



# ESTUDO DOS MECANISMOS DE DESGASTE EM FERRAMENTAS REVESTIDAS E NÃO REVESTIDAS NA FRESAGEM DE AMPCOLOY® 83

JOÃO PEDRO FREITAS CASTANHEIRA  
outubro de 2021

**ESTUDO COMPARATIVO DOS MECANISMOS DE  
DESGASTE EM FERRAMENTAS REVESTIDAS E NÃO  
REVESTIDAS NA FRESAGEM DE UMA LIGA DE  
COBRE-BERÍLIO**

João Pedro Freitas Castanheira  
1191214

**2021**

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica



# **ESTUDO COMPARATIVO DOS MECANISMOS DE DESGASTE EM FERRAMENTAS REVESTIDAS E NÃO REVESTIDAS NA FRESAGEM DE UMA LIGA DE COBRE-BERÍLIO**

João Pedro Freitas Castanheira  
1191214

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor Francisco José Gomes da Silva, Professor Coordenador com Agregação do Departamento de Engenharia Mecânica, e coorientação do Mestre José Manuel da Silva Fecheira, Assistente Convidado do Departamento de Engenharia Mecânica.

**2021**

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica





# JÚRI

## **Presidente**

Doutor Arnaldo Manuel Guedes Pinto

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

## **Orientador**

Doutor Francisco José Gomes da Silva

Professor Coordenador com Agregação, Instituto Superior de Engenharia do Porto

## **Coorientador**

Mestre José Manuel da Silva Fecheira

Assistente Convidado, Instituto Superior de Engenharia do Porto

## **Arguente**

Professor Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva

Professor Catedrático, Universidade de Aveiro



## AGRADECIMENTOS

Desejo expressar os meus sinceros agradecimentos a todos os que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, nomeadamente ao Professor Doutor Francisco José Gomes da Silva, pela orientação e apoio prestado ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho. Todo o incentivo fornecido foi fundamental para a sua realização.

Ao coorientador, Eng<sup>o</sup> José Fecheira, pela disponibilidade na concretização dos ensaios de maquinagem.

Ao colega Vítor Sousa, por toda a ajuda e disponibilidade prestada na parte prática do trabalho.

Ao Dr. Rui Rocha, operador do microscópio eletrónico de varrimento (SEM/EDS) do CEMUP, pela colaboração na obtenção das imagens, assim como ajuda na interpretação de resultados.

Um obrigado à INOVATOOLS, S.A. (Leiria, Portugal) pelo fornecimento das ferramentas de corte, à TEandM – Tecnologia, Engenharia e Materiais, S. A. (Coimbra, Portugal) e ao Engenheiro Ricardo Alexandre pela realização dos revestimentos das ferramentas.

À minha família, amigos e, principalmente aos meus pais, por todo o apoio e incentivo manifestado até ao final deste trabalho.

A todos os que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, um muito obrigado.



## **PALAVRAS-CHAVE**

Maquinagem, Liga Cobre-Berílio (AMPCOLOY® 83), Ferramentas de corte, Revestimentos, Rugosidade superficial, Mecanismos de desgaste.

## **RESUMO**

O processo de fresagem é um processo de maquinagem de corte por arranque de aparta, muito utilizado nas indústrias metalomecânicas.

As constantes evoluções das máquinas CNC fazem com que o processo de fresagem se torne bastante versátil. Assim sendo, e com vista ao acompanhamento desta evolução, surge a necessidade de evoluir as ferramentas de corte. Desta forma, os revestimentos em ferramentas tem-se tornado o fator-chave na maquinagem de novas ligas metálicas, que constituem alguns produtos da engenharia. Os estudos dos revestimentos permitem que as ferramentas de corte sejam cada vez mais desenvolvidas e acompanhem essencialmente as exigências que o mercado dos materiais oferece relativamente à sua maquinabilidade.

Por outro lado, a constante evolução das ligas metálicas é um indicador que as empresas devem acompanhar com atenção, de forma a resolver os problemas que estes materiais podem desenvolver. Assim, a liga de cobre-berílio (AMPCOLOY® 83) é o material que estará no centro de toda esta investigação. Existem vários problemas no processamento desta liga, nomeadamente a deterioração da ferramenta de corte durante o processo de maquinagem, devido à adesão de material à superfície da ferramenta, causada pela natureza dúctil desta liga.

Foram realizados ensaios de maquinagem de topo com parâmetros fornecidos pelo fabricante das ferramentas, fazendo-se variar apenas a velocidade de avanço e o comprimento de corte. Nos resultados, foi realizada uma avaliação ao desgaste da ferramenta após a maquinagem da liga de Cu-Be (AMPCOLOY® 83), utilizando ferramentas revestidas e não revestidas. Os resultados oferecem uma comparação do desempenho da maquinagem e do comportamento de desgaste das ferramentas tóricas não revestidas de metal duro e, ferramentas com a mesma geometria, revestidas com uma multicamada de CrN/DLC.

Em cada ensaio, foi analisada a rugosidade superficial da superfície maquinada, o desgaste do flanco da ferramenta e os mecanismos de desgaste que essas ferramentas sofreram.

As ferramentas revestidas apresentaram um melhor desempenho para comprimentos de corte mais curtos, produzindo uma rugosidade menor na superfície da peça maquinada. O desgaste para esta ferramenta foi menos intenso do que o da ferramenta não revestida, que sofreram danos adesivos. Contudo, observou-se que para comprimentos de corte mais elevados, as ferramentas não revestidas obtiveram um melhor desempenho em termos de rugosidade da superfície maquinada, assim como ao nível do desgaste da ferramenta.

**KEYWORDS**

*Machining, Cu-Be alloy (AMPCOLOY® 83), Cutting tools, Coating, Surface roughness, Wear mechanisms.*

**ABSTRACT**

*The milling process is a cheap cutting machining process widely used in metalworking industries.*

*The constant evolutions of CNC machines make the milling process very versatile. Therefore, and in order to follow this evolution, the need to evolve the cutting tools arises. In this way, coatings on tools become the key factor in the machining of new metal alloys usually used on engineering products. The studies on coatings allow cutting tools to be increasingly developed and to follow the demands that the materials market offers, in relation to their machinability.*

*On the other hand, the constant evolution of metallic alloys is an indicator that companies must follow carefully, in order to solve the problems that these materials can develop. Thus, the copper-beryllium alloy (AMPCOLOY® 83) is the material that will be at the center of all this research. There are several problems in the processing of this alloy, namely the deterioration of the cutting tool during the machining process, due to the adhesion of material to the tool surface caused by the ductile nature of this alloy.*

*Top machining tests were performed with parameters provided by the tool manufacturer, varying only the feed rate and length of cut. In the results, an evaluation was observed on the tool wear after machining the Cu-Be alloy (AMPCOLOY® 83) using coated and uncoated tools. The results provide a comparison of the machining performance and wear behaviour of uncoated toroidal carbide tools and tools with the same geometry, coated with a CrN/DLC multilayer.*

*In each test, surface roughness of the machined surface, tool flank wear and the wear mechanisms affecting the tools were analysed.*

*The coated tools performed better for lower cutting lengths, producing a lower surface roughness on the machined part. The wear for this tool was less intense than that of the uncoated tool, which suffered adhesive and abrasive damage. However, it was observed that for higher cutting lengths, the uncoated tool performed better in terms of surface roughness, as well as wear sustained.*



## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

### Lista de Abreviaturas

AlTiN	Nitreto de Alumínio e Titânio
AlCrN	Nitreto de Alumínio e Crómio
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de Alumínio (Alumina)
BSE	<i>Backscattered Electron Detector</i> (Detetor de eletrões retrodifundidos)
CBN	Nitreto Cúbico de Boro Policristalino
Co	Cobalto
CVD	<i>Chemical Vapor Deposition</i>
CNC	<i>Computer Numeric Control</i>
Cr	Crómio
CrN	Nitreto de Crómio
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
DLC	<i>Diamond Like Carbon</i>
HM	<i>Hard Metal</i>
HSS	<i>High Speed Steel</i>
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
MEV	Microscópio Eletrónico de Varrimento
PCVN	Nitreto Cúbico de Boro Policristalino
PCD	<i>Polycrystalline Diamond</i>
PVD	<i>Physical Vapor Deposition</i>
SED	<i>Secondary Electron Detector</i>
SEM	<i>Scanning Electron Microscopy</i>
Si	Silício
TiC	Carboneto de Titânio
TiCN	Nitreto de Titânio e Carbono
TiN	Nitreto de Titânio
TiAlN	Nitreto de Titânio e Alumínio
TiBN	Nitreto de Titânio e Boro
W	Tungsténio
WC	Carboneto de Tungsténio
3D	Tridimensional

### Lista de Unidades

kW	QuiloWatt
m/min	Metros por minuto
min	Minuto
mm	Milímetros
mm/min	Milímetros por minuto
mm/rot	Milímetros por rotação
mm <sup>3</sup> /min	Milímetros cúbicos por minuto
N/mm <sup>2</sup>	Newton por milímetro quadrado
Nm	Newton metro
rpm	Rotações por minuto
W	Watt
μm	Micrometro

### Lista de Símbolos

$a_e$	Profundidade de corte radial
$a_p$	Profundidade de corte máxima
$D_e$	Diâmetro da ferramenta
DCX	Diâmetro de corte máximo
$f_n$	Avanço por rotação
$f_z$	Avanço por dente
$K_c$	Força de corte específica
L	Distância percorrida
$M_c$	Binário de corte
n	Velocidade de rotação da árvore
$P_c$	Potência de corte
$P_g$	Potência bruta
Q	Taxa de remoção de material
r	Raio da ferramenta
$R_a$	Rugosidade média aritmética
$R_z$	Profundidade média da rugosidade
$R_{zi}$	Profundidade individual da rugosidade
$R_{zmáx}$	Profundidade máxima da rugosidade
$T_c$	Tempo de maquinagem
$VB_B$	Desgaste do flanco
$V_c$	Velocidade de corte
$V_f$	Velocidade de avanço
$Z_c$	Número de dentes/lâminas
$\gamma_p$	Ângulo de hélice da ferramenta
%wt	Porcentagem em peso

## GLOSSÁRIO DE TERMOS

<b>Termo</b>	<b>Designação</b>
AMPCOLOY® 83	Trata-se do nome comercial atribuído à liga de Cu-Be, globalmente conhecida por liga C17200.
Zona moldante	Toda a zona pertencente ao molde de injeção, que se encontra em contacto com a peça a produzir.



## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 – VARIÁVEIS PRINCIPAIS E SECUNDÁRIAS DE APOIO À MAQUINAGEM [4].	10
FIGURA 2 – FRESADORA DE CINCO EIXOS HAAS UMC-100SS (ADAPTADO DE [8])	11
FIGURA 3 – FRESAGEM PERIFÉRICA: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO LEGENDADO (ADAPTADO DE [5])	12
FIGURA 4 – FRESAGEM DE TOPO: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO LEGENDADO (ADAPTADO DE [5])	12
FIGURA 5 – INÍCIO DA FORMAÇÃO DA APARA (ADAPTADO DE [13])	14
FIGURA 6 – FISSURAS NA REGIÃO DE CORTE (ADAPTADO DE [13])	14
FIGURA 7 – A) FRESA DE TOPO MONOBLOCO; B) FRESA DE INSERTOS (ADAPTADO DE [6])	16
FIGURA 8 – REPRESENTAÇÃO DO AVANÇO POR DENTE (ADAPTADO DE [6])	16
FIGURA 9 – REPRESENTAÇÃO DOS FATORES QUE DEPENDEM DO CÁLCULO DA TAXA DE REMOÇÃO DE MATERIAL (ADAPTADO DE [6])	17
FIGURA 10 – REPRESENTAÇÃO DA POTÊNCIA LÍQUIDA DE CORTE E BINÁRIO DE CORTE (ADAPTADO DE [6])	18
FIGURA 11 – FRESA PROVIDAS DE INSERTOS (ADAPTADO DE [21])	19
FIGURA 12 – FRESAS MONOBLOCO (ADAPTADO DE [26])	19
FIGURA 13 – PONTA DAS FRESAS MONOBLOCO PARA OPERAÇÕES DE FRESAGEM (ADAPTADO DE [27])	20
FIGURA 14 – LEGENDA GEOMÉTRICA – A) FRESA MONOBLOCO B) DETALHE FERRAMENTA (ADAPTADO DE [28])	20
FIGURA 15 – SUPORTE DE FIXAÇÃO (ADAPTADO DE [32])	21
FIGURA 16 – FIXAÇÃO POR BARRA/GRAMPO (ADAPTADO DE [35])	23
FIGURA 17 – FIXAÇÃO DE PEÇA EM BASE MAGNÉTICA (ADAPTADO DE [36])	23
FIGURA 18 – TIPOS DE PRENSAS: A) MANUAL DE PRECISÃO (ADAPTADO DE [39]); B) PNEUMÁTICA (ADAPTADO DE [38])	24
FIGURA 19 – SISTEMA DE FIXAÇÃO MODULAR (ADAPTADO DE [42])	24
FIGURA 20 – APLICAÇÃO DE REVESTIMENTO NO MATERIAL DE BASE/SUBSTRATO (ADAPTADO DE [44])	25
FIGURA 21 – PAPEL DOS REVESTIMENTOS NO DESEMPENHO DO PROCESSO (ADAPTADO DE [46])	25
FIGURA 22 – TIPO DE ARQUITETURA DOS REVESTIMENTOS EM SUBSTRATOS (ADAPTADO DE [59])	28
FIGURA 23 - TIPOS DE REVESTIMENTOS	29
FIGURA 24 – DIAGRAMA DE FASES TERNÁRIO E DIFERENTES CONTEÚDOS DE HIDROGÉNIO DAS VÁRIAS FORMAS DE DLC (ADAPTADO DE [63])	30
FIGURA 25 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA LIGAÇÃO DO ÁTOMO DE C NOS REVESTIMENTOS DLC (ADAPTADO DE [65])	30
FIGURA 26 – FRESA COM REVESTIMENTO DLC (ADAPTADO DE [69])	31
FIGURA 27 – CURVA DE: A) DESGASTE PARA AS VELOCIDADES DE CORTE 1, 2 E 3; B) VIDA (ADAPTADO DE [79])	37
FIGURA 28 - FATORES QUE AFETAM A VIDA DA FERRAMENTA (ADAPTADO DE [77])	38
FIGURA 29 - MICROSCÓPIO ELETRÓNICO DE VARRIMENTO (MEV)	39
FIGURA 30 – CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DE UMA AMOSTRA POR EDS [82]	40
FIGURA 31 – IMAGEM EXTRAÍDA DO MEV: A) DORMER DE DUAS LÂMINAS; B) ARESTA DE CORTE COM DESGASTE (ADAPTADO DE [82])	40

FIGURA 32 – RUGOSIMETRIA: A) RUGOSÍMETRO MAHR; B) PARÂMETROS DE MEDIDA AVALIADOS NUM PERFIL DE RUGOSIDADE.....	42
FIGURA 33 – REPRESENTAÇÃO DA RUGOSIDADE MÉDIA ARITMÉTICA ( $R_a$ ).....	42
FIGURA 34 – REPRESENTAÇÃO DA PROFUNDIDADE MÉDIA DA RUGOSIDADE ( $R_z$ ).....	43
FIGURA 35 – FORMAS COMERCIAIS DA LIGA DE CU-BE NO MERCADO (ADAPTADO DE [90]).....	48
FIGURA 36 – DIAGRAMA DE FASE DA LIGA DE CU-BE (ADAPTADO DE [92]).....	49
FIGURA 37 – UTILIZAÇÃO DO AMPCOLOY® 83: A) INSERTO DE EXTRAÇÃO (ADAPTADO DE [93]); B) MOLDE DE INJEÇÃO (ADAPTADO DE [94]).....	50
FIGURA 38 – BLOCO DE MATERIAL (AMPCOLOY® 83).....	53
FIGURA 39 – FERRAMENTA DE CORTE: A) DIAGRAMA ESQUEMÁTICO LEGENDADO; B) LÂMINAS DE CORTE (VISTA DE TOPO).....	56
FIGURA 40 – FRESA NÃO REVESTIDA.....	56
FIGURA 41 – FRESA REVESTIDA.....	57
FIGURA 42 – SISTEMA DE APERTO FERRAMENTA DIN 6499: A) CONE PORTA PINÇAS ER-32; B) FERRAMENTA DE CORTE FIXADA.....	57
FIGURA 43 – CEMECON CC800 / 9ML PVD <i>UNBALANCED MAGNETRON SPUTTERING</i> .....	59
FIGURA 44 – CENTRO DE MAQUINAGEM – HAAS VF-2.....	60
FIGURA 45 – PRENSA DE PRECISÃO MANUAL CHICK ONELOCK.....	62
FIGURA 46 – APALPADOR POR CONTACTO RENISHAW OMP40.....	63
FIGURA 47 – MODO DE ATUAÇÃO DO PROGRAMA “RECTANGLE BLOCK”.....	63
FIGURA 48 – PROGRAMA “SINGLE SURFACE”.....	63
FIGURA 49 – SISTEMA DE MEDIÇÃO DE FERRAMENTA OTS DA RENISHAW.....	64
FIGURA 50 – SIMULAÇÃO NO <i>SOFTWARE FUSION 360</i> DA ESTRATÉGIA DE MAQUINAGEM UTILIZADA NOS ENSAIOS.....	66
FIGURA 51 – LIMPEZA DE FERRAMENTA DE CORTE EM BANHO DE ULTRASSONS.....	68
FIGURA 52 – DINAMÓMETRO KISTLER 9171A.....	68
FIGURA 53 – PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS: A) SERRA DE DISCO STRUERS MINITOM; B) PRENSA STRUERS PEDOPRESS.....	69
FIGURA 54 – AMOSTRA EMBEBIDA EM RESINA TERMOENDURECÍVEL, PRONTA PARA SER ANALISADA..	70
FIGURA 55 – MICROSCÓPIO ELETRÓNICO DE VARRIMENTO: FEI QUANTA 400 FEG.....	70
FIGURA 56 – LEGENDA DA AQUISIÇÃO DAS IMAGENS MEV.....	72
FIGURA 57 – REFERÊNCIA UTILIZADA NA ANÁLISE DAS FERRAMENTAS: A) NUMERAÇÃO DAS LÂMINAS; B) REFERÊNCIA UTILIZADA PARA A RF DA LÂMINA DE CORTE 1.....	73
FIGURA 58 – RUGOSÍMETRO MAHR PERTHOMETER M1.....	73
FIGURA 59 – TESTE DE MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE DA PEÇA MAQUINADA.....	74
FIGURA 60 – CARACTERIZAÇÃO DO REVESTIMENTO: A) IDENTIFICAÇÃO DAS DIFERENTES CAMADAS (Z1 – CRN, Z2 – DLC, Z3 – CRN, Z4 – DLC); B) MEDIÇÃO DA ESPESSURA DO REVESTIMENTO.....	75
FIGURA 61 – ESPETROS EDS PARA AS DIFERENTES ZONAS DA FIGURA 60: A) Z1; B) Z2; C) Z3; D) Z4.....	76
FIGURA 62 – GRÁFICO DE SUPERFÍCIE DA RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE MAQUINADA PRODUZIDA PELAS FERRAMENTAS NÃO REVESTIDAS PARA CADA UMA DAS CONDIÇÕES TESTADAS.....	78
FIGURA 63 – GRÁFICO DE SUPERFÍCIE DA RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE MAQUINADA PRODUZIDA PELAS FERRAMENTAS REVESTIDAS PARA CADA UMA DAS CONDIÇÕES TESTADAS.....	78

