



# Estudo da maquinagem de ligas para a indústria aeroespacial utilizando revestimentos avançados

LILIANA ISABEL FLORIM ROCHA

outubro de 2024

# **Estudo da maquinagem de ligas para a indústria aeroespacial utilizando revestimentos avançados**

**Liliana Isabel Florim Rocha**

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica, Área de Especialização em  
Materiais e Tecnologias de Fabrico**

**Orientador: Professor Filipe Daniel Fernandes, Professor Adjunto, ISEP**

**Co-orientador: Professora Rita Cássia Mendonça Sales Contini, Investigadora, ISEP**

**Júri: Doutor Manuel António Peralta Evaristo, Investigador, Universidade de Coimbra**

Presidente:

Professora Rafaela Carla Barros Casais, Professor Adjunto, ISEP

Porto, setembro de 2024

# Agradecimentos

Gostaria de começar por agradecer ao Prof. Filipe Daniel Fernandes por todo o apoio, orientação, disponibilidade e capacidade de fazer acontecer, fundamentais para a finalização do presente trabalho.

Agradeço ao Engenheiro Víctor Moreira e Engenheira Rita Contini, pela disponibilidade e auxílio na realização dos ensaios práticos apresentados neste trabalho.

Agradeço ao Doutor Diogo Cavaleiro, investigador no Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade de Coimbra (FCTUC), pela ajuda e colaboração na operação do microscópio eletrónico de varrimento (SEM/EDS), bem como o contributo na obtenção das imagens e auxílio na interpretação de resultados.

Um grande obrigado à empresa INOVATOOLS, S.A. pelo fornecimento das ferramentas de corte, com e sem revestimento, sem elas este trabalho não seria realizado.

Agradeço principalmente a ti, meu PAI, que partiste tão cedo e não tiveste oportunidade de me acompanhar e saudar o término de mais um objetivo que tanto lutei para conseguir. Podes não estar presente fisicamente, mas continuas a estar sempre no meu coração. Te Amo!

Agradeço ao meu amigo José Figueiredo pelas horas de apoio que teve comigo ao longo destes anos, pelo incentivo e determinação.

Por fim, agradeço a todos que de forma direta ou indireta ajudaram a atingir este tão ansioso objetivo. Sem vós, não teria sido igual.

A todos, o meu muito obrigada.



# Resumo

As ligas de titânio possuem uma combinação excelente de propriedades mecânicas como elevada resistência à corrosão, baixa densidade, elevada resistência específica e baixo módulo de elasticidade, o que as torna muito atrativas para a indústria aeroespacial. No entanto, este tipo de ligas são muito difíceis de maquinar devido à sua baixa condutividade térmica, alta reatividade química, alta dureza, o que implica que as ferramentas necessitem de possuir características específicas para conseguirem maquinar e ter um tempo de vida útil que seja rentável para o processo. Estas ligas são, portanto, ligas designadas como materiais difíceis de maquinar. Os materiais base convencionais para fabrico de ferramentas de corte, como o aço rápido, não têm a capacidade de manter a dureza e outras propriedades mecânicas quando submetidos a elevadas velocidades de corte. No entanto, verificou-se que o uso de revestimentos duros sobre a superfície das ferramentas de corte permitem melhorar o seu desempenho, aumentar a rentabilidade do processo e a qualidade da superfície das peças maquinadas. Assim, o objetivo desta dissertação consiste em avaliar o comportamento ao desgaste de fresas revestidas pela empresa Inovatools, durante a maquinação de ligas de titânio. O tempo de vida das ferramentas foi avaliado, variando a velocidade de corte, variando comprimento de corte e avanço por dente. Após a realização dos ensaios de maquinação, foi analisada a rugosidade da superfície da peça maquinada, avaliado o desgaste da ferramenta, caracterizados os mecanismos de desgaste e determinado o tempo de vida da ferramenta. Foi constatado que o avanço por dente tem uma forte influência no desgaste das fresas e na rugosidade superficial da peça maquinada. Quanto maior é este parâmetro pior é a qualidade da superfície e maior o desgaste da ferramenta. Também se verificou que com o aumento do comprimento de corte a qualidade superficial diminui e o desgaste aumenta gradualmente, independentemente do valor de velocidade de corte. Relativamente aos mecanismos de desgaste identificados, predominantemente, o desgaste é abrasivo. Observou-se também desgaste adesivo, principalmente para maiores valores de avanço por dente, em que as fresas apresentaram muitas aparas, contribuindo para a aderência ao substrato. Quanto à vida útil da ferramenta, foi observado que quanto maior a velocidade de corte, maior o desgaste, principalmente para maiores valores de comprimento de corte e, conseqüentemente, menor a vida útil da ferramenta. Assim, o parâmetro que teve maior influência na vida útil da ferramenta, para além do comprimento de corte, foi a velocidade de corte.

**Palavras-chave:** Fresagem, Ligas de titânio, Ferramentas de corte, Aplicações de engenharia aeroespacial.



# Abstract

Titanium alloys have an excellent combination of mechanical properties such as high corrosion resistance, low density, high specific strength and low modulus of elasticity, which makes them very attractive for the aerospace industry. However, these types of alloys are very difficult to machine due to their low thermal conductivity, high chemical reactivity and high hardness, which means that the tools need to have specific characteristics in order to be able to machine and have a useful life that is profitable for the process. These alloys are therefore designated as difficult-to-machine materials. Conventional base materials for manufacturing cutting tools, such as high-speed steel, do not have the ability to maintain hardness and other mechanical properties when subjected to high cutting speeds. However, it has been found that the use of hard coatings on the surface of cutting tools allows for improved performance, increased process profitability and the surface quality of machined parts. Thus, the objective of this dissertation is to evaluate the wear behavior of milling cutters coated by the company Inovatools, during the machining of titanium alloys. The tool life was evaluated, varying the cutting speed, cutting length and feed per tooth. After performing the machining tests, the surface roughness of the machined parts were analyzed, tool wear was evaluated, the wear mechanisms were characterized and the tool lifetime was accessed. It was found that the feed per tooth has a strong impact on the wear of the milling cutters and on the surface roughness of the machined parts. The higher this parameter is, the worse the surface quality and the greater the tool wear are. It was also found that with the increase in the cutting length, the surface quality decreases; and the wear gradually increases, regardless of the cutting speed used. Regarding the wear mechanisms, the predominant wear abrasive wear. Adhesive wear was also observed, especially when the feed rate per tooth was higher, in which the cutters presented many chips, contributing to their adhesion to the substrate. Regarding tool life, it was found that the higher the cutting speed, the greater the wear, especially for higher cutting length values and, consequently, the shorter the tool lifetime. Thus, the parameter that had the greatest influence on tool life, besides cutting length, was cutting speed.

**KEYWORDS:** Milling, Titanium Alloys, Cutting tools, Aerospace engineering applications.



# Índice

1. Introdução.....	1
1.1. Contextualização .....	1
1.2. Objetivos .....	1
1.3. Metodologia .....	2
1.4. Estrutura do relatório.....	3
2. Revisão Bibliográfica .....	5
2.1. Importância das ligas de titânio na indústria.....	5
2.1.1. Fases das ligas de titânio.....	7
2.2. Problemas na maquinagem das ligas de Ti .....	9
2.3. Soluções utilizadas para melhorar a maquinagem das ligas de titânio .....	11
2.4. Materiais base usados na produção de ferramentas.....	15
2.5. Revestimentos usados na proteção de superfície de ferramentas de maquinagem para ligas de Ti.....	21
2.5.1. Classificação baseada na arquitetura do revestimento.....	21
2.5.2. Revestimentos realizados por PVD .....	23
2.5.3. Revestimentos realizados por CVD .....	26
2.5.4. Técnicas de deposição híbrida .....	28
3. Métodos e Aplicação.....	29
3.1. Materiais .....	29
3.1.1. Material a maquinar .....	29
3.1.2. Substrato e geometria da ferramenta .....	30
3.2. Métodos e Equipamentos .....	31
3.2.1. Equipamentos e condições de maquinagem .....	31
3.2.2. Análise da rugosidade da superfície maquinada .....	35
3.2.3. Análise de desgaste e espessura do revestimento .....	36
3.2.4. Caracterização dos mecanismos de desgaste.....	37
3.2.5. Caracterização dos equipamentos de medição de força de corte .....	39
3.2.6. Avaliação da vida útil da ferramenta .....	40
4. Resultados e Discussão .....	43
4.1. Caracterização do revestimento .....	43
4.2. Análise da superfície maquinada .....	44
4.2.1. Velocidade de corte = 60m/min .....	44
4.2.2. Velocidade de corte = 70m/min .....	45
4.2.3. Velocidade de corte = 80m/min .....	47
4.3. Análise das forças de corte .....	47
4.3.1. Velocidade de corte = 60m/min .....	48

4.3.2. Velocidade de corte = 70m/min .....	49
4.3.3. Velocidade de corte = 80m/min .....	49
4.4. Caracterização de desgaste na ferramenta.....	50
4.4.1. Velocidade de corte = 60m/min .....	51
4.4.2. Velocidade de corte = 70m/min .....	52
4.4.3. Velocidade de corte = 80m/min .....	54
4.5. Análise dos mecanismos de desgaste .....	56
4.5.1. Velocidade de corte = 60m/min .....	57
4.5.2. Velocidade de corte = 70m/min .....	58
4.5.3. Velocidade de corte = 80m/min .....	60
4.6. Análise da vida útil da ferramenta .....	63
5. Conclusão .....	65
5.1. Conclusões finais .....	65
5.2. Trabalhos futuros .....	66
Referências.....	67
Declaração de Integridade .....	71
Anexo A – Imagens SEM das fresas.....	73



# Lista de Figuras

Figura 1 - Número de artigos publicados sobre torneamento e fresamento de ligas Ti [1].....	6
Figura 2 - Fases das ligas de titânio [1] .....	8
Figura 3 - Sistema de transporte do azoto do tanque até à saída [7].....	13
Figura 4 - Rugosidade versus diferentes ambiente para as três ferramentas TP100, TP200 e TP1000 [11].....	14
Figura 5 - Classificação de diferentes materiais de ferramentas de corte em função da tenacidade e dureza [27] .....	16
Figura 6 - Desgaste médio do flanco versus tempo de corte da ferramenta [3] .....	17
Figura 7 - Arquiteturas típicos de revestimento [33].....	21
Figura 8 - Testes de corte no fresamento da liga de titânio VT20 para diferentes tipos de revestimentos [34].....	22
Figura 9 – Diagrama esquemático abreviado de algumas das variantes desenvolvidas com base na técnica PVD (Adaptado de [27; 31]).....	23
Figura 10 - Diagrama esquemático do método de revestimento PVD de (a) projeção catódica e de (b) evaporação [31].....	24
Figura 11 - Representação esquemática da pulverização catódica que ocorre no processo HiPIMS [27] .....	25
Figura 12 - Diagrama abreviado das diversas variantes desenvolvidas do processo CVD [31] .	27
Figura 13 - Peça a maquinar.....	30
Figura 14 - Exemplo ferramentas de corte utilizadas: a) com revestimento (ref. 266.060.00); b) sem revestimento (ref. 998074105) .....	31
Figura 15 - Centro de maquinagem CNC HAAS (Oxnard, CA, USA).....	32
Figura 16 - Prensa modelo One-Lok da CHICK .....	32
Figura 17 - Exemplo processo troca de uma ferramenta.....	33
Figura 18 - Medição da rugosidade superficial com rugosímetro .....	36
Figura 19 –a) Microscópio eletrónico de varrimento: Hitachi SU3800; b) Ferramentas inseridas para análise no SEM.....	37
Figura 20 - Tipos de desgaste de flanco em fresas de topo [37].....	38
Figura 21 - Zona de referência utilizada na medição do desgaste e numeração das lâminas de corte .....	38
Figura 22 - Equipamento utilizado para medição de forças de corte .....	39
Figura 23 - Microscópio digital Dino-Lite Edge .....	40
Figura 24 - Morfologia e espessura do revestimento .....	43
Figura 25 - Valor de rugosidade superficial média obtida para todas as condições testadas com velocidade de corte de 60m/min.....	44
Figura 26 - Valor de rugosidade superficial média obtida para todas as condições testadas com velocidade de corte de 70m/min.....	46
Figura 27- Valor de rugosidade superficial média obtida para todas as condições testadas com velocidade de corte de 80m/min.....	47

Figura 28 - Forças de corte para todas as condições testadas com velocidade de corte de 60m/min .....	48
Figura 29 - Forças de corte para todas as condições testadas com velocidade de corte de 70m/min .....	49
Figura 30 - Forças de corte para todas as condições testadas com velocidade de corte de 80m/min .....	50
Figura 31 - Valor médio de desgaste (VB3) para todas as condições testadas com velocidade de corte de 60m/min .....	51
Figura 32 - Imagens SEM da vista de topo das ferramentas CT60_L5 (a) e UCT60_L5 (b) para Fz=0,1mm/dente.....	52
Figura 33 - Imagens SEM da vista de topo das ferramentas CT60_L15 (a) e UCT60_L10 (b) para Fz=0,03mm/dente.....	52
Figura 34 - Valor médio de desgaste (VB3) para todas as condições testadas com velocidade de corte de 70m/min .....	53
Figura 35 - Imagens SEM da vista de topo das ferramentas CT70_L5 (a) e UCT70_L5 (b) para Fz=0,1mm/dente.....	54
Figura 36 - Imagens SEM da vista de topo das ferramentas CT70_L15 (a) e UCT70_L10 (b) para Fz=0,026mm/dente.....	54
Figura 37 - Valor médio de desgaste (VB3) para todas as condições testadas com velocidade de corte de 80m/min .....	55
Figura 38 - Imagens SEM da vista de topo das ferramentas CT80_L5 (a) e UCT80_L5 (b) para Fz=0,1mm/dente.....	56
Figura 39 - Imagens SEM da vista de topo das ferramentas CT80_L15 (a) e UCT80_L10 (b) para Fz=0,026mm/dente.....	56
Figura 40 - Análise EDS da ferramenta CT70F3L15 .....	60
Figura 41 - Análise EDS da ferramenta CT80F10L5 .....	61
Figura 42 - Análise EDS da ferramenta CT80F3L15 .....	62
Figura 43 - Progressão do desgaste em função da velocidade de corte.....	63



# Lista de Tabelas

Tabela 1 - Cronograma de atividades .....	3
Tabela 2 - Ligas de titânio classificadas por estrutura metalúrgica [28; 29; 30].....	8
Tabela 3 - Exemplos de fontes de calor do processamento de pré-aquecimento [4] .....	12
Tabela 4 - Influência de métodos de maquinagem na qualidade superficial, na vida útil da ferramenta e no impacto ambiental [33] .....	15
Tabela 5 - Diferentes ferramentas corte versus diferentes métodos de fresamento .....	18
Tabela 6 - Propriedades mecânicas da liga Ti4Al6V [35] .....	29
Tabela 7 - Composição química da liga Ti4Al6V [35] .....	30
Tabela 8 – Dimensão das fresas utilizadas neste trabalho .....	31
Tabela 9 - Parâmetros de corte utilizados por ferramenta.....	34
Tabela 10 - Condições de corte selecionadas para análise da vida útil da ferramenta. ....	41
Tabela 11 - Composições químicas em percentagem atômica do revestimento .....	44
Tabela 12 - Vista topo das ferramentas revestidas e não revestidas testadas a 60 m/min de velocidade de corte, com $F_z=0,03; 0,07$ e $0,1\text{mm/dente}$ e $L=5\text{m}$ .....	57
Tabela 13 - Vista topo das ferramentas revestidas e não revestidas testadas a 60 m/min de velocidade de corte, com $F_z= 0,026$ e $0,03\text{mm/dente}$ e $L=5, 10$ e $15\text{m}$ .....	58
Tabela 14 - Vista topo das ferramentas revestidas e não revestidas testadas a 70 m/min de velocidade de corte, com $F_z=0,03; 0,07$ e $0,1\text{mm/dente}$ e $L=5\text{m}$ .....	58
Tabela 15 - Vista topo das ferramentas revestidas e não revestidas testadas a 70 m/min de velocidade de corte, com $F_z= 0,026$ e $0,03\text{mm/dente}$ e $L=5, 10$ e $15\text{m}$ .....	59
Tabela 16 - Vista topo das ferramentas revestidas e não revestidas testadas a 80 m/min de velocidade de corte, com $F_z=0,03; 0,07$ e $0,1\text{mm/dente}$ e $L=5\text{m}$ .....	60
Tabela 17 - Vista topo das ferramentas revestidas e não revestidas testadas a 80 m/min de velocidade de corte, com $F_z= 0,026$ e $0,03\text{mm/dente}$ e $L=5, 10$ e $15\text{m}$ .....	62



# Acrónimos e Símbolos

## Lista de Acrónimos

Abr.	Abril
ACF	<i>Atomization cutting fluid</i>
Ago.	Agosto
APCV	<i>Atmospheric pressure chemical vapor deposition</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BCBN	<i>Binderless cubic boron nitride</i>
BMS	<i>Balanced magnetron sputtering</i>
CAD	<i>Computer-aided design</i>
CBN	Cubic boron nitrite
CCA	<i>Cold compressed air</i>
C-HPMS	<i>Continuous high-power magnetron sputtering</i>
CNC	<i>Computer Numerical Control</i>
CVD	<i>Chemical Vapor Deposition</i>
DC	<i>Direct-current</i>
DCMS	<i>Direct-current magnetron sputtering</i>
Dez.	Dezembro
DLC	Diamond-like carbon
DMS	<i>Dual Magnetron Sputtering</i>
EDS	<i>Energy-dispersive X-ray spectroscopy</i>
FEM	<i>Finite Element Modeling</i>
Fev.	Fevereiro
Jul.	Julho
Jun.	Junho
HiPIMS	<i>High-Power Impulse Magnetron Sputtering</i>
HSS	<i>High Speed Steel</i>
Jan.	Janeiro
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
LAM	<i>Laser assisted machining</i>
LCVD	<i>Laser chemical vapor deposition</i>
LPCVD	<i>Low-pressure chemical vapor deposition</i>
Mar.	Março
MDC	<i>Microcrystalline diamond coating</i>
MEP	<i>Magnetically Enhanced Plasma</i>
METIP	Metodologias de Investigação e Planeamento

MQL	<i>Minimum quantity lubrication</i>
MQLN	<i>MQL with nanoparticle</i>
NDC	<i>Nanocrystalline diamond coating</i>
Nov.	Novembro
UAM	<i>Ultrasonically assisted machining</i>
Out.	Outubro
PACVD	<i>Plasma assisted chemical vapor deposition</i>
PCD	<i>Plycrystalline diamonds</i>
PCBN	<i>Plycrystalline cubic boron nitrides</i>
PECVD	<i>Plasma enhanced chemical vapor deposition</i>
P.Porto	Instituto Politécnico do Porto
PCD	<i>Polycrystalline diamond</i>
PVD	<i>Physical Vapor Deposition</i>
RD	<i>Radio Frequency</i>
SEM	<i>Scannig electron microscope</i>
Set.	Setembro
TAM	<i>Thermally assisted machining</i>
UBMS	<i>Unbalanced Magnetron Sputtering</i>
UTS	<i>Ultimate tensile strength</i>
UVAM	<i>Ultrasonic vibration assisted milling</i>

## Lista de Símbolos

%	Percentagem	%
∅	Diâmetro	μm
α	Alfa	α
Al	Alumínio	Al
β	Beta	β
C	Carbono	C
Co	Cobalto	Co
Cr	Crómio	Cr
Cu	Cobre	Cu
E	Modulo de elasticidade	GPa
F	Força adesiva	N
Fe	Ferro	Fe
Kr	Criptónio	Kr
N <sub>2</sub>	Azoto	N <sub>2</sub>
Nb	Nióbio	Nb

Ne	Neônio	Ne
Mn	Manganês	Mn
Mo	Molibdênio	Mo
Ni	Níquel	Ni
Pd	Paládio	Pd
Ra	Rugosidade superficial	nm
S	Enxofre	S
Si	Silício	Si
Sn	Estanho	Sn
Re	Rênio	Re
T	Temperatura	°C; K
Ta	Tântalo	Ta
Ti	Titanium	Ti
TiAlN	Nitreto de titânio e alumínio	TiAlN
TiB <sub>2</sub>	Di-Boreto de Titânio	TiB <sub>2</sub>
TiC	Carboneto de titânio	TiC
TiCN	Carbonitreto de titânio	TiCN
TiN	Nitreto de titânio	TiN
V	Vanádio	V
V <sub>c</sub>	<i>Cutting Speed</i>	m/min
V <sub>f</sub>	<i>Feed Speed</i>	m/min
WC	Carboneto de tungstênio	WC
Xe	Xenônio	Xe
Zr	Zircônio	Zr





# 1. Introdução

Neste capítulo é apresentada uma contextualização do tema selecionado para este projeto de dissertação e os seus principais objetivos. Neste capítulo é ainda indicada a metodologia a seguir no desenvolvimento do presente relatório e a sua estrutura.

## 1.1. Contextualização

A maquiabilidade das ligas de titânio tem sido um tema de grande interesse para indústria e investigação científica em todo o mundo. Estas ligas são amplamente utilizadas na indústria aeroespacial, biomédica, automóvel e naval devido às suas excelentes propriedades mecânicas. A utilização de ligas de titânio tiveram um aumento exponencial especialmente na indústria aeroespacial, devido à sua excelente resistência à corrosão e à sua boa relação resistência/peso.

O titânio é o sétimo metal mais abundante além do alumínio, ferro e magnésio. O aumento da competitividade e dos requisitos legislativos na indústria aeronáutica promoveu uma necessidade de desenvolver produtos e processos mais rentáveis e sustentáveis para este setor. As ligas de titânio são um exemplo de materiais amplamente usados nesta indústria, por apresentarem alta resistência mecânica, boa resistência à corrosão e baixo peso. Contudo, estas excelentes propriedades provocam um elevado desgaste na ferramenta de corte, tornando-as difíceis de maquinar. Durante o processo de maquinagem as ferramentas convencionais desgastam-se muito rapidamente dada a baixa condutividade térmica das ligas de titânio, originando elevadas temperaturas junto à aresta de corte e adesão do material da peça à ferramenta de corte. A análise e identificação das condições adequadas de maquinagem é a chave para obter um bom acabamento superficial da peça e um aumento do tempo de vida das ferramentas [1;3].

## 1.2. Objetivos

O principal objetivo do presente trabalho foi avaliar o efeito do revestimento e a influência de diferentes parâmetros de corte (velocidade de corte, comprimento de corte e avanço por dente), no tempo de vida de ferramentas de corte e na qualidade final da superfície da liga maquinada, durante a fresagem de uma liga de titânio usada na indústria aeronáutica (TiAl6V4).

Para cumprir o objetivo principal os seguintes sub-objetivos têm de ser cumpridos:

- Identificar os principais problemas de maquiagem nas ligas de Ti;
- Identificar os revestimentos atualmente utilizados na proteção das ferramentas de corte para maquinar ligas de Ti;
- Avaliar o tempo de vida das ferramentas;
- Avaliar os mecanismos de desgaste/modos de degradação;

- Verificar como é que a combinação dos vários parâmetros de corte afeta o tempo de vida das ferramentas e a qualidade superficial das peças maquinadas;
- Comparar o desempenho das fresas revestidas e fresas não revestidas.

### 1.3. Metodologia

A metodologia seguida para a realização deste relatório foi o estudo e análise de trabalhos, livros e dissertações realizados na área de maquinagem, particularmente na maquinagem de ligas de Ti e revestimentos aplicados às ferramentas de corte. A metodologia foi dividida em quatro grandes capítulos: Revisão Bibliográfica, Materiais e Métodos, Resultados e Discussão.

No capítulo revisão bibliográfica foi realizada uma investigação sobre o tema proposto recorrendo a artigos científicos publicados, livros e trabalhos académicos. Numa primeira fase foi descrita a importância das ligas de titânio para a indústria, descrevendo as principais ligas Ti utilizadas; os principais problemas decorrentes da maquinagem deste tipo de ligas, focando no processo de fresagem; as soluções utilizadas para melhorar a sua maquiabilidade, descrevendo as diversas técnicas já testadas até ao momento; e os principais revestimentos usados na proteção das ferramentas, para que no capítulo Resultados e Discussão seja possível identificar os mecanismos de desgaste e comparar a rentabilidade do revestimento usado nas ferramentas.

No capítulo Materiais e Métodos é feita uma breve descrição da liga Ti4Al6V, descritas as características e dimensões das ferramentas a utilizar, para assim estabelecer e selecionar os parâmetros de corte que serão utilizados neste trabalho, como velocidade de corte, comprimento de corte e avanço por dente, e analisar como estes influenciam o processo, tanto em termos de desgaste associado, quanto de vida útil da ferramenta e qualidade da superfície maquinada.

Por fim, no capítulo Resultados e Discussão é apresentada e debatida a vida útil das ferramentas resultantes da fresagem das ligas de titânio, com base nas condições de maquinagem, na qualidade da superfície maquinada, nos tipos de mecanismos de desgaste e na influência dos diversos parâmetros de corte.

Na tabela seguinte é apresentado o cronograma de atividades a realizar durante o período de execução da presente dissertação.

Tabela 1 - Cronograma de atividades

	Out.	Nov.	Dez.	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.
Estado de arte												
Análise do comportamento das ferramentas em contexto de fresagem												
Análise de mecanismos de desgaste												
Análise do tempo de vida útil das ferramentas												
Discussão de resultados												
Escrita da tese												

## 1.4. Estrutura do relatório

Esta dissertação encontra-se dividida em seis capítulos: 1. Introdução, 2. Revisão Bibliográfica, 3. Métodos e Aplicação, 4. Resultados e Discussão, 5. Conclusões e 6. Referências Bibliográficas. O primeiro capítulo, apresenta uma breve introdução ao tema selecionado, contextualizando-o no mercado atual. Para além disso apresenta, os objetivos, a metodologia seguida e a estrutura do presente relatório. No segundo capítulo é feita a revisão bibliográfica do tema selecionado, sendo este dividido em cinco subcapítulos. O subcapítulo 2.1 descreve a importância atual das ligas de titânio na indústria; o subcapítulo 2.2 apresenta os principais problemas detetados, até aos dias de hoje, na maquinaria das ligas Ti; o subcapítulo 2.3 relata as soluções já usadas e que continuam a ser aplicadas para melhorar o processo de maquinaria; o subcapítulo 2.4 apresenta os materiais base mais indicados e usados na produção das ferramentas de corte para os materiais difíceis de maquinar; e, por fim, o subcapítulo 2.5 analisa e apresenta os principais revestimentos usados como proteção de superfície da ferramenta, avaliando o seu rendimento para cada tipo de revestimento. O terceiro capítulo apresenta os materiais utilizados e métodos aplicados, este encontra-se dividido em vários subcapítulos, nomeadamente: o subcapítulo 3.1 é focado nos materiais utilizados e encontra-se dividido em dois subcapítulos: 3.1.1. Material a maquinar, que diz respeito à liga Ti4Al6V; 3.1.2. Substrato e geometria da ferramenta, esclarecendo que tipos de ferramentas foram utilizadas na parte experimental. De seguida, o subcapítulo 3.2. apresenta todos os métodos e equipamentos necessários para a execução dos ensaios, descrevendo os procedimentos utilizados para cada análise utilizada neste trabalho; o subcapítulo 3.3. descreve os equipamentos e condições de maquinaria utilizados; no subcapítulo 3.4. é apresentada a análise da rugosidade da superfície maquinada para cada uma das condições testadas; o subcapítulo 3.5. realiza uma análise do desgaste e espessura do revestimento; no subcapítulo 3.6. é apresentada a caracterização dos mecanismos de desgaste detetados nas ferramentas com e sem revestimento; o subcapítulo 3.7. descreve a caracterização dos equipamentos de medição de força de corte utilizados e o subcapítulo 3.8. realiza uma avaliação da vida útil da ferramenta, comparando entre os diferentes parâmetros. O quarto capítulo diz respeito aos

resultados obtidos. Encontra-se subdividido em seis subcapítulos. O subcapítulo 4.1. Caracterização do revestimento; apresenta os resultados obtidos quanto à espessura do revestimento e sua caracterização. Subcapítulo 4.2. Análise de superfícies maquinadas; realiza uma análise da rugosidade da superfície maquinada. Subcapítulo 4.3. Análise de forças de corte; apresenta as forças de corte desenvolvidas no processo. Subcapítulo 4.4. Caracterização do desgaste na ferramenta; apresenta medições de desgaste de flanco. Subcapítulo 4.5. Análise de mecanismos de desgaste; mostra e identifica os mecanismos de desgaste resultantes do processo e, por fim, o subcapítulo 4.6. Análise de vida útil da ferramenta; apresenta a análise e os resultados referentes à vida útil da ferramenta. Para isso, os subcapítulos 4.2., 4.3., 4.4. e 4.5. foram divididos em três subcapítulos referentes à condição de teste baseada na velocidade de corte 60, 70 e 80m/min. O quinto capítulo apresenta as conclusões do estudo, bem como propostas para trabalhos futuros. O último capítulo, expõe todas as referências bibliográficas que suportam a escrita da presente dissertação.

