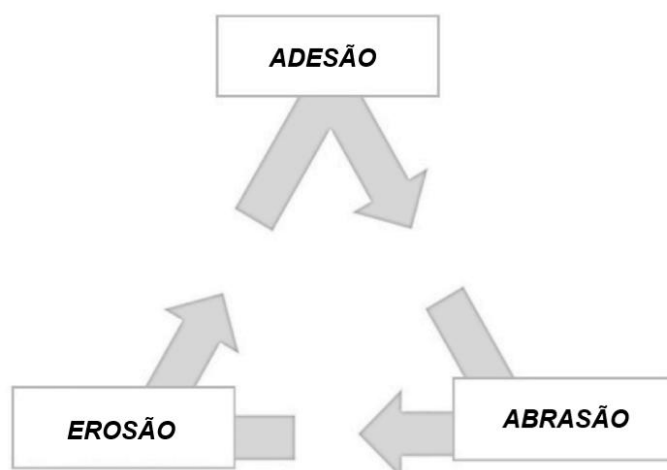
2.3 Desgaste em ferramentas

Boing, Oliveira e Schroeter (2020) avaliaram o desgaste de ferramentas de metal duro com revestimentos em nitreto de alumínio e titânio (PVD) e com

revestimentos de tripla camada (CVD) compostos de carbonitreto de titânio (TiCN), óxido de alumínio (Al₂O₃) e nitreto de titânio (TiN) na usinagem do aço AISI 4340 temperado e revenido. Os mecanismos de desgaste foram analisados antes e após a falha, utilizando um microscópio de variação de foco (MVF) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os autores concluíram que, no caso das ferramentas revestidas por CVD, os mecanismos de desgaste incluem abrasão, formação de trincas, delaminação, descolamento entre camadas e lascamento. Por outro lado, a falha nas ferramentas com revestimento PVD está associada à abrasão, altas deformações na aresta de corte, nucleação de trincas e descamamento do revestimento.

Sousa *et al.* (2021) compararam o desempenho de duas ferramentas PVD, uma revestida com nitreto de titânio alumínio (TiAlN) e a outra com nitreto de titânio alumínio silício (TiAlSiN), utilizando o aço ferramenta W1.2711, que apresenta dureza de 376 HB $\approx$ 393 HV e limite de escoamento de 1045 Megapascals (Mpa) (INDUSTEEL, 2023). Os experimentos variaram a velocidade de avanço e a largura de corte. O revestimento TiAlSiN apresentou menor taxa de desgaste e rugosidade superficial inferior, com base na norma DIN EN ISO 4288/ASME B46.1. O desgaste foi medido após cada teste, sendo os mecanismos principais adesão, abrasão e erosão formando um ciclo conforme Figura 1.

Figura 1 - Ciclo de desgaste analisado nas ferramentas.



Fonte: Adaptado de Sousa *et al.* (2021)

O estudo de Zhang *et al.* (2024) investigou o desgaste de ferramentas e as características de corte no fresamento de superligas de níquel obtidas por metalurgia

do pó, utilizando diversos revestimentos de ferramentas. Foram analisados os revestimentos de Nitreto de titânio alumínio e cromo (TiAlCrN), Nitreto de titânio alumínio (TiAlN) e Nitreto de titânio alumínio e silício (TiAlSiN), com foco em sua influência no desgaste das ferramentas e na integridade superficial das peças usinadas. A pesquisa também avaliou os mecanismos de desgaste predominantes por meio de análise com microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva (EDS), revelando que o desgaste adesivo foi o principal mecanismo identificado.

Yaqoob *et al.* (2024) destacam que a ferramenta CVD apresentou um desgaste mais progressivo e uma maior vida útil em comparação à ferramenta PVD, mesmo com parâmetros de corte idênticos na usinagem de aço de alta resistência. A ferramenta revestida por CVD demonstrou uma vida útil mais longa, de 14,75 minutos, enquanto a ferramenta revestida por PVD atingiu o fim de sua vida útil em 10,08 minutos. Ambos os experimentos foram conduzidos com os mesmos parâmetros: velocidade de corte de 300 m/min e avanço de 0,05 mm/volta. A profundidade de corte foi considerada a variável de menor influência. Observou-se que a ferramenta CVD apresentou um desgaste progressivo mais controlado, enquanto o desgaste da ferramenta PVD foi acelerado com o aumento do avanço para 0,1 mm/volta e 0,15 mm/volta. Além disso, as durezas iniciais dos revestimentos foram verificadas como 93 HRA para a ferramenta PVD e 90,5 HRA para a ferramenta CVD, ambas com camadas superficiais de carbonitreto de titânio (TiCN).

O estudo conduzido por Akgün, Özlü e Kara (2023) comparou o desempenho de ferramentas de corte com revestimentos PVD-TiN (nitreto de titânio) e CVD-Al₂O₃ (óxido de alumínio) no torneamento a seco do aço AISI H13. Durante o experimento, os autores avaliaram parâmetros como rugosidade superficial, força de corte e temperatura de trabalho. Concluíram que a força de corte, a rugosidade superficial e a temperatura de corte foram de 10% a 15% menores ao utilizar ferramentas revestidas com PVD em comparação às ferramentas revestidas com CVD. O teste foi realizado com velocidades de corte entre 120 e 300 m/min, avanços de 0,12 a 0,24 mm/volta e profundidade de corte de 0,6 mm. A abrasão foi o principal mecanismo de desgaste observado. As ferramentas revestidas com TiN apresentaram maior resistência ao desgaste de flanco (V_b), com espessura de camada variando de 2 a 6 μm , enquanto o revestimento de Al₂O₃ tinha espessura de 5 a 10 μm . Assim, concluiu-

se que as ferramentas revestidas com TiN superaram as revestidas com Al₂O₃ em termos de resistência ao desgaste.

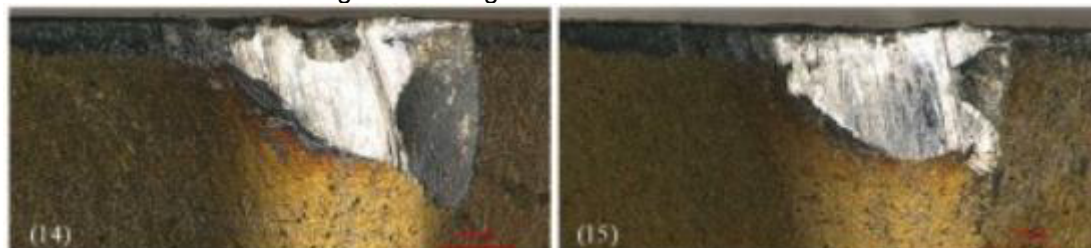
De acordo com a literatura, o desgaste das ferramentas de usinagem pode ocorrer por pelo menos cinco mecanismos distintos: abrasão, adesão, oxidação, erosão e corrosão. No entanto, neste estudo, considerou-se que o desgaste por corrosão não seria um fator relevante, uma vez que pesquisas anteriores indicam que esse fenômeno está diretamente associado ao uso de lubrificantes durante a usinagem. Como os ensaios deste trabalho foram conduzidos a seco, a corrosão não foi considerada.

Dessa forma, a revisão bibliográfica concentrou-se exclusivamente nos mecanismos de desgaste mais relevantes para as condições experimentais adotadas: abrasão (associada ao atrito), adesão (associada à aderência, influenciada por temperatura e pressão), difusão (relacionada a altas temperaturas e pressões), e oxidação (decorrente da formação de óxidos devido à reação química com o oxigênio).

2.3.1 Desgaste por abrasão

Em um estudo sobre o desgaste de ferramentas na usinagem a seco por fresamento da superliga GH4169, foram realizados 45 experimentos utilizando ferramentas de carboneto revestidas com PVD-TiAlN. O desgaste no estágio mais crítico foi analisado com o uso de microscopia eletrônica de varredura (MEV), possibilitando uma compreensão aprofundada dos mecanismos envolvidos. Os resultados demonstraram a predominância do desgaste abrasivo severo e do desgaste adesivo, acompanhados por uma taxa acelerada de desgaste, aumento da força de corte e da corrente do motor. Além disso, foram identificados desgastes adesivo, oxidativo e rupturas nas ferramentas, com vestígios de ferro, cromo e alumínio no flanco, evidenciando intensos processos de adesão e oxidação conforme a Figura 2 (LIANG et al., 2023).

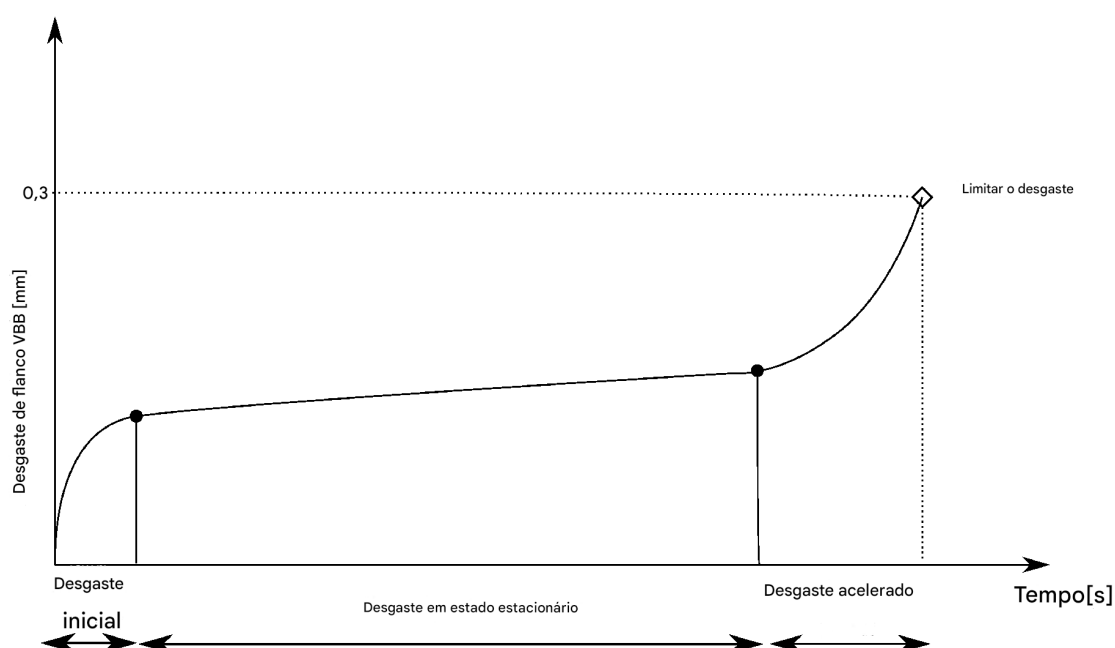
Figura 2 - Desgaste abrasivo PVD TiAlN



Fonte: LIANG et al., 2023

Alguns autores observaram uma fase mais duradoura no ciclo de desgaste de flanco de ferramentas em se tratando de abrasão. De acordo com Colantonio et al. (2021) observa-se que o desgaste ocorre de forma não linear, apresentando um estágio de maior resistência a abrasão, como se o desgaste acontecesse de forma mais lenta no período intermediário de tempo. Também é importante observar que o desgaste tanto no início quanto no final do processo de vida útil da ferramenta ocorre de forma mais abrupta, como descrito na Figura 3.

Figura 3 - Curva comportamental do desgaste em ferramentas



Fonte: Adaptado de Colantonio et al. (2021)

Wang et al. (2024) investigaram os efeitos do desgaste em fresas de topo durante a usinagem lateral da superliga GH4169D sob vibração ultrassônica longitudinal. O material, conhecido pela difícil usinagem, foi avaliado por métodos convencionais e assistidos por vibração ultrassônica. Os resultados indicaram que a vibração reduziu o esforço de corte, aumentou a vida útil da ferramenta em 33% e minimizou a formação de gume postigo, além de reduzir o desgaste abrasivo, prevalecendo os mecanismos de desgaste adesivo e oxidativo.

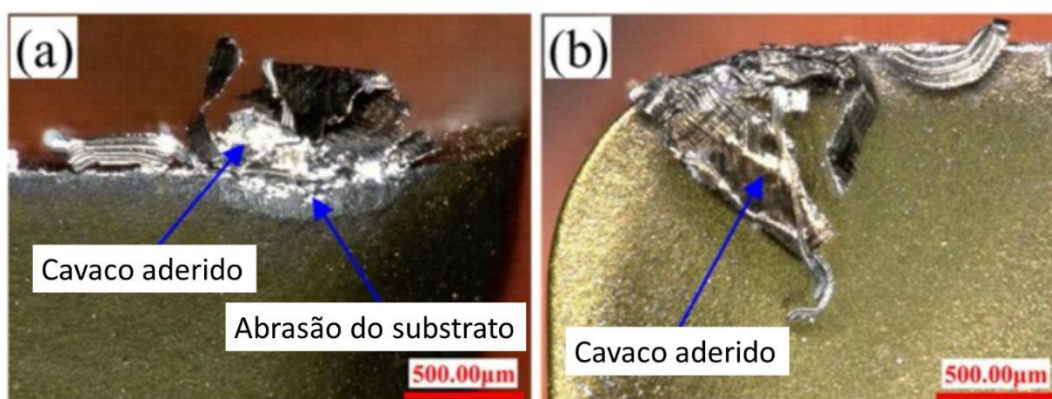
Sun et al. (2024) investigaram o mecanismo de desgaste durante o fresamento robótico de material plástico reforçado com fibra de vidro. Os resultados indicaram a

predominância de desgaste adesivo, abrasivo, formação de gume postiço e lascamento, sendo o desgaste abrasivo mais evidente na região do flanco, causado pelo atrito. Velocidades de corte elevadas e avanços reduzidos intensificaram o desgaste de flanco, enquanto velocidades de corte mais baixas, combinadas com avanços mais altos, promoveram desgaste na forma de crateras, adesão e lascamento.

2.3.2 Desgaste por adesão

Bai et al. (2021) conduziram experimentos para avaliar a usinabilidade de aço maraging (18Ni300), produzido por manufatura aditiva sem tratamento térmico, por meio de fresamento para aprimorar o acabamento superficial. O material possui alta resistência (2200 MPa de tensão última) e dureza aproximada de 650 HV. Foram analisados parâmetros como microdureza, força de corte, rugosidade, desgaste e formação de cavacos. Observou-se que o tratamento de envelhecimento aumentou a dureza do material, resultando em maior força de corte e desgaste, além de causar adesão na superfície da ferramenta na formação de cavacos. Na Figura 4a (vista lateral) e 4b (vista superior), o cavaco se apresenta aderido à superfície da ferramenta que apresenta também desgaste por abrasão devido ao aumento do atrito, e por consequência, aumento da temperatura na região do flanco, reduzindo a vida útil da ferramenta.

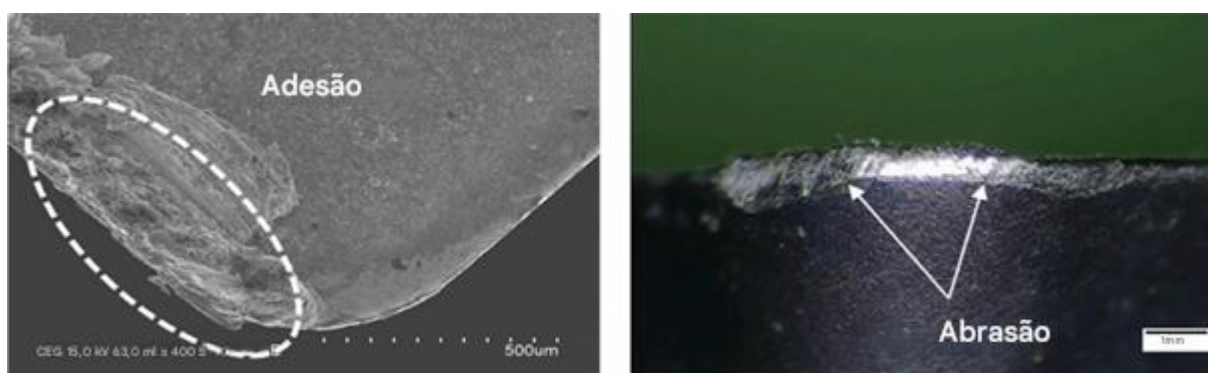
Figura 4 - Desgaste por adesão de cavacos



Fonte: Adaptado de Bai et al. (2021)

Ross et al. (2021) realizaram um estudo de lubrificação híbrida na usinagem de uma liga à base de níquel. Os resultados mostraram que a otimização ocorreu com uma velocidade de corte de 60 m/min e avanço de 0,04 mm/volta. Os autores concluíram que, ao utilizar CO_2 associado ao MQL, o desgaste de flanco foi atenuado, sendo os mecanismos de adesão e abrasão predominantes em todos os tipos de lubrificação avaliados utilizando os mesmos parâmetros. A Figura 5 apresenta os mecanismos de desgaste obtidos através de microscópio eletrônico de varredura.

Figura 5 - Representação do mecanismo de desgaste por abrasão e adesão observado em MEV

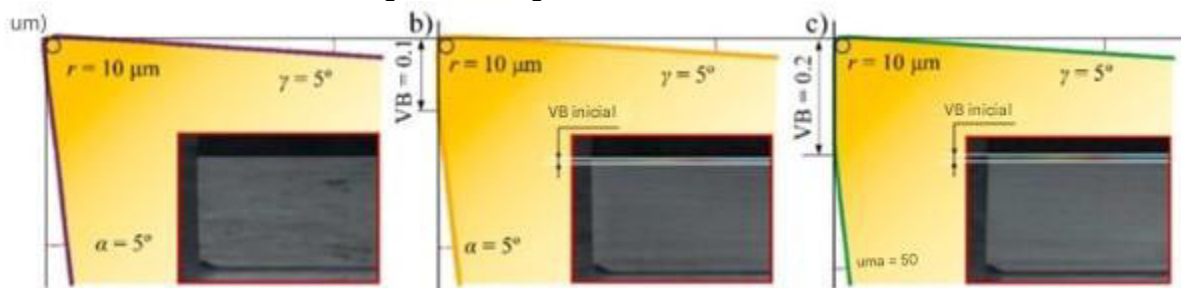


Fonte: Adaptado de Ross et al. (2021)

2.3.3 Desgaste por difusão

Na investigação realizada por Liu et al. (2022), foram analisados os impactos do desgaste de flanco na usinagem da liga de titânio Ti6Al4V, considerando diferentes estratégias de lubrificação. O estudo envolveu a preparação prévia das ferramentas, com o intuito de simular condições de desgaste inicial e avaliar seus efeitos no processo de usinagem. Foram utilizadas três ferramentas distintas: uma nova, $VB_B=0$ (sem desgaste de flanco) e duas com desgastes (VB_B) de 0,1 mm e 0,2 mm, respectivamente, apresentadas na Figura 6.

Figura 6 - Desgaste de flanco em insertos



Fonte: Adaptado de Liu et al. (2022)

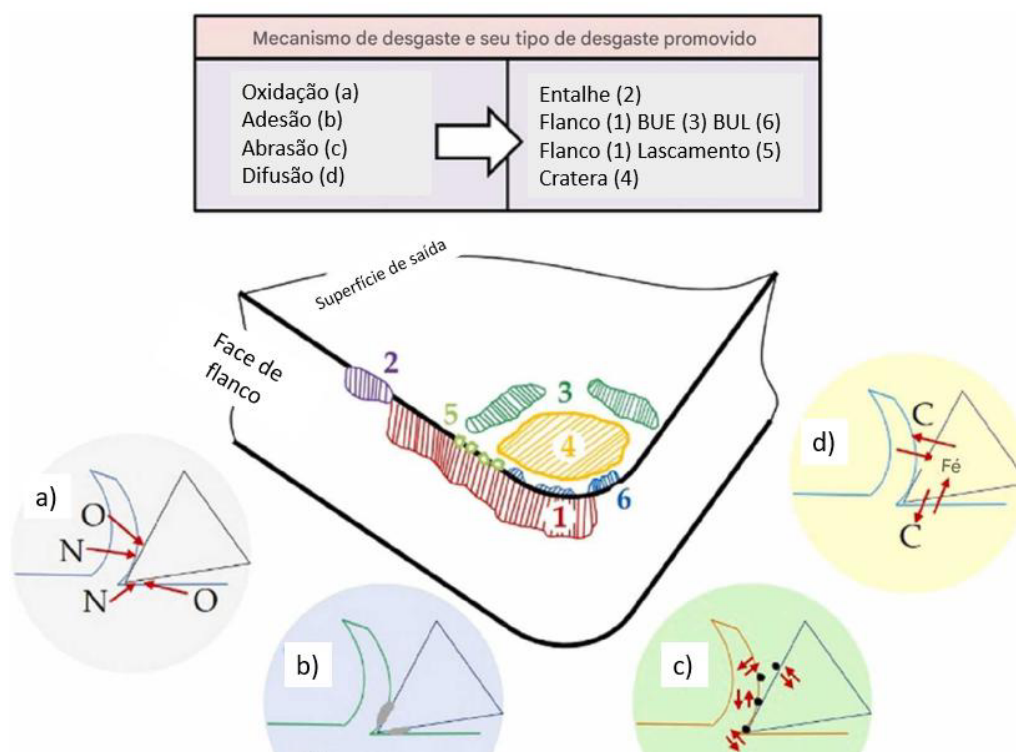
A literatura aponta que o limite de vida útil da ferramenta é atingido quando o desgaste de flanco médio VB_B alcança 0,3 mm ou quando algum ponto atinge 0,6 mm ($VB_B máx$). Para cada uma dessas condições iniciais, foram testados três métodos de lubrificação: a seco, por inundação e criogênica (utilizando nitrogênio líquido), com duas repetições para cada combinação experimental. Os autores identificaram que o desgaste por difusão é o mecanismo predominante durante a usinagem de ligas de titânio, especialmente em ferramentas não revestidas, devido às altas temperaturas e pressões envolvidas no processo. Entre os desafios enfrentados, a formação de gumes postigos foi destacada como o principal problema. Nesse contexto, a lubrificação criogênica demonstrou ser a técnica mais eficaz para mitigar a formação desses gumes e melhorar o desempenho do processo de usinagem.