FIGURA 64 – COMPARAÇÃO DOS VALORES DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL DAS FERRAMENTAS NÃO REVESTIDAS E REVESTIDAS PARA CADA UMA DAS CONDIÇÕES DE ENSAIO .....	79
FIGURA 65 – COMPARAÇÃO DOS VALORES DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL DAS FERRAMENTAS NÃO REVESTIDAS E REVESTIDAS PARA ENSAIOS REALIZADOS A VELOCIDADE DE AVANÇO DE 350 MM/MIN .....	80
FIGURA 66 – COMPARAÇÃO DOS VALORES DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL DAS FERRAMENTAS NÃO REVESTIDAS PARA ENSAIOS REALIZADOS A VELOCIDADE DE AVANÇO DE 350 MM/MIN E 750 MM/MIN .....	81
FIGURA 67 – IMAGENS SEM COM AMPLIAÇÃO DE 220X DA RAKE FACE DAS FERRAMENTAS TESTADAS NAS CONDIÇÕES DE: A) T0L18F750; B) T1L18F750; C) T0L18F1500; D) T1L18F1500 .....	82
FIGURA 68 – IMAGENS SEM COM AMPLIAÇÃO DE 220X DA <i>CLEARANCE FACE</i> DAS FERRAMENTAS TESTADAS NAS CONDIÇÕES DE: A) T0L36F750; B) T1L36F750; C) T0L36F1500; D) T1L36F1500 .....	82
FIGURA 69 – IMAGENS SEM COM AMPLIAÇÃO DE 220X DA <i>RAKE FACE</i> DAS FERRAMENTAS TESTADAS NAS CONDIÇÕES DE: A) T0L48F750; B) T1L48F750; C) T0L48F1500; D) T1L48F1500 .....	83
FIGURA 70 – MEDIÇÃO DO DESGASTE DO FLANCO VB SEGUNDO NORMA ISO 8688-2:1989 .....	84
FIGURA 71 – GRÁFICO DE SUPERFÍCIE DO VALOR MÉDIO DO DESGASTE DO FLANCO (VB) DAS FERRAMENTAS NÃO REVESTIDAS PARA CADA CONDIÇÃO DE ENSAIO .....	84
FIGURA 72 – GRÁFICO DE SUPERFÍCIE DO VALOR MÉDIO DO DESGASTE DO FLANCO (VB) DAS FERRAMENTAS REVESTIDAS PARA CADA CONDIÇÃO DE ENSAIO .....	85
FIGURA 73 – COMPARAÇÃO DO DESGASTE DO FLANCO (VB) DAS FERRAMENTAS NÃO REVESTIDAS E REVESTIDAS, PARA CADA CONDIÇÃO DE ENSAIO .....	86
FIGURA 74 – A) MECANISMOS DE DESGASTE PRESENTES NUMA <i>CLEARANCE FACE</i> DE FERRAMENTA NÃO REVESTIDA, TESTADA A 36 METROS DE COMPRIMENTO DE CORTE E 750 MM/MIN DE VELOCIDADE DE AVANÇO; B) ESPETROS EDS DE Z1; C) ESPETROS EDS DE Z2 .....	87
FIGURA 75 – IMAGENS SEM (1500X): FACE DE TOPO T1L18F100 COM A IDENTIFICAÇÃO DE QUATRO ZONAS DESTACADAS A VERMELHO PARA ANÁLISE EDS (Z1 – ZONA DO SUBSTRATO; Z2 – ZONA DO REVESTIMENTO DE CRN; Z3 – ZONA DO REVESTIMENTO DE CRN; Z4 – ZONA DE MATERIAL ADERIDO) .....	88
FIGURA 76 – ESPETROS EDS DAS ZONAS CORRESPONDENTES À FIGURA 75: A) Z1; B) Z2; C) Z3; D) Z4 .....	88
FIGURA 77 – A) MECANISMOS DE DESGASTE REGISTRADOS NA FACE DE ATAQUE DE UMA FERRAMENTA NÃO REVESTIDA TESTADA A 48 METROS DE COMPRIMENTO DE CORTE E 750 MM/MIN DE VELOCIDADE DE AVANÇO; B) MECANISMOS DE DESGASTE REGISTRADOS NO TOPO DE UMA FERRAMENTA NÃO REVESTIDA TESTADA A 48 METROS DE COMPRIMENTO DE CORTE E 1500 MM/MIN DE VELOCIDADE DE AVANÇO .....	89
FIGURA 78 – IMAGENS SEM COM AMPLIAÇÃO DE 220X DA FACE DE ATAQUE DE FERRAMENTAS REVESTIDAS TESTADAS A 48 METROS DE COMPRIMENTO DE CORTE E: A) PARA 750 MM/MIN DE VELOCIDADE DE AVANÇO; B) PARA 1500 MM/MIN DE VELOCIDADE DE AVANÇO .....	90
FIGURA 79 – IMAGENS SEM COM AMPLIAÇÃO DE 220X DA FACE DE ATAQUE DA FERRAMENTA TESTADA A 350 MM/MIN E 48 METROS DE COMPRIMENTO DE CORTE: A) FERRAMENTA NÃO REVESTIDA; B) FERRAMENTA REVESTIDA .....	90
FIGURA 80 - FICHA TÉCNICA AMPCOLOY® 83 .....	109



## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - OPERAÇÕES DE FRESAGEM DE TOPO (ADAPTADO DE [6]) .....	13
TABELA 2 - TIPOS DE SISTEMAS DE FIXAÇÃO (ADAPTADO DE [29]) .....	22
TABELA 3 - CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS DE REVESTIMENTO (ADAPTADO DE [47]) .....	26
TABELA 4 - COMPARAÇÃO DE DIFERENTES PROCESSOS DE PVD (ADAPTADO DE [51], [54]) .....	27
TABELA 5 - RESUMO DE ESTUDOS DO DESGASTE EM FERRAMENTAS REVESTIDAS .....	32
TABELA 6 - TIPOS DE DESGASTE EM FERRAMENTAS DE CORTE (ADAPTADO DE [9]).....	35
TABELA 7 - ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE NA RUGOSIDADE SUPERFICIAL DA PEÇA MAQUINADA.....	44
TABELA 8 - RESUMO DE ESTUDOS NA MAQUINAGEM DE LIGAS DE COBRE .....	45
TABELA 9 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA LIGA DE COBRE (AMPCOLOY 83) (ADAPTADO DE [89]) .....	47
TABELA 10 - PARÂMETROS DE FRESAGEM AMPCOLOY® 83 .....	50
TABELA 11 - ESPECIFICAÇÕES DO MATERIAL TENDO EM CONTA DIVERSAS NORMAS .....	54
TABELA 12 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO MATERIAL A MAQUINAR .....	54
TABELA 13 - PROPRIEDADES MECÂNICAS E FÍSICAS DO AMPCOLOY® 83 .....	55
TABELA 14 - DIMENSÕES DA FERRAMENTA DE CORTE .....	56
TABELA 15 - ESPECIFICAÇÕES DOS COMPONENTES DE FIXAÇÃO DA FERRAMENTA DE CORTE .....	58
TABELA 16 - PARÂMETROS UTILIZADOS NA DEPOSIÇÃO DOS REVESTIMENTOS .....	60
TABELA 17 – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS: HAAS VF-2 (ADAPTADO DE [95]) .....	61
TABELA 18 - PARÂMETROS UTILIZADOS NOS ENSAIOS DE MAQUINAGEM PARA CADA FERRAMENTA DE CORTE .....	67
TABELA 19 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS FEI QUANTA 400 FEG .....	71
TABELA 20 - DADOS TÉCNICOS RUGOSÍMETRO MAHR PERTHOMETER M1 .....	74
TABELA 21 - COMPOSIÇÃO DAS CAMADAS E MÉDIA DA MEDIÇÃO DA SUA ESPESSURA .....	76
TABELA 22 - VALORES DA RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE REGISTRADOS PARA CADA UMA DAS CONDIÇÕES TESTADAS.....	77



# ÍNDICE

<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>XII</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>IX</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>XI</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....</b>	<b>XIII</b>
<b>GLOSSÁRIO DE TERMOS.....</b>	<b>XV</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>XVII</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS.....</b>	<b>XXI</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>3</b>
1.1 Enquadramento.....	3
1.2 Objetivos.....	4
1.3 Metodologia.....	5
1.4 Estrutura da dissertação .....	5
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>9</b>
2.1 Maquinagem .....	9
2.1.1 Definição de fresagem .....	10
2.1.2 Tipos de operações de fresagem .....	12
2.1.3 Formação da apara .....	14
2.1.4 Parâmetros e cálculos na fresagem .....	15
2.1.5 Tipos de fresas .....	18
2.1.6 Geometria das ferramentas de corte .....	20
2.1.7 Tipos de fixação de ferramentas .....	21
2.1.8 Tipos de fixação de peças .....	23
2.2 Revestimentos para ferramentas .....	25
2.2.1 Técnicas de revestimento de ferramentas: PVD e CVD .....	26
2.2.2 Tipos de revestimentos .....	28
2.2.2.1 Revestimento <i>Diamond Like Carbon</i> (DLC) .....	29
2.2.3 Estudo do desgaste de ferramentas revestidas.....	31
2.3 Desgaste, técnica de avaliação do desgaste e de superfícies .....	35

2.3.1	Tipos de desgaste em ferramentas .....	35
2.3.2	Vida das ferramentas: critérios de fim de vida .....	37
2.3.3	Caracterização e medição do desgaste por microscopia.....	39
2.3.4	Avaliação da rugosidade da superfície maquinada .....	41
2.3.4.1	Influência dos parâmetros de corte na rugosidade superficial .....	43
<b>2.4</b>	<b>Maquinagem de ligas de cobre.....</b>	<b>45</b>
2.4.1	Estudos de maquinagem em ligas de cobre .....	45
2.4.2	Liga de cobre: AMPCOLOY® 83 .....	47
2.4.3	Aplicação do AMPCOLOY® 83 na indústria de moldes para injeção de plásticos.....	49
2.4.4	Parâmetros de maquinagem do AMPCOLOY® 83.....	50
<b>3</b>	<b>TRABALHO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>53</b>
<b>3.1</b>	<b>Materiais.....</b>	<b>53</b>
3.1.1	Material a maquinar .....	53
3.1.1.1	Composição química .....	54
3.1.1.2	Propriedades mecânicas e físicas.....	54
3.1.2	Ferramenta de corte.....	55
3.1.2.1	Geometria da ferramenta de corte .....	55
3.1.2.2	Material de base da ferramenta de corte .....	56
3.1.2.3	Revestimento da ferramenta de corte.....	57
3.1.3	Sistema de aperto da ferramenta de corte .....	57
<b>3.2</b>	<b>Métodos .....</b>	<b>59</b>
3.2.1	Revestimento das ferramentas .....	59
3.2.2	Centro de maquinagem .....	60
3.2.2.1	Especificações técnicas do centro de maquinagem.....	60
3.2.3	Sistema de fixação da peça.....	62
3.2.4	Posicionamento zero-peça no centro de maquinagem.....	62
3.2.5	Medição das ferramentas.....	64
3.2.6	Plano de ensaios .....	64
3.2.6.1	Ensaio de maquinagem preliminares .....	64
3.2.6.2	Ensaio de maquinagem definitivos.....	65
3.2.7	Dinamómetro .....	68
3.2.8	Preparação das amostras para análise SEM .....	69
3.2.9	Microscópio eletrónico de varrimento (MEV) .....	70
3.2.10	Análise da espessura do revestimento .....	72
3.2.11	Análise do desgaste das ferramentas de corte .....	72
3.2.12	Rugosímetro.....	73
3.2.13	Teste de rugosidade superficial .....	74
<b>3.3</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>75</b>
3.3.1	Caracterização do revestimento das ferramentas de corte .....	75
3.3.2	Resultados dos ensaios de maquinagem.....	77
3.3.2.1	Análise da rugosidade superficial.....	77

3.3.2.2	Análise da rugosidade superficial para baixo valor de velocidade de avanço .....	79
3.3.3	Análises MEV das ferramentas .....	81
3.3.3.1	Análise do desgaste.....	81
3.3.3.2	Quantificação do desgaste.....	84
3.3.3.3	Caracterização dos mecanismos de desgaste .....	86
3.3.3.4	Caracterização dos mecanismos de desgaste para baixo valor de velocidade de avanço	90
3.3.4	Análise crítica dos resultados .....	91
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>95</b>
4.1	Conclusões .....	95
4.2	Proposta de trabalhos futuros.....	96
<b>5</b>	<b>BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO .....</b>	<b>99</b>
<b>6</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>109</b>
6.1	Anexo 1: Ficha técnica – AMPCOLOY® 83.....	109



# INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

1.2 Objetivos

1.3 Metodologia

1.4 Estrutura da dissertação



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento

Com o avanço da tecnologia e dos materiais de engenharia, surgiu a necessidade de otimizar parâmetros e processos que aumentem a eficiência da produção das empresas. O aumento da competitividade existente entre mercados, reflete-se na crescente qualidade dos produtos disponíveis e na crescente necessidade de se fazer “mais e melhor”.

A maquinagem é um processo bastante utilizado na indústria metalomecânica e garante a produção de peças bastante complexas, de forma a dar resposta às necessidades do mercado global. A indústria de moldes para injeção ocupa uma grande percentagem no setor da metalomecânica. Atualmente, Portugal é um dos principais fabricantes do mundo no ramo dos moldes para injeção de plásticos, com uma taxa de exportação de cerca de 85% da produção [1].

Nesse sentido, a exigência e complexidade dos produtos criam a necessidade de introduzir processos mais avançados nas empresas, para atender a todos os requisitos impostos pelos clientes.

Neste contexto, além da evolução da tecnologia das máquinas, cada vez mais robotizadas, as ferramentas de corte utilizadas nos processos por arranque de apara, têm vindo a sofrer atualizações. Nestas, poderemos apontar a notória evolução dos revestimentos para a obtenção de uma maquinagem mais eficiente e eficaz.

Paralelamente a esta evolução, surgiu o desenvolvimento de novas ligas metálicas, tais como a liga de cobre-berílio, ideais para a produção de componentes (insertos) em zonas moldantes em moldes de injeção de plásticos. A grande aplicação desta liga nesta indústria está relacionada com a sua condutividade térmica. Desta forma, esta liga permite aumentar a eficiência da produção através da redução do tempo do ciclo de injeção.

Por tudo o que foi referido anteriormente, e por forma a cumprir todos os desafios impostos nesta indústria, o estudo da liga cobre-berílio (AMPCOLOY® 83) é fundamental e necessário, de forma a acrescentar conteúdo científico a um material com grande potencial na engenharia.

## 1.2 Objetivos

A fresagem de ligas metálicas na indústria metalomecânica, e o conhecimento dos seus parâmetros e condições ideais de corte, são fatores importantes para um incremento da produtividade.

Neste trabalho, procurou-se otimizar com recurso à investigação, novas soluções para um assunto ainda muito pouco explorado. Assim sendo, este trabalho teve como objetivo principal o estudo comparativo dos mecanismos de desgaste em ferramentas de corte revestidas com multicamada de CrN e DLC e não revestidas, na fresagem de uma liga de cobre-berílio (AMPCOLOY® 83). Procurou-se obter acabamentos superficiais compatíveis com as necessidades dos moldes de injeção de plásticos, procurando concluir qual a melhor ferramenta de corte para a maquinagem do AMPCOLOY® 83: revestida com CrN+DLC ou não revestida.

Para cumprir com o objetivo proposto, o trabalho passou por:

- Obter conhecimento aprofundado na área da maquinagem, mais destinada à fresagem de uma liga de cobre-berílio (AMPCOLOY® 83);
- Conhecer alguns parâmetros de corte que afetam a maquinabilidade deste material;
- Analisar os tipos de revestimentos que se destinam à fresagem de ligas de cobre-berílio, nomeadamente, um revestimento do tipo multicamada de CrN/DLC;
- Proceder à análise do desgaste da ferramenta e analisar a rugosidade da superfície maquinada;
- Obter rugosidade máxima de 0,2 µm na superfície da peça maquinada.

De forma a atingir todos os objetivos foi necessário:

- Elaborar um procedimento de ensaios de maquinagem;
- Realizar ensaios de maquinagem na liga AMPCOLOY® 83;
- Analisar e caracterizar o revestimento das ferramentas de corte revestidas com multicamada de CrN e DLC;
- Analisar as forças de corte resultantes do processo de fresagem;
- Analisar e avaliar a superfície maquinada;
- Analisar todas as ferramentas de corte testadas, identificando quais as tipologias de desgaste que se encontram presentes para cada condição de ensaios testada;
- Proceder à análise detalhada de todos os resultados, com auxílio da técnica de Microscopia Eletrónica de Varrimento.

### 1.3 Metodologia

A elaboração da presente dissertação seguiu a metodologia que abaixo se descreve:

- Estudo do estado da arte apoiada em artigos científicos e livros, para a obtenção de conhecimento fundamental para o desenvolvimento prático do trabalho;
- Escolha e caracterização das ferramentas e revestimento a utilizar no trabalho;
- Realização de plano de ensaio e realização de ensaios preliminares para avaliar os parâmetros fornecidos pelo fabricante das ferramentas de corte;
- Realização de ensaios definitivos para diversas condições de corte testadas;
- Análise das forças de corte no processo de maquinagem para verificar a sua influência no desgaste das ferramentas;
- Análise da rugosidade superficial da peça maquinada, para cada condição testada;
- Análise SEM de todas as ferramentas de corte testadas;
- Caracterização do revestimento utilizado nas ferramentas revestidas;
- Quantificação do nível de desgaste de todas as ferramentas de corte testadas, para cada condição de ensaio;
- Caracterização dos mecanismos de desgaste de todas as ferramentas de corte testadas, apoiado nas imagens SEM;
- Redação da presente dissertação.

### 1.4 Estrutura da dissertação

Após a realização do presente capítulo, onde se demonstra qual o tema e o objetivo do trabalho realizado, a presente dissertação está dividida em mais três capítulos.

No capítulo dois será realizada uma revisão bibliográfica, com o intuito de enquadrar o leitor sobre os temas abordados na dissertação.

O capítulo três representa o trabalho experimental e encontra-se dividido em três partes: uma primeira parte onde se indicam todos os materiais utilizados, uma segunda parte onde se descrevem todos os métodos utilizados, uma terceira parte onde se analisa e interpreta todos os resultados obtidos na parte prática da dissertação.

Por último, representado pelo capítulo quatro, vêm as conclusões, onde são destacados os principais desenvolvimentos concretizados através deste estudo, nomeadamente, conclusões relevantes da análise dos resultados face ao objetivo descrito e indicação de propostas para trabalhos futuros.



# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Maquinagem

2.2 Revestimentos para ferramentas

2.3 Desgaste, técnica de avaliação do desgaste e de superfícies

2.4 Maquinagem de ligas de cobre



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, apresenta-se toda a contextualização teórica relacionada com o trabalho de desenvolvimento para a dissertação de mestrado.

Será abordado o processo de fresagem, apresentando-se como um processo de maquinagem com grande utilização na indústria metalomecânica. Deste processo, mostram-se aspetos relacionados com os tipos de fresagem existentes, parâmetros, ferramentas de corte utilizadas no processo, o tipo de revestimento de ferramentas de corte, o nível e a avaliação de desgaste das mesmas, e o material que estará na base do trabalho experimental.

### 2.1 Maquinagem

A maquinagem é um termo muito utilizado na indústria metalomecânica e decompõe-se em vários processos de fabrico que são responsáveis pela remoção de material. Nesta família de processos, a remoção é realizada por corte por arranque de apra, de maneira a conferir geometrias complexas com elevado grau de precisão. Industrialmente, o processo de maquinagem é realizado em diversos tipos de máquinas-ferramentas, de maneira a originar peças de engenharia a partir de blocos de metal, peças de fundição ou até mesmo peças forjadas [2].

