

# DESEMPENHO DE BROCAS COM REVESTIMENTOS DO SISTEMA TISINAG PRODUZIDOS COM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE AG NA MAQUINAGEM DA LIGA DE TITÂNIO TIAL6V4

TIAGO FRANCISCO FERREIRA CAMPOS  
outubro de 2023

**DESEMPENHO DE BROCAS COM  
REVESTIMENTOS DO SISTEMA TISINAG  
PRODUZIDOS COM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES  
DE AG NA MAQUINAGEM DA LIGA DE TITÂNIO  
TIAL6V4**

Tiago Francisco Ferreira Campos 1202106

Materiais e Tecnologias de Fabrico

**2023**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

Orientador: Professor Doutor Filipe Daniel Fernandes

Coorientador: Professor Doutor Francisco J. G. Silva

isen

P.PORTO

# DESEMPENHO DE BROCAS COM REVESTIMENTOS DO SISTEMA TISINAG PRODUZIDOS COM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE AG NA MAQUINAGEM DA LIGA DE TITÂNIO TIAL6V4

Tiago Francisco Ferreira Campos

1202106

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Professor Doutor Filipe Daniel Fernandes e coorientação do Professor Doutor Francisco J. G. Silva

**2023**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

# JÚRI

## **Presidente do Júri**

Prof. Dra. Rafaela Carla Barros Casais  
Professora Assistente, Instituto Superior de Engenharia do Porto

## **Orientador**

Prof. Dr. Filipe Daniel Fernandes  
Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

## **Coorientador**

Prof. Dr. Francisco José Gomes da Silva  
Professor Associado com Agregação, Instituto Superior de Engenharia do Porto

## **Arguente**

Dr. Diogo Albano Cavaleiro Ventura de Carvalho  
Investigador júnior, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da  
Universidade de Coimbra

página propositadamente em branco

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer a todos os que de certa forma contribuíram para o meu crescimento pessoal e como estudante ao longo dos anos. Gratifico o Professor Doutor Filipe Daniel Fernandes, orientador da presente dissertação, pelo apoio, paciência e tempo despendidos para a elaboração deste trabalho que não seria possível sem o mesmo.

Agradeço também ao Engenheiro Diogo Cavaleiro, do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (FCTUC), por toda a ajuda no tratamento de informação e auxílio nos ensaios realizados.

Agradeço à empresa INOVATOOLS, S.A. (Leiria, Portugal) pelo fornecimento dos substratos das ferramentas e ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra pela ajuda na aquisição de informação importante para o trabalho.

Agradeço também a todo o corpo docente do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) pela disponibilidade de recursos importantes para a pesquisa, neste trabalho e ao longo do mestrado.

Aos amigos de longa data pelo apoio e incentivo constante ao longo do percurso académico. Deixo um agradecimento ao Engenheiro Bruno Alves da empresa Zollern & Comandita, atual chefe de trabalho por toda a compreensão e apoio para realizar este trabalho. Por fim um enorme agradecimento ao pai e irmã pela ajuda a todos os níveis ao longo dos anos.

Dedico ainda esta dissertação à memória da minha mãe que foi a força principal por todas as conquistas académicas e pessoais.

Um obrigado a todos!

página propositadamente em branco

## RESUMO

A demanda por novos produtos, mais eficientes e fabricados em materiais com melhores propriedades, têm levado nos últimos anos a um crescimento de novos métodos de fabrico e a ferramentas de corte mais eficientes para acompanhar a subida rápida da procura por componentes de materiais considerados difíceis de maquinar.

A aplicação de revestimento sob a superfície de ferramentas de corte para prolongar a sua vida tem crescido exponencialmente. Métodos e procedimentos de maquinar, parâmetros de corte, temperaturas atingidas durante a maquinagem, tipo de ferramentas, materiais das ferramentas e materiais a maquinar tem grande importância na vida das ferramentas.

De forma a aumentar o tempo de vida das ferramentas para maquinar ligas consideradas difíceis de maquinar e a necessidade de a indústria produzir em períodos muito rápidos, tem levado a estudar novas soluções de revestimentos que possuem propriedades autolubrificantes

Nessa perspectiva, esta dissertação tenciona estudar a influencia da adição de Ag a revestimentos do sistema TiSiN na maquinagem de uma liga de titânio usada na indústria aeronáutica. Assim é apresentado inicialmente o estado da arte respeitante: principais processos usados na maquinagem de ligas de Ti; principais problemas na maquinagem das ligas de Ti; ferramentas de corte para maquinar ligas de Ti; principais soluções na maquinagem de ligas de Ti; revestimento HiPIMS e o desgaste das ferramentas durante o processo de maquinagem. Posteriormente é feito o estudo onde foram depositados 3 tipos de revestimentos diferentes, um TiSiN, um segundo TiSiNAg6 e por fim TiSiNAg10, estes revestimentos foram obtidos através do processo HiPIMS. Os revestimentos foram analisados quanto à sua morfologia, composição química, propriedades mecânicas e a resistência á oxidação. Brocas revestidas e não revestidas foram depois usadas para maquinar a liga de titânio Ti-6Al-4V e seguindo da avaliação do seu desgaste. Nestes ensaios foram realizados 2 tipos diferentes de ensaios: i) uma para quantificar o número de furos que cada tipo broca permitia abrir, isto é avaliar o tempo de vida das ferramentas e ii) teste interrompido a cada 20 furos para avaliar a evolução do desgaste na ferramenta. Os resultados foram comparados entre si para determinar qual a solução é mais eficaz.

Observou-se que o revestimento que teve o melhor desempenho nos ensaios de maquinagem foi o TiSiNAg10, apesar de ser o que apresenta a dureza e o modulo de elasticidade mais baixo que os restantes revestimentos e o ganho de massa na oxidação isotérmica ser superior aos outros revestimentos. O revestimento TiSiN foi o que apresentou o pior desempenho em ambos os ensaios. Concluiu-se que a presença de Ag nos revestimentos consegue diminuir o atrito no contacto e melhorar o tempo de vida das ferramentas.

## PALAVRAS-CHAVE

“Maquinagem ligas de titânio”; “Revestimento do sistema TiSiNAg”; “revestimentos autolubrificantes”; “Furação”; “Mecanismos de desgaste”

Desempenho de Brocas com revestimentos do sistema TiSiNAg produzidos com diferentes concentrações de Ag na maquinagem da liga de titânio (TiAl6V4)

página propositadamente em branco

## ABSTRACT

The demand for new and more efficient products made of better materials with good properties led in recent years to the development of methods and more efficient cutting tools to keep up with the rising demand of materials considered difficult to machine.

The application of coatings over the surface of cutting tools to extend their lifetime has grown exponentially. Machining methods and procedures, cutting parameters, temperatures reached during machining, type of tools, tool materials and materials to be machined are of great importance in tool life.

To increase the lifetime of tools for machining hard-to-cut materials and the need for the industry to increase production in short periods of time, has led to the development and study of new coatings solutions that have self-lubricating properties.

This dissertation aims to study the influence of adding Ag on TiSiN coatings in the machining of a titanium alloy used in the aeronautical industry. In the state of the art: the main processes used in machining Ti alloys; the main problems in machining Ti alloys; cutting tools for machining Ti alloys; the main solutions in machining Ti alloys; HiPIMS coatings and tool wear during the machining process are presented. Subsequently 3 different types of coatings were deposited, one TiSiN, a second TiSiNAg6 and finally TiSiNAg10, using the HiPIMS process. The coatings were analysed regarding their morphology, chemical composition, mechanical properties, and resistance to oxidation. Coated and uncoated drills were then used to machine the Ti-6Al-4V titanium alloy, and their wear was assessed. On those experiments, 2 different types of tests were carried out: i) one to quantify the number of holes that each type of drill allowed to be drilled, i.e. to evaluate the life of the tools and ii) an interrupted test every 20 holes to evaluate the evolution of wear on the tool. The results were compared to determine which solution was more effective.

It was observed that the coating that performed the best in the machining tests was the TiSiNAg10 one, even though it had the lowest hardness and elasticity modulus than that of the other coatings as well as the worst oxidation resistance. The TiSiN coating was the worst performer in both tests. It was concluded that the presence of Ag in the coatings can reduce contact friction and improve tools lifetime.

### KEYWORDS

“Machining titanium alloys”; “TiSiNAg system coating”; “self-lubricating coating”; “Drilling”; “Thinning mechanism”

página propositadamente em branco

# ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS .....	VII
ÍNDICE DE TABELAS .....	IX
LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS.....	XI
1. INTRODUÇÃO .....	13
1.1. Contextualização .....	13
1.2. Objetivos .....	13
1.3. Metodologia científica.....	14
1.4. Estrutura da dissertação.....	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1. Processos usados na maquinagem de ligas de Ti.....	18
2.2. Principais problemas na maquinagem das ligas de Ti.....	22
2.3. Ferramentas de corte para maquinar ligas de Ti .....	24
2.4. Principais soluções para melhorar maquinagem das ligas difíceis de maquinar .....	26
2.4.1. Refrigeração líquida .....	26
2.4.2. Refrigeração criogénica.....	27
2.4.3. Maquinagem a seco e quantidade mínima de lubrificação .....	28
2.4.4. Principais revestimentos aplicados nas ferramentas .....	29
2.5. Revestimento Hipims .....	32
2.6. Desgaste .....	33
3. Métodos e aplicação .....	34
3.1. Materiais.....	34
3.1.1. Substratos .....	34
3.1.2. Deposição dos revestimentos .....	35
3.1.3. Material maquinado.....	36
3.2. Caracterização dos revestimentos .....	36
3.2.1. Composição química dos revestimentos e morfologia em secção transversal e superfície .....	36
3.2.2. Estrutura dos revestimentos.....	37
3.2.3. Propriedades mecânica dos revestimentos .....	37
3.2.4. Resistência à oxidação .....	37
3.3. \Testes de furação.....	38
3.3.1. Descrição dos ensaios .....	38
3.3.2. Caracterização do desgaste .....	39
4. Discussão de resultados.....	42
4.1. Composição química dos revestimentos e taxa de deposição.....	42
4.2. Morfologia da secção transversal .....	43
4.2.1. Estrutura.....	44

---

4.3. Propriedades mecânicas .....	45
4.4. Resistência à oxidação.....	45
4.5. Ensaio de furação.....	47
5. Conclusão .....	53
5.1. Conclusões finais .....	53
5.2. Trabalhos futuros .....	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	55
ANEXO A – DATASHEET DO MATERIAL MAQUINADO – TiAl6V4.....	59

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Operação de tornamento (adaptado de [7]).....	18
Figura 2 - Operações de fresagem periférica (adaptado de [7]).....	19
Figura 3 - Operações de fresagem de topo (adaptado de [7]).....	19
Figura 4 - Operações de furação (adaptado de [7]).....	20
Figura 5 - Diagrama das fases do titânio (adaptado de [16]).....	23
Figura 6 - Morfologia da apara de duas ligas de Ti (adaptado de [19]).....	24
Figura 7 - Geometria ferramenta de corte (adaptado de [22]).....	25
Figura 8 - Comparação de tipos de furação realizados no estudo (adaptado de [24]).....	25
Figura 9 - Direções de aplicação do fluido de refrigeração (adaptado de [25]).....	26
Figura 10 - Comparação da refrigeração líquida e maquinagem a seco (adaptado de [28]).....	27
Figura 11 - Aplicação de criogénico para arrefecimento (adaptado de [26]).....	28
Figura 12 - Comparação da rugosidade superficial de métodos de arrefecimento da maquinagem (adaptado de [32]).....	29
Figura 13 - Tipos de estrutura dos revestimentos das ferramentas (adaptado de [37]).....	30
Figura 14 - Taxa deposição HiPIMS vs DCMS (adaptado de [47]).....	32
Figura 15 - Mecanismos de desgaste (adaptado de [51]).....	33
Figura 16 – Dimensões das ferramentas.....	34
Figura 17 - Alvo de Ti com furos usado nas deposições e equipamento de deposição.....	35
Figura 18 – Bloco de titânio maquinado.....	38
Figura 19 - Imagem padrão do microscópio para análise do desgaste.....	39
Figura 20 - Imagem padrão da segunda análise "We".....	40
Figura 21 – Gráfico da taxa deposição de Ag (adaptado de [53]).....	42
Figura 22 - Secção transversal e morfologia da superfície TiSiN.....	43
Figura 23 - Secção transversal e morfologia da superfície TiSiNAg6 e TiSiNAg10.....	43
Figura 24 - Espetros de difração dos revestimentos.....	44
Figura 25 - Ensaio de oxidação dinâmica.....	46
Figura 26 - Ensaio de oxidação isotérmica.....	46
Figura 27 - Quantificação de furos por revestimento.....	47
Figura 28 – Comprimento do desgaste "D".....	48
Figura 29 - Furação número 60 e 80 da ferramenta TiSiNAg6.....	48
Figura 30 – Comprimento de desgaste "We".....	49
Figura 31 - Ferramentas TiSiN e não revestidas furo 80.....	49
Figura 32 - Furo 80 da ferramenta TiSiNAg10.....	50
Figura 33 - Apara acumulada nas ferramentas.....	50

página propositadamente em branco

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição temporal das atividades desenvolvidas para a realização da dissertação..	14
Tabela 2 - Resumo de estudos de métodos de maquinagem não convencionais .....	21
Tabela 3 – Tecnicas de Deposição .....	30
Tabela 4 - Resumo de estudos de revestimentos .....	31
Tabela 5 - Características das ferramentas .....	34
Tabela 6 - Parâmetros de deposição para cada um dos revestimentos produzidos. ....	36
Tabela 7 - Composição química da liga Ti-6Al-4V em %wt .....	36
Tabela 8 - Parâmetros do teste de vida .....	38
Tabela 9 - Parâmetros do teste para avaliar a evolução do desgaste na ferramenta de corte .....	39
Tabela 10 - Composição química dos revestimentos.....	42
Tabela 11 - Propriedades mecânicas dos revestimentos.....	45

página propositadamente em branco

## LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS

### Lista de Siglas

Ag	Prata
Cr	Crómio
CrAlN	Nitreto de Cromo Alumínio
CrC	Carboneto de crómio
CrN	Nitreto de Crómio
Cu	Cobre
CVD	Deposição Química em fases de vapores
DCMS	Sputtering por Magnetração de Corrente Contínua Direta
ECM	Maquinagem eletroquímica
EDM	Maquinagem de eletroerosão
HiPIMS	Sputtering Magnetração de Impulsos de Alta Potência
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
LAM	Maquinagem assistida por laser
LN <sub>2</sub>	Azoto líquido
METIP	Metodologias de Investigação e Planeamento
MQL	Quantidade mínima de lubrificação
N	Azoto
NaNO <sub>3</sub>	Nitrato de sódio
P.Porto	Instituto Politécnico do Porto
PVD	Deposição física em fases de vapores
SEM	Microscópio de varrimento eletrónico
Si	Silício
Ti	Titânio
TiAlN	Nitreto titânio alumínio
TiAlSiN	Nitreto de titânio alumínio e silício
TiC	Carboneto de titânio
TiN	Nitreto de titânio
TiSiN	Nitreto de titânio silício
TiSiNAg	Nitreto de titânio silício e prata
TiSiNAg10	Nitreto de titânio silício e 10% prata
TiSiNAg6	Nitreto de titânio silício e 6% prata
WC-Co	Carboneto de tungsténio
XRD	Difração de raios-X
ZrN	Nitreto de zircónio

Desempenho de Brocas com revestimentos do sistema TiSiNAg produzidos com diferentes concentrações de Ag na maquinagem da liga de titânio (TiAl6V4)

**Lista de Unidades**

%at	Porcentagem atômica
°C	Grau Célsio
°C/min	Grau Célsio por minuto
µm	Micrómetro
A	Amperes
A/cm <sup>2</sup>	Densidade de corrente
GPa	Giga Pascal
Hz	Hertz
kW	Quilowatt
L/min	Taxa de fluxo
m/min	Metros por minuto
mA	Miliampère
min	Minutos
mm	Milímetro
mm/rev	Milímetro por revolução
mN	Milínewton
MPa	Pressão
Pa	Pascal
RP	Rotações por minuto
RPM	Rotações por minuto
V	Voltagem
W	Watt
wt	Porcentagem em peso
µm	Micrómetro
µs	Microsssegundo
<i>kg</i>	massa

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Contextualização

O uso das ligas de titânio por parte da indústria tem vindo a crescer a um ritmo elevado, o que leva a comunidade científica e indústrias a procurar soluções para melhorar o processo de maquinagem destas ligas, quer seja por otimização dos parâmetros de maquinagem ou o desenvolvimento de novos revestimentos para ferramentas.

As ligas de titânio apresentam excelentes características mecânicas, boa resistência à corrosão e baixa densidade, o que fazem um excelente material para diversos componentes de alta importância que muitas vezes estão sujeitos a condições de trabalho bastante adversas. As produções dos componentes recorrem a processos de maquinagem convencionais dentro da indústria, tais como: fresagem, torneamento e furação. No entanto o desenvolvimento destes processos, métodos e ferramentas para melhorar a maquinagem destas ligas tem evoluído. De facto, as ligas de titânio são consideradas ligas difíceis de maquinar, devido à sua baixa condutividade térmica, baixo módulo de elasticidade e fácil formação de aparado aderente. Estas características levam em serviço à falha prematura das ferramentas de corte e fraco acabamento da superfície da peça a maquinar. Assim, de formar a ultrapassar estes problemas, revestimentos mais eficientes e mais resistentes ao desgaste têm de ser desenvolvidos e testados em serviço.

## 1.2. Objetivos

O estudo de várias formas de melhorar a maquinagem de materiais considerados difíceis de maquinar é de extrema importância na indústria. O desenvolvimento de revestimentos que permitam eliminar o uso de lubrificação líquida é de extrema importância. Este trabalho inicia-se com a revisão bibliográfica dos processos usados na maquinagem das ligas de titânio, dos principais problemas e soluções utilizados para resolver os problemas destas ligas e principais revestimentos utilizados na proteção das ferramentas de corte para maquinar eficientemente as ligas de Ti.

Depois, o trabalho foca-se no desenvolvimento de revestimentos autolubrificantes, do sistema TiSiNAg com diferentes adições de Ag e a sua aplicação em ferramentas de corte para averiguar o seu rendimento durante a maquinagem de uma liga de titânio bastante usada na indústria aeronáutica e aeroespacial (TiAl6V4). Os revestimentos desenvolvidos foram também caracterizados relativamente à sua: composição química, estrutura, propriedades mecânicas e resistência à oxidação. No que diz respeito aos ensaios de maquinagem foram realizados ensaios de fim de vida e ensaios de maquinagem para avaliar a evolução de desgaste em brocas em função do número de furos realizados.