2.3.4 Desgaste por oxidação

Liang et al. (2023) estudaram a morfologia e os mecanismos de desgaste de ferramentas de carboneto revestidas com TiAlN-PVD durante a usinagem da superliga GH4169. Identificaram desgaste oxidativo por meio de análises EDS, além de desgaste abrasivo e adesivo. Foi constatada a presença de elementos como ferro, cromo e alumínio na superfície da ferramenta, bem como óxidos como Al_2O_3 e Fe_2O_3 .

Gupta et al. (2022) analisaram os padrões de desgaste de ferramentas durante a usinagem de uma liga de titânio Ti-3Al-2.5V grau 9, sob refrigeração híbrida. Identificaram o mecanismo de desgaste oxidativo na região 2 (Figura 7), evidenciado pela presença de oxigênio e nitrogênio, especialmente durante a usinagem a seco.

Figura 7 - Distribuição dos tipos de desgastes nas superfícies e arestas das ferramentas



Fonte: Adaptado de Gupta et al. (2022)

2.4 Coberturas das ferramentas

Sharma e Gupta (2019) investigaram o desempenho de ferramentas de metal duro revestidas e não revestidas durante a usinagem a seco do aço inoxidável 304, destacando a influência significativa do revestimento na redução do desgaste e na melhoria da qualidade da superfície usinada. O estudo revelou que as ferramentas revestidas apresentaram uma vida útil até 40% superior às não revestidas, graças à redução do desgaste abrasivo e adesivo proporcionada pela barreira térmica do revestimento, que minimiza os efeitos de altas temperaturas e reduz o atrito na interface ferramenta-peça. Além disso, os autores observaram que parâmetros como velocidade de corte e avanço desempenham um papel crucial na integridade superficial e na vida útil da ferramenta, tornando a seleção adequada desses fatores essencial para a eficiência do processo.

As camadas de cobertura das pastilhas de metal duro possuem características específicas que influenciam seu desempenho. Segundo Diniz et al. (2014), a espessura total dessas camadas varia de 2 a 12 μm , influenciando diretamente a resistência ao desgaste. Camadas mais espessas aumentam essa resistência, mas

reduzem a tenacidade da ferramenta, elevando a probabilidade de lascamento das arestas.

O óxido de alumínio (Al_2O_3) é fundamental para garantir estabilidade térmica em temperaturas elevadas, devido à sua baixa condutividade térmica e elevada dureza a quente. Além disso, apresenta alta resistência à abrasão, elevada resistência à oxidação e grande estabilidade química na presença de ferro. Essa camada é essencial para minimizar o desgaste em forma de cratera nas ferramentas recobertas com metal duro.

O carboneto de titânio (TiC) e o carbonitreto de titânio (TiCN) possuem excelente resistência ao desgaste abrasivo e desempenham um papel crucial na adesão das camadas de revestimento ao núcleo de metal duro. Como há uma diferença significativa nos coeficientes de dilatação térmica entre o óxido de alumínio e o substrato de metal duro, esses compostos atuam como intermediários para melhorar a adesão entre essas camadas.

O nitreto de titânio (TiN) tem a função de reduzir o coeficiente de atrito entre a pastilha e o cavaco, além de ser mais estável quimicamente do que o carboneto de titânio. Isso resulta em menor tendência à difusão com aços, favorecendo um desempenho mais estável da ferramenta durante a usinagem.

O revestimento de nitreto de titânio-alumínio-silício (TiAlSiN) apresenta alta resistência ao desgaste em temperaturas elevadas, sendo indicado para operações severas de usinagem. A presença do silício contribui para o aumento da dureza e da resistência à oxidação, enquanto o alumínio melhora a estabilidade térmica. Essa combinação resulta em um revestimento com excelente desempenho, especialmente em condições de corte a seco e altas velocidades de usinagem (DINIZ et al., 2014).

2.5 Lubri-refrigeração das ferramentas

Saha, Deb e Bandyopadhyay (2021) investigaram o microfresamento de uma liga de titânio Ti-6Al-4V, analisando o desgaste de ferramentas de carboneto de tungstênio com cobalto revestidas com nitreto de titânio alumínio (TiAlN) com espessura de revestimento de 500 micrômetros. Os autores observaram um coeficiente de atrito elevado entre 0,97 e 0,84 na usinagem a seco, que se reduziu consideravelmente ao usar MQL (mínima quantidade de lubrificação). Verificou-se que o desgaste progredia rapidamente nos primeiros 15 mm de corte, mas desacelerava

após 70 mm, e que o uso de MQL, embora vantajoso para reduzir o desgaste, aumentava as tensões na ponta da ferramenta, tornando-a mais suscetível a lascamentos.

Race *et al.* (2021) investigaram alternativas sustentáveis no fresamento do aço SA516 Grau 70, focando na comparação entre o uso de refrigeração a seco, com emulsão (flood) e com mínima quantidade de lubrificação (MQL). No estudo, a aplicação de MQL e do fresamento a seco resultaram em menores gastos de energia e menores custos operacionais em comparação ao uso de grandes volumes de emulsões convencionais. Em termos de integridade superficial, as técnicas MQL e a seco também proporcionaram melhores resultados de desgaste da ferramenta e menor geração de resíduos.

Eraslan *et al.* (2021) investigaram a usinagem de dois materiais com propriedades mecânicas similares (limite de escoamento entre 700 e 800 MPa e limite de resistência entre 900 e 1000 MPa). Utilizando ferramentas de metal duro WC-Co revestidas com TiAlN, compararam as condições de usinagem a seco, com mínima quantidade de lubrificação (MQL) e com emulsão convencional de alta vazão. A pesquisa concluiu que a usinagem a seco proporcionou melhores resultados quanto à rugosidade da superfície, forças de corte e desgaste das ferramentas, independente do material usinado.

Kuntoglu (2022) realizou um estudo sobre a usinagem do aço Hardox 500, um material de baixa liga com estrutura martensítica e dureza de aproximadamente 48 HRC (ou 490 HV), investigando os efeitos de diferentes estratégias de resfriamento — mínima quantidade de lubrificação (MQL), emulsão convencional, spray criogênico com nitrogênio líquido (LN2) e usinagem a seco. Foram avaliados parâmetros como rugosidade superficial, desgaste da ferramenta e topografia da superfície. A usinagem do Hardox 500 mostrou-se desafiadora devido à elevada dureza, o que acelerou o desgaste da ferramenta em todas as condições, com uma leve vantagem para o resfriamento criogênico com LN2. Ainda assim, a usinagem a seco apresentou resultados superiores quando comparada ao resfriamento por emulsão.

Aslantas *et al.* (2024) avaliaram o impacto das condições de corte sobre o desgaste e os mecanismos de desgaste em microfresamento de uma liga de titânio Ti6Al4V, produzida por manufatura aditiva. Os autores analisaram o desempenho de diferentes fluidos de lubrificação e refrigeração, destacando que a liga Ti6Al4V possui

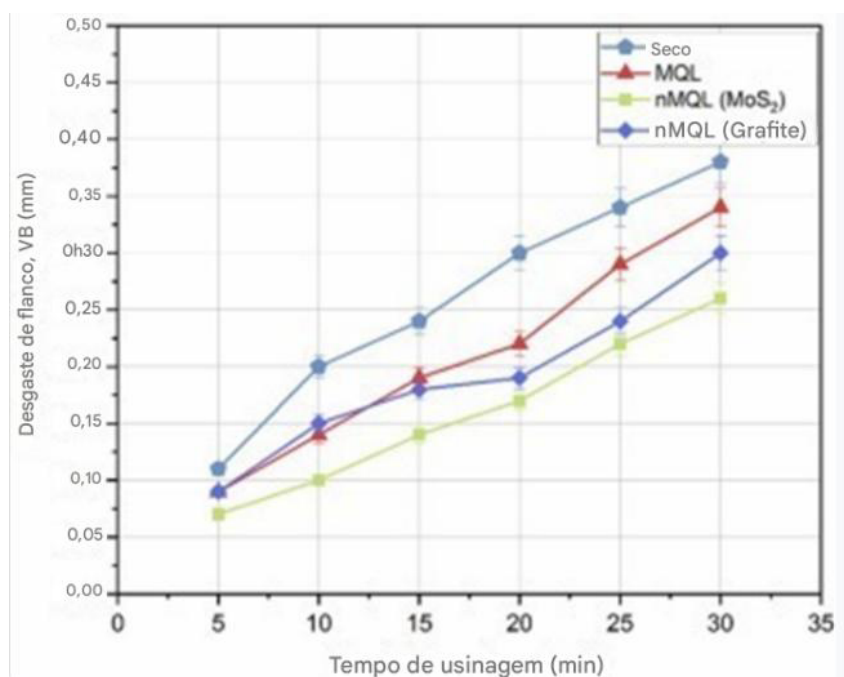
tensão de escoamento de 910 MPa e dureza de 320 HV, sendo usinada com uma ferramenta de metal duro revestida com dureza de 2.700 HV. O desgaste foi monitorado pela largura do canal usinado, observando-se que a redução da dimensão do rasgo refletia o desgaste da aresta cortante. Em termos de força de corte, a usinagem a seco apresentou os maiores valores, enquanto a condição MQL (mínima quantidade de lubrificante) resultou em menores forças. No entanto, a usinagem a seco revelou o melhor desempenho em relação à rugosidade superficial.

2.6 Vida da ferramenta

No estudo conduzido por Makhesana et al. (2023), foi analisada a influência de diferentes técnicas de lubrificação e refrigeração no desgaste de ferramentas durante a usinagem do Inconel 625, uma superliga amplamente utilizada devido às suas propriedades excepcionais de resistência à corrosão e altas temperaturas. O trabalho comparou quatro condições distintas: usinagem a seco, usinagem com MQL utilizando nitrogênio líquido puro, MQL com adição de nanopartículas de bissulfeto de molibdênio (MoS_2) e MQL com nanopartículas de grafite.

Os resultados evidenciaram que a usinagem a seco apresentou desempenho inferior em relação às demais condições avaliadas, principalmente em termos de desgaste de flanco (VB) e temperatura de corte. Durante os testes, os autores observaram valores de desgaste de flanco variando entre 350 e 400 μm após um tempo de usinagem de 30 minutos, para a condição a seco, indicando uma maior deterioração da ferramenta. Por outro lado, as técnicas de MQL com nanopartículas de MoS_2 e grafite mostraram benefícios significativos na redução do desgaste e melhoria das condições de usinagem, podendo ser evidenciados pela Figura 8.

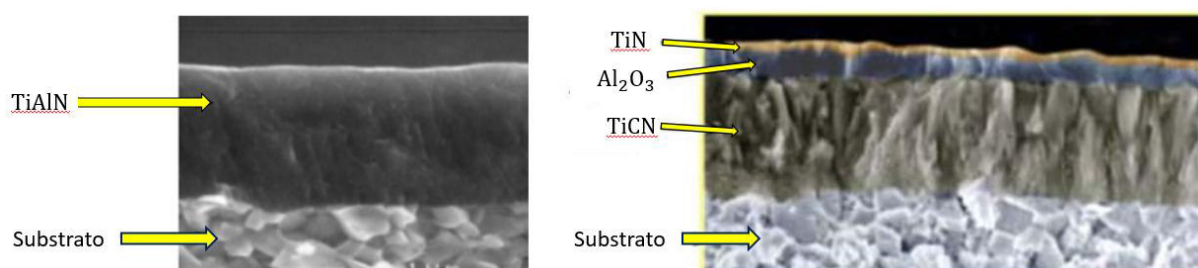
Figura 8 - Relação entre tempo de usinagem e desgaste para diferentes lubrificantes



Fonte: Adaptado Makhesana et al. (2023)

Yahya Isik (2010) avaliou o desgaste de ferramentas de corte revestidas por diferentes processos na usinagem do aço AISI 1050. Entre elas, uma ferramenta revestida pelo processo PVD com nitreto de titânio-alumínio (TiAlN), enquanto três ferramentas foram revestidas pelo processo CVD: TiC + TiCN + TiN, TiC + Al₂O₃ + TiN e TiN + TiCN + TiN, conforme observado Figura 9.

Figura 9 - Distribuição das camadas de revestimento

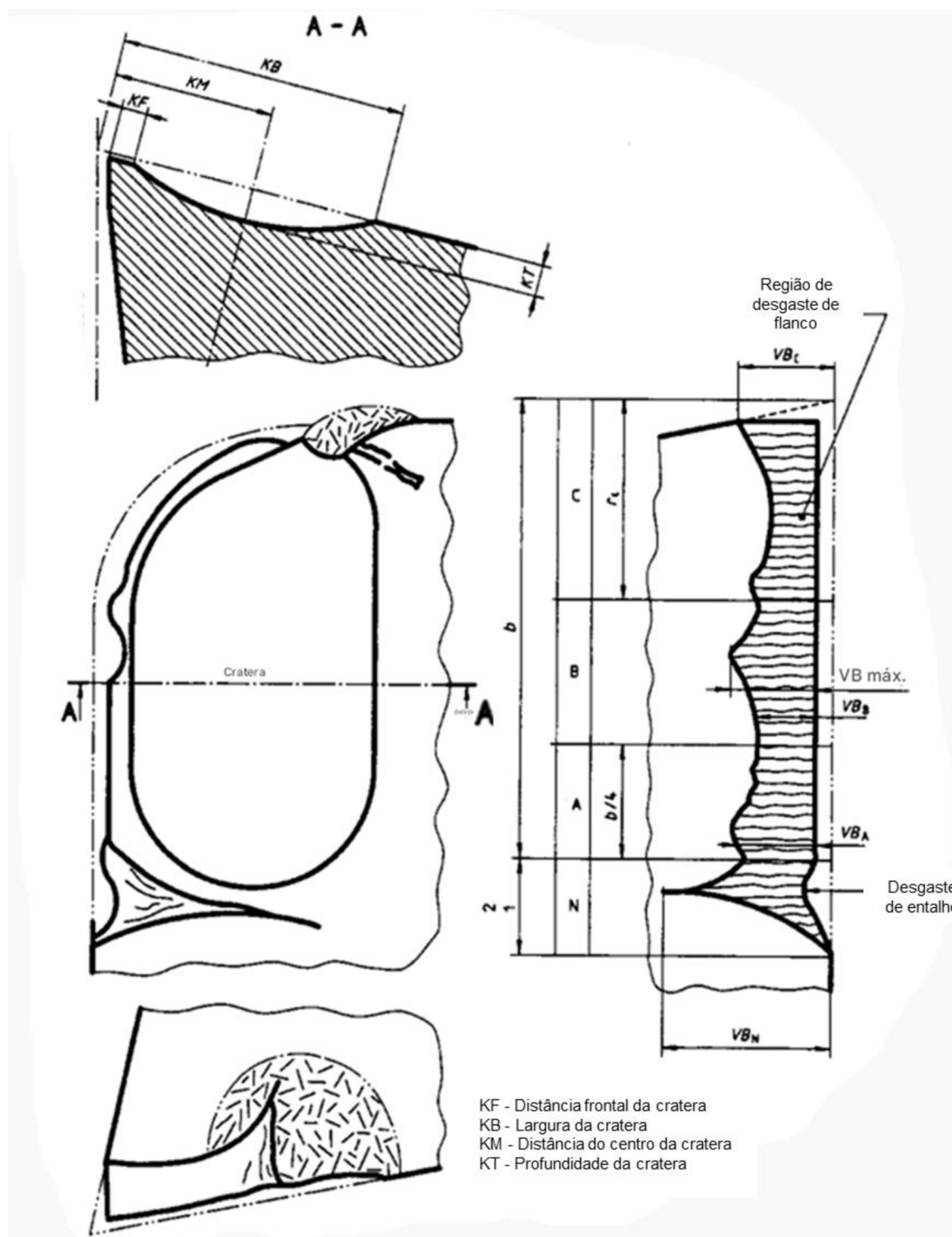


Fonte: Adaptado Yahya Isik (2010)

O estudo avaliou a vida útil, o esforço de corte e os custos associados a cada ferramenta, concluindo que o inserto revestido por PVD (TiAlN) apresentou desempenho superior em todos os aspectos analisados, destacando-se pela maior durabilidade, menor esforço de corte e maior eficiência econômica.

De acordo com a Norma ISO3685, o desgaste em ferramentas de usinagem pode ser definido segundo algumas dimensões e critérios. Essas dimensões podem ser obtidas através da Figura 10.

Figura 10 - Representação esquemática do desgaste de ferramentas



Fonte: Adaptado de ISO 3685 (1993)

A norma ISO 3685 (1993) fornece termos e definições específicos para cada tipo de desgaste e ajuda a padronizar a avaliação do desempenho das ferramentas de corte durante a usinagem. Esses critérios são importantes para a indústria de usinagem, pois permitem que engenheiros e operadores identifiquem quando uma ferramenta está desgastada e precisa ser substituída, contribuindo para uma usinagem eficiente e segura.

De acordo com a Norma ISO 3685 (1993), o fim da vida útil de uma ferramenta de metal duro pode ser indicado pelos critérios mais frequentemente utilizados, que são:

Nota: (ver Figura 10)

- a) Quando a média dos desgastes de flanco atingir 0,30 mm (VB_B);
- b) Quando em algum ponto do flanco o desgaste máximo adquirir valor equivalente a 0,60 mm ($VB_{B_{máx}}$);
- c) Quando ocorrer a *quebra da ferramenta*, denominada: “falha catastrófica”;
- d) Quando KF for menor que 0,02 mm;
- e) Quando a profundidade de cratera KT atingir determinado valor em função do avanço através da equação:

$$KT = 0,06 + 0,3f$$

Onde:

Avanço f (mm/rot)	0,25	0,4	0,63
Profundidade de cratera KT (mm)	0,14	0,18	0,25

2.7 Rugosidade superficial

A rugosidade média (R_a) é um parâmetro essencial na avaliação da qualidade superficial de peças usinadas, sendo fortemente influenciada por diversos fatores de usinagem. Ratnam (2017) destaca que o avanço, a velocidade de corte e a profundidade de corte são os principais determinantes da rugosidade da superfície. Dentre esses, o avanço se sobressai como o fator mais impactante, pois influencia

diretamente as marcas deixadas pela ferramenta na superfície usinada. Quando o avanço é elevado, a altura dos vales e picos da superfície aumenta, resultando em um maior valor de Ra.

Pesquisas recentes corroboram essa relação entre avanço e rugosidade. Reis et al. (2019) verificaram, ao analisar o torneamento do aço ABNT 4340 com insertos de metal duro, que um aumento do avanço em 2,5 vezes resultou em um incremento de cinco vezes no valor de Ra. Esse efeito se deve ao fato de que, com maior avanço, a profundidade das marcas de avanço na superfície torna-se mais pronunciada, prejudicando o acabamento superficial.

Estudos sobre a interação entre parâmetros de corte e rugosidade também evidenciam que a velocidade de corte possui influência relevante. Muhl (2019) observou que, ao trabalhar com baixos valores de avanço e altas velocidades de corte, a rugosidade média da superfície usinada apresentou uma redução significativa. Isso ocorre porque uma velocidade de corte mais elevada reduz a força de atrito entre a ferramenta e a peça, minimizando a formação de marcas profundas na superfície.

Outro aspecto importante é a relação entre o desgaste da ferramenta e a rugosidade superficial. Denkena et al. (2015) analisaram o torneamento do aço AISI 52100 e constataram que ferramentas com alto desgaste na aresta de corte resultam em superfícies com maiores valores de Ra. Isso se deve ao fato de que o desgaste altera a geometria da ferramenta, tornando-a menos eficiente na remoção do material e aumentando as irregularidades da superfície.