Existem diversos processos de corte por arranque de apra, que se diversificam pelas gamas de operações que podem executar, sendo eles: o torneamento, a fresagem, a furação, a retificação, corte por serra, entre outros.

Cada processo apresenta variáveis que influenciam direta ou indiretamente a qualidade do processo [3]. Entenda-se por variáveis todos os parâmetros de maquinagem envolvidos, ferramentas de corte, técnicas de refrigeração, líquido de lubrificação, entre outros. Assim sendo, a Figura 1 apresenta as variáveis principais e secundárias do processo de maquinagem. As variáveis principais (1º nível), apresentam um valor de entrada finito ao processo e podem ser representadas por: fluído de corte, técnica de aplicação de lubrificação, material da ferramenta de corte, material do revestimento de corte, técnica de deposição do revestimento na ferramenta e a estrutura do revestimento. As variáveis secundárias (2º nível), apresentam um número infinito de valores, que podem ser conjugados de forma a parametrizar a variável principal. Estas variáveis podem ser: geometria da ferramenta de corte, parâmetros de maquinagem, parâmetros do processo para a aplicação do fluído de corte, composição

do material da ferramenta, composição do material do revestimento, parâmetros da deposição do revestimento e o número de camadas do revestimento [4].

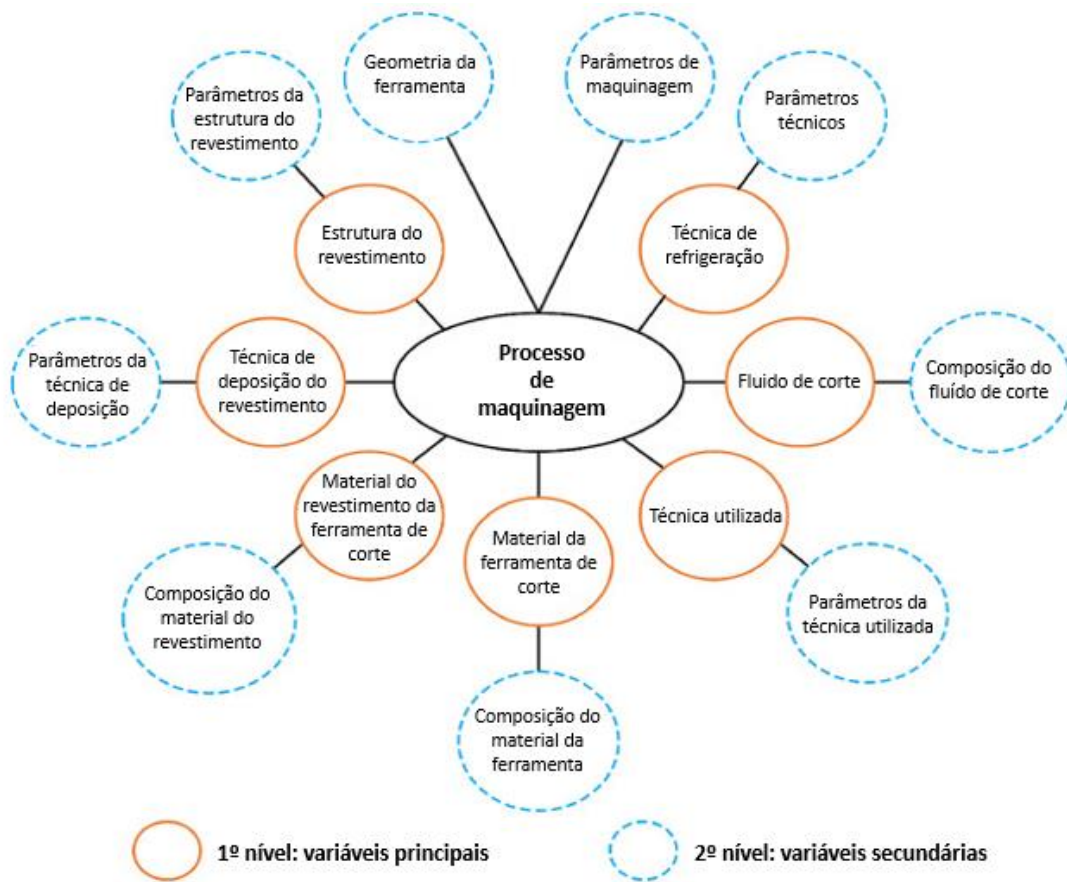


Figura 1 – Variáveis principais e secundárias de apoio à maquinação [4].

### 2.1.1 Definição de fresagem

A fresagem é um processo de fabrico que permite obter peças com geometrias regulares e complexas, removendo o material por arranque de aparas. É um processo capaz de trabalhar uma grande variedade de materiais, e é caracterizado pelo seu rigor dimensional.

Na fresagem, uma ferramenta em rotação com múltiplas arestas de corte, percorre o material, removendo-o parcialmente, de forma a gerar uma superfície plana [5]. Geralmente, as ferramentas de fresagem são denominadas de fresas, que percorrem a peça, ou a peça é movimentada em relação à ferramenta, mediante as características da máquina.

O processo, quando utilizado com uma gama de ferramentas variada e combinado com várias operações de maquinagem sequencial (furação, roscagem, entre outros), permite obter peças de complexidade elevada. Por outro lado, existem muitas combinações de parâmetros que servem como entrada ao processo, que podem dificultar a sua otimização [6].

A fresadora com Controlo Numérico Computadorizado (CNC), é a máquina responsável pelo processo de fresagem e, mediante a sua complexidade, é possível obter peças cada vez mais complexas [7]. Assim sendo, a caracterização mais comum de uma fresadora CNC é através:

- **Da orientação da árvore:**
  - Fresadora horizontal;
  - Fresadora vertical;
  - Fresadora universal.
  
- **Do número de eixos:**
  - Fresadora de três eixos;
  - Fresadora de três eixos e meio;
  - Fresadora de três mais dois meios eixos;
  - Fresadora de quatro eixos;
  - Fresadora de cinco eixos.

A tecnologia CNC permitiu um grande avanço na indústria, não só com um forte incremento na produtividade e flexibilidade do processo, mas também com a otimização de processos. Por essa razão, os processos CNC multieixos são apontados às empresas no sentido de as colocar na vanguarda da tecnologia empresarial. Na Figura 2, é apresentado uma fresadora/centro de maquinagem de cinco eixos.



Figura 2 – Fresadora de cinco eixos Haas UMC-100SS (adaptado de [8])

### 2.1.2 Tipos de operações de fresagem

Mediante o tipo de fresadora a utilizar, existem vários tipos de fresagem que podem ser mais rentáveis num certo tipo de máquina do que noutra. Assim sendo, a fresagem tradicional utilizada em máquinas tradicionais, é amplamente utilizada de forma a gerar faces simples e planas. Porém, com os avanços tecnológicos e com um mercado cada vez mais exigente, foram desenvolvidas máquinas, *softwares* e gabaritos capazes de produzir peças complexas e com extremo rigor [9–11].

Existem dois tipos de fresagem:

1. **Fresagem periférica:** tipo de fresagem onde o eixo de rotação da ferramenta de corte se encontra paralelo à face a maquinar, como visualizado na Figura 3. Esta técnica permite que o incremento da fresa seja estendido para além da espessura da peça, permitindo uma superfície lisa [5].



Figura 3 – Fresagem periférica: Diagrama esquemático legendado (adaptado de [5])

2. **Fresagem de topo:** tipo de fresagem onde o eixo de rotação da ferramenta de corte se encontra perpendicular ao sentido de movimento de avanço, como visualizado na Figura 4.

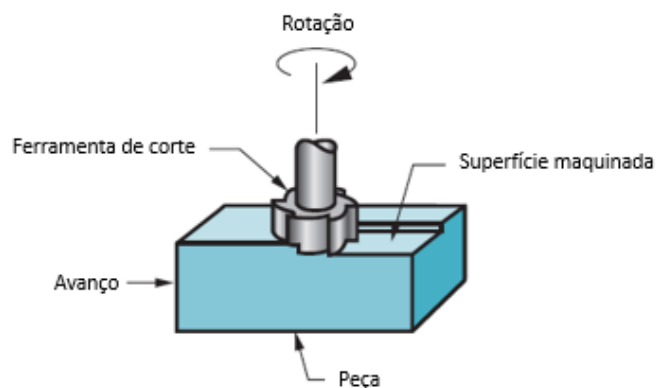

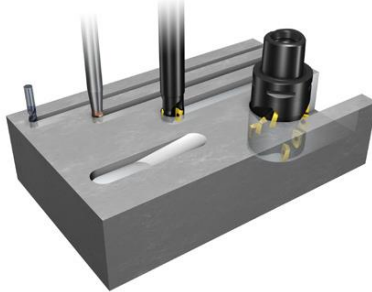
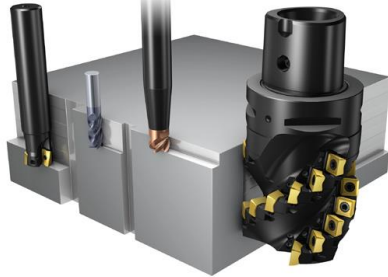



Figura 4 – Fresagem de topo: Diagrama esquemático legendado (adaptado de [5])

Dentro da fresagem de topo, existem ainda vários tipos de operações de fresagem, os quais se designam por: facejamento, fresagem frontal de canal, fresagem de contorno (fresagem de cantos a 90°) e fresagem de perfis [5], representados na Tabela 1.

Tabela 1 - Operações de fresagem de topo (adaptado de [6])

Representação	Designação	Descrição
	Facejamento	É uma operação muito comum na fresagem e consiste na realização de uma face com uma área considerável no mesmo plano.
	Fresagem de canais	Operação que consiste na abertura de um canal ou rasgo, profundos ou rasos, sendo a seleção da ferramenta determinada pela largura e profundidade do canal.
	Fresagem em contorno	Consiste na junção dos dois tipos de fresagem, periférica e de topo, de forma a maquinar duas faces em simultâneo e também a criação de cantos a 90°.
	Fresagem de perfil	Esta operação está relacionada com a fresagem multieixos de perfis côncavos e convexos, em duas ou três dimensões. Nesta, é importante o planeamento do processo de desbaste/semidesbaste, semiacabamento e acabamento, de forma a sequenciar o processo produtivo da peça final.

### 2.1.3 Formação da apara

O processo de formação da apara no processo de fresagem, organiza-se em duas fases [12]:

- Primeiro, a ferramenta de corte penetra na peça, provocando o encalcamento de uma pequena quantidade de material contra a face de ataque da ferramenta. O encalque ocorre uma vez que o escorregamento da apara em formação é travado, devido ao atrito com a face de ataque. O atrito gerado dá origem a altas temperaturas, que ajudam a acelerar o processo de deformação plástica que resulta da formação da apara. Nesta fase, a força de maquinagem aumenta, até que as tensões de corte sejam de tal maneira elevadas, que facilitem o escorregamento sem perda de coesão entre a peça e a porção de material encalcado, como visualizado na Figura 5.

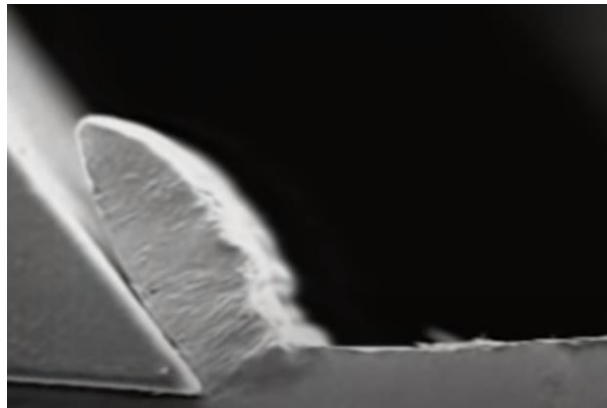


Figura 5 – Início da formação da apara (adaptado de [13])

- Seguidamente, e continuando a penetração da ferramenta de corte na peça, ocorre a formação de uma fissura na região de corte (Figura 6), que pode dar origem a uma apara contínua, se a fissura for parcial, ou uma apara descontínua, se a fissura for total. Na sequência do movimento peça/ferramenta de corte, verifica-se o escorregamento da apara sobre a face de ataque da ferramenta e, ao mesmo tempo, uma nova porção de material é encalcado sobre a face de ataque.

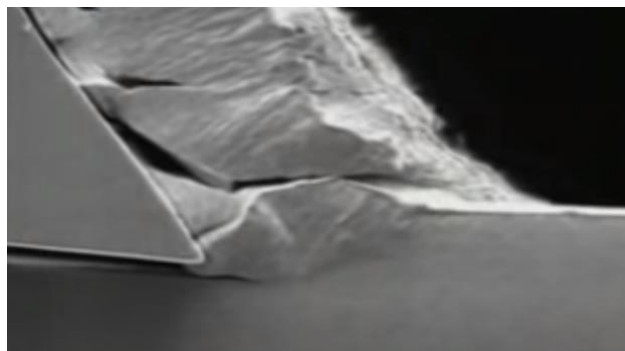


Figura 6 – Fissuras na região de corte (adaptado de [13])

Segundo Davim, em “Princípios da Maquinagem” [12], o processo de formação da aparta é um fenómeno periódico, tendo numa primeira fase o encalque, seguido de uma fase de corte, sendo a força de maquinagem máxima e mínima, respetivamente.

#### 2.1.4 Parâmetros e cálculos na fresagem

Segundo Grabowski *et al.* [14], o comportamento dinâmico da operação de fresagem pode condicionar o corte instável, que muitas vezes limita o potencial da máquina/ferramenta, em termos de produtividade.

As vibrações resultantes, são a causa prejudicial mais comum ao processo de fresagem, e estão inteiramente relacionadas com a escolha dos parâmetros de corte.

Segundo Wojciechowski *et al.* [15], selecionar parâmetros de corte ideais, permite a minimização das forças de corte envolvidas na ferramenta, aumentando a eficiência do processo de fresagem.

No mercado, existe uma gama de ferramentas de maquinagem capaz de produzir peças cada vez mais complexas. Dada a variedade de ferramentas, os parâmetros de corte de cada tipo diferem [16].

Os parâmetros de corte correspondem a *inputs* que caracterizam o movimento relativo da ferramenta em relação à peça a maquinar, ou vice-versa. Existem vários parâmetros que caracterizam o processo, no entanto, apenas importa abordar aqueles que são recomendados e estudados pelos fabricantes das ferramentas de corte.

A velocidade de corte, a velocidade de avanço, a profundidade e a largura de corte, são parâmetros recomendados pelos fabricantes. Estes parâmetros dependem do material a maquinar. Contudo, quando utilizados em condições ideais, é possível a redução da energia despendida com o processo, assim como o tempo necessário [17].

Na Figura 7 a) e b), são representados os diagramas esquemáticos, com respetiva legenda, de uma fresa monobloco e outra de insertos de corte, respetivamente, de forma a se perceber quais as características que estão envolvidas nos parâmetros de corte.

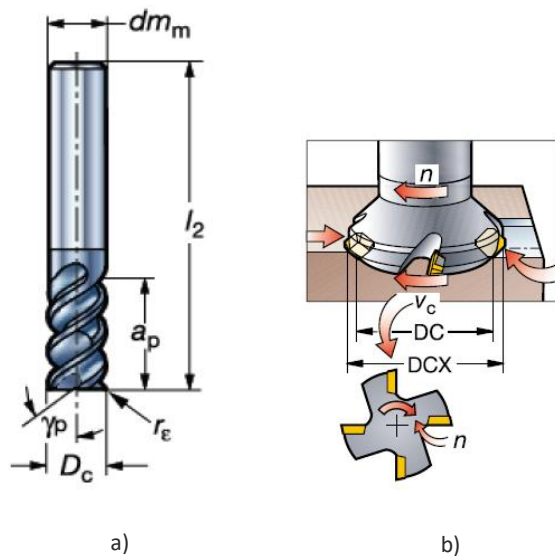
**Legenda:****Dc:** Diâmetro da fresa em mm**DCX:** Diâmetro de corte máximo em mm**γp:** Ângulo de hélice em graus**rε:** Raio de canto em mm**a<sub>p</sub>:** Profundidade de corte máxima em mm**l<sub>2</sub>:** Comprimento da fresa em mm**n:** Velocidade de rotação da árvore em rotações por minuto**V<sub>c</sub>:** Velocidade de corte em metros por minuto

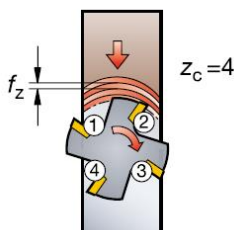
Figura 7 – a) Fresa de topo monobloco; b) fresa de insertos (adaptado de [6])

A **velocidade de corte (V<sub>c</sub>, m/min)**, indica a velocidade do contacto entre a aresta de corte na maquinagem da peça, calculada pela equação (1).

$$V_c = \frac{\pi \times D_c \times n}{1000} \quad (1)$$

A **velocidade de rotação da árvore (n, rpm)**, é um valor calculado pela equação (1) resolvida em ordem a n, e representa o número de rotações que a ferramenta realiza por minuto.

O **avanço por dente (f<sub>z</sub>, mm)**, é o valor necessário para o cálculo do avanço, e corresponde à distância linear percorrida por uma aresta de corte no processo de corte, calculado a partir do valor da espessura máxima da apra recomendada (equação (2)).



$$f_z = \frac{V_f}{n \times z_c} \quad (2)$$

Figura 8 – Representação do avanço por dente (adaptado de [6])

O **avanço por rotação ( $f_n$ , mm/rot)**, é o valor que indica a distância que a ferramenta de corte progride sobre a peça durante uma rotação. Este valor é usado para o cálculo do avanço (equação (3)).

$$f_n = \frac{V_f}{n} \quad (3)$$

A **velocidade de avanço ( $V_f$ , mm/min)**, ou também chamado de avanço por minuto (equação (4)), é a distância percorrida pela ferramenta sobre a peça, por unidade de tempo. Esta depende do avanço por dente ( $f_n$ , mm/rot) e do número de dentes ( $z_c$ ) da fresa em trabalho.

$$V_f = f_n \times n \times z_c \quad (4)$$

A **taxa de remoção de material ( $Q$ , mm<sup>3</sup>/min)** expressa na equação (5), é o volume de material removido, que depende da profundidade de corte axial ( $a_p$ , mm), da profundidade de corte radial ( $a_e$ , mm) e da velocidade de avanço ( $V_f$ , mm/min).

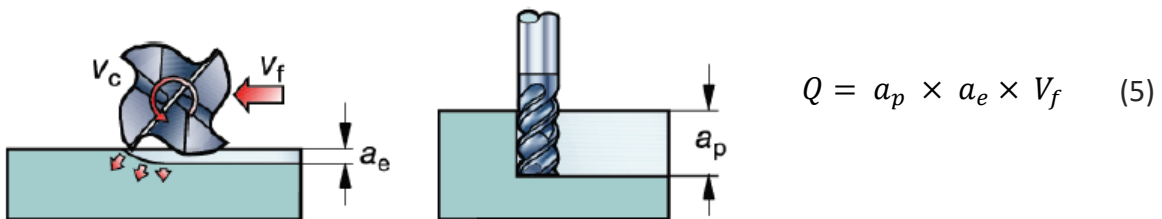


Figura 9 – Representação dos fatores que dependem do cálculo da taxa de remoção de material (adaptado de [6])

O **tempo de maquinagem ( $T_c$ , min)** expresso na equação (6), é o tempo necessário para executar uma operação. Depende da distância percorrida ( $L$ , mm) e da velocidade de avanço ( $V_f$ , mm/min).