### 1.3. Metodologia científica

A dissertação segue a seguinte metodologia:

- Estado da arte da maquinagem de ligas de Ti e revestimentos aplicados com base em artigos científicos, livros e outras dissertações;
- Análise da morfologia e estrutura dos revestimentos
- Análise da adesão dos revestimentos aos substratos
- Análise da resistência à oxidação dos revestimentos
- Avaliação do tempo de vida das brocas revestidas e não revestidas, por avaliação do número máximo de furos possíveis realizar com cada um dos revestimentos para parâmetros de corte específicos
- Análise da evolução do desgaste das várias arestas das brocas revestidas
- Análise da produção de diferentes mecanismos de desgaste.

O rendimento das brocas revestidas com Ag serão comparados com o seu revestimento de referência (TiSiN) e com brocas não revestidas. A tabela abaixo sumariza as atividades para desenvolvimento da tese e a sua distribuição temporal.

Tabela 1 - Distribuição temporal das atividades desenvolvidas para a realização da dissertação.

		Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago
Caracterização do revestimento	Estado da arte	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Composição química dos revestimentos (SEM)					■	■						
	Estrutura (XRD)					■	■						
	Propriedades mecânicas (H; E; nano-indentação)					■	■						
	Termogravimetria/Resistência à oxidação					■	■	■					
	Testes de maquinagem			■	■	■	■	■					
	Análise do desgaste nas brocas				■	■	■	■					
	Análise de mecanismos de desgaste				■	■	■	■	■	■	■	■	
	Discussão de resultados					■	■	■	■	■	■	■	
	Escrita da tese	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

### 1.4. Estrutura da dissertação

A dissertação estará dividida em cinco capítulos principais, sendo o presente capítulo introdutório. No segundo capítulo é apresentado a revisão bibliográfica onde são apresentados todos os tópicos considerados importantes para o estudo a realizar à posteriori. Os tópicos apresentados são: principais processos usados na maquinagem de ligas de Ti; principais problemas na maquinagem

Desempenho de Brocas com revestimentos do sistema TiSiN<sub>Ag</sub> produzidos com diferentes concentrações de Ag na maquinagem de ligas de titânio (Ti6Al4V)

das ligas de Ti; ferramentas de corte para maquinar ligas de Ti; principais soluções na maquinagem de ligas de Ti.

O terceiro capítulo apresenta o procedimento experimental, estando dividido em três subcapítulos. O primeiro subcapítulo 3.1 descreve os materiais utilizados, desde o material base e os revestimentos depositados nas ferramentas. No subcapítulo 3.2 apresenta os métodos e equipamentos que foram utilizados para caracterizar os revestimentos em questão. Por fim, o subcapítulo 3.3 descreve os ensaios realizados, os métodos utilizados para a caracterização do desgaste das ferramentas.

No quarto capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos diferentes ensaios.

Por fim, no último capítulo da dissertação, apresentam-se as principais conclusões do trabalho realizado.



---

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O uso de ligas de Ti na indústria, principalmente na aeroespacial, aeronáutica, biomédica e automóvel tem crescido a. As ligas de Ti apresentam excelentes propriedades mecânicas tais como, resistência à corrosão, alta tenacidade e boa biocompatibilidade. Porém são bastante difíceis de maquinar [1], [2] .

Neste capítulo esta a informação considerada pertinente para os próximos capítulos. Capítulo 2 esta dividido em cinco subcapítulos.

- 2.1 Processos usados na maquinagem de ligas de Ti

O capítulo 2.1 foca-se na descrição dos processos usados na maquinagem de ligas de Ti, tais como torneamento, fresagem e furação. Apresenta-se também os parâmetros dos processos. Existem também processos considerados não convencionais, sendo feito um resumo de artigos com processos de maquinagem eletroquímica, eletroerosão, maquinagem assistida por laser e maquinagem híbrida.

- 2.2 Principais problemas na maquinagem de ligas de Ti

No capítulo 2.2 os principais problemas da maquinagem de ligas de Ti são abordados.

- 2.3 Ferramentas de corte

No capítulo 2.3 as tipologias de ferramentas de corte e geometrias utilizadas na maquinagem de ligas de Ti são apresentadas, a forma como a geometria das ferramentas afeta a maquinagem e os seus parâmetros são apresentadas.

- 2.4 Principais soluções para melhorar maquinagem das ligas

No capítulo 2.4 as principais soluções para melhorar a maquinagem das ligas de Ti (refrigeração líquida, refrigeração criogénica, quantidade mínima de lubrificação e revestimentos das ferramentas) são apresentados. Neste capítulo são também apresentados vários artigos científicos onde se estudou o efeito destas soluções na maquinagem de Ti

- 2.5 Revestimento HiPIMS

Neste subcapítulo são apresentadas as características dos revestimentos HiPIMS assim como estudos realizados para caracterizar os revestimentos obtidos através da técnica HiPIMS.

- 2.6 Desgaste

No último subcapítulo é apresentado os mecanismos de desgaste que as ferramentas estão sujeitas durante a maquinagem.

## 2.1. Processos usados na maquinagem de ligas de Ti

Há vários processos usados na maquinagem das ligas de Ti tais como, torneamento, fresagem e furação, mas vários artigos mostram uma procura por outros processos tais como maquinagem eletroquímica (ECM) eletroerosão (EDM) , maquinagem assistida por laser (LAM), maquinagem híbrida. [1], [3]–[6]

Uma descrição dos principais processos é descrita resumidamente abaixo:

- Torneamento -Processo de maquinagem que remove material da superfície de uma peça em rotação, por ação de uma ferramenta que varre em paralelo ao eixo de rotação da peça a maquinar que gere uma geometria cilíndrica. Existem várias operações usadas no torneamento, tais como, facejamento: onde se cria um plano superficial criado pela ferramenta que se move radialmente removendo uma camada fina de material; torneamento cónico: onde a ferramenta produz uma rampa entre duas superfícies devido a um ângulo entre a peça e ferramenta criando um cilindro cónico; torneamento por contorno: gera uma geometria previamente definida, neste caso a ferramenta não segue uma linha reta tal como acontece no facejamento; torneamento por forma: usa uma ferramenta já com a forma pretendida de ser obtida; chanfro: a ponta da ferramenta é usada para cortar em ângulo a ponta do cilindro; cortar: usa uma ferramenta específica que entra perpendicularmente ao eixo de rotação da peça, quando chega ao centro a peça a maquinar cai; rosqueamento: a ferramenta move ao longo da superfície da peça paralelo à direção de rotação; furação: uso de uma broca resulta na remoção no interior da peça estando a trabalhar ao longo do eixo de rotação, uma outra operação pode surgir no seguimento da furação que é o alargamento que usa os princípios da furação alargando o furo já existente mas que obtém uma precisão no diâmetro e um acabamento mais suave no interior; *Boring*: através de um furo já existente e paralelo ao eixo de rotação da peça a ferramenta tornea no interior. Grande parte das operações usa ferramentas de ponto único, tais como o torneamento por forma, cortar, e furação [7]

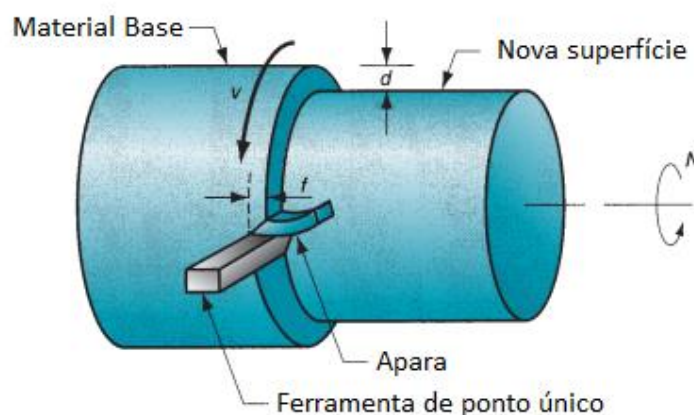


Figura 1 - Operação de torneamento (adaptado de [7])

Desempenho de Brocas com revestimentos do sistema TiSiNAg produzidos com diferentes concentrações de Ag na maquinagem de ligas de titânio (Ti6Al4V)

- Fresagem-Processo de maquinagem onde a ferramenta em rotação perpendicular ao seu avanço remove material formando aparas. Neste processo o material base encontra-se fixo a um gabari. Na fresagem há 2 operações principais, a periférica ou de topo como é possível observar na **Figura 2** e **Figura 3**[7]
  - Periférica - O eixo de rotação da ferramenta é paralelo ao da superfície a maquinar, existem 5 tipos diferentes de torneamento periférico,(a) fresagem plana: a extensão da ferramenta de corte ultrapassa a peça a maquinar em ambos os lados; (b) fresagem por ranhura: a extensão da ferramenta de corte é inferior à peça criando assim uma ranhura; (c) fresagem lateral: a ferramenta maquina num dos lados na peça; (d) fresagem lateral dupla: processo igual à fresagem lateral mas a ferramenta maquina em ambos os lados ao mesmo tempo; (e) fresagem por molde: usado uma ferramenta com especial perfil que cria uma ranhura com o seu formato [7]

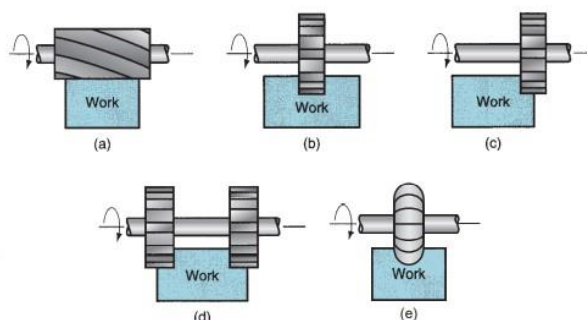


Figura 2 - Operações de fresagem periférica (adaptado de [7])

- Fresagem de topo – O eixo de rotação da ferramenta é perpendicular à superfície a ser maquinada, existem seis configurações diferentes na fresagem de topo, (a) facejamento convencional: o peça a maquinar é menos que o diâmetro da ferramenta; (b)facejamento parcial: a ferramenta corta num dos lados da peça; (c)fresagem de canais: o diâmetro é inferior ao tamanho da peça criando canais; (d)fresagem de contornos: operação feita nas extremidades da peça paralelo ao plano lateral superfície da peça; (e) fresagem de cantos: operação onde é criado uma caixa no interior do material; (f) contorno de superfície: ferramenta percorre uma superfície curvilínea, geralmente a ferramenta é uma fresa esférica [7]

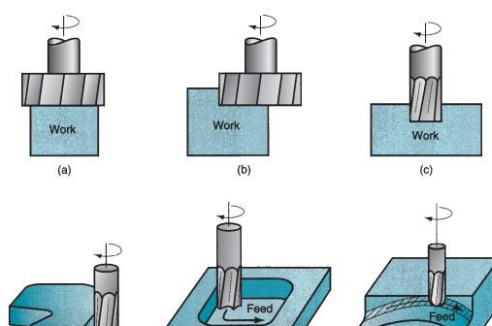


Figura 3 - Operações de fresagem de topo (adaptado de [7])

- Furação – Operação que geralmente usa uma ferramenta cilíndrica rotativa, designada de broca que normalmente tem duas superfícies de corte. A ferramenta penetra o material produzindo um furo com o diâmetro da ferramenta. No seguimento da furação é possível recorrer a várias operações que recorrem aos mesmos princípios da furação para se obter diferentes acabamentos, (a) alargamento: recorre a uma ferramenta que alarga um furo já existente melhorando a superfície de acabamento; (b) roscagem: um buraco já existente cria uma rosca interna; (c) rebaixamento: cria uma caixa de diâmetro maior geralmente usado para acertar as cabeças dos parafusos; (d) rebaixamento cônico: segue o princípio do rebaixamento alterando o furo para uma furação cônica para parafusos desse tipo; (e) centrar: cria um furo de pequenas dimensões para estabilizar a furação principal; (f) facejamento com curvatura: usado também na fresagem que cria uma superfície com melhores acabamentos.[7]

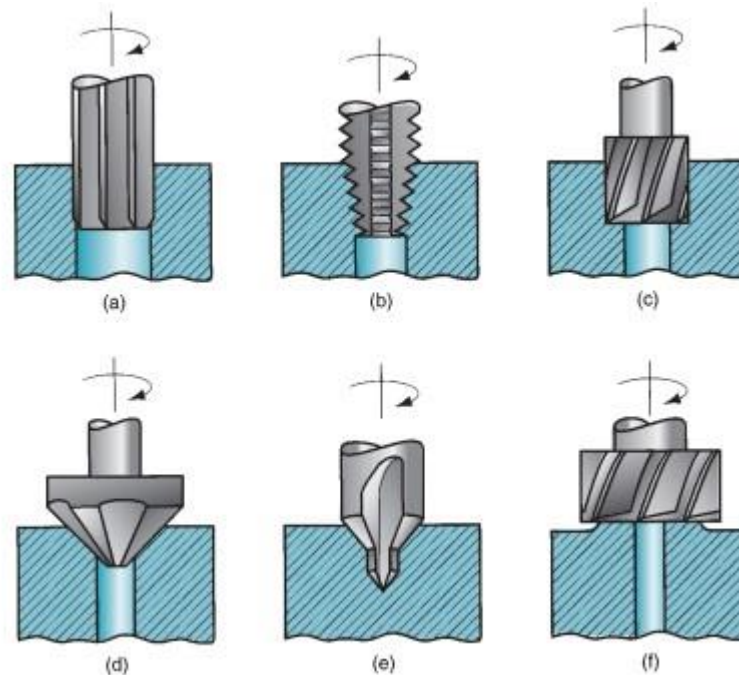


Figura 4 - Operações de furação (adaptado de [7])

Na maquinagem quer seja por torneamento, fresagem ou furação é necessário ter em consideração vários parâmetros de corte, de focar a velocidade de rotação que corresponde ao número de rotações que a ferramenta efetua por minuto (rpm); a velocidade de corte (m/min) que é o parâmetro de maior importância na maquinagem; a velocidade de avanço (mm/min) que é a velocidade linear do movimento do avanço da ferramenta; avanço por revolução (mm/rot; profundidade de corte axial (mm); profundidade de corte radial (mm)[7], [8].

A alteração destes parâmetros tem resultado na durabilidade das ferramentas, na rugosidade do material a maquinar, nas temperaturas atingidas durante a maquinagem e propriedades mecânicas do material base após a maquinagem.

A maquinagem de ligas de Ti usando ferramentas convencionas não é eficiente. A Tabela 2 apresenta alguns artigos de processos de maquinagem não convencionas de ligas de Ti.

Desempenho de Brocas com revestimentos do sistema TiSiNAg produzidos com diferentes concentrações de Ag na maquinagem de ligas de titânio (Ti6Al4V)

Tabela 2 - Resumo de estudos de métodos de maquinagem não convencionais

Referência Bibliográfica	Descrição do Trabalho
Xu et al. (2016), [9]	Este estudo foca-se na maquinagem eletroquímica (ECM) de uma liga de titânio Ti60 de alta temperatura. Foram realizados ensaios a diferentes densidades de corrente que mostram que a rugosidade do Ti60 deteriora com densidades baixas. O comportamento eletroquímico do Ti60 é analisado e as curvas do anódico polarizado foram obtidas, desenvolveram-se duas soluções uma de nitrato de sódio e uma de cloreto de sódio onde se obteve o potencial do circuito aberto. Verificaram que o eletrólito de cloreto de sódio é mais ativo e os iões interagem mais facilmente. Temperatura e concentração são fatores importante para influenciar os resultados. Com uma densidade de corrente superior de $20 A/cm^2$ é possível obter uma boa estabilidade, eficiência e qualidade. Os valores máximos de taxa de maquinagem é de 1.2 mm/min, melhor valor de rugosidade é Ra 0.6 $\mu m$ e a precisão da maquinagem do perfil é 0.05-0.07mm.
Liu et al. (2017), [1]	Neste trabalho o objetivo principal passou pelo estudo da fiabilidade e otimização dos parâmetros de processos de maquinagem por jato eletroquímico da liga de titânio TB6. Foi analisado o comportamento da dissolução da liga TB6 em nitrato de sódio e cloreto de sódio com diferentes concentrações e temperaturas, em seguida o efeito dos principais parâmetros, tais como composição, concentração e fluxo volumétrico do eletrólito, a voltagem da máquina e por fim o espaço intereletrodos. Os valores de 24V, 0.6mm de espaço intereletrodos, 2.1L/min de fluxo volumétrico e 15% eletrólito cloreto de sódio são selecionados como parâmetros ótimos. Conclui-se que o cloreto de sódio é mais eficaz no poder de ativação da superfície do titânio TB6, com o aumento da concentração de cloreto de sódio diminui a voltagem de dissolução; com a voltagem e concentração mais elevada mais rápido é a remoção de material, com um valor do espaço intereletrodos menos é possível a resistência dos eletrólitos e alcançar densidades maiores que aumenta a taxa de remoção.
Dandekar et al. (2010) [4]	Neste trabalho foi feito um estudo comparativo entre os processos convencionais de maquinagem com o processo de maquinagem com laser assistido (LAM) e um sistema híbrido de maquinagem com material base Ti-6Al-4V O custo de maquinagem de ligas de titânio é elevado pelo facto de ter baixas velocidades de corte (<60m/min) e a vida das ferramentas ser muito reduzida. A maquinagem assistida por laser obteve um aumento nas velocidades de corte passando para 107m/min e a maquinagem híbrida para 150-200m/min. A ferramenta utilizada de TiAlN apresentou resultados 2-3 vezes melhores do que não revestida para a maquinagem híbrida. Não houve qualquer diferença na microestrutura e microdureza no titânio entre a maquinagem convencional e da híbrida A níveis económicos com a ferramenta TiAlN houve uma redução de 30% para a maquinagem assistida por laser e 40% na maquinagem híbrida.
Li et al. (2016) [10]	Este estudo foca-se na maquinabilidade eletroquímica de Ti-6Al-4V na solução de $NaNO_3$ . Os parâmetros foram otimizados e conclui que usando uma solução de 10% de $NaNO_3$ é possível obter furos com diâmetros uniformes, boa qualidade de superfície e boa morfologia. O desvio medio na furação foi de 0.05mm com uma rugosidade de 9 $\mu m$ .