## 2. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo, será apresentada a revisão bibliográfica sobre os principais temas que vão de encontro selecionado. Pretende-se ter uma noção sobre quais os problemas detetados durante a maquinagem das ligas Ti, que soluções foram encontradas, quais as ferramentas mais adequadas e que revestimentos são mais indicados, para se comparar com os materiais a testar na fase de investigação.

### 2.1. Importância das ligas de titânio na indústria

As ligas de titânio são produzidas combinando titânio com vários elementos de liga. Esta união contribui para que as ligas Ti sejam leves, com alta resistência mecânica, excelente tenacidade, boa resistência à corrosão e apresentem elevada resistência a altas temperaturas. O titânio é um elemento que possui menos 60% de densidade comparativamente ao aço e superligas [1].

Através do processamento e deformação de ligas de Ti, a resistência pode ser significativamente melhorada. Estas ligas ajudam a substituir materiais pesados, aumentando os padrões de segurança e assim reduzir o número de acidentes e falhas. Para além disso, têm alta resistência à fadiga, excelente tenacidade à fratura, resistência específica aprimorada e excelente resistência à oxidação. Devido a estas excelentes propriedades, as ligas de Ti são um candidato adequado para indústria aeroespacial, criação de implantes médicos e indústria química [1; 6].

A indústria aeroespacial realça a utilização de materiais com baixa densidade e elevada resistência, de modo a manter as cargas em altitudes mínimas e também devido aos aumentos dos custos de combustível [27].

As principais razões para se utilizar titânio em componentes aeroespaciais são [30]:

- Redução no peso (especialmente na substituição de aço);
- Temperatura operacional (Al, Ni, substituição de ligas de aço);
- Limitação de espaço (substituir ligas A1);
- Resistência à corrosão (substituir Al e aços de baixa liga);
- Compatibilidade Composta (substituir ligas A1);

Contudo, o titânio e as suas ligas são bastante caras comparativamente a outros metais, devido ao complexo processo de extração, dificuldade de fusão e problemas de fabricação e maquinagem [12]. Tipicamente são utilizadas em diversas áreas da indústria, como a indústria marítima, biomedicina, química, energia, entre outras.

No final da década de 1940 começou o desenvolvimento de ligas de titânio com aplicações na construção de aeronaves. Inicialmente, em turbinas a gás, na construção das pás e disco de

compressores, e de seguida nos motores das aeronaves [11]. Atualmente são usadas em peças de motores a jato, carrocerias de aviões, pás de ventiladores, compartimento do motor, tanque de combustível, entre outros [28].

A figura 1 apresenta a quantidade de estudos publicados que foram realizados, ao longo dos anos, sobre o torneamento e fresamento das ligas de titânio. É notório um crescimento na fase inicial, por ser um tema pouco ou nada explorado, seguida de uma quebra e por volta do ano de 1996 volta a aumentar consideravelmente. Devido à grande expansão da indústria aeroespacial a procura por este tipo de ligas cresceu exponencialmente, com o intuito de melhorar a maquiabilidade destas ligas.

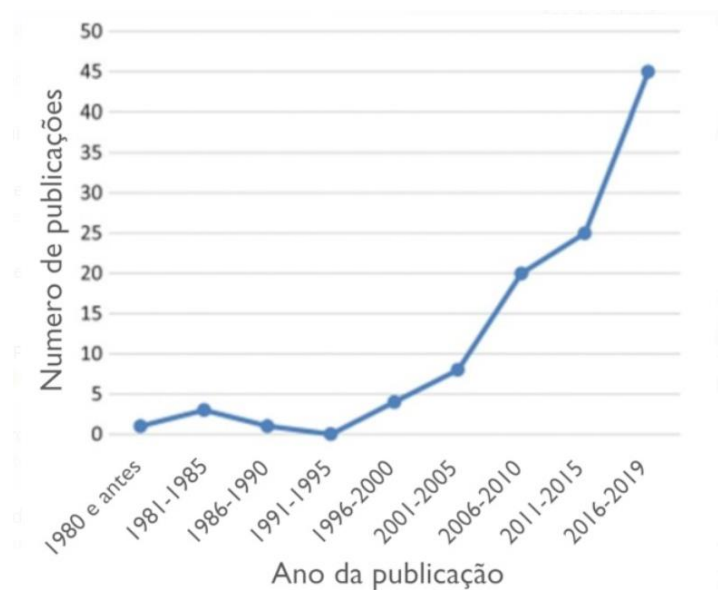


Figura 1 - Número de artigos publicados sobre torneamento e fresamento de ligas Ti [1]

Atualmente, com a descoberta de novos materiais com propriedades bastante desejáveis para este tipo de construção, como é o caso dos compósitos houve uma evolução na conceção dos modelos das aeronaves. Este avanço reforçou ainda mais a importância do titânio na indústria, devido ao facto de este ser um material bastante compatível com os compósitos comparativamente a outros materiais estruturais [11]. Mais de metade da produção global de titânio é utilizada na construção de aeronaves, devido ao aumento da quantidade de material utilizado na fabricação de novos modelos. Nos modelos mais antigos utilizava-se cerca de 4,5% enquanto os modelos mais recentes passaram a consumir 12-15% [2]. Este crescimento deve-se muito ao aumento da construção de motores com elevada potência e desempenho, com baixo peso, para a aeronáutica militar [4].

As ligas de titânio alfa-beta ( $\alpha$ - $\beta$ ) são as mais utilizadas para aplicações estruturais, como por exemplo, a liga Ti-6Al-4V que é amplamente utilizada na aeronáutica, representa 45-60% de todas as ligas de titânio utilizadas. Esta liga em específico tem sido utilizada na produção de estruturas de fuselagem e nos motores de turbina a gás [11]. O que torna a liga Ti-6Al-4V única é o facto de esta possuir algumas excelentes propriedades, que a tornam vital para uso comercial em muitos setores como aeroespacial, biomédico e automotivo. Tendo em conta a

sua ampla disponibilidade comercial e viabilidade económica, é provável que continue a ser a liga de titânio mais utilizada nos próximos anos [28].

Na indústria aeroespacial a maquinagem é um dos processos mais importantes e presentes no fabrico de peças. O objetivo principal é obter um produto que atenda às especificações de projeto, desta forma é importante monitorizar o estado da ferramenta, controlar os parâmetros de corte e as condições de maquinagem [2; 10]. Todos estes parâmetros são imprescindíveis para atingir os valores de rugosidade desejados e garantir uma excelente qualidade de superfície [1].

### **2.1.1. Fases das ligas de titânio**

O titânio é um elemento alotrópico que pode desenvolver diferentes formas cristalinas. As ligas de titânio são classificadas em quatro grupos: ligas alfa ( $\alpha$ ), ligas quase alfa, ligas alfa e beta ( $\alpha$ - $\beta$ ) e ligas beta ( $\beta$ ) e quase beta. O titânio possui dois alótropos, a fase alfa e a fase beta [1; 27]. Estas podem ser classificadas em dois grandes grupos: as ligas resistentes à corrosão e as ligas estruturais [5].

O titânio apresenta uma estrutura hexagonal compacta quando se encontra a temperatura ambiente, que representa a fase  $\alpha$ . Nesta fase, as ligas apresentam uma boa resistência à corrosão devido à adição de elementos que funcionam como estabilizadores, como é o caso do oxigénio, paládio ou alumínio e elementos neutros de baixa a média resistência [28]. São ligas com utilidade na indústria química, alimentícia ou no processamento de papel para produzir tubos altamente resistentes aos produtos químicos e corrosivos [5].

Esta estrutura passa da fase  $\alpha$  para a segunda fase, conhecida como fase  $\beta$ , quando a estrutura cristalina é cúbica de corpo centrado, para temperaturas superiores a 882°C [1]. Os estabilizadores desta fase são isomorfos ou eutetóide. Os elementos isomorfos são V, Mo, Re e os elementos *eutectoid* são Cr, Fe, Mn, Ni, Co [28]. As ligas destas fase apresentam uma elevada resistência mecânica, por isso são utilizadas em aplicações que exigem uma elevada resistência a baixas temperaturas [5]. A figura 2 representa cada uma destas fases, em função da percentagem de estabilizadores presentes:

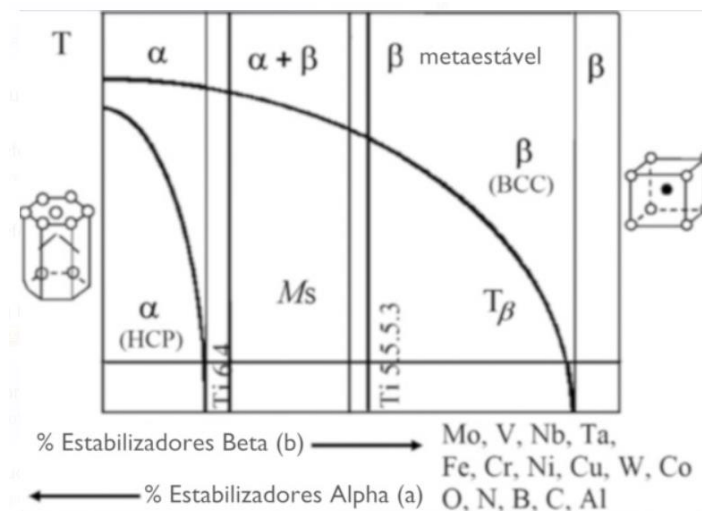


Figura 2 - Fases das ligas de titânio [1]

Quando os estabilizadores alfa estão presentes com menos estabilizadora beta como elementos de liga, uma liga quase alfa de titânio é formada. No entanto, quando as fases alfa e beta estão ambas presentes, forma-se uma liga de titânio alfa e beta ( $\alpha$ - $\beta$ ). Da mesma forma, pode haver uma fase quase beta e beta com estabilizadores beta [27].

Os elementos de liga são designados como estabilizadores  $\alpha$  e  $\beta$ . Os estabilizadores  $\alpha$  promovem o aumento de temperatura, de modo que a fase  $\alpha$  fique estável. Enquanto os estabilizadores  $\beta$  são responsáveis por manter a fase  $\beta$  em temperaturas baixas [1]. As ligas de titânio são adicionalmente subdivididas em ligas quase  $\alpha$  e metaestáveis  $\beta$  [28]. A tabela 2 apresenta exemplos de ligas de titânio para cada uma das fases:

Tabela 2 - Ligas de titânio classificadas por estrutura metalúrgica [28; 29; 30]

Ligas	Exemplos
<b>Ligas alfa (<math>\alpha</math>)</b>	Titânio comercialmente puro - ligas Ti/Pd grau ASTM 1,2,3 e 4 - grau ASTM 7 e 11
<b>Ligas <math>\alpha</math> + composto quase <math>\alpha</math></b>	Ti-2.5Cu – IMI230 Ti-3Al-2.5V Ti-5Al-2.5Sn Ti-6Al2Sn-4Zr-2Mo Ti-8Al- 1Mo-1V Ti-6Al-5Zr-0.5Mo-0.2Si- IMI 685 Ti-6Al-4Zr-2Sn-2Mo-0.08Si Ti-6Al-4Zr-3Sn-0.5Mo-0.5Si- Ti 1100
<b>Ligas alfa-beta (<math>\alpha</math>-<math>\beta</math>)</b>	Ti-6Al-4V

	Ti-4Al- 4Mo-2Sn-0.5Si- IMI 151 Ti-4Al-4Mo-4Sn-0.5Si Ti-6Al-6V-2Sn Ti-6Al-4Zr-2Sn-1Mo
<b>Ligas metaestáveis <math>\beta</math></b>	Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr- Beta C Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al Ti-13V-11Cr-3Al Ti-6V-6Mo-5.7Fe-2.7Al- TIMETAL 125

As ligas  $\alpha+\beta$  são normalmente ligas estruturais e amplamente usadas na construção de estruturas e componentes de motores para a indústria aeroespacial [5].

Particularmente, as ligas de titânio de alta resistência com tensão final de tração (UTS), à temperatura ambiente, superior a 1100MPa tornaram-se importantes para a indústria aeronáutica devido à elevadíssima resistência com ductilidade/tenacidade razoáveis e boa temperabilidade [29].

## 2.2. Problemas na maquinagem das ligas de Ti

O titânio e as suas ligas são considerados materiais difíceis de maquinar, por isso as ferramentas de corte utilizadas na maquinagem destas ligas sofrem desgaste prematuro na aresta de corte. Este tipo de desgaste encontra-se relacionado vários fatores como: a geometria da ferramenta, o material base da ferramenta, as propriedades do material a fresar, as condições e parâmetros de corte. Outro fator é a reatividade química do material a maquinar com o material da ferramenta, que causa soldagem por adesão à ferramenta de corte [11].

A qualidade superficial das ligas de titânio quando se utiliza maquinagem a seco, que eleva a temperatura de maquinagem, deve permanecer. O calor excessivo que se acumula na zona de corte foi identificado como uma das principais ameaças à integridade da superfície [11].

Quanto maior for a dureza do material, maiores serão as forças de maquinagem necessárias para remoção de material, resultando num aumento das temperaturas de corte. Estas condições adversas deterioraram a ferramenta de forma mais agressiva tanto mecanicamente, por exemplo, por abrasão, quanto termicamente, por exemplo, por oxidação [27].

Para além disso, fatores como a vibração existente durante o processo, tensões elevadas, reações químicas, bem como as temperaturas elevadas na região de corte contribuem para reduzir o desempenho e a vida útil da ferramenta [2]. Para aumentar o tempo de vida das ferramentas de corte deve-se estudar muito bem os parâmetros de corte a utilizar antes de se efetuar o corte na peça. Fatores como a velocidade de corte, profundidade do corte, velocidade de avanço, uso ou não de líquidos de refrigeração e os materiais das ferramentas, contribuem significativamente para o resultado obtido [1].

Apesar de todas as excelentes propriedades que a ligas de titânio apresentam estas são muito difíceis de maquinar, devido a:

- Alta resistência, baixa condutividade térmica e reatividade química a altas temperaturas faz com que uma boa percentagem de calor seja transferido para a ferramenta de corte, reduzindo significativamente a vida útil da ferramenta [1];
- Módulo de elasticidade baixo o que representa um retorno elástico pequeno, logo existe risco de a peça ficar com má qualidade superficial [1];
- Durante o processo de maquinagem são geradas aparas longas e contínuas, interferido com o processo e danificando a peça [1];
- Elevada dureza a altas temperaturas, comparativamente aos aços com propriedades semelhantes [5];
- As variações no corte e nos componentes axiais provocam vibrações durante o processo [5];

A vibração é a propriedade mais indesejável durante a maquinagem, uma vez que afeta a qualidade do produto e a rentabilidade de produção. Uma maquinagem com pouca ou nenhuma vibração é vital para se atingir um bom acabamento superficial/rugosidade [8].

Para além disso, as ligas de titânio são normalmente difíceis de maquinar usando velocidades de corte superiores a 30 m/min utilizando ferramentas produzidas em aço rápido e acima de 60 m/min utilizando ferramentas produzidas em metal duro, resultando numa produtividade bastante baixa [3]. A velocidade de corte é o parâmetro que mais afeta a temperatura atingida na zona de corte e conseqüentemente o desgaste da ferramenta. Outros tipos de materiais de ferramenta, como a cerâmica, diamante policristalino e nitreto de boro cúbico, apesar de mais duros, não são aconselhados devido à sua elevada reatividade na maquinagem das ligas de titânio, o que causa desgaste rápido em altas velocidades de corte [5; 23].

A criação de aparas e o desgaste da aresta de corte são os principais modo de falha no fresamento de ligas de titânio com ferramentas de metal duro. Esses tipos de modos de falha são resultado de uma combinação de vários fatores, como as altas tensões termomecânicas e cíclicas, bem como a adesão e o rompimento das faces da ferramenta do material da peça [23].

A intensa ação de deslizamento entre a apara que é gerada e a ferramenta de corte, faz com que a temperatura no contacto aumente. A superfície quente em contacto com a superfície da ferramenta provoca uma rápida reação química, que provoca um grande desgaste da ferramenta. Outro tipo crítico de desgaste, é o desgaste abrasivo provocado por pequenos fragmentos de material [5]. O facto de alguns componentes, para a indústria aeronáutica, apresentarem geometrias complexas, como nervuras finas, esquinas, etc. dificulta ainda mais o processo de maquinagem [9].

Perante estas dificuldades ferramentas de corte com propriedades superficiais são necessárias. Boa dureza e resistência ao desgaste, tenacidade e estabilidade térmica são as principais propriedades exigidas [12]. Assim, pretende-se desenvolver novos materiais base de

ferramentas de corte para maquirar este tipo de ligas, que não promovam a formação de aparapostia [1].

### **2.3. Soluções utilizadas para melhorar a maquiragem das ligas de titânio**

A utilização de fluidos de corte é geralmente recomendado para a maquiragem das ligas Ti, uma vez que realizam o arrefecimento da zona de corte e reduzem o coeficiente de atrito. Podem diminuir a temperatura de corte até 30% e serão mais eficazes se o fluido de corte penetrar na interface entre a ferramenta e a peça [1]. No entanto, o uso de lubrificação aumenta o custo do processo (10-20% dos custos totais), têm impacto ambiental e são prejudiciais para a saúde dos colaboradores, como a criação de vapores perigosos devido à interação de fluidos e a superfície maquirada aquecida [11; 12].

O uso de lubrificantes sólidos ajudam a resolver, até um certo ponto, os efeitos perigosos dos fluidos de corte convencionais, mas não eliminam na totalidade o problema. O facto de haver aderência entre o lubrificante sólido e a superfície maquirada e a máquina-ferramenta, obrigada a uma limpeza adicional. As desvantagens da utilização dos fluidos de corte e de lubrificantes sólidos podem ser ultrapassadas com a deposição de uma fina película sob as ferramentas de corte. Este tipo de revestimento atua como uma barreira térmica, fornece lubrificação e resistência ao desgaste durante o processo de maquiragem. Para além disso, elimina todos os processos de limpeza decorrentes dos fluidos de corte e da aderência dos lubrificantes sólidos [27].

As regras e os regulamentos ambientais atualmente em vigor limitam a utilização de fluidos de corte, promovendo uma produção mais sustentável. Desta forma, a tendência é realizar o processo de maquiragem a seco ou utilizar técnicas como maquiragem assistida por ultrassom (UAM - *Ultrasonically assisted machining*), maquiragem assistida por laser (LAM - *Laser assisted machining*), maquiragem térmica assistida (TAM - *Thermally enhanced machining*), resfriamento criogênico, refrigeração de alta pressão, lubrificação por quantidade mínima (MQL - *Minimum quantity lubrication*), MQL com nanopartículas (MQLN) e sistema de pulverização de fluido de corte baseado em atomização (ACF - *Atomization based cutting fluid*) [1; 11].

A UAM é uma das opções para melhorar a maquirabilidade da liga de Ti, em detrimento do corte de fluidos [1]. Segundo alguns estudos realizados existe melhoria de até 300% e 90% na vida útil da ferramenta e na eficiência de corte, respetivamente. Este método também produz melhor integridade superficial, incluindo ausência de defeitos subterrâneos, maior tensão residual de compressão, menor rugosidade superficial e moderado endurecimento por trabalho da superfície [26].

A maquiragem assistida por laser (LAM) permite reduzir a força da maquiragem, uma vez que amolece a superfície a maquirar. A penetração de calor na região de corte é diminuída pela incidência do feixe de laser na superfície ao longo da direção de rotação da peça, como resultado do curto período de interação do feixe. A vida útil da ferramenta aumenta e o

aquecimento da ferramenta diminui, porque a resistência da ferramenta WC é baixa em altas temperaturas através do corte de ligas de Ti. Conforme ocorre no fresamento tradicional, o modo de falha no fresamento assistido por laser é quebra de arestas. [1].

A maquinagem a seco compromete significativamente a vida útil da ferramenta, especialmente quando executa o trabalho a altas velocidades de corte [15].

O processo de maquinagem térmica assistida (TAM) utiliza fontes de calor externas para promover um aumento da temperatura da peça. Desta forma, o material que se encontra próximo à ponta da ferramenta torna-se mais macio, diminuindo o limite de elasticidade da peça e respetivo endurecimento. A tabela 3 descreve alguns exemplos de fontes de calor que poderão ser utilizadas, bem como os respetivos prós e contras associados [4]:

Tabela 3 - Exemplos de fontes de calor do processamento de pré-aquecimento [4]

Fonte de Calor	Descrição	Vantagens	Desvantagens
<b>Eletricidade</b>	Ocorre transferência de corrente ao longo da peça	Equipamento simples Distribuição uniforme do calor	Processo difícil de controlar
<b>Gás</b>	O material junto à ferramenta de corte é aquecido pela chama do gás e move-se com a ferramenta	Investimento inicial é baixo	Pode ocorrer elevada absorção de calor
<b>Plasma</b>	A peça é aquecida com um arco de plasma sobre a ponta da ferramenta	Elevada absorção de calor; Não há necessidade de condução elétrica	Processo difícil de controlar
<b>Laser</b>	O feixe de laser é absorvido pela superfície da peça, aquecendo o material	Elevada absorção de calor;	Elevado custo material; Taxa de concentração difere por material

O TAM promove uma redução das forças de corte, maior taxa de remoção de material e melhor acabamento superficial [4].

A maquinagem criogénica é vista como uma potencial solução no aumento da vida útil da ferramenta, uma vez que remove eficientemente o calor na zona de corte. Este processo consiste na utilização de um fluido criogénico, normalmente azoto líquido ( $N_2$ ), durante o processo de corte, com o intuito de reduzir a temperatura e, assim, melhorar a rentabilidade da ferramenta [7]. Também contribui para reduzir a afinidade química dos materiais da peça e da ferramenta e, portanto, melhorar a maquiabilidade [22]. É uma técnica usada tanto na maquinagem das ligas de titânio como de níquel, conseguindo atingir bons desempenhos de corte devido ao reduzido desgaste da ferramenta e à boa integridade superficial atingida

durante o processo de maquinagem [7]. O azoto com ponto de ebulição a  $-196^{\circ}\text{C}$  é armazenado num tanque apropriado. Este é transportado por canais e válvulas, nos quais ocorre troca de calor, aumentando a temperatura do fluido e produzindo o fenómeno de ebulição, criando-se uma fase gasosa. Para evitar este aumento de temperatura deve-se usar um separador de fases, assim, consegue-se uma maior quantidade de  $\text{N}_2$  na saída. A figura 3 representa cada uma destas etapas:

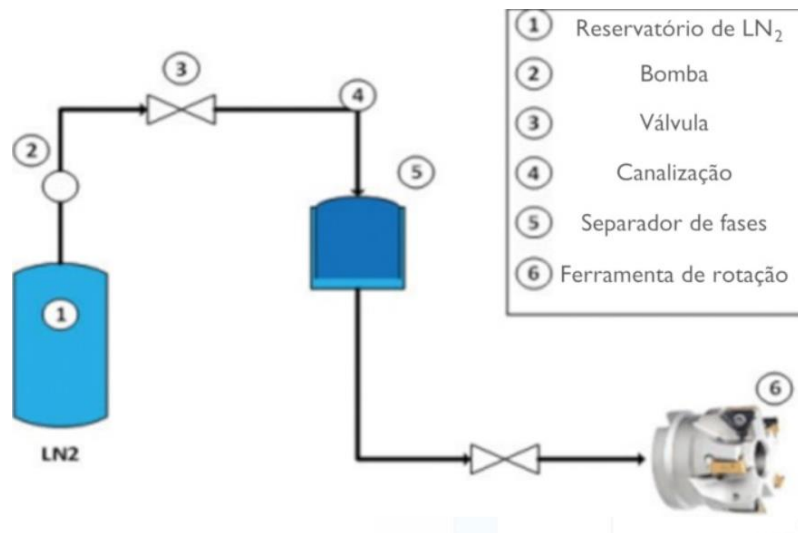


Figura 3 - Sistema de transporte do azoto do tanque até à saída [7]

A eficácia dos resultados depende dos parâmetros de fluxo de entrada, tais como: pressão, velocidade e fração gás/líquido, bem como da geometria do tubo utilizado [7]. A maquinagem criogênica melhora a integridade da superfície, reduzindo a rugosidade da superfície e refinando o grão na camada superficial [15].

A utilização de fluido de arrefecimento a alta pressão tem tido resultados muito satisfatórios, verificando-se um aumento na velocidade de corte de 35% [11];

A maquinagem a seco é considerada a melhor alternativa quando se pretende obter baixa rugosidade. Para além disso, é um dos métodos mais sustentáveis [32; 42].

Os benefícios decorrentes do uso de ferramentas de corte revestidas podem ser potencializados com a utilização de métodos de lubrificação que utilizam quantidades mínimas de lubrificante, como a técnica MQL [32]. O método MQL apresenta bons resultados, dependendo da ferramenta que é utilizada, reduzindo significativamente a utilização de fluidos de corte [13]. Este método tem sido bastante utilizado principalmente por ser mais ecológico, por conceder à peça melhor acabamento superficial e pelo facto de a ferramenta de corte ser submetida a menores forças de corte, aumentando assim a sua vida útil [32].

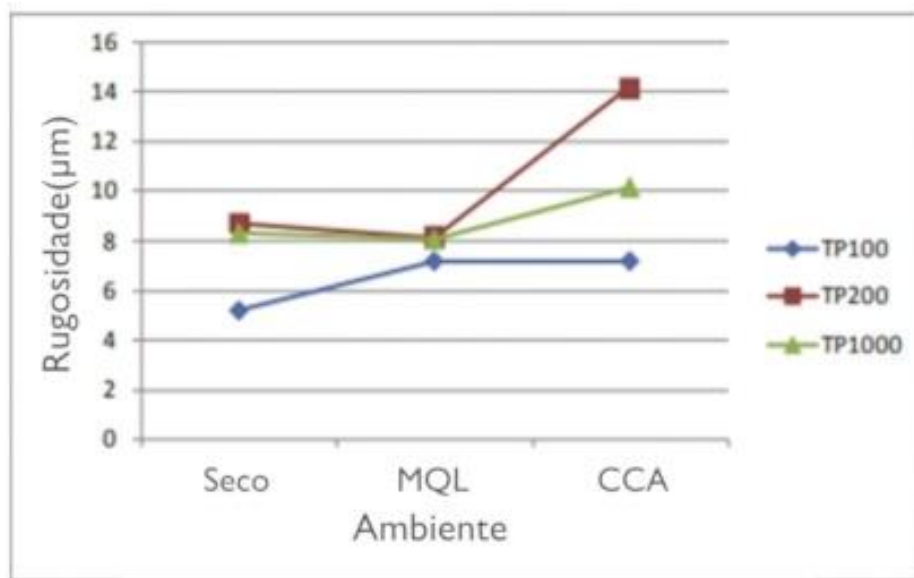


Figura 4 - Rugosidade versus diferentes ambiente para as três ferramentas TP100, TP200 e TP1000 [11]

A figura 4 permite fazer uma comparação entre três fresas que foram testadas em três ambientes diferentes: seco, em sistema MQL e sistema de ar comprimido frio (CCA). A ferramenta TP100 supera as restantes nos três ambientes. Contudo, em sistema MQL as ferramentas TP200 e TP1000 apresentam melhores resultados comparativamente à maquinação a seco [11; 41]. O MQL, em particular, representa uma alternativa muito interessante ao corte, por permitir aliar um bom desempenho a baixos custos económicos e ambientais [12].

Os autores Settireni e Faga [12] estudaram o processo de torneamento das ligas de titânio com três velocidades de corte (50, 90 e 130 m/min) e constataram que o uso do sistema MQL efetivamente aumenta a vida útil da ferramenta devido à sua boa capacidade de lubrificação [12].

Evitar o uso de fluídos de corte implica reduzir a qualidade das peças maquinadas e/ou a produtividade do processo, por isso a técnica MCL tem sido fortemente usada. Esta mantém os objetivos da maquinação, nomeadamente: redução de atrito, remoção das aparas, redução da temperatura, etc., mantendo a estratégia de reduzir o consumo do fluido de corte. MQL é um método ecologicamente correto que pode melhorar a produtividade nos processos de maquinação [1]. Efetivamente existem estudos que comprovam que o MCL aumenta a vida útil da ferramenta, contudo em alguns casos a sua utilização não proporciona os melhores resultados. Assim, a utilização do sistema MQL deve ser convenientemente avaliada para cada processo específico [13].

No processo MQL com nanopartículas (MQLN), as nanopartículas em pequena concentração na névoa de óleo aumentam a condutividade térmica e lubrificidade do sistema [1; 40].

Conforme descrito neste subcapítulo, existem vários métodos de lubrificação/ refrigeração que influenciam o processo de fresagem. Cada um deles pode conceder melhor qualidade

superficial e melhorar a vida útil da ferramenta. A tabela 4 apresenta uma comparação dos resultados obtidos, para os diferentes métodos de lubrificação/refrigeração, no que diz respeito à vida útil da ferramenta, qualidade do acabamento superficial e impacto ambiental [33; 42].