Aouici (2013) indica que a rugosidade média Ra tende a crescer com o avanço devido à formação de sulcos helicoidais na superfície usinada por torneamento. Esses sulcos tornam-se mais profundos conforme o avanço aumenta, dificultando o acabamento da peça. Dessa forma, a gestão adequada dos parâmetros de corte, em especial do avanço, é fundamental para garantir um acabamento superficial de alta qualidade e prolongar a vida útil das ferramentas de corte.

2.8 Consumo de potência na usinagem

A mitigação do consumo de energia elétrica representa uma prioridade nos processos industriais modernos, tanto por razões econômicas quanto ambientais. Conforme destacado por Hassan et al. (2023), o aumento da taxa de avanço e da profundidade de corte promove a formação de cavacos com maior espessura e

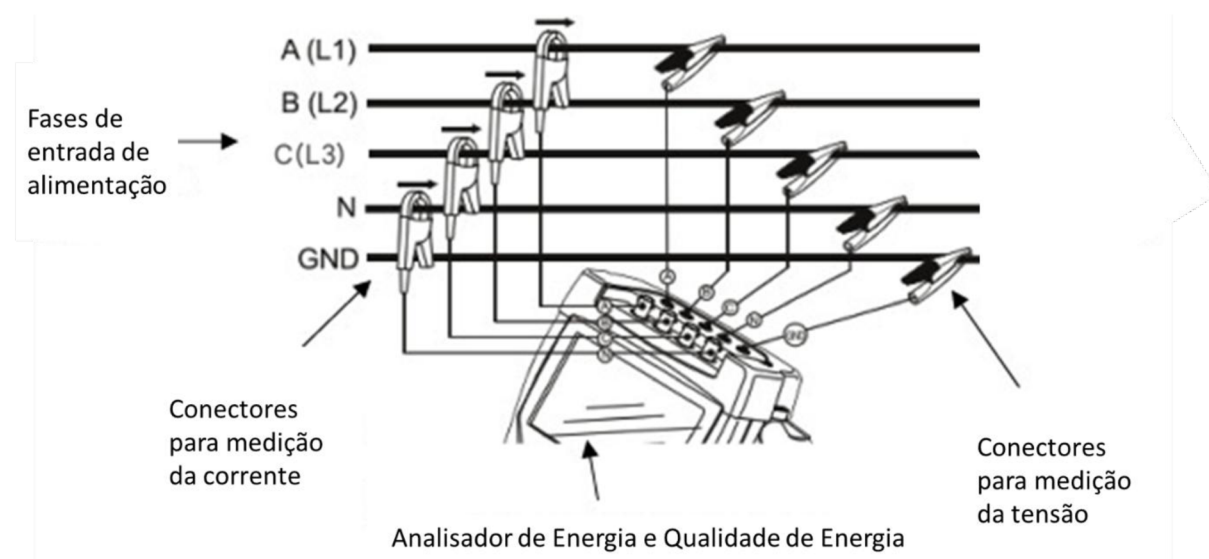
largura, o que eleva significativamente a demanda energética durante a remoção do material, devido à maior força de corte requerida.

No estudo conduzido por Airao et al. (2022), foi utilizado um analisador de energia e qualidade de energia para avaliar o consumo energético em ensaios de usinagem sob quatro diferentes condições de refrigeração. Para cada condição, foram comparados dois métodos de usinagem: o convencional e o assistido por vibração ultrassônica. Os resultados indicaram que a usinagem com auxílio de ultrassom apresentou maior eficiência energética em todas as estratégias de refrigeração avaliadas. As medições de potência consumida foram realizadas com o analisador Fluke 435 Série II.

A espessura do cavaco influencia diretamente as forças de corte e o consumo de energia. Na usinagem a seco, a formação de aresta postiça pode reduzir essa espessura e, conseqüentemente, a demanda energética. A refrigeração abundante tende a aumentar o consumo devido ao funcionamento contínuo da bomba, sem ganhos significativos no corte. No MQL, o maior desgaste da ferramenta eleva a espessura do cavaco e o consumo. Já o corte criogênico reduz ambos, devido à menor taxa de desgaste da ferramenta (KHANNA et al., 2020).

A esquemática de ligação e instalação do equipamento utilizado segue descrito na figura Figura 11.

Figura 11 - Esquemática de ligação e instalação do equipamento Analisador de Rede



Fonte: adaptado de KHANNA et al. (2020)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Para a realização deste trabalho, foram utilizadas chapas metálicas com 13 mm de espessura e dimensões de 400 × 250 mm. O material foi fornecido por uma indústria siderúrgica sob um contrato de confidencialidade, conforme solicitado pela empresa, devido ao seu estágio de desenvolvimento pré-comercial.

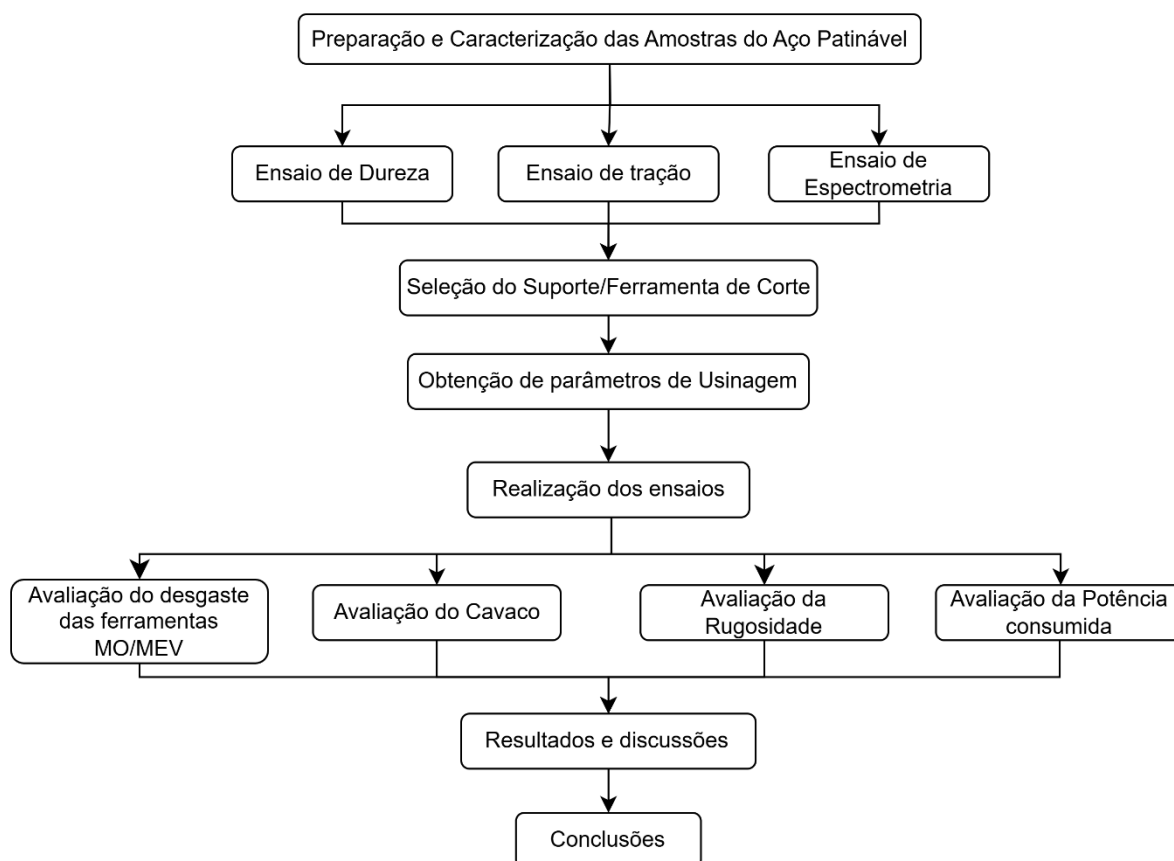
3.2 Máquinas e equipamentos

- Fresadora Universal Marógépgyára Esztergom do tipo MS 400-02.
- Analisador de Energia Fluke 435 série 2;
- Espectômetro de Emissão Óptica com base para Fe, Al e Cu, modelo Foundry-Master Pro, Oxford
- Durômetro multi escala ZWICK/ROELL, modelo 8187 5LKV
- Microscópio óptico, marca Olympus GX51;
- Rugosímetro portátil, modelo sj-201p, série 110558, marca Mitutoyo.
- Microscópio Eletrônico de Varredura, em modo alto e baixo vácuo, Jeol, JSM - 6610LV, com microsonda de EDS.

3.3 Fluxograma do procedimento experimental

O fluxograma da Figura 12 apresenta as etapas realizadas em ordem.

Figura 12 - Fluxograma do procedimento experimental



Fonte: O autor

3.4 Ensaio de dureza do aço patinável

O ensaio de dureza foi realizado nas dependências da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), tendo seus resultados apresentados no capítulo 4.

3.5 Ensaio de tração

Conforme dados enviados pelo fabricante do material, os valores obtidos para resistência ao escoamento e ruptura das amostras podem variar de acordo com os diferentes sentidos de Laminação e foram determinados através de ensaios de tração.

Valores obtidos para o material no sentido transversal à laminação.

LR: 841 MPa (como bobina a quente).

LE: 761 MPa (como bobina a quente).

Alongamento: 30%

Valores obtidos para o material após etapa de desbobinamento e aplainamento do material ainda no sentido transversal à laminação:

LR: 893 MPa

LE: 799 Mpa

Alongamento: 24%

Valores obtidos para o material no sentido longitudinal à laminação.

LR: 927 MPa

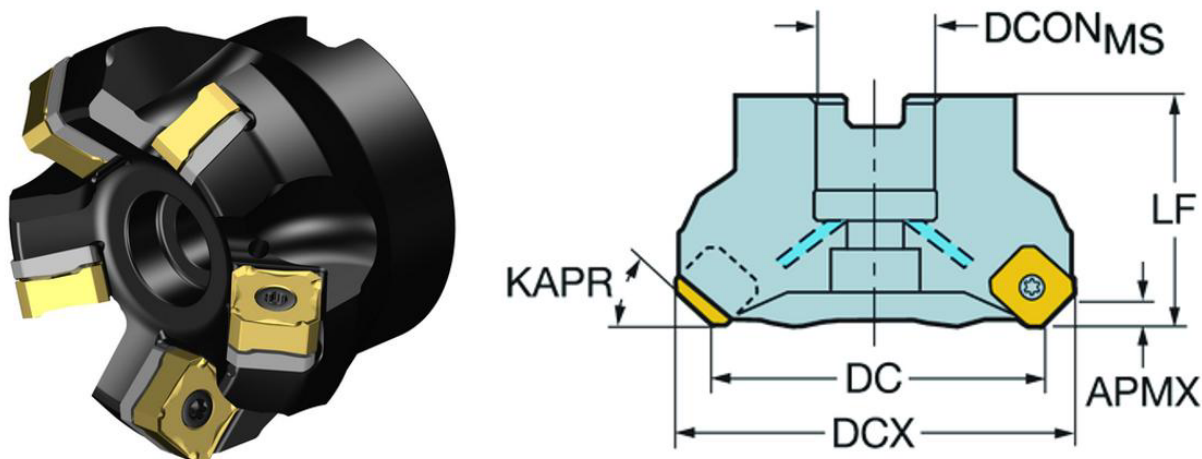
LE: 868 MPa

Alongamento: 19%

3.6 Seleção do suporte/ferramenta de corte

O suporte selecionado foi o modelo 345-050Q22-13H 711574 da Sandvik, com capacidade para cinco insertos. No entanto, neste estudo, foi utilizado apenas um inserto montado no suporte, visando análises mais direcionadas e uma mensuração mais ágil do desgaste, além da redução do volume de material consumido. A Figura 13 apresenta a descrição do suporte.

Figura 13 - Porta ferramenta utilizado nos ensaios



Fonte: Catálogo Sandvik

Onde:

Ângulo de corte (**KAPR**): 45 graus

Diâmetro de corte (**DC**): 50 mm

Diâmetro de corte máximo (**DCX**): 64,08 mm

Profundidade de corte máxima (**LF**): 6 mm

As ferramentas selecionadas foram a Coromill 345R-1305M-PM1230 e a 345R-1305M-PM4330 Sandvik coromant, constituídas de Carboneto de tungstênio revestido.

A ferramenta PM4330 é uma classe com revestimento CVD (deposição química a vapor), possuindo três camadas (**CVD TiCN+Al₂O₃+TiN**), sendo a camada mais externa composta por nitreto de titânio, seguida da camada intermediária de óxido de alumínio por fim, na camada mais interna, composta por carboneto de titânio apresentando dureza média medida de 2600 HV. A imagem real do inserto está representada na Figura 14.

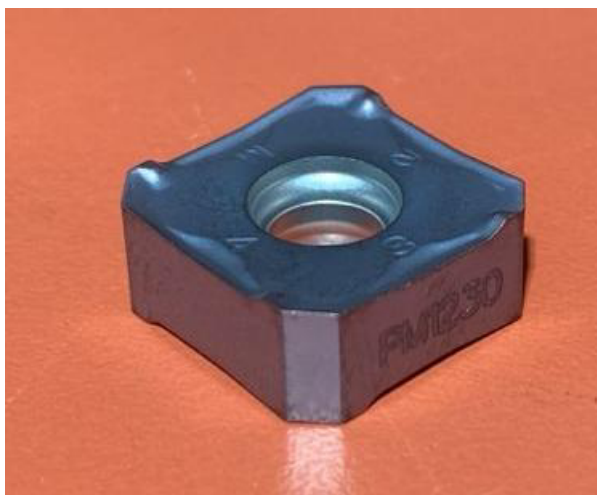
Figura 14 - Inserto CVD com tripla camada de cobertura



Fonte: O autor

Enquanto o modelo PM1230 consiste em uma ferramenta com classe de revestimento PVD (deposição física a vapor) de cobertura por camada única (**PVD TiAlSiN**), que durante os ensaios submetidos em laboratório apresentou dureza de 2950 HV. A imagem real do inserto está representada na Figura 15.

Figura 15 - Inserto PVD com única camada de cobertura



Fonte: O autor

Ambos os insertos possuem oito arestas de corte, onde os ângulos de folga são dados pelo próprio suporte. Seus substratos são constituídos por Carbonetos de tungstênio **HC** (High Coherence), que se refere a uma microestrutura otimizada do carboneto cimentado, com melhor controle do tamanho dos grãos e da distribuição do cobalto na matriz, o que melhora a resistência ao desgaste e a tenacidade da ferramenta.

3.7 Corpos de prova

Os corpos de prova foram confeccionados a partir de chapas metálicas com espessura de 13,00 mm e dimensões originais de 250 × 400 mm, conforme fornecido pelo fabricante. O comprimento de usinagem foi fixado em 250 mm, resultando em um tempo de passe de 2,5 minutos ao considerar um avanço de 100 mm/min.

Cada corpo de prova mantinha uma espessura inicial de 13,00 mm, sendo removidos 1,0 mm por passe. Dessa forma, foram necessários 10 passes antes do reposicionamento da chapa. A cada quatro passes, o tempo acumulado de usinagem atingia 10 minutos, imediatamente eram realizadas medições de desgaste em MO, coleta de cavaco e registro da potência consumida, além disso a rugosidade era verificada. O procedimento experimental está ilustrado na Figura 16.

Figura 16 - Procedimento experimental no fresamento



Fonte: O autor

O tempo total de usinagem para cada par de ferramentas (CVD e PVD) foi de 30, 60 e 120 minutos, com paradas a cada 10 minutos para análises intermediárias, conforme mencionado anteriormente, seguidas de uma análise posterior em MEV.

Devido à limitação do material usinável e à alta resistência ao desgaste apresentada por ambos os insertos, foram realizadas três réplicas até 30 minutos de usinagem, duas réplicas até 60 minutos e uma réplica até 120 minutos para cada ferramenta, tanto com revestimento CVD quanto com revestimento PVD. Esse procedimento permitiu uma avaliação do desgaste próximo ao fim de vida útil, em conformidade com a norma ISO 3685 (1993).

A Tabela 1 apresenta um resumo dos principais parâmetros utilizados no procedimento experimental

Tabela 1 – Quadro resumo do procedimento experimental

Procedimento experimental		
Dimensões dos CPs	Tempo de usinagem/passe	Rotação da ferramenta
250 mm x 400 mm x 13 mm (ESP)	2,5 min	1120 RPM
Comprimento de usinagem	Avanço da mesa	Avanço por dente
250 mm	100 m/min	0,09 mm/z
Profundidade de corte	Tempo de usinagem até análise em MO	Número de insertos
1,0 mm	10 min	3 PVD e 3 CVD

Fonte: o autor

3.8 Ensaios de usinagem

Os ensaios foram realizados em uma Fresadora Universal, utilizando os mesmos parâmetros operacionais para ambas as ferramentas, garantindo condições uniformes e comparáveis. Durante o processo de usinagem, ilustrado na Figura 17, foram adotados os seguintes parâmetros:

- **Rotação:** 1120 RPM
- **Velocidade de avanço:** 100 mm/min
- **Largura de corte:** 50 mm
- **Profundidade de corte:** 1,0 mm

Esses parâmetros foram selecionados para assegurar a repetibilidade dos experimentos e permitir uma análise precisa do desgaste das ferramentas.

Figura 17 - Procedimento experimental de Fresagem



Fonte: O autor

Apenas um inserto foi montado no suporte e, para simular condições equivalentes às aquelas com o número total de insertos, o avanço da mesa foi reduzido proporcionalmente, de acordo com a quantidade efetiva de insertos instalados. Assim, o avanço por dente (f_z) foi calculado dividindo-se o avanço da mesa (em mm/min) pela rotação da ferramenta (em rpm), resultando em um valor de 0,09 mm/z.

Essa abordagem teve como objetivo manter o avanço por dente dentro dos limites recomendados pelo fabricante da ferramenta, além de estar em conformidade com os parâmetros encontrados na revisão bibliográfica voltada à usinagem de aços de difícil usinabilidade.

Destaca-se, ainda, que a largura de corte foi de 50 mm, determinada pelas dimensões do próprio suporte utilizado.

3.9 Potência Consumida

A potência consumida durante cada ensaio foi obtida através de um analisador de rede Fluke 435 Série 2. Para tanto, foi utilizado também o Software Power Log para leitura da potência ativa média consumida em Watts. O equipamento foi instalado de modo a monitorar a corrente e a tensão em cada uma das 3 fases de alimentação da Fresadora.

O equipamento segue ilustrado na Figura 18 – Analisador de rede Fluke 435 Série 2 e foi instalado no interior do painel elétrico da máquina, onde permaneceu até o encerramento dos ensaios.

Figura 18 – Analisador de rede Fluke 435 Série 2



Fonte: o autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Ensaio de dureza

Para a determinação da dureza do material foram utilizadas amostras de seção transversal de uma peça do material. Os ensaios foram realizados em Durômetro Zwick Roell localizado no laboratório de superfícies (LabSurf) da Universidade Federal do Rio Grande (FURG). A Tabela 2 apresenta os resultados de dureza que foram obtidos em cada um dos ensaios, assim como a média obtida.

Tabela 2 - Ensaio de dureza Vickers da amostra do material

Ensaio	Dureza HV
1	281,68
2	284,01
3	283,08
4	271,81
Média	280,15

Fonte: O autor

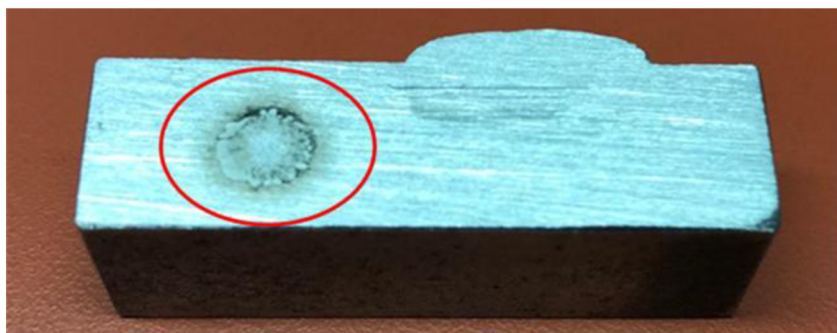
Foram realizados 4 ensaios com 10 kgf de carga e 10 segundos de tempo aplicação da carga. O valor obtido para Dureza Vickers pode ser convertido para outras escalas de dureza existentes, obtendo um valor equivalente para cada escala. Para o caso específico deste trabalho será considerado o valor de 280,15 equivalente a aproximadamente 27 HRC.

4.2 Espectrometria de emissão óptica por centelha

O ensaio espectrométrico foi realizado no Espectômetro de Emissão Óptica com base para Fe, Al e Cu, modelo Foundry-Master Pro, Oxford. Ele possibilita a obtenção da composição química de diversos materiais metálicos, que podem ser comparados com a Norma associada ou tabela de composição fornecida pelos fabricantes.