Desempenho de Brocas com revestimentos do sistema TiSiNAg produzidos com diferentes concentrações de Ag na maquinagem da liga de titânio (TiAl6V4)

Referência Bibliográfica	Descrição do Trabalho
Bhaumik et al. (2019) [11]	Bhaumik et al neste trabalho estudou o efeito de eletrodos diferentes usados na eletroerosão. Foi usado uma liga de titânio de grau 6 e 3 diferentes eletrodos, de cobre, zinco e latão. Os autores concluíram que o eletrodo de cobre produz o melhor acabamento superficial por adquirir uma condutividade térmica maior 401 W/m.k, o eletrodo de zinco produz a nível microestrutural mais defeitos superficiais
Perumal et al. (2021)[12]	Neste trabalho foi realizado através do método de Taguchi a avaliação dos parâmetros de processo na maquinagem de eletroerosão. Conclui que a taxa remoção de material aumenta com a corrente de descarga, o fator mais importante para a taxa de desgaste da ferramenta é o pulso no tempo e o menos importante o diâmetro da ferramenta. A maior taxa de remoção de material é obtida com um diâmetro de 6mm, corrente de 20A, voltagem de 60V e uma duração da faísca de 100 microssegundos. A mais baixa taxa de desgaste da ferramenta é atingida com um diâmetro de 10mm, corrente de 10A, voltagem de 80V e uma duração da faísca de 50microssegundos.
Muhammad et al. (2014) [13]	Este estudo feito por Muhammad et al teve como objetivo analisar a maquinabilidade de duas ligas alfa+beta de titânio usando torneamento convencional com o torneamento assistido por ultrassom. Concluiu se que o torneamento assistido por ultrassom, as vibrações na interface peça material base e uma temperatura mais alta promovem aparas mais pequenas aumentado a maquinabilidade. Também foi observado uma redução das forças de corte e uma melhor rugosidade de superfície em ambas as ligas

## 2.2. Principais problemas na maquinagem das ligas de Ti

O titânio no estado puro não apresenta boas propriedades mecânicas sendo necessário recorrer a elementos ligantes para aumentar as propriedades. No estado puro o titânio tem 2 formas alotrópicas, a hexagonal compacta formada a baixa temperatura também designada fase alfa e a cubica de corpo centrado ou fase beta. A temperatura para a transição das fases é de 882°C. Ao adicionar-se outros elementos ao Ti é possível otimizar as características mecânicas da liga. As ligas de titânio segundo a sua estrutura podem ser divididas em cinco famílias diferentes: ligas alfa, ligas quase alfa, beta, ligas alfa+beta e compostos intermetálicos à base de Ti[14]–[17]

- Ligas de fase alfa: Resulta em grande parte (95%) da forma alotrópica hexagonal compacta ou fase alfa com o acréscimo da fase beta. As ligas de titânio com fase alfa não são usadas em aplicações sujeitas a elevados esforços por não apresentar valores de tensão elevados sendo usados em aplicações onde a resistência à corrosão seja de maior foco. Dentro desta fase existem 4 graus que dependem da sua composição. O valor de tensão nunca passa dos 550 MPa. [14], [18]
- Ligas de fase beta: Ao contrário das ligas de fase alfa, as betam atingem valores de tensão bastante elevados. É possível obter estas ligas através do arrefecimento rápido da fase beta podendo atingir a fase 100% metastável, apenas existe uma liga beta estável, a liga Ti-35V-15, porque durante o tratamento de envelhecimento as ligas decompõem-se formado alfa+beta. Através de combinações de vários componentes e da temperatura de arrefecimento é possível controlar a percentagem da fase alfa. Os valores de tensão de cedência na fase beta são tipicamente nunca maiores de 1200MPa[14], [18]

Desempenho de Brocas com revestimentos do sistema TiSiNAg produzidos com diferentes concentrações de Ag na maquinagem de ligas de titânio (Ti6Al4V)

- Ligas alfa+beta: São as mais recorrentes das ligas de titânio juntando as características das duas fases obtendo assim uma liga com boa resistência à corrosão e valores de tensão de cedência elevados. A liga mais famosa é o TiAl6V4 que apresenta uma excelente combinação de propriedades.[14], [18]

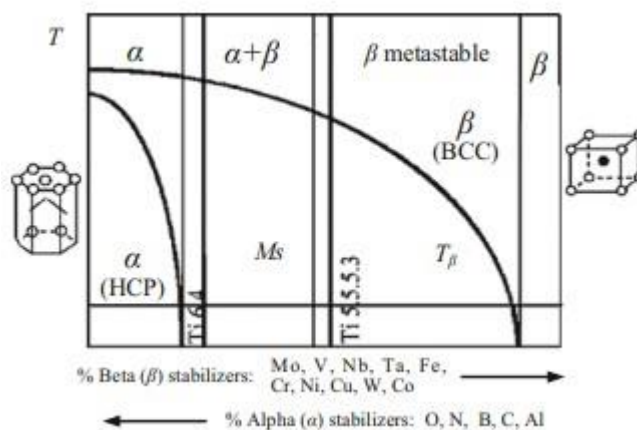


Figura 5 - Diagrama das fases do titânio (adaptado de [16])

As ligas de titânio apesar de apresentarem boas propriedades mecânicas são conhecidas por serem bastante difíceis de maquinar devido à sua baixa condutividade, baixo módulo de elasticidade, alta reatividade química a que a altas temperaturas provoca adesão do material a maquinar às ferramentas e a alteração da espessura da apra. [3], [8], [19]

- Variação da espessura da apra - A velocidade de corte durante a maquinação de ligas de Ti na qual se atinge uma instabilidade no cisalhamento é bastante baixa. Esta velocidade ao ser atingida começa a gerar ciclos de forças que criam trepidações e alterações na rugosidade isto devido ao facto de diferentes espessuras da apra e este mecanismo leva que a ponta da ferramenta se parta levando a um desgaste rápido.[19].
- Reatividade do titânio - O titânio é um material com alta reatividade com os materiais mais comuns usados nas ferramentas de corte como carbonetos, nitretos, óxidos e diamante que leva a um alto desgaste das ferramentas.[19]
- Tensões térmicas – A temperatura que é atingida durante a maquinação está relacionada com as condições de corte e as propriedades da ferramenta. Através da equação  $u * \sqrt{\frac{vf}{kpc}}$  onde o “u” é a energia específica de corte, o “v” é a velocidade de corte, “f” a espessura das aparas; “k” condutividade térmica da material base, “p” a densidade do material base, “c” calor específico da material base. Através desta equação e das propriedades das ligas de titânio que apresentam valores baixos dos produtos k,p e c quase um aumento da temperatura durante a maquinação. Cerca de 80% do calor gerado durante a maquinação de ligas de titânio é aplicado na ferramenta devido à baixa condutividade térmica das ligas de titânio. A temperatura atingida durante a maquinação da liga Ti-6Al- 4V a baixas velocidades de corte (60m/min) atinge 1077° que provoca processos de difusão e adesão onde ocorrem tensões térmicas. Estas temperatura alta também afetam a ferramenta de corte podendo reduzir a precisão e a qualidade superficial das peças a maquinar. A temperatura provoca uma expansão quer na ferramenta, quer nas ligas de titânio [19], [20].

Desempenho de Brocas com revestimentos do sistema TiSiNAg produzidos com diferentes concentrações de Ag na maquinação da liga de titânio (TiAl6V4)

- Cargas de alta pressão – A resistência e a dureza das ligas de titânio não reduzem com o aumento da temperatura, isto provoca alto desgaste na ferramenta, ferramentas estas que com uma carga de pressão alta causa uma redução da superfície de contacto no qual aumenta com o processo de formação de aparas reduzindo assim estes esforços na ponta da ferramenta [19].

Os problemas acima descritos estão relacionados com a maquinagem de ligas de titânio alfa-beta por exemplo (Ti-6Al-4V). No entanto, existem também problemas relacionados com a maquinagem de outras ligas Ti, nas ligas beta onde a reatividade química e resistência mecânica, os valores de temperaturas atingidas são maiores elevando a um desgaste rápido das ferramentas. **A Figura 6** apresenta a morfologia das aparas de 2 ligas titânio com diversas velocidades de corte, onde se observam diferentes morfologias e tamanhos de aparas.

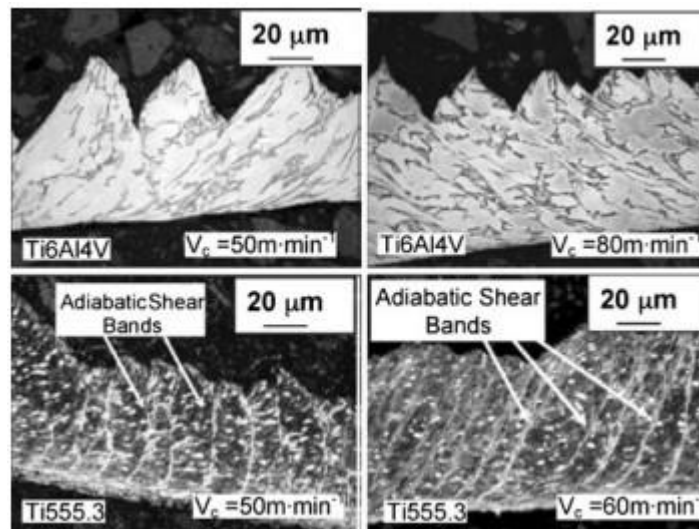


Figura 6 - Morfologia da avara de duas ligas de Ti (adaptado de [19])

### 2.3. Ferramentas de corte para maquinar ligas de Ti

A constante procura por parte da indústria de maquinagem por ferramentas de corte e métodos mais eficientes de maquinar as ligas consideradas difíceis de maquinar tem levado nos últimos anos ao desenvolvimento de ferramentas e revestimentos que consigam melhorar a eficiência dos processos. As geometrias das ferramentas influenciam os resultados na maquinagem, por exemplo, rugosidades superficiais, temperaturas atingidas e afetam as propriedades mecânicas das ligas de titânio [16], [21]. As características geométricas das ferramentas de corte podem afetar a vida das

ferramentas, a ângulo do nariz, angulo de saída, raio da aresta de corte e o tipo e grau da e qualidade de acabamento do angulo são alguns dos exemplos [21], [22].

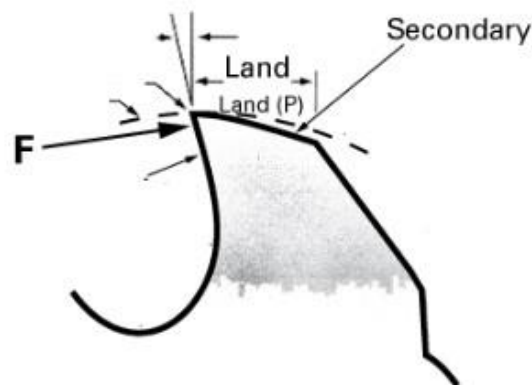


Figura 7 - Geometria ferramenta de corte (adaptado de [22])

Segundo Hughes et al. (2004) [23] que estudou os efeitos da alteração da geometria na vida da ferramenta e da integridade da superfície do material base Ti-6Al-4V. Concluiu que com o aumento da velocidade de corte e do avanço reduz a vida da ferramenta, A uma velocidade de corte de 80m/min pouco desgaste foi observado. As pastilhas de corte utilizadas são de carboneto de tungstênio. Estas ferramentas tinham um angulo de inclinação de 7°, angulo de folga de 6, angulo de corte de 95° e um raio de nariz de 0.8mm. A primeira pastilha tem a ponta de corte com raio de 10-20  $\mu\text{m}$  e uma segunda pastilha com um raio de corte de 40  $\mu\text{m}$ .

Outro estudo sobre diferentes ferramentas de corte foi realizado por Ge et al. (2022) [24] que investigou a performance dos furos recorrendo a furação convencional, furação pica pau e fresagem helicoidal. O material base é formado por duas camadas, uma de Al 2024-T3 e outra de Ti-6Al-4V e concluiu que o método de fresagem helicoidal produz menos aparas devido a menores forças de corte e temperaturas alcançadas. Dos três métodos o de fresagem helicoidal mostrou ser o mais favorável a aumentar a qualidade dos furos reduzindo as alterações de microestrutura e aumentando performance da fadiga, por fim acrescenta que este método apresenta limitações por ser o que reduz a produtividade.

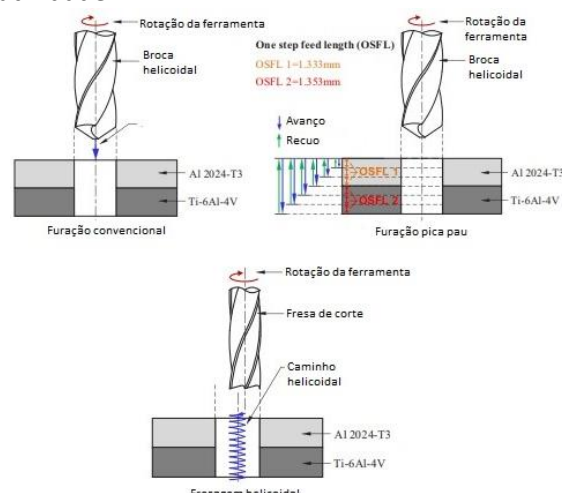


Figura 8 - Comparação de tipos de furação realizados no estudo (adaptado de [24])

Desempenho de Brocas com revestimentos do sistema TiSiN<sub>Ag</sub> produzidos com diferentes concentrações de Ag na maquinagem da liga de titânio (TiAl6V4)

## 2.4. Principais soluções para melhorar maquinagem das ligas difíceis de maquinar

Como já referido anteriormente, durante a maquiagem das ligas de Ti são atingidas elevadas temperaturas na zona de corte levando à adesão do material de base às ferramentas de corte e consequentemente má qualidade superficial de peça e falha prematura da ferramenta de corte em serviço sendo necessário procurar soluções que melhorem os resultados da maquinagem. Algumas das soluções é o uso de refrigeração líquida, quantidade mínima lubrificante (MQL), refrigeração criogénica e uso de revestimentos protetores das ferramentas [3], [25], [26]

### 2.4.1. Refrigeração líquida

O uso de líquidos de refrigeração é o método mais convencional que leva a uma redução do atrito entre a ferramenta e o material base que por consequência reduz a temperatura atingida. No entanto, nas ligas de titânio a temperatura desenvolvida no contacto é muito elevada o que faz com que o fluido evapore antes de chegar à interface da ferramenta material base. Tipicamente é usado um fluxo volumétrico de 100L/h, o arrefecimento ocorre por convecção do calor na zona de maquinagem e esta dependente da quantidade de refrigerante que consegue atingir a interface da ferramenta com o material base e da direção da aplicação do refrigerante. A aplicação do líquido refrigerante é normalmente feita atrás da apra ou entre a ferramenta e a apra.[25].

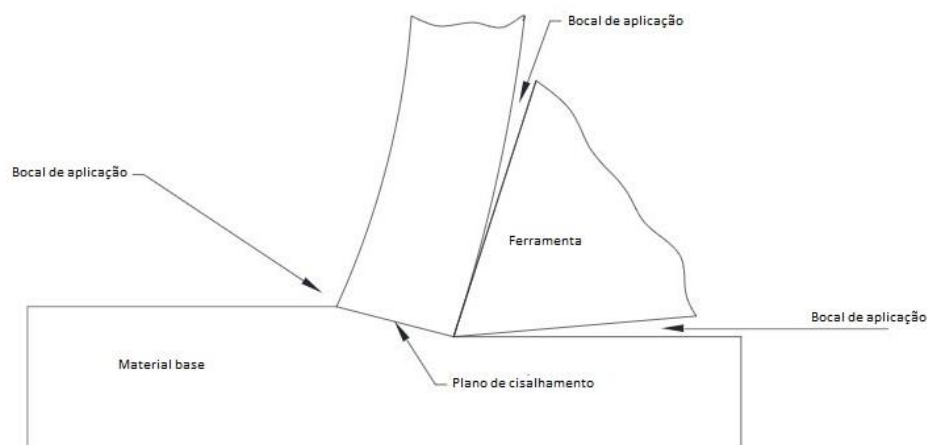


Figura 9 - Direções de aplicação do fluido de refrigeração (adaptado de [25])

A característica dos fluidos, nomeadamente, a concentração, o tipo de fluido, a sua volatilidade, do efeito da temperatura no fluido, a idade, níveis de óleo e o método e velocidade da aplicação são as características a ter em conta na escolha do fluido no arrefecimento de qualquer método de maquinagem.[27]

Os líquidos de refrigeração são divididos em 4 grupos: os óleos no qual é necessário selecionar a viscosidade que afeta a escolha da utilização; os óleos solúveis que tem como base óleos minerais ou semissintéticos normalmente diluídos em 50% de água; semissintéticos normalmente com menos de 30% de óleo mineral no qual se pode substituído por hidrocarbonetos; sintéticos que

Desempenho de Brocas com revestimentos do sistema TiSiNAg produzidos com diferentes concentrações de Ag na maquinagem de ligas de titânio (Ti6Al4V)

subdivide em 2 grupos os sintéticos a base de água e o que segundo grupo que contem óleo mineral.[27]

Segundo Namb et al. [28] que maquinou a liga de Ti6Al4V com diferentes condições de corte comparando o uso de líquido de arrefecimento e maquinagem a seco. A ferramenta usada foi de cerâmica contendo 80% de  $Al_2O_3$  e 20% de TiC e a constituição do líquido de refrigeração de 75% de água. Concluiu que os acabamentos superficiais era melhor em comparação com a maquinagem a seco e a vida da ferramenta aumentou em 30% com o uso de fluido de refrigeração.