Tabela 4 - Influência de métodos de maquinagem na qualidade superficial, na vida útil da ferramenta e no impacto ambiental [33]

<b>Regime de Lubrificação</b>	<b>Qualidade de acabamento superficial</b>	<b>Vida útil da ferramenta</b>	<b>Sustentabilidade</b>
<b>Resfriamento com lubrificantes</b>	Alta	Alta	Insustentável
<b>Corte a seco</b>	Média	Baixa	Alta
<b>MQL</b>	Alta	Média	Média
<b>Resfriamento criogênico</b>	Elevada	Elevada	Média; alto custo inicial e de manutenção

## 2.4. Materiais base usados na produção de ferramentas

A escolha das ferramentas de corte é crucial para se obter uma boa qualidade superficial, eficiência e economia na maquinagem. Existem várias estratégias para atenuar o desgaste na ferramenta, tais como: a otimização da ligação máquina-ferramenta, escolha do material base, parâmetros de corte, refrigeração e lubrificação, entre outros [9].

Ao longos dos anos, foram realizados variados estudos científicos com o intuito de aumentar a vida útil das ferramentas utilizadas na maquinagem de ligas de titânio. Investigou-se o seu desgaste em concordância com os parâmetros de corte selecionados e o material base escolhido [3]. Numa primeira fase é importante perceber qual o material mais adequado, para a ferramenta, com o objetivo de obter um resultado o mais próximo possível do pretendido. Existem um conjunto de propriedades a ter em atenção nesta seleção, nomeadamente [1; 27]:

- Boa tenacidade e resistência à fadiga, para atenuar os choques e suportar o arranque cíclico da apanha;
- Elevada dureza a quente, para suportar as altas tensões criadas durante o processo;
- Elevada resistência mecânica;
- Excelente resistência à compressão;
- Material com baixa reação química ao titânio;
- Estabilidade química e térmica;
- Excelente condutividade térmica, para extrair o calor do contacto;

A seleção deve ser criteriosa com base na aplicabilidade, precisão e na rugosidade superficial que se pretende obter. A integridade da superfície é um aspeto importante para se obter uma

boa qualidade superficial da peça. Foi demonstrado que a rugosidade da superfície depende do material usado na ferramenta de corte [3]. Como regra geral, o material da ferramenta de corte deve ser mais duro que o material a ser cortado [27].

A figura 5 representa os diferentes tipos de materiais utilizados em ferramentas de corte, em função da dureza e da tenacidade. Fica claro que, para as ferramentas de corte, existe uma relação inversa entre a tenacidade e a dureza. As ferramentas de corte com maior dureza, por exemplo, as que tem diamante policristalino (PCD), apresentam menor tenacidade. Por outro lado, as ferramentas de corte feitas de aço rápido são extremamente tenazes. No entanto, quando comparadas com outras ferramentas de corte mais duras, por exemplo, feitas de nitreto cúbico de boro policristalino (PCBN) e cerâmica, estas apresentam muito baixos níveis de dureza [27].

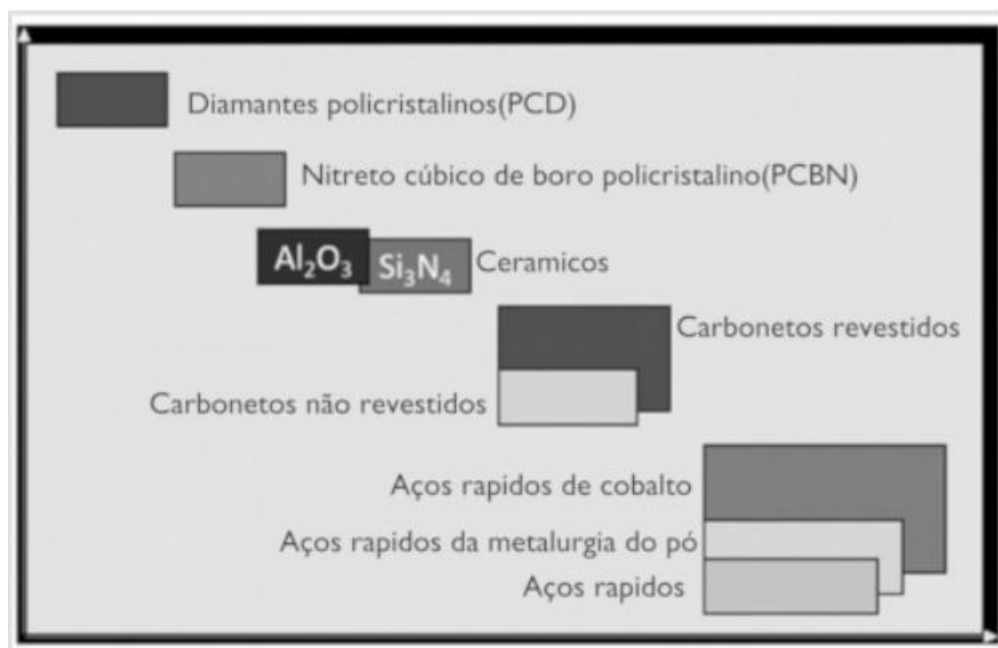


Figura 5 - Classificação de diferentes materiais de ferramentas de corte em função da tenacidade e dureza [27]

O nitreto cúbico de boro (CBN) possui uma dureza muito próxima à do diamante e melhor resistência à oxidação. As ferramentas de corte feitas de CBN possuem alta dureza a quente e elevada estabilidade química, mesmo em altas temperaturas. O PCBN é formado quando os grãos de CBN são sintetizados a altas temperaturas e pressões [27].

As ferramentas de diamante policristalino (PCD) são produzidas por sinterização, a alta temperatura e pressão, juntando partículas de diamante com um ligante metálico. Estas apresentam alta dureza a quente e estabilidade química, contudo, são reativas com o ferro [27].

Assim, e de acordo com outros estudos realizados para a fresagem de ligas de titânio a altas velocidades, já existem materiais avançados que estão a ser usados na produção de ferramentas, exemplo disso são as ferramentas de diamante policristalino (PCD) e nitreto de boro cúbico policristalino (PCBN) [3].

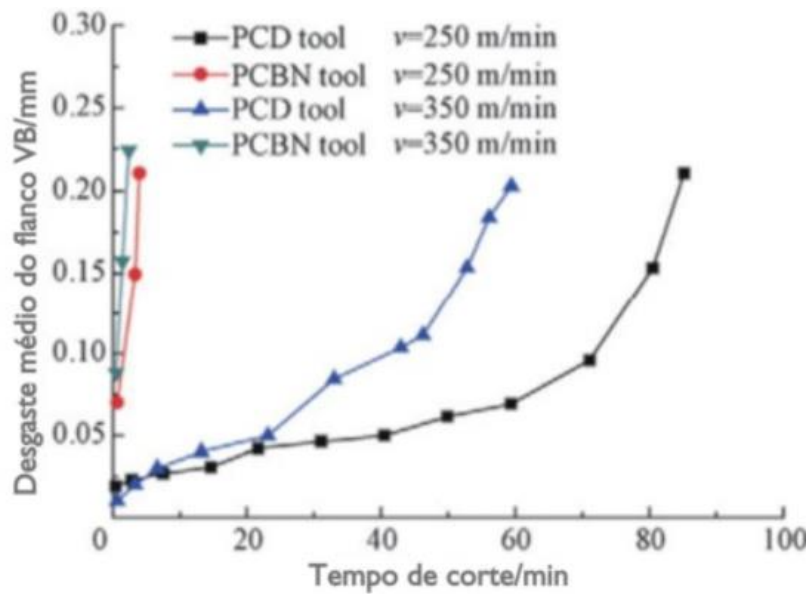


Figura 6 - Desgaste médio do flanco versus tempo de corte da ferramenta [3]

A figura 6 permite verificar que a ferramenta PCD tem uma vida útil superior comparativamente à ferramenta PCBN. Isto verifica-se tanto nas mesmas condições de corte, mas principalmente quando submetida a velocidades de corte mais elevadas. É notável uma redução da vida útil em ambas as ferramentas quando a velocidade de corte é aumentada. As análises realizadas através do microscópio de varrimento eletrónico (SEM) indicam que a adesão é o principal mecanismo de desgaste das ferramentas PCD e PCBN na fresagem de ligas de titânio em alta velocidade. A ferramenta PCD é funcionalmente a mais satisfatória para a maquinagem das ligas de titânio [3].

O nitreto de boro cúbico sem ligante (BCBN) é utilizado no fresamento em alta velocidade de ligas de titânio. Esta ferramenta apresenta maior vida útil em altas velocidades de corte, com resultados bem mais satisfatórios quando comparada com as ferramentas CBN e PCD [19].

A classe de metal duro (WC/Co) continua a ser a primeira escolha no torneamento e no fresamento de faseamento das ligas de titânio [23]. Geralmente são utilizados dois tipos de carbonetos: puros e mistos. Os carbonetos puros consistem em carboneto de tungstênio (WC) com uma pequena quantidade de cobalto (Co). Os carbonetos mistos são um composto que englobam carboneto de tungstênio com carboneto de titânio (TiC), carboneto de tântalo (TaC) ou carboneto de nióbio (NbC). Estes são adicionados com o intuito de aumentar a dureza e a tenacidade dos carbonetos de tungstênio puro [27]. No fresamento das ligas de titânio é amplamente utilizado ferramentas de corte confeccionadas com metal duro com ou sem revestimento.

A tabela 5 apresenta as diversas ferramentas de corte que foram utilizadas em diferentes processos de fresamento, durante a maquinagem das ligas de titânio.

Tabela 5 - Diferentes ferramentas corte versus diferentes métodos de fresamento

<b>Processo</b>	<b>Ferramentas de corte</b>	<b>Material da peça</b>	<b>Líquido de refrigeração</b>	<b>Observações</b>
<b>Fresagem</b>	Fresa com 160mm de diâmetro revestida com carboneto de tungstênio	Ti6Al4V	Seco	Em velocidades de corte mais baixas (50m/min – 200m/min), as frações volumétricas das fases $\alpha$ e $\beta$ da superfície maquinada ficaram praticamente inalteradas. Aumentando a velocidade de corte de 200m/min a 600m/min a microestrutura final da superfície passou a ser composta pelas fases $\alpha$ , $\beta$ e $\alpha'$ [14].
<b>Fresagem</b>	Pastilhas de metal duro sem cobertura para fresamento de topo	Ti6Al4V	Nitrogênio líquido seco e húmido ( $N_2$ ) - criogênico, lubrificação por quantidade mínima (MQL), MQL com nanopartículas	MQL com nanopartículas foi o melhor método de resfriamento [15].
<b>Fresagem a alta velocidade</b>	Cinco categorias de inserções de metal duro não revestido (WC) – monocamada TiAlN, AlTiN, TiCN e duas camadas AlTiN/TiN e TiCN/TiN	Ti6Al4V	Seco	A menor rugosidade superficial e de corte foi obtida com o revestimento TiCN [16].
<b>Fresagem</b>	Ferramenta WC-Ti/Ta/Nb-Co não revestida e	Ti-6242S	Seco	A maquinagem a seco pode ser executada para o corte do Ti-6242S utilizando as

	ferramenta WC-Ti/Ta/Nb-Co revestida com TiN/TiC/TiCN			ferramentas WC não revestidas, desde que seja restrita à maquinagem de acabamento e/ou semiacabamento [17].
<b>Fresagem a alta velocidade</b>	Ferramentas de fresagem de topo revestidas (TiAlN) com 4 canais	Ti6Al4V	Gás nitrogênio	O gás nitrogênio impede o aumento da dureza, diminui o desgaste das ferramentas e aumenta a rugosidade da superfície maquinada [18].
<b>Fresagem a alta velocidade</b>	BCBN (nitreto cúbico de boro sem ligante)	Ti6Al4V	Líquido refrigerante de alta pressão	A pastilha BCBN teve vida útil mais longa em comparação com a pastilha CBN tradicional [19].
<b>Micro-fresamento de alta velocidade</b>	Fresa de topo WC sem revestimento com diâmetro de 300 µm	Ti6Al4V	Corte a seco e uso de lubrificação	As forças de corte reduziram cerca de 38% no corte com lubrificante em comparação com o corte seco. Há uma melhoria significativa nos limites de estabilidade na maquinagem lubrificada [20].
<b>Fresagem</b>	Fresa de topo de metal duro sem cobertura com 10 mm de diâmetro, quatro canais e ângulo de hélice de 30°	Ti6Al4V	Atomização - à base de fluido de corte e seco	A utilização do sistema de pulverização de fluido baseado em atomização (ACF) induz menores forças de corte, desgaste uniforme da ferramenta e maior acabamento superficial. A vida útil da ferramenta se estende até 75% durante o resfriamento [21].
<b>Fresagem</b>	Ferramentas para fresas de topo em metal duro	Ti6Al4V	Corte criogênico usando nitrogênio líquido bastante frio e seco	O resfriamento criogênico promoveu uma rugosidade superficial até 39% e 31% menor quando comparado aos métodos de resfriamento a seco e por inundação, respetivamente. Melhorou consideravelmente a

				integridade superficial no fresamento das ligas Ti [22].
<b>Fresagem frontal</b>	Pastilhas de WC revestidas com CVD-TiCN/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> e PVD-TiN	Ti6Al4V	Hocut 808	A pastilha revestida foi a que teve melhor desempenho; As ferramentas com revestimento CVD apresentaram melhor desempenho do que as ferramentas com revestimento PVD [23].
<b>Fresagem</b>	Insertos C-Co não revestidos e revestidos com (TiC+Ti/CN+/TiN) (W-Ti/Ta/Nb)	Ti-6242S	Seco	Ambos podem ser usados no corte das ligas Ti [24].
<b>Fresagem</b>	Fresas de topo WC com e sem revestimento PVD-TiAlN	Ti6Al4V	Seco	A ferramenta revestida com TiAlN apresenta um aumento de vida útil da ferramenta em cerca de 48% [25].
<b>Fresagem</b>	Ferramenta de metal duro não revestida e revestida com TiAlN	Ti6Al4V	Corte a seco, com uso de lubrificação e MQL	Sob condições da técnica MQL a ferramenta de corte sofreu consideravelmente menos desgaste, quando comparada aos outros métodos de resfriamento [33].

A pastilha de corte BCBN tem uma vida útil consideravelmente mais longa comparativamente a uma pastilha CBN tradicional. As ferramentas revestidas por metal duro WC (carboneto de tungstênio) ou WC/Co (com ligantes de cobalto) possuem melhor desempenho em comparação às não revestidas. Isto acontece devido ao atrito ser menor, ocorrer menor desgaste na ferramenta e a superfície maquinada ser mais lisa. A partir da tabela 5 verifica-se que as ferramentas revestidas com carboneto de tungstênio podem ser utilizadas tanto no fresamento a seco como no fresamento, das ligas de Ti, usando sistemas de resfriamento como fluido refrigerante, criogênico, MQL, MQL com nanopartículas e fluido de corte baseado em atomização [1; 40].

## 2.5. Revestimentos usados na proteção de superfície de ferramentas de maquinagem para ligas de Ti

A elevada dificuldade de maquiabilidade das ligas de titânio e a constante procura por soluções mais eficientes tem contribuído para um aumento da utilização de revestimentos para proteger a superfície das ferramentas de corte.

Os revestimentos utilizados com a finalidade de aumentar o tempo de vida útil da ferramenta de corte apresentam: alta dureza, alta resistência ao desgaste, alta resistência à oxidação, baixo atrito, entre outras. Para além disso, permitem eliminar por completo o uso de fluidos de corte, tornando todo o processo muito mais ecológico. A seleção do revestimento é realizada em função das condições de operação, do material a maquinar, da estabilidade térmica, do desempenho tribológico e da afinidade do revestimento com o material base a maquinar [27].

Os revestimentos aplicados nas ferramentas de corte geralmente são nitretos, carbonetos, boretos, óxidos de metais de transição e carbonitretos [27; 33]. Os nitretos utilizados como revestimento para ferramentas de corte são: TiN, TiAlN, CrN, ZrN, TiSiN, TiAlSiN, CrAlN, TiAlCrN e CBN; carbonetos para revestimentos são TiC, CrC e WC. O TiB<sub>2</sub> é utilizado devido à sua inércia química, alta dureza e boa resistência ao desgaste. Outros revestimentos comuns para ferramentas de corte são: Diamond-Like Carbon (DLC), MoS<sub>2</sub> e WC-C [33]. A utilização de revestimentos que não tenham Ti na sua composição pode tornar o processo de fresagem das ligas de titânio mais eficiente. A utilização de revestimentos à base de ZrN ou (Zr,Al)N podem ser bastante eficazes [34].

Os revestimentos DLC têm sido recentemente mais citados e comparados com as técnicas PVD e CVD. Estes têm mostrado melhor adesão e maior resistência ao desgaste, contribuindo para um aumento na vida útil da ferramenta. Apresentam elevado potencial em diversas aplicações de fresamento, especialmente no fresamento de materiais difíceis de maquinar [33].

### 2.5.1. Classificação baseada na arquitetura do revestimento

A arquitetura dos revestimentos é uma condição importante a ter em conta no seu desenvolvimento. Os revestimentos devem ter uma adesão adequada ao substrato, propriedades mecânicas, térmicas, de oxidação, tribológicas e baixa reatividade química [27].

A figura 7 representa as diferentes categorias de arquitetura existentes.



Figura 7 - Arquiteturas típicas de revestimento [33]

Nos revestimentos monocamada, a camada de trabalho é depositada sobre o substrato ou sobre as camadas de adesão otimizadas. A primeira geração de revestimentos monocamada

foram o TiN e CrN, que são revestimentos quimicamente estáveis, mas são suscetíveis ao desgaste abrasivo. Neste tipo de revestimentos quando se inicia uma fissura esta propaga-se, através da secção transversal, provocando a delaminação do revestimento. Para evitar a propagação de fissuras foram desenvolvidos revestimentos em multicamadas [33].

Os revestimentos multicamadas consistem na deposição de duas camadas com composições químicas diferentes, que se repetem várias vezes dentro de um período específico. Com esta configuração é possível atingir elevada dureza, dependendo da espessura das camadas [27].

Os revestimentos com estrutura nanocompósito podem ser compostos por fases nanocristalinas, termodinamicamente estáveis ou metaestáveis e amorfas. São considerados uma nova geração de materiais multifuncionais avançados. A microestrutura resultante e o perfil de propriedades de um revestimento nanocompósito são determinados pelos parâmetros do processo de deposição e pela cinética do processo de deposição e crescimento. [27; 34].

Os revestimentos nanoestruturados aumentam o desempenho do processo de fresagem, uma vez que combina alta dureza, resistência à fratura frágil, estabilidade térmica e resistência à difusão. A figura 8 permite comparar o tempo de vida útil das ferramentas de corte utilizando diferentes revestimentos. Neste estudo foram utilizadas fresas de topo com pastilhas de metal duro substituíveis sem revestimentos, revestimentos de TiN e ZrN e revestimentos compostos multicamadas nanoestruturados de Ti-TiN-(Ti,Cr,Al)N e Zr-ZrN-(Zr,Al,Si)N [34].

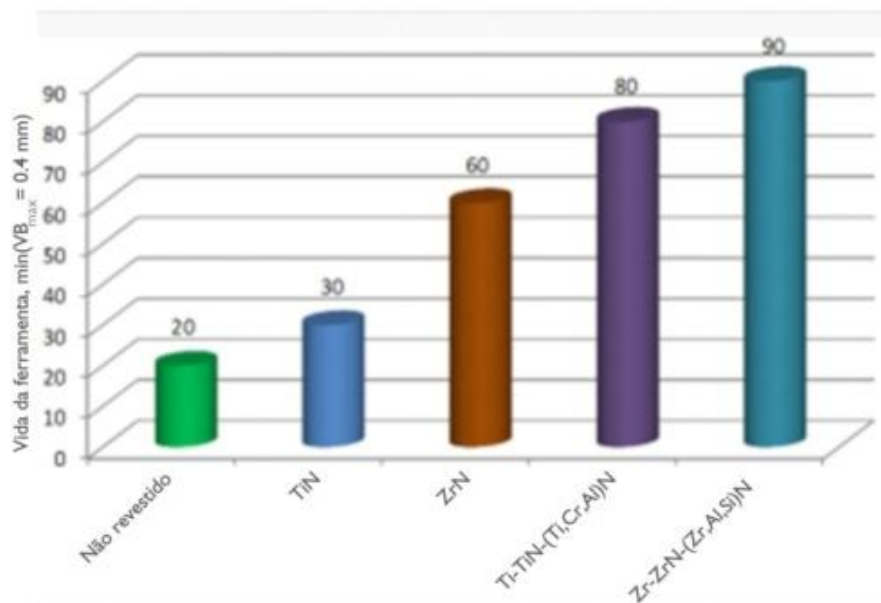


Figura 8 - Testes de corte no fresamento da liga de titânio VT20 para diferentes tipos de revestimentos [34]

Analisando a figura 8 verifica-se que o revestimento TiN proporciona um aumento do tempo de vida de ferramenta aproximadamente de 40% relativamente à ferramenta não revestida. Por outro lado, o revestimento ZrN permite aumentar três vezes a vida útil da ferramenta. O uso dos revestimentos compostos por multicamadas nanoestruturados de Ti-TiN-(Ti,Cr,Al)N e Zr-ZrN-(Zr,Al,Si)N podem aumentar a vida útil da ferramenta em 4 a 4,5 vezes, fornecendo um padrão de desgaste da ferramenta equilibrado e previsível [34].

As ferramentas de corte possuem uma geometria definida que permite num processo de corte utilizar uma única aresta de corte, como no caso do torneamento, ou múltiplas arestas, por exemplo, fresagem. Em ambos os processos o desempenho da maquiagem pode ser melhorado através da deposição de filmes finos sob as ferramentas de corte. Estes filmes podem atuar como barreira térmica entre o substrato da ferramenta e a superfície, lubrificar e, assim, melhorar a resistência ao desgaste das ferramentas [27]. Estes revestimentos podem ser aplicados recorrendo a vários processos, desde a galvanoplastia até técnicas mais recentes como a deposição química e física em fase de vapor, isto é, PVD ou CVD [31]. De seguida, será feita uma abordagem mais aprofundada sobre estes dois processos.

### 2.5.2. Revestimentos realizados por PVD

O processo de deposição de deposição física em fase de vapor já é conhecido há mais de 100 anos. A terminologia *Physical Vapour Deposition* (PVD) surgiu nos anos 60 do século XX, quando ocorreram vários desenvolvimentos na área da eletrónica e da mecânica que contribuíram significativamente para a evolução deste processo [31]. A importância desta tecnologia tem vindo a aumentar nos últimos anos devido à sua versatilidade na deposição de filmes de boa qualidade [27]. Atualmente, é uma técnica absolutamente vital para alguns produtos industriais e é amplamente utilizada para proteger a superfície de ferramentas de corte, principalmente com nitretos [27; 31].

O processo de deposição PVD consiste na projeção de material a partir de uma ou mais fontes sólidas, designadas por alvos, dentro de uma câmara de deposição sujeita ao vácuo. O crescimento do filme realiza-se pela adição de material à superfície, átomo após átomo. Neste processo, as partículas são aceleradas a partir do alvo em direção ao substrato, que podem assumir duas formas principais [31]: projeção catódica, também designada por *sputtering*, e evaporação. A figura 9 apresenta o diagrama esquemático simplificado dos processos PVD mais correntes e as suas variantes:

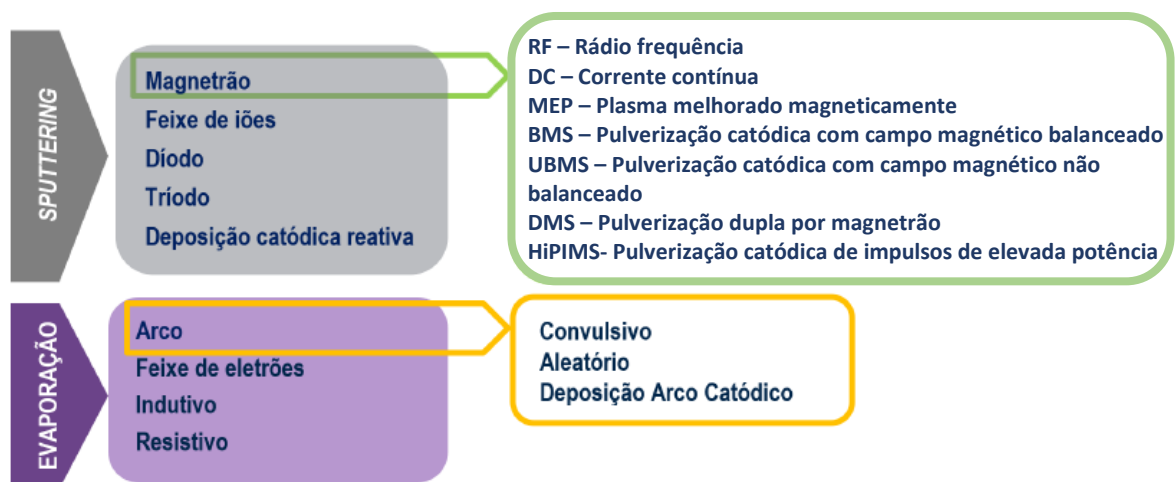


Figura 9 – Diagrama esquemático abreviado de algumas das variantes desenvolvidas com base na técnica PVD (Adaptado de [27; 31])

Estes processos são particularmente indicados para a produção de filmes finos. As diferentes fontes de alimentação têm uma influência extrema nas propriedades mecânicas e na morfologia do filme. Por outro lado, o movimento dos elétrões é muito importante para definir a eficiência da pulverização catódica [27].

O processo de *sputtering* envolve a ejeção de átomos da superfície do alvo através do bombardeamento de iões positivos, normalmente de argon. É introduzido um gás inerte na câmara de deposição, que vai ionizar para formar iões positivos. Posteriormente, estes iões são acelerados em direção ao alvo, conforme se pode observar na figura 10 (a). Esta colisão provoca radiação, reflexão de iões e injeção de átomos no substrato, formando o filme [27;44].

No processo de ionização, o plasma estabelece-se no interior da câmara de deposição e deve ser mantido para que o processo decorra continuamente. Deve-se utilizar uma diferença de potencial alta para que os elétrões secundários sejam injetados assim que os iões colidem com o substrato. Para além disso, deve-se garantir que a pressão dentro da câmara não seja muito baixa, de modo a promover o número suficiente de colisões entre elétrões e átomos de gás. Assim, após o bombardeio os átomos do material ejetado possuem energia cinética suficiente para viajar até o substrato [27].

Na Figura 10 pode-se observar, esquematicamente, a forma como cada um destes dois métodos (a projeção catódica e a evaporação) realiza o revestimento dos substratos [31].

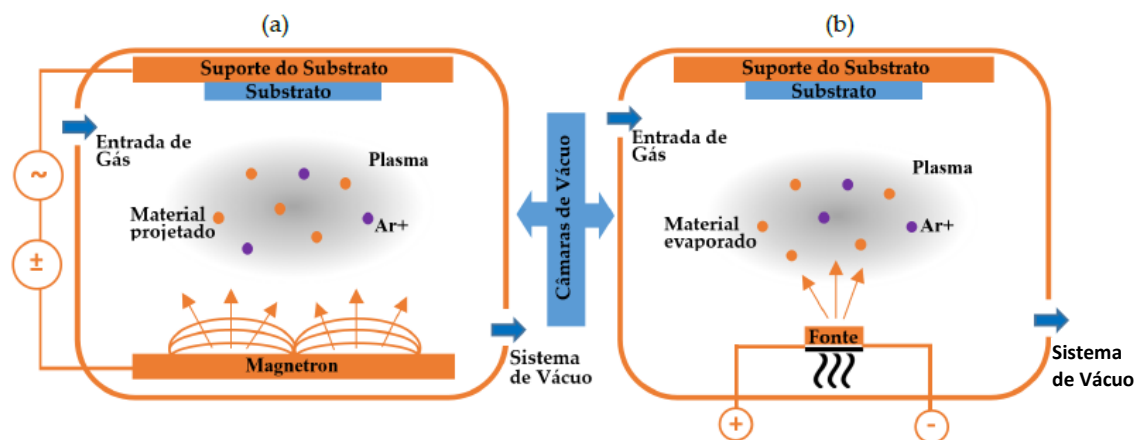


Figura 10 - Diagrama esquemático do método de revestimento PVD de (a) projeção catódica e de (b) evaporação [31]

O facto de o processo decorrer dentro de uma câmara sujeita a vácuo, elimina imensas fontes de contaminação, podendo existir um controlo mais apurado da composição química e da estrutura do revestimento. No entanto, é necessário realizar uma limpeza regular da câmara entre processos de deposição, principalmente quando os alvos ou substratos são diferentes de deposição para deposição. Também é possível realizar uma limpeza catódica da superfície dos substratos, através da projeção de átomos positivos contra a superfície dos mesmos, criando uma ligeira “erosão” na superfície. Esta estratégia é suficiente para remover eventuais impurezas que possam existir na superfície do substrato. Estas serão escoadas pelo sistema de vácuo ligado à câmara [31].

O Ar é o gás mais utilizado devido à sua disponibilidade no mercado e baixo custo. No entanto, também se utiliza gases inertes como Neônio (Ne), Criptônio (Kr) e Xenônio (Xe), que têm a vantagem de não produzir compostos, embora possam ficar presos nos filmes [27].