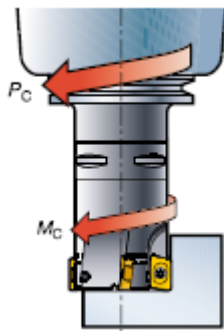
$$T_c = \frac{L}{V_f} \quad (6)$$

A **potência líquida de corte ( $P_c$ , kW)**, é a potência que a fresadora necessita debitar à ferramenta de corte para efetuar a remoção do material (equação (7)).

$$P_c = \frac{a_e \times a_p \times V_f \times K_c}{60 \times 60^5} \quad (7)$$

Sendo  $K_c$  o valor da força de corte específica. Este valor é uma constante do material a maquinar, expresso em N/mm<sup>2</sup>.

O **binário de corte ( $M_c$ , Nm)** expresso na equação (8), é o valor do binário produzido pela ferramenta de corte durante a sua ação de remoção de material, e que a máquina deve estar capacitada para fornecer.



$$M_c = \frac{P_c \times 30 \times 10^3}{\pi \times n} \quad (8)$$

Figura 10 – Representação da potência líquida de corte e binário de corte (adaptado de [6])

### 2.1.5 Tipos de fresas

O processo de fresagem é um método complexo, onde existe uma variedade de fatores que são importantes para o seu sucesso. Assim sendo, um dos fatores mais importantes no processo é a geometria da ferramenta de corte e a sua estrutura, que influenciam bastante a fresagem [18]. As ferramentas de corte (fresas), são desenvolvidas de forma a proporcionar uma experiência de corte mais eficaz nas peças a produzir.

Desta forma, as fresas podem dividir-se em dois grupos:

#### **Fresas providas de insertos**

São ferramentas com montagem de insertos num corpo sólido (Figura 11). Este tipo de ferramenta é muito utilizado nas indústrias, uma vez que o seu custo é relativamente baixo em comparação com outro tipo de fresa. Neste grupo, é possível obter ferramentas com grandes diâmetros, muito utilizados para desbastes de cavidades de moldes de injeção. Os insertos mais simples são construídos com carboneto de tungsténio (WC) e ligante de cobalto (Co). Os mais complexos apresentam na sua estrutura materiais cerâmicos, nitrato cúbico de boro policristalino (PCBN) ou ainda, deposição sobre o substrato de diamante policristalino (PCD) [19]. O PCD, é ligado ao corpo da pastilha de corte por brasagem, não se podendo exceder os 800°C no processo, pois o diamante terá tendência a reverter para o seu estado grafítico [20].



Figura 11 – Fresa providas de insertos (adaptado de [21])

### Fresas monobloco

São ferramentas com lâminas cortantes nas extremidades, bem como ao longo da lateral do seu corpo [22]. Este tipo de fresas apresenta o mesmo material em toda a sua estrutura, podendo ser de aço rápido, também conhecida como *High Speed Steel* (HSS) ou de carbonetos sinterizados, chamado de metal duro [18]. Na extremidade de corte, é possível a aplicação de um revestimento (pelo método CVD ou PVD), de forma a obter melhores desempenhos [19], [23–25].

Na Figura 12, estão representados vários tipos de fresas monobloco, entre as quais: fresas tóricas, fresas de topo esférico, entre outras.



Figura 12 – Fresas monobloco (adaptado de [26])

Na Figura 13, estão representadas as formas da ponta das fresas monobloco mais comuns para um processo de fresagem. Desta forma, podemos perceber que existe uma variedade de geometrias que nos permitem realizar diferentes tipos de operações. Por um lado, é comum a realização de desbastes com fresas providas de

raio de canto e com um número reduzido de lâminas, normalmente entre duas a três. Para as operações de acabamento, as fresas com um maior número de lâminas são as preferencialmente escolhidas, uma vez que a rigidez da ferramenta aumenta, permitindo desta forma um maior rigor dimensional na peça maquinada. As ferramentas esféricas, são normalmente selecionadas para acabamentos em superfícies inclinadas e complexas.

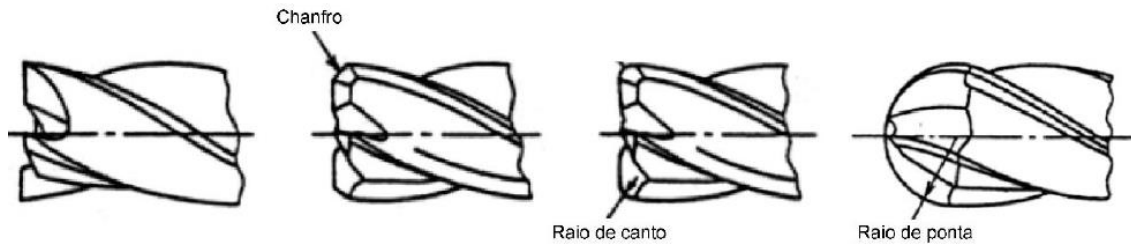


Figura 13 – Ponta das fresas monobloco para operações de fresagem (adaptado de [27])

### 2.1.6 Geometria das ferramentas de corte

A construção de uma ferramenta de corte é realizada com o intuito de corresponder às exigências do processo em questão. Assim sendo, é demonstrado na Figura 14, a configuração geométrica de uma ferramenta de corte. Esta, opera segundo um comprimento útil de corte onde, na fresagem de topo, o corte corresponde ao diâmetro de corte, e na fresagem periférica, corresponde ao comprimento de corte, limitado pelas lâminas. Na Figura 14 b), é possível visualizar as faces que estão na origem da remoção da avara.

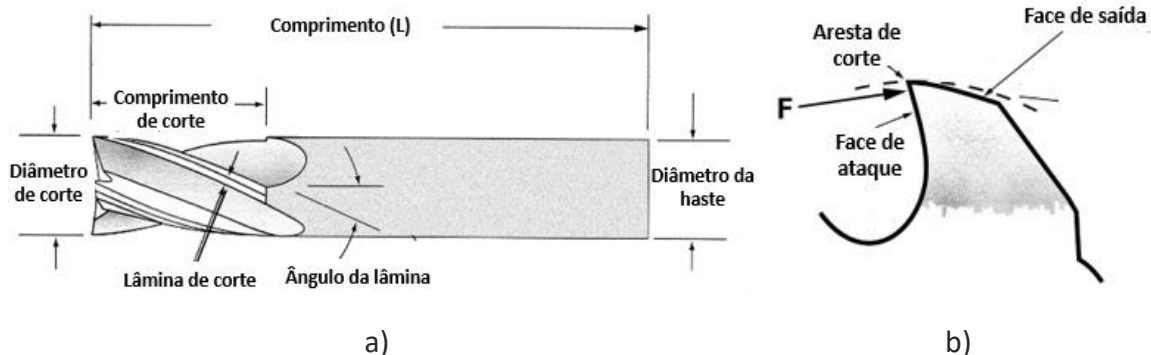


Figura 14 – Legenda geométrica – a) fresa monobloco b) detalhe ferramenta (adaptado de [28])

Existem normas que são utilizadas para definir a geometria da ferramenta de corte. A norma ISO 3002/1:1982, é considerada uma das mais importantes. Esta, abrange termos muito gerais sobre a geometria da parte ativa das ferramentas de corte, tais como: ângulos de trabalho, superfícies da ferramenta e os seus elementos, movimento da peça de trabalho, sistemas de referência de planos que são posteriormente utilizados para definir os vários ângulos e formação de avara.

### 2.1.7 Tipos de fixação de ferramentas

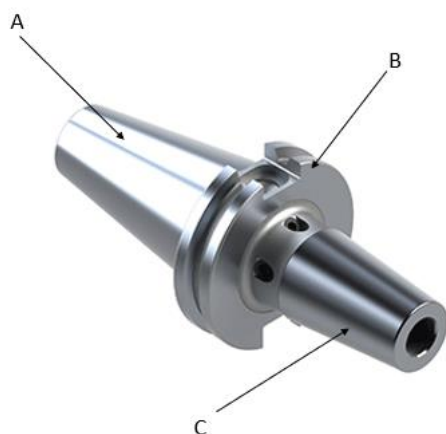
Um suporte de fixação, é definido como um dispositivo que atua como interface intercambiável, entre a árvore de uma máquina e uma ferramenta de corte, sem alterar a eficácia de ambos os elementos [29].

No mercado, existe uma vasta gama de componentes de fixação de diversos formatos que variam consoante a máquina e a operação. Desta forma, uma fresadora CNC pode acoplar diferentes sistemas de fixação. A fixação rígida é o principal fator a ter em conta para se obter precisão dimensional [30, 31]. Portanto, existe sempre a necessidade de escolher a fixação mais correta à operação.

Existem quatro requisitos necessários para manter a eficácia do sistema de fixação [29]:

- **Concentricidade:** deve ser assegurada a concentricidade entre o eixo de rotação da árvore da máquina e o eixo de rotação da ferramenta de corte;
- **Força de retenção:** assegura a adequada fixação da ferramenta de corte à árvore da máquina, através do porta-ferramentas;
- **Calibração:** assegura o rigor dimensional de suporte para suporte das ferramentas de corte;
- **Equilibragem:** assegura uma correta distribuição de massas, para evitar vibrações e desalinhamentos durante o processo de rotação.

Assim sendo, na Figura 15 é possível verificar-se três partes fundamentais que devem cumprir os requisitos acima mencionados.



#### Legenda:

**A:** Interface com a árvore da máquina

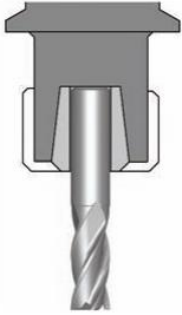
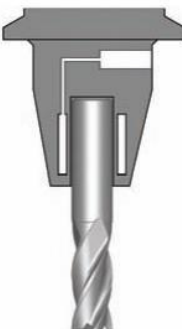

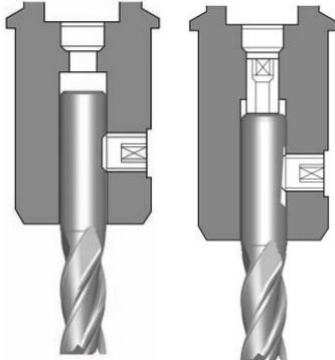
**B:** Dispositivo de equilíbrio

**C:** Mecanismo de retenção da ferramenta

Figura 15 – Suporte de fixação (adaptado de [32])

Existem quatro tipos diferentes de sistemas de fixação de ferramentas, como demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Tipos de sistemas de fixação (adaptado de [29])

	Designação	Descrição
	<p><b>Sistema DIN 6388</b></p> <p><b>Sistema DIN6499</b></p>	<p>Sistema de fixação muito comum na indústria dos moldes para injeção. O aperto da ferramenta de corte é auxiliado por uma pinça metálica, que tem como função garantir a distribuição da força de aperto para a haste da ferramenta.</p>
	<p><b>Sistema Hidráulico</b></p>	<p>Sistema de fixação com aperto hidráulico. Este suporte, contém um reservatório de óleo que é pressurizado com o aperto de um parafuso, garantindo o aperto da haste da ferramenta.</p>
	<p><b>Sistema térmico</b></p>	<p>Sistema de fixação com expansão térmica. O local de alojamento da fresa, contém um diâmetro inferior ao da haste da ferramenta. Por indução de corrente elétrica (corrente de Foucault), ocorre a dilatação do suporte, permitindo a entrada da ferramenta. Quando arrefece, contrai, garantindo o aperto da ferramenta. Este suporte é muito utilizado em centros de maquinagem.</p>
	<p><b>Sistema Weldon (DIN 1835 B) esquerda</b></p> <p><b>Sistema Whistle Notch (DIN 1835 E) direita</b></p>	<p>Sistema de fixação simples e cada vez menos utilizado na indústria, pelos seus elevados tempos de troca de ferramenta. Este sistema adota um parafuso que, ao ser apertado contra um entalhe existente na haste da ferramenta, garante o seu aperto.</p>

### 2.1.8 Tipos de fixação de peças

A fixação da peça de trabalho é um conceito que cada vez mais pode ser otimizado, por se tratar de um procedimento que ocupa algum tempo. Com a evolução do mercado, as empresas apostam cada vez mais na otimização de processos que combatem os problemas dos tempos de *setup* [33].

Dada a complexidade das peças a maquinar e o tipo de operação a executar, podem utilizar-se os seguintes sistemas de fixação de peças:

- **Barra/grampo**

É o método mais simples e mais comum utilizado nas indústrias metalomecânicas. Como apresentado na Figura 16, consiste num conjunto de três elementos: barra (A), dispositivo de fixação (parafuso e porca) (B) e suporte de calcanhar (C) [34]. Neste caso, a força é transferida da barra para a peça de trabalho, sendo o suporte de calcanhar o elemento que atua para oferecer suporte à barra, atuando como um sistema de alavanca.

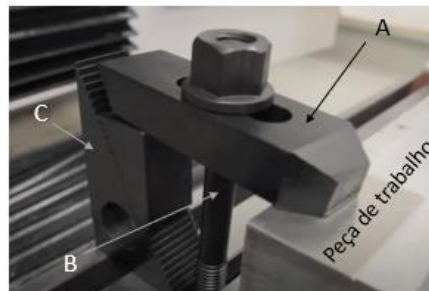


Figura 16 – Fixação por barra/grampo (adaptado de [35])

- **Base magnética**

É um método simples de fixação da peça na máquina. É muito utilizado quando permite a fixação de peças com uma base ampla, de forma a garantir melhor a fixação. Na Figura 17, é apresentado um tipo de fixação de base magnética.



Figura 17 – Fixação de peça em base magnética (adaptado de [36])

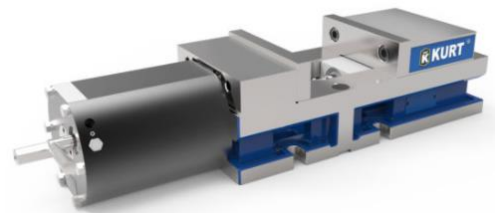
- **Prensa de precisão e prensa pneumática**

As prensas de precisão (Figura 18 a)), são muito utilizadas na indústria metalomecânica, por proporcionarem uma estabilidade superior e um posicionamento fiável e preciso das peças de trabalho [37].

As prensas pneumáticas (Figura 18 b)), são alimentadas por ar comprimido. Um sistema pneumático é o principal componente que torna esta alternativa de fixação mais económica e mais flexível [38].



a)



b)

Figura 18 – Tipos de prensas: a) manual de precisão (adaptado de [39]); b) pneumática (adaptado de [38])

- **Apertos modulares**

Os apertos modulares representados na Figura 19, são uma aposta das empresas para que os processos sejam cada vez mais otimizados, pois permitem uma redução considerável dos tempos de *setup*. Assim sendo, este sistema de fixação traz grande vantagem em relação aos demais, dadas as suas características.

Este sistema pode ser realizado manualmente ou automaticamente, através da alimentação automatizada da máquina [40]. Desta forma, podem-se obter claras vantagens com a utilização deste sistema, nomeadamente: a redução dos tempos de *setup*, a utilização de referências permanentes, o acesso facilitado às zonas de trabalho, a fiabilidade existente na centragem da peça e a flexibilidade que se pode trazer para o processo [41].

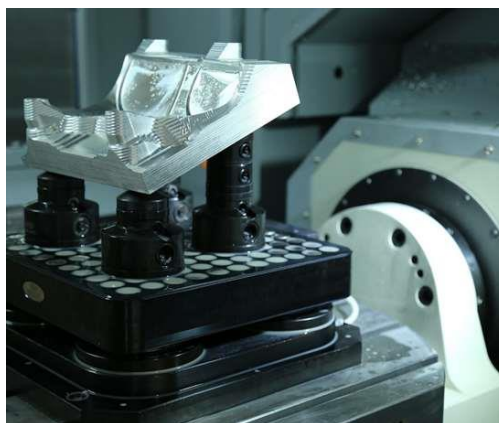


Figura 19 – Sistema de fixação modular (adaptado de [42])

## 2.2 Revestimentos para ferramentas

Segundo Shaw e Cookson [7], o desenvolvimento de ferramentas próprias da década de 1960, foi a introdução de ferramentas de carboneto revestidas, em 1969. O princípio passou por revestir as ferramentas comuns de carboneto, com uma fina película de TiC, através do método de deposição química em fase de vapor (CVD). O objetivo do revestimento passava por reduzir a tendência de desgaste da ferramenta de corte de metal duro ao maquinar os aços macios, permitindo que os aços de baixa liga fossem maquinados com valores de temperatura elevada, dadas as velocidades e os avanços então utilizados [43].

O processo de revestimento de ferramentas (Figura 20) expõe o metal de base a certos produtos químicos ou físicos, que formam uma fina película, a que se chama “revestimento” [5], como visualizado na Figura 20. O seu principal objetivo é proteger o metal de base que, nas ferramentas de fresagem, são normalmente HSS ou carboneto de tungsténio.



Figura 20 – Aplicação de revestimento no material de base/substrato (adaptado de [44])

Os avanços da tecnologia de revestimento permitiram um progresso importante na maquinagem com a evolução do processo de revestimento CVD e PVD, adaptado com diferentes materiais para se obter melhores resultados [45].

Assim sendo, a Figura 21 demonstra de que forma o revestimento pode ajudar a influenciar o desempenho de uma ferramenta de corte.

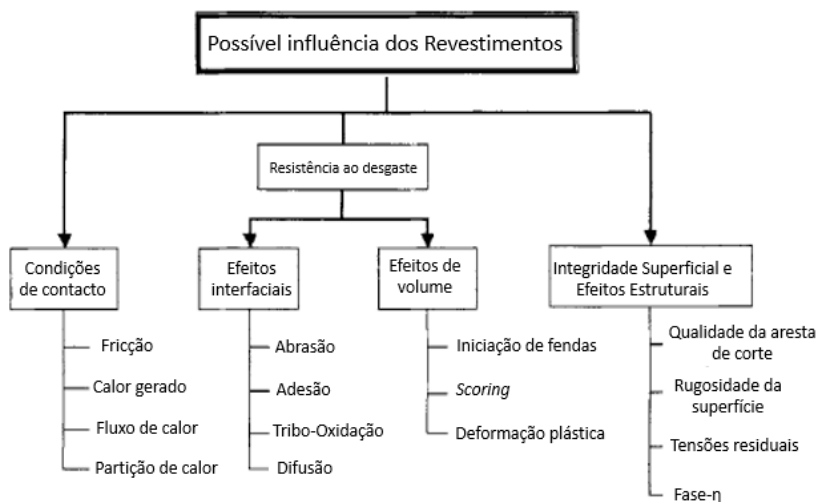


Figura 21 – Papel dos revestimentos no desempenho do processo (adaptado de [46])

### 2.2.1 Técnicas de revestimento de ferramentas: PVD e CVD

Como já definido anteriormente, o método de revestimento de ferramentas de corte, permitem obter resultados muito interessantes no processo de maquinagem [45].

No entanto, as técnicas de revestir ferramentas podem ser classificada, de modo geral, em duas categorias: processo de deposição química de vapor (CVD) e o processo de deposição física de vapor (PVD) [47, 48]. Na Tabela 3, encontra-se representada a classificação destas duas categorias.

Tabela 3 - Classificação dos métodos de revestimento (adaptado de [47])

Classificação	
<b>Deposição física em fase de vapor (PVD)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evaporação no vácuo (<i>vacuum evaporation</i>)</li> <li>• Deposição iónica (<i>ion plating</i>)</li> <li>• Projeção catódica (<i>sputtering</i>)</li> </ul>
<b>Deposição química em fase de vapor (CVD)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CVD em vácuo</li> <li>• CVD com ausência de vácuo</li> </ul>

- **Deposição física em fase de vapor (PVD)**

O processo por PVD ocorre no interior de uma câmara de vácuo, onde o material a ser depositado é previamente vaporizado e ionizado, formando um plasma [49, 50]. Com a criação de uma diferença de potencial, os iões no estado puro ou combinados com átomos de azoto e/ou carbono, são atraídos para o material de base, dando origem ao revestimento, cuja espessura é determinada pelo tempo de deposição [51].