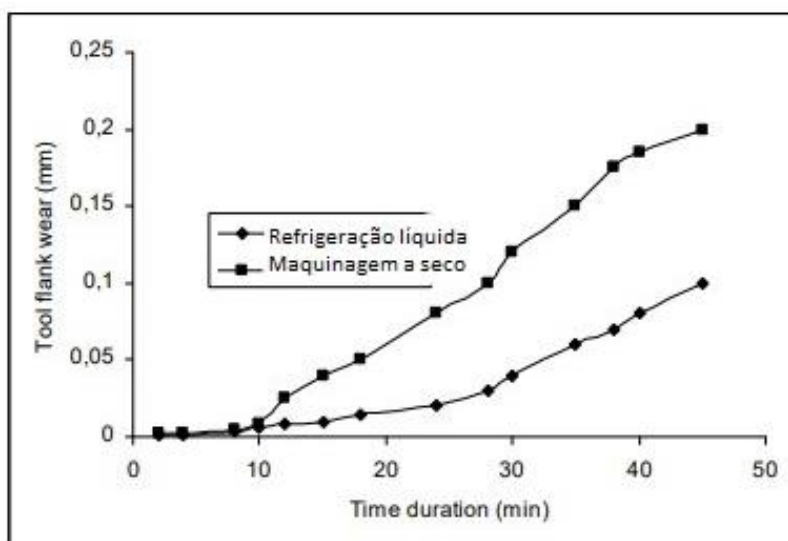


Figura 10 - Comparação da refrigeração líquida e maquinagem a seco (adaptado de [28])

## 2.4.2. Refrigeração criogénica

O uso da refrigeração criogénica é também um dos métodos para solucionar os problemas na maquinagem das ligas de titânio. O arrefecimento azoto líquido é o mais utilizado por ser bastante abundante e não ser tóxico. O seu uso tem como objetivo remover o calor da zona de corte resultante do atrito entre a ferramenta e o material a ser removido. O calor gerado no contacto durante a maquinagem pode se dissipar através de 4 formas diferentes, para ferramenta, para a peça, através das aparas e através do fluido de refrigeração. [25], [26]. O método de aplicação da refrigeração criogénica pode ser dividido em 4 grupos: pré-refrigeração da peça, refrigeração criogénica indireta, refrigeração por jato e tratamento criogénico. O método de pré-refrigeração consiste em reduzir a temperatura da peça antes da sua maquinagem, de modo mudar as suas propriedades. O método indireto de refrigeração passa por refrigerar a ferramenta através de canais interiores existentes nas ferramentas com este processo é possível aumentar a performance da maquinagem porque não há alteração das propriedades da peça base estando dependentes dos materiais da ferramenta e sua condutividade térmica; no arrefecimento por jato a aplica-se o refrigerante na interface entre a ferramenta e a peça através de bocas onde é expelido o refrigerante, com isto é possível evitar um gasto desnecessário em zonas que não precisem de refrigeração; tratamento criogénico o arrefecimento das peças é feito durante algum tempo e depois a aquecida ate a temperatura ambiente para aumentar a resistência e a estabilidade dimensional.[26]

Desempenho de Brocas com revestimentos do sistema TiSiNAg produzidos com diferentes concentrações de Ag na maquinagem da liga de titânio (TiAl6V4)

Segundo Wang et al.[29] que estudou o efeito da refrigeração criogénica na fresagem de paredes finas produzidas com ligas de titânio, o refrigerante usado foi azoto líquido (LN<sub>2</sub>) que foi comparado com um fluido de refrigeração tradicional. Concluiu que com o uso de refrigeração criogénica a uma temperatura de -130 °C origina num aumento da força de fresagem. A deformação foi menor em comparação com o líquido. As principais razões que levaram à melhoria da fresagem da liga de Ti com o uso de arrefecimento criogénico foram o aumento da rigidez de corte, a mudança da forma das aparas e a redução da deflexão

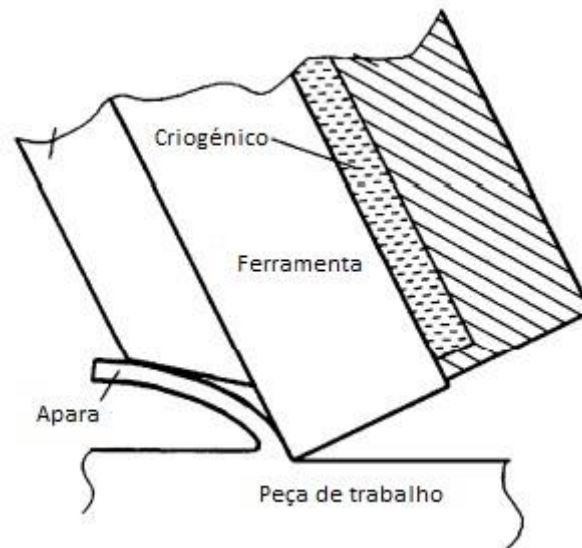


Figura 11 - Aplicação de criogénico para arrefecimento (adaptado de [26])

### 2.4.3. Maquinagem a seco e quantidade mínima de lubrificação

A maquinagem a seco em comparação com a refrigeração líquida e criogénica apresenta um impacto ambiental e económico por não usar líquidos tóxicos e poluentes na redução da temperatura durante a maquinagem. A maquinagem a seco tem como principal desvantagem o aumento das temperaturas no contacto que diminui o tempo de vida das ferramentas [3], [30].

Outra solução possível para reduzir os problemas na maquinagem das ligas de Ti é o uso de quantidade mínima de lubrificação que reduz a quantidade de fluido de arrefecimento que é usado. Este método reduz eficientemente a quantidade de fluido muitas vezes poluentes e tóxicos, no entanto pode não ser suficiente para reduzir as temperaturas excessivas alcançadas durante a maquinagem. Apesar disso normalmente leva a melhores resultados que a maquinagem a seco [31].

Segundo Sun et al. 2015 (2018) [32] que comparou a maquinabilidade da liga de Ti-5553 usando refrigeração criogénica, quantidade mínima de lubrificação e o método de líquido de refrigeração. Conclui que a melhor rugosidade superficial foi atingida com o método de quantidade mínima de lubrificação e que a refrigeração criogénica conseguiu reduzir 30% as forças de corte em comparação com os outros 2 métodos.

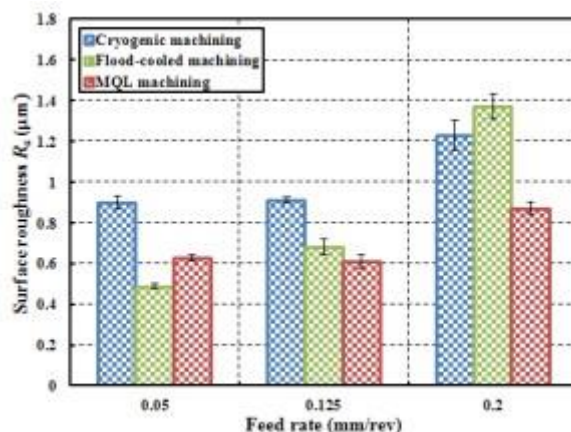


Figura 12 - Comparação da rugosidade superficial de métodos de arrefecimento da maquinagem (adaptado de [32])

Outro estudo levado a cabo por Qin et al. (2016)[33] que analisou a utilização da quantidade mínima de lubrificante com o uso de ferramentas com diferentes revestimentos no torneamento de TC11. Concluiu que as forças de corte reduziram em volta de 10% com o uso de quantidade mínima de lubrificante., A ferramenta revestida com  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiAlN}$  com o uso de quantidade mínima de lubrificante consegue ser prolongada em 88.4% a vida das ferramentas. A ferramenta revestida com diamante consegue obter uma boa superfície de acabamento

#### 2.4.4. Principais revestimentos aplicados nas ferramentas

A aplicação de revestimentos é outra forma de tentar minimizar os problemas da maquinagem de ligas de Ti [19].

A aplicação destes revestimentos são realizadas a partir da deposição por duas técnicas diferentes, deposição química em fase de vapor (CVD) e deposição física em fase de vapor (PVD). Historicamente a deposição química começa nos anos 1880 com a deposição de carbono e metal em filamentos de lâmpadas sendo apenas nos anos 1970 que lançaram o primeiro revestimento de TiC comercialmente, ao nível da deposição física comercialmente foi lançado em 1978 o primeiro revestimento. As varias técnicas provenientes do PVD e CVD estão na Tabela 3 [34]–[36].

Atualmente 80% das ferramentas usadas na maquinagem são de metal duro revestido, este revestimento melhorou o processo de maquinagem aumentando a taxa de remoção de material. Os revestimentos depositados na superfície da ferramenta provocam um aumento da resistência e reduzem o coeficiente de fricção podendo assim maquinar a velocidades mais altas mantendo uma boa qualidade superficial, reduzir as forças de corte, temperaturas e desgaste. [37]

Desempenho de Brocas com revestimentos do sistema TiSiNAg produzidos com diferentes concentrações de Ag na maquinagem da liga de titânio (TiAl6V4)

Tabela 3 – Técnicas de Deposição

Processo de Deposição	Técnicas de deposição
<b>PVD</b>	Evaporação Deposição catódica
<b>CVD</b>	CVD com vácuo CVD sem vácuo

O processo PVD comparado com o CVD ocorre a temperaturas mais baixas não passando dos 500°. O primeiro processo é mais amigável ao ambiente do que o último. A seleção do revestimento para as ferramentas tem de ter em consideração o tipo de maquinagem a qual a ferramenta será aplicada. Os revestimentos produzidos por CVD são geralmente mais espessos e apropriados para desbastes e apenas podem ser aplicados a ferramentas de corte de metal duro que apresentam bom comportamento a elevadas temperaturas por outro lado o processo PVD que é aplicado a temperaturas mais baixas tem de ser aplicado a ferramentas de aço [37].

Os revestimentos podem ser depositados de formas diferentes, mas também tipos diferentes. Estas divisões de diferentes tipos podem ser descritas da seguinte forma [37]:

- (a) Revestimento de camada única (monocamada);
- (b) Revestimento de dupla camada;
- (c) Revestimento graduado;
- (d) Revestimento em multicamada;
- (e) Revestimento nanoestruturado;
- (f) Revestimento nano-compósito.

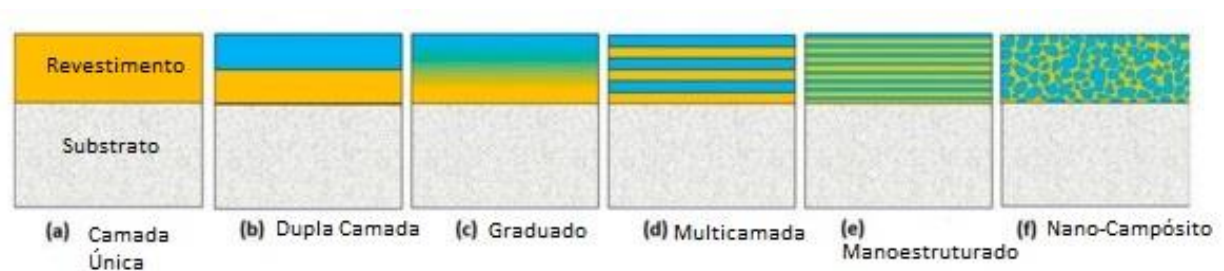


Figura 13 - Tipos de estrutura dos revestimentos das ferramentas (adaptado de [37])

As diferentes arquiteturas dos revestimentos são aplicadas consoante as condições de serviço e os materiais a maquinar, por exemplo a dupla camada onde são utilizados 2 revestimentos sobrepostos, a primeira pode apresentar condutividade térmica e outra com melhores propriedades mecânicas para resistir ao desgaste. O revestimento com mais aplicações na indústria é a multicamada pois normalmente apresentam maior dureza e maior resistência à propagação de fendas [37].

Os revestimentos geralmente usados nas ferramentas são nitretos, boretos, óxidos e carbonetos. Os revestimentos à base dos nitretos mais usados são TiN, TiAlN, CrN, ZrN, TiSiN, TiAlSiN, CrAlN e TiAlCrN; os boretos de destacar o TiB<sub>2</sub>; os óxidos é o Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e por fim os carbonetos TiC, CrC e WC [37].

Desempenho de Brocas com revestimentos do sistema TiSiNAg produzidos com diferentes concentrações de Ag na maquinagem de ligas de titânio (Ti6Al4V)

Tabela 4 - Resumo de estudos de revestimentos

Referência Bibliográfica	Descrição do Trabalho
Grzesik et al. (2019) [38]	Este estudo investigou o comportamento do revestimento do AlTiN na maquinagem de Ti-6Al-4V. Os parâmetros selecionados foram: profundidade de corte constante de 0.25mm, um avanço de 0.1mm/rpm e uma velocidade de corte variável de 110,120,150 e 170 m/min. Com o avanço pequeno e com um raio da ferramenta de contornos de 1.2mm garante bons acabamentos sendo 1.25 µm a rugosidade pretendida. Os autores concluíram que a velocidade de corte de 150m/min é a recomendada para a indústria aeroespacial por garantir uma vida da ferramenta de 20min, a esta velocidade de corte a temperatura não excedeu os 800°
Lemes et al. (2022) [39]	Este estudo comparou a performance de 4 ferramentas diferentes no torneamento de titânio puro de grau 4. As ferramentas uma delas é não revestida sendo as 3 restantes revestidas pelo processo PVD, uma com TiAlN, com AlCrN e por fim TiN + TiCN. Os parâmetros definidos foram a velocidade de corte de 55m/min e um avanço de 0.06mm/rev sendo posteriormente aumentado em 20% a velocidade de corte usando 66m/min. Os autores concluíram que a ferramenta que apresentou melhor comportamento foi a revestida com TiN + TiCN devido ao baixo coeficiente de atrito gerado. A ferramenta com a maior dureza de superfície não obteve o valor de tempo de vida. A pior ferramenta ao nível da duração de utilização foi a não revestida.
Shuster et al. (2021) [40]	O objetivo deste estudo foi de ver a influencia das condições de corte na resistência do revestimento TiB <sub>2</sub> na maquinagem de Ti-6Al-4V. As condições de corte foram divididas em 3 tipos, baixa velocidade 45m/min, a alta velocidade 80m/min e a muito alta velocidade de 150m/min. Constata que a baixas velocidades o desgaste é bastante eficaz tendo uma profundidade de corte de 2mm, assume que se deve ao facto de se criar uma barreira térmica nos filmes TiC e a imensa quantidade de B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> que serve como lubrificante líquido. Nas operações de acabamento velocidades altas e muito altas não apresenta eficácia
Kumar et al. (2016)[41]	Kumar et al. comparou o comportamento de uma ferramenta revestida com TiAlN e uma não revestida durante a furação de uma liga de titânio de grau 2. No total foram realizados 9 ensaios para cada ferramenta a diferentes rotações e avanço da ferramenta indo de 132 a 220 e 0.038 a 0.203 respetivamente. As principais conclusões foram que a ferramenta não revestida produz maior vibrações do que as ferramentas revestidas com TiAlN. A rugosidade de superfície da ferramenta revestida é muito melhor que o da não revestida; a força de impulso maior ocorreu na ferramenta não revestida com a combinação da velocidade de rotação menor e o avanço menor, mas na ferramenta revestida só ocorreu quando a velocidade de rotação estava a meio do intervalo selecionado e com avanço maior.
Vereschaka et al. (2019)[42]	Este trabalho teve como objetivo aumentar a vida das ferramentas usadas na fresagem usando um revestimento de multicamada. O ensaio consistiu na maquinagem de titânio VT20 a seco com uma velocidade de corte de 62.8m/min. Foram usados 4 tipos de revestimentos., TiN; ZrN; Ti-TiN-(Ti,Cr,Al)N e Zr-ZrN-(Zr,Al,Si)N. Concluiu que os revestimentos Ti-TiN-(Ti,Cr,Al)N e Zr-ZrN-(Zr,Al,Si)N aumentaram em 4.5vezes a vida das ferramentas e que o Zr-ZrN-(Zr,Al,Si)N

Desempenho de Brocas com revestimentos do sistema TiSiNAg produzidos com diferentes concentrações de Ag na maquinagem da liga de titânio (TiAl6V4)

## 2.5. Revestimento Hipims

A técnica de deposição HIPIMS (pulverização de magnetres de impulso de alta potência) usa um alto valor densidade de potência e um ciclo de trabalho baixo para aumentar a quantidade de pulverização de materiais ionizados atingindo mais de 70% em materiais metálicos. Assim aumenta a adesão do revestimento ao substrato e as propriedades do mesmo. Ao elevar a densidade de corrente catódica dentro do pulso, pode-se alcançar um valor de ionização do material pulverizado mais elevado, mas com baixa energia iônica. A técnica de HiPIMS é uma derivada do processo PVD[43] [44], [45]

A técnica de HiPIMS tem vindo a ser fortemente desenvolvida não só para revestimentos metálicos mas como compósitos ou reduzidos, a alteração entre as técnicas de HiPIMS e DCMS juntamente com a rotação do substrato tem sido usado para a criação de revestimentos multicamada [46].

A técnica HIPIMS em comparação com DCMS (pulverização de corrente direta) consegue uma deposição de 5 a 15% mais densa, que pode ser explicado pelo aumento do bombardeamento de metal ionizado [47].

Segundo o estudo de Samuelsson et al. 2010 [47], que comparou a taxa de deposição e a espessura dos filmes para 8 diferentes tipos de revestimentos metálicos usando DCMS e HiPIMS. Conclui que a técnica DCMS apresenta uma taxa de deposição mais elevada, destacou também a importância de ajustar as condições de deposição consoante o material a depositar, por exemplo as configurações do campo magnético e características de descarga do pulso influencia as propriedades do revestimento. Segundo o mesmo a técnica de HiPIMS de forma geral apresenta um aumento da densidade dos revestimentos, isto pode estar relacionado com o grau de ionização do material alvo. A **Figura 14** apresenta a taxa de deposição de diferentes materiais para ambas as técnicas.

Segundo Ghailane et al. 2020 [48], que reviu as propriedades mecânicas dos revestimentos depositados por DCMS e HiPIMS, conclui que usando a técnicas de HiPIMS as propriedades poderiam ser melhoradas graças à maior fração de ies na descarga que podem ser manipulados pela voltagem de polarização, configuração do pulso e do campo magnético.

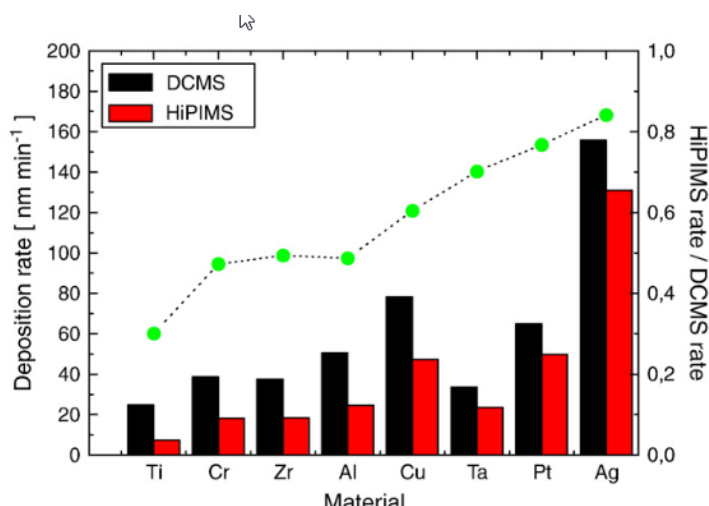


Figura 14 - Taxa deposição HiPIMS vs DCMS (adaptado de [47])

Desempenho de Brocas com revestimentos do sistema TiSiNAg produzidos com diferentes concentrações de Ag na maquinagem de ligas de titânio (Ti6Al4V)

## 2.6. Desgaste

Na maquinagem o contacto entra a ferramenta e a peça a maquinar esta sujeito a forças de contacto que gera atrito elevado e alcança temperaturas elevadas o que leva ao seu desgaste. Os parâmetros de corte e os materiais, quer da ferramenta, quer do material a maquinar são fatores de igual importância para o desgaste. Este desgaste pode assim ser classificado de diferentes formas[7], [49]–[51]:

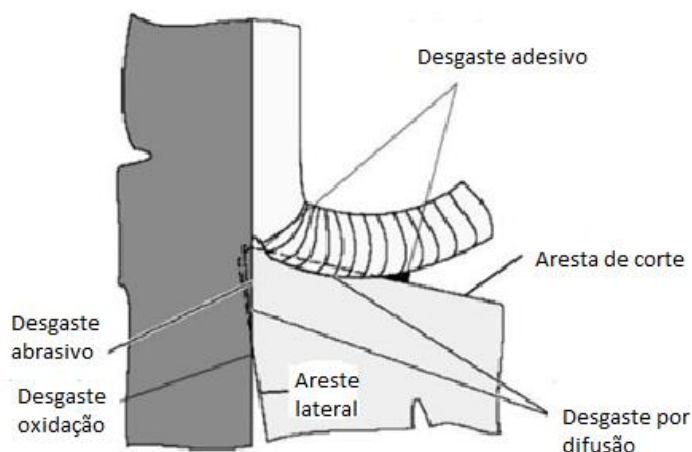


Figura 15 - Mecanismos de desgaste (adaptado de [51])

- Desgaste adesivo - Quando a pressão e a temperatura no contacto atingem valores elevados leva ao material a ser maquinado a soldar na ferramenta. Este desgaste só é possível em materiais que são quimicamente compatíveis.
- Desgaste Abrasivo – Processo de desgaste mais comum na maquinagem em que a remoção de material desgasta a ferramenta levando a que haja levantamentos de partículas.
- Difusão – Com o aumento da temperatura provocada pelo contacto da ferramenta e peça existe a troca de átomos entre os dois. Isto leva à perda de propriedades provenientes dos elementos presentes na ferramenta o que leva ao aparecimento de outros processos de desgaste.
- Oxidação - A formação de óxidos provenientes da remoção de matéria a altas temperaturas provoca a perda de propriedades da ferramenta. Este desgaste está muito dependente da estabilidade química e térmica de ambos os materiais
- Deformação plástica – Temperaturas elevadas deforma plasticamente a ferramenta devido as forças de corte.
- Fadiga – As tensões de corte que a ferramenta esta sujeita ao longo da maquinagem dá origem a microfissuras que desenvolvem até à superfície. Estas microfissuras enfraquecem a ligação do revestimento e o substrato levando à possibilidade de ocorrer delaminação.