Várias técnicas de revestimento PVD são utilizadas para a deposição de filmes finos e duros em materiais de substrato Ti6Al4V. Revestimentos como TiC, TiC e TiN são usados para desenvolver revestimentos duros e resistentes ao desgaste. No entanto, quando submetidos a altas temperaturas possuem menor tenacidade à fratura e baixa resistência à oxidação, limitando assim a sua utilização em aplicações avançadas de engenharia [32; 44].

Nas últimas décadas, foram desenvolvidas novas técnicas de deposição por pulverização catódica de *magnetron*, com o intuito de produzir fluxos altamente ionizados de material pulverizado. Uma tecnologia que surgiu recentemente é a técnica HiPIMS que permite utilizar uma potência, aplicada nos alvos, extremamente alta. Isto permite obter densidades de plasma mais elevadas e, conseqüentemente, ionização do material pulverizado. A figura 11 apresenta uma representação esquemática das diferentes etapas que ocorrem no processo de pulverização catódica por HiPIMS.

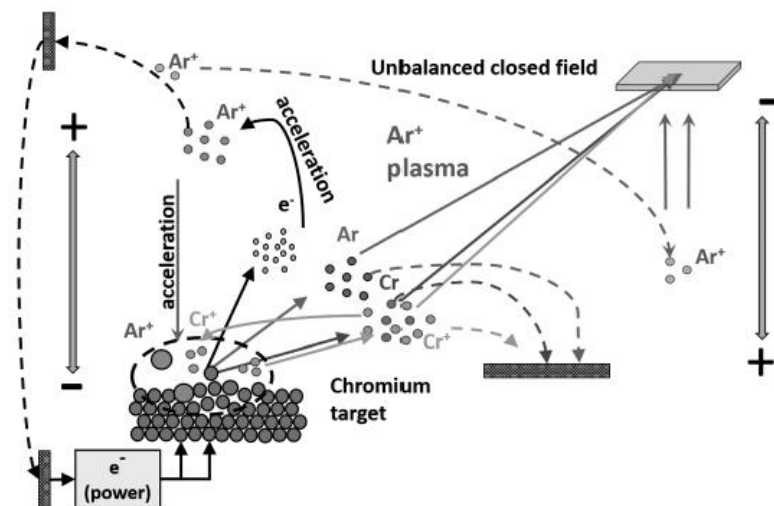


Figura 11 - Representação esquemática da pulverização catódica que ocorre no processo HiPIMS [27]

Comparativamente ao método tradicional, que foi abordado anteriormente, existem algumas diferenças neste novo processo, a destacar [27]:

- Ocorre a ionização do material do alvo, mas o nível de ionização depende dos parâmetros de deposição;
- Os íons metálicos injetados podem voltar para o alvo, diminuindo a taxa de deposição;
- Os íons que chegam ao substrato possuem mais energia e mobilidade produzindo filmes mais compactos e mais duros.

Apesar das vantagens mencionadas anteriormente, este processo possui baixa taxa de deposição e produz elevada tensão residual nos filmes [27].

A pureza dos filmes obtidos por PVD é muito elevada, o que contribui para que os mesmos apresentem propriedades bem definidas, reproduzíveis, e que vão ao encontro das necessidades do mercado [31].

### 2.5.3. Revestimentos realizados por CVD

Neste processo ocorre a deposição de material sólido na superfície do substrato, durante a fase de vapor de uma reação química controlada. O revestimento do substrato é efetuado com base nos gases, normalmente designados por precursores, de alimentação do sistema. Ocorre a decomposição de gases de alta pureza dentro de uma câmara, sob condições controladas, estes passam por uma série de reações químicas e físicas e ocorre a deposição de uma fase sólida sobre os substratos [27; 31].

Simplificando, o processo CVD consiste em produzir os revestimentos através da introdução de reagentes específicos e gases inertes, em fluxo controlado, numa câmara de reação, os gases difundem-se para a superfície do substrato, ocorrendo a absorção dos reagentes na superfície. Os átomos que foram absorvidos reagem e formam o filme. Todos os produtos da reação são removidos da câmara [27; 31].

É um método versátil e rápido que possibilita o crescimento do filme e a criação de revestimentos puros com espessura uniforme e porosidade controlada. Este processo é formado por diferentes sistemas, que têm a sua própria função, nomeadamente [27]:

- Sistemas de gases – o sistema fornece os gases precursores ao reator. O tipo de gás deve ser selecionado tendo em conta o revestimento final que se pretende. Os gases mais frequentemente utilizados são halogenetos, por exemplo,  $TiCl_4$ ,  $TaCl_5$ ,  $WF_6$ , etc., hidretos ( $SiH_4$ ,  $GeH_4$ ,  $AlH_3(N(CH_3)_3)_2$ ,  $NH_3$ , etc.) e compostos organometálicos.
- Reator – É a câmara de reação, na qual ocorre a reação e a deposição do filme.

É possível escolher a composição dos gases de alimentação em função do tipo de substrato a revestir e do tipo de revestimento a efetuar, fluxo dos gases de alimentação, concentração relativa de cada gás, e temperatura do substrato, para além de outros parâmetros próprios de cada processo. A orientação, tamanho do grão, composição e as propriedades dos revestimentos podem ser controladas através do ajuste dos parâmetros do processo [31]. Contudo, os parâmetros que influenciam a estrutura do filme são a temperatura e a taxa de deposição [27].

O processo pode ser assistido de diversas formas, a figura 12 apresenta um diagrama esquemático das diversas variantes desenvolvidas com base no processo CVD.

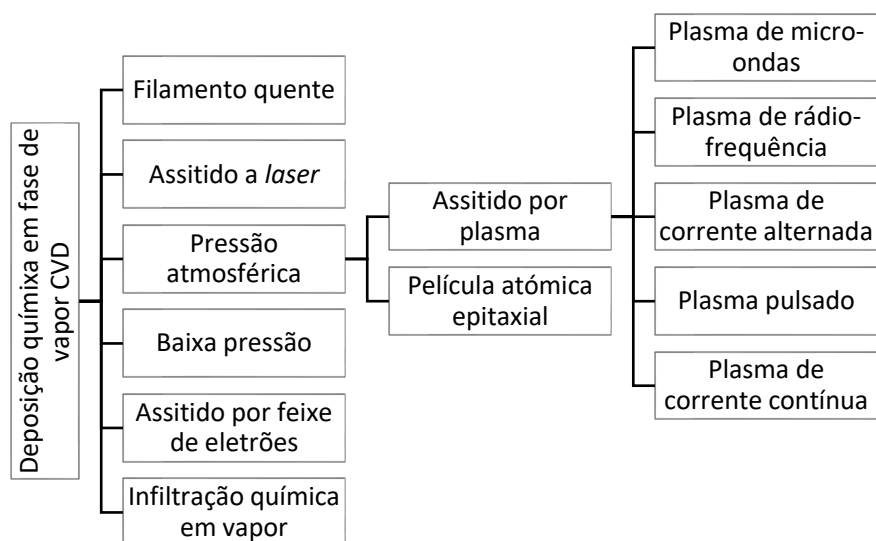


Figura 12 - Diagrama abreviado das diversas variantes desenvolvidas do processo CVD [31]

Quando o processo é assistido por bombardeamento iônico, a temperatura de deposição é inferior, isto permite melhorar a adesão, uniformidade e densificação dos filmes [31]. A deposição química de vapor à pressão atmosférica (APCVD) utiliza equipamentos baratos e permite altas taxas de deposição, no entanto, necessita de altas taxas de fluxo de gás. No caso da deposição química de vapor de baixa pressão (LPCVD) este produz melhores filmes, comparado com a APCVD, porém o equipamento é mais complexo, envolve altas temperaturas e a taxa de deposição é menor. A deposição química de vapor assistida por plasma (PACVD) utiliza plasma para fornecer parte da energia para que a reação ocorra, a temperatura do processo é inferior à do APCVD e LPCVD permitindo a deposição de filmes em substratos de baixo ponto de fusão, contudo, os filmes obtidos não são estequiométricos. O processo de deposição química de vapor a laser LCVD permite a deposição de filmes com alta pureza e funciona em alto vácuo, todavia, é um método muito caro e as taxas de deposição são muito baixas [27; 31]. As principais vantagens e desvantagens do processo CVD são [27]:

#### Vantagens

- Filmes de alta qualidade, com menos porosidade e mais compactos;
- Altas taxas de deposição;
- Facilidade de doping;
- Facilidade em controlar a estequiometria dos filmes;
- Permite revestir objetos de formato complexo;

#### Desvantagens

- Reação cinética é complicada;
- Utilização de fontes térmicas;
- São necessárias altas temperaturas de deposição, o que restringe o tipo de substratos;
- Produção de gases tóxicos, reativos e corrosivos;
- Reagentes caros;

A técnica CVD permite depositar um vasto número de revestimentos anti desgaste, tais como metais, ligas metálicas, boretos, carbonetos, nitretos, óxidos ou carbonitretos e compostos intermetálicos [27; 31].

#### 2.5.4. Técnicas de deposição híbrida

A aplicação de revestimentos contribuiu para aumentar a resistência ao desgaste da ferramenta e garantir uma boa qualidade superficial do produto. Estes revestimentos apresentam elevada dureza, uma boa resistência ao desgaste, mantendo a sua dureza a quente e reduzindo a reação química com o material que se está a maquinar [11].

A deposição híbrida combina mais de um processo de deposição, quando é feita a deposição de revestimentos sobre camadas de revestimentos. Podem ser considerados quatro processos de deposição híbridos [27]:

- PVD convencional + *Sputtering* de *magnetron* de impulso de alta potência (HiPIMS)
- PVD + Arco Convencional
- HiPIMS + Arco
- PVD convencional + Deposição de Vapor Químico Aprimorado por Plasma (PECVD)

Revestimentos como o carboneto de titânio (TiC) e o nitreto de titânio-alumínio (TiAlN) possuem estas propriedades e ainda produzem uma barreira química contra o calor gerado, entre a ferramenta e a peça. Revestimentos como TiN (depositado por deposição física em fase de vapor) e TiCN + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (depositado por deposição química em fase de vapor) têm apresentado bons resultados em termos de vida útil da ferramenta na maquinagem de ligas de titânio [11]. O nitreto de titânio (TiN) proporciona uma baixa relação de atrito nas arestas de corte e maior resistência ao desgaste [5].

Assim, na maquinagem das ligas de titânio é preciso recorrer a revestimentos com elevada resistência ao desgaste e boa estabilidade química. O facto de a maquinagem de titânio gerar elevadas temperaturas na aresta de corte, bem como desgaste e adesão é o suficiente para apoiar o utilização de revestimentos do tipo PVD [5]. O desempenho das ferramentas com cobertura PVD é fortemente afetado pela composição, microestrutura, tensões residuais e adesão entre o revestimento e o substrato [12].

## 3. Métodos e Aplicação

Neste capítulo serão apresentados os materiais utilizados e descritos os métodos aplicados para a realização deste trabalho. O capítulo encontra-se subdividido em dois subcapítulos, 3.1. Materiais e 3.2. Métodos.

### 3.1. Materiais

Neste subcapítulo são apresentados os materiais utilizados para a realização da presente dissertação, nomeadamente: o material maquinado, as suas dimensões, propriedades mecânicas e composição química, e as ferramentas de corte, identificando o material do substrato e a sua geometria.

#### 3.1.1. Material a maquinar

O material maquinado foi a liga Ti4Al6V uma das ligas mais comumente utilizada na indústria aeroespacial, devido às suas excelentes propriedades mecânicas, alta relação resistência/peso e excelente resistência à corrosão. Os avanços na engenharia aeroespacial dependem cada vez mais de soluções que proporcionam um desempenho mais eficaz a temperaturas mais elevadas, redução de peso e diminuição do consumo de combustível. É um tipo de liga alfa-beta ( $\alpha$ - $\beta$ ), que tratável termicamente aumenta a sua resistência, quando sujeita a uma temperatura de recozimento entre os 700°C e os 785°C. Esta liga representa cerca de 60% da produção total de titânio [35; 36]. A tabela 6 representa as principais propriedades mecânicas desta liga.

Tabela 6 - Propriedades mecânicas da liga Ti4Al6V [35]

Propriedade Material	Valor
Dureza [HBW]	334
Limite de elasticidade [MPa]	880
Resistência à tração [MPa]	950
Alongamento [%]	14
Módulo de Elasticidade [GPa]	113.8

A liga Ti4Al6V é constituída por 6% Al, 4% V e o restante Ti. As impurezas como ferro e oxigênio são cuidadosamente controlados para melhorar a ductilidade e a resistência à fratura. A tabela 7 apresenta a composição química da liga Ti4Al6V.

Tabela 7 - Composição química da liga Ti4Al6V [35]

Elemento	Percentagem (%)
Alumínio (Al)	6
Ferro (Fe)	Max 0,25
Oxigénio (O)	Max 0.2
Titânio (Ti)	90
Vanádio (V)	4

A peça foi fornecida na forma de um paralelepípedo com 100mm de comprimento, 50mm de largura e 80mm de altura, conforme se pode observar na figura 13.



Figura 13 - Peça a maquinar

### 3.1.2. Substrato e geometria da ferramenta

As ferramentas de corte utilizadas no processo de fresagem foram fresas de topo, produzidas em carboneto de tungsténio (WC-Co), de grau 6110, com um tamanho de grão médio de 0,3  $\mu\text{m}$ . Tanto as ferramentas revestidas com o revestimento comercial “PrimeCon” (cor ouro rosa) como as fresas não revestidas foram fornecidas pela empresa INOVATOOLS, S.A. (Leiria, Portugal).

A geometria da ferramenta é mostrada na figura 14 e as suas dimensões na tabela 8.

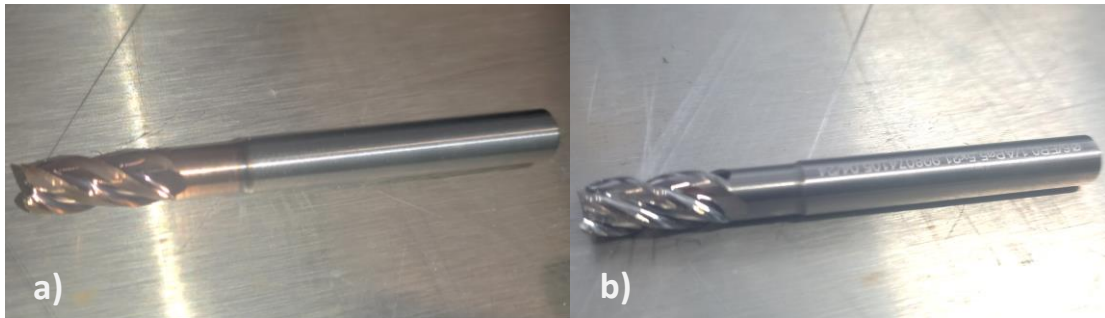


Figura 14 - Exemplo ferramentas de corte utilizadas: a) com revestimento (ref. 266.060.00); b) sem revestimento (ref. 998074105)

Tabela 8 – Dimensão das fresas utilizadas neste trabalho

Geometria	Valor
Diâmetro de corte	6 mm
Comprimento de corte	13 mm
Comprimento total	57 mm
Chanfro	45°; 0.20 mm
Ângulo de hélice	35°/38°
Ângulo de ataque	25,4°
Ângulo de saída	10°
Número de lâminas	4

## 3.2. Métodos e Equipamentos

Nesta subsecção serão apresentados os equipamentos e todos os métodos aplicados para a realização deste trabalho, tais como: parâmetros de maquinagem, caracterização da espessura e morfologia do revestimento, análise da rugosidade, mecanismos de desgaste, forças de corte e análise da vida útil da ferramenta.

### 3.2.1. Equipamentos e condições de maquinagem

Os testes de maquinagem foram realizados recorrendo a um centro de maquinagem de três eixos, mais concretamente um centro de maquinagem CNC HAAS (Oxnard, CA, USA), modelo VF-2. Este equipamento possuiu uma mesa com 914 mm de comprimento e 356 mm de largura, podendo atingir uma velocidade máxima de 10.000 rpm e potência máxima de 20 kW. Esta máquina encontra-se localizada no Laboratório de Tecnologia Mecânica do departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP). A Figura 15 ilustra o referido equipamento.



Figura 15 - Centro de maquinagem CNC HAAS (Oxnard, CA, USA)

Tendo em conta que a geometria do bloco a maquinar é retangular, para o fixar teve-se de utilizar uma prensa de precisão manual modelo *One-Lok*, da marca *CHICK*, com máxima abertura de 200 mm. A prensa foi montada na mesa do centro de maquinagem, como apresentado na figura 16.



Figura 16 - Prensa modelo One-Lok da CHICK

A estratégia de maquinagem foi definida tendo em conta a geometria da peça. Foi realizada uma maquinagem de desbaste linear concordante e não concordante, ou seja, a fresa começava a fresar desde a extremidade do bloco, percorria-o horizontalmente, saía e fazia o regresso numa posição ligeiramente mais à frente, com uma profundidade de corte axial de 0,5 mm e uma profundidade de corte radial de 4,5 mm. A profundidade de corte radial foi mantida constante, com o objetivo de mitigar fenômenos relacionados ao desgaste que poderiam surgir

como resultado da alteração deste parâmetro ao longo do teste. Durante os ensaios, foi utilizado fluido de corte, uma emulsão composta por 5% de óleo de base sintética e 95% de água.

Para realizar a fixação e troca da ferramenta foi necessário utilizar diferentes ferramentas, nomeadamente: um tirante ISO 7388-2, porta-pinças ER32 H70, paquímetro, pinça ER DIN 6499 e um cone ISO40 DIN69871. A figura 17 representa o processo de troca de ferramenta.



Figura 17 - Exemplo processo troca de uma ferramenta

A fixação da ferramenta para medir forças de corte será explicada na seção 3.2.5. - Caracterização de equipamentos de medição de força de corte.

Antes de se iniciar o processo de fresagem teve-se de determinar o zero-peça no centro de maquinagem, ou seja, o zero da ferramenta em relação à superfície da peça. Começou-se por medir a peça de trabalho, recorrendo a uma sonda de contacto com transmissão ótica, modelo OMP40 da marca *Renishaw*. A sonda de contacto foi montada na árvore do centro de maquinagem e colocada o mais próxima possível do centro da peça, recorrendo ao programa *Rectangle Block*. De seguida, foi realizada a atribuição no programa dos valores aproximados de x e y, e calculada a altura da ponta da sonda em relação à superfície da peça, para determinar a posição inicial do eixo z.

Quanto aos parâmetros de fresagem, estes inicialmente foram escolhidos tendo em conta os parâmetros recomendados pelo fabricante. Porém, com o decorrer dos testes houve necessidade de ajustar os parâmetros de corte.

O objetivo principal consiste em avaliar o tempo de vida/ desgaste / rendimento das fresas revestidas e não revestidas para diferentes parâmetros de corte. Para isso, foram variados os seguintes parâmetros: comprimento de corte, velocidade de corte e avanço por dente. As condições de maquinagem tanto para as ferramentas revestidas como não revestidas foram iguais.

Para mais fácil identificação das fresas ao longo desta dissertação e para identificar os parâmetros alterados, optou-se por se utilizar as seguintes nomenclaturas: UCTxFyLz e CTxFyLz. Nesta nomenclatura, a sigla 'UCT' representa as fresas não revestidas e a sigla 'CT' representa as fresas revestidas. A letra x representa o valor da velocidade de corte e pode assumir os valores 60, 70 ou 80m/min. De seguida, a letra y representa o valor de avanço por dente que pode apresentar os valores 0.026, 0.03, 0,07 ou 0.1mm/dente. Por fim, a letra z representa o comprimento de corte utilizado em cada ensaio, que pode tomar os valores de 5, 10 ou 15 metros. A profundidade de corte radial foi constante e de 4,6 mm (77% do diâmetro da ferramenta), enquanto a profundidade de corte axial também foi constante e de 0,5 mm. Todos os parâmetros e condições de teste encontram-se resumidas na tabela 9.

Tabela 9 - Parâmetros de corte utilizados por ferramenta

Referência Fresas não revestidas	Referência Fresas Revestidas	Vel. de corte (m/min)	Avanço (mm/dente)	Profundidade de corte (mm)	Largura de corte (mm)	Comp. de corte (m)
UCT60F2.6L5	CT60F2.6L5	60	0.026	0.5	4.6	5
UCT60F2.6L10	CT60F2.6L10	60	0.026	0.5	4.6	10
-	CT60F2.6L15	60	0.026	0.5	4.6	15
UCT60F3L5	CT60F3L5	60	0.03	0.5	4.6	5
UCT60F3L10	CT60F3L10	60	0.03	0.5	4.6	10
-	CT60F3L15	60	0.03	0.5	4.6	15
UCT60F7L5	CT60F7L5	60	0.07	0.5	4.6	5
UCT60F10L5	CT60F10L5	60	0.1	0.5	4.6	5
UCT70F2.6L5	CT70F2.6L5	70	0.026	0.5	4.6	5
UCT70F2.6L10	CT70F2.6L10	70	0.026	0.5	4.6	10
-	CT70F2.6L15	70	0.026	0.5	4.6	15
UCT70F3L5	CT70F3L5	70	0.03	0.5	4.6	5
-	CT70F3L10	70	0.03	0.5	4.6	10
-	CT70F3L15	70	0.03	0.5	4.6	15
UCT70F7L5	CT70F7L5	70	0.07	0.5	4.6	5
UCT70F10L5	CT70F10L5	70	0.1	0.5	4.6	5
UCT80F2.6L5	CT80F2.6L5	80	0.026	0.5	4.6	5
UCT80F2.6L10	CT80F2.6L10	80	0.026	0.5	4.6	10
-	CT80F2.6L15	80	0.026	0.5	4.6	15

UCT80F3L5	CT80F3L5	80	0.03	0.5	4.6	5
-	CT80F3L10	80	0.03	0.5	4.6	10
-	CT80F3L15	80	0.03	0.5	4.6	15
UCT80F7L5	CT80F7L5	80	0.07	0.5	4.6	5
UCT80F10L5	CT80F10L5	80	0.1	0.5	4.6	5

Começou-se por avaliar todas as variações de velocidade de corte (60, 70 ou 80m/min) e avanço por dente (0.03, 0,07 ou 0.1mm/dente) para um comprimento de corte de 5m, tanto para as fresas revestidas como não revestidas. Durante todos estes ensaios, efetuou-se a mediação da rugosidade da superfície da peça e tirou-se imagens das ferramentas utilizando o microscópio eletrónico. Com estes dados realizou-se uma análise do desgaste provocado nas ferramentas. Verificou-se um desgaste elevado, pelo que se procedeu à alteração dos parâmetros de corte, mais concretamente dos valores de avanço por dente que foram ajustados para os valores recomendados pelo fabricante ( $F_{zmin}= 0,026\text{mm/tooth}$  e  $F_{zmax}=0,03\text{mm/tooth}$ ).

De seguida, realizou-se os testes com todas as variações de velocidade de corte (60, 70 ou 80m/min) e avanço por dente (0.026 ou 0.03mm/dente) para 10m e 15m. Em algumas ferramentas, principalmente as não revestidas, dependendo do parâmetro, houve a necessidade de parar os ensaios em 10m devido ao desgaste e acumulação de material na ferramenta. Isto significa que, nas fresas não revestidas, para os parâmetros mais agressivos, os ensaios foram parados em 10m, para os restantes ensaios estes foram realizados até os 15m. Em cada uma das condições, tanto de 10m como de 15m, foi realizada análise e medição da rugosidade superficial. É importante realçar que cada medição de rugosidade foi repetida quatro vezes, de forma a despistar possíveis erros de leitura. Para além disso, também se avaliou o desgaste provocado na ferramenta de corte. Em todas as situações de corte foram medidas as forças de corte em três eixos (x, y e z).

No final de cada ensaio, as ferramentas de corte foram devidamente embaladas nas suas caixas de origem e devidamente identificadas, para posteriormente serem analisadas através do microscópio de varrimento eletrónico.

### 3.2.2. Análise da rugosidade da superfície maquinada

A análise da rugosidade superficial da superfície maquinada permite avaliar a qualidade superficial das peças maquinadas e o desempenho da ferramenta de corte [38; 39].

A rugosidade da superfície maquinada foi medida recorrendo a um rugosímetro *MAHR PERTHOMETER M2* (Mahr, Gottingen, Alemanha), seguindo a norma DIN EN ISO 4288/ASME b461, após os ensaios de maquinagem, sendo medidos e analisados os valores de rugosidade aritmética ( $R_a$ ), rugosidade média ( $R_z$ ) e rugosidade máxima ( $R_{max}$ ), longitudinalmente à direção da maquinagem.

Após cada ensaio de maquinagem, efetuaram-se quatro medições da rugosidade superficial na direção longitudinal ao corte, e os valores obtidos foram utilizados para calcular o valor médio

aritmético da rugosidade (Ra). Assim, foi possível avaliar a estabilidade do processo, o desempenho da ferramenta de corte e sua correlação com o desgaste resultante em cada condição testada. A figura 18 apresenta o método de medição da rugosidade superficial da peça maquinada.



Figura 18 - Medição da rugosidade superficial com rugosímetro

### 3.2.3. Análise de desgaste e espessura do revestimento

Após os ensaios de maquinagem as fresas foram observadas num microscópio de varrimento elétrico, com o intuito de caracterizar a composição química e a morfologia do revestimento, bem como conhecer, avaliar e quantificar o desgaste das ferramentas de corte e também avaliar os mecanismos de desgaste presentes na superfície das fresas.

Todas as ferramentas foram analisadas num microscópio de varrimento eletrónico - SEM da marca *Hitachi*, modelo SU3800, que se encontra instalado no Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, representado na figura 19. Foram tiradas imagens das fresas maquinadas e de duas fresas não maquinadas: uma revestida e outra não revestida, com o objetivo de caracterizar a composição química do revestimento através da análise por espectroscopia de dispersão de energia - EDS.

Na análise SEM, ajustou-se a gama de ampliação dependendo da zona a medir, permitindo uma melhor análise da morfologia do revestimento. Foi utilizada uma tensão de aceleração de feixe eletrões de 6 kV, e usado o detetor de eletrões retrodifundidos (*Backscattered Electron Detector* – BSE).

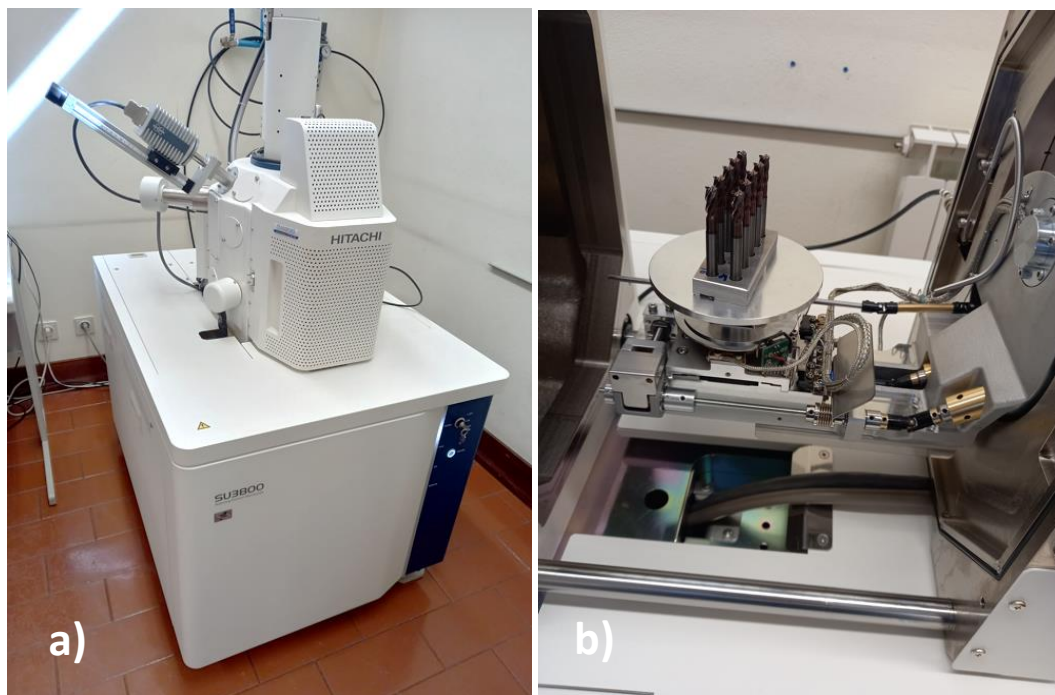


Figura 19 –a) Microscópio eletrônico de varrimento: Hitachi SU3800; b) Ferramentas inseridas para análise no SEM

Para medir a espessura do revestimento das ferramentas de corte, cortou-se uma fresa revestida, sem qualquer desgaste, utilizando uma serra de disco. O corte da secção transversal foi parcial, ou seja, cortou-se a fresa até meio. De seguida, mergulhou-se em azoto líquido por cerca de 10 segundos. Por fim, deu-se uma pequena pancada na fresa, utilizando um martelo, para partir na totalidade, provocando uma rotura frágil. Assim, foi possível analisar a superfície “fresca” da fresa.