Esta técnica é bastante utilizada para revestir ferramentas de corte com nitreto de titânio (TiN) [52], nitreto de titânio alumínio (TiAlN) [45], nitreto de crómio (CrN) [53], entre muitos outros.

Todos os processos de PVD são caracterizados pelas seguintes etapas:

- limpeza em ultrassons das peças a revestir;
- montagem das peças nos dispositivos de suporte;
- introdução das peças na câmara de vácuo para a realização do vácuo;
- limpeza das peças por bombardeamento iónico;
- aquecimento dos substratos;
- deposição do filme fino sólido;
- arrefecimento e desmontagem.

Como visualizado na Tabela 3, a diferença no processo PVD está na forma através de como o material é transformado em fase de vapor. Na Tabela 4 é demonstrado um resumo dos processos PVD existentes.

Tabela 4 - Comparação de diferentes processos de PVD (adaptado de [51], [54])

PVD	Características
<b>Evaporação no vácuo</b> ( <i>vacuum evaporation</i> )	<p>É considerado o processo mais simples e versátil, com equipamento de relativamente baixo custo. A evaporação é utilizada para gerar um plasma altamente ionizado, permitindo o revestimento dos substratos, com boa adesão, a temperaturas moderadas.</p> <p>Os filmes sólidos desenvolvidos deste processo apresentam como vantagem a sua forte adesão ao substrato e a sua elevada taxa de deposição. Contudo, apresenta o inconveniente de maiores rugosidades devido ao tamanho das partículas “arrancadas” dos alvos.</p>
<b>Projeção catódica</b> ( <i>Sputtering</i> )	<p>Nesta técnica, os átomos da superfície do alvo são ejetados através do bombardeamento de iões de um gás inerte (árgon) e transportados por meio de um plasma até à superfície do revestimento, onde se dá a condensação. Esse “arrancamento” de partículas do alvo é devido à colisão de iões produzidos que, devido à carga elétrica que possuem, são atraídos por este. Contudo, as partículas ejetadas do alvo, com movimento contrário ao das partículas incidentes, vão ser depositadas no substrato.</p> <p>Este processo apresenta uma temperatura de deposição baixa (inferior a 500°C) e têm a possibilidade de revestir materiais com baixo ponto de fusão. Contudo, apresenta o inconveniente da taxa de deposição ser mais lenta e em arestas ou furos, pode haver a dificuldade em uniformizar a espessura do filme de revestimento.</p>
<b>Deposição iónica</b> ( <i>ion plating</i> )	<p>Nesta técnica, o substrato é polarizado negativamente por uma corrente elétrica, para que se intensifiquem as forças de atração do material vaporizado para atingir o substrato.</p> <p>Apresenta uma melhor adesão do revestimento ao substrato, onde se podem realizar os revestimentos a temperaturas menores de deposição, assim como obter um maior controlo da estrutura do filme sólido.</p>

- **Deposição química em fase de vapor (CVD)**

O processo de revestimento por CVD, consiste no aquecimento (normalmente em temperaturas entre 500 e 1000°C) das ferramentas de corte num reator selado, contendo hidrogénio no estado gasoso, normalmente a baixa pressão [55, 56]. Os compostos voláteis são posteriormente adicionados ao hidrogénio para fornecer os constituintes metálicos e não metálicos que compõe o revestimento com cerca de 5 a 20 micrometros ( $\mu\text{m}$ ) [52]. Desta forma, o processo de CVD envolve a interação entre uma mistura de gases e, através do aquecimento do substrato, causa a decomposição química de alguns constituintes do gás, que formam assim um filme de revestimento [5].

Atualmente, foram desenvolvidas variantes do processo de CVD, de forma a oferecer soluções para gamas de aplicações distintas e uma maior versatilidade do processo [57].

As principais vantagens da deposição por CVD são [58]:

- capacidade de deposição em materiais refratários a temperaturas inferiores à sua temperatura de fusão;
- possível controlo da morfologia e do tamanho do grão;
- pode ser realizado à pressão atmosférica.

### 2.2.2 Tipos de revestimentos

Os revestimentos de ferramentas podem ter várias configurações (Figura 22), desde uma só camada que reveste o substrato, até mesmo um sistema multicamada. Assim sendo, os tipos de revestimento podem ser [59]:

- (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.

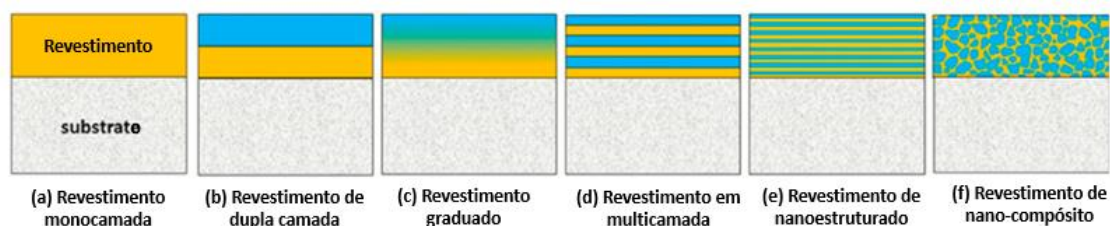


Figura 22 – Tipo de arquitetura dos revestimentos em substratos (adaptado de [59])

Esta subdivisão está interligada à concepção do revestimento, que significa que cada tipo está preparado para lidar com problemas diferentes. Desta forma, um aumento de camadas de revestimento contribui para aumentar a dureza do revestimento, assim como oferecer maior resistência à propagação de fissuras. Isto traz vantagens à ferramenta de corte uma vez que proporciona à mesma um desempenho reforçado.

Segundo Kainz [60], a aplicação de uma arquitetura de revestimentos em multicamada em dois materiais duros alternados, fornece uma ótima estratégia para melhorar as propriedades mecânicas dos revestimentos para a indústria de ferramentas de corte de metais. Assim sendo, realizou um estudo comparativo entre o comportamento dos revestimentos CVD de TiN/TiBN multicamada e monocamada. Deste estudo, concluiu que a resistência à fratura mostrava uma clara dependência, tanto da composição elementar como da arquitetura da camada do revestimento. Por outro lado, os ensaios micromecânicos de flexão realizados, permitiram concluir que as multicamadas de TiN/TiBN oferecem alto desempenho em aplicações de corte, em comparação com a monocamada de TiN e TiBN.

Os revestimentos aplicados a ferramentas de corte podem ser: nitretos, carbonetos, boretos e óxidos de transição (Figura 23).

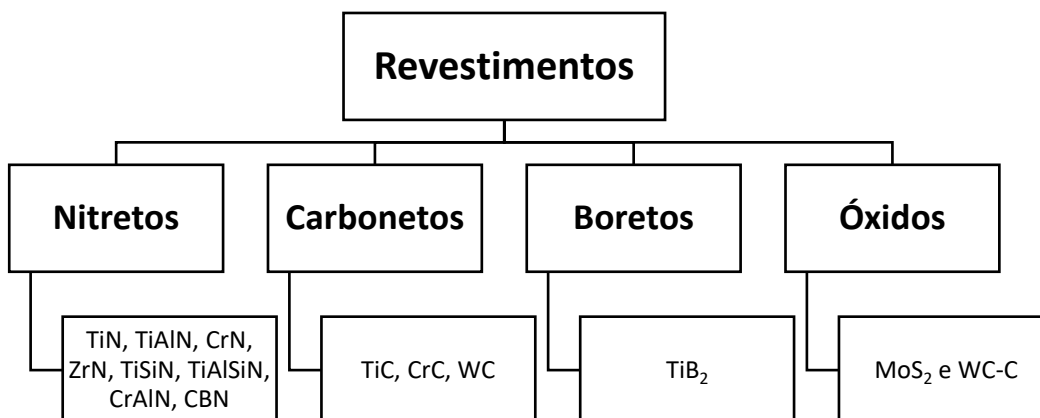


Figura 23 - Tipos de Revestimentos

### 2.2.2.1 Revestimento *Diamond Like Carbon* (DLC)

DLC (*Diamond Like Carbon*) é o termo dado à fase metastável de carbono amorfo [61]. Os filmes de DLC contêm configurações do tipo  $sp^3$  (fase de diamante) como as do C, o que lhes permite adquirir boas propriedades físicas e mecânicas, semelhantes às do diamante [62].

Dependendo do teor de hidrogénio e da proporção de células das camadas  $sp^2/sp^3$ , os revestimentos de DLC podem ser divididos em diferentes grupos, como mostra a Figura 24.

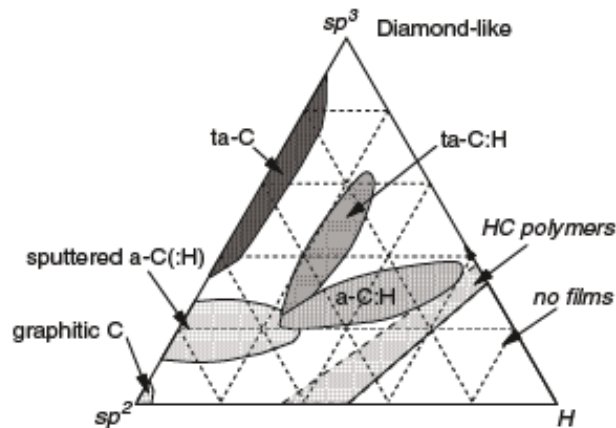


Figura 24 – Diagrama de fases ternário e diferentes conteúdos de hidrogênio das várias formas de DLC (adaptado de [63])

O diagrama de fases da Figura 24 mostra as fases que os revestimentos DLC podem adquirir. Este tipo de revestimento é caracterizado pela ligação dos átomos de C. No canto inferior esquerdo do diagrama, encontram-se as ligações de C -  $sp^2$ , que se encontram entre os planos cristalinos (que representam as ligações do tipo grafite), no canto inferior direito encontram-se as ligações de C - H, e no vértice superior encontram-se as ligações de C -  $sp^3$ , que estão localizadas em planos adjacentes (que representam as ligações do tipo diamante), como demonstrado na Figura 25. A película de DLC tem um átomo de C ligado à hibridização  $sp^2$  ou  $sp^3$ , com quantidades suficientes de hidrogênio [64].

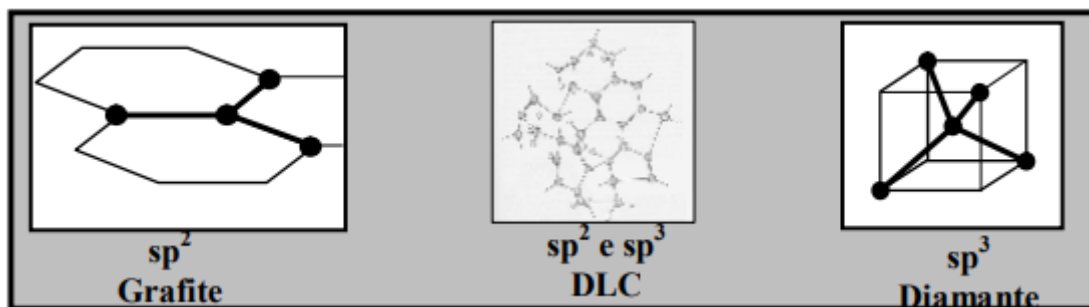


Figura 25 – Representação esquemática da ligação do átomo de C nos revestimentos DLC (adaptado de [65])

Com a procura de melhores resultados, o revestimento DLC é tipicamente utilizado em ferramentas, componentes de motores, e tem ocupado o seu espaço nos revestimentos de ferramentas de corte [66, 67].

Como revestimento para ferramentas de corte, os filmes de DLC têm ótimas propriedades tribológicas, uma vez que apresentam um baixo coeficiente de atrito e uma autolubrificação capaz de reduzir a adesão da apana na ferramenta de corte [53].

Com uma grande variedade de técnicas de deposição do revestimento de DLC, é possível conseguir uma grande variedade de propriedades físicas, mecânicas e

tribológicas [44]. A utilização destes revestimentos como multicamada com diferentes elementos de liga (Si, Cr e W, por exemplo), faz com que seja possível obter uma melhor adesão do filme de DLC e aumentar a gama de propriedades que este revestimento pode oferecer [68].

Na Figura 26 estão representadas fresas com revestimento DLC.



Figura 26 – Fresa com revestimento DLC (adaptado de [69])

Uma grande limitação do revestimento DLC é a sua instabilidade térmica, em que o seu comportamento ao desgaste é afetado pela temperatura. A temperatura está dependente do método de deposição, parâmetros, estrutura e composição do revestimento [70]. Vanhulsel *et al.* [71] estudaram o comportamento ao desgaste a altas temperaturas de um revestimento de DLC. Verificaram que o coeficiente de atrito e a resistência ao desgaste diminuem com o aumento da temperatura. A degradação de um revestimento de DLC ocorre para temperaturas superiores a 400°C.

Na maquinagem de ligas ferrosas, ocorre a decomposição do diamante (revestimento de DLC) em grafite, ou seja, uma redução da ligação C – sp<sup>3</sup> para C – sp<sup>2</sup> [56].

Yokota *et al.* [72] realizaram um estudo de maquinagem de torneamento ortogonal de uma liga de alumínio AA5052 em condições de contacto seco e utilizando ferramentas de corte revestidas com DLC e não revestidas (carboneto de tungstênio). Este estudo permitiu avaliar as forças de corte geradas no processo e verificar as vibrações existentes na face de ataque da ferramenta de corte, relacionando-as com o coeficiente de atrito da ferramenta. Do estudo, conclui-se que as forças de corte são menores para as ferramentas revestidas com DLC e o coeficiente de atrito da ferramenta revestida com DLC diminuiu de 0,8 para 0,3 nos primeiros 10 segundos de maquinagem (enquanto o coeficiente de atrito da ferramenta não revestida subiu de 0,8 para 1,1 nos primeiros 10 segundos de maquinagem).

### 2.2.3 Estudo do desgaste de ferramentas revestidas

A variedade de ferramentas de corte existente no mercado, torna difícil a escolha adequada a utilizar no processo de fresagem de um determinado material [73]. As ferramentas revestidas são colocadas à prova de forma a operarem em melhores condições de trabalho, nomeadamente a sua resistência ao desgaste. Assim sendo, a

Tabela 5 apresenta alguns estudos realizados ao desgaste de ferramentas revestidas em diferentes tipos de materiais.

Tabela 5 - Resumo de estudos do desgaste em ferramentas revestidas

Referência Bibliográfica	Descrição do Trabalho
<p>Martinho <i>et al.</i> (2007), [74]</p>	<p>Neste trabalho, realizou-se um estudo com ferramentas de corte com e sem revestimento diamantado num processo de maquinagem do ferro fundido cinzento DIN GG25. Foram realizadas nove combinações de velocidade e avanço, mantendo-se sempre constante a profundidade de corte. Os resultados mostraram que o desgaste ocorrido na ponta da ferramenta de insertos cerâmicos, foi tanto do tipo mecânico como químico. No desgaste mecânico, notaram-se problemas de abrasão e adesão. No desgaste químico, destacam-se problemas de difusão. As arestas de corte e as superfícies da ferramenta foram analisadas por microscopia eletrónica de varrimento (SEM/MEV).</p> <p>Do estudo, conclui-se que a vida dos insertos revestidos com diamante é mais longa do que a dos insertos sem revestimento, e que para a mesma velocidade de corte (500 m/min), o VB máximo da ferramenta revestida (para um avanço de 0,4 mm/rot) é aproximadamente igual ao VB mínimo dos insertos não revestidos (para um avanço de 0,1 mm/min).</p>
<p>Gouveia <i>et al.</i> (2016), [73]</p>	<p>Este estudo pretendia avaliar o desempenho de ferramentas de corte, analisando os mecanismos de desgaste na maquinagem de aço inoxidável duplex. Os ensaios foram realizados com dois comprimentos de corte diferentes, mantendo a velocidade de corte, a profundidade de corte axial e radial e o avanço por dente constante. Testaram-se ferramentas com números diferentes de lâminas (2, 3 e 4) e dois revestimentos (AlCrN e TiAlN), analisando-se o comportamento ao desgaste de cada comprimento de corte e medindo-se a rugosidade superficial da peça maquinada.</p> <p>Conclui-se que as ferramentas com quatro lâminas de corte apresentam melhores resultados na rugosidade superficial da peça em comparação com as ferramentas com duas ou três lâminas de corte. Este estudo permitiu também comparar o revestimento de AlCrN com o TiAlN, concluindo-se que este último apresentou melhores resultados em termos de desgaste do flanco (VB), em relação ao AlCrN, que apresentou um desgaste prematuro e severo. Assim sendo, os autores consideram um revestimento de TiAlN a escolha mais eficaz.</p>

<p>Silva <i>et al.</i> (2019), [75]</p>	<p>Neste trabalho, foram analisados insertos de carboneto de tungstênio revestidas pelos processos PVD e CVD, para estudar o comportamento num aço inoxidável super-duplex, e assim identificar os mecanismos de desgaste que afetam cada um dos revestimentos e a qualidade da superfície da peça. Ao longo dos vários testes efetuados, registou-se o nível de vibração, de forma a associar o tipo de revestimento ou falha do inserto ao nível de vibrações geradas na árvore da máquina. Após tudo isto, concluiu-se que as ferramentas revestidas com TiAlN por PVD, permitem a criação de superfícies de peças com menos rugosidade e apresentam um melhor comportamento de desgaste, evidenciando as vantagens deste tipo de revestimento em relação ao revestimento por CVD, de TiCN/TiN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, na maquinagem do aço inoxidável super-duplex (GX2CrNiMoN26-7-4).</p>
<p>Martinho <i>et al.</i> (2019) [52]</p>	<p>Neste estudo, os autores pretenderam avaliar o desempenho de dois insertos de corte com revestimentos PVD e CVD, utilizadas em desbaste na fresagem de um aço inoxidável duplex (X2CrNiMoCu25-6-3-3). Utilizaram-se parâmetros de corte recomendados pelo fabricante, mantendo-se inalterados em todos os testes. Foram avaliados os comportamentos das ferramentas de corte com revestimentos PVD (AlTiN - monocamada) e CVD (TiN/ TiCn/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - multicamada) em estudos de análise da rugosidade superficial, avaliação do desgaste da ferramenta e monitorização dos níveis de vibração. Conclui-se que os insertos de corte revestidas pelo processo CVD com (TiN/TiCn/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), apresentam melhor comportamento ao desgaste e maior eficácia em operações de desbaste, onde a qualidade superficial não é um fator importante. Já as ferramentas revestidas com AlTiN pelo processo PVD, apresentam boa qualidade superficial em processo de acabamento.</p>
<p>Sousa <i>et al.</i> (2021) [23]</p>	<p>Neste trabalho, foi realizado um estudo comparativo de ferramentas revestidas com TiAlN e TiAlSiN, em operações de fresagem numa liga de aço para ferramentas, W 1.2711. Os autores avaliaram a influência de vários parâmetros na rugosidade superficial produzida, forças de corte geradas durante o processo e no desgaste apresentado pelas ferramentas. Foi avaliada a influência do tipo da ferramenta, sendo testados dois: uma fresa de topo e outra esférica. Foi também variado o comprimento de corte e velocidade de corte, sendo testadas as ferramentas para valores de 2 e 4 metros de</p>