### 3. MÉTODOS E APLICAÇÃO

#### 3.1. Materiais

##### 3.1.1. Substratos

As ferramentas de corte usadas nos ensaios de furação são fabricadas em carboneto de tungstênio (WC-Co), adquiridas na empresa INOVATOOLS, S.A. (Leiria, Portugal) (ref 50504000). As ferramentas foram revestidas por HIPMS, realizado no Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. A **Figura 16** juntamente com a **Tabela 5** apresentam a forma e principais dimensões da ferramenta utilizada nos ensaios.

Para estudar a composição química e a morfologia da secção transversal foi usado como substrato amostras de silício (Si). Substrato de FeCrAlY foram usados para avaliar as propriedades mecânicas dos revestimentos. Substratos de alumina foram usadas para avaliar a resistência à oxidação dos revestimentos.

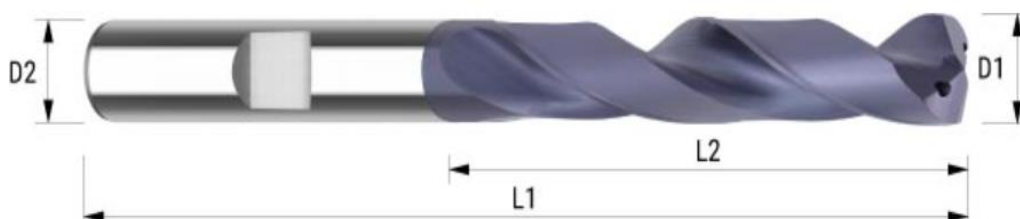


Figura 16 – Dimensões das ferramentas

Tabela 5 - Características das ferramentas

Características	Valor
Comprimento total [L1]	74 mm
Comprimento de corte [L2]	36mm
Diâmetro de corte [D1]	4mm
Diâmetro da ferramenta[D2]	6mm

### 3.1.2. Deposição dos revestimentos

Para a realização desta dissertação foram realizados 3 revestimentos com adições crescente de Ag: o primeiro TiSiN, o segundo e terceiro TiSiNAg sendo que um foi depositado com 6%at de Ag (TiSiNag6) e outro com 10%at de Ag (TiSiNag10). Os revestimentos foram depositados por HiPIMS (fonte de potência de altos impulsos da marca HiPIMS Cyprium™ III plasma generator, Zpulsar Inc.) em modo de trabalho utilizando uma onda de oscilação profunda (DOMS) numa câmara de deposição da empresa Hartec. Esta câmara é formada por 2 cátodos desfasados por um ângulo de 90° entre si. Num dos cátodos foi colocado um alvo de Cr para a deposição da intercâmara e no segundo cátodo foi colocado um alvo de Ti contendo 20 furos com 10mm de diâmetro. Dos 20 furos 7 foram preenchidos com cilindros de Si, e os restantes com cilindros de Ti e Ag, que permitiram depositar revestimentos com as diferentes combinações de elementos Ti-Si-(Ag). Antes da deposição todos os substratos foram limpos em ultrassons e em banhos de acetona e álcool durante 15 min. Os substratos foram depois colocados no suporte rotativo da câmara. Antes da deposição a câmara de deposição foi evacuada a uma pressão inferior  $1 \times 10^{-4}$  Pa. O alvo de Ti foi limpo com Ar durante 10 min aplicando um pulso com as seguintes características ao alvo (potência de pico média de 1200W, voltagem de 340V e a duração do pulso de 1500  $\mu$ s). Depois o alvo de crómio foi também sujeito a um passo de limpeza. Para evitar a deposição de material do alvo nos substratos foi colocado um shutter/chapa à frente do alvo. Em seguida para promover a boa adesão dos revestimentos foi depositadas uma camada de Cr usando uma fonte de corrente contínua aplicando 1200W ao alvo de Cr durante 5 min. Depois foi depositada uma camada de gradiente onde se diminui progressivamente potência aplicada ao alvo de Cr em incrementos de 200 W até chegar a 0 e onde se aumentou progressivamente o fluxo de azoto introduzido na câmara até à pressão de 0,7Pa durante 5 minutos. Ao início do passo de deposição da camada de gradiente foi ligada a fonte de HiPIMS. Os parâmetros definidos na fonte de HiPIMS foram 1200 W de potência média de pico, 340V de tensão de carga, tempo de impulso ligado de 6  $\mu$ s, período oscilação de 80  $\mu$ s e duração de impulso de 1500  $\mu$ s.



Figura 17 - Alvo de Ti com furos usado nas deposições e equipamento de deposição

Desempenho de Brocas com revestimentos do sistema TiSiNAg produzidos com diferentes concentrações de Ag na maquinagem da liga de titânio (TiAL6V4)

A **Tabela 6** apresenta os parâmetros utilizados para se obter os revestimentos. Deve-se destacar que o revestimento de TiSiNAg6 apresenta valores mais altos do pico de corrente ( $I_p$ ) e da potência de pico ( $P_p$ ) apesar de não apresentar a maior taxa de deposição dos revestimentos.

Tabela 6 - Parâmetros de deposição para cada um dos revestimentos produzidos.

Revestimento	Números de discos Ag	Espessura dos filmes	Taxa deposição [nm/min]	Parâmetros HiPIMS			
				Vp[V]	Ip[A]	Pp[kW]	Fi[Hz]
TiSiN	0	2,2	12,1	1145	44,1	50,5	252
TiSiNAg6	4 × ¼ (Ø 10 mm)	2,3	12,8	1130	51,6	58,3	259
TiSiNAg10	4 × ½ (Ø 10 mm)	2,3	12,9	1132	51,4	58,2	258

### 3.1.3. Material maquinado

O material de base utilizado na furação foi uma liga de titânio, TIAL6V4. O material adquirido em formato retangular com as dimensões 219mm de comprimento, 175mm de largura e 50.8mm de altura. O material foi adquirido à empresa *Testbourne* (Basingstoke, Reino Unido). Segundo as folhas de especificações do material as especificações são: 334 HWB de dureza, tensão de rotura de 950 MPa e um módulo de limite de elasticidade de 880 MPa. A composição química do material em percentagem atômica (%at) é apresentado na **Tabela 7**

Tabela 7 - Composição química da liga Ti-6Al-4V em %at

Al	V	Fe	Ti	C	O	N	H
6,27	4,31	0,022	Balanço	0,004	0,106	0,003	0,0012

## 3.2. Caracterização dos revestimentos

### 3.2.1. Composição química dos revestimentos e morfologia em secção transversal e superfície

A composição química dos revestimentos foi determinada com recurso à técnica EDS espectroscopia dispersiva de energia, utilizando como padrões de calibração amostras de TiN e TiSiN previamente medidos por microsonda eletrónica (EPMA). O microscópio eletrónico de varrimento (SEM) foi utilizado para examinar a secção transversal, a morfologia da superfície do revestimento e a espessura dos revestimentos.

Desempenho de Brocas com revestimentos do sistema TiSiNAg produzidos com diferentes concentrações de Ag na maquinagem de ligas de titânio (Ti6Al4V)

### **3.2.2. Estrutura dos revestimentos**

A estrutura dos revestimentos foi analisada por difração de raios X (XRD) usando uma ampola com radiação Cu K $\alpha$  (45 kV e 40 mA). Os espectros de difração foram obtidos em modo convencional.

### **3.2.3. Propriedades mecânica dos revestimentos**

As propriedades mecânicas dos revestimentos tais como dureza e módulo de elasticidade foram analisados num equipamento de nano-dureza. O indentador utilizado foi um indentador Berkovich com uma forma piramidal. A carga aplicada nas medições foi de 15 e 30 mN assegurando uma profundidade de indentação de 10% da espessura dos revestimentos evitando assim influencia na dureza do substrato.

### **3.2.4. Resistência à oxidação**

A resistência à oxidação foi avaliada através de um equipamento de termogravimetria(TGA) utilizando ar industrial. . Começou-se por realizar ensaios de oxidação dinâmicos onde as amostras foram aquecidas desde a temperatura ambiente até 1200° C a uma taxa de aquecimento constante de 20 °C/min. Depois ensaios de oxidação isotérmicos foram realizados a 800 °C durante 2h. As amostras foram posteriormente arrefecidas até à temperatura ambiente. A temperatura de 800 °C foi selecionada por ser uma temperatura esperada no contacto da ferramenta de corte e a peça a maquinar durante ensaios de maquinagem. O aumento de peso devido à oxidação foi continuamente registado durante os testes usando uma microbalança com uma precisão de 0,01 mg em intervalos regulares de 2 segundos.

### 3.3. Testes de furação

#### 3.3.1. Descrição dos ensaios

Os ensaios de furação foram realizados, num centro de maquinagem HAAS, modelo VF-2. As características deste centro de maquinagem são uma potência máxima de 20kW com uma rotação máxima de 10.000 RPM. A área de trabalho do centro é de 914mm por 356mm tendo ainda uma altura entre a árvore e mesa de 610mm.

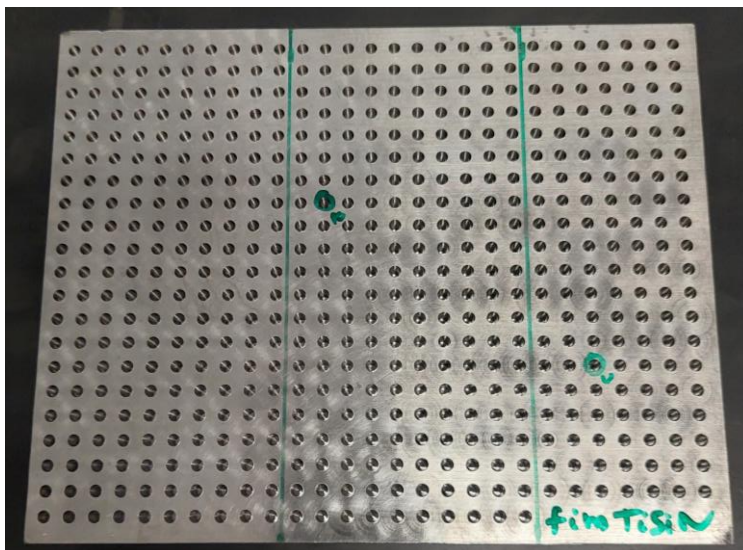


Figura 18 – Bloco de titânio maquinado

Para otimizar o aproveitamento da geometria retangular do bloco de titânio, os ensaios de maquinagem foram realizados seguindo um padrão retilíneo. Inicialmente percorreu-se as linhas e depois das colunas. Além disso, ambas as faces do bloco foram utilizadas, assegurando que todos os ensaios pudessem ser realizados. É possível observar na **Figura 18** o bloco já maquinado segundo os princípios atrás explicados.

Foram realizados 2 tipos de ensaios: ensaios de vida e ensaios para avaliar a evolução de desgaste nas ferramentas.

Em ambos os ensaios foram testados os 4 tipos de ferramentas: i) brocas não revestidas e ii) brocas revestidas com TiSiN e TiSiNAg com 6 e 10 % de Ag

Os parâmetros de maquinagem usados nos testes de vida apresentam-se **Tabela 8**. E os parâmetros usados para avaliar a evolução do desgaste na ferramenta de corte apresentam-se na **Tabela 9**.

Tabela 8 - Parâmetros do teste de vida

Parâmetros	Valores
Velocidade de corte [m/min]	60
Avanço [mm/rev]	0,05
Rotação [n]	4776,6
Rápidos	50%

Desempenho de Brocas com revestimentos do sistema TiSiNAg produzidos com diferentes concentrações de Ag na maquinagem de ligas de titânio (Ti6Al4V)

- Segundo teste com o objetivo de caracterizar o desgaste ocorrido nas ferramentas de 20 em 20 furos, para isso a cada paragem era analisado a ferramenta com o uso de um microscópio e caracterizado o desgaste.

Tabela 9 - Parâmetros do teste para avaliar a evolução do desgaste na ferramenta de corte

Parâmetros	Valores
Velocidade de corte [m/min]	40
Avanço [mm/rev]	0.05
Rotação [n]	3183,1
Rápidos	50%

### 3.3.2. Caracterização do desgaste

Como referido acima um dos testes tinha como objetivo a caracterização do desgaste, para isso foram estabelecidas paragens de 20 em 20 furos e analisado o desgaste recorrendo a um microscópio. Através do *software AxioVision* foi analisado o desgaste das brocas, seguindo a norma ISO 3685:1993 [52]. Com as imagens obtidas através do microscópio com vista de topo foram utilizadas para analisar o desgaste sofrido durante a maquinagem.

Na **Figura 19** é possível observar a imagem obtidas em microscópio ótico na qual se pode ver o a ferramenta antes da maquinagem. Para a análise das dimensões de desgaste foi usado como referência dimensional uma ferramenta virgem. Ao definir uma linha que representa o diâmetro da ferramenta e outra linha que coincide com a aresta de corte da ferramenta foi possível obter um ponto de interseção dessas linhas. A distância do centro da ferramenta ao ponto de interseção das duas linhas é caracterizada de “D” tal como é demonstrado na **Figura 19**.

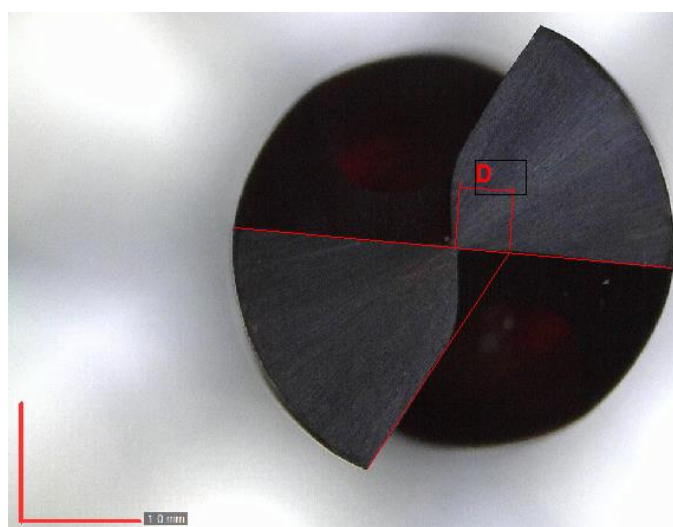


Figura 19 - Imagem padrão do microscópio para análise do desgaste

Desempenho de Brocas com revestimentos do sistema TiSiNAg produzidos com diferentes concentrações de Ag na maquinagem da liga de titânio (TIAL6V4)

À medida que as ferramentas sofrem desgaste durante a maquinagem, é natural que a distância "D" aumente. Esse aumento é calculado subtraindo-se a primeira medida obtida na ferramenta no seu estado original da distância medida na ferramenta após a paragem de 20 em 20 furos. Foi ainda realizada uma segunda análise de desgaste nas ferramentas, analisando o desgaste do centro da ferramenta. Através da **Figura 20** é possível verificar a distância ( $We$ ), também conhecido como largura de desgaste da ponta da broca.

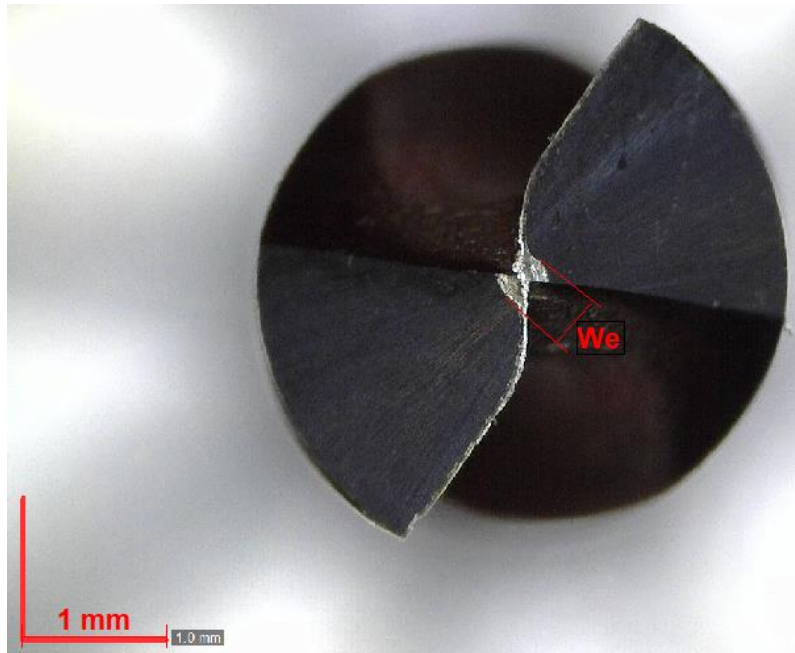


Figura 20 - Imagem padrão da segunda análise "We"

página propositadamente em branco

## 4. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

### 4.1. Composição química dos revestimentos e taxa de deposição

A **Tabela 10** apresenta a composição química dos revestimentos obtidos por EDS. É possível através das percentagens dos elementos metálicos verificar que os revestimentos são estequiométricos, isto é a soma das percentagens de titânio, silício e prata é aproximadamente igual ao de azoto, fazendo com que o rácio destes elementos seja próximo de 1.