#### 3.2.4. Caracterização dos mecanismos de desgaste

As imagens recolhidas no SEM foram posteriormente tratadas no *software ImageJ*, para realizar a medição do desgaste das fresas, conforme a norma ISO 8688-2:1989 [37]. Esta norma recomenda analisar a presença de todos os mecanismos de desgaste e adotar como critério de vida aquele que tem maior influência, ou seja, analisar a influência dos parâmetros de corte no tipo de desgaste criado na ferramenta de corte. Tendo em conta o tipo de desgaste presente nas ferramentas testadas, desgaste de flanco localizado (ocorre em uma região específica do flanco da ferramenta), foi selecionado o tipo de desgaste de flanco VB3. Através da medição da distância VB3 (distância desde o gume da fresa até à marca mais interior de desgaste), figura 20, foi possível quantificar o desgaste ocorrido em cada ferramenta testada.

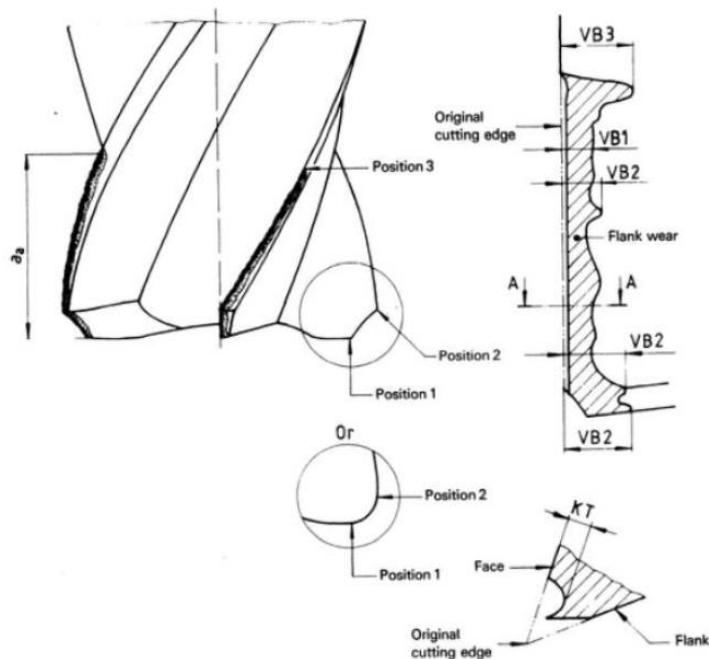


Figura 20 - Tipos de desgaste de flanco em fresas de topo [37]

O desgaste das ferramentas foi avaliado com base numa vista de topo. Foi escolhida esta vista devido aos parâmetros de maquinagem utilizados, que geram um desgaste de flanco mais localizado nos chanfros da ferramenta.

A dimensão VB3, segundo a norma ISO 8688-2:1989, foi medida nas fresas após o processo de maquinagem. A figura 21 representa a dimensão VB3, assim como a referência criada para identificar os 4 dentes cortantes da ferramenta, representando-os com os números de 1 a 4.

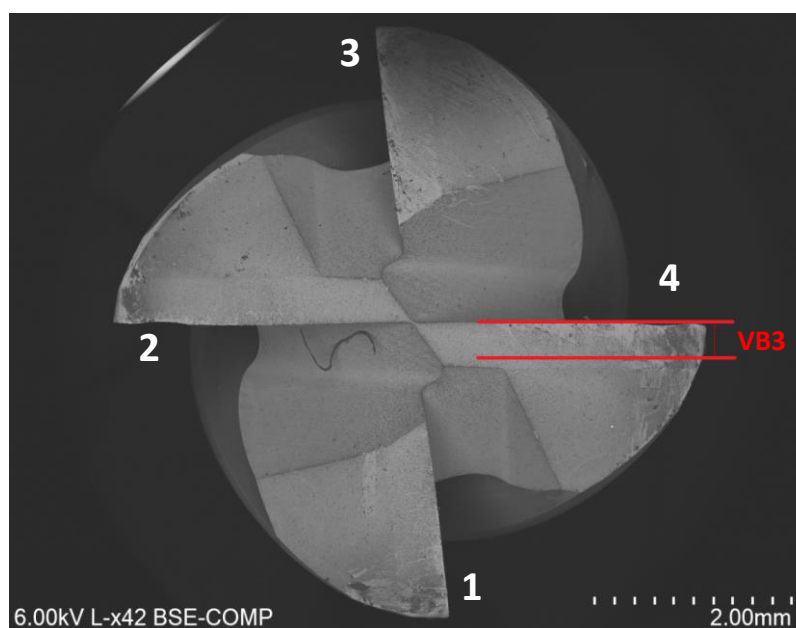


Figura 21 - Zona de referência utilizada na medição do desgaste e numeração das lâminas de corte

A utilização desta numeração facilita a identificação de cada lâmina de corte e análise dos diferentes mecanismos de desgaste ocorridos. Foi analisada a face de ataque em cada fresa testada e medido o desgaste de três gumes, observando as fresas de topo, e segundo a norma ISO 8688-2:01-05-1989 [37].

### 3.2.5. Caracterização dos equipamentos de medição de força de corte

A medição das forças de corte durante o processo de maquinagem permitem recolher informações relevantes sobre a estabilidade do processo, maquinabilidade do material e monitorização do estado da ferramenta.

Para a análise das forças de corte, durante o processo de fresagem da liga Ti4Al6V, foi utilizado um dinamômetro rotativo de quatro componentes KISTLER 9171A, acoplado a um sistema de aquisição de dados KISTLER 5697A1. Este equipamento mede as forças radiais  $F_x$  e  $F_y$ , a força axial  $F_z$  e o torque  $M_z$ , através do software fornecido com o equipamento. As forças de corte que atuam sobre a aresta são medidas diretamente na ferramenta rotativa. O processo de corte pode ser analisado e otimizado com a ajuda dos dados recolhidos.

Os valores de força foram obtidos para todas as condições testadas, pelo que o dinamómetro rotativo foi acoplado ao fuso do centro de maquinagem CNC e por sua vez a ferramenta foi fixa neste equipamento, conforme representado na figura 21.

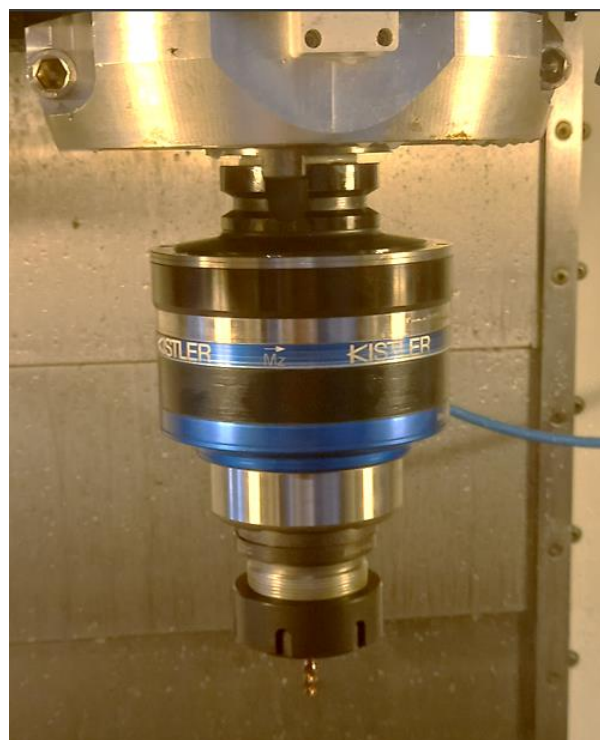


Figura 22 - Equipamento utilizado para medição de forças de corte

### 3.2.6. Avaliação da vida útil da ferramenta

Para determinar a vida útil da ferramenta foram selecionadas diferentes condições de corte, conforme apresentado na tabela 9. Alguns parâmetros permaneceram constantes: profundidade axial de corte de 0,5 mm; e profundidade radial de corte de 4,6 mm. Os ensaios de maquinagem foram realizados utilizando fluido de corte (5% de óleo em água).

Conforme descrito no subcapítulo 3.2.1. Equipamentos e condições de maquinagem, o processo de maquinagem iniciou com a realização dos ensaios para todas as variações de velocidade de corte (60, 70 ou 80m/min) e avanço por dente (0.03, 0,07 ou 0.1mm/dente), para um comprimento de corte de 5m. Realizou-se a análise da rugosidade da superfície maquinada e a análise do desgaste de flanco com o auxílio do microscópio digital Dino-Lite Edge, representado na figura 23. O desgaste medido foi VB3 e seu critério de fim de vida foi estipulado de acordo com a ISO 8688-2:1989 [37]. Assim, o fim da vida útil foi considerado um VB3 máximo de 0,5 mm em qualquer dente individual.



Figura 23 - Microscópio digital Dino-Lite Edge

Analisando as fresas para cada um destes parâmetros verificou-se um elevado desgaste de flanco, tanto nas fresas revestidas como não revestidas. O desgaste apenas foi menor e aceitável, de acordo com o critério imposto pela ISO 8688-2:1989 [37], nas condições em que o avanço por dente era de  $F_z = 0,03\text{mm/dente}$ . Assim sendo, estes primeiros testes a 5m, mais agressivos, permitiram averiguar se o tempo de vida das ferramentas revestidas seria maior que o das ferramentas não revestidas. No entanto, para uma avaliação perfeita do tempo de vida das ferramentas os testes de 5 m foram realizados com condições de corte menos severas, ou seja, ajustou-se as condições de corte para as recomendadas pelo fabricante. Portanto, deixou de se realizar ensaios para os avanços com  $F_z = 0,07$  e  $0,1\text{mm/dente}$  e passou-se a fazer

apenas para  $F_z=0,026$  e  $0,3\text{mm}$ , mantendo as três variações de velocidade de corte (60, 70 ou  $80\text{m/min}$ ) e aumentando o valor de comprimento de corte.

Perante o exposto, os resultados obtidos nos primeiros testes a  $5\text{m}$ , em que os valores de avanço são maiores ( $F_z=0,07$  e  $0,1\text{mm/dente}$ ), não deverão ser tidos em conta na análise da vida útil da ferramenta pois irão desfazer das restantes medições. Portanto, para uma análise mais efetiva selecionou-se as condições para os quais os parâmetros de corte já se encontravam ajustados. Assim, para a análise da vida útil da ferramenta serão consideradas as seguintes condições:

Tabela 10 - Condições de corte selecionadas para análise da vida útil da ferramenta.

Referência Fresas não revestidas	Referência Fresas Revestidas	Vel. de corte (m/min)	Avanço (mm/dente)	Profundidade de corte (mm)	Largura de corte (mm)	Comp. de corte (m)
UCT60F2.6L5	CT60F2.6L5	60	0.026	0.5	4.6	5
UCT60F2.6L10	-	60	0.026	0.5	4.6	10
-	CT60F2.6L15	60	0.026	0.5	4.6	15
UCT60F3L5	CT60F3L5	60	0.03	0.5	4.6	5
UCT60F3L10	-	60	0.03	0.5	4.6	10
-	CT60F3L15	60	0.03	0.5	4.6	15
UCT70F2.6L5	CT70F2.6L5	70	0.026	0.5	4.6	5
UCT70F2.6L10	-	70	0.026	0.5	4.6	10
-	CT70F2.6L15	70	0.026	0.5	4.6	15
UCT70F3L5	CT70F3L5	70	0.03	0.5	4.6	5
-	CT70F3L15	70	0.03	0.5	4.6	15
UCT80F2.6L5	CT80F2.6L5	80	0.026	0.5	4.6	5
UCT80F2.6L10	-	80	0.026	0.5	4.6	10
-	CT80F2.6L15	80	0.026	0.5	4.6	15
UCT80F3L5	CT80F3L5	80	0.03	0.5	4.6	5
-	CT80F3L15	80	0.03	0.5	4.6	15



## 4. Resultados e Discussão

Neste capítulo serão apresentados e comentados os resultados obtidos em cada um dos testes realizados. Assim, o capítulo encontra-se subdividido nas seguintes subsecções: 4.1. Caracterização do revestimento; 4.2. Análise da superfície maquinada; 4.3. Análise das forças de corte, 4.4. Caracterização de desgaste na ferramenta; 4.5. Análise dos mecanismos de desgaste; 4.6. Análise da vida útil da ferramenta. Deve-se realçar que os capítulos 4.2., 4.3., 4.4. e 4.5. foram subdivididos de acordo com a velocidade de corte utilizada, nomeadamente, 60 m/min, 70 m/min e 80 m/min para uma melhor interpretação e apresentação dos resultados.

### 4.1. Caracterização do revestimento

O revestimento foi analisado de acordo com os métodos descritos na secção 3.2.3. Com a análise em SEM foi possível determinar o valor médio da espessura do revestimento, a sua morfologia e a sua composição química.

A figura 24 apresenta a morfologia do revestimento em secção transversal. Este revestimento apresenta uma morfologia colunar compacta, embora se visualize algumas colunas, principalmente na parte superior onde é visível o topo de cada coluna. O revestimento foi depositado nas ferramentas com uma espessura de 1,6 $\mu$ m.

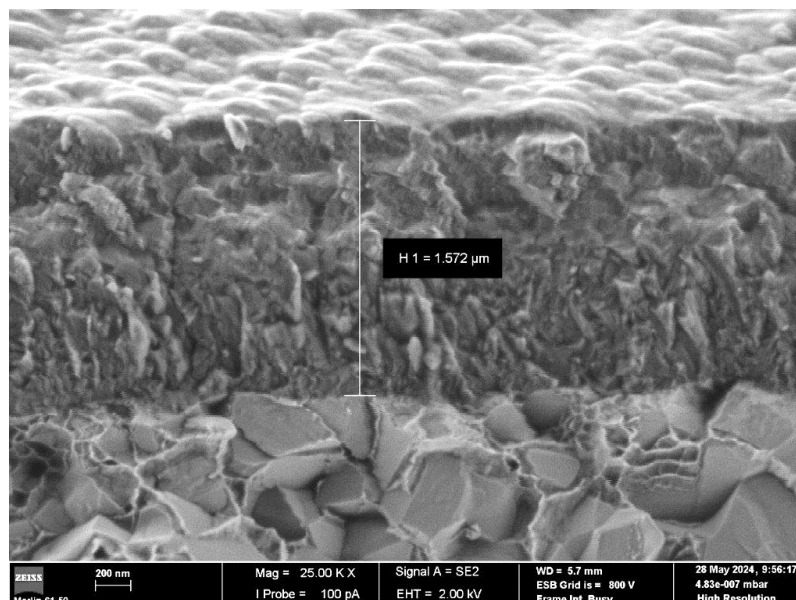


Figura 24 - Morfologia e espessura do revestimento

A tabela 11 apresenta a composição química do revestimento em percentagem atómica. Através da análise de composição química verifica-se que o revestimento é do sistema TiSiCN. A percentagem de azoto (N) revela que o revestimento tem uma composição sob-estequiométrica já que a razão da soma de todos os elementos metálicos a dividir pela percentagem de azoto é inferior a 1. Além disso, apesar do revestimento apresentar C, este

elemento pode estar presente na composição do revestimento devido à sua contaminação superficial. Deve ser realçado que a concentração de Al é muito pequena e que tal percentagem contribui de uma forma mínima para melhorar as suas propriedades mecânicas.

Tabela 11 - Composições químicas em percentagem atômica do revestimento

Revestimento					
	C	N	Al	Si	Ti
Percentagem atômica (%at)	4,1	54,6	0,5	8,9	33,9

## 4.2. Análise da superfície maquinada

A rugosidade da superfície maquinada foi medida, nas condições descritas no subcapítulo 3.2.2, para todas as condições testadas. Esta medição foi realizada no sentido longitudinal ao corte.

Para uma melhor interpretação dos dados, os resultados foram divididos de acordo com a velocidade de corte utilizada, para as fresas revestidas e não revestidas.

### 4.2.1. Velocidade de corte = 60m/min

A figura 25 apresenta os resultados obtidos da rugosidade superficial média medida da superfície da peça maquinada, para cada uma das ferramentas testadas com velocidade de corte 60m/min, agrupando-as por revestimento, comprimento de corte e avanço.

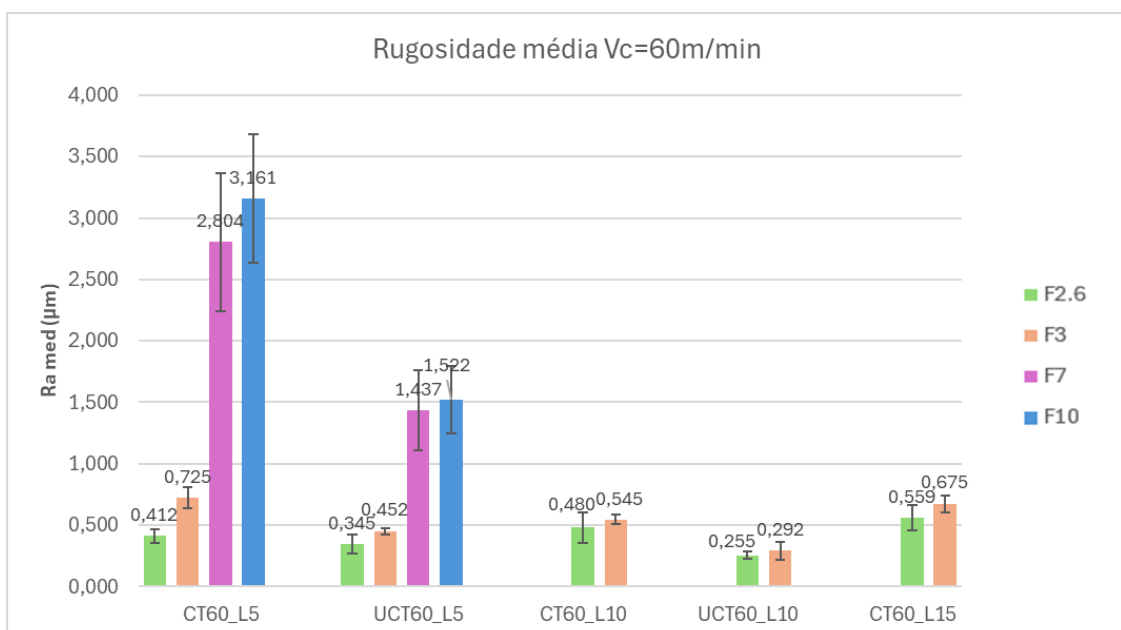


Figura 25 - Valor de rugosidade superficial média obtida para todas as condições testadas com velocidade de corte de 60m/min

A partir da figura 25 é possível observar que para qualquer uma das fresas (revestidas ou não revestidas) o valor da rugosidade aumenta sempre com o aumento do avanço por dente. Esta tendência é, claramente, notória quando o valor do avanço sobe para  $F_z=0,07\text{mm/dente}$  e maior ainda quando  $F_z=0,1\text{mm/dente}$ . Para valores de  $F_z=0,026$  e  $0,03\text{mm/dente}$  verifica-se que a rugosidade superficial é consideravelmente menor, em ambas as condições (fresas revestidas e não revestidas).

Ao analisar os dados para um comprimento de corte com 5m ( $L=5\text{m}$ ), verifica-se que nas fresas não revestidas a rugosidade da superfície é menor, quando comparada com as fresas revestidas, para todos os avanços por dente. Esta diferença é maior quanto mais elevado é o valor do avanço por dente ( $F_z=0,07$  ou  $0,1\text{mm/dente}$ ).

Conforme referido no subcapítulo 3.2.1, teve de se ajustar os valores do avanço por dente para o recomendado pelo fabricante, devido ao elevado desgaste provocado nas ferramentas. Posto isto, deu-se continuidade aos ensaios com  $F_z= 0,026$  e  $0,03\text{mm/dente}$  para  $L=10\text{m}$  e  $L=15\text{m}$ , para todas as velocidades de corte ( $V_c= 60, 70$  e  $80\text{m/min}$ ).

Para um comprimento de corte de 10m ( $L=10\text{m}$ ), tanto com  $F_z= 0,026$  ou  $0,03\text{mm/dente}$  observam-se valores muito próximos de rugosidade. Nas fresas revestidas a rugosidade da superfície foi ligeiramente maior para um avanço do dente  $F_z=0,03\text{mm/dente}$ . O mesmo acontece nas fresas não revestidas, verifica-se que efetivamente a rugosidade foi maior para um maior valor do avanço por dente.

Para um comprimento de corte de 15m ( $L=15\text{m}$ ) não foi possível testar as fresas não revestidas, porque partiam. Apenas foram realizados ensaios para as fresas revestidas. Comparando os resultados obtidos para  $L=15$ , pode-se mais uma vez concluir que quanto maior é o valor do avanço por dente maior é a rugosidade da superfície maquinada.

#### **4.2.2. Velocidade de corte = 70m/min**

Os resultados obtidos para a rugosidade superficial média medida da superfície maquinada para todas as condições testadas com uma velocidade de corte de  $70\text{m/min}$  são apresentados na figura 26, agrupando-as por revestimento, comprimento de corte e avanço.

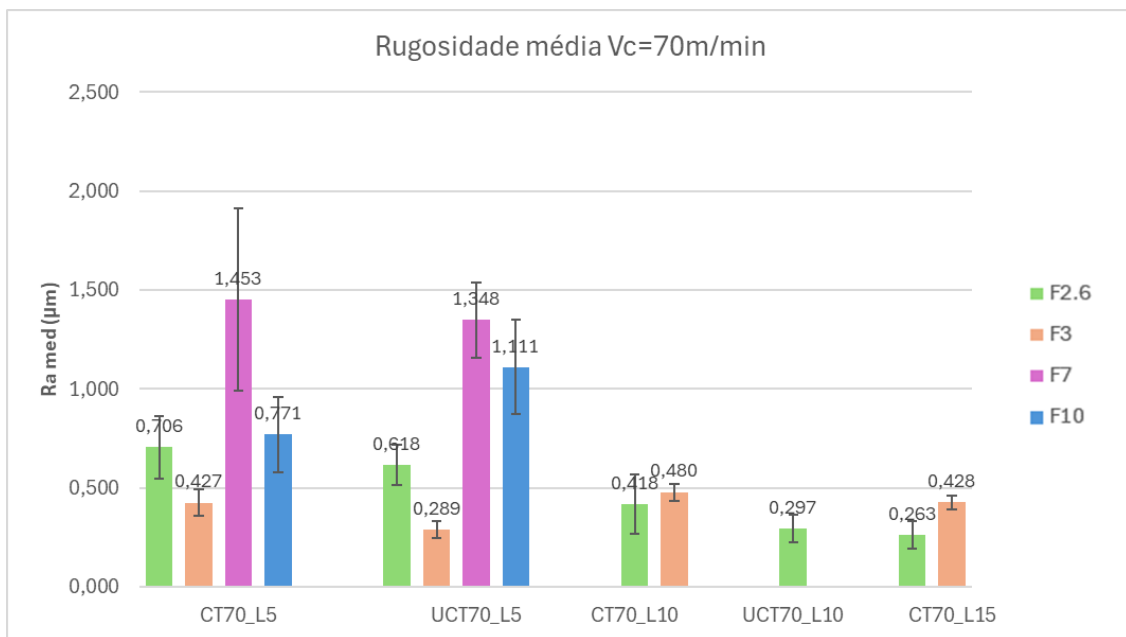


Figura 26 - Valor de rugosidade superficial média obtida para todas as condições testadas com velocidade de corte de 70m/min

A partir da figura 26 é possível observar que para L=5m os resultados variaram, os valores de rugosidade não aumentaram diretamente com o avanço por dente. Tanto para as fresas revestidas como não revestidas a rugosidade foi maior para  $F_z=0,026\text{mm/dente}$  do que para  $F_z=0,03\text{mm/dente}$  e foi maior para  $F_z=0,07\text{mm/dente}$  do que para  $F_z=0,1\text{mm/dente}$ . Esta alteração de comportamento pode dever-se às vibrações do processo, tipo de apara formada e mecanismos de desgaste presentes e forças de corte desenvolvidas.

Verificam-se algumas diferenças face aos resultados obtidos, para estas mesmas condições de teste, mas com velocidade de corte de 60m/min, nomeadamente:

- Para L=5m existe um claro aumento da rugosidade superficial quando o valor do avanço é mais baixo ( $F_z=0,026\text{mm/dente}$ ), tanto na fresa revestida como a não revestida;
- Nas restantes condições de avanço por dente, os valores de rugosidade foram mais baixos;
- Ocorre um aumento de rugosidade quando L=10m, para a fresa revestida com  $F_z=0,03\text{mm/dente}$  e na fresa não revestida;

Para L=10m o valor da rugosidade é efetivamente maior à medida que o valor do avanço por dente aumenta, em todas as condições testadas. Mais uma vez verifica-se menor rugosidade superficial para  $F_z=0,026\text{mm/dente}$  nas fresas não revestidas.

Para L=15m o valor da rugosidade aumenta com a subida do valor do avanço por dente. Comparando as fresas não revestidas com L=10m com as fresas revestidas com L=15m e  $F_z=0,026\text{mm/dente}$ , verifica-se que a rugosidade da superfície maquinada é maior nas fresas não revestidas.

### 4.2.3. Velocidade de corte = 80m/min

Por fim, são apresentados na figura 27 os resultados obtidos para a rugosidade superficial média medida da superfície maquinada para as condições testadas com uma velocidade de corte de 80m/min, agrupando-as por revestimento, comprimento de corte e avanço.

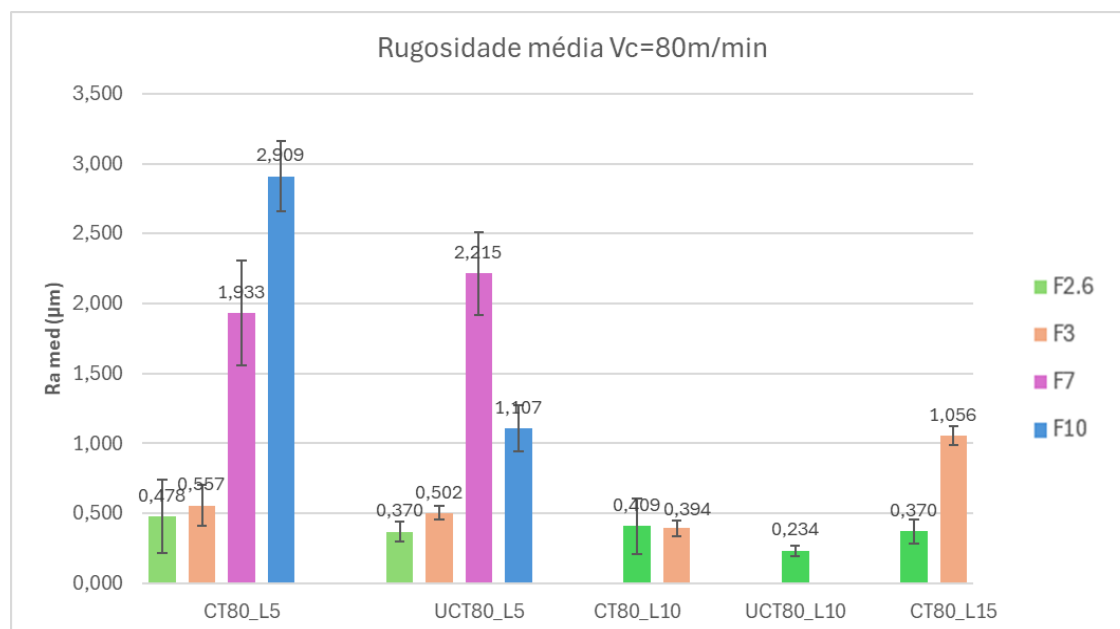


Figura 27- Valor de rugosidade superficial média obtida para todas as condições testadas com velocidade de corte de 80m/min

Analisando a figura 27 observa-se algo muito similar ao obtido para  $V_c=60\text{m/min}$  que é o aumento efetivo da rugosidade com o aumento do avanço por dente. Para  $L=5\text{m}$  é claro o aumento da rugosidade com o aumento do avanço por dente, enquanto nas fresas não revestidas o valor da rugosidade é maior para  $F_z=0,07\text{mm/dente}$ . Esta diferença deve-se ao elevado desgaste provocado na ferramenta, conforme se vai visualizar no capítulo 4.4.

Para  $L=10\text{m}$  os valores de rugosidade ficaram muito próximos, tendo em conta o avanço, contudo verifica-se que é maior nas fresas revestidas comparativamente à fresa não revestida.

Para  $L=15\text{m}$  a rugosidade foi bastante mais elevada para o maior valor de avanço por dente testado ( $F_z=0,03\text{mm/dente}$ ), sendo este o maior valor obtido comparativamente a  $V_c=60$  e  $70\text{m/min}$ .

### 4.3. Análise das forças de corte

Conforme explicado na seção 3.2.5., as forças de corte foram registadas para os valores de avanço por dente analisados neste trabalho, para as condições com 60, 70 e 90m/min de velocidade de corte e comprimento de corte 5, 10 e 15m.

Para simplificar a interpretação e comparação dos resultados, estes foram divididos de acordo com a velocidade de corte utilizada, para as fresas revestidas e não revestidas.