No presente trabalho foi realizada a espectrometria em uma amostra de material, através da realização de duas queimas executadas após o lixamento com lixa apropriada para descontaminação, representada em destaque na Figura 19.

Figura 19 - Amostra do material submetido ao ensaio de espectrometria



Fonte: O autor

O círculo na figura indica o local onde foi realizado a queima para a obtenção da composição química do material que segue ilustrada na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição química do material patinável

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Nb	Ti
0,97	0,87	0,48	1,49	0,057	0,056	0,31	0,104	0,22	0,04	0,122

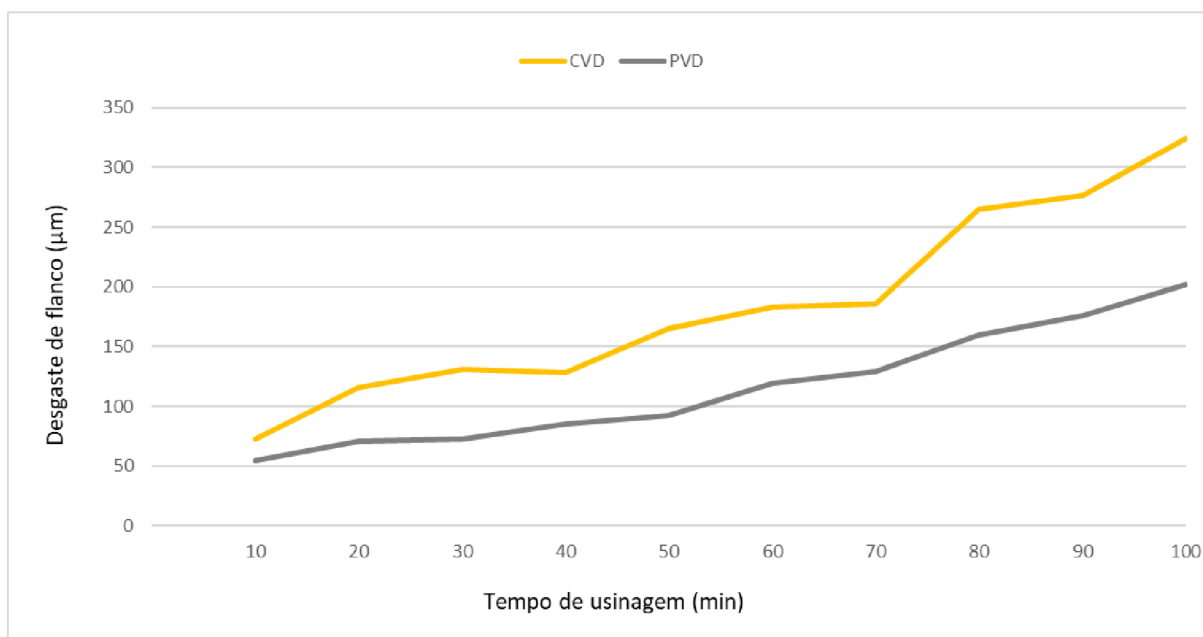
Fonte: O autor

Conforme a tabela apresentada, a composição química do material é predominantemente constituída por ferro e carbono, com a presença de elementos como cromo, titânio, cobre e nióbio, além do manganês. No entanto, esses elementos estão em quantidades pouco expressivas, o que impede sua classificação como um aço de baixa liga, uma vez que nenhum deles atinge a concentração mínima de 3% em massa.

4.3 Relação entre desgaste e tempo de usinagem

Esse parâmetro é um dos principais indicadores de desempenho em processos de usinagem, uma vez que afeta diretamente a qualidade da peça usinada e a viabilidade econômica do processo. O desgaste das ferramentas foi analisado em função do tempo de usinagem, conforme ilustrado na Figura 20.

Figura 20 - Relação entre tempo de usinagem e desgaste



Fonte: O autor

A análise do gráfico revela a evolução do desgaste para cada uma das ferramentas avaliadas, evidenciando uma vantagem significativa da ferramenta revestida por deposição física de vapor (PVD) em comparação à ferramenta revestida por deposição química de vapor (CVD). Ao longo dos ensaios, a ferramenta PVD apresentou um desempenho mais consistente e uma taxa de desgaste inferior, mantendo-se dentro de níveis aceitáveis por um período de tempo prolongado. Em contrapartida, a ferramenta CVD atingiu sua vida útil média ($VB_B M\acute{a}x = 0,3\text{ mm}$) em aproximadamente 100 minutos de usinagem, enquanto a ferramenta PVD permaneceu funcional até o encerramento dos testes, sem atingir o limite crítico de desgaste.

Os resultados obtidos neste estudo corroboram as conclusões de Akgün, Özlü e Kara (2023), que identificaram uma maior eficiência e durabilidade das ferramentas revestidas por PVD em comparação às ferramentas CVD. No entanto, Kivak (2014) constatou que, apesar de as ferramentas revestidas por CVD possuírem menor dureza em relação às PVD, elas podem apresentar melhor resistência ao desgaste em determinadas condições de corte (usinagem do aço Hadfield). Esse termo se refere a uma liga de aço alto manganês desenvolvida por Sir Robert Hadfield, conhecida por sua elevada resistência ao desgaste e grande capacidade de

endurecimento por deformação), o que sugere que a escolha do revestimento ideal deve considerar não apenas a dureza, mas também a aplicação específica e os parâmetros de usinagem empregados, além da composição do revestimento.

Além dos autores previamente mencionados, Sousa et al. (2021) também corroboram com os resultados que indicam a superioridade do revestimento TiAlSiN, evidenciando seu melhor desempenho em relação à resistência ao desgaste. No entanto, os estudos conduzidos por Yaqoob et al. (2024) apresentaram resultados divergentes, demonstrando que, em suas condições experimentais, a ferramenta revestida por deposição química de vapor (CVD) superou a ferramenta revestida por deposição física de vapor (PVD). Esse desempenho superior da ferramenta CVD foi atribuído, em grande parte, à sua menor dureza, característica que pode conferir maior resistência ao desgaste sob determinados regimes de usinagem.

A análise gráfica também corrobora o estudo de Colantonio et al. (2021), que descreve a progressão do desgaste em ferramentas de corte por meio de uma curva em formato de "S". Esse modelo sugere três fases distintas: um crescimento acentuado do desgaste na fase inicial, seguido por uma fase intermediária de progressão linear e, por fim, uma fase final de desgaste acelerado e exponencial, indicando o fim da vida útil da ferramenta.

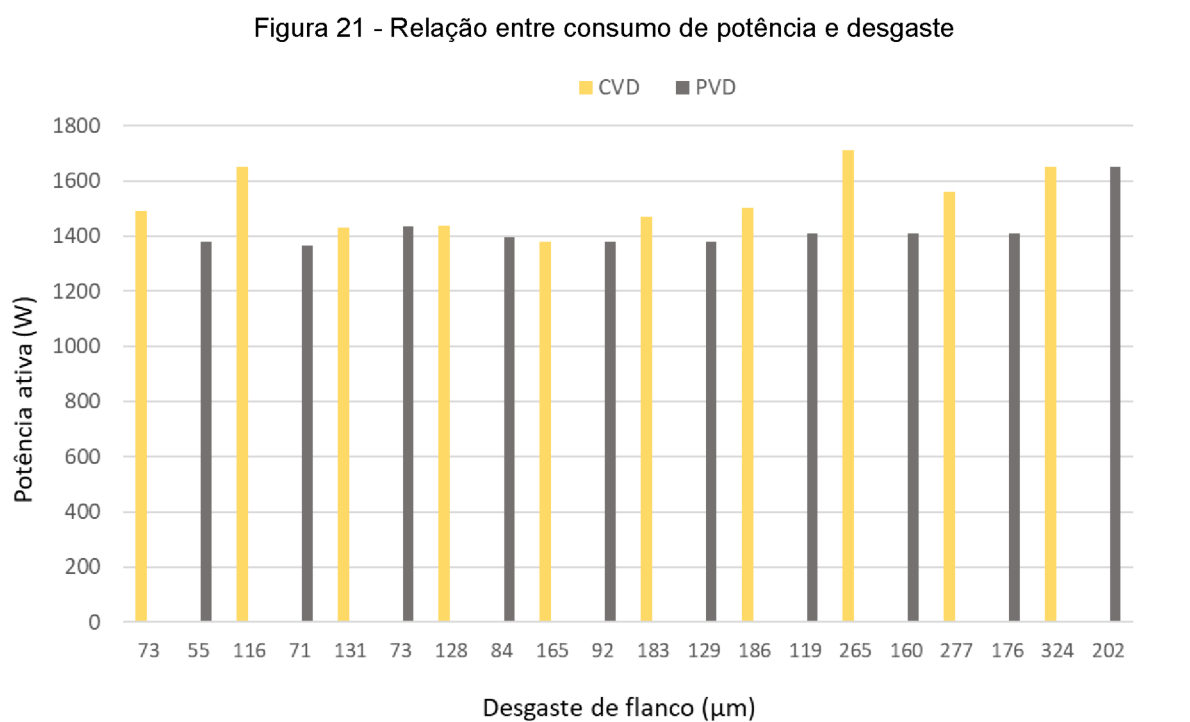
No presente estudo, a quantidade limitada de material disponível para os ensaios, aliada à maior resistência ao desgaste das ferramentas testadas em comparação à maioria dos dados encontrados na literatura, sugere que, caso os testes tivessem sido estendidos, seria possível observar com mais clareza o comportamento descrito por Colantonio et al. (2021). Isso reforça a hipótese de que as ferramentas avaliadas seguem o padrão de desgaste em "S", com uma fase final abrupta de degradação em um curto intervalo de tempo.

Diante dessas variações nos resultados experimentais, torna-se evidente que a escolha do revestimento ideal para uma ferramenta de corte não deve considerar apenas o material a ser usinado e suas propriedades mecânicas, mas também a composição química do revestimento e os efeitos do próprio processo de deposição. Diferentes métodos de aplicação, como CVD e PVD, conferem características distintas às camadas de revestimento, influenciando diretamente sua adesão, dureza, coeficiente de atrito e resistência ao desgaste.

Essa análise reforça a necessidade de uma seleção criteriosa dos revestimentos das ferramentas de corte, uma vez que a interação entre os parâmetros de usinagem, o material da peça e a tecnologia de deposição pode afetar significativamente o desempenho e a vida útil da ferramenta. Portanto, a escolha adequada deve ser baseada em uma avaliação abrangente, considerando não apenas as condições operacionais.

4.4 Relação entre potência consumida e desgaste

O gráfico, na Figura 21, mostra a relação entre o consumo de energia e os dois modelos de ferramentas avaliados, comparando cada nível de desgaste com a respectiva potência média registrada durante os ensaios. Para garantir a confiabilidade dos dados, os experimentos foram conduzidos com três repetições para cada condição, possibilitando a obtenção de valores médios mais representativos e reduzindo a influência de eventuais variações experimentais. Esse procedimento permitiu uma análise mais precisa da influência do desgaste no consumo energético, fornecendo subsídios para a comparação do desempenho entre as ferramentas testadas.



Fonte: O autor

A análise gráfica possibilita uma comparação detalhada entre o desgaste das ferramentas e o respectivo consumo de potência durante o processo de usinagem. Os dados obtidos indicam uma vantagem sutil, porém consistente, das ferramentas revestidas por deposição física de vapor (PVD) em relação às ferramentas revestidas por deposição química de vapor (CVD).

Observa-se que, ao longo de uma ampla faixa de desgaste, as ferramentas PVD mantiveram seu consumo energético predominantemente próximo ou abaixo do limite de 1400 W. Em contraste, as ferramentas CVD apresentaram, na maioria dos casos, um consumo superior a esse valor, evidenciando uma maior exigência de potência durante a usinagem. Esse comportamento sugere que as ferramentas PVD, além de proporcionarem menor desgaste, oferecem uma vantagem econômica relevante, uma vez que operam com menor demanda energética. Essa característica pode levar à redução dos custos operacionais e ao aumento da eficiência do processo produtivo, tornando as ferramentas uma alternativa mais atraente sob a perspectiva do consumo energético na usinagem. Yahya Isik (2010), em seu estudo, também destacou a vantagem econômica das ferramentas com revestimento PVD em comparação com as ferramentas CVD, avaliando três tipos distintos de cobertura.

Por outro lado, não foi possível estabelecer uma relação linear entre o desgaste e o consumo de potência, especialmente ao analisar o comportamento da potência consumida pelas ferramentas CVD. Observou-se que essas ferramentas apresentaram um pico de consumo aos 116 μm de desgaste, seguido por uma redução subsequente próximo da meia vida apresentou novamente acréscimo seguida de decréscimo. Esse comportamento sugere a influência de variáveis adicionais no processo, que demandam uma investigação mais aprofundada para melhor caracterização dos fenômenos envolvidos.

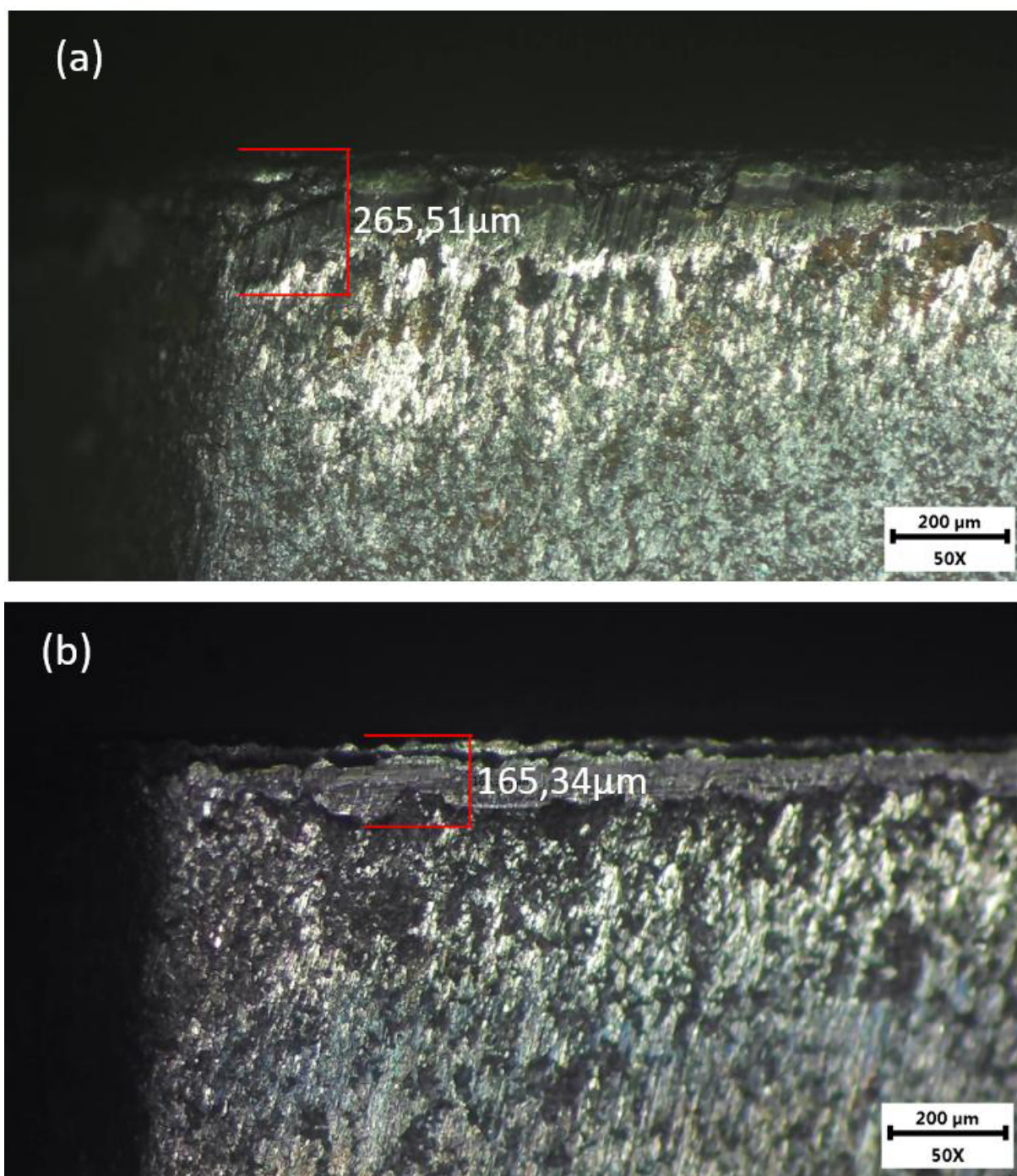
4.5 Desgaste observado em microscópio

Os ensaios foram programados para serem interrompidos a cada 10 minutos de tempo efetivo de usinagem, permitindo a realização de medições periódicas e a análise da evolução do desgaste das ferramentas ao longo do processo. Durante esse intervalo, a ferramenta percorreu linearmente uma distância total de 1000 mm, garantindo condições homogêneas para ambas as amostras testadas. Dessa forma,

o volume de material removido a cada etapa de medição foi calculado em 50 cm³ para ambas as ferramentas, assegurando uma base comparativa equilibrada.

Apesar da igualdade nos parâmetros de remoção de material, as imagens obtidas ao longo dos ensaios revelam uma clara vantagem da ferramenta revestida por deposição física de vapor (PVD) em relação à ferramenta revestida por deposição química de vapor (CVD). Em um mesmo período de usinagem e sob idêntico volume de material removido, a ferramenta PVD demonstrou um desempenho superior, apresentando menor nível de desgaste e maior estabilidade dimensional. Esse comportamento evidencia sua maior eficiência ao longo do processo, conforme ilustrado nas Figura 22 (a) e (b).

Figura 22 - Comparativo de desgaste das ferramentas (a)CVD e (b)PVD



Fonte: O autor

A ferramenta (a), revestida por deposição química de vapor (CVD), apresentou um desgaste abrasivo de flanco $VB_B^{máx} = 265,51 \mu\text{m}$ ao longo de 80 minutos de usinagem, indicando uma degradação significativa da aresta de corte nesse período. Em contraste, a ferramenta (b), revestida por deposição física de vapor (PVD), registrou um desgaste abrasivo de flanco $VB_B^{máx} = 165,34 \mu\text{m}$ sob o mesmo tempo

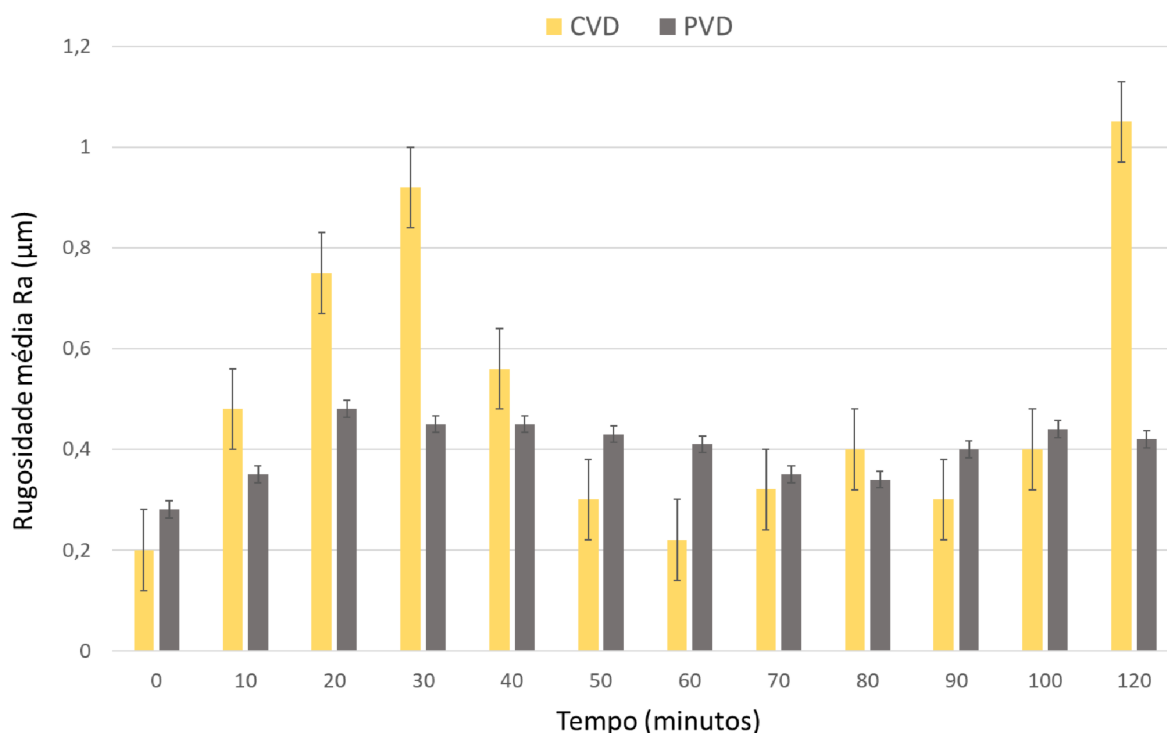
e as mesmas condições operacionais, evidenciando um desempenho superior em termos de resistência ao desgaste.