Tabela 10 - Composição química dos revestimentos

Revestimento		Número de pastilhas de Ag	Ti	Si	Ag	N	(Ti+Si+Ag)/N
Percentagem atômica (%at)	TiSiN	0	39,6	8,9	0	51,5	1,1
	TiSiNAg6	4 × ¼ (∅ 10 mm)	36,1	9,4	5,7	48,7	0,9
	TiSiNAg10	4 × ½ (∅ 10 mm)	34,6	9,4	8,9	47,1	1,1

O aumento do número de pastilhas de Ag no Alvo de Ti permite aumentar com sucesso a concentração de Ag nos revestimentos. A introdução de prata nos revestimentos não afetou significativamente a concentração de Si nos revestimentos. De destacar também que a percentagem de N decresce com o aumento da Ag.

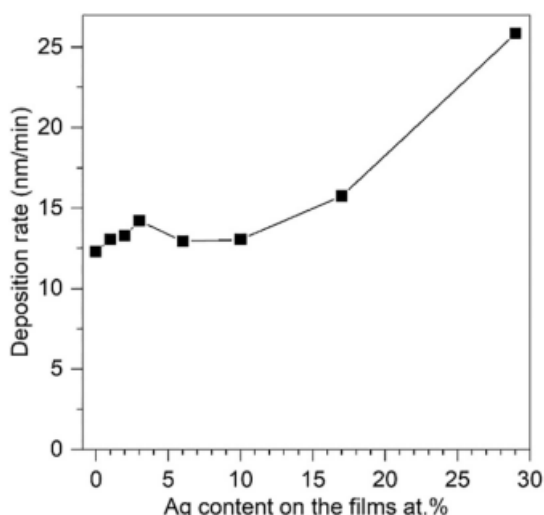


Figura 21 – Gráfico da taxa deposição de Ag (adaptado de [53])

Como é possível verificar através da **Figura 21** proveniente do estudo que Cavaleiro et al. 2019 [53] realizou sobre as características de ferramentas revestidas com Ag, a taxa de deposição de Ag vai aumentando até se atingir 3% de Ag, levando a um decréscimo da taxa de deposição até por volta

Desempenho de Brocas com revestimentos do sistema TiSiNAg produzidos com diferentes concentrações de Ag na maquinagem de ligas de titânio (Ti6Al4V)

dos 6% no qual vai aumentando. Concluiu que taxa de deposição dos revestimentos depende diretamente dos parâmetros de deposição utilizados no processo HiPIMS e principalmente pela fração ionizada do material pulverizado. Através da **Tabela 6** é possível verificar que há um aumento do pico de corrente ( $I_p$ ) que leva a uma diminuição da taxa deposição, uma das explicações pode ser pelo aumento da atração reversa de ies metálicos em direção ao alvo.

## 4.2. Morfologia da secção transversal

A morfologia da secção transversal e superfície do revestimento de referência TiSiN representada na **Figura 22** apresenta uma morfologia colunar densa, com “colunas” que se estendem desde o substrato até ao topo do revestimento. Superficialmente a morfologia deste revestimento apresenta pequenos grãos que se combinam em agregados maiores, e consequentemente formando maiores aglomerados.

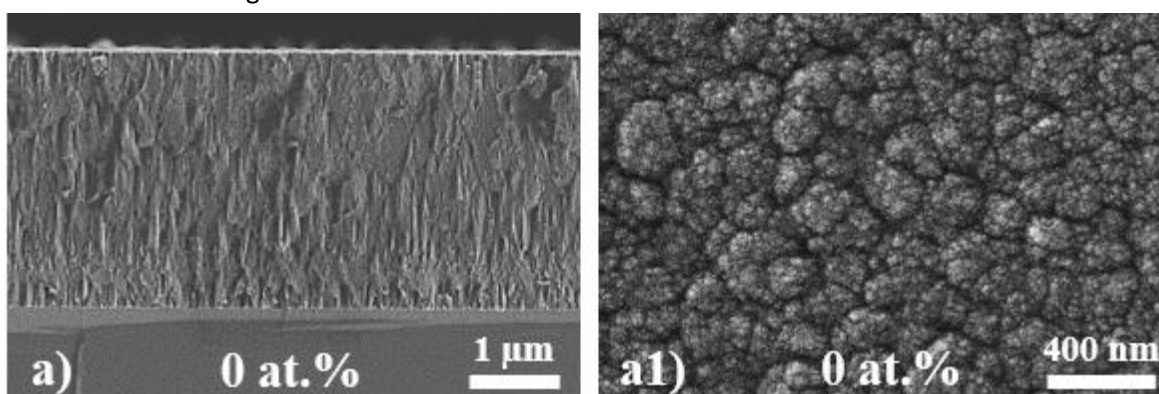


Figura 22 - Secção transversal e morfologia da superfície TiSiN

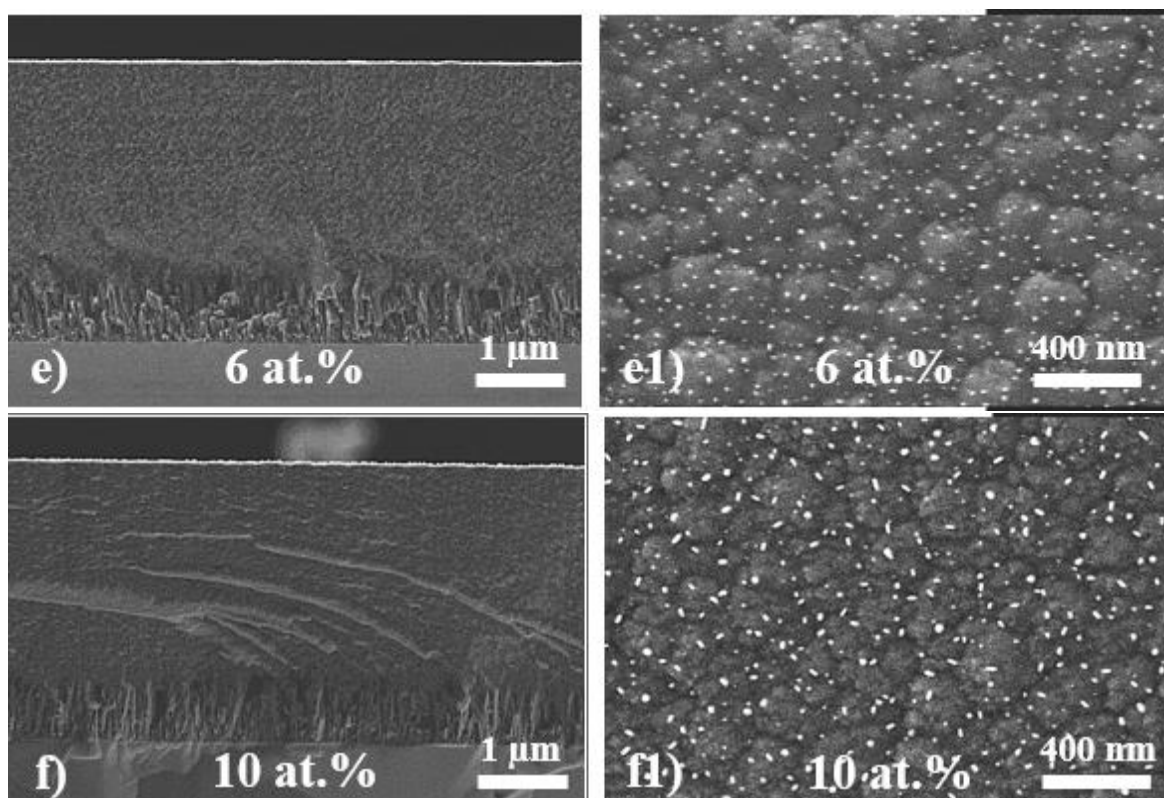


Figura 23 - Secção transversal e morfologia da superfície TiSiN<sub>Ag6</sub> e TiSiN<sub>Ag10</sub>

Desempenho de Brocas com revestimentos do sistema TiSiN<sub>Ag</sub> produzidos com diferentes concentrações de Ag na maquinagem da liga de titânio (TiAl6V4)

Com o aumento da percentagem de Ag de 6 para 10% a morfologia dos revestimentos ficam ainda mais compactas, não sendo possível observar qualquer coluna. Esta alteração na morfologia pode ser explicada pelo aumento do  $I_p$  que aumenta a fração de iões que atingem a superfície dos revestimentos promovendo a mobilidade superficial dos átomos, criando assim uma morfologia mais compacta.

É possível observar também, através da **Figura 23** que existe uma intercamada entre os substratos e do revestimento superficial, esta intercamada ajuda na adesão do revestimento. Existem também pontos brancos presentes na superfície do revestimento, cujas análises EDS revelaram corresponder a partículas de Ag. O tamanho destes pontos aumenta com o aumento do teor de Ag nos revestimentos.

#### 4.2.1. Estrutura

A estrutura dos revestimentos, avaliada por XRD em modo convencional é apresentado na **Figura 24**.

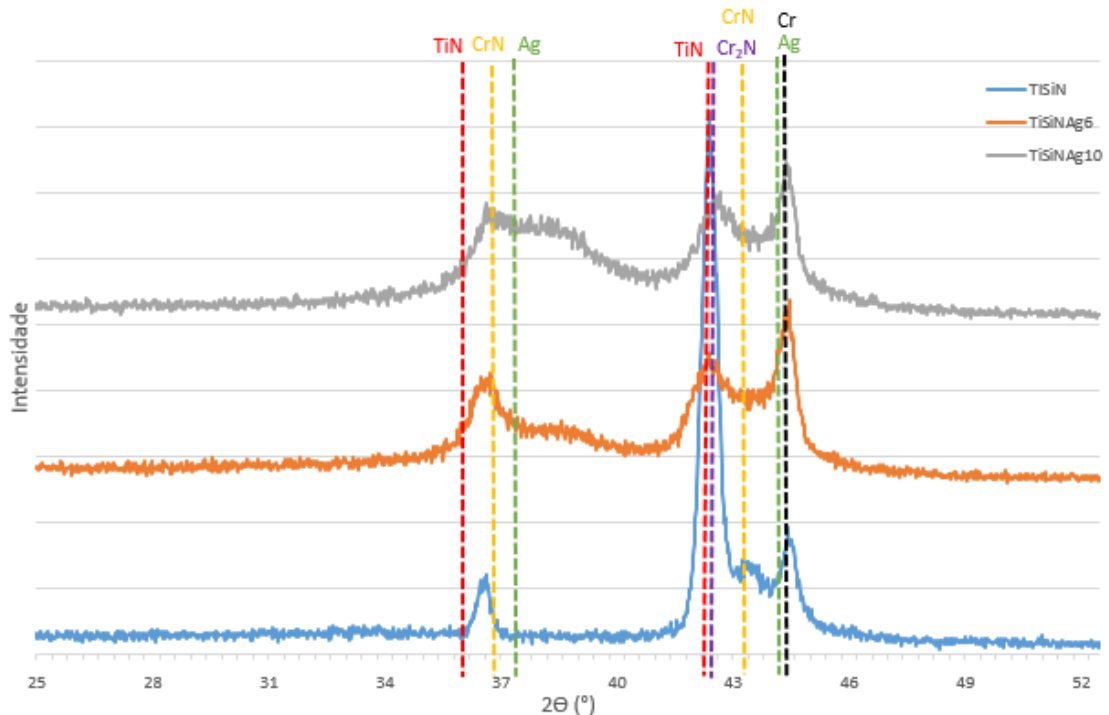


Figura 24 - Espetros de difração dos revestimentos

O revestimento de referência TiSiN exibe picos de difração atribuídos à fase TiN do tipo f.c.c. (cubica de face centrada). Não são detetados picos de difração associados a nenhuma fase de Si-N, revelando o seu carácter amorfo. De facto, os estudos de Fernandes et al. 2016 [54] e Oliveira et al. 2015 [45] revelam que esta fase é amorfa, sendo que o revestimento do sistema TiSiN apresenta uma estrutura nano-composita (grãos de TiN rodeados por uma matriz amorfa SiNx), embora pequenas quantidades de Si possam estar presentes em solução sólida na rede de TiN. Todos os picos de difração de TiN estão deslocados para ângulos superiores relação à ficha de referência. Isto pode estar associado ao efeito combinado da presença de Si em solução sólida e à presença de tensões residuais de tração (não avaliadas neste trabalho). O pico de difração localizado a  $\sim 43,4^\circ$ , posicionado entre as fases Cr<sub>2</sub>N e CrN, sugere a formação de um composto intermediário entre

Desempenho de Brocas com revestimentos do sistema TiSiNAg produzidos com diferentes concentrações de Ag na maquinagem de ligas de titânio (Ti6Al4V)

essas fases. Esta fase é explicada pela presença da intercamada de gradiente Cr-N usada para fazer a transição entre a intercamada de Cr e o filme final de TiSiN/Ag. O pico posicionado a 44,4° corresponde a um sinal de sobreposição proveniente da intercamada CrNx e do substrato FeCrAlY.

### 4.3. Propriedades mecânicas

A **Tabela 11** apresenta-se os resultados de dureza e módulo de elasticidade dos revestimentos obtidos para duas cargas distintas (15mN e 30mN).

Tabela 11 - Propriedades mecânicas dos revestimentos

	15mN		30mN	
	Dureza (GPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Dureza (GPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
<b>TiSiN</b>	29,7	279,7	31,4	289,5
<b>TiSiNAg6</b>	19,9	217,6	20,0	218,9
<b>TiSiNAg10</b>	12,9	184,8	14,2	189,9

O revestimento de referência o TiSiN tem para a carga de 30mN uma dureza de 31,4 GPa e um módulo de elasticidade de 289,5 GPa, estes valores são idênticos aos repostados na literatura para este tipo de revestimentos TiSiN [55].

A dureza dos revestimentos e o módulo de elasticidade apresentam um valor inferior com o aumento da percentagem de Ag, sendo esta diminuição idêntica quer para o ensaio com uma carga de 15mN, quer para com uma carga de 30mN. Esta diminuição era de esperar, visto que com o aumento da percentagem de Ag nos revestimentos que é um material bastante macio leva a uma diminuição da dureza do revestimento.

### 4.4. Resistência à oxidação

A **Figura 25** apresenta o ensaio de oxidação dinâmica, onde se representa a curva de ganho de massa devido à oxidação em função da temperatura. O início do ponto de oxidação dos revestimentos com a presença de Ag está localizada a aproximadamente a 900°C, o revestimento de referência TiSiN começa a oxidar a temperatura mais baixa a rondar os 850°C. Após se iniciar a oxidação o ganho de massa aumenta lentamente até aos 1000°C, temperatura para a qual a taxa de oxidação aumenta. Ambos os revestimentos contendo Ag apresentam uma evolução idêntica na oxidação. Atingindo a temperatura de 1100°C as curvas começam a estabilizar indicando que os revestimentos já oxidaram na sua totalidade.

De destacar que ambos os revestimentos de Ag apresentam uma característica invulgar, antes de se iniciar o ganho de massa há uma perda de massa até aos 940°C. Esta perda de massa deve-se ao facto que o tamanho das nanopartículas de Ag presentes nos revestimentos assim que se atinge a temperatura de oxidação começa a ocorrer a evaporação de Ag mesmo que seja atingida a

Desempenho de Brocas com revestimentos do sistema TiSiNAg produzidos com diferentes concentrações de Ag na maquinagem da liga de titânio (TIAL6V4)

temperatura de fusão. Com o aumento da temperatura podem ocorrer 2 desfechos da Ag, ou acontece toda a sua evaporação ou existe aglomeração de tamanhos maior o que dificulta a sua evaporação.

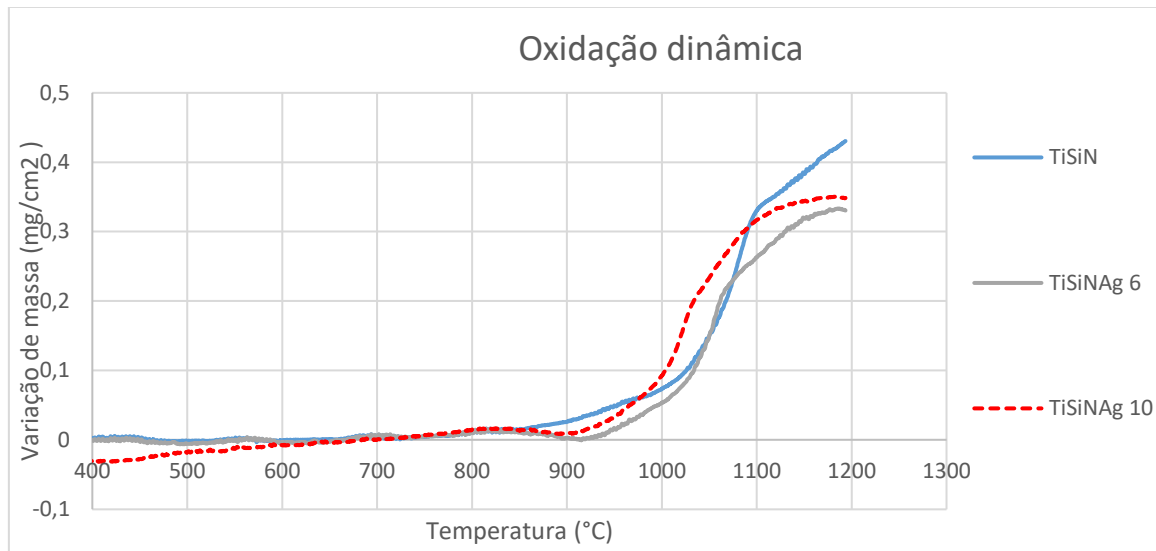


Figura 25 - Ensaio de oxidação dinâmica

Nas curvas de oxidação isotérmica, presente na **Figura 26** é possível verificar que inicialmente a presença de Ag nos revestimentos não afeta a oxidação visto que as curvas apresentam comportamentos idênticos. Por volta dos 2000 segundos as semelhanças acabam e o revestimento TiSiNAg10 acaba por ter um ganho de massa superior aos outros revestimentos evidenciando que existe uma degradação da sua resistência à oxidação. Segundo Cavaleiro et al. 2019 [56], que também estudou a oxidação de ferramentas revestidas contendo Ag conclui que com o aumento da percentagem de Ag nas ferramentas leva à destruição da camada protetora Si-O, o que consequentemente degrada a resistência à oxidação. No caso do revestimento de referência TiSiN a camada protetora de Si-O forma-se continuamente protegendo o revestimento de oxidação.