### 4.3.1. Velocidade de corte = 60m/min

Os resultados obtidos para as forças de corte nas condições testadas com uma velocidade de corte de 60m/min são apresentados na figura 28, agrupando-as por revestimento, comprimento de corte e avanço.

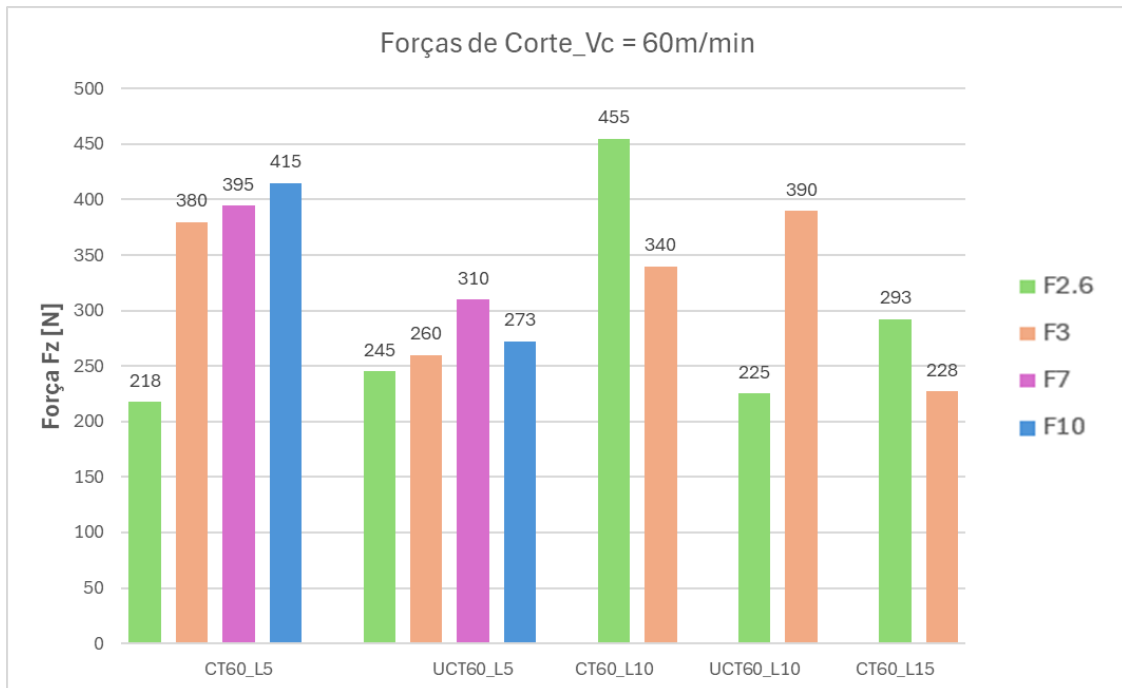


Figura 28 - Forças de corte para todas as condições testadas com velocidade de corte de 60m/min

Observando a figura 28, verifica-se que para as ferramentas revestidas com L=5m (CT60\_L5) as forças de corte aumentaram com o aumento do avanço por dente, sendo este aumento mais significativo de  $F_z=0,026\text{mm/dente}$  para  $F_z=0,03\text{mm/dente}$ . Para os restantes valores de avanço as forças de corte aumentaram gradualmente.

Comparando estes mesmos parâmetros com as fresas não revestidas (UCT60\_L5), é possível aferir que as forças de corte nas ferramentas não revestidas são menores, para qualquer valor de avanço. Ao analisar individualmente cada valor obtido, fica claro que as forças de corte foram maiores para avanço  $F_z=0,07\text{mm/dente}$ .

Para L=10m verifica-se maior força de corte nas fresas revestidas (CT60\_L10) que nas não revestidas (UCT60\_L10) para o avanço  $F_z=0,026\text{mm/dente}$ . Ocorreu um comportamento diferente quando se aumentou o avanço para  $F_z=0,03\text{mm/dente}$ , em que a força foi ligeiramente maior na fresa não revestida.

Comparando os resultados das fresas revestidas para L=15m (CT60\_L15) com as de 10m verifica-se uma diminuição das forças de corte, em ambos os avanços.

### 4.3.2. Velocidade de corte = 70m/min

A figura 29 apresenta os resultados obtidos para as forças de corte de todas as condições testadas com uma velocidade de corte de 70m/min, agrupando-as por revestimento, comprimento de corte e avanço.

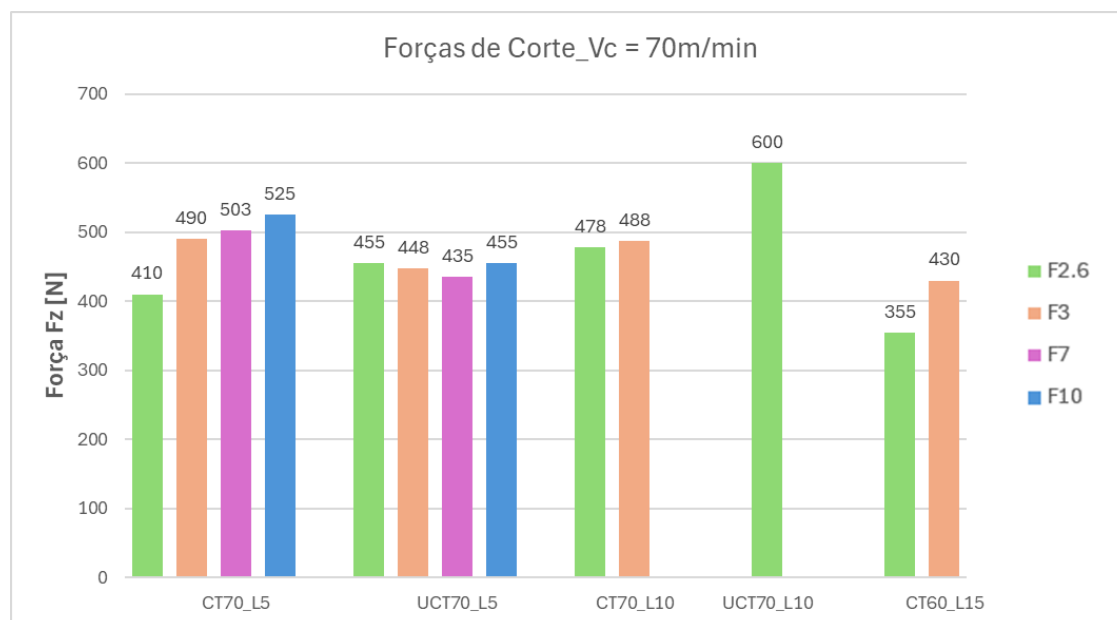


Figura 29 - Forças de corte para todas as condições testadas com velocidade de corte de 70m/min

Ao analisar a fresas revestidas e não revestidas para L=5m e Vc=60m/min com os valores obtidos com Vc=70m/min, verifica-se um aumento das forças de corte, em todos os valores de avanço. Ocorre novamente um aumento das forças com o aumento do avanço por dente, nas fresas revestidas. Para as fresas não revestidas os valores das forças andam muito próximos e sempre no valor dos 400N.

Para L=10m e L=15m verifica-se novamente um aumento das forças de corte, comparativamente aos valores obtidos para os mesmos parâmetros com Vc=60m/min.

Especificamente para L=10m, o valor foi maior para a fresa não revestida, devido à acumulação de aparado junto da fresa, que gerou mais atrito, sendo necessário atuar com mais força. Nas fresas revestidas as forças de corte foram um pouco maiores para o Fz=0,03mm/dente. Comparando com L=15m, mais uma vez verifica-se que as forças de corte diminuíram.

### 4.3.3. Velocidade de corte = 80m/min

Por fim, a figura 30 mostra os resultados obtidos para as forças de corte nas condições testadas com uma velocidade de corte de 80m/min, agrupando-as por revestimento, comprimento de corte e avanço.

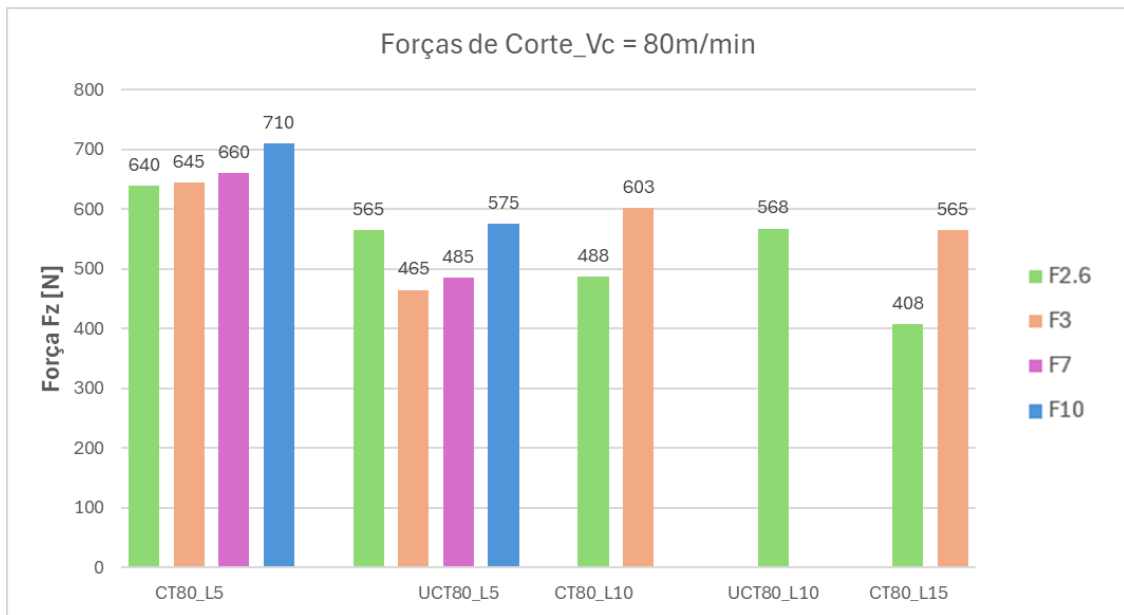


Figura 30 - Forças de corte para todas as condições testadas com velocidade de corte de 80m/min

A partir da figura 30 verifica-se, novamente, um aumento das forças de corte com o aumento do valor de avanço por dente, para as fresas revestidas com L=5m (CT80\_L5). Comparando estas mesmas condições com as fresas não revestidas (UCT80\_L5) as forças são claramente menores e próximas.

Nas fresas não revestidas não se verifica um aumento das forças em função do avanço, contudo, o valor maior das forças foi obtido para o maior valor de avanço por dente.

Comparando as fresas revestidas e não revestidas para L=5m e Vc=60 e 70m/min com os valores obtidos, nas mesmas condições, com Vc=80m/min, observa-se novamente um aumento das forças de corte. Portanto, fica evidente que existe um claro aumento das forças de corte com o aumento da velocidade de corte.

Para L=10m, verifica-se que nas fresas revestidas o valor das forças foi maior para o avanço  $F_z=0,03\text{mm/dente}$ , maior valor de avanço testado. Relativamente à fresa não revestida, houve uma pequena redução face ao obtido para Vc= 70m/min.

Para L=15m, as forças de corte foram maiores para o maior valor de avanço, conforme ocorreu nas fresas revestidas com L=10m. Mais uma vez verifica-se que as forças de corte foram menores para L=15m do que para L=10m, nas mesmas condições de trabalho.

#### 4.4. Caracterização de desgaste na ferramenta

A análise do desgaste nas ferramentas de corte foi realizado conforme descrito na secção 3.2.3., (desgaste de flanco, VB3) e de acordo com a norma ISO 8688-2:1989 [37]. Os resultados foram agrupados de acordo com a velocidade de corte utilizada, comprimento de corte e avanço por dente, para as fresas revestidas e não revestidas. Note-se, no entanto, que os desgastes para as ferramentas de corte revestidas testadas a 10m não foi medido, porque os testes foram realizados continuamente até 15 metros. Apesar de se terem adquirido imagens do desgaste,

para esta distância, com recurso a um microscópio ótico, devido ao baixo desgaste, este não foi possível ser avaliado e, portanto, nos gráficos de desgaste não aparecem as barras correspondentes ao desgaste para os fresas revestidas e testadas com 10m de comprimento.

#### 4.4.1. Velocidade de corte = 60m/min

Os resultados obtidos para o desgaste das ferramentas testadas nas condições com velocidade de corte de 60m/min são apresentados na figura 31, agrupando-o por revestimento, comprimento de corte e avanço.

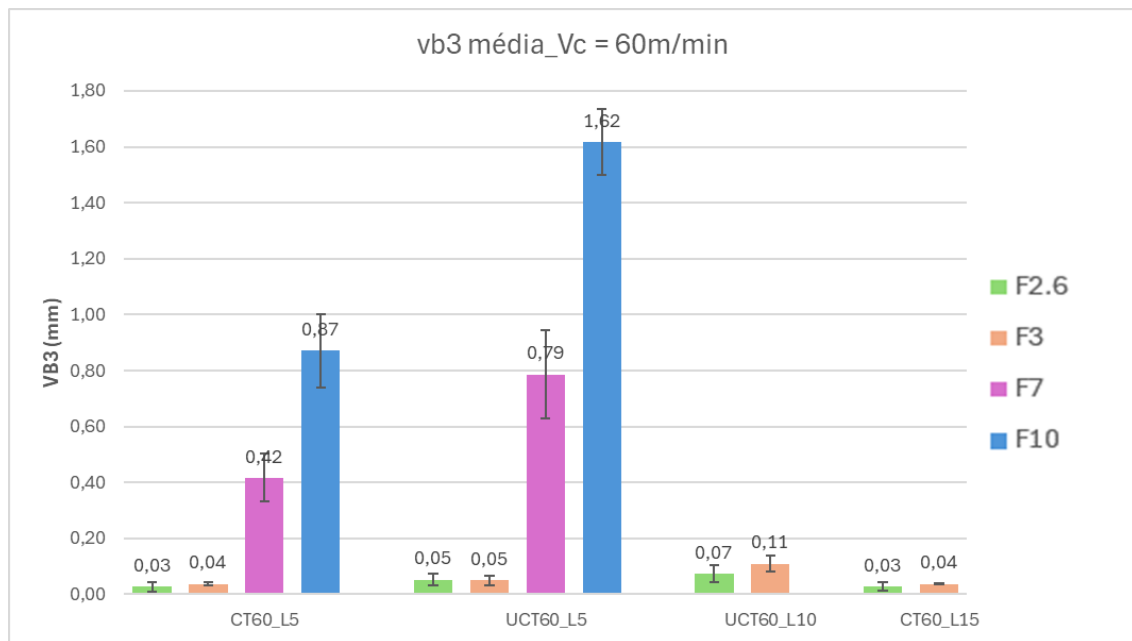


Figura 31 - Valor médio de desgaste (VB3) para todas as condições testadas com velocidade de corte de 60m/min

A partir da figura 31 fica clara o aumento do desgaste das ferramentas com o aumento do avanço por dente, à semelhança da evolução da rugosidade no subcapítulo 4.2.1. Tanto nas fresas revestidas como não revestidas esta tendência foi igual, sendo o desgaste superior nas fresas não revestidas. Assim, para um comprimento de corte de 5m tanto as fresas revestidas (CT60\_L5) como não revestidas (UCT60\_L5) apresentam um aumento de desgaste com o aumento do avanço.

Para os avanços mais baixos  $F_z = 0,026$  e  $0,03$  mm/dente verifica-se um desgaste muito baixo em todas as variações do comprimento de corte, exceto nas ferramentas não revestidas com comprimento de corte  $L=10$ m, em que se observa um pequeno aumento do desgaste para ambos os avanços.

Comparando o desgaste das ferramentas não revestidas com comprimento de corte de 10m (UCT60\_L10) para as ferramentas revestidas com comprimento de corte 15m (CT60\_L15), verifica-se que as fresas não revestidas apresentam maior desgaste.

A figura 32 mostra o efeito da variação do avanço para a ferramenta revestida CT60\_L5 (32a) e não revestida UCT60\_L5 (32b). Conforme descrito anteriormente, o desgaste é efetivamente maior na fresa não revestida, como se pode verificar pelas marcas nas faces de saída.

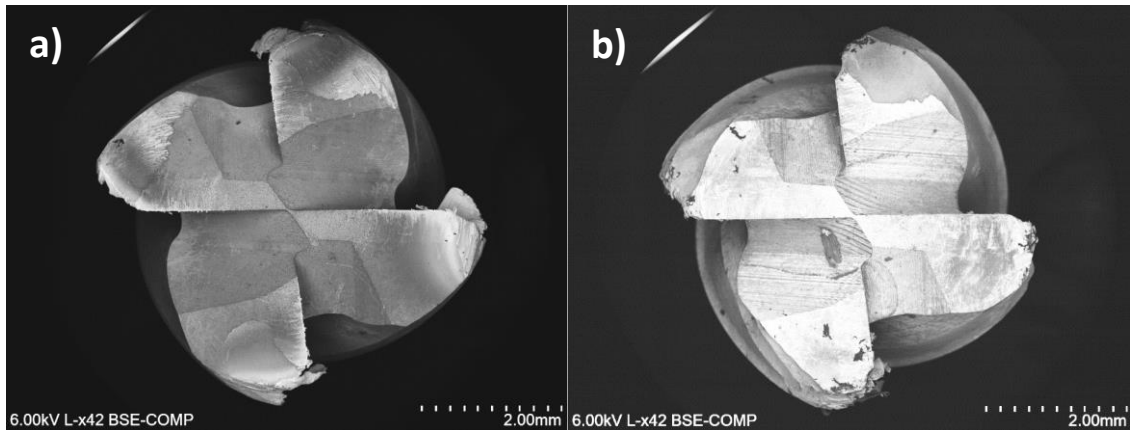


Figura 32 - Imagens SEM da vista de topo das ferramentas CT60\_L5 (a) e UCT60\_L5 (b) para  $F_z=0,1\text{mm/dente}$

A figura 33 apresenta a variação do desgaste em função do comprimento de corte na ferramenta revestida CT60\_L15 (33a) e não revestida UCT60\_L10 (33b). Pode-se verificar que para a ferramenta CT60\_L15 o desgaste é praticamente inexistente, enquanto para a ferramenta UCT60\_L10 já se observar um ligeiro desgaste nas pontas.

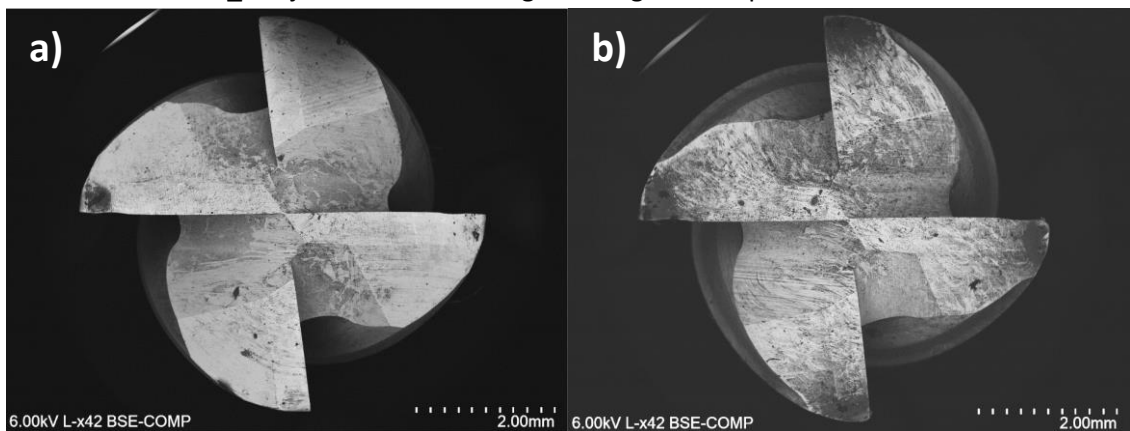


Figura 33 - Imagens SEM da vista de topo das ferramentas CT60\_L15 (a) e UCT60\_L10 (b) para  $F_z=0,03\text{mm/dente}$

#### 4.4.2. Velocidade de corte = 70m/min

Os resultados obtidos para o desgaste das ferramentas de corte nas condições testadas com uma velocidade de corte de 70m/min são apresentados na figura 34, agrupando-as por revestimento, comprimento de corte e avanço.

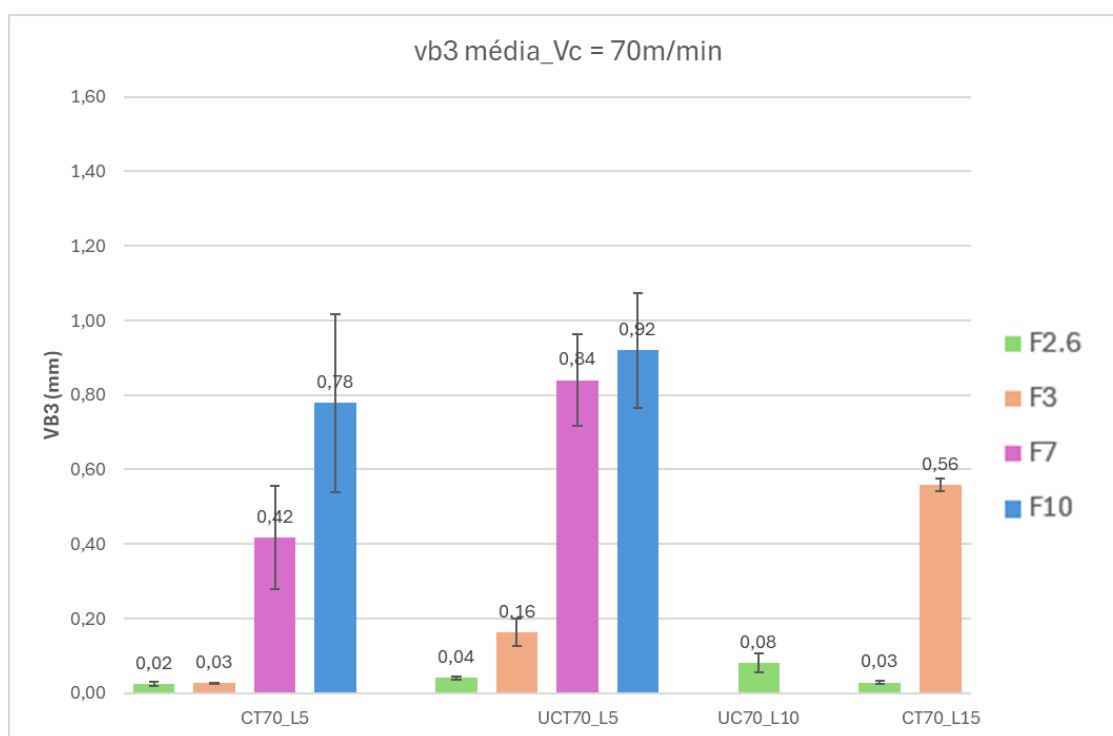


Figura 34 - Valor médio de desgaste (VB3) para todas as condições testadas com velocidade de corte de 70m/min

Analisando a figura 34, mais uma vez se observa um aumento de desgaste das ferramentas com o aumento do avanço por dente. Sendo este aumento maior com  $F_z=0,07$  e  $0,1$ mm/dente para  $L=5$ m e  $F_z=0,03$ mm/dente para  $L=15$ m.

Comparando os resultados das fresas revestidas e não revestidas para 5m verifica-se que o desgaste é maior nas fresas não revestidas (UCT\_L5). Confrontado estes resultados com os obtidos com  $V_c=60$ m/min os valores são bastante próximos, havendo uma ligeira redução do desgaste nas fresas para  $L=5$ m.

Para  $L=10$ m apenas temos um resultado, porque conforme referido anteriormente as fresas não revestidas não resistiram quando testadas para 15m (simplesmente partiam). Desta forma, comparou-se o desgaste das fresas não revestidas com  $L=10$ m (UCT70\_L10) com as fresas revestidas com  $L=15$ m (CT70\_L15). Como se pode observar na figura 34 o desgaste, para o menor valor de avanço, é efetivamente maior para a fresa não revestida com comprimento 10m (UCT70\_L10). Contudo, verifica-se um aumento substancial do desgaste na fresa revestida para comprimento de corte de 15m, com  $F_z=0,03$ mm/dente, corroborando com o aumento da rugosidade de superfície, descrito na figura 26. Para além disso, ao comparar este resultado com o obtido com  $V_c=60$ m/min, verifica-se que o desgaste aumentou com a velocidade. Portanto, quanto maior a velocidade e o comprimento de corte maior é o desgaste provocado na ferramenta.

A figura 35 apresenta o efeito do aumento do avanço por dente na ferramenta revestida CT70\_L5 (32a) e não revestida UCT70\_L5 (32b). Nesta condição, observa-se uma grande acumulação de aparas na ferramenta, sendo maior na ferramenta não revestida, provocando maior desgaste e rugosidade à superfície da peça (figura 26). Em ambas as condições o desgaste

é grande, contudo, analisando cuidadosamente cada dente de corte o desgaste é maior na ferramenta não revestida.

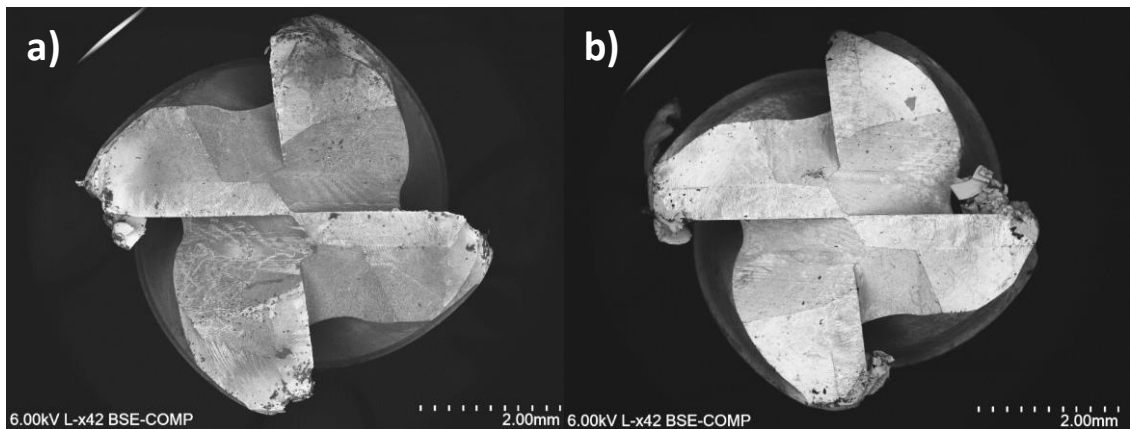


Figura 35 - Imagens SEM da vista de topo das ferramentas CT70\_L5 (a) e UCT70\_L5 (b) para  $F_z=0,1\text{mm/dente}$

Na figura 36 é possível avaliar a variação do desgaste em função do comprimento de corte na ferramenta revestida CT70\_L15 (36a) e não revestida UCT70\_L10 (36b), para um avanço de  $F_z=0,026\text{mm/dente}$ . Na ferramenta CT70\_L15 (36a) o desgaste é praticamente inexistente e semelhante ao obtido, nas mesmas condições, para  $V_c=60\text{m/min}$ . No caso da ferramenta UCT70\_L10 (36b), ocorre um ligeiro aumento do desgaste. O valor é semelhante ao obtido, nas mesmas condições, para  $V_c=60\text{m/min}$ .

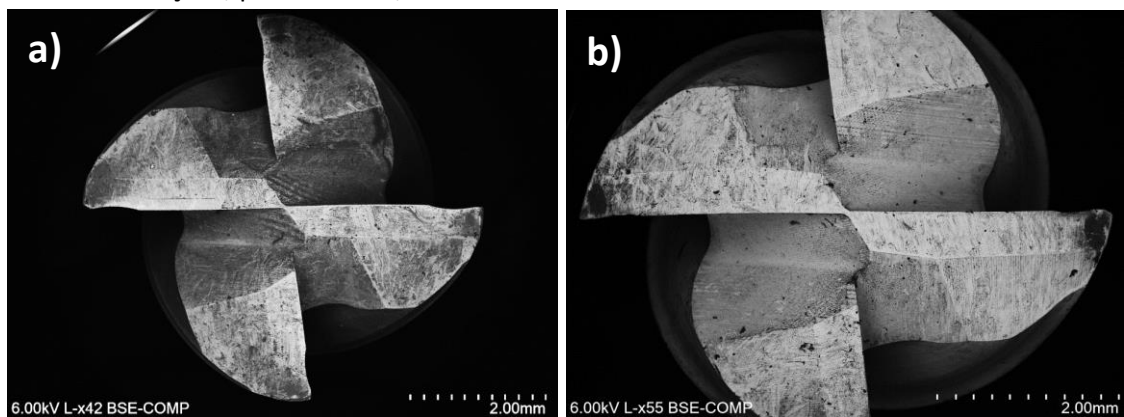


Figura 36 - Imagens SEM da vista de topo das ferramentas CT70\_L15 (a) e UCT70\_L10 (b) para  $F_z=0,026\text{mm/dente}$

#### 4.4.3. Velocidade de corte = 80m/min

Por fim, a figura 37 apresenta os resultados obtidos para o desgaste das ferramentas de corte nas condições testadas com uma velocidade de corte de 80m/min, agrupando-as por revestimento, comprimento de corte e avanço.