Comparando os valores obtidos, a ferramenta PVD sofreu 39,6% menos desgaste em relação à ferramenta CVD, demonstrando uma redução expressiva na taxa de degradação. Essa diferença reforça a eficácia do revestimento PVD na proteção da superfície de corte, possivelmente devido à sua maior aderência e menor coeficiente de atrito, características que favorecem um menor desgaste e uma maior vida útil da ferramenta. Corroborando, Sousa *et al.* (2021) realizaram estudos com duas ferramentas PVD, uma delas revestida por TiAlSiN e outra revestida por TiAlN, e concluiu que o revestimento contendo silício (Si) foi superior em termos de resistência ao desgaste.

4.6 Relação entre rugosidade e desgaste

A Figura 23 demonstra que a rugosidade se comportou de forma distinta nas duas ferramentas, durante os ensaios.

Figura 23 - Relação entre rugosidade e tempo de usinagem



Fonte: O autor

O gráfico evidencia que a ferramenta revestida com camada única por PVD apresentou um comportamento de rugosidade mais estável ao longo do tempo de usinagem, enquanto a ferramenta com revestimento tripla camada por CVD exibiu um padrão mais oscilatório, caracterizado por variações expressivas em forma de picos e vales. Esse comportamento sugere que a ferramenta de camada única proporciona maior previsibilidade e uniformidade no acabamento superficial, reduzindo variações indesejadas que podem comprometer a qualidade da peça usinada. Assim, do ponto de vista da estabilidade do acabamento superficial, a ferramenta PVD de camada única se mostra mais vantajosa, possivelmente devido à melhor adesão do revestimento e menor acúmulo de tensões residuais ao longo do processo.

Aslantas et al. (2024), ao usinar ligas de titânio, Eraslan et al. (2021), ao trabalhar com materiais de elevada resistência, e Kuntoglu (2022), em seu estudo sobre a usinagem do aço Hardox 500, concluíram que, do ponto de vista da rugosidade, a usinagem a seco apresentou vantagens em relação ao uso de técnicas de MQL e emulsão. Essas literaturas corroboram com o presente estudo, que obteve índices relativamente baixos de rugosidade média superficial para padrões de usinagem por fresamento. No entanto, é possível que esses valores se elevem em ensaios prolongados sob as mesmas condições operacionais, uma vez que o desgaste da ferramenta tende a aumentar com o tempo de usinagem.

Na fresagem com os dois tipos de ferramenta, a rugosidade média da R_a foi de $0,40\text{ }\mu\text{m}$ para a ferramenta CVD e $0,42\text{ }\mu\text{m}$ para a ferramenta PVD. No entanto, a ferramenta PVD apresentou um desvio padrão de $0,05\text{ }\mu\text{m}$, indicando maior uniformidade, enquanto a ferramenta CVD teve um desvio padrão de $0,27\text{ }\mu\text{m}$, sugerindo maior variabilidade nos resultados.

4.7 Mecanismos de desgaste

O principal mecanismo de desgaste observado foi o desgaste por abrasão. Durante os ensaios com microscópio óptico, foram identificados o desgaste de flanco e indícios de entalhes formados na aresta de corte. No entanto, a ocorrência de desgaste por entalhe foi mais evidente nas ferramentas revestidas por CVD (Figura 24). Além disso não foram encontradas evidências comprobatórias de desgaste por difusão e oxidação, nem mesmo desgaste por cratera em ambos os insertos em análise através de MO.

Figura 24 - Desgaste por Abrasão e Entalhe



Fonte: O autor

A imagem acima evidencia o desgaste de flanco em formato de entalhe na região da aresta de ponta da ferramenta revestida por tripla camada. Esse fenômeno ocorre devido à abrasividade presente na interface entre a ferramenta, a peça e o cavaco durante o processo de usinagem.

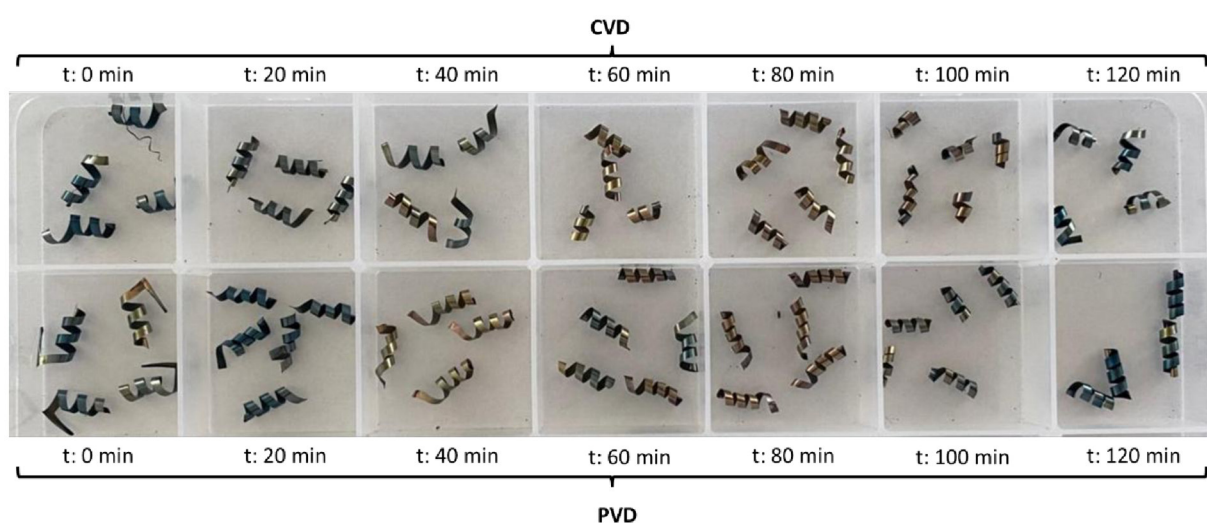
Boing, Oliveira e Schroeter (2020) destacam a influência do fator abrasivo no desgaste de ferramentas revestidas por CVD e PVD. A abrasividade é um dos principais mecanismos de desgaste, iniciando um ciclo progressivo de deterioração, conforme descrito por Sousa et al. (2021) na Figura 1. De acordo com esses autores, ferramentas submetidas a esforços de corte experimentam aumento de temperatura, abrasão, adesão e erosão, o que pode resultar na formação de pequenos entalhes. Esses entalhes tendem a evoluir até a falha total da ferramenta, seja por quebra ou pelo fim da sua vida útil.

Não foram evidenciadas presença de entalhes ao longo da aresta de corte das ferramentas PVD, onde o desgaste observado se comportou de maneira mais homogênea ao longo do comprimento da aresta.

4.8 Formato do cavaco

Os ensaios foram conduzidos para cada uma das ferramentas, com a coleta de cavacos realizada no primeiro passe e, subsequentemente, a cada 20 minutos de usinagem. Não foram observadas alterações significativas na morfologia dos cavacos para nenhuma das ferramentas avaliadas. No entanto, foi identificada uma mudança na coloração dos cavacos nos tempos de 60 e 80 minutos para a ferramenta CVD e nos tempos de 40 e 80 minutos para a ferramenta PVD, conforme pode-se observar na Figura 25.

Figura 25 - Aspecto do cavaco ao longo de 120 minutos



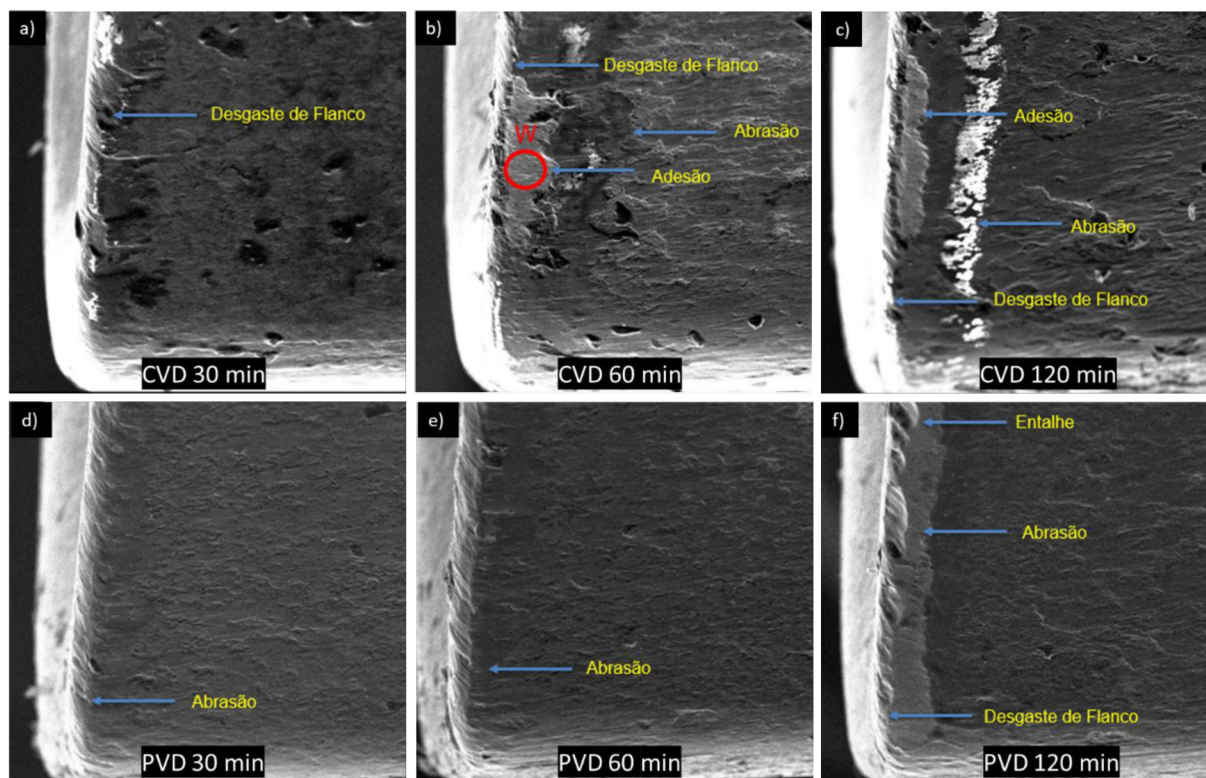
Fonte: O autor

Apesar das variações na coloração do cavaco, não foi possível estabelecer uma correlação direta com o desgaste da ferramenta ou com a potência consumida durante o processo. Assim, a coloração do cavaco se manifesta como um fenômeno inerente à usinagem, sem evidências conclusivas que permitam inferir mecanismos específicos de degradação da ferramenta ou eficiência energética no corte. No entanto, ensaios de usinagem com monitoramento da temperatura ao longo dos passes podem fornecer uma análise mais precisa das causas das alterações cromáticas observadas ao longo do processo.

4.9 Análise microscópica de desgaste em MEV

A Figura 26 – Comparativo geral entre as ferramentas CVD e PVD ilustra cada uma das análises realizadas em MEV para cada uma das Ferramentas utilizadas (PVD e CVD) em seus respectivos tempos de usinagem, evidenciando um comparativo.

Figura 26 – Comparativo geral entre as ferramentas CVD e PVD



Fonte: o autor

A análise em MEV associada as técnicas de EDS favorecem a determinação de mecanismos de desgaste envolvido nos processos de usinagem, tendo sido utilizada por diversos autores, para determinação da presença de desgastes de todos os tipos.

A apresenta a ferramenta CVD na parte superior da imagem e a ferramenta PVD na parte inferior da imagem, ambas ampliadas 200x após 30, 60 e 120 minutos de usinagem. Através imagem, observa-se a progressão do desgaste por abrasão, localizado nas proximidades da aresta de corte, situada na lateral esquerda da figura apresenta a ferramenta CVD na parte superior da imagem e a ferramenta PVD na parte inferior da imagem, ambas ampliadas 200x após 30, 60 e 120 minutos de

usinagem. Através imagem, observa-se a progressão do desgaste por abrasão, localizado nas proximidades da aresta de corte, situada na lateral esquerda da figura, além da presença de adesão de material da peça à superfície das ferramentas

A Erro! Fonte de referência não encontrada. 26(b) ilustra a progressão do desgaste abrasivo após 60 minutos de usinagem, apresentando um estágio mais avançado em comparação à Figura 26(a). A região circulada indica a exposição da camada do substrato da ferramenta, constituída por tungstênio (W), corroborando com o estudo de Boing, Oliveira e Schroeter (2020), identificada por meio de ensaio de EDS.

A Figura 26(c) evidencia um estágio ainda mais avançado do desgaste abrasivo, correspondente a 120 minutos de usinagem. Neste momento, a ferramenta CVD atingiu a condição de “meia vida”, com um desgaste máximo ($VB_{Bmáx}$) de 324 μm . A adesão e a abrasão foram os principais mecanismos encontrados corroborando com Sousa et al. (2021).

A Figura 26 (d) apresenta a ferramenta PVD no início do desgaste, com um leve desgaste abrasivo na fase inicial do processo, equivalente à de 73,71 μm , conforme identificado durante as medições de desgaste, nas análises em microscópio ótico (Liang et al., 2023).

A Figura 26 (e) mostra a ferramenta PVD após 60 minutos de usinagem, evidenciando um desgaste abrasivo máximo de 129,11 μm . Observa-se um acréscimo de aproximadamente 77% no desgaste abrasivo ao passar de 73,71 μm (30 min) para 129,11 μm (60 min), indicando uma progressão significativa do desgaste. Akgün, Özlü e Kara (2023) apresentaram a abrasão como o principal mecanismo de desgaste observado em sua pesquisa.

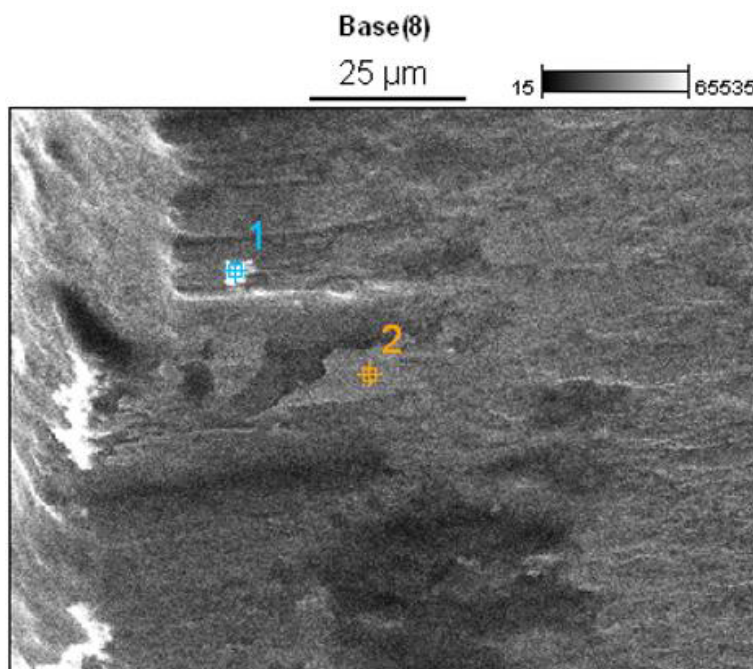
A Figura 26 (f) ilustra a ferramenta PVD após 120 min de usinagem, evidenciando a presença do desgaste abrasivo ao longo de toda a aresta de corte, além da ocorrência de entalhes, característicos do desgaste avançado de flanco, com profundidade aproximada de 200 μm de entalhe. O desgaste de flanco é classificado como um tipo de desgaste que ocorre em decorrência de alguns mecanismos como

abrasão (Ross et al. 2021) e oxidação que podem atuar de forma simultânea ou isolada.

4.10 Análise do desgaste por EDS das ferramentas CVD

A Figura 27 destaca os pontos onde foram realizados os ensaios de EDS, utilizando ampliação de 1000x. A lateral esquerda da imagem representa a região mais próxima da aresta de corte.

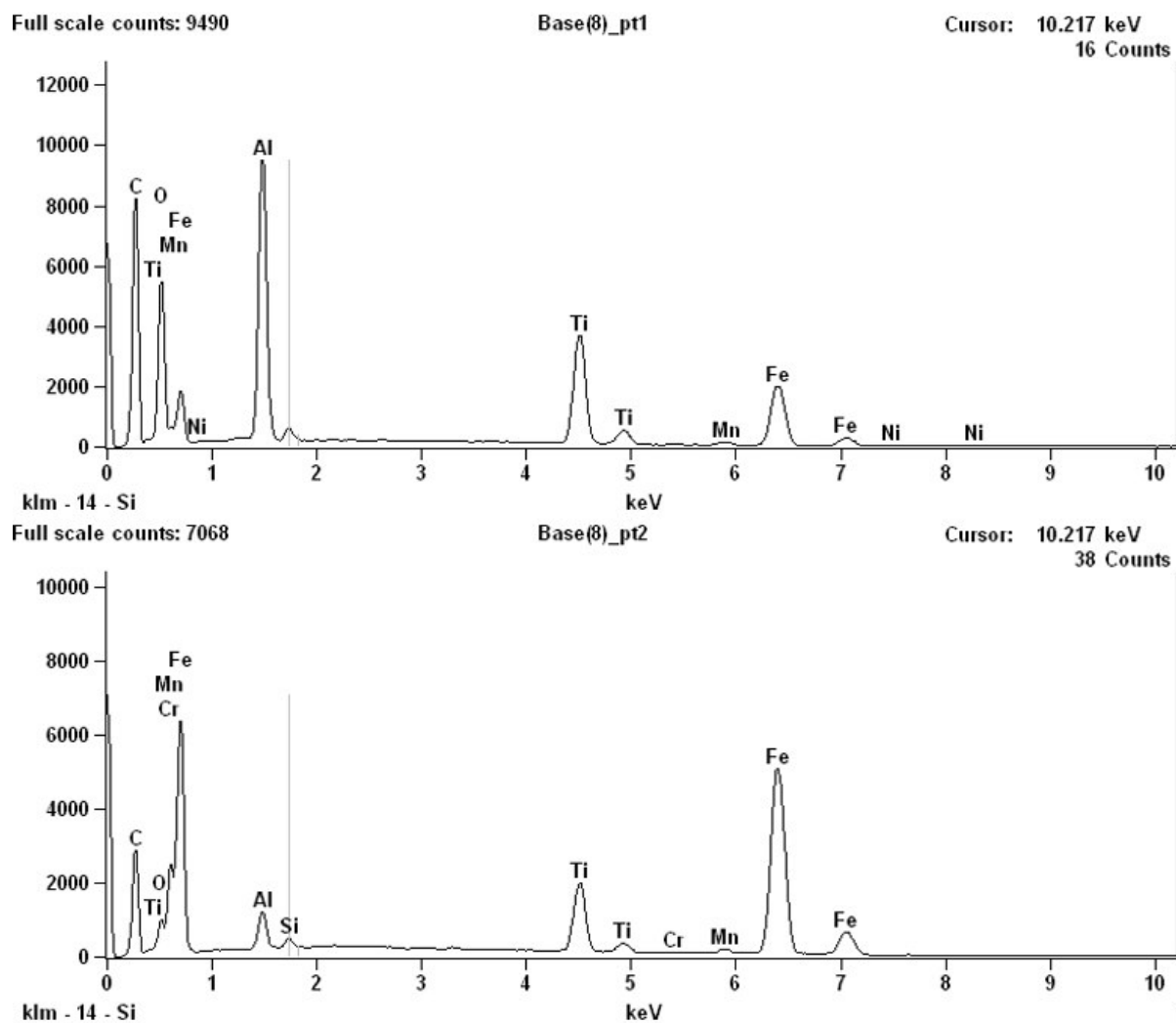
Figura 27 - EDS da ferramenta CVD 30 min



Fonte: o autor

A Figura 28 apresenta os espectros do EDS nos pontos 1 e 2 da ferramenta CVD após 30 minutos de usinagem.

Figura 28 - Espectro do EDS da ferramenta CVD 30 min



Fonte: O autor

A Tabela 4 mostra a composição percentual dos elementos na ferramenta CVD com 30 min de usinagem, destacando no ponto 1 a predominância de elementos que constituem o revestimento (TiCN+Al₂O₃+TiN) e presença de Fe e O, indicando mecanismo de adesão do material da peça na superfície do revestimento e oxidação, enquanto o ponto 2 revela comportamento semelhante, porém com maior teor de Fe. Corroborando com os estudos de Liang et al. (2023) e Gupta et al. (2022), apresentando a oxidação como o principal mecanismo de desgaste obtido em sua pesquisa.