	<p>comprimento de corte e de 40 m/min, 80 m/min e 120 m/min, de velocidade de corte. Relativamente à influência do comprimento de corte, foi registado para todas as ferramentas que os valores ótimos de rugosidade superficial e desgaste são obtidos para um menor comprimento de corte, visto que um aumento deste parâmetro promove maior desgaste da ferramenta. Quanto à velocidade de corte, foram registados os melhores resultados para todas as ferramentas ensaiadas, para 80 m/min de velocidade de corte. Relativamente à geometria, para as fresas de topo, não foram registadas grandes diferenças nos resultados obtidos e no desgaste apresentado para as ferramentas revestidas com TiAlN e TiAlSiN, não justificando o uso do TiAlSiN. Todavia, as fresas esféricas que foram revestidas com TiAlSiN apresentaram os melhores resultados, em termos de valores mínimos de rugosidade e desgaste, quando comparadas com todas as outras ferramentas.</p>
Sousa <i>et al.</i> (2021) [76]	<p>Neste artigo, foi realizado um estudo comparativo de duas ferramentas revestidas com TiAlSiN por PVD, revestimentos obtidos por técnicas de deposição diferentes, um por <i>direct current magnetron sputtering</i> (dc MS) e outro por <i>high power impulse magnetron sputtering</i> (HiPIMS). Estas ferramentas foram utilizadas em ensaios de fresagem de uma liga de aço inoxidável duplex, LDX 2101. Foi avaliada a influência do comprimento de corte, avanço e técnica de deposição do revestimento na rugosidade superficial obtida e no desgaste apresentado pelas ferramentas. Relativamente aos valores de parâmetros utilizados, as ferramentas foram ensaiadas a 2 e 4 metros de comprimento de corte e para três condições de avanço, usando um valor de 479 mm/min e variando este por 25% (positivo e negativo). Os resultados obtidos foram muito semelhantes, visto que as ferramentas apenas diferiam na técnica de deposição utilizada para obter os revestimentos. Os valores ideais de rugosidade e desgaste foram obtidos para valores de comprimento de corte e de avanço de 2 m e 598,25 mm/min, respetivamente. O desgaste apresentado foi também bastante semelhante, com os dois tipos de ferramenta a exibir os mesmos mecanismos de desgaste e a registar as mesmas tendências. No entanto, a ferramenta revestida por HiPIMS produziu resultados ligeiramente melhores do que a revestida pela técnica convencional. Adicionalmente, estes revestimentos apresentam melhores propriedades de adesão aos substratos, o que melhora o comportamento ao desgaste dos revestimentos.</p>

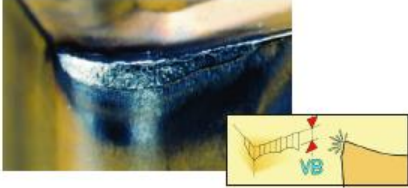
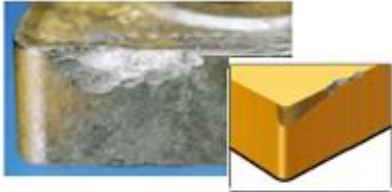
## 2.3 Desgaste, técnica de avaliação do desgaste e de superfícies

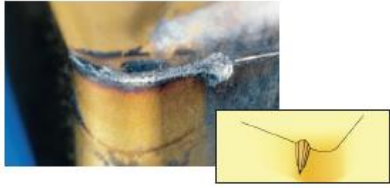


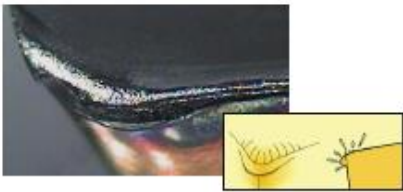

O desgaste de uma ferramenta de corte pode ser descrito como um processo de perda de partículas da ferramenta, diminuindo desta forma a sua vida útil. As interações podem ser de diversos tipos, entre a avara e a ferramenta, e entre a ferramenta e a peça a maquinar. O mecanismo de desgaste depende do material da ferramenta, da peça de trabalho, dos parâmetros de corte impostos ao processo, da avara resultante, do líquido de lubrificação/refrigeração, da geometria da ferramenta, entre outros [77].

### 2.3.1 Tipos de desgaste em ferramentas

O desgaste é muitas vezes difícil de visualizar a olho nu e a avaliação da vida útil da ferramenta fica um pouco condicionada ao critério do operador. Desta forma, os critérios e tipos de desgaste são tipificados, auxiliando na sua identificação, e indicando as possíveis causas para a sua ocorrência. A Tabela 6 apresenta os tipos de desgaste possíveis em ferramentas de corte.

Tabela 6 - Tipos de desgaste em ferramentas de corte (adaptado de [9])

Mecanismos/ Tipo de desgaste		Imagem	Descrição do desgaste
Abrasivo	Desgaste do Flanco		O desgaste de flanco é o tipo mais comum e o mais aceitável, uma vez que continua a oferecer vida útil e estabilidade à ferramenta de corte. Este desgaste ocorre devido à abrasão causada pelo contacto da ferramenta com certas partículas mais abrasivas que compõem o material da peça a maquinar.
Mecânico	Lascagem/Quebra da aresta		Este tipo de desgaste resulta da sobrecarga das tensões de compressão mecânica no processo de corte por arranque de avara. Estas tensões podem ser devidas ao contacto da avara com a ferramenta, profundidade de corte ou avanço muito elevado, aresta postiça de corte, vibrações ou desgaste em excesso.

<b>Adesivo</b>	Desgaste tipo entalhe		Este tipo de desgaste é caracterizado por microfissuras sucessivas na face de saída e no flanco da ferramenta, que conduzem à formação de microfraturas, afetando a superfície e a integridade da aresta de corte.
	Aresta postiça de corte		Este tipo de anomalia é caracterizado pela soldadura resultante da pressão da apra na face de ataque. As altas pressões são ideais para a formação da aresta postiça de corte. Este fenómeno é muito comum na maquinagem de materiais macios (aços com baixo teor em carbono, aços inoxidáveis e alumínio).
<b>Químico</b>	Formação de cratera		Este tipo de fenómeno ocorre na saída da ferramenta, devido à reação química entre o material da peça a maquinar e a ferramenta de corte. Uma formação excessiva de cratera pode resultar no enfraquecimento da aresta de corte, podendo levar ao colapso da mesma.
<b>Térmico</b>	Deformação plástica		A deformação plástica ocorre pelo amaciamento localizado do material da ferramenta de corte. Este fenómeno ocorre devido às altas temperaturas resultantes de altas pressões de corte.
	Fratura térmica		Este tipo de desgaste ocorre pela mudança repentina da temperatura da aresta de corte. A mudança de quente para frio, pode originar pequenas fraturas espaçadas perpendicularmente à aresta de corte.

### 2.3.2 Vida das ferramentas: critérios de fim de vida

O tempo de vida de ferramenta, é o período de tempo (em minutos), para o qual a aresta de corte, afetada pelo processo de arranque de apra, mantém de forma satisfatória a sua capacidade de corte. A ferramenta encontra-se em estado funcional até que o desgaste a torne inoperável.

No processo de fresagem, a vida da ferramenta também pode ser medida pelo trajeto da mesma, sendo a soma dos comprimentos maquinados com uma ferramenta de corte, no tempo entre operações de substituição [78].

- **Fórmula de Taylor: para a vida útil das ferramentas**

O desgaste do flanco da ferramenta de corte (VB) é frequentemente utilizado como critério, uma vez que apresenta uma elevada influência na precisão e rugosidade das superfícies maquinadas [79]. A Figura 27, mostra as curvas de desgaste VB em função do tempo, para várias velocidades de corte, assim como a construção da curva de vida útil, com uma representação da velocidade de corte em função da vida da ferramenta.

Taylor apresentou a equação (9):

$$V_c T^n = C \quad (9)$$

onde,  $V_c$  corresponde à velocidade de corte (m/min), T refere-se à vida da ferramenta (min) até desenvolver um determinado desgaste no flanco (VB), n diz respeito ao expoente que depende dos parâmetros de corte introduzidos no processo e C é uma constante. O valor de C é igual à velocidade de corte para  $T = 1$  min.

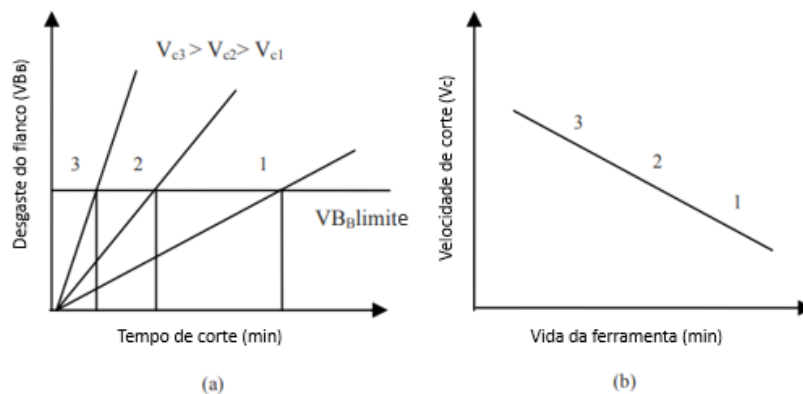


Figura 27 – Curva de: a) desgaste para as velocidades de corte 1, 2 e 3; b) vida (adaptado de [79])

Através da análise da Figura 27, é possível concluir que o desgaste do flanco aumenta com o tempo de utilização da aresta de corte da ferramenta. Por outro lado, quanto maior a velocidade, menor será a vida útil da ferramenta de corte.

Por outro lado, é necessário perceber que a vida útil da ferramenta depende de inúmeros fatores resultantes do próprio processo de maquinagem. Assim sendo, numa operação de acabamento, a precisão dimensional e a rugosidade superficial são alguns fatores a ter em conta na vida útil da ferramenta. Já nos desbastes, as forças de corte

excessivas e as vibrações, são fatores que podem comprometer a vida útil da ferramenta [79].

- **Critérios de fim de vida**

Em ambiente industrial, os valores teóricos para a vida útil das ferramentas de corte já são pré-determinados pelos fabricantes. Contudo, é necessário conhecer formas diversificadas para a análise da sua vida útil.

Desta forma, são apresentados critérios alternativos para a análise e gestão da vida útil de ferramentas, tais como [5, 77]:

1. Desgaste da ferramenta: desgaste está frequentemente interligado ao valor permitido do desgaste do flanco (VB);
2. Componente da força radial: o fim da vida útil da ferramenta de corte é verificado se a componente da força de corte radial aumentar repentinamente em 10% relativamente à sua componente original;
3. Rugosidade superficial: numa operação de acabamento, a vida útil da ferramenta é determinada pela rugosidade superficial da peça maquinada;
4. Faixa brilhante na peça: o fim de vida da ferramenta ocorre se uma faixa brilhante aparece na superfície maquinada (no caso dos aços) ou pontos escuros (no caso de ferro fundido);
5. Ruído: o sinal sonoro ruidoso produzido pela ferramenta de corte no arranque da apara é muitas vezes evidente. Este é consequência do fim de vida útil da ferramenta;
6. Tempo de corte: a acumulação do tempo de corte, pode ser uma forma de detetar o fim de vida útil da ferramenta. Normalmente, os fabricantes indicam qual o tempo de vida útil.

A Figura 28 apresenta alguns dos fatores que podem afetar a vida útil da ferramenta.

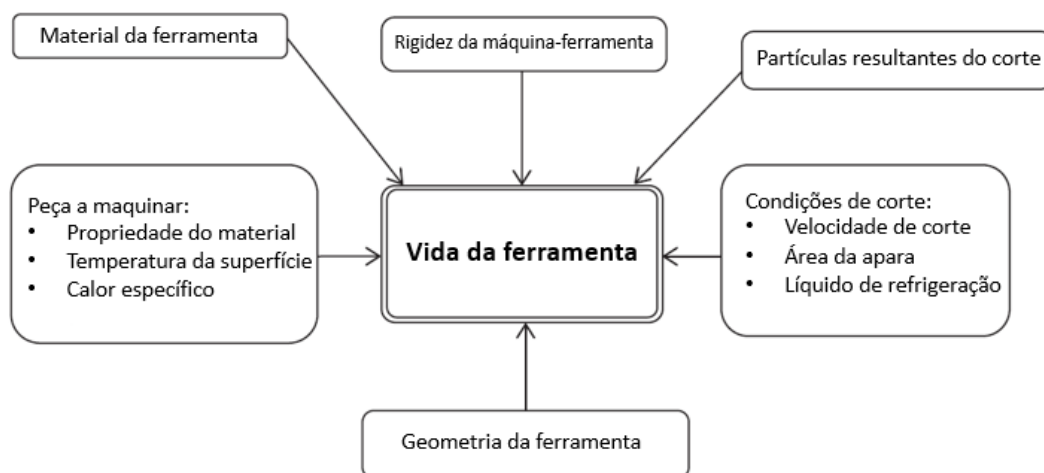


Figura 28 - Fatores que afetam a vida da ferramenta (adaptado de [77])

### 2.3.3 Caracterização e medição do desgaste por microscopia

Como já referido anteriormente, a velocidade de corte é um fator que influencia significativamente a intensidade de calor gerado na zona de corte. O desgaste das ferramentas é um processo que afeta a dinâmica da maquinagem da peça.

O desgaste do flanco da ferramenta (VB), causa um crescimento intenso das forças de atrito, fazendo aumentar as forças de corte no processo e comprometendo a vida útil das ferramentas.

Uma das formas de caracterizar e medir o desgaste de ferramentas por microscopia, é através da análise por “Microscopia Eletrónica de Varrimento”, normalmente designada por SEM (*Scanning Electron Microscopy*). O Microscópio Eletrónico de Varrimento - MEV, apresentado na Figura 29, é um equipamento versátil para efetuar análises e estudos de características estruturais e topográficas [80]. Este apresenta uma imagem tridimensional (3D) da amostra com grande profundidade de campo (muito superior à apresentada por sistemas óticos).



Figura 29 - Microscópio Eletrónico de Varrimento (MEV)

Na MEV, um feixe de eletrões incide diretamente na amostra, sem que ocorra nenhuma interação com a mesma. O feixe é acelerado com um potencial entre os quinze e os trinta kV e é equipado com um ou mais tipos de detetores de eletrões: o detetor de eletrões retrodifundidos (*Backscattered Electron Detector (BSE)*) e o detetor de eletrões secundários (*Secondary Electron Detector (SE)*). Estes, são exemplos de detetores que são responsáveis pela recolha e conversão de impulsos elétricos que dão origem às imagens [81].

Estes sistemas estão ainda normalmente dotados de um sistema de Espetroscopia de raios-X por dispersão de energia (EDS), utilizado para realizar uma análise elementar ou caracterização química de qualquer amostra, como apresentado na Figura 30 [80].

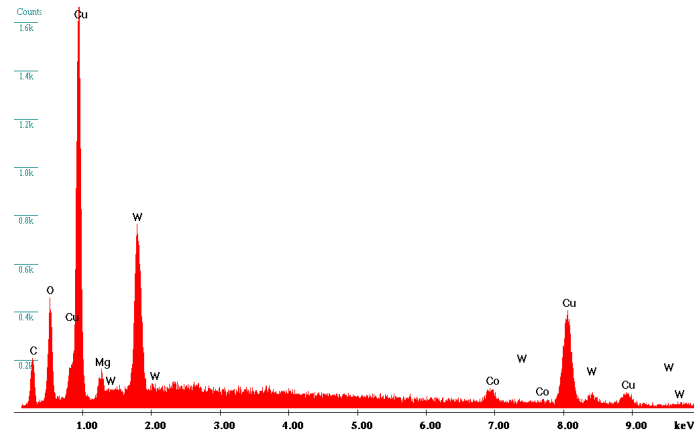


Figura 30 – Caracterização química de uma amostra por EDS [82]

Este equipamento apresenta um conjunto de lentes que, através de um campo eletromagnético, fazem convergir o feixe de eletrões, dirigindo-o para a amostra. O sistema de varrimento permite que se forme a imagem em estudo, linha a linha. Assim sendo, o feixe de eletrões percorre segundo x e y toda a amostra. A informação extraída do varrimento é posteriormente traduzida em imagem, como demonstrado na Figura 31.

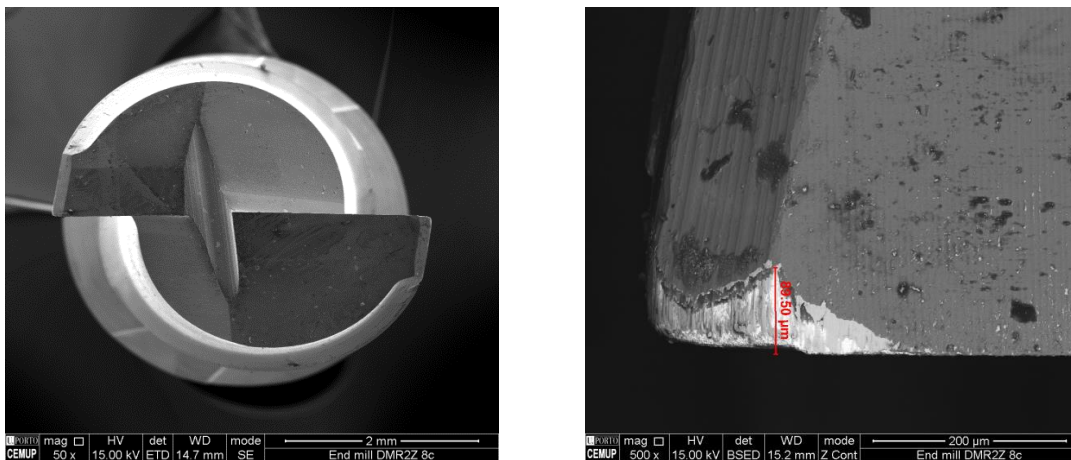


Figura 31 – Imagem extraída do MEV: a) Dormer de duas lâminas; b) Aresta de corte com desgaste (adaptado de [82])

A Figura 31 b) mostra o desgaste de uma fresa de duas lâminas, num ensaio de fresagem de um aço duplex [82]. Assim sendo, pela análise das imagens SEM, o autor considerou que a fresa apresenta um desgaste do tipo abrasivo, sendo também apresentado um desgaste do flanco da ferramenta. Por outro lado, também é possível visualizar desgaste por lascagem da aresta de corte da ferramenta. É possível verificar que uma lâmina apresentou um desgaste máximo do flanco de 89,50 µm. O autor considerou que a fresa, para além de não apresentar grande desgaste, desempenhou um bom trabalho, uma vez que apresentou resultados excelentes na rugosidade superficial da peça maquinada.

### 2.3.4 Avaliação da rugosidade da superfície maquinada

Uma superfície pode ser definida como uma fronteira entre a peça e o seu ambiente envolvente. A avaliação da rugosidade da superfície maquinada, é um fator considerado bastante importante, uma vez que os requisitos de precisão e operação assim o exigem [83]. A rugosidade da superfície depende de vários fatores que se agrupam da seguinte forma [5]:

1. Fatores geométricos;
2. Fatores do material a maquinar;
3. Fatores de vibração da ferramenta de corte e qualidade da máquina-ferramenta.

Para a análise da rugosidade da superfície, são fundamentais dois conceitos [83]:

- **Superfície nominal:** são as superfícies da peça de trabalho, como descritas nos desenhos, ou seja, sem qualquer irregularidade;
- **Superfície real:** trata-se da representação do perfil da superfície, como representado em instrumentos óticos de medição.

Todas as medições dos perfis de rugosidade devem ser realizadas na direção da irregularidade da superfície. No processo de fresagem, essa irregularidade superficial coincide com a direção normal do eixo do processo, ou seja, normal à velocidade de corte. Desta forma, as irregularidades mais baixas são apresentadas paralelas ao eixo do processo, enquanto as mais elevadas se encontram representadas na direção normal.

Na prática, qualquer processo de corte por arranque de apra deixa na superfície irregularidades, por maior que seja o controlo dos parâmetros ideais ao processo em causa. Assim sendo, Davim [12] refere mesmo ser impossível obter uma superfície absolutamente perfeita.