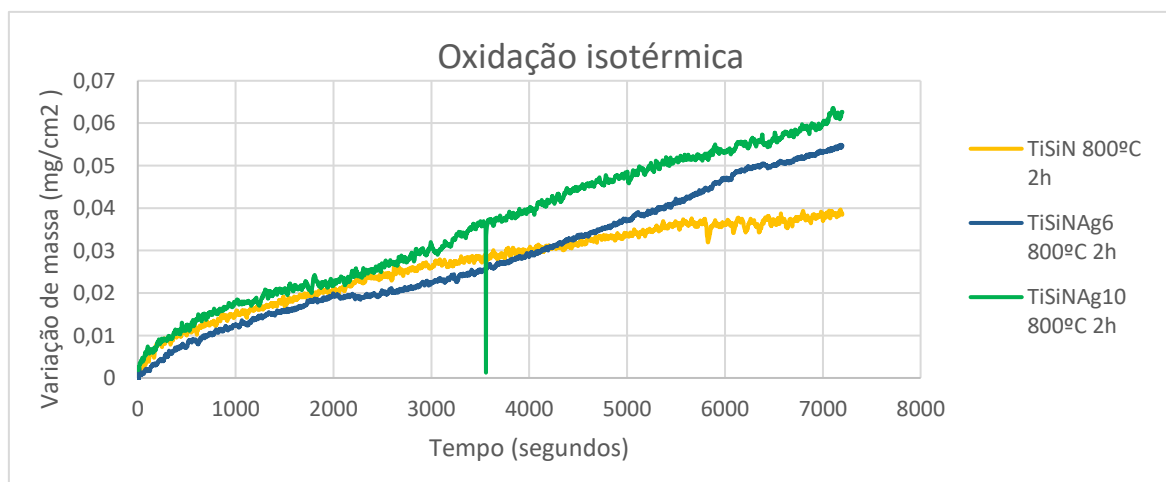


Figura 26 - Ensaio de oxidação isotérmica

Desempenho de Brocas com revestimentos do sistema TiSiNAg produzidos com diferentes concentrações de Ag na maquinagem de ligas de titânio (Ti6Al4V)

## 4.5. Ensaio de furação

### Primeiro teste – Quantidade de furos por ferramenta

A **Figura 27** ilustra a quantidade de furos que cada ferramenta realizou. Para assegurar a reprodutibilidade dos resultados todas as ferramentas foram testadas 2 vezes por cada revestimento.

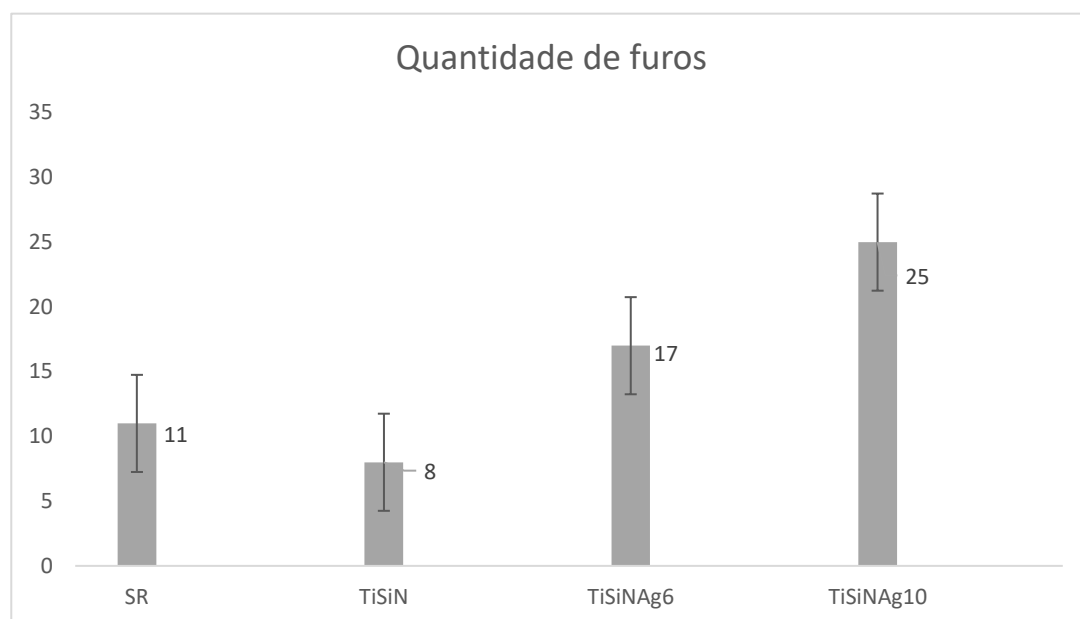


Figura 27 - Quantificação de furos por revestimento

Como é possível constatar através da **Figura 27** a ferramenta TiSiN foi a que alcançou o menor número de furos até à sua falha, tendo a ferramenta não revestida alcançado melhores resultados. As ferramentas revestidas com Ag apresentam melhores resultados, sendo a TiSiNAg10 a que conseguiu um número maior de furos antes da sua rotura. Em comparação a TiSiNAg10 teve um resultado três vezes superior à TiSiN e a TiSiNAg6 duas vezes superior.

## Segundo teste – Caracterização dimensional do desgaste

A **Figura 28** apresenta o segundo ensaio realizado, para avaliar o desgaste contínuo das diferentes ferramentas a cada 20 furos realizados.

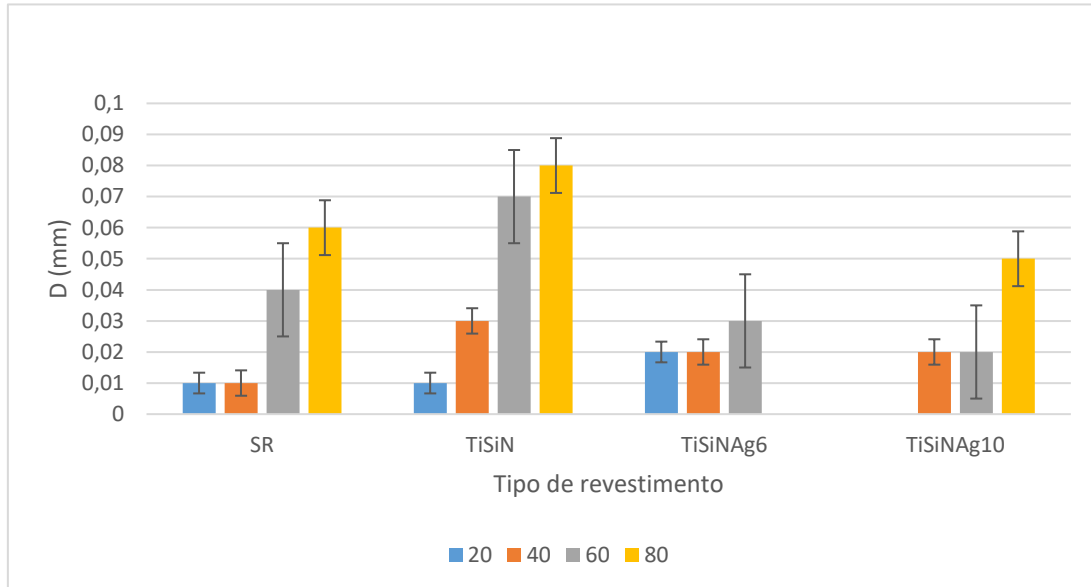


Figura 28 – Comprimento do desgaste “D”

Em ambos os testes é possível afirmar que o revestimento TiSiN apresenta os piores resultados, sendo a ferramenta que mais rápido atingiu a falha no teste 1 e de ter o maior desgaste no teste 2 em ambas as análises. Na análise do desgaste da aresta de corte a ferramenta TiSiNAg6 que teve o maior desgaste como é possível observar na **Figura 28**, no entanto até à furação 60 a ferramenta TiSiN tem o maior crescimento de desgaste da aresta de corte. Apesar de ter uma dureza e um módulo de elasticidade mais elevado, comparando com os revestimentos com Ag, os resultados em ambos os testes ficam abaixo dos outros revestimentos. Este resultado obtido poderá estar associado à morfologia deste revestimento, como anteriormente explicado este revestimento apresenta uma secção composta por “colunas” que poderão ajudar na propagação de fraturas levando ao seu desgaste mais rápido. Segundo o estudo de Zhu et al.[57] que também defende que uma das razões para o desgaste é a fragmentação do revestimento, o facto de esta fragmentação aumentar a área de contacto com o oxigénio levando também à sua deterioração e por fim que a expansão térmica neste revestimento leva à sua falha.

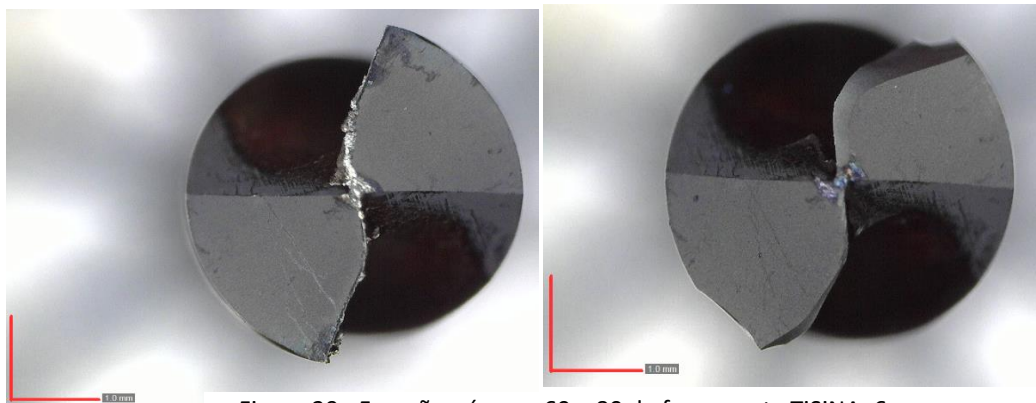


Figura 29 - Furação número 60 e 80 da ferramenta TiSiNAg6

Desempenho de Brocas com revestimentos do sistema TiSiNAg produzidos com diferentes concentrações de Ag na maquinagem de ligas de titânio (Ti6Al4V)

No segundo teste, a broca revestida com o revestimento TiSiAg6 para 80 furos, apresenta um desgaste excessivo ou até mesmo a rutura das arestas de corte da ferramenta, tal como demonstrado na **Figura 29**, este desgaste destaca-se dos outros revestimentos apesar do desgaste do centro da ferramenta não ser o maior entre as restantes ferramentas.

Na **Figura 30** é possível verificar que o revestimento TiSiN apresenta um aumento progressivo de desgaste no centro da ferramenta e que apesar de a ferramenta TiSiNAg10 ter um desgaste maior na paragem do furo 20 nas paragens seguintes a evolução do desgaste não é tão elevada.

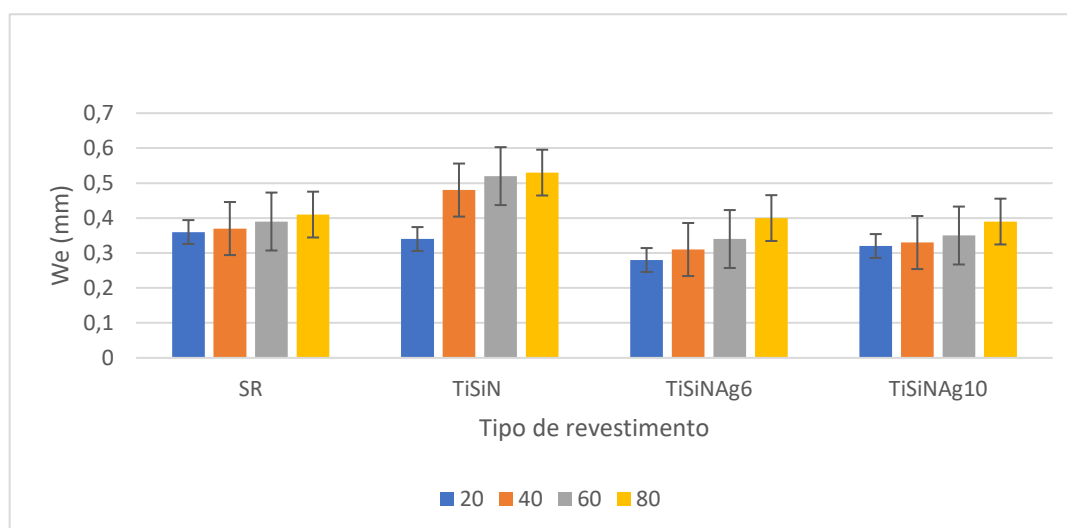


Figura 30 – Comprimento de desgaste “We”

Na **Figura 31** é possível identificar facilmente o desgaste abrasivo em ambas as ferramentas, tratando-se da ferramenta não revestida e da TiSiN ao fim de 80 furos. No centro da broca TiSiN (figura esquerda) é notável o desgaste abrasivo. Segundo Dargusch et al. 2018 [58], o desgaste sofrido durante a maquinagem altera o mecanismo de formação de avara, o que leva a influenciar o desgaste que atuam na ferramenta. Assim a formação da avara está fortemente ligada ao desgaste que a ferramenta sofre podendo no caso da ferramenta TiSiN ser uma das razões para o maior desgaste do centro da ferramenta e das arestas de corte.

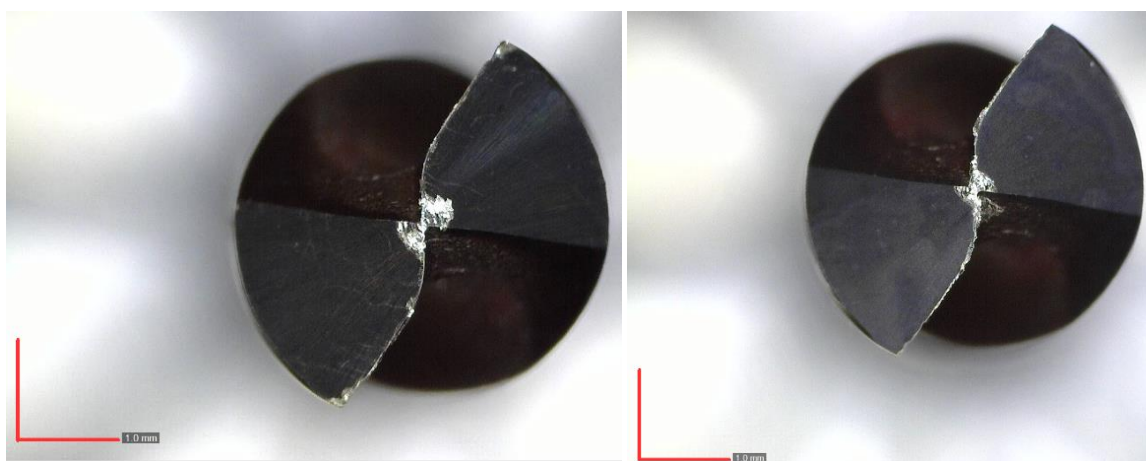


Figura 31 - Ferramentas TiSiN e não revestidas furo 80

Desempenho de Brocas com revestimentos do sistema TiSiNAg produzidos com diferentes concentrações de Ag na maquinagem da liga de titânio (TiAl6V4)

Na **Figura 32** é possível observar a ferramenta TiSiNAg10 após a furação de 80. Esta ferramenta em comparação com as restantes 3 ferramentas é a que apresenta o melhor resultado em ambos os testes. Esta é a ferramenta que possibilita um maior número de furos no teste de vida (**Figura 28**) e no teste de evolução do desgaste. Este resultado da ferramenta TiSiNAg10 sustenta que a aplicação de Ag nas ferramentas acrescenta um fator de lubrificação sólida no contacto. De facto devido à maior difusão de prata para a superfície do filme tal como sugerem os testes de oxidação na **Figura 26** leva a que a Ag no contacto funcione como um lubrificante sólido, diminuindo atrito e temperatura e assim permitindo aumentar o tempo de vida das ferramentas.

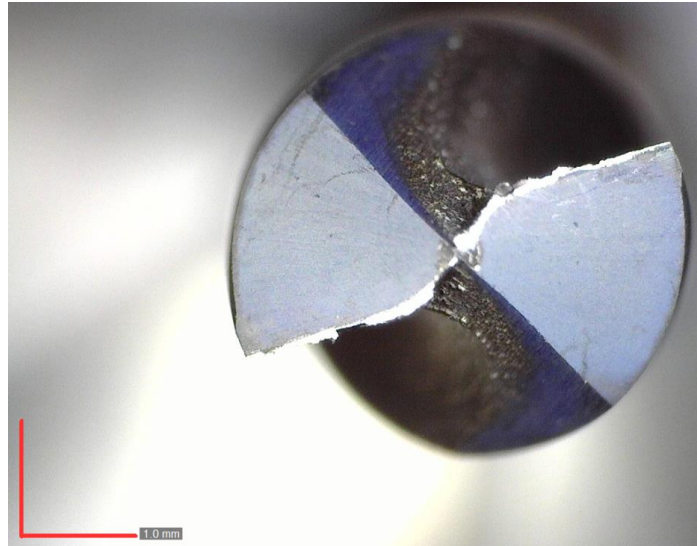


Figura 32 - Furo 80 da ferramenta TiSiNAg10

Segundo Cavaleiro et al. 2021 [59] que maquinou também a liga de Ti6Al4V com ferramentas de torneamento revestidas com Ag a presença de Ag nas ferramentas prolonga a vida útil das ferramentas. O autor, também destacou que apenas com velocidades de corte de 100m/min é que a presença de Ag passava a ser notável.



Figura 33 - Apara acumulada nas ferramentas

Desempenho de Brocas com revestimentos do sistema TiSiNAg produzidos com diferentes concentrações de Ag na maquinagem de ligas de titânio (Ti6Al4V)

---

Durante o processo de furação, observou-se a acumulação de apara nas ferramentas tal como se pode observar na **Figura 33**, esta acumulação de apara é um fator que reduz a durabilidade das ferramentas. As ligas de titânio apresentam uma fraca dissipação de calor, e durante o processo de maquinagem as temperaturas desenvolvidas no contacto entre a ferramenta e o material base aumentam. A formação de apara contínua promove um aumento de temperatura na ferramenta e o desenvolvimento de maiores forças de corte comprometendo a eficiência da ferramenta

Segundo o estudo de Zhou et al. 2017 [60] que teve como objetivo resolver o problema de aparas de geometria e tamanho diferente que causavam o aumento da força de corte e da acumulação da temperatura na ferramenta levando a um desgaste rápido da ferramenta e de má qualidade superficial do material a maquinar. Para isso recorreu a uma alteração geométrica para facilitar a remoção da apara.

página propositadamente em branco

---

## 5. CONCLUSÃO

### 5.1. Conclusões finais

Na presente dissertação, foi apresentado o estudo comparativo do desempenho de 4 brocas (brocas não revestidas e com 3 tipos de revestimentos), depositados com a técnica HiPIMS e com diferentes percentagens de Ag na maquinagem de uma liga de titânio Ti6Al4V. Os revestimentos foram caracterizados quanto à sua composição química, morfologia, estrutura, propriedades mecânicas e resistência à oxidação. Nos testes de maquinagem foram realizados 2 tipos diferentes de ensaios, um até à rutura das ferramentas e um segundo com paragens de 20 em 20 furos para avaliar o desgaste das ferramentas.

Os revestimentos apresentam uma composição química estequiométrica e uma estrutura cristalina do tipo cúbica de face centrada.