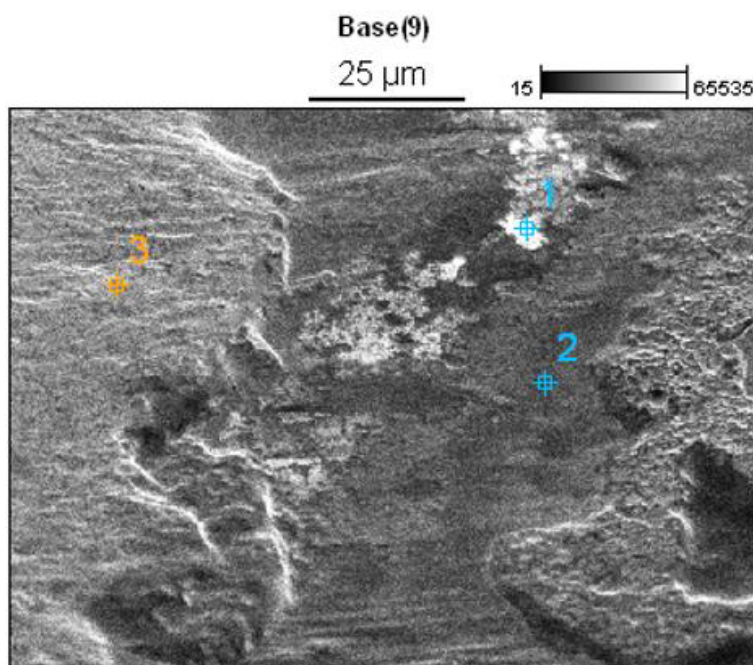
Tabela 4 - Composição por EDS da ferramenta CVD 30 min

% em massa	C-K	O-K	Al-K	Si-K	Ti-K	Cr-K	Mn-K	Fe-K	Ni-K
Base(8)_pt1	19.66	20.73	13.31		18.89		1.15	26.20	0.06
Base(8)_pt2	8.55	1.61	2.11	0.53	10.57	0.39	1.29	74.94	

Fonte: O autor

A Figura 29 apresenta os pontos 1, 2 e 3, da ferramenta CVD após 60 minutos de usinagem.

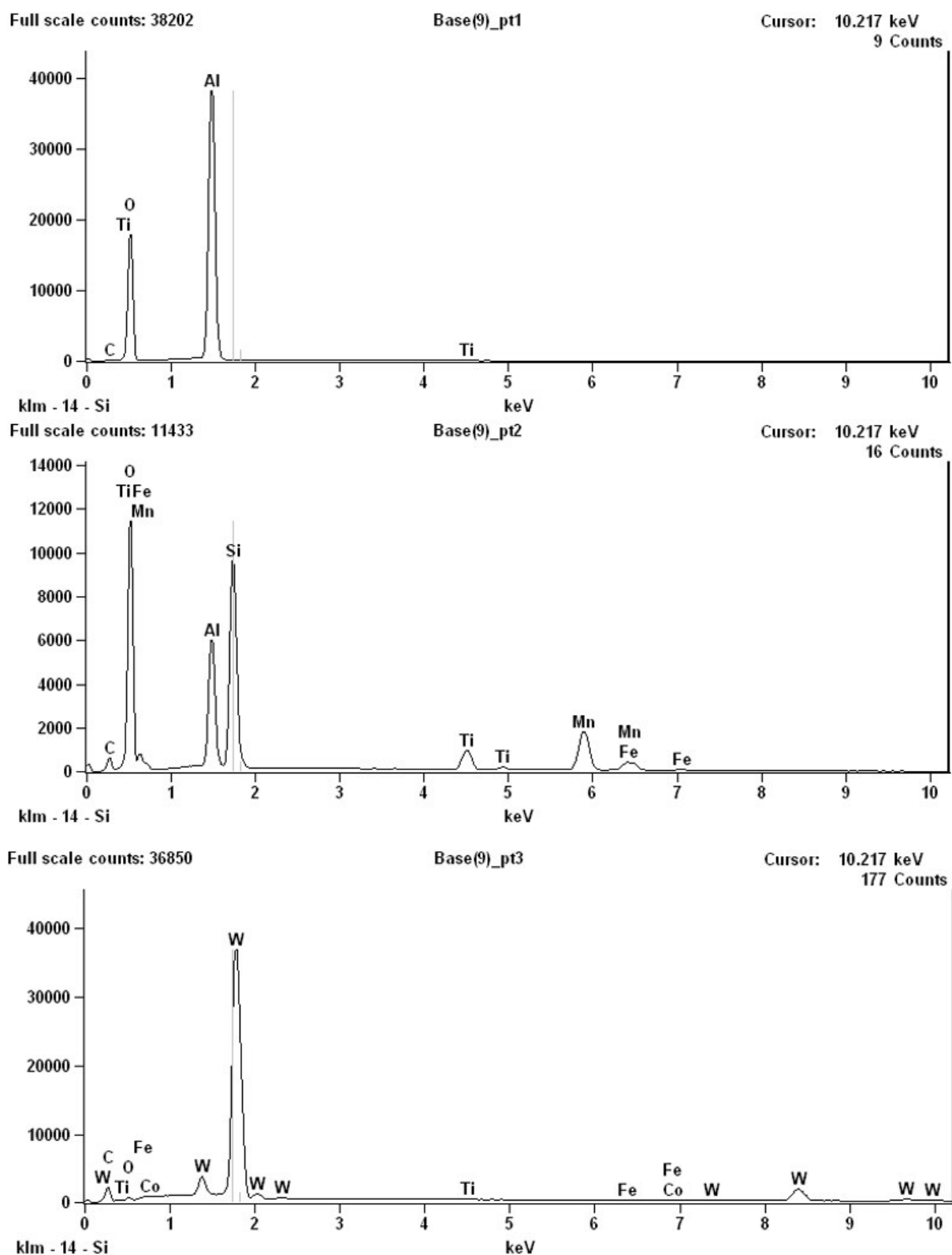
Figura 29 - EDS da ferramenta CVD 60 min



Fonte: O autor

Na Figura 30, podem-se observar os espectros de EDS da ferramenta CVD com 60 minutos de usinagem nos pontos 1, 2 e 3.

Figura 30 - Espectro do EDS da ferramenta CVD 60 min



Fonte: O autor

A Tabela 5 apresenta a composição percentual dos elementos na ferramenta CVD com 60 min de usinagem

Ponto 3: A alta concentração de W confirma a exposição do substrato da ferramenta, sem indícios de adesão do material da peça ou oxidação, predominando o mecanismo de abrasão, (LIANG et al., 2023).

Ponto 2: A presença de Fe, Mn, Si, Al e O sugere adesão do material da peça à superfície da ferramenta (Zhang et al. 2024), além de uma forte concentração dos elementos característicos do revestimento (TiCN+Al₂O₃+TiN). O teor significativo de oxigênio indica um possível mecanismo de oxidação (Liang et al. 2023 e Gupta et al. 2022).

Ponto 1: A predominância de Ti, Al e O sugere a formação de óxidos devido à presença expressiva de oxigênio e não indica adesão (Bai et al. 2021).

Esses resultados estão em conformidade com os estudos de Gupta et al. (2022), que analisaram as regiões das ferramentas onde cada tipo de desgaste ocorre com maior frequência. Conforme ilustrado na Figura 7 (Capítulo 2), a região do flanco e da aresta de corte das ferramentas é a mais propensa ao desgaste adesivo, abrasivo e oxidativo.

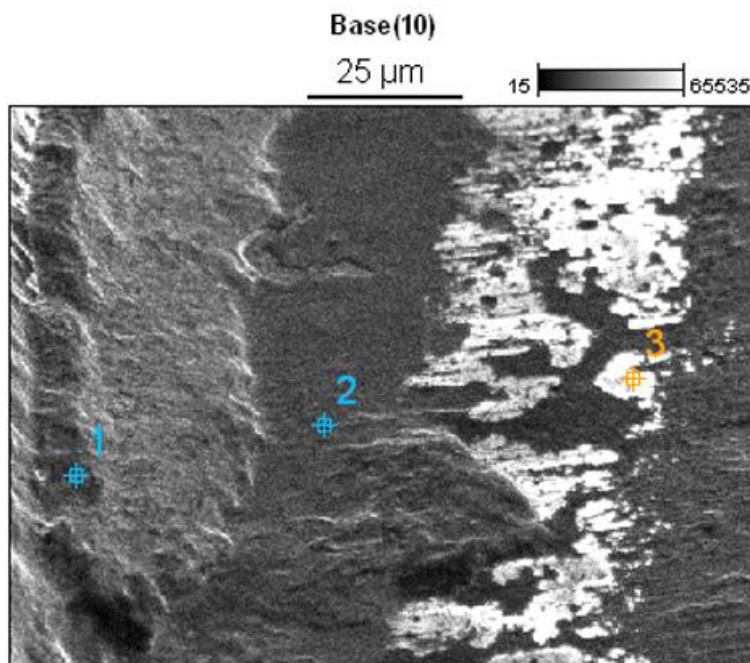
Tabela 5 - Composição por EDS da ferramenta CVD 60 min

% em massa	C-K	O-K	Al-K	Si-K	Ti-K	Mn-K	Fe-K	Co-K	W-M
Base(9)_pt1	0.81	46.33	52.46		0.39				
Base(9)_pt2	2.60	33.06	10.17	18.63	5.93	24.40	5.21		
Base(9)_pt3	5.64	1.53			0.27		0.50	1.27	90.79

Fonte: O autor

A Figura 31 exibe os pontos 1, 2 e 3, onde foram realizados os ensaios por EDS na ferramenta CVD com 120 minutos de usinagem, com ampliação de 1000X.

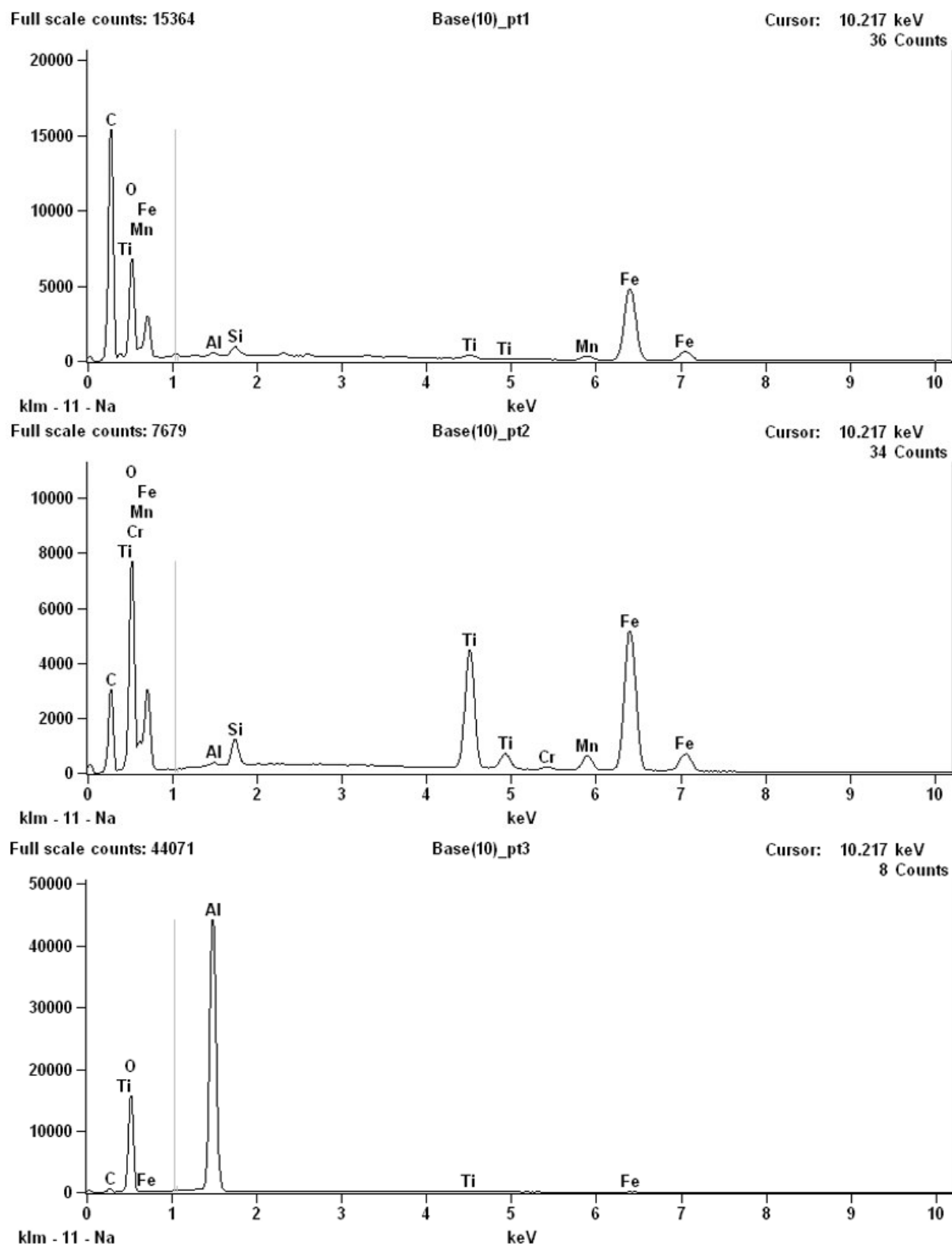
Figura 31 - EDS da ferramenta CVD 120 min



Fonte: O autor

Na Figura 32, os espectros dos pontos 1, 2 e 3, obtidos por EDS na ferramenta CVD após 120 minutos de usinagem são representados.

Figura 32 - Espectro do EDS da ferramenta CVD 120 min



Fonte: O autor

A Tabela 6 apresenta a composição percentual dos elementos na ferramenta CVD com 120 min de usinagem.

Ponto 1 (próximo à aresta de corte): Identificou-se a presença de C (26,85%), O (15,20%), Mn (2,27%) e Fe (53,52%). A composição química sugere um mecanismo de desgaste predominantemente adesivo (Zhang et al. 2024) e oxidativo (Liang et al. 2023), evidenciado pela transferência de material da peça para a ferramenta e pela presença de oxigênio.

Ponto 2: Foram detectados C (5,97%), O (12,95%), Ti (18,26%) e Fe (56,35%). Assim como no ponto 1, os elementos identificados indicam um mecanismo de desgaste por adesão (Ross et al. 2021) e oxidação (Gupta et al. 2022), reforçando a interação entre o material da peça e a superfície da ferramenta.

Ponto 3: Observou-se nesse ponto a presença de C (2,74%), O (40,65%), Mn (4,27%) e Fe (0,54%), caracterizando um mecanismo de desgaste predominantemente oxidativo (Liang et al. 2023 e Gupta et al. 2022). A menor presença de Fe sugere uma menor adesão do material da peça, possivelmente devido ao maior afastamento da aresta de corte.

Tabela 6 - Composição por EDS da ferramenta CVD 120 min

% em massa	C-K	O-K	Al-K	Si-K	Ti-K	Cr-K	Mn-K	Fe-K
Base(10)_pt1	26.85	15.20	0.23	0.88	1.06		2.27	53.52
Base(10)_pt2	5.97	12.95	0.15	1.38	18.26	0.66	4.27	56.35
Base(10)_pt3	2.74	40.65	55.71		0.36			0.54

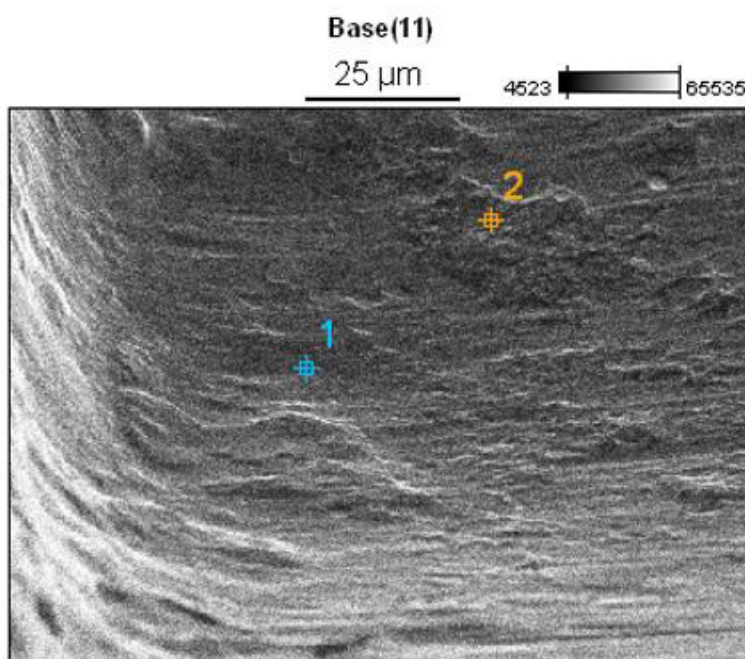
Fonte: O autor

4.11 Análise do desgaste por EDS das ferramentas PVD

As ferramentas revestidas por PVD, neste trabalho, apresentaram melhor desempenho em relação ao desgaste abrasivo de flanco, além de vantagens energéticas devido ao menor consumo de energia. Além disso, os resultados de rugosidade superficial indicaram valores médios mais baixos em comparação com as ferramentas CVD. Neste subcapítulo, serão apresentados os resultados obtidos por EDS, permitindo uma análise detalhada do comportamento das ferramentas PVD sob os aspectos do desgaste oxidativo e adesivo.

Na Figura 33 observam-se os pontos 1 e 2, onde foram realizados os ensaios por EDS na ferramenta PVD com 30 minutos de usinagem, com ampliação de 1000X.

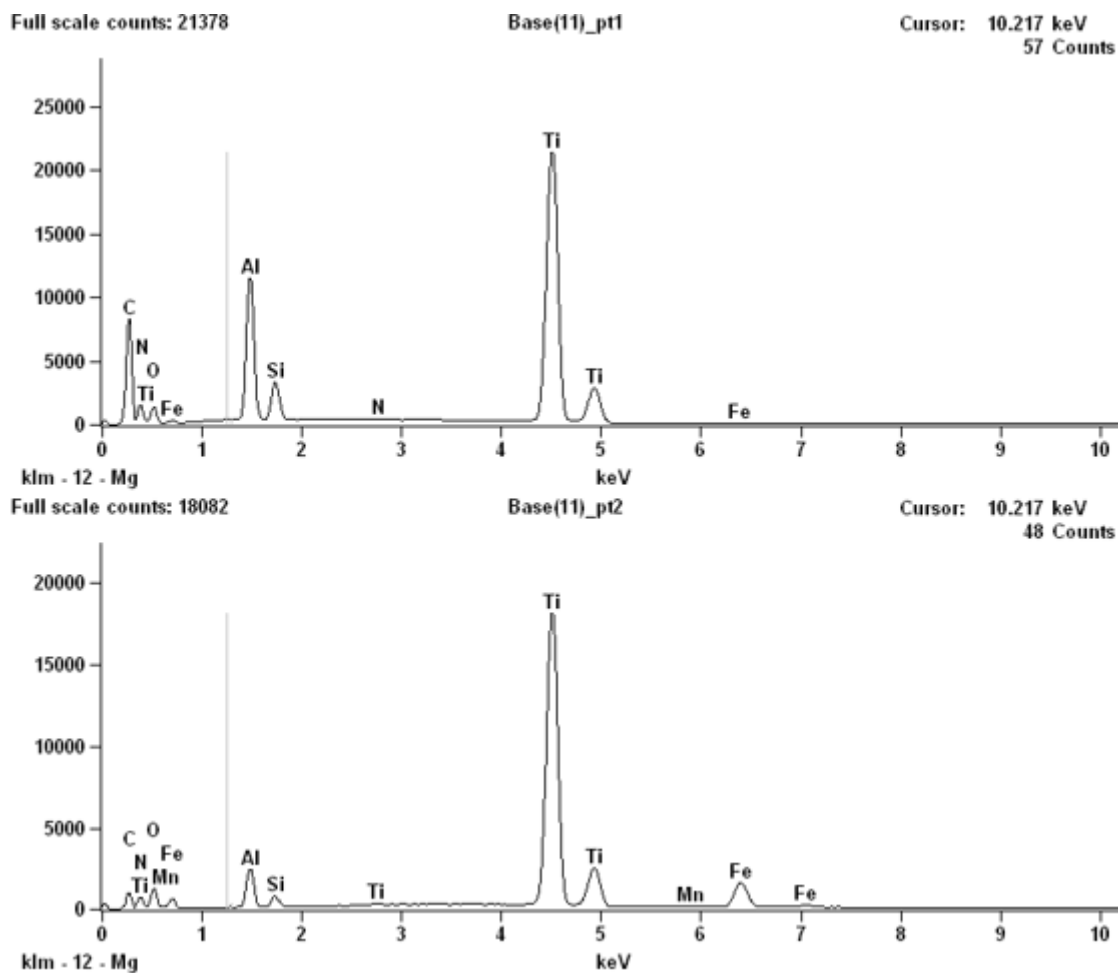
Figura 33 - EDS da ferramenta PVD 30 min



Fonte: O autor

A Figura 34 mostra os espectros dos pontos 1 e 2 obtidos por EDS na ferramenta PVD após 30 minutos de usinagem.