A técnica de avaliação da rugosidade superficial mais comum é realizada através da utilização de um rugosímetro com apalpador provido de ponta de diamante, de forma a realizar a leitura da superfície, como demonstrado na Figura 32 a). A Figura 32 b), representa o perfil de rugosidade, com diferentes parâmetros de medida associados à medição.

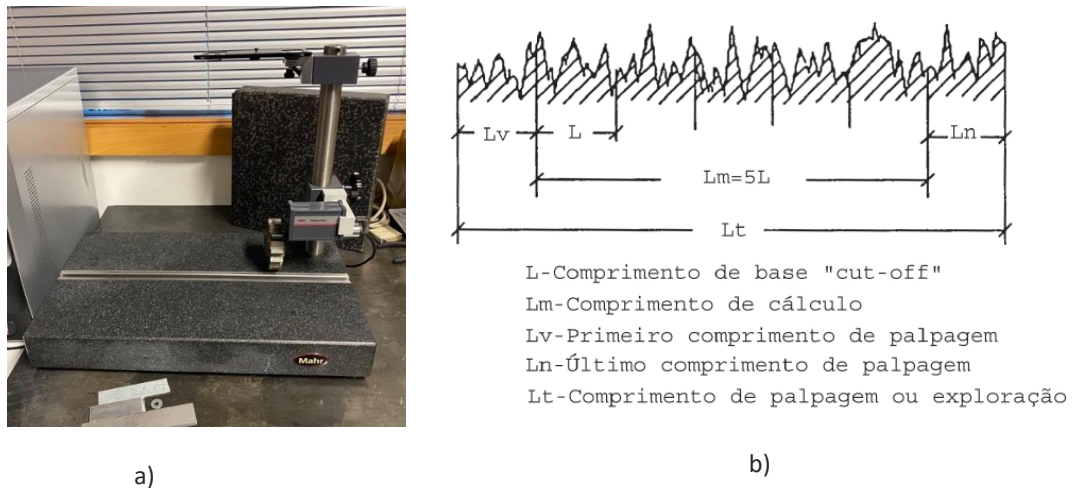


Figura 32 – Rugosimetria: a) Rugosímetro Mahr; b) Parâmetros de medida avaliados num perfil de rugosidade

(adaptado de [12])

A rugosidade superficial é afetada por variáveis que podem estar ligadas aos seguintes parâmetros: parâmetros de amplitude, parâmetros de espaçamento e parâmetros híbridos [83].

- Parâmetros de amplitude: dizem respeito às alturas dos picos e profundidades dos vales;
- Parâmetros de espaçamento: dizem respeito ao espaço do desvio do perfil na superfície;
- Parâmetros híbridos: combinam os parâmetros de amplitude com os parâmetros de espaçamento.

Dentro dos parâmetros de amplitude, a rugosidade média aritmética ( $R_a$ ) (Figura 33), expressa na equação (10), é a variável que resulta da média entre os valores absolutos das ordenadas  $Z(x)$  no interior do comprimento de base  $L_m$  [12].

$$R_a = \frac{1}{L_m} \int_0^{L_m} Z(x) dx \quad (10)$$

O valor de  $R_a$  é o mais utilizado como parâmetro de controlo do processo de fresagem, para determinar a qualidade superficial da peça maquinada. No entanto, como valor médio que representa, deverá ser complementado por outro que permita obter uma noção de quanto robusto é o perfil de rugosidade da superfície.

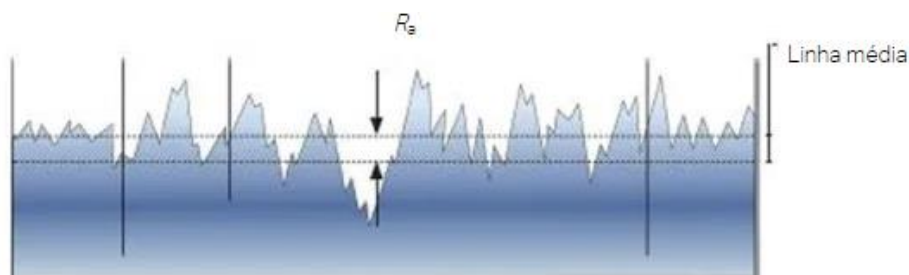


Figura 33 – Representação da rugosidade média aritmética ( $R_a$ )

A profundidade da rugosidade, é definida como a distância na vertical entre o maior pico e o maior vale, no comprimento de base (L), sendo representada por  $R_{zi}$ , quando se trata da profundidade individual da rugosidade e, por  $R_z$  quando se trata da profundidade média da rugosidade. Pela Norma DIN 4768,  $R_z$  é dado pela média aritmética da profundidade individual da rugosidade de cinco comprimentos de base (L) sucessivos, expressos na equação (11) e ilustrado na Figura 34.

$$R_a = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 R_{zi} \quad (11)$$

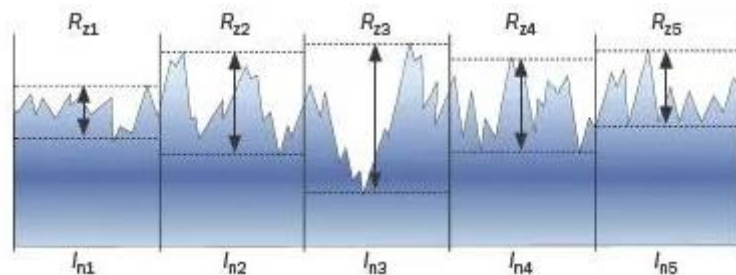


Figura 34 – Representação da profundidade média da rugosidade ( $R_z$ )

$R_{z\text{máx}}$ , trata-se da profundidade máxima da rugosidade que, pela norma DIN 4768, é definida como o valor máximo da profundidade individual da rugosidade ( $R_{zi}$ ) detetada no comprimento de cálculo ( $L_m$ ).

#### 2.3.4.1 Influência dos parâmetros de corte na rugosidade superficial

Um dos principais objetivos da maquinagem é reduzir os custos operacionais e aumentar a taxa de produção, mantendo ou até mesmo melhorando a qualidade superficial da peça.

A rugosidade da superfície é influenciada por vários fatores dos quais, os mais importantes são a velocidade de corte, o avanço, o desgaste da ferramenta e o tipo de ferramenta de corte [84].

Desta forma, são seguidamente dissecados os fatores que influenciam a qualidade da superfície:

- **Velocidade de corte**

O aumento da velocidade de corte tende a melhorar a qualidade superficial, principalmente nos metais com tendência à formação de aresta postiça de corte. As baixas velocidades de corte, são propícias à formação de aresta postiça de corte na ferramenta, e o metal depositado na sua face de ataque tende a sair sob a forma de

partículas. Estas microaparças resultantes aderem à ferramenta e à superfície maquinada, prejudicando o acabamento superficial e o desgaste da face de saída da ferramenta, que tende a prejudicar ainda mais o acabamento. Quando se eleva a velocidade de corte para valores acima do ideal, ocorre o aumento da temperatura de corte, provocando uma recristalização, com conseqüente mudança de fase da aresta postiça de corte, que perde assim a sua dureza, acabando por se deteriorar [12].

- **Velocidade de avanço**

A velocidade de avanço é a condição de corte que mais influencia o acabamento superficial da peça maquinada, uma vez que a ferramenta de corte deixa na superfície estrias e irregularidades que aumentam a rugosidade superficial [12].

- **Profundidade de corte**

A profundidade de corte é a condição que menos influencia a qualidade da superfície maquinada. Em operações de acabamento, geralmente a profundidade de corte é inferior a 1,5 mm. Contudo, quando a secção de corte é reduzida (menor que 0,05 mm<sup>2</sup>), o gume da ferramenta de corte pode encalçar o material em vez de arrancar, causando um mau acabamento superficial [12].

Tabela 7 - Estudo sobre a influência dos parâmetros de corte na rugosidade superficial da peça maquinada.

Referência Bibliográfica	Descrição do Trabalho
Oosthuizen <i>et al.</i> (2016), [84]	Neste trabalho, realizou-se um estudo para análise superficial de uma liga de titânio (Ti6Al4V), com alteração dos parâmetros de corte. Foi estudado o efeito da velocidade de corte ( $V_c$ ) e o avanço por dente ( $f_z$ ), na rugosidade da superfície. Os ensaios foram realizados numa máquina CNC de cinco eixos com fresas de dezasseis milímetros de diâmetro e com duas lâminas de corte. A velocidade de corte foi de 50, 70 e 90 m/min e os valores obtidos para a rugosidade média ( $R_a$ ) foram de 0,383; 0,289 e 0,114 $\mu\text{m}$ , respetivamente, conforme o aumento incremental do avanço por dente de 0,3; 0,4 e 0,5 mm. Registou-se que com o aumento da velocidade de corte e do avanço por dente, a rugosidade $R_a$ diminui. No entanto, a rugosidade superficial é menos sensível com a alteração do avanço por dente à medida que a velocidade de corte aumenta. Todos os valores de rugosidade superficial ( $R_a$ ), estavam abaixo do valor requerido, de 1,6 $\mu\text{m}$ . Conclui-se que a rugosidade superficial diminui com o aumento da velocidade de corte devido à menor deformação plástica na zona de cortes da ferramenta de corte.

## 2.4 Maquinagem de ligas de cobre

A pouca informação científica relativa ao processo de fresagem da liga cobre-berílio AMPCOLOY® 83 desperta o estudo aprofundado deste material. Assim sendo, o foco nas ligas de cobre é uma solução à obtenção de informação relativa a parâmetros e estratégias que sejam úteis para o trabalho em termos práticos.

### 2.4.1 Estudos de maquinagem em ligas de cobre

Sendo o AMPCOLOY® 83 uma liga de cobre-berílio, a Tabela 8 apresenta alguns resultados relativos à maquinagem em ligas de cobre.

Tabela 8 - Resumo de estudos na maquinagem de ligas de cobre

Referência Bibliográfica	Descrição do Trabalho
Shihan <i>et al.</i> (2020), [85]	<p>Neste trabalho, realizou-se um estudo à vibração gerada no processo de fresagem de topo de uma liga Monel K-400. Esta é uma liga de cobre-níquel que apresenta excelente resistência à corrosão e excelente dureza. O estudo à vibração que afeta a vida útil da ferramenta e, conseqüente, má qualidade superficial na peça maquinada, passou por selecionar os parâmetros de entrada, tais como, velocidade de rotação da árvore, velocidade de avanço e profundidade de corte axial.</p> <p>Foram realizados ensaios à vibração resultantes do processo de fresagem e as amplitudes foram registadas com diferentes velocidades de rotação da árvore da fresadora vertical CNC. O desgaste da ferramenta de corte foi também verificado em todos os ensaios. O fator que mais influencia o desgaste das ferramentas de corte é a velocidade de rotação da árvore. Realizou-se ensaios com 900, 1200, 1500 e 1800 rpm registando-se em todos os ensaios as amplitudes de vibração da ferramenta de corte.</p> <p>Do estudo conclui-se que o desgaste das ferramentas aumenta com o aumento da velocidade de rotação da árvore verificando-se que, para esse mesmo desgaste, a amplitude da vibração da ferramenta aumenta para o dobro.</p> <p>A velocidade de rotação da árvore ideal foi de 1500 rpm, onde se verificou que as vibrações resultantes do corte não afetam a qualidade superficial da peça maquinada nem o desgaste da própria ferramenta de corte.</p>

<p>Alagarsamy <i>et al.</i> (2020), [86]</p>	<p>Este estudo permitiu a otimização dos parâmetros de maquinagem durante o processo de fresagem de uma liga de latão C26130. Para essa otimização, utilizou-se o método de Taguchi.</p> <p>Os resultados da experiência mostram que para uma velocidade de rotação da árvore de 750 rpm, velocidade de avanço de 20 mm/rot e uma profundidade de corte axial de 1 mm, foi possível chegar ao nível onde a rugosidade superficial da peça a maquinar é mínima. Por outro lado, uma velocidade de rotação da árvore de 750 rpm, velocidade de avanço de 60 mm/rot e uma profundidade de corte axial de 0,75 mm, foi possível identificar o nível ótimo para se obter um desgaste mínimo na ferramenta de corte (fresa HSS 12 mm).</p> <p>Em conclusão, identificou-se que os parâmetros, velocidade de rotação da árvore e velocidade de avanço, são os que influenciam a rugosidade superficial da peça e o desgaste na ferramenta de corte.</p>
<p>Dehen <i>et al.</i> (2020), [87]</p>	<p>Este estudo centra-se no mesmo objetivo gizado para dissertação, sendo o principal foco a análise dos mecanismos de desgaste e os seus efeitos na qualidade da peça maquinada.</p> <p>O latão foi o material escolhido para a realização do estudo e as ferramentas de corte testadas foram de 1,5 mm de diâmetro e 4 navalhas de corte. Foram testadas ferramentas novas e ferramentas com desgaste. Experimentalmente investigou-se a influência dos parâmetros de corte do processo, estratégia e estado de desgaste da ferramenta na topografia da superfície resultante. Assim sendo, realizou-se um facejamento de topo na peça, sendo a velocidade de corte e a velocidade de avanço parâmetros variáveis, assim como a direção do corte. No processo de corte registou-se as forças de corte geradas, assim como a rugosidade obtida na superfície da peça. Como era de esperar, a rugosidade mostrou-se superior para ferramentas com desgaste. O parâmetro que demonstrou ter maior influência na rugosidade superficial da peça maquinada foi a velocidade de avanço. As forças de corte foram registadas e mostram uma tendência semelhante com a rugosidade da superfície resultante.</p> <p>Os resultados finais demonstraram uma influência significativa do desgaste da ferramenta, resultando em vibrações durante o processo de fresagem, que prejudicam a qualidade superficial e o aumento das forças de corte.</p>

Zuo *et al.*  
(2019)  
[88]

Neste estudo, comparou-se a tipologia de desgaste da ferramenta de corte revestida por PVD, no processo de fresagem de uma liga de Cu-Be forjada (C17200), a diferentes velocidades de corte: 200, 400, 600, 800 e 1000 m/min. Realizaram-se os ensaios com ferramentas de carboneto de tungstênio revestidas pelo processo PVD com TiAlN, testando-se a vida útil e o desgaste do flanco, de forma a descrever os mecanismos de desgaste da superfície da ferramenta. Estudou-se, através de cálculos teóricos e de resultados de outras experiências, o efeito adesivo no desgaste da ferramenta sob diferentes pressões superficiais, mostrando-se que a adesão e os mecanismos de desgaste são afetados pela velocidade de corte e pressão superficial. Os ensaios para análise dos mecanismos de desgaste foram realizados a uma velocidade de rotação da árvore de 10000 rpm, com variações da velocidade de corte de 100 m/min até 1000 m/min, e uma profundidade de corte radial de 0,5 mm. Dos resultados conclui-se que as forças de corte no flanco da ferramenta e a temperatura de corte aumentam com o aumento da velocidade de corte. À velocidade de corte de 600 m/min, foi registada a temperatura de 253°C, causando desgaste adesivo e desgaste do tipo entalhe na superfície da ferramenta. Relativamente às temperaturas de corte, foi possível concluir que as diferentes temperaturas máximas registadas, conduzem a processos naturais de recozimento na ferramenta, e transforma os seus materiais constituintes, provocando fissuras que comprometem a superfície da ferramenta.

#### 2.4.2 Liga de cobre: AMPCOLOY® 83

AMPCOLOY® 83 é o nome comercial dado à liga de cobre-berílio, que irá ser alvo de estudo num processo de desenvolvimento experimental. Esta liga é conhecida na União Europeia por Cu-Be 101C e é universalmente conhecida por liga Cu-Be C17200. É muito utilizada na engenharia por apresentar ótimas propriedades mecânicas, juntamente com uma elevada condutividade térmica e elétrica [89]. A Tabela 9, apresenta a composição química desta liga de Cu-Be.

Tabela 9 – Composição química da liga de cobre (AMPCOLOY 83) (adaptado de [89])

	<b>Cobalto + Níquel (Co) + (Ni)</b>	<b>Berílio (Be)</b>	<b>Outros</b>	<b>Cobre (Cu)</b>
<b>Percentagem (%)</b>	0,5%	1,9%	Máximo 0,5%	Restante

A liga de Cu-Be está disponível no mercado em fio, barra, tubo, placas, lingote, entre outros, como visualizado na Figura 35. Dependendo da sua forma, a liga forjada pode ser estampada, formada a frio por uma variedade de processos convencionais, ou até maquinada. Esta liga pode ser soldada por feixe de elétrons, por resistência, por arco de tungstênio e por fricção. Como acabamento, este tipo de liga pode ser banhado com estanho, níquel e metais preciosos, ou em alternativa pode ser simplesmente revestida por outros metais.



Figura 35 – Formas comerciais da liga de Cu-Be no mercado (adaptado de [90])

De um modo geral, a resistência à corrosão da liga de Cu-Be é semelhante à de outros materiais à base de cobre e ligas com elevado teor de cobre. O Cu-Be apresenta boa resistência à corrosão atmosférica. Embora possa manchar, não coloca em causa as propriedades mecânicas desta liga [91].

O diagrama de fases da liga de cobre-berílio, apresentado na Figura 36, mostra que a solubilidade do berílio no cobre aumenta à medida que a temperatura aumenta, de praticamente 0%wt (em peso) à temperatura ambiente, para mais de 2%wt a temperaturas acima dos 800°C [92]. Esta zona está representada à esquerda no diagrama, onde a liga se encontra em estado sólido (fase- $\alpha$ ), numa estrutura cúbica de face centrada como o cobre.

Para uma liga com um teor de Be entre os 1,8% e 2%, a liga encontra-se na fase- $\alpha$  entre os 720°C e os 860°C. Para utilizações industriais, a solução para um tratamento térmico é realizada entre os 750°C e os 800°C. Arrefecendo rapidamente após tratamento térmico, a solução supersaturada pode ser mantida à temperatura ambiente.

Nesta condição, a liga de Cu-Be é trabalhável e pronta para o endurecimento por precipitação, que lhe confere propriedades interessantes. Este endurecimento é realizado quando a liga tenta retornar às suas condições de equilíbrio, fase  $\alpha + \gamma$ . Desde que a estrutura que não se encontra em equilíbrio possa permanecer na condição de supersaturada, por tempo indeterminado à temperatura ambiente, o metal deve ser aquecido para acelerar a transformação.

A fase  $\gamma$  é a fase rica em Be (um átomo em dois), e apresenta uma estrutura cúbica de corpo centrado. A formação desta fase  $\gamma$  causa a redução do teor de Be contido na

matriz  $\alpha$ , que por sua vez melhora a condutividade térmica e elétrica. Ao mesmo tempo, produz a contração do material em cerca de 0,2% (em média).

O endurecimento estrutural é o resultado da precipitação da fase  $\gamma$ , que passa por fases intermédias. O endurecimento por precipitação é geralmente feito para temperaturas entre os 300°C e os 400°C, com tempos entre 15 minutos e 4 horas, dependendo do forno utilizado e das propriedades desejadas.

As propriedades mecânicas máximas, são obtidas por tratamento a 310-330°C por um período de 2 a 3 horas.