O revestimento TiSiN apresenta uma dureza e um módulo de elasticidade superior aos revestimentos contendo prata. Com o aumento da percentagem de prata as propriedades mecânicas em questão tendem a diminuir.

Os revestimentos com presença de Ag apresentam uma menor resistência à oxidação.

Nos testes de maquinagem foi possível concluir que a presença de Ag no contacto reduz o desgaste sofrido nas ferramentas, sendo a ferramenta TiSiNAg10 a que apresenta melhores resultados em ambos os ensaios. A presença de Ag nas ferramentas quando difunde para o contacto tem um efeito de lubrificante reduzindo o atrito entre as ferramentas e o material a maquinar. O mecanismo de desgaste predominante foi o desgaste abrasivo

### 5.2. Trabalhos futuros

No futuro, de forma a complementar o trabalho aqui apresentado pondera-se:

Aumentar a quantidade de furos a maquinar e fazer a e respetiva análise do desgaste das ferramentas tal como alterar os parâmetros de maquinagem para se entender melhor as propriedades que a adição de Ag apresenta.

Estudar a rugosidade superficial do material base a maquinar para verificar se a adição de Ag nos revestimentos não só prolonga a vida útil da ferramenta como confere um bom acabamento superficial

Analisar as aparas resultantes da maquinagem de forma a caracterizar melhor o mecanismo de desgaste e o comportamento da Ag no material a maquinar.

Estudar se a adição de maiores percentagens de Ag em brocas de furação aumenta a vida útil da ferramenta e reduz o seu desgaste.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] W. Liu *et al.*, “Jet electrochemical machining of TB6 titanium alloy,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 90, no. 5–8, pp. 2397–2409, May 2017, doi: 10.1007/s00170-016-9500-9.
- [2] F. Wang, Y. Liu, Y. Zhang, Z. Tang, R. Ji, and C. Zheng, “Compound machining of titanium alloy by super high speed EDM milling and arc machining,” *J Mater Process Technol*, vol. 214, no. 3, pp. 531–538, 2014, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2013.10.015.
- [3] J. L. Cantero, M. M. Tardío, J. A. Canteli, M. Marcos, and M. H. Miguélez, “Dry drilling of alloy Ti-6Al-4V,” *Int J Mach Tools Manuf*, vol. 45, no. 11, pp. 1246–1255, Sep. 2005, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2005.01.010.
- [4] C. R. Dandekar, Y. C. Shin, and J. Barnes, “Machinability improvement of titanium alloy (Ti-6Al-4V) via LAM and hybrid machining,” *Int J Mach Tools Manuf*, vol. 50, no. 2, pp. 174–182, Feb. 2010, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2009.10.013.
- [5] E. O. Ezugwu and Z. M. Wang, “Materials Processing Technology Titanium alloys and their machinability a review,” 1997.
- [6] G. Singh, P. S. Samra, and A. Kumar, “Tool electrode considerations in EDM of titanium alloys – A review,” *Mater Today Proc*, vol. 56, pp. 3117–3120, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.12.298.
- [7] M. P. Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing Materials, Processes, and Systems Seventh Edition*, 7th ed. Wiley, 2019.
- [8] L. N. lo Âpez De Lacalle, J. Pe Ârez, J. I. Llorente, and J. A. Sa Ânchez, “Advanced cutting conditions for the milling of aeronautical alloys.”
- [9] Z. Xu, X. Chen, Z. Zhou, P. Qin, and D. Zhu, “Electrochemical Machining of High-temperature Titanium Alloy Ti60,” in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2016, pp. 125–130. doi: 10.1016/j.procir.2016.02.206.
- [10] H. Li, C. Gao, G. Wang, N. Qu, and D. Zhu, “A study of electrochemical machining of Ti-6Al-4V in NaNO<sub>3</sub> solution,” *Sci Rep*, vol. 6, Oct. 2016, doi: 10.1038/srep35013.
- [11] M. Bhaumik and K. Maity, “Effect of Electrode Materials on Different EDM Aspects of Titanium Alloy,” *Silicon*, vol. 11, no. 1, pp. 187–196, Feb. 2019, doi: 10.1007/s12633-018-9844-x.
- [12] A. Perumal, C. Kailasanathan, B. Stalin, P. R. Rajkumar, T. Gangadharan, and G. Venkatesan, “Evaluation of EDM process parameters on titanium alloy through Taguchi approach,” in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2021, pp. 2394–2400. doi: 10.1016/j.matpr.2020.10.737.
- [13] R. Muhammad, M. S. Hussain, A. Maurotto, C. Siemers, A. Roy, and V. v. Silberschmidt, “Analysis of a free machining  $\alpha+\beta$  titanium alloy using conventional and ultrasonically assisted turning,” *J Mater Process Technol*, vol. 214, no. 4, pp. 906–915, 2014, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2013.12.002.
- [14] J. C. Williams and R. R. Boyer, “Opportunities and issues in the application of titanium alloys for aerospace components,” *Metals (Basel)*, vol. 10, no. 6, Jun. 2020, doi: 10.3390/met10060705.
- [15] L. M. Kang and C. Yang, “A Review on High-Strength Titanium Alloys: Microstructure, Strengthening, and Properties,” *Advanced Engineering Materials*, vol. 21, no. 8. Wiley-VCH Verlag, Aug. 01, 2019. doi: 10.1002/adem.201801359.
- [16] B. Wang and Z. Liu, “Influences of tool structure, tool material and tool wear on machined surface integrity during turning and milling of titanium and nickel alloys: a review,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 98, no. 5–8, pp. 1925–1975, Sep. 2018, doi: 10.1007/s00170-018-2314-1.

- [17] K. Gupta and R. F. Laubscher, "Sustainable machining of titanium alloys: A critical review," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 231, no. 14. SAGE Publications Ltd, pp. 2543–2560, Dec. 01, 2017. doi: 10.1177/0954405416634278.
- [18] C. Cui, B. M. Hu, L. Zhao, and S. Liu, "Titanium alloy production technology, market prospects and industry development," *Mater Des*, vol. 32, no. 3, pp. 1684–1691, Mar. 2011, doi: 10.1016/j.matdes.2010.09.011.
- [19] A. Pramanik, "Problems and solutions in machining of titanium alloys," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 70, no. 5–8, pp. 919–928, Feb. 2014, doi: 10.1007/s00170-013-5326-x.
- [20] M. Kikuchi, "The use of cutting temperature to evaluate the machinability of titanium alloys," *Acta Biomater*, vol. 5, no. 2, pp. 770–775, 2009, doi: 10.1016/j.actbio.2008.08.016.
- [21] K. Gupta and R. F. Laubscher, "Sustainable machining of titanium alloys: A critical review," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 231, no. 14. SAGE Publications Ltd, pp. 2543–2560, Dec. 01, 2017. doi: 10.1177/0954405416634278.
- [22] "DestinyTool." <http://www.destinytool.com/technical.html> (accessed Dec. 29, 2022).
- [23] J. I. Hughes, C. Sharman, and K. Ridgway, "The effect of tool edge preparation on tool life and workpiece surface integrity."
- [24] J. Ge *et al.*, "Investigating hole making performance of Al 2024-T3/Ti-6Al-4V alloy stacks: A comparative study of conventional drilling, peck drilling and helical milling," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 120, no. 7–8, pp. 5027–5040, Jun. 2022, doi: 10.1007/s00170-022-09062-x.
- [25] R. S. Revuru, N. R. Posinasetti, V. R. Vsn, and M. Amrita, "Application of cutting fluids in machining of titanium alloys—a review," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 91, no. 5–8, pp. 2477–2498, Jul. 2017, doi: 10.1007/s00170-016-9883-7.
- [26] Y. Yildiz and M. Nalbant, "A review of cryogenic cooling in machining processes," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 48, no. 9. pp. 947–964, Jul. 2008. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2008.01.008.
- [27] J. P. Byers, "Metalworking Fluids Second Edition," 2006.
- [28] M. Namb and D. Paulo, "Influence of Coolant in Machinability of Titanium Alloy (Ti-6Al-4V)," *J Surf Eng Mater Adv Technol*, vol. 01, no. 01, pp. 9–14, 2011, doi: 10.4236/jsemat.2011.11002.
- [29] F. Wang and Y. Wang, "Effect of cryogenic cooling on deformation of milled thin-walled titanium alloy parts," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Oct. 2022, doi: 10.1007/s00170-022-10137-y.
- [30] G. S. Goindi and P. Sarkar, "Dry machining: A step towards sustainable machining – Challenges and future directions," *J Clean Prod*, vol. 165, pp. 1557–1571, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.07.235.
- [31] K. Weinert, I. Inasaki, J. W. Sutherland, and T. Wakabayashi, "Dry Machining and Minimum Quantity Lubrication."
- [32] Y. Sun, B. Huang, D. A. Puleo, and I. S. Jawahir, "Enhanced machinability of Ti-5553 alloy from cryogenic machining: Comparison with MQL and flood-cooled machining and modeling," in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2015, pp. 477–482. doi: 10.1016/j.procir.2015.03.099.
- [33] S. Qin, Z. Li, G. Guo, Q. An, M. Chen, and W. Ming, "Analysis of minimum quantity lubrication (MQL) for different coating tools during turning of TC11 titanium alloy," *Materials*, vol. 9, no. 10, Sep. 2016, doi: 10.3390/ma9100804.
- [34] A. Baptista, F. J. G. Silva, J. Porteiro, J. L. Míguez, G. Pinto, and L. Fernandes, "On the Physical Vapour Deposition (PVD): Evolution of Magnetron Sputtering Processes for Industrial Applications," in *Procedia Manufacturing*, Elsevier B.V., 2018, pp. 746–757. doi: 10.1016/j.promfg.2018.10.125.

- [35] A. Inspektor and P. A. Salvador, "Architecture of PVD coatings for metalcutting applications: A review," *Surf Coat Technol*, vol. 257, pp. 138–153, Oct. 2014, doi: 10.1016/j.surfcoat.2014.08.068.
- [36] R. Haubner, "The history of hard CVD coatings for tool applications at the University of Technology Vienna," *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 41, pp. 22–34, Nov. 2013. doi: 10.1016/j.ijrmhm.2013.01.012.
- [37] V. F. C. Sousa and F. J. G. Silva, "Recent advances in turning processes using coated tools—A comprehensive review," *Metals*, vol. 10, no. 2. MDPI AG, Feb. 01, 2020. doi: 10.3390/met10020170.
- [38] W. Grzesik, P. Niestony, and W. Habrat, "Investigation of the tribological performance of alumin coated cutting tools in the machining of Ti6Al4V titanium alloy in terms of demanded tool life," *Eksplotacja i Niezawodnosc*, vol. 21, no. 1, pp. 153–158, 2019, doi: 10.17531/ein.2019.1.17.
- [39] C. V. Lemes, A. E. Diniz, and V. R. Saciotto, "Comparing the performance of several tool coatings in turning of commercially pure titanium grade 4," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Nov. 2022, doi: 10.1007/s00170-022-10318-9.
- [40] L. S. Shuster, G. S. Fox-Rabinovich, and S. v. Chertovskikh, "Influence of Cutting Conditions on the Wear Resistance of Tools with a TiB<sub>2</sub> Coating during Titanium Alloy Machining," *Journal of Friction and Wear*, vol. 42, no. 6, pp. 466–472, Dec. 2021, doi: 10.3103/S1068366621060118.
- [41] B. S. Kumar, V. Vijayan, and N. Baskar, "Comparison of coated and uncoated carbide drill bits for drilling titanium grade 2 material," *Mechanika*, vol. 22, no. 6, pp. 571–575, 2016, doi: 10.5755/j01.mech.22.6.13467.
- [42] A. Vereschaka, V. Gurin, M. Oganyan, G. Oganyan, J. Bublikov, and A. Shein, "Increase in tool life for end milling titanium alloys using tools with multilayer composite nanostructured modified coatings," in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2019, pp. 1412–1416. doi: 10.1016/j.procir.2019.04.173.
- [43] A. Baptista, F. Silva, J. Porteiro, J. Míguez, and G. Pinto, "Sputtering physical vapour deposition (PVD) coatings: A critical review on process improvement and market trend demands," *Coatings*, vol. 8, no. 11. MDPI AG, 2018. doi: 10.3390/COATINGS8110402.
- [44] V. Sittinger, O. Lenck, M. Vergöhl, B. Szyszka, and G. Bräuer, "Applications of HIPIMS metal oxides," *Thin Solid Films*, vol. 548, pp. 18–26, Dec. 2013, doi: 10.1016/j.tsf.2013.08.087.
- [45] J. C. Oliveira, F. Fernandes, F. Ferreira, and A. Cavaleiro, "Tailoring the nanostructure of Ti-Si-N thin films by HiPIMS in deep oscillation magnetron sputtering (DOMS) mode," *Surf Coat Technol*, vol. 264, pp. 140–149, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.surfcoat.2014.12.065.
- [46] E. Lewin, D. Loch, A. Montagne, A. P. Ehasarian, and J. Patscheider, "Comparison of Al-Si-N nanocomposite coatings deposited by HIPIMS and DC magnetron sputtering," *Surf Coat Technol*, vol. 232, pp. 680–689, Oct. 2013, doi: 10.1016/j.surfcoat.2013.06.076.
- [47] M. Samuelsson, D. Lundin, J. Jensen, M. A. Raadu, J. T. Gudmundsson, and U. Helmersson, "On the film density using high power impulse magnetron sputtering," *Surf Coat Technol*, vol. 205, no. 2, pp. 591–596, Oct. 2010, doi: 10.1016/j.surfcoat.2010.07.041.
- [48] A. Ghailane, M. Makha, H. Larhlimi, and J. Alami, "Design of hard coatings deposited by HiPIMS and dcMS," *Mater Lett*, vol. 280, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.matlet.2020.128540.
- [49] V. Fernando and C. Sousa, "Fresagem de uma liga de DSS (LDX2101): Estudo comparativo do desgaste de ferramentas com diferentes geometrias e revestimentos PVD."
- [50] S. Dolinšek and J. Kopač, "Mechanism and types of tool wear; particularities in advanced cutting materials Manufacturing and processing," 2006.
- [51] Z. Dadić, F. Elektrotehnike, Strojarstva I Brodogradnje, and S. U. Splitu, "Tribological principles and measures to reduce cutting tools wear Surface wear in high pressure die casting conditions of aluminium alloy AlSi9Cu3 View project Tribological principles and measures to reduce cutting tools wear," 2013, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/277202973>

- [52] "iso3685".
- [53] D. Cavaleiro, S. Carvalho, A. Cavaleiro, and F. Fernandes, "TiSiN(Ag) films deposited by HiPIMS working in DOMS mode: Effect of Ag content on structure, mechanical properties and thermal stability," *Appl Surf Sci*, vol. 478, pp. 426–434, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.apsusc.2019.01.174.
- [54] F. Fernandes, J. C. Oliveira, and A. Cavaleiro, "Self-lubricating TiSi(V)N thin films deposited by deep oscillation magnetron sputtering (DOMS)," *Surf Coat Technol*, vol. 308, pp. 256–263, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.surfcoat.2016.07.039.
- [55] S. Veprek, M. G. J. Veprek-Heijman, P. Karvankova, and J. Prochazka, "Different approaches to superhard coatings and nanocomposites," *Thin Solid Films*, vol. 476, no. 1. Elsevier, pp. 1–29, Apr. 01, 2005. doi: 10.1016/j.tsf.2004.10.053.
- [56] D. Cavaleiro, A. Cavaleiro, S. Carvalho, and F. Fernandes, "Oxidation behaviour of TiSiN(Ag) films deposited by high power impulse magnetron sputtering," *Thin Solid Films*, vol. 688, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.tsf.2019.137423.
- [57] Y. Zhu, M. Dong, J. Li, and L. Wang, "Wear failure mechanism of TiSiN coating at elevated temperatures," *Appl Surf Sci*, vol. 487, pp. 349–355, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.apsusc.2019.05.120.
- [58] M. S. Dargusch, S. Sun, J. W. Kim, T. Li, P. Trimby, and J. Cairney, "Effect of tool wear evolution on chip formation during dry machining of Ti-6Al-4V alloy," *Int J Mach Tools Manuf*, vol. 126, pp. 13–17, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2017.12.003.
- [59] D. Cavaleiro, D. Figueiredo, C. W. Moura, A. Cavaleiro, S. Carvalho, and F. Fernandes, "Machining performance of TiSiN(Ag) coated tools during dry turning of TiAl6V4 aerospace alloy," *Ceram Int*, vol. 47, no. 8, pp. 11799–11806, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.ceramint.2021.01.021.
- [60] L. Zhou, H. Dong, Y. Ke, and G. Chen, "Analysis of the chip-splitting performance of a dedicated cutting tool in dry orbital drilling process," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 90, no. 5–8, pp. 1809–1823, May 2017, doi: 10.1007/s00170-016-9496-1.

## ANEXO A – DATASHEET DO MATERIAL MAQUINADO – TIAL6V4



## Certificate of Analysis

Part #: T8-9035-D18 LOT No: LOT013625  
 Material: Titanium Aluminium Vanadium Our Ref No.:  
 Formula: Ti-6Al-4V Prod Date:  
 Size: 50.8mm x 175mm x 219mm Quantity: 1  
 Purity: Grade 5 Customer:  
 Density: 4.51g/cm<sup>3</sup> Customer PO:

Elements	Actual	Spec	Units	Elements	Actual	Spec	Units	Elements	Actual	Spec	Units
Li			wt%	Zn			wt%	Pb			wt%
B			wt%	Ga			wt%	Bi			wt%
F			wt%	Ge			wt%	Y			wt%
Na			wt%	As			wt%	Th			wt%
Mg			wt%	Se			wt%	Er			wt%
Al	6.27		wt%	Zr			wt%	Ru			wt%
Si			wt%	Nb			wt%	Rb			wt%
P			wt%	Mo			wt%	Cd			wt%
Cl			wt%	Pd			wt%	U			wt%
K			wt%	Ag			wt%	In			wt%
Ca			wt%	Sn			wt%	Ta			wt%
Ti			wt%	Sb			wt%				
V	4.31		wt%	Ba			wt%				
Cr			wt%	Hf			wt%				
Mn			wt%	Ta			wt%	C	0.004		wt%
Fe	0.022		wt%	W			wt%	S			wt%
Co			wt%	Pt			wt%	O	0.106		wt%
Ni			wt%	Au			wt%	N	0.003		wt%
Cu			wt%	Hg			wt%	H	0.0012		wt%

## Analytical Methods:

1. Metallic elements were analyzed using ICP-OES.
2. Gas elements were analyzed using LECO.

Steenovenweg 5  
 5708 HN Helmond  
 The Netherlands

02/09/2022

Date:

S Rushe

Completed By:

G. Stromdale

Approved:

MS= Quality, Environmental and Occupational Health and Safety Management System

NAGQF011