Figura 34 - Espectro do EDS da ferramenta PVD 30 min



Fonte: O autor

A Tabela 7 apresenta a composição percentual dos elementos na ferramenta PVD com 30 min de usinagem.

Ponto 1 (próximo à aresta de corte): Visualizou-se presença de C (10,86%), N (3,23%), O (7,35%), Al (8,85%), Si (2,54%), Ti (66,35%) e Fe (0,82%). A predominância dos elementos do revestimento (TiAlSiN) e a baixa concentração de O sugerem que a camada protetora permanece relativamente íntegra neste ponto, com mínima degradação.

Ponto 2: Foram identificados C (1,61%), N (1,41%), O (7,32%), Al (2,78%), Si (0,78%), Ti (70,84%), Mn (0,45%) e Fe (14,82%). A redução dos elementos do revestimento, combinada com o aumento da presença de Fe e Mn, indica um desgaste progressivo da camada protetora, evidenciando a atuação de um mecanismo de adesão (Zhang et al. 2024) do material da peça na superfície da ferramenta.

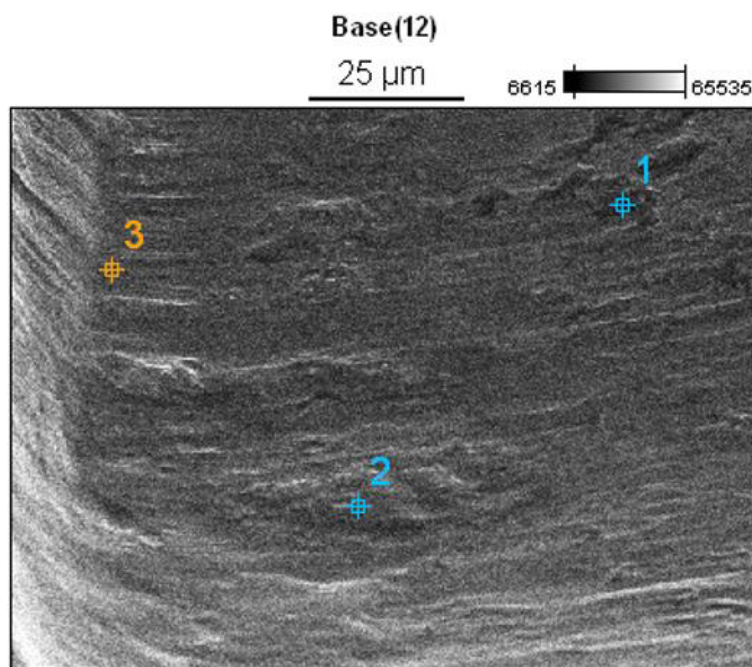
Tabela 7 - Composição por EDS da ferramenta PVD 30 min

% em massa	C-K	N-K	O-K	Al-K	Si-K	Ti-K	Mn-K	Fe-K
Base(11)_pt1	10.86	3.23	7.35	8.85	2.54	66.35		0.82
Base(11)_pt2	1.61	1.41	7.32	2.78	0.78	70.84	0.45	14.82

Fonte: O autor

A Figura 35 apresenta os pontos 1, 2 e 3 onde foram realizados os ensaios por EDS na ferramenta PVD com 60 minutos de usinagem, com ampliação de 1000X.

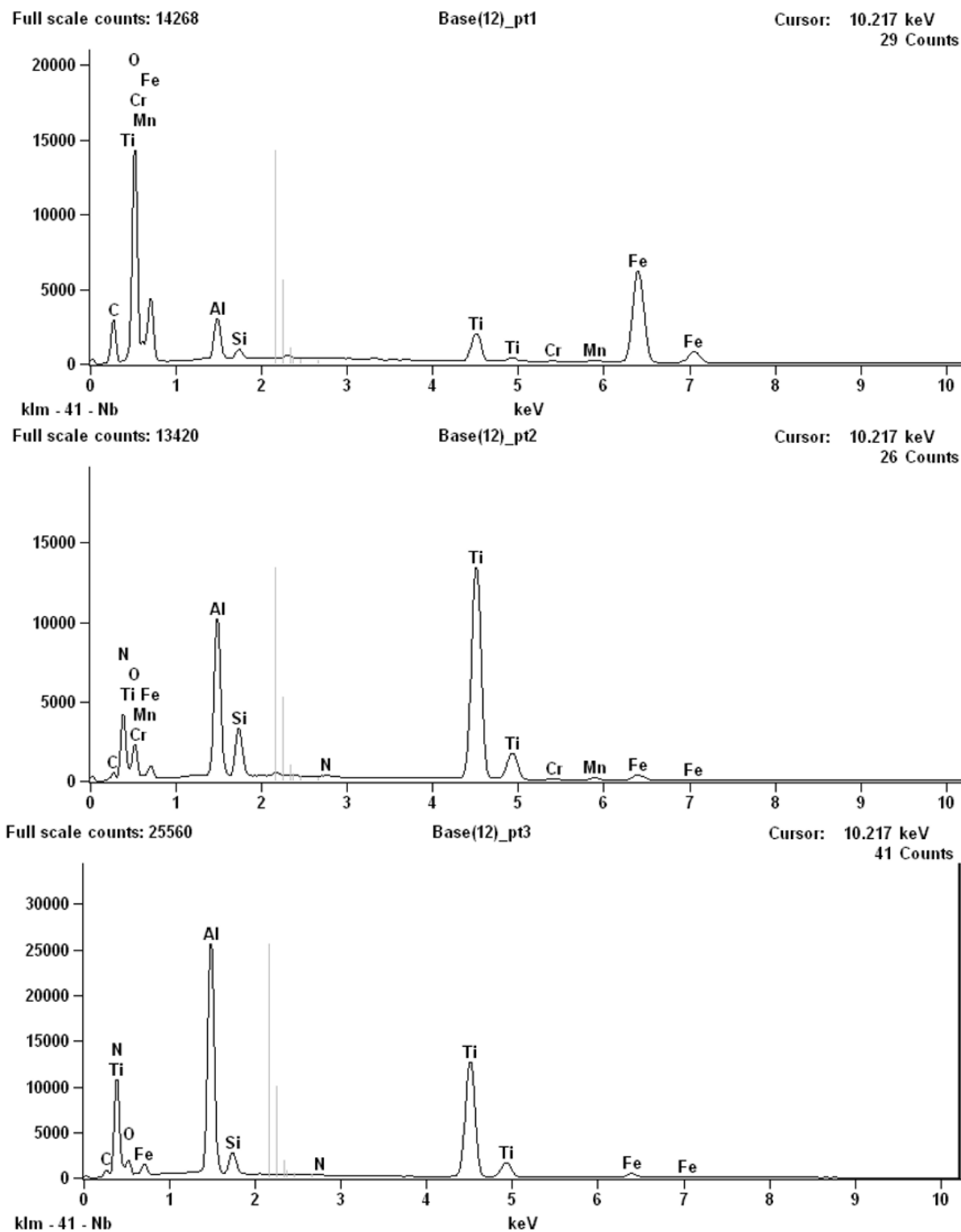
Figura 35 - EDS da ferramenta PVD 60 min



Fonte: O autor

A Figura 36 apresenta o espectro dos pontos 1, 2 e 3, obtidos por EDS na ferramenta PVD após 60 minutos de usinagem.

Figura 36 - Espectro do EDS da ferramenta PVD 60 min



Fonte: O autor

A Tabela 8 apresenta a composição percentual dos elementos na ferramenta PVD com 60 min de usinagem.

Ponto 1 (mais afastado da aresta de corte): Composição de C (5,72%), O (19,17%), Al (3,76%), Si (0,81%), Ti (7,20%), Cr (0,24%), Mn (1,38%) e Fe (61,73%). A predominância dos elementos do revestimento (TiAlSiN) sugere que a camada protetora ainda está relativamente íntegra. No entanto, o alto teor de Fe e a presença de oxigênio indicam um desgaste por adesão (Bai et al. 2021) combinado com um mecanismo de oxidação.

Ponto 2 (mais próximo da aresta de corte): Foram identificados C (1,30%), N (8,35%), O (13,88%), Al (10,92%), Si (3,73%), Ti (57,64%), Mn (0,68%) e Fe (3,23%). A composição observada é compatível com os elementos do revestimento, sugerindo uma baixa adesão de material da peça e evidências de desgaste predominantemente por mecanismo de oxidação (Liang et al. 2023 e Gupta et al. 2022).

No ponto 3 não foram registrados os dados percentuais dos elementos através do equipamento.

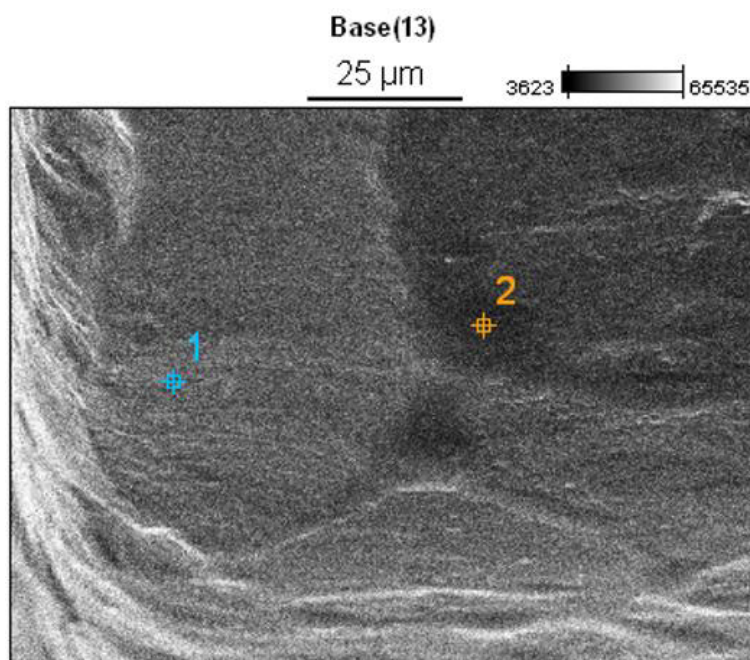
Tabela 8 - Composição por EDS da ferramenta PVD 60min

% em massa	C-K	N-K	O-K	Al-K	Si-K	Ti-K	Cr-K	Mn-K	Fe-K
Base(12)_pt1	5.72		19.17	3.76	0.81	7.20	0.24	1.38	61.73
Base(12)_pt2	1.30	8.35	13.88	10.92	3.73	57.64	0.28	0.68	3.23
Base(12)_pt3									

Fonte: O autor

A Figura 37 exibe os pontos 1 e 2, onde foram realizados os ensaios por EDS na ferramenta PVD com 120 minutos de usinagem, com ampliação de 1000X.

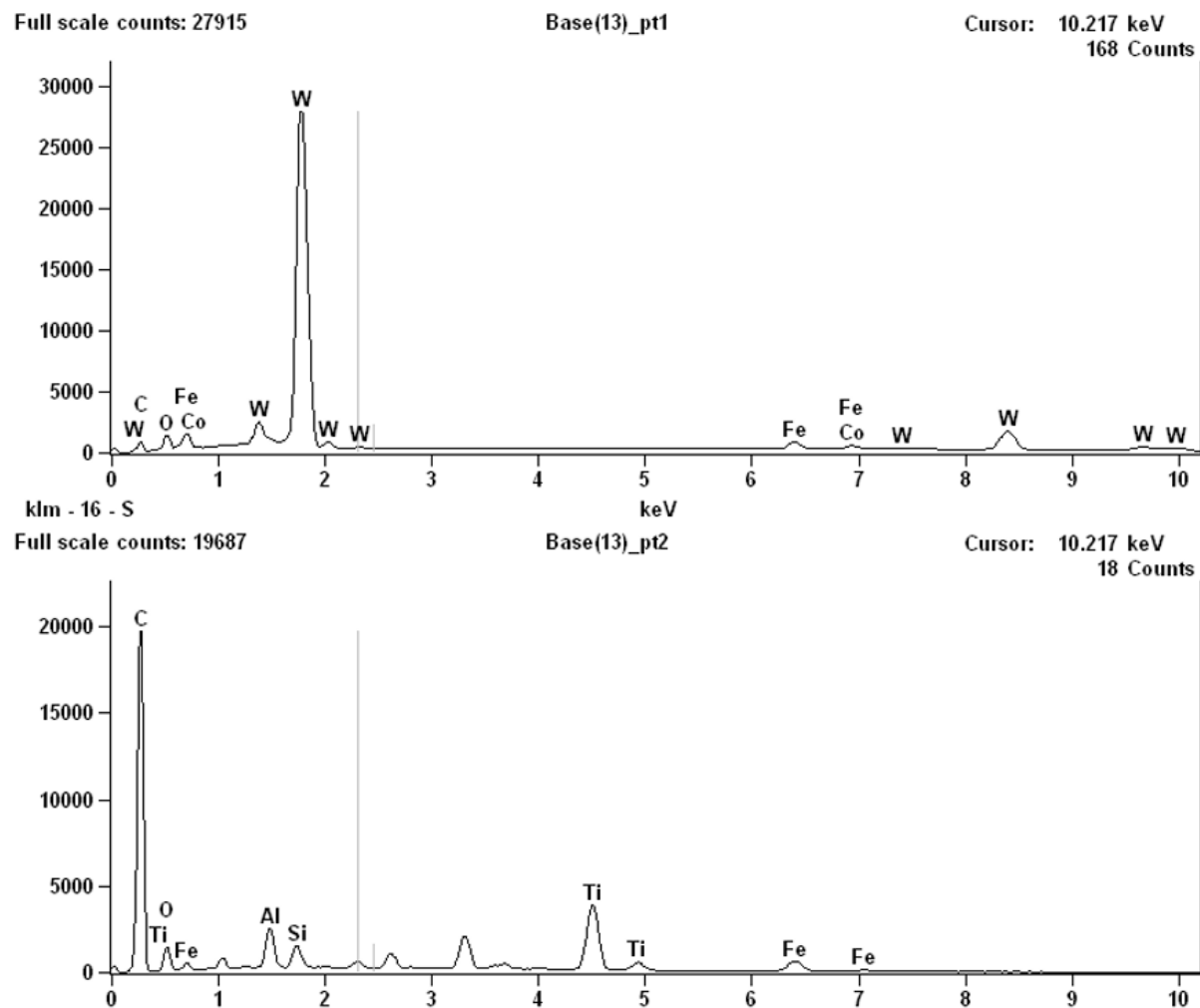
Figura 37 - EDS da ferramenta PVD 120 min



Fonte: O autor

Podem-se observar, através da Figura 38, os espectrogramas dos pontos 1 e 2 obtidos por EDS na ferramenta PVD após 120 minutos de usinagem.

Figura 38- Espectro do EDS da ferramenta PVD 120 min



Fonte: O autor

A Tabela 9 apresenta a composição percentual dos elementos na ferramenta PVD com 120 min de usinagem.

Ponto 1 (mais próximo à aresta de corte): Composição de C (2,58%), O (3,80%), Fe (4,72%), Co (3,12%) e W (85,78%). A ausência de Al, Si, Ti e Cr, indica a remoção completa da camada de revestimento, expondo o substrato da ferramenta, composto principalmente por tungstênio (matriz) e cobalto (ligante). O leve teor de oxigênio sugere a ocorrência de um mecanismo de oxidação incipiente (Liang et al. 2023 e Gupta et al. 2022) .

Ponto 2 (mais afastado da aresta de corte): Foram identificados C (43,67%), O (11,87%), Al (3,89%), Si (2,35%) e Ti (27,05%), sem a presença de Fe e Co. O alto teor de carbono, aliado à composição compatível com o revestimento, indica que a camada protetora ainda está presente e que não ocorreu adesão neste ponto. No entanto, o aumento da concentração de oxigênio sugere a ocorrência de mecanismo de desgaste oxidativo (Liang et al. 2023 e Gupta et al. 2022).

Tabela 9 - Composição por EDS da ferramenta PVD 120min

% em massa	C-K	O-K	Al-K	Si-K	Ti-K	Fe-K	Co-K	W-M
Base(13)_pt1	2.58	3.80				4.72	3.12	85.78
Base(13)_pt2	43.67	11.87	3.89	2.35	27.05	11.16		

Fonte: O autor

Com base nos resultados obtidos, é possível afirmar que os objetivos propostos neste trabalho foram devidamente atendidos. A investigação comparativa entre as ferramentas com revestimentos CVD e PVD permitiu identificar diferenças significativas em termos de desempenho, desgaste e eficiência energética. A ferramenta revestida com TiAlSiN (PVD) apresentou maior resistência ao desgaste, menor consumo de potência e maior estabilidade dimensional da rugosidade, evidenciando-se como a alternativa mais eficiente para as condições de usinagem estudadas, além disso os resultados estão alinhados com a pesquisa bibliográfica, seus autores e seus resultados.

5 CONCLUSÕES

A seguir, são apresentadas as principais conclusões obtidas a partir dos ensaios realizados.

- O consumo de potência apresentou variações pouco expressivas, com quedas registradas mesmo à medida que o desgaste progredia em ambas as ferramentas. No entanto, a ferramenta com revestimento PVD demonstrou um desempenho mais eficiente em comparação à CVD, consumindo menos energia ao longo do processo.
- O comportamento do cavaco permaneceu relativamente estável ao longo dos ensaios. Foram observadas pequenas variações de coloração em passes intermediários, assumindo tonalidade amarronzada, mas retornando à coloração azulada nas fases finais do processo.
- Em relação à rugosidade superficial, a média de R_a foi de $0,40\text{ }\mu\text{m}$ para a ferramenta CVD e $0,42\text{ }\mu\text{m}$ para a ferramenta PVD. No entanto, a ferramenta PVD apresentou uma vantagem em termos de estabilidade, com um desvio padrão de $0,05\text{ }\mu\text{m}$, enquanto a ferramenta CVD teve um desvio padrão de $0,27\text{ }\mu\text{m}$, indicando maior variabilidade nos resultados.
- As análises de microscopia óptica indicaram, predominantemente, a presença de mecanismo de desgaste por abrasão com presença de entalhe (nas ferramentas CVD), sem ocorrência de desgaste de cratera.
- As análises de MEV e EDS identificaram mecanismos de desgaste do tipo adesivo e oxidativo. Na ferramenta CVD, após 60 minutos de uso, a composição química em um ponto próximo à aresta de corte indicou 90% em massa de tungstênio, evidenciando o desgaste total do revestimento e a exposição do substrato. Na ferramenta PVD o mesmo evento ocorreu aos 120 minutos.

- A ferramenta com revestimento PVD de camada única de TiAlSiN destacou-se pela maior resistência ao desgaste. Além disso, apresentou vantagem energética, registrando um menor consumo de energia durante os ensaios.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar ensaios monitorando temperatura, uma vez que temperaturas mais elevadas favorecem o surgimento de outros mecanismos de desgaste como a difusão e a oxidação;
- Variar parâmetros de usinagem afim de que se confirme a ferramenta que apresenta superioridade em outras faixas de trabalho;
- Relacionar o desgaste com variação do comportamento de forças utilizando auxílio de células de carga;
- Monitorar o comportamento da variação da vibração relacionado ao desgaste e a rugosidade;
- Realizar comparativo de vida útil de ferramentas com uso de métodos variados de lubrificação e refrigeração;
- Executar comparativo de outros tipos de camadas de cobertura com a ferramenta de melhor desempenho destacada neste trabalho;
- Realizar comparativos de ferramentas para diferentes tipos de materiais.

7 REFERÊNCIAS

7.1 Referências nominais

AIRAO, J.; NIRALA, C. K.; BERTOLINI, R.; KROLCZYK, G. M.; KHANNA, N. Sustainable cooling strategies to reduce tool wear, power consumption and surface roughness during ultrasonic assisted turning of Ti-6Al-4V. **Tribology International**, v. 169, p. 107494, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107494>.

AKGÜN, M.; ÖZLÜ, B.; KARA, F. Effect of PVD-TiN and CVD-Al₂O₃ Coatings on Cutting Force, Surface Roughness, Cutting Power, and Temperature in Hard Turning of AISI H13 Steel. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 32, p. 1390–1401, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11665-022-07190-9>.

AMARDEEP STEEL CENTRE. The compelling history of COR-TEN and weathering steel. 2023. Disponível em: <https://www.amardeepsteel.com>. Acesso em: 8 out. 2024.