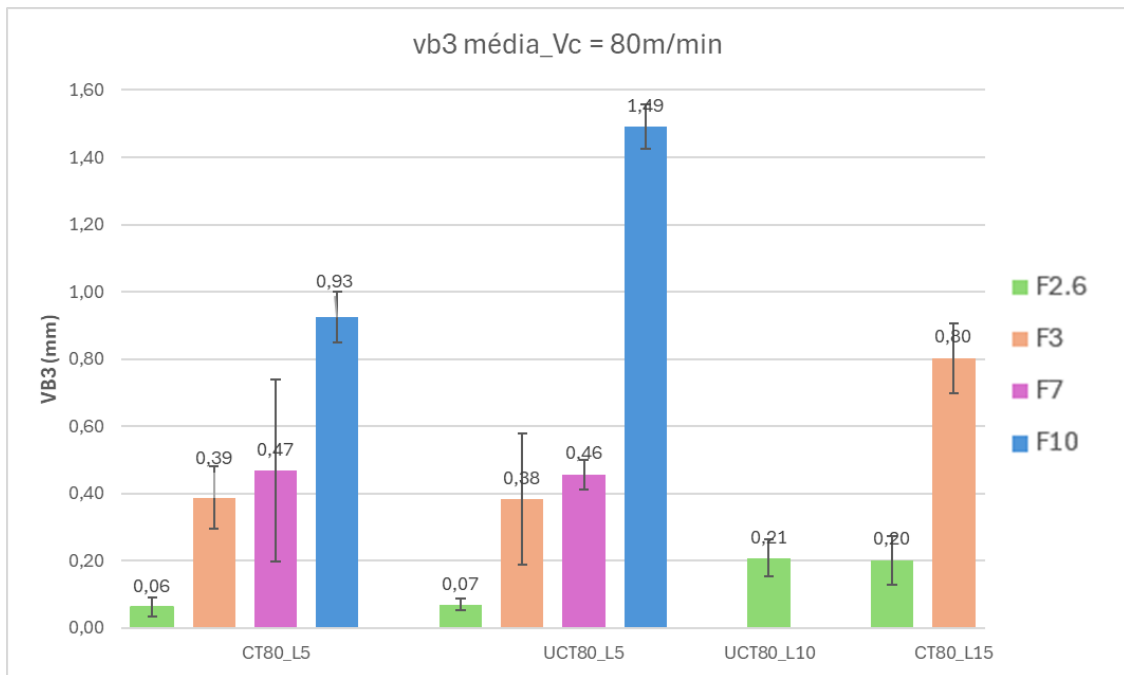


Figura 37 - Valor médio de desgaste (VB3) para todas as condições testadas com velocidade de corte de 80m/min

A partir da figura 37 verifica-se, novamente, um aumento do desgaste das ferramentas com o aumento do avanço por dente, independente do valor de comprimento de corte.

Para L=5m observa-se maior desgaste na ferramenta não revestida com  $F_z = 0,1\text{mm/dente}$ , comparativamente à ferramenta revestida. Nos restantes valores de avanço, para L=5m, os valores de desgaste são bastante próximos aos obtidos nas fresas revestidas.

Com o aumento da velocidade de corte para  $V_c = 80\text{m/min}$ , verifica-se um aumento do desgaste nas fresas, com o aumento do avanço por dente, tanto nas fresas revestidas como não revestidas, quando comparado com as condições de menor velocidade. A única exceção foi na fresa não revestida para o avanço de  $F_z = 0,07\text{mm/dente}$ , em que houve uma diminuição do desgaste devido à acumulação de aparas e conseqüentemente aumento da temperatura junto da ferramenta.

O desgaste da fresa não revestida para L=10m (UCT80\_L10) e  $F_z = 0,026\text{mm/dente}$  é praticamente igual ao obtido para a fresa revestida para L=15m (CT80\_L15). No entanto, com o aumento do avanço para  $F_z = 0,03\text{mm/dente}$  o desgaste da fresa CT80\_L15 subiu bastante, sendo este o maior valor atingido para estas condições, ou seja, para  $V_c = 60$  e  $70\text{m/min}$  o desgaste foi menor. Assim, certifica-se que efetivamente quanto maior é a velocidade e o comprimento de corte maior é o desgaste criado na ferramenta.

A figura 38 permite avaliar o efeito do aumento do avanço por dente na ferramenta revestida CT80\_L5 (38a) e não revestida UCT80\_L5 (38b), para  $F_z = 0,1\text{mm/dente}$ . Analisando cada uma das imagens verifica-se um severo desgaste na ferramenta UCT80\_L5 (38b), na qual é perceptível a quebra dos 4 dentes.

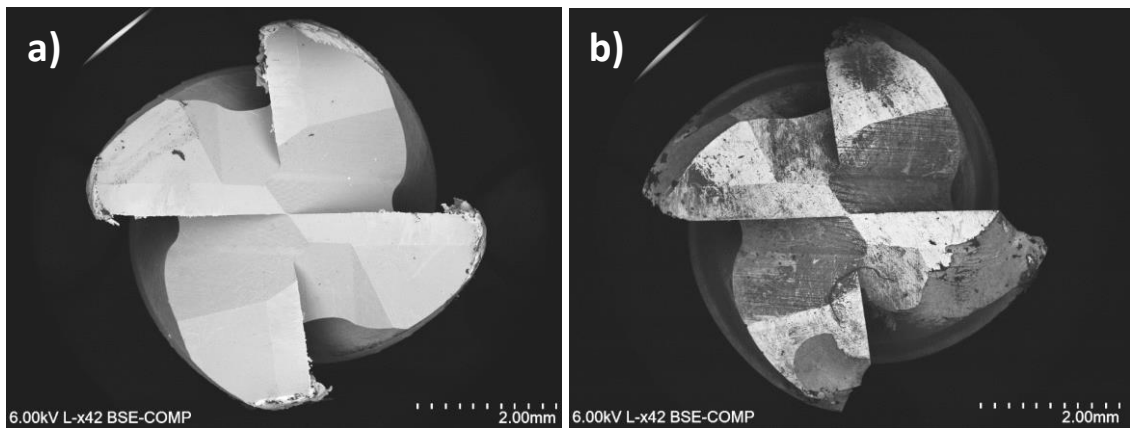


Figura 38 - Imagens SEM da vista de topo das ferramentas CT80\_L5 (a) e UCT80\_L5 (b) para  $F_z=0,1\text{mm/dente}$

Na figura 39 é possível avaliar a variação do desgaste em função do comprimento de corte na ferramenta revestida CT80\_L15 (39a) e não revestida UCT80\_L10 (39b), para um avanço de  $F_z=0,026\text{mm/dente}$ . O desgaste obtido para a ferramenta CT80\_L15 é igual ao obtido para a ferramenta UCT80\_L10. Contudo, comparando estes valores com os obtidos para  $V_c=70\text{m/min}$ , verifica-se um aumento do desgaste. Assim, mais uma vez se confirma que com o aumento da velocidade e o comprimento de corte o desgaste das ferramentas é maior.

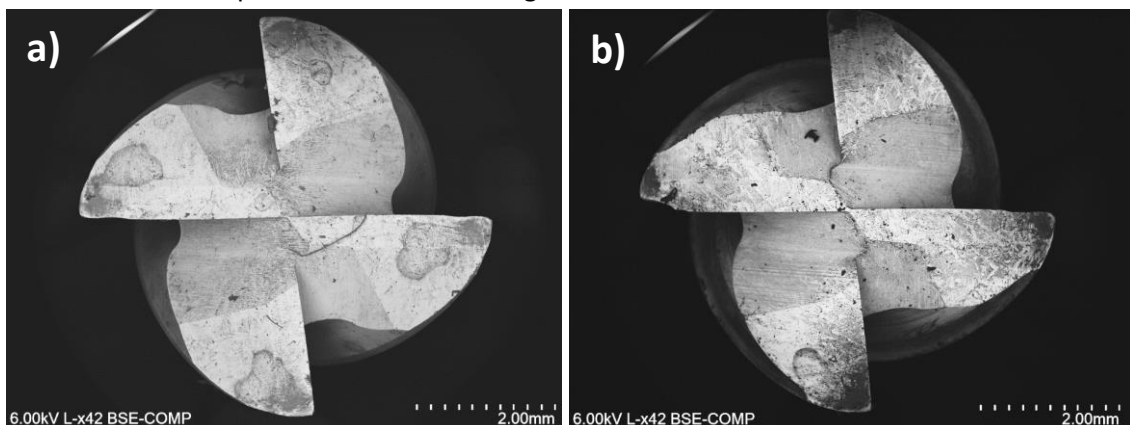


Figura 39 - Imagens SEM da vista de topo das ferramentas CT80\_L15 (a) e UCT80\_L10 (b) para  $F_z=0,026\text{mm/dente}$

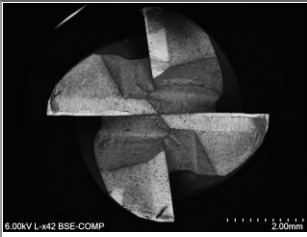
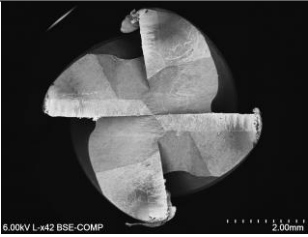
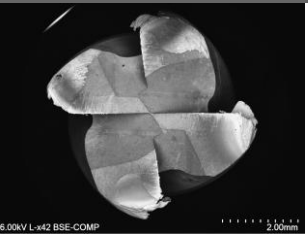
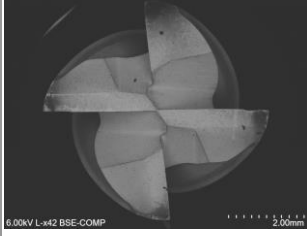


#### 4.5. Análise dos mecanismos de desgaste

A análise do desgaste em todas as ferramentas foi caracterizado, tal como descrito no subcapítulo 3.2.3., através de observações SEM. Tal como nos capítulos anteriores, os resultados foram agrupados por velocidade de corte utilizada, para as fresas revestidas e não revestidas.

#### 4.5.1. Velocidade de corte = 60m/min

A tabela 12 apresenta a vista de topo das fresas testadas com  $V_c=60\text{m/min}$ , para um avanço de  $F_z = 0,03; 0,07$  e  $0,1\text{mm/dente}$  e  $L=5\text{m}$ , correspondendo aos primeiros ensaios realizados, obtidas no microscópio eletrónico de varrimento (SEM).

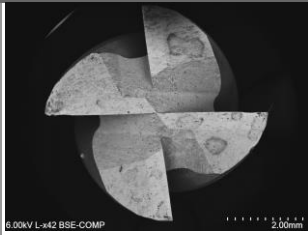
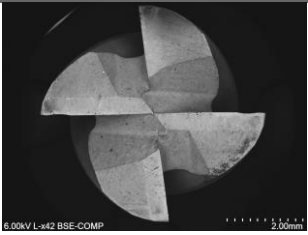
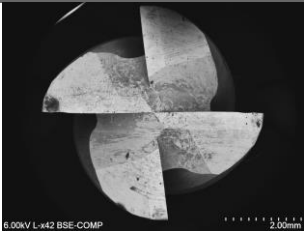
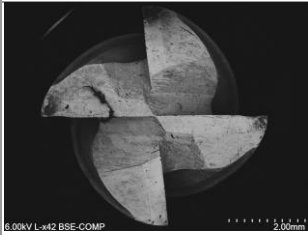
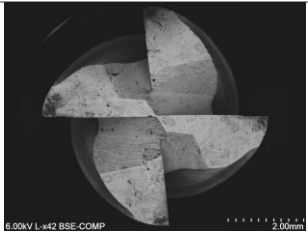
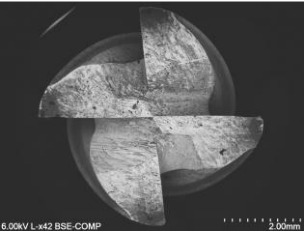
Tabela 12 - Vista topo das ferramentas revestidas e não revestidas testadas a  $60\text{ m/min}$  de velocidade de corte, com  $F_z=0,03; 0,07$  e  $0,1\text{mm/dente}$  e  $L=5\text{m}$

Ferramentas	CT60F3L5	CT60F7L5	CT60F10L5
Revestidas			
	UCT60F3L5	UCT60F7L5	UCT60F10L5
Não Revestidas			

Analisando as diferentes imagens da tabela 12, verifica-se que o desgaste foi baixo, principalmente para menores valores do avanço. Com o aumento do avanço por dente, ocorre um aumento do desgaste das ferramentas, com maior impacto nas fresas não revestidas, sendo este desgaste do tipo abrasivo. Para além disso, verificou-se a quebra de dentes de corte na ferramenta revestida para  $F_z=0,1\text{mm/dente}$  e nas ferramentas não revestidas para  $F_z= 0,07$  e  $0,1\text{mm/dente}$ . Para melhor perceção dos tipos de desgaste ver figuras do anexo A.

As análises de composição química (-EDS) permitiram verificar que para  $F_z=0,07\text{mm/dente}$  já havia algumas zonas com exposição do substrato (remoção do revestimento) e alguma adesão de apra nas pontas da fresa. Com  $F_z=0,1\text{mm/dente}$  a remoção de filme foi muito mais elevada, havendo claramente maior adesão de substrato na ferramenta.

Tabela 13 - Vista topo das ferramentas revestidas e não revestidas testadas a 60 m/min de velocidade de corte, com  $F_z = 0,026$  e  $0,03\text{mm/dente}$  e  $L=5, 10$  e  $15\text{m}$

Ferramentas	CT60F2.6L5	CT60F2.6L15	CT60F3L15
Revestidas			
Não Revestidas			

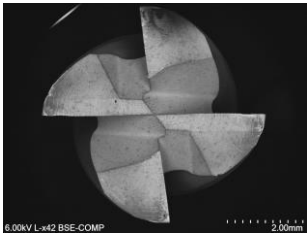
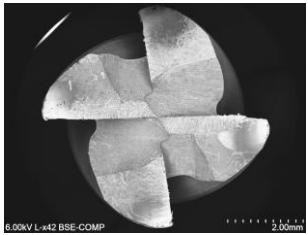
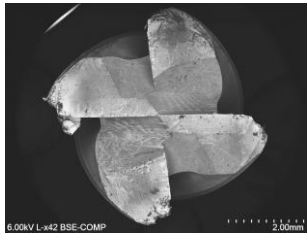
A tabela 13 apresenta a vista de topo das ferramentas testadas para maiores valores de comprimento de corte, que corresponde à segunda fase dos ensaios de maquinagem. Observando as imagens apresentadas, verifica-se que houve muito pouco desgaste para  $L=5$ . No entanto, com o aumento do comprimento de corte, principalmente nas fresas não revestidas, observa-se alguma abrasão nas pontas da fresa.

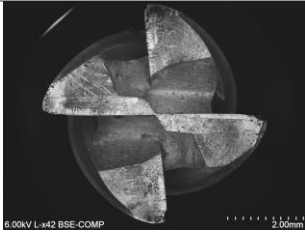


Para estes ensaios não se detetou delaminação do revestimento, nem adesão da apara às fresas. Contudo, para a condição com maior valor de comprimento de corte ( $L=10\text{m}$ ), verifica-se uma ligeira adesão de material na fresa não revestida.

#### 4.5.2. Velocidade de corte = 70m/min

As tabelas 14 e 15 apresentam as vistas de topo das ferramentas revestidas e não revestidas, para todas as condições testadas com  $V_c=70\text{m/min}$ .

Tabela 14 - Vista topo das ferramentas revestidas e não revestidas testadas a 70 m/min de velocidade de corte, com  $F_z=0,03; 0,07$  e  $0,1\text{mm/dente}$  e  $L=5\text{m}$

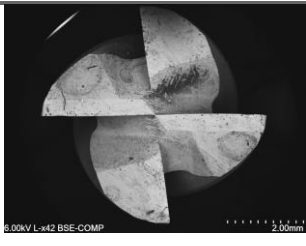
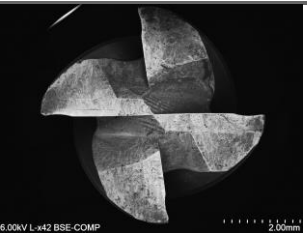


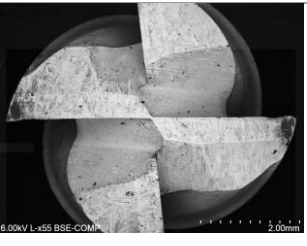
Ferramentas	CT70F3L5	CT70F7L5	CT70F10L5
Revestidas			

	UCT70F3L5	UCT70F7L5	UCT70F10L5
Não Revestidas			

A partir da tabela 14 é possível observar que o desgaste foi baixo, na fresa revestida, para  $F_z=0,026\text{mm/dente}$ . Contudo, nesta mesma condição para a fresa não revestida verifica-se que houve uma ligeira abrasão e quebra nos quatro dentes.

Com o aumento do valor de avanço por dente as ferramentas apresentam um maior desgaste. Neste caso, há um aumento do desgaste abrasivo e as ferramentas quebram muito mais rapidamente. Observa-se também adesão de apra nas arestas de corte, tanto na fresa revestida como não revestida. Tal como para as ferramentas testadas para  $V_c=60\text{m/min}$  observou-se degradação do revestimento com o aumento do valor de avanço, havendo adesão do substrato na condição com  $F_z=0,1\text{mm/dente}$ .

Tabela 15 - Vista topo das ferramentas revestidas e não revestidas testadas a 70 m/min de velocidade de corte, com  $F_z=0,026$  e  $0,03\text{mm/dente}$  e  $L=5, 10$  e  $15\text{m}$

Ferramentas	CT70F2.6L5	CT70F2.6L15	CT70F3L15
Revestidas			
Não Revestidas			-

A tabela 15 apresenta a vista topo das ferramentas testadas para os diferentes valores de comprimentos de corte, com  $V_c=70\text{m/min}$ . O desgaste foi baixo para o menor valor de avanço e menor valor de comprimento de corte. Com o aumento do comprimento de corte de  $L=5\text{m}$  para  $L=10\text{m}$ , ocorre um aumento no desgaste abrasivo da fresa não revestida e quebra de um dente. O facto das fresas não revestidas apresentarem dentes quebrados, para baixos valores de avanço, corrobora com o facto de estas não apresentarem resistência mecânica e resistência ao desgaste suficiente para aguentarem as condições de solicitação. Curiosamente, apesar do maior desgaste destas ferramentas, o valor da rugosidade induzida na peça maquinada é muito

inferior aos das peças maquinadas com fresas revestidas, que desgastam, muito menos. Este é um efeito que não seria de esperar, já que os mecanismos de desgaste são semelhantes. Portanto, uma futura análise de vibrações, tipo de apara e temperaturas desenvolvidas no contacto devem ser avaliadas.

No caso das fresas revestidas, estas apresentam baixo desgaste para  $F_z=0,026\text{mm/dente}$ . Contudo, com o aumento do avanço para  $F_z=0,03\text{mm/dente}$  e  $L=15\text{m}$  o desgaste sobe substancialmente. Como se pode observar a partir da análise EDS, na figura 40, a ferramenta CT70F3L15 perde a camada de revestimento junto aos dentes de corte. Verifica-se que na maioria dos espectros selecionados já não existe a presença de silício, logo, sem filme. Para além disso, ocorre a quebra de um dente e adesão de substrato. Ver figuras do anexo A para melhor visualização dos tipos de desgaste.

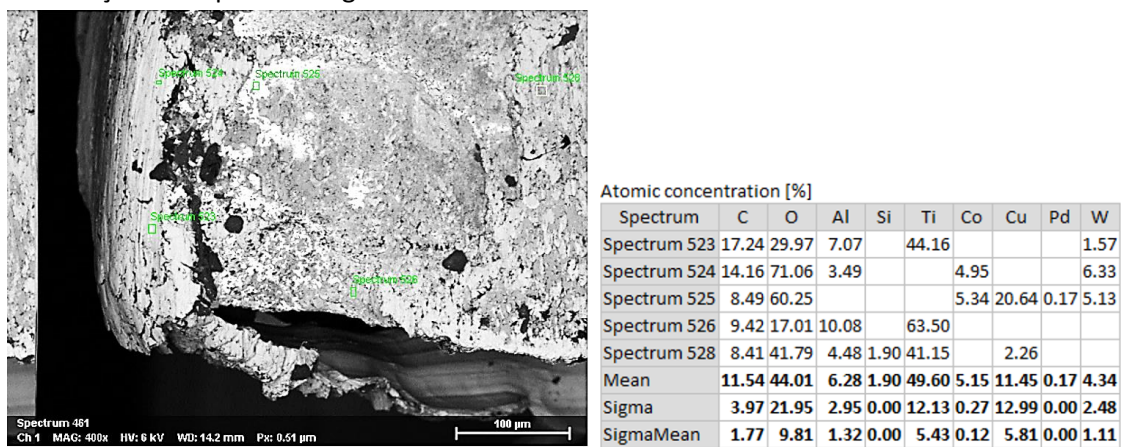


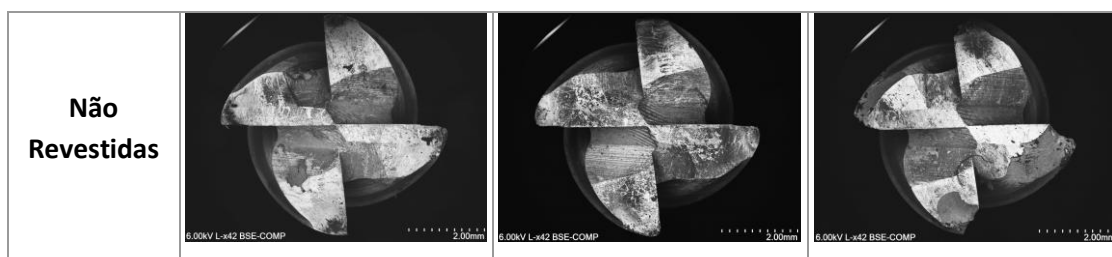
Figura 40 - Análise EDS da ferramenta CT70F3L15

### 4.5.3. Velocidade de corte = 80m/min

Por fim, as tabelas 16 e 17 apresentam as vistas de topo das ferramentas revestidas e não revestidas, para todas as condições testadas com  $V_c=80\text{m/min}$ .

Tabela 16 - Vista topo das ferramentas revestidas e não revestidas testadas a 80 m/min de velocidade de corte, com  $F_z=0,03$ ;  $0,07$  e  $0,1\text{mm/dente}$  e  $L=5\text{m}$

Ferramentas	CT80F3L5	CT80F7L5	CT80F10L5
Revestidas			
	UCT80F3L5	UCT80F7L5	UCT80F10L5



Observando as imagens apresentadas na tabela 16, verifica-se que houve um aumento de desgaste com o aumento da velocidade para  $V_c = 80\text{m/min}$ , isto porque para  $F_z = 0,026\text{mm/dente}$  observa-se um aumento da abrasão nas ferramentas, face ao obtido com  $V_c = 60$  e  $70\text{m/min}$ . Este desgaste abrasivo vai aumentando com o aumento do valor de avanço por dente. Na condição de menor avanço, a fresa não revestida apresenta baixa abrasão, mas quebra de um dente de corte.

Com a subida do valor de avanço para  $F_z = 0,07\text{mm/dente}$  o desgaste é maior, tanto na fresa revestida como não revestida e ocorre adesão de material nas pontas. Para o maior valor de avanço,  $F_z = 0,1\text{mm/dente}$ , ocorre quebras de todos os dentes de corte, na fresa não revestida. No caso da fresa revestida, verifica-se um aumento de material aderido nas pontas da ferramenta. A figura 41, apresenta uma imagem mais detalhada de um dos dentes de corte da ferramenta CT80F10L5, bem como a análise dos diferentes espectros.

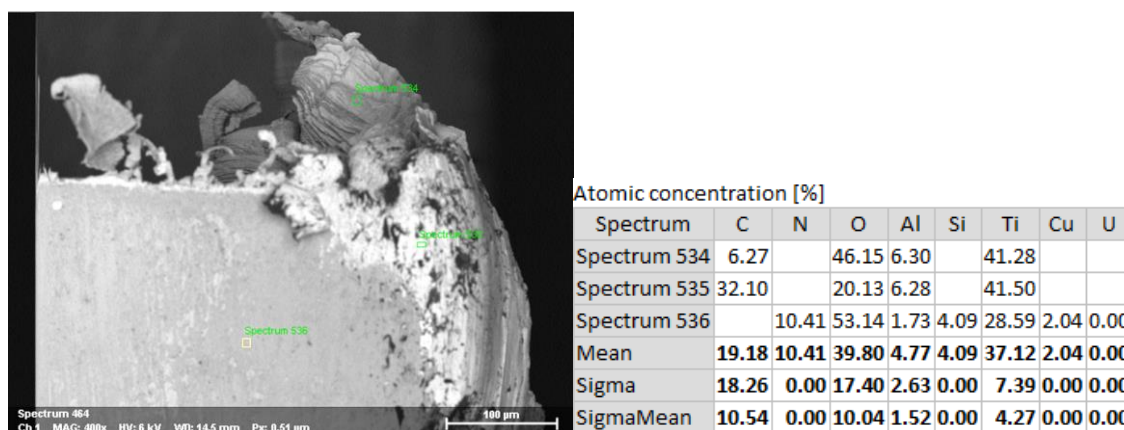
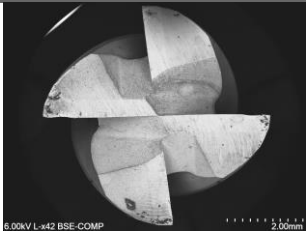
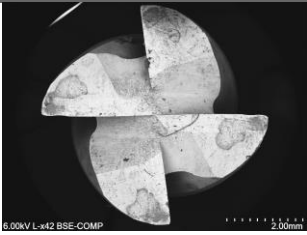
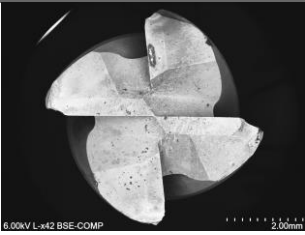
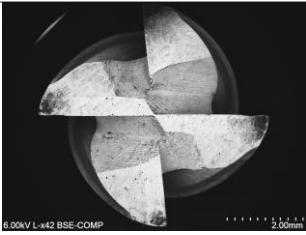



Figura 41 - Análise EDS da ferramenta CT80F10L5

Como se observa na figura 41, efetivamente ocorre adesão de material de substrato nas extremidades da ferramenta. Apenas o espectro indicado com o número 536 é que apresenta o elemento silício na sua constituição, nos restantes não se deteta. O facto de apresentar silício significa que ainda existe revestimento na ferramenta, dado que é um elemento que constitui a camada de filme aplicada sobre a ferramenta (tabela 11), com o intuito de aumentar a sua durabilidade. Assim, para os restantes espectros fica claro que o revestimento se rompeu com o aumento do avanço por dente. Verifica-se quebra dos dentes de corte e a adesão de material.

Tabela 17 - Vista topo das ferramentas revestidas e não revestidas testadas a 80 m/min de velocidade de corte, com  $F_z = 0,026$  e  $0,03\text{mm/dente}$  e  $L=5, 10$  e  $15\text{m}$

Ferramentas	CT80F2.6L5	CT80F2.6L15	CT80F3L15
Revestidas			
Não Revestidas			-

A tabela 17 apresenta a vista topo das ferramentas testadas para os diferentes valores de comprimentos de corte, com  $V_c=80\text{m/min}$ . O desgaste abrasivo foi baixo para os menores valores de avanço por dente. Observa-se uma ligeira quebra das pontas na fresa revestida com o aumento do comprimento de corte para  $L=15\text{m}$ , com  $F_z=0,026\text{mm/dente}$ .

Na condição de menor avanço e comprimento de corte de  $5\text{m}$ , a fresa não revestida apresenta baixa abrasão. No entanto, com o aumento do comprimento de corte para  $L=10\text{m}$  ocorre a quebra de dois dentes de corte, ficando a ferramenta completamente inutilizada. Mais uma vez verifica-se que a durabilidade destas fresas é baixa, impedindo a realização de testes com maiores valores de avanço.

Para  $L=15\text{m}$  a fresa revestida apresenta elevada adesão de material nas extremidades, o valor de desgaste é maior que o obtido nas mesmas condições, para velocidades de corte inferiores. A figura 42 permite verificar a zona, na ferramenta, que ainda apresenta revestimento da que já possui material aderido. Observa-se, perfeitamente, que o dente já se encontra quebrado.