ASLANTAS, K.; HASÇELIK, A.; ERÇETIN, A.; DANISH, Mohd; ALATRUSHI, Luqman K. H.; RUBAIEE, Saeed; MAHFOUZ, Abdullah Bin. Effect of cutting conditions on tool wear and wear mechanism in micro-milling of additively manufactured titanium alloy. **Tribology International**, v. 193, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109340>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 3685:1993: Ensaio de vida da ferramenta de ponta única para torneamento. Rio de Janeiro: ABNT, 1993.

ASTM International. (2019). ASTM A588/A588M - 19a, Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Structural Steel, up to 50 ksi [345 MPa] Minimum Yield Strength, with Atmospheric Corrosion Resistance.

AOUICI, H. Influence of cutting parameters on surface roughness and cutting forces in hard turning of AISI H11. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 27, n. 4, p. 1045-1050, 2013.

DENKANA, B.; HEINRICHS, J.; GROTE, C. Influence of tool geometry on surface quality in hard turning. **Procedia CIRP**, v. 31, p. 183-188, 2015.

MUHL, R.T. **Otimização dos Parâmetros de Usinagem de Acabamento Através da Rugosidade no Torneamento do aço ABNT 4340**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo, RS, 2019.

RATNAM, M. Factors Affecting Surface Roughness in Finish Turning. **Comprehensive Materials Finishing**, Elsevier, p.1-25, 2017.

REIS, B.C.M.; PEREIRA, N.F.S.; SANTOS, A.J.; CÂMARA, M.A.; FARIA, P.E.; RODRIGUES, P.C.M.; RU-BIO, J.C.C. Influência do material da ferramenta de corte sobre a usinabilidade do aço ABNT 4340 no torneamento. *Revista Matéria*, v.24, n.1, 2019.

BAI, Y.; ZHAO, C.; YANG, J.; HONG, R.; WENG, C.; WANG, H. Microstructure and machinability of selective laser melted high-strength maraging steel with heat treatment. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 288, 2021. ISSN 0924-0136. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116906.

BAKAR, H. N. Abu; GHANI, J. A.; CHE HARON, C. H.; GHAZALI, M. J.; KASIM, M. S.; AL-ZUBAIDI, S.; JOUINI, N. Wear mechanisms of solid carbide cutting tools in dry and cryogenic machining of AISI H13 steel with varying cutting-edge radius. **Wear**, v. 523, p. 204758, 2023. ISSN 0043-1648. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204758>. Acesso em: 9 out. 2024.

BOING, D.; OLIVEIRA, A. J. de; SCHROETER, R. B. Evaluation of wear mechanisms of PVD and CVD coatings deposited on cemented carbide substrates applied to hard turning. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 106, p. 5441–5451, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05000-x>.

CAMUŞCU, N.; ASLAN, E. A comparative study on cutting tool performance in end milling of AISI D3 tool steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 170, n. 1–2, p. 121-126, 2005. ISSN 0924-0136. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.04.111>.

COLANTONIO, L.; EQUETER, L.; DEHOMBREUX, P.; DUCOBU, F. A systematic literature review of cutting tool wear monitoring in turning by using artificial intelligence techniques. **Machines**, v. 9, n. 12, p. 351, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/machines9120351>.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 9ª. Ed. São Paulo: Artliber, 270 p, 2014.

ERASLAN, D.; BALCI, A.; ÇETIN, B.; UÇAK, N.; ÇIÇEK, A.; YILMAZ, O. D.; DAVUT, K. Machinability evaluations of austempered ductile iron and cast steel with similar mechanical properties under eco-friendly milling conditions. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 11, p. 1443-1456, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.01.123>.

FERRARESI, D. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2015.

GUPTA, M. K.; NIEŚŁONY, P.; SARIKAYA, M.; KORKMAZ, M. E.; KUNTOĞLU, M.; KRÓLCZYK, G. M.; JAMIL, M. Tool wear patterns and their promoting mechanisms in hybrid cooling assisted machining of titanium Ti-3Al-2.5V/grade 9 alloy. **Tribology International**, v. 174, p. 107773, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107773>.

HASSAN, S.; KHAN, S. A.; NAVEED, R. et al. Investigation on tool wear mechanisms and machining tribology of hardened DC53 steel through modified CBN tooling geometry in hard turning. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 127, p. 547–564, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11528-5>. Qualis A1.

INDUSTEEL. *DS-Mold 2711: W 1.2711 - Prehardened tool steel for plastic mould industry*. ArcelorMittal, 2023. Disponível em: <https://industeel.arcelormittal.com/fichier/ds-mold-2711/>. Acesso em: 14 out. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Dados sobre a indústria de transformação e PIB. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 25 jun. 2024.

ISIK, Yahya. Tool life and performance comparison of coated tools in metal cutting. **International Journal of Materials and Product Technology**, v. 39, p. 240-250, 2010. DOI: 10.1504/IJMPT.2010.035801.

KHANNA, N.; SHAH, P.; CHETAN. Comparative analysis of dry, flood, MQL and cryogenic CO₂ techniques during the machining of 15-5-PH SS alloy. **Tribology International**, v. 146, p. 106196, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106196>.

KIVAK, Turgay. Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts. **Measurement**, v. 50, p. 19-28, 2014. ISSN 0263-2241. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.12.017>.

KUNTOGLU, M. Machining induced tribological investigations in sustainable milling of Hardox 500 steel: A new approach of measurement science. **Measurement**, v. 201, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111715>.

LIANG, J.; GAO, H.; LI, D.; LEI, Y.; LI, S.; GUO, L.; CHEN, L.; LENG, Z.; SUN, Y.; LI, C. Study on milling tool wear morphology and mechanism during machining superalloy GH4169 with PVD-TiAlN coated carbide tool. **Tribology International**, v. 182, p. 108298, 2023. DOI: 10.1016/j.triboint.2023.108298.

LIU, HONGGUANG; AYED, YESSINE; BIREMBAUX, HÉLÈNE; ROSSI, FRÉDÉRIC; POULACHON, GÉRARD. Impacts of flank wear and cooling strategies on evolutions of built-up edges, diffusion wear and cutting forces in Ti6Al4V machining. **Tribology International**, v. 171, 2022, p. 107537. ISSN 0301-679X. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107537>.

MAKHESANA, MAYUR A.; PATEL, KAUSHIK M.; KROLCZYK, GRZEGORZ M.; DANISH, MOHD; SINGLA, ANIL KUMAR; KHANNA, NAVNEET. Influence of MoS₂ and graphite-reinforced nanofluid-MQL on surface roughness, tool wear, cutting temperature and microhardness in machining of Inconel 625. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 41, 2023, p. 225–238. ISSN 1755-5817. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.12.015>.

RACE, A.; ZWIERZAK, I.; SECKER, J.; WALSH, J.; CARRELL, J.; SLATTER, T.; MAUROTTO, A. Environmentally sustainable cooling strategies in milling of SA516: Effects on surface integrity of dry, flood and MQL machining. **Journal of Cleaner Production**, v. 288, p. 125580, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125580>. Acesso em: 1 nov. 2024.

SAHA, SUMAN; DEB, SANKHA; BANDYOPADHYAY, PARTHA PRATIM. Progressive wear based tool failure analysis during dry and MQL assisted sustainable micro-milling. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 212, p. 106844, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106844>.

SHARMA, Neeraj; GUPTA, Kapil. Influence of coated and uncoated carbide tools on tool wear and surface quality during dry machining of stainless steel 304. **Materials Research Express**, v. 6, n. 6, 2019. DOI: 10.1088/2053-1591/ab1e59.

SHARMA, V. S.; DOGRA, M.; SURI, N. M. **Advances in Metal Cutting and High-Speed Machining**. Springer, 2021.

SILVEIRA, M. L.; OLIVEIRA, D. de; SANTOS, A. J. dos; *et al.* Assessment of the surface integrity of AISI H13 tool steel after milling with carbide and cermet inserts. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 125, p. 3135-3148, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-10843-1>.

SOUSA, V. F. C.; SILVA, F. J. G.; ALEXANDRE, R.; FECHEIRA, J. S.; SILVA, F. P. N. Study of the wear behaviour of TiAlSiN and TiAlN PVD coated tools on milling operations of pre-hardened tool steel. **Wear**, v. 476, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203695>.

SUN, M.; GUO, K.; SIVALINGAM, V.; SUN, J.; LI, D.; HUANG, T. Understanding the tool wear mechanism during robotic milling of glass fibre reinforced plastic. **Tribology International**, v. 195, p. 109648, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109648>.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. Butterworth-Heinemann, 2000.

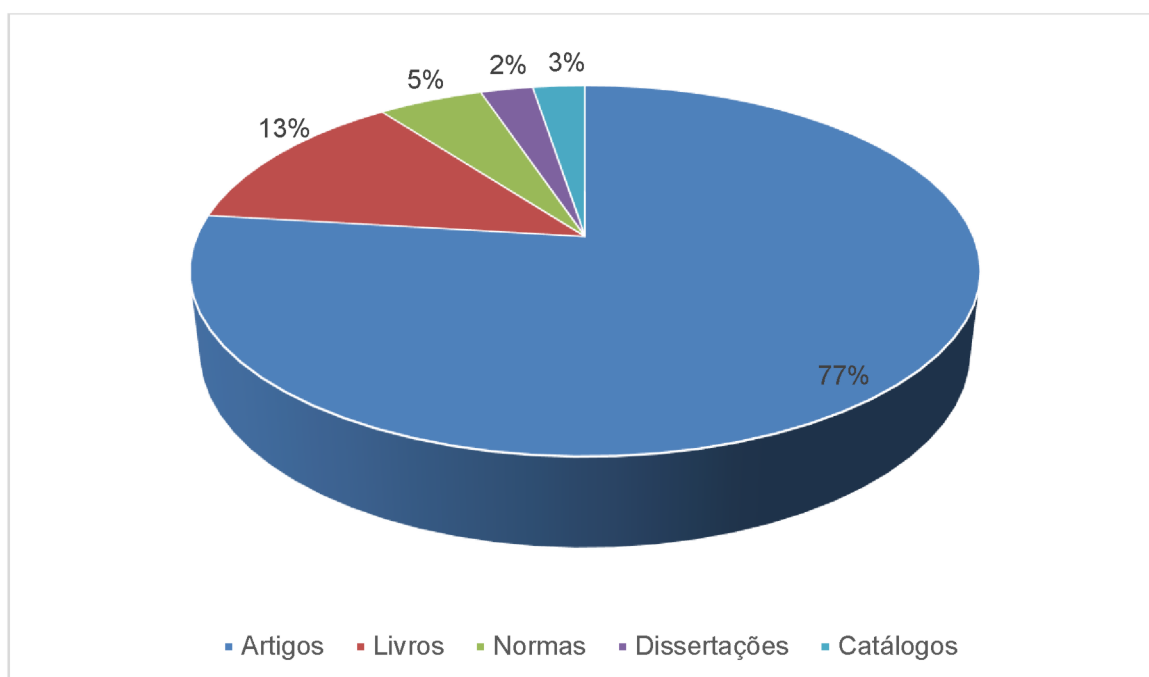
WANG, X.; ZHANG, M.; ZHAO, B.; DING, W.; ZHAO, Z.; CUI, H.; WANG, M. Effects of longitudinal ultrasonic vibration on tool wear behaviors in side milling of GH4169D superalloy. **Tribology International**, v. 198, p. 109918, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109918>.

YAQOOB, SAIMA; GHANI, JAHARAH A.; JOUINI, NABIL; JURI, AFIFAH Z. Performance Evaluation of PVD and CVD Multilayer-Coated Tools in Machining High-Strength Steel. *Coatings, Basel*, v. 14, p. 8392, 2024. Disponível em: <https://www.thefreelibrary.com/Performance+Evaluation+of+PVD+and+CVD+Multilayer-Coated+Tools+in...-a0803764726>.

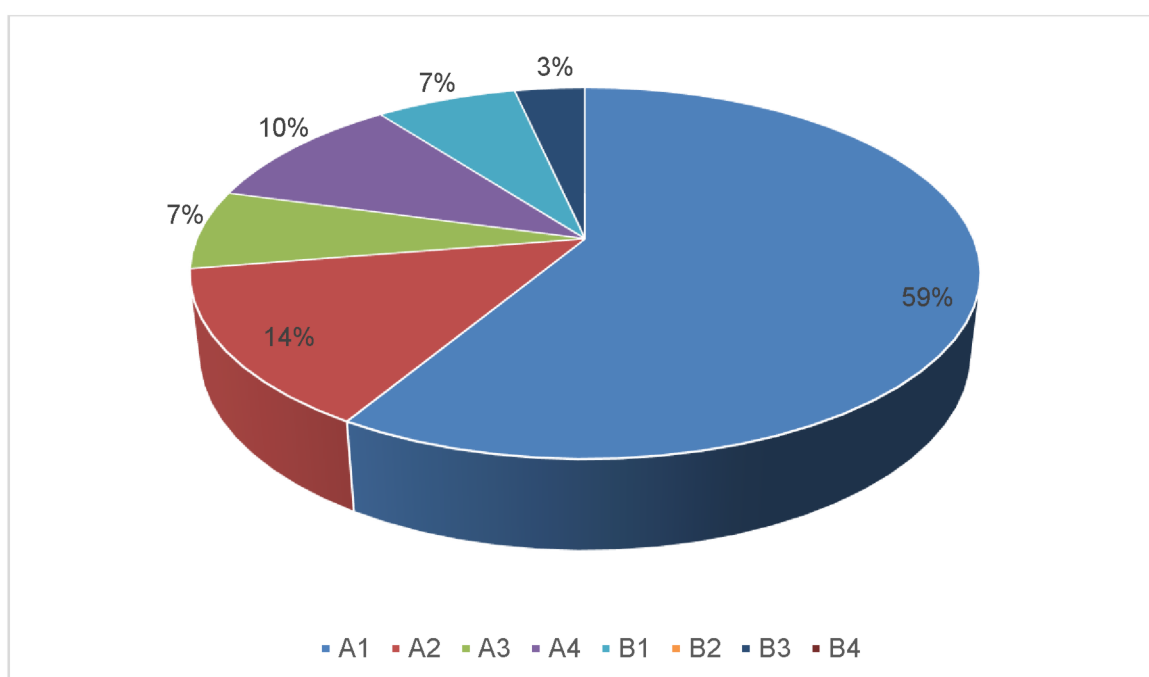
ZHANG, J.; KANG, X.; CAO, H. *et al.* Research on feasible region of specific cutting energy and surface roughness in high-speed dry milling of 30CrMnSiNi2A steel with CVD and PVD coated inserts. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 125, p. 133–155, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10647-9>.

ZHANG, X.; ZHANG, K.; DANG, J.; TU, L.; WANG, Q.; MING, W.; WANG, D.; LIU, Z., & CHEN, M. Analysis of tool wear and cutting characteristics in milling of powder metallurgy nickel-based superalloy by various coatings. **Wear**, v. 552–553, 2024, 205429. ISSN 0043-1648. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2024.205429>.

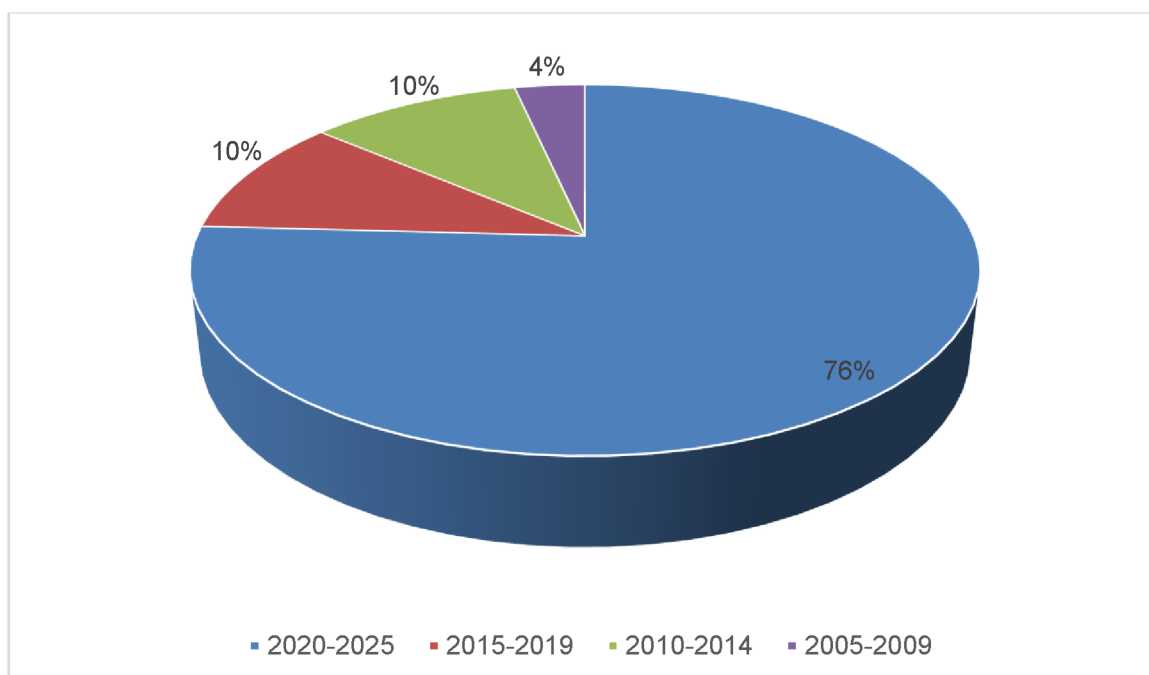
7.2 Referências por extrato



7.3 Referências por qualis



7.4 Referências por data dos artigos



8 APÊNDICE - RELATÓRIO COMPLETO DOS ENSAIOS

Ferramenta	Tempo (min)	Rugosidade média Ra (μm)	Potência Ativa (W)	Desgaste médio (μm)
CVD 1	0	0,20	1740,00	0,00
CVD 2	0	0,20	1560,00	0,00
CVD 3	0	0,19	NR	0,00
Médias	0	0,20	1650,00	
PVD 1	0	0,21	NR	0,00
PVD 2	0	0,31	1530,00	0,00
PVD 3	0	0,33	NR	0,00
Médias		0,28	1530,00	
CVD 1	10	0,51	1530,00	62,24
CVD 2	10	NR	1440,00	86,56
CVD 3	10	0,44	1500,00	70,51
Médias		0,48	1490,00	73,10
PVD 1	10	0,30	NR	53,49
PVD 2	10	0,37	1410,00	61,39
PVD 3	10	0,38	1380,00	52,03
Médias		0,35	1395,00	55,64
CVD 1	20	0,51	1500,00	156,59
CVD 2	20	0,65	NR	112,82
CVD 3	20	1,10	1800,00	80,81
Médias		0,75	1650,00	116,74
PVD 1	20	0,45	NR	80,29
PVD 2	20	0,49	1380,00	62,13
PVD 3	20	0,49	1350,00	
Médias		0,48	1365,00	71,21
CVD 1	30	0,70	1500,00	162,42
CVD 2	30	0,75	1410,00	119,63
CVD 3	30	1,30	1380,00	111,83
Médias		0,92	1430,00	131,29
PVD 1	30	0,30	1500,00	79,25
PVD 2	30	0,51	1425,00	72,00
PVD 3	30	0,55	1380,00	69,89
Médias		0,45	1435,00	73,71

Ferramenta	Tempo (min)	Rugosidade média Ra (μm)	Potência Ativa (W)	Desgaste médio (μm)
CVD 1	40	0,52	NR	131,04
CVD 2	40	0,60	1440,00	126,43
Médias		0,56	1440,00	128,74
PVD 1	40	0,29	1440,00	85,17
PVD 2	40	0,60	1350,00	84,61
Médias		0,45	1395,00	84,89
CVD 1	50	0,26	1380,00	181,87
CVD 2	50	0,34	NR	149,78
Médias		0,30	1380,00	165,83
PVD 1	50	0,34	1380,00	100,17
PVD 2	50	0,52	1380,00	85,59
Médias		0,43	1380,00	92,88
CVD 1	60	NR	1410,00	218,34
CVD 2	60	0,22	1530,00	148,32
Médias		0,22	1470,00	183,33
PVD 1	60	0,30	1380,00	152,69
PVD 2	60	0,51	1380,00	105,52
Médias		0,41	1380,00	129,11
CVD 1	70	NR	1500,00	186,22
PVD 1	70	0,35	1410,00	119,14
CVD 1	80	0,40	1710,00	265,51
PVD 1	80		1410,00	160,48
CVD 1	90	0,30	1470,00	277,67
PVD 1	90	0,40	NR	176,04
CVD 1	100	0,40	1560,00	324,84
PVD 1	100	0,44	1410,00	202,78
CVD 1	120	1,05	1650,00	Meia vida
PVD 1	120	0,42	1650,00	127,41