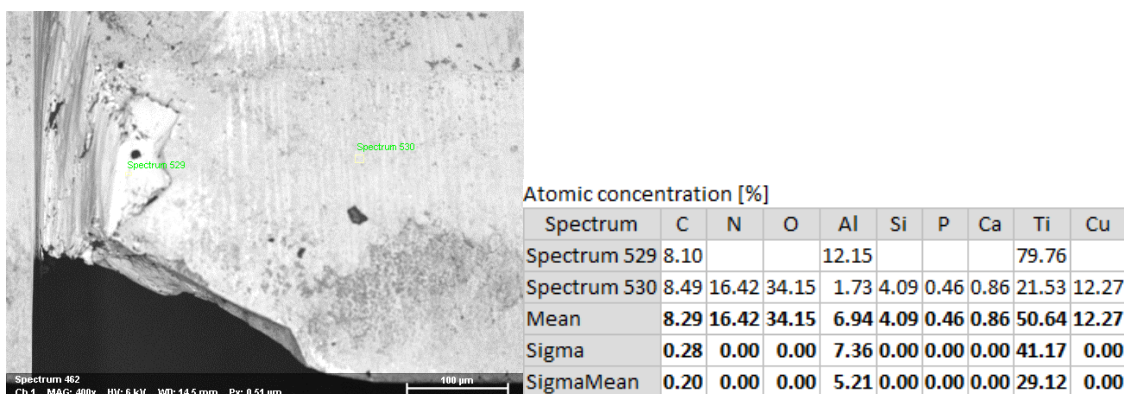


Figura 42 - Análise EDS da ferramenta CT80F3L15

Em suma, para todas as velocidades de corte testadas, verificou-se que ocorre desgaste e consequentemente exposição do substrato da ferramenta de corte para os maiores valores de avanço por dente e maiores valores de comprimento de corte.

## 4.6. Análise da vida útil da ferramenta

Conforme descrito no subcapítulo 3.2.6., o critério de fim de vida considerado foi um VB3 máximo de 0,5 mm [37] em qualquer dente individual da ferramenta. A figura 43 apresenta a evolução do desgaste de flanco (VB3) em função da velocidade de corte.

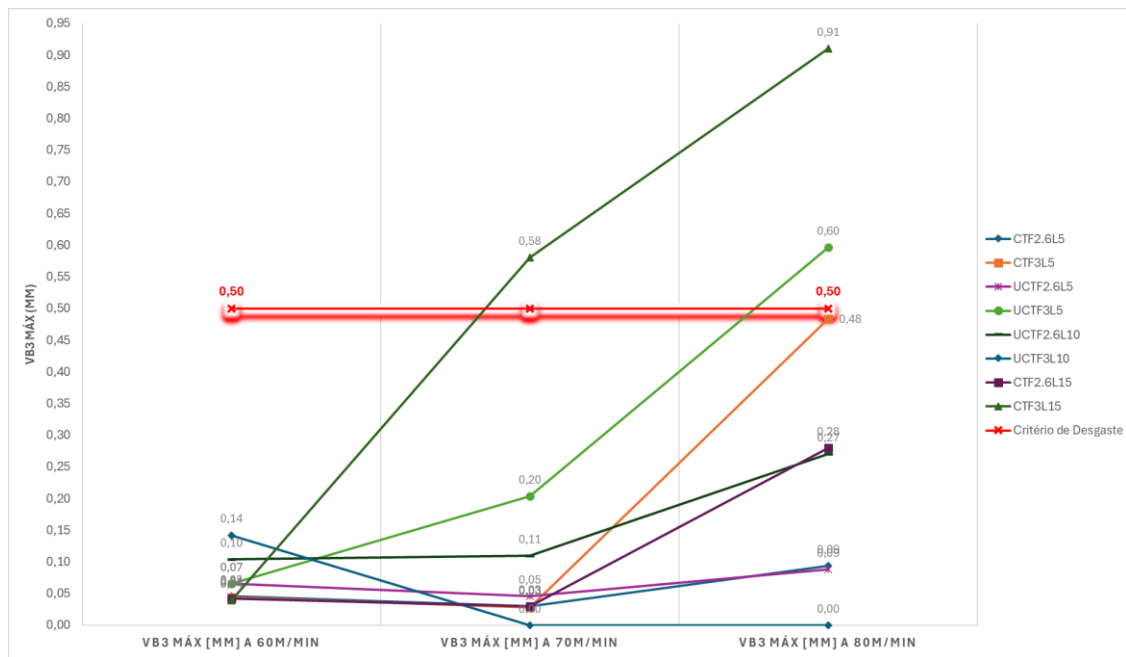


Figura 43 - Progressão do desgaste em função da velocidade de corte

Numa primeira análise, ao observar a figura 43, pode-se verificar o aumento do desgaste com o progressivo aumento da velocidade de corte. Este aumento, em determinadas condições, é mais notório para a velocidade de corte de 80m/min, comparativamente às velocidades 60 e 70m/min.

Ao analisar a figura 43 em função do avanço por dente e do comprimento de corte, verifica-se que nas condições CTF2.6L5 e UCTF2.6L5 o desgaste é muito baixo e sobe muito pouco com o aumento da velocidade de corte. Deste modo, a duração da vida útil da ferramenta é consideravelmente maior. Com o aumento do comprimento de corte, mantendo o valor do avanço, nomeadamente: CTF2.6L15 e UCTF2.6L10, verifica-se um aumento substancial do desgaste, tanto na fresa revestida como não revestida. Este aumento é mais notório quando a velocidade de corte aumenta para  $V_c=80\text{m/min}$ , pois o desgaste observado para a velocidade de corte de 60 e 70m/min foi muito similar, em ambas as condições.

Com o aumento do valor de avanço para  $F_z=0,03\text{mm/dente}$ , nas condições CTF3L5 e UCTF3L5, o desgaste foi elevado, a fresa revestida ficou muito próxima do critério de desgaste e a não revestida ultrapassou o critério. É importante realçar que segundo a norma ISO 8688-2:1989

[37], se houver apenas um dente que ultrapasse os 0.5mm, o fim de vida útil da ferramenta é decretado. No caso da fresa não revestida, UCTF3L5, houve um dente que atingiu um desgaste de 0.6mm. O aumento de desgaste nesta fresa (UCTF3L5) foi progressivo, aumentando à medida que a velocidade de corte também aumentava. Na fresa revestida, o desgaste não teve uma evolução tão gradual, pois para as velocidades de corte de 60 e 70m/min os valores de desgaste são bastante próximos, só se verificando um aumento significativo deste quando a velocidade atingiu os 80m/min. Com o aumento do comprimento de corte, mantendo o valor do avanço de  $F_z=0,03\text{mm/dente}$ , o desgaste foi elevadíssimo na fresa revestida (CTF3L15). É de realçar que um dos dentes atingiu um desgaste de 0.91mm, o maior valor obtido para os ensaios selecionados. Mais uma vez se verifica que o aumento do desgaste na fresa revestida (CTF3L15), aumentou à medida que a velocidade de corte ia aumentando. No caso da fresa não revestida, UCTF3L10, verifica-se que o desgaste foi maior comparativamente ao obtido na fresa CTF3L15, para  $V_c=60\text{m/min}$ . Conforme descrito no capítulo 4.5, as fresas não revestidas quebravam para valores de avanço e velocidade de corte maiores, não sendo possível avaliar adequadamente o desgaste das mesmas nessas condições. Para além disso, na condição UCTF3L5 a fresa ultrapassou o critério de desgaste, ou seja, teve o seu fim de vida quando a velocidade de corte era de 80m/min. Logo, para maiores valores de comprimentos de corte seria espectável maior desgaste e menor durabilidade da ferramenta.

Perante o acima descrito, fica claro que a velocidade é efetivamente um parâmetro que influencia a vida útil da ferramenta. Quando maior a velocidade de corte maior será o desgaste provocado nas ferramentas [43]. É importante realçar que nas condições em que o comprimento de corte e o avanço por dente tinham valores baixos, havia menor desgaste abrasivo das ferramentas, logo haverá maior durabilidade da ferramenta.

## 5. Conclusão

Neste capítulo, serão apresentadas as conclusões do trabalho desenvolvido, bem como as propostas para trabalhos futuros.

### 5.1. Conclusões finais

Na presente dissertação, é apresentado o desempenho de fresas de topo revestidas com o revestimento comercial “PrimeCon” (cor ouro rosa) comercializadas pela empresa INOVATOOLS com fresas de topo não revestidas, ambas produzidas em carboneto de tungstênio (WC-Co). O revestimento aplicado foi caracterizado, através de análises SEM, quanto à sua morfologia, espessura e composição química. Os ensaios de maquinagem realizados permitiram avaliar a influência do revestimento no comportamento do desgaste das fresas. Os mecanismos de desgaste predominantes foram identificados e a rugosidade dos blocos maquinados avaliada (blocos da liga titânio TiAl6V4). Além disso, as forças de corte foram adquiridas com recurso a um dinamómetro. A influência da variação de alguns parâmetros de corte também foi avaliada: a velocidade de corte, avanço por dente e comprimento de corte.

As análises SEM-EDS revelaram que o revestimento depositado sobre as ferramentas de corte apresentava uma espessura de  $1,6\mu\text{m}$ , uma composição química sob-estequiométrica, pertencendo ao sistema TiSiCN e uma morfologia colunar compacta.

Relativamente aos ensaios de maquinagem, estes permitiram caracterizar e correlacionar a rugosidade da superfície maquinada com o desgaste provocado nas fresas, bem como comparar as forças de cortes desenvolvidas em cada ensaio. Observou-se que, maioritariamente, o valor da rugosidade aumenta com o aumento do avanço por dente, tanto nas fresas revestidas como não revestidas. Os resultados obtidos, nas fresas não revestidas, para a rugosidade da superfície maquinada e forças de corte não foram os expectáveis, já que se observou um maior desgaste dessas ferramentas. O valor da rugosidade, para a maior parte dos avanços e velocidade de corte testados, são inferiores que os obtidos para as fresas revestidas. O mesmo se observou para as forças de corte, os valores também foram menores nas fresas não revestidas, independente do valor de avanço por dente ou velocidade de corte. De facto, devido ao maior desgaste destas fresas, onde se observaram mecanismos de desgaste semelhantes às das fresas revestidas, deveria ter ocorrido exatamente o oposto, ou seja, quanto maior o desgaste da ferramenta maior deveria de ser a rugosidade da superfície maquinada. Análises das vibrações, tipos de apara produzidas, medição das temperaturas desenvolvidas durante o contacto da ferramenta com a peça, seriam importantes de avaliar, para explicar este comportamento. Infelizmente isto não foi possível de estudar nesta tese. Por outro lado, o facto das fresas não revestidas apresentarem dentes quebrados para baixos valores de avanço, mostrou que estas possuem uma baixa resistência mecânica e baixa resistência ao desgaste para as condições solicitadas.

## Conclusão

O desgaste provocado nas fresas não revestidas foi efetivamente maior que nas fresas revestidas, em todas as velocidades testadas. Além disso, verificou-se que as forças de corte aumentaram com o aumento do valor de avanço por dente e com o aumento da velocidade de corte.

Em suma, quanto maior é o valor de avanço por dente maior é a rugosidade da superfície da peça maquinada e consequentemente maior é o desgaste provocado na ferramenta. Quanto maior é a velocidade e o comprimento de corte maior é o desgaste criado na ferramenta, para condições de corte iguais.

Os mecanismos de desgaste observados nas fresas revestidas e não revestidas eram bastante semelhantes. Os mecanismos mais predominantes foram o desgaste abrasivo e o desgaste adesivo. O desgaste adesivo foi mais preeminente para maiores valores de avanço por dente. Realça-se que nas condições em que o comprimento de corte e o avanço por dente tinham valores baixos, havia menor desgaste abrasivo das ferramentas, logo, maior durabilidade da ferramenta.

Em relação à vida útil da ferramenta, verifica-se que esta é maior quanto menor é a velocidade de corte, pois, a partir dos ensaios verificou-se o aumento do desgaste com o progressivo aumento da velocidade de corte. Assim, a velocidade de corte é efetivamente o parâmetro que mais influencia a vida útil da ferramenta.

## 5.2. Trabalhos futuros

Com o intuito de complementar e expandir o trabalho apresentado, no futuro poder-se-ão explorar as seguintes ideias:

- Analisar as vibrações geradas durante o processo de maquinagem;
- Analisar e caracterizar os diferentes tipos de apara;
- Medir e analisar os valores de temperatura gerados no contacto da fresa com a peça;
- Realizar ensaios mais curtos com as fresas não revestidas com o objetivo de detetar o valor limite do comprimento de corte;

# Referências

- [1] A. A. D. S. M. S. e. M. H. Mehdi Hourmand, "A Comprehensive Review on Machining of Titanium Alloys," pp. 1-2;11-32, Março 2021, DOI:10.1007/s13369-021-05420-1.
- [2] A. M. A. G.-P. J. S. F. P. M. M. M. Batista, "3D-FEM based methodology for analysing contour milling," pp. 1-8 , Dezembro 2015, DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.606.
- [3] L. P. F. Y. X. J. SU Honghua, "Tool Life and Surface Integrity in High-speed Milling of Titanium," pp. 1-7, 22 Novembro 2021, DOI: 10.1016/S1000-9361(11) 60445-7 .
- [4] Y. K. Mruthunjaya M., "A review on conventional and thermal assisted machining of titanium based alloy," pp. 1-6, 21 Abril 2021, DOI: 10.1016/j.matpr.2021.03.490.
- [5] J. P. J. L. J. S. L.N. López de lacalle, "Advanced cutting conditions for the milling of aeronautical alloys," pp. 1-10, 26 Janeiro 1998, PII: S 0924-0136(99)00372-6.
- [6] P. M. A. R. J. S. I. d. S. M. M. S.R. Fernández-Vidal, "Analysis of the effects of tool wear on dry helical milling of Ti6Al4V alloy," pp. 1-2, 2015, Doi: 10.1016/j.proeng.2015.12.536 .
- [7] P. L. J. G. P. Chawki TAHRI, "CFD simulation and optimize of LN2 flow inside channels used for cryogenic machining: application to milling of titanium alloy Ti-6Al-4V," pp. 1-7, 2017, Doi: 10.1016/j.procir.2017.03.230.
- [8] P. K. Koshy Zacharia, "Chatter Prediction in High Speed Machining of Titanium Alloy (Ti-6Al-4V) using Machine Learning Techniques," pp. 1-2, 2018, Proceedings 24 (2020) 350–358.
- [9] S. W. Z. H. N. H. Wei Zhao, "Cutting Performance Evaluation of End Mills for Titanium Aircraft Componentes," pp. [1-6], 2015, Doi:10.1016/j.procir.2015.08.051 .
- [10] A. R. A. & D. J. P. Festas, "Machining of titanium alloys for medical applications – a review," pp. [1-17], 2021, Doi: 10.1177/09544054211028531.
- [11] E. R. B. A. M. M. D. Carou, "Experimental study for the effective and sustainable repair and maintenance of bars made of Ti-6Al-4V alloy. Application to the aeronautic industry," pp. [1-7], 12 Junho 2017, Doi: 10.1016/j.jclepro.2017.06.095.
- [12] S. Luca e F. Maria, "NANOSTRUCTURED CUTTING TOOLS COATINGS FOR MACHINING TITANIUM," pp. [1-7], 12 Junho 2008, Doi: 10.1080/10910340802067239.
- [13] E. M. R. J. P. D. D. Carou, "A note on the use of the minimum quantity lubrication (MQL) system in turning," pp. [1-6], 1 Setembro 2014, Doi: 10.1108/ILT-07-2014-0070.
- [14] Q. Wang, Z. Liu, D. Yang e A. U. H. Mohsan, "Metallurgical-based prediction of stress-temperature induced rapid heating and cooling phase transformations for high speed machining Ti-6Al-4V alloy," pp. [1-11], 27 Janeiro 2017, Doi: 10.1016/j.matdes.2017.01.076.
- [15] K.-H. Park, M. A. Suhaim, G.-D. Yang, D.-Y. Lee, S.-W. Lee e P. Kwon, "Milling of Titanium Alloy with Cryogenic Cooling and Minimum Quantity Lubrication (MQL)," pp. [1-7], 5 Janeiro 2017, DOI: 10.1007/s12541-017-0001-z.

## Referências

- [16] “The effect of monolayer TiCN-, AlTiN-, TiAlN-and two layers TiCN + TiN- and AlTiN + TiN-coated cutting tools on tool wear, cutting force, surface roughness and chip morphology during high-speed milling of Ti6Al4V titanium alloy,” *Emel Kuram*; , pp. [1-5], Setembro 2016, Doi: 10.1177/095440541666669.
- [17] A. Ginting e M. Nouari, “Surface integrity of dry machined titanium alloys,” pp. [1-6], 20 Novembro 2008, Doi:10.1016/j.ijmachtools.2008.10.011.
- [18] K. Ying-lin, D. Hui-yue, L. Gang e Z. Ming, “Use of nitrogen gas in high-speed milling of Ti-6Al-4V,” pp. [1-3], 9 Setembro 2008, DOI: 10.1016/S1003-6326(08)60307-6 .
- [19] Z. Wang, Y. Wong e M. Rahman, “High-speed milling of titanium alloys using binderless CBN tools,” pp. [1-8], 24 Junho 2004, Doi:10.1016/j.ijmachtools.2004.06.021.
- [20] R. K. Mittal, S. S. Kulkarni e R. K. Singh, “Effect of lubrication on machining response and dynamic instability in high-speed micromilling of Ti-6Al-4V,” pp. [1-9], 29 Abril 2017, Doi: 10.1016/j.jmapro.2017.04.007.
- [21] S. Ganguli e S. G. Kapoor, “Improving the performance of milling of titanium alloys using the atomization-based cutting fluid application system,” pp. [1-8], 10 Junho 2016, Doi: 10.1016/j.jmapro.2016.05.011.
- [22] A. Shokrani, V. Dhokia e S. T. Newman, “Investigation of the effects of cryogenic machining on surface integrity in CNC end milling of Ti-6Al-4V titanium alloy,” pp. [1-7], 21 Janeiro 2016, Doi: 10.1016/j.jmapro.2015.12.002.
- [23] S. S. S. K. A. Jawaid, “Evaluation of wear mechanisms of coated carbide tools when face milling titanium alloy,” pp. [1-8], 8 Maio 1999, PII: S 0924-0136(99)00438-0.
- [24] A. G. H. A. C.H. Che Haron, “Performance of alloyed uncoated and CVD-coated carbide tools in dry milling of titanium alloy Ti-6242S,” pp. [1-5], 2006, Doi:10.1016/j.jmatprotec.2006.03.135.
- [25] M. S. Uddin, B. Pham, A. Sarhan, A. Basak e A. Pramanik, “Comparative study between wear of uncoated and TiAlN-coated carbide tools in milling of Ti6Al4V,” pp. [1-8], 18 Fevereiro 20147, DOI: 10.1007/s40436-016-0166-1.
- [26] H. Suaia, X. Zhang, D. Zhang, X. Jiang e R. Wu, “Feasibility study of high-speed ultrasonic vibration cutting titanium alloy,” pp. [1-2], 10 Abril 2017, Doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.03.017.
- [27] C. S. Kumar e F. D. Fernandes, THIN-FILMS FOR MACHINING DIFFICULT-TO-CUT MATERIALS, 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300, Boca Raton, FL 33487-2742: CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, 2023, DOI: 10.1201/9781003340553.
- [28] P. Pushp, S. Dasharath e C. Arati, “Classification and applications of titanium and its alloys,” pp. [1-5], 12 Janeiro 2022, Doi: 10.1016/j.matpr.2022.01.008.
- [29] Q. Zhao, Q. Sun, S. Xin, Y. Chen, C. Wu, H. Wang, J. Xu, M. Wan, W. Zeng e Y. Zhao, “High-strength titanium alloys for aerospace engineering applications: A review on melting-forging process,” pp. [1-4], 8 Maio 2022, Doi: 10.1016/j.msea.2022.143260.
- [30] R. BOYER, “Titanium for Aerospace: Rationale and Applications,” pp. [1-4], Outubro 1995, Doi: 10.1007/BF00705316.

## Referências

- [31] F. J. d. Silva, *Revestimentos avançados realizados em vácuo e sua caracterização*, Porto, Janeiro 2022, Consultado a 27/12/2023.
- [32] S. Yadav, A. Kumar, T. Paramesh e K. Sunita, "A Review on Enhancement of Wear Resistance Properties of Titanium Alloy using Nano Composite Coating," pp. [4-5], 2018, Doi:10.1088/1757-899X/455/1/012120.
- [33] V. F. C. Sousa e F. J. G. Silva, "Recent Advances on Coated Milling Tool Technology—A Comprehensive Review," pp. [19-22], 3 Março 2020, Doi:10.3390/coatings10030235.
- [34] A. Vereschaka, V. Gurin, M. Oganyan, G. O. e J. Bublikov, "Increase in tool life for end milling titanium alloys using tools with multilayer composite nanostructured modified coatings," pp. [1-4], 2019, Doi: 10.1016/j.procir.2019.04.173.
- [35] "Titanium Ti-6Al-4V (Grade 5), Annealed," ASM - Aerospace Specification Metals Inc. , [Online]. Available: <https://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=mtp641>. [Acedido em 19 06 2024].
- [36] Q. J. M. S. Zhiqiang Liu, "Wear performance of (nc-ALTiN)/(a-Si3N4) coating and (nc-AlCrN)/(a-Si3N4) coating in high-speed machining of titanium alloys under dry and minimum quantity lubrication (MQL) conditions," pp. [1-2], 16 Fevereiro 2013, Doi:10.1016/j.wear.2013.02.001.
- [37] *ISO 8688-2:1989 - Tool Life Testing in Milling – Part 2: End Milling; International Organization for Standardization*., Geneva, Switzerland, 1989.
- [38] L. K. K. P. S. Ramesh, "Surface Roughness Analysis in Machining of Titanium Alloy," pp. 1-2, Janeiro 23 2088, DOI: 10.1080/10426910701774700.
- [39] A. S. R. o. R. D. S. a. G. C. T. i. M. M. M. C. (MMCs), "Rashid Ali Laghari, Ning He, Muhammad Jamil, Muhammad Irfan Hussain, Munish Kumar Gupta, Grzegorz M. Krolczyk," pp. 9-10, 8 Maio 2023, Doi: 10.1007/s40684-023-00521-8.
- [40] N. R. P. V. R. V. A. M. Rukmini Srikant Revuru, "Application of cutting fluids in machining of titanium alloys—a review," 13 Setembro 2017, DOI 10.1007/s00170-016-9883-7.
- [41] K. JEMIELNIAK, "REVIEW OF NEW DEVELOPMENTS IN MACHINING OF AEROSPACE MATERIALS," pp. 1-30, 29 Março 2021, ISSN 2391-8071.
- [42] V. M. A. M.-M. M. C. M. J. C. Enrique García-Martínez, "Sustainable Lubrication Methods for the Machining of Titanium Alloys: An Overview," pp. 1-6, 2019 Novembro 2019, Doi:10.3390/ma12233852.
- [43] J. M. V.-M. J. P. D. J. S. G. Moises Batista Ponce, "Analysis of Secondary Adhesion Wear Mechanism on Hard Machining of Titanium Aerospace Alloy," pp. 1-11, 21 Junho 2019, Doi:10.3390/ma12122015.
- [44] A. R. I. D. M. N. Salman Pervaiz, "Influence of Tool Materials on Machinability of Titanium- and Nickel-Based Alloys: A Review," p. 27, 4 Março 2014, Doi:10.1080/10426914.2014.880460.

## Referências

# Declaração de Integridade

Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à sua elaboração.

Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim.

Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO.

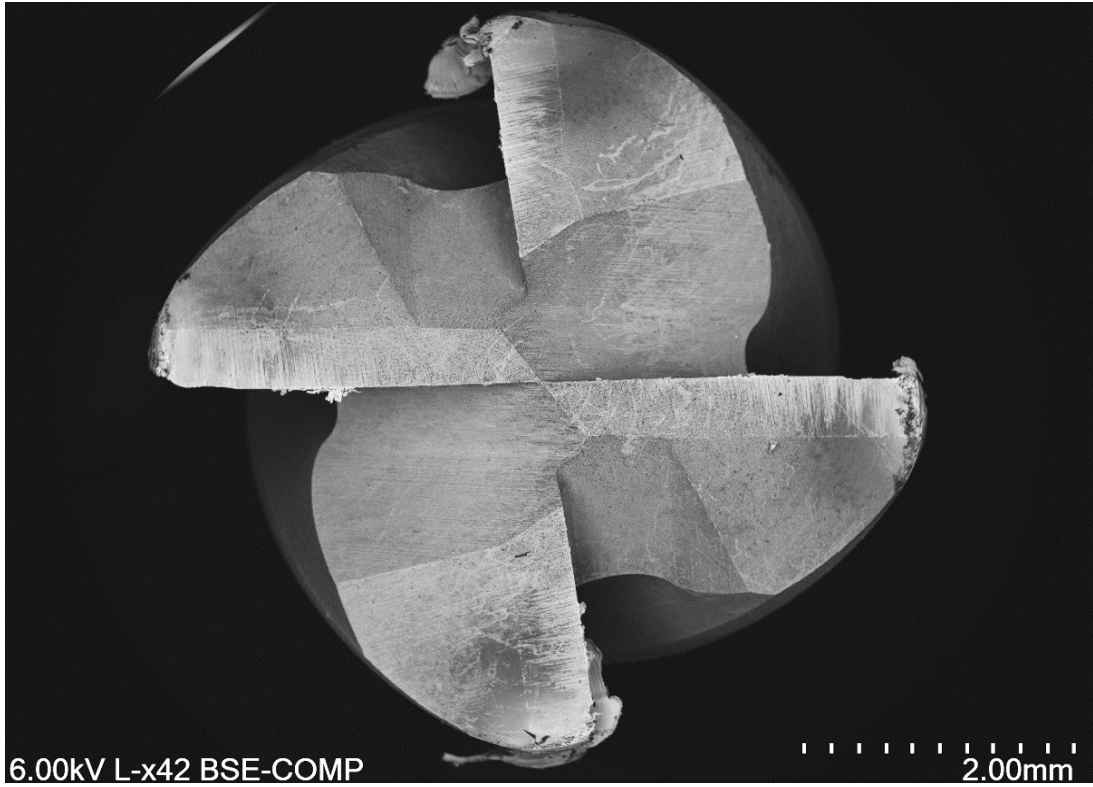
NOME: Liliana Rocha

ISEP, Porto, 10 de setembro de 2024

## Declaração de Integridade

## **Anexo A – Imagens SEM das fresas**

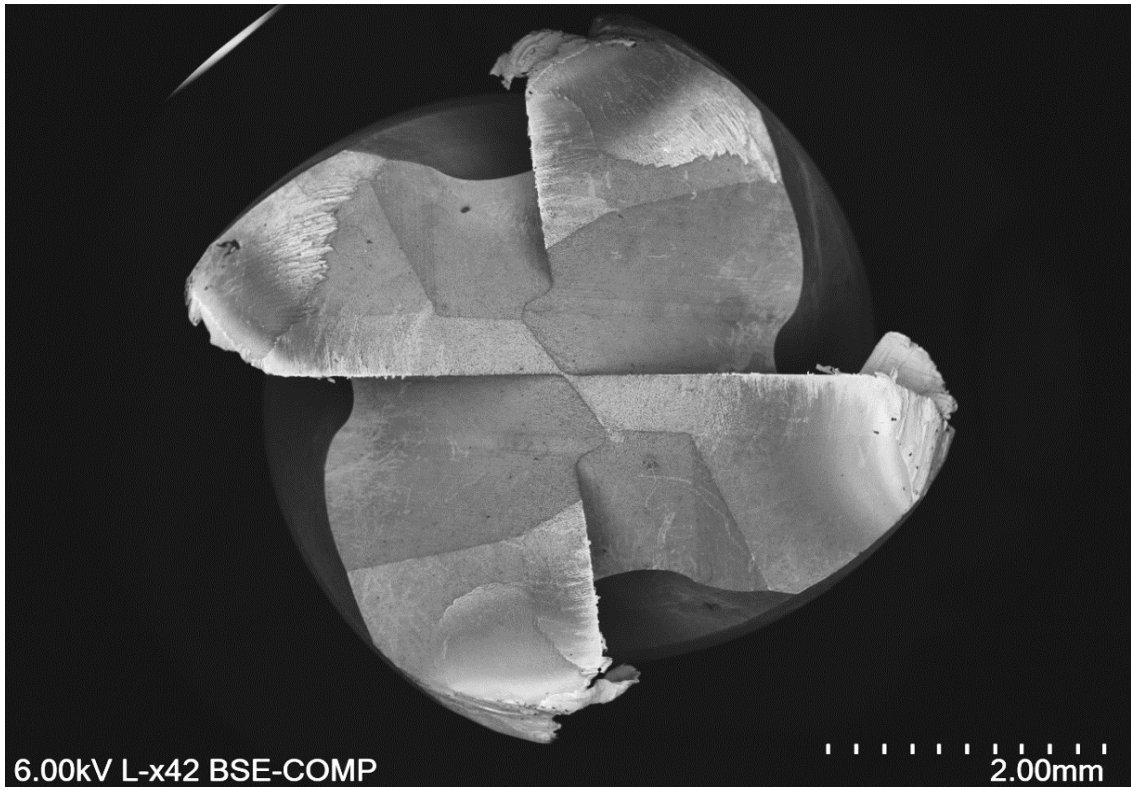
**CT60F7L5**



**UCT60F7L5**



**CT60F10L5**



**UCT60F10L5**