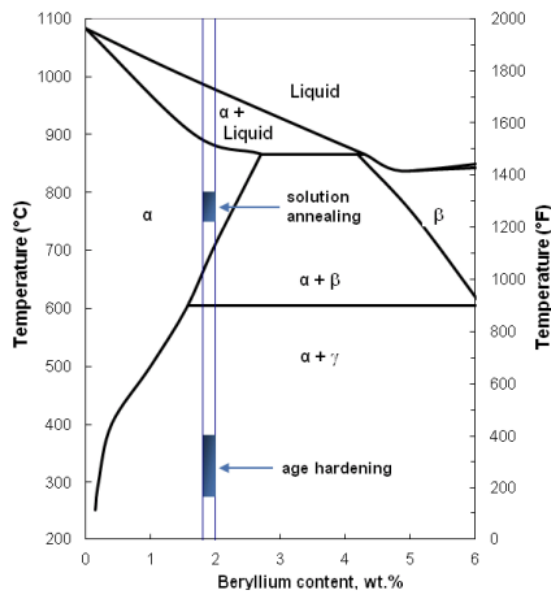


Figura 36 – Diagrama de fase da liga de Cu-Be (adaptado de [92])

#### 2.4.3 Aplicação do AMPCOLOY® 83 na indústria de moldes para injeção de plásticos

Esta liga de Cu-Be é muito utilizada nos projetos de engenharia, principalmente onde é necessária uma boa resistência ao desgaste com ótimas propriedades mecânicas.

Na indústria dos moldes para injeção, este material é muito utilizado para a fabricação de componentes (também chamados insertos) (Figura 37 a)), que fazem parte das zonas moldantes, onde o circuito de refrigeração do molde não consegue abranger e onde a refrigeração nesse mesmo local é extremamente importante. Numa zona de moldagem, onde a condutividade térmica é relevante, é muitas vezes utilizado este material para adquirir o maior rendimento possível no ciclo de injeção [91]. Por outro lado, por ser uma liga resistente ao desgaste, são muitas vezes utilizados insertos providos de movimento onde o deslizamento seja recorrente como, por exemplo, na realização de uma extração da peça no interior do molde de injeção. As ligas de Cu-Be são bastante utilizadas neste tipo de indústria, uma vez que apresentam entre duas a dez vezes mais condutividade térmica quando comparado com a dos aços mais

utilizados para a fabricação de moldes. Na Figura 37 b), é possível visualizar um molde de injeção de plástico com componentes em Cu-Be.

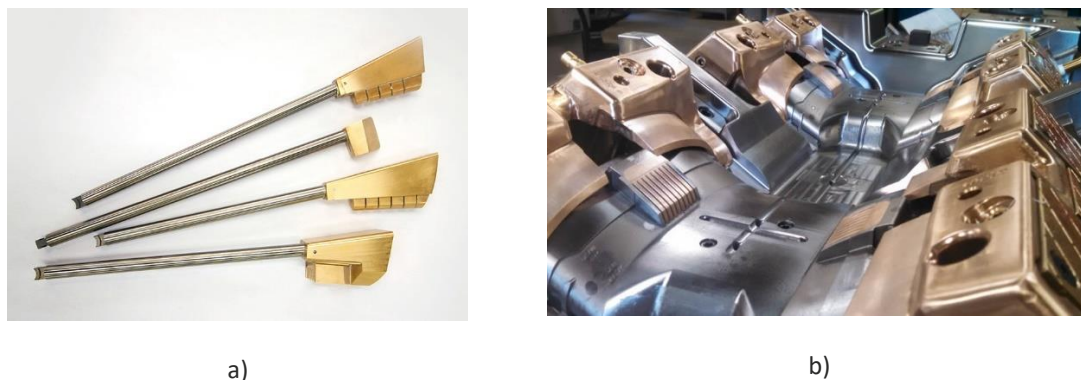


Figura 37 – Utilização do AMPCOLOY® 83: a) Inserto de extração (adaptado de [93]); b) Molde de injeção (adaptado de [94])

#### 2.4.4 Parâmetros de maquinagem do AMPCOLOY® 83

O AMPCOLOY® 83, apresenta uma maquinabilidade excelente e é bastante competitiva em relação a aços comuns.

É certo que a velocidade de corte depende muito das máquinas, da rigidez e estabilidade das ferramentas de maquinagem e do tipo de refrigeração e lubrificação a utilizar. Para a fresagem da liga de AMPCOLOY® 83, as ferramentas mais adequadas são as de carboneto de tungstênio e é recomendável a utilização de água com 5 a 10% de óleo solúvel, como refrigeração ao processo de maquinagem.

A Tabela 10 apresenta os parâmetros de fresagem recomendados pelo fabricante da liga AMPCOLOY® 83.

Tabela 10 - Parâmetros de fresagem AMPCOLOY® 83

	Parâmetro	Valor	Unidade
<b>Desbaste</b>	Velocidade de corte ( $V_c$ )	105 - 140	m/min
	Avanço por rotação ( $f_n$ )	0,1 – 0,25	mm/rot
	Profundidade de corte ( $a_p$ )	Até 4	mm
<b>Acabamento</b>	Velocidade de corte ( $V_c$ )	105 - 140	m/min
	Avanço por rotação ( $f_n$ )	0,05 – 0,1	mm/rot
	Profundidade de corte ( $a_p$ )	0,1 – 0,5	mm

# TRABALHO EXPERIMENTAL

3.1 Materiais

3.2 Métodos

3.3 Resultados



## 3 TRABALHO EXPERIMENTAL

Neste capítulo apresenta-se um conjunto de tópicos que retratam o desenvolvimento experimental do “Estudo Comparativo dos Mecanismos de Desgaste em Ferramentas Revestidas e Não Revestidas na Fresagem de uma Liga de Cobre-Berílio”.

O projeto e desenvolvimento do trabalho, exigiu a organização e implementação de conhecimentos teóricos que foram descritos no capítulo anterior.

### 3.1 Materiais

#### 3.1.1 Material a maquinar

O material utilizado para a realização do procedimento experimental foi o AMPCOLOY® 83 (Figura 38). Trata-se de uma liga de cobre-berílio forjada, fornecido em bloco com dimensões de 103 x 153 x 153 mm<sup>3</sup> e 21,4 kg, pela Ampco Metal Portugal Lda. (Porto, Portugal). A combinação das suas propriedades permite que o material seja um excelente condutor térmico e elétrico e, ao mesmo tempo, apresente uma excelente prestação em solicitações mecânicas como, por exemplo, deslizamento.



Figura 38 – Bloco de material (AMPCOLOY® 83)

Na Tabela 11 encontram-se as especificações do material segundo dados do fornecedor, e a sua ficha técnica encontra-se no Anexo 1: Ficha técnica – AMPCOLOY® 83.

Tabela 11 - Especificações do material tendo em conta diversas normas

EN	101C	A4/2
D	DIN 17672	W. Nr. 2.1247
F	AFNOR	UBe2
GB	BS	
USA	CDA RWMA	C17200 Class 4

A escolha deste material para a realização da tese de mestrado, recai no facto de ser uma liga muito pouco explorada em termos de investigação, juntamente com a sua elevada importância na indústria dos moldes para injeção de plástico para a fabricação de componentes para zonas moldantes dos moldes. O facto de não haver grandes estudos realizados originou um excelente desafio, com o objetivo de acrescentar conteúdo científico na área da Engenharia.

### 3.1.1.1 Composição química

A composição química do AMPCOLOY® 83 é apresentada na Tabela 12.

Tabela 12 - Composição química do material a maquinar

	<b>Cobalto + Níquel (Co) + (Ni)</b>	<b>Berílio (Be)</b>	<b>Outros</b>	<b>Cobre (Cu)</b>
<b>Percentagem (%)</b>	0,5%	1,9%	Máximo 0,5%	97,1%

### Alguns cuidados a ter na maquinagem do AMPCOLOY® 83 devido à composição química:

Como esta liga contém 1,9% de Berílio, é recomendado que, para qualquer operação que produza pó ou fumos, devem ser tomadas precauções de forma a evitar a inalação ou contacto com os olhos e pele. Geralmente, não apresenta risco durante o processo de maquinagem convencional (torneamento ou fresagem).

### 3.1.1.2 Propriedades mecânicas e físicas

A liga de cobre-berílio AMPCOLOY® 83, é uma liga com 1,9% de Berílio, que apresenta excelentes propriedades mecânicas, juntamente com uma boa condutividade térmica e elétrica. Por esta razão, é muito utilizada em diversas aplicações industriais, entre as quais: indústria da injeção, indústria automóvel, indústria aeroespacial, entre outras. Na Tabela 13 estão apresentadas as propriedades mecânicas e físicas para o material utilizado nos ensaios.

Tabela 13 - Propriedades mecânicas e físicas do AMPCOLOY® 83

Propriedades	Unidades	Valor
Resistência à tração	MPa	1140
Tensão de cedência	MPa	1000
Deformação	%	5
Módulo de elasticidade	GPa	128
Dureza Brinell	HBW 10/3000	360
Dureza Rockwell	HRC	38
Densidade	g/cm <sup>3</sup>	8,26
Coefficiente de expansão	10 <sup>-6</sup> /K	17,5
Condutividade térmica	W/m·K	106
Condutividade elétrica	m/Ω·mm <sup>2</sup>	12,8
Calor específico	J/g·K	0,38

### 3.1.2 Ferramenta de corte

#### 3.1.2.1 Geometria da ferramenta de corte

As ferramentas utilizadas na fresagem do AMPCOLOY® 83, foram fresas monobloco tóricas de carboneto de tungstênio com 4 mm de diâmetro, representada na Figura 39 a). As suas dimensões estão apresentadas na Tabela 14. A fresa possui três lâminas de corte ( $Z=3$ ), sendo a lâmina representada com o número 1 na Figura 39 b), a lâmina de corte ao centro. Nos ensaios, apenas foram utilizadas ferramentas desta geometria, sendo a principal diferença entre elas, a inclusão de um revestimento.

Todas as ferramentas utilizadas nos ensaios tiveram os seguintes critérios de seleção:

- Diâmetro de 4 mm, muito utilizado em operações de acabamentos nas peças;
- Fresas de metal duro (HM), as quais são muito resistentes e eficazes no processo de corte por arranque de apra;
- Fresas de metal duro (HM) revestidas (DLC/CrN), apropriadas para a maquinação de materiais macios e com tendência a formar aresta postiça, facilitando assim a remoção da apra e permitindo a eficiência do corte;
- Encabadouro de 6 mm, de forma a garantir maior robustez, evitando ao máximo as vibrações geradas na maquinação;
- Três navalhas de corte, sendo considerado o número ideal para a maquinação de materiais macios e ao mesmo tempo, conseguir melhores acabamentos superficiais na peça maquinação.

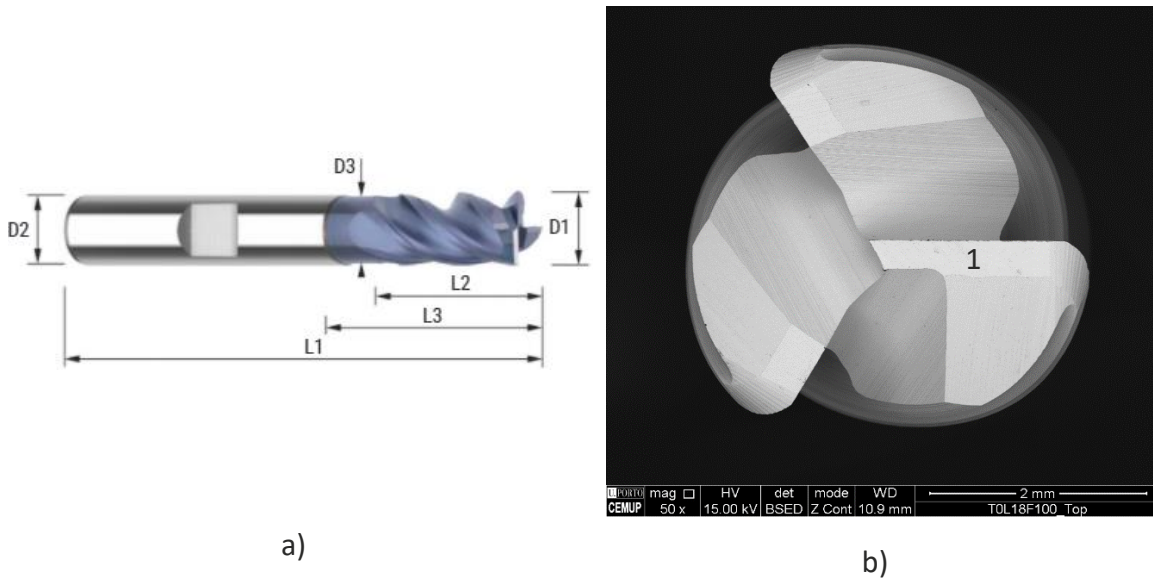


Figura 39 – Ferramenta de corte: a) Diagrama esquemático legendado; b) Lâminas de corte (vista de topo)

Tabela 14 - Dimensões da ferramenta de corte

Referência	D1	D2	L2	L1	D3	L3	Z	Ângulo de hélice ( $\lambda$ )
402.040.06	4	6	11	57	3,70	16	3	43°/47°

### 3.1.2.2 Material de base da ferramenta de corte

As ferramentas de corte usadas nos ensaios de maquinagem, utilizam como substrato um carboneto sinterizado de Tungstênio de grau 6110 com cerca de 0,3  $\mu\text{m}$  de grão e um aglutinante com 6%wt de Cobalto (WC-Co), fornecidas pela empresa InovaTools, S. A. (Marinha Grande, Portugal).



Figura 40 – Fresa não revestida

### 3.1.2.3 Revestimento da ferramenta de corte

O revestimento das ferramentas de corte foi selecionado com base no material a maquinar (liga de cobre-berílio AMPCOLOY® 83). Assim sendo, e visto que se tratava de um material macio (que tende a aderir à ferramenta de corte), foi escolhido um revestimento que funciona como autolubrificante. Este é do tipo multicamada, com subcamadas de nitreto de cromo (CrN) e top layer de *Diamond Like Carbon* (DLC). O revestimento foi realizado pela empresa TEandM (Coimbra, Portugal), utilizando um equipamento CemeCom CC800 / 9ML PVD *Unbalanced Magnetron Sputtering*.



Figura 41 – Fresa revestida

### 3.1.3 Sistema de aperto da ferramenta de corte

Para fixação da ferramenta, foram utilizados diversos componentes como pode ser visualizado na Figura 42. Estes são compostos por um cone ISO40 DIN69871, Porta-Piças ER32 H70, um tirante ISO 7388-2 e uma pinça ER DIN 6499.



a)

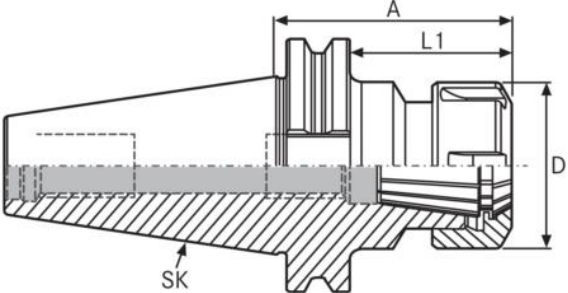
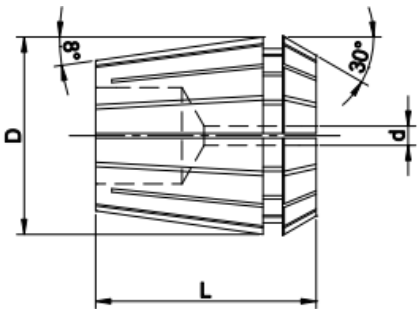
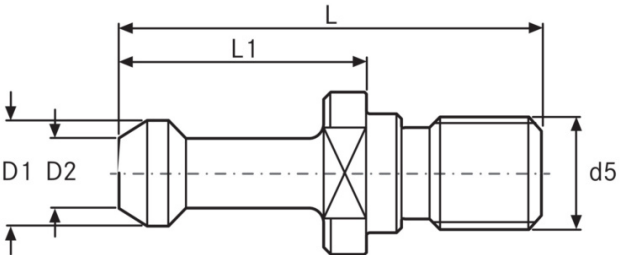


b)

Figura 42 – Sistema de Aperto Ferramenta DIN 6499: a) Cone Porta Piças ER-32; b) Ferramenta de corte fixada

Na Tabela 15, encontram-se representados os componentes que fazem parte do sistema de aperto da ferramenta de corte à árvore da máquina.

Tabela 15 - Especificações dos componentes de fixação da ferramenta de corte

<p style="text-align: center;"><b>Cone</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>ISO40 DIN69871 Porta-Piças ER32</b></p>										
	<table border="1"> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;"><b>A</b></td> <td style="text-align: center;">70 mm</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><b>L1</b></td> <td style="text-align: center;">50 mm</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><b>D</b></td> <td style="text-align: center;">50 mm</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><b>SK</b></td> <td style="text-align: center;">40</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><b>Peso</b></td> <td style="text-align: center;">1 kg</td> </tr> </tbody> </table>	<b>A</b>	70 mm	<b>L1</b>	50 mm	<b>D</b>	50 mm	<b>SK</b>	40	<b>Peso</b>	1 kg
<b>A</b>	70 mm										
<b>L1</b>	50 mm										
<b>D</b>	50 mm										
<b>SK</b>	40										
<b>Peso</b>	1 kg										
<p style="text-align: center;"><b>Piça</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>ER 32 DIN6499</b></p>										
	<table border="1"> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;"><b>L</b></td> <td style="text-align: center;">40 mm</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><b>D</b></td> <td style="text-align: center;">33 mm</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><b>d</b></td> <td style="text-align: center;">5 - 6 mm</td> </tr> </tbody> </table>	<b>L</b>	40 mm	<b>D</b>	33 mm	<b>d</b>	5 - 6 mm				
<b>L</b>	40 mm										
<b>D</b>	33 mm										
<b>d</b>	5 - 6 mm										
<p style="text-align: center;"><b>Tirante</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>ISO 7388-2</b></p>										
	<table border="1"> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;"><b>D1</b></td> <td style="text-align: center;">17 mm</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><b>D2</b></td> <td style="text-align: center;">10 mm</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><b>L</b></td> <td style="text-align: center;">57 mm</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><b>L1</b></td> <td style="text-align: center;">32 mm</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><b>D5</b></td> <td style="text-align: center;">M16</td> </tr> </tbody> </table>	<b>D1</b>	17 mm	<b>D2</b>	10 mm	<b>L</b>	57 mm	<b>L1</b>	32 mm	<b>D5</b>	M16
<b>D1</b>	17 mm										
<b>D2</b>	10 mm										
<b>L</b>	57 mm										
<b>L1</b>	32 mm										
<b>D5</b>	M16										

## 3.2 Métodos

### 3.2.1 Revestimento das ferramentas

Para a aplicação do revestimento nas ferramentas de corte, foi utilizado o método PVD, através de um equipamento CemeCon CC800 / 9ML PVD *Unbalanced Magnetron Sputtering*, como visualizado na Figura 43.



Figura 43 – CemeCon CC800 / 9ML PVD *Unbalanced Magnetron Sputtering*

Para a realização da deposição do revestimento, foi necessária uma limpeza com acetona em banho de ultrassons, durante 15 minutos. Após finalizado, a acetona foi mudada e procedeu-se novamente a um banho em ultrassons durante 5 minutos, para concluir o processo de limpeza.

Posteriormente ao processo de limpeza das ferramentas, estas foram montadas num suporte próprio, onde, com exceção do encabadouro, foi exposta ao processo de deposição do revestimento. De maneira a tornar o revestimento da superfície da ferramenta o mais homogéneo possível, estas foram montadas num suporte com base rotativa na câmara de deposição do equipamento, que se movimenta a 1 rpm durante o tempo de deposição.

Os parâmetros utilizados no revestimento das ferramentas de corte, encontram-se na Tabela 16.

Tabela 16 - Parâmetros utilizados na deposição dos revestimentos

Parâmetro	Nitreto de Crómio (CrN)	DLC
Pressão de trabalho	600 MPa	600 MPa
Bias	-60V	-75V
Material do alvo	Crómio	Grafite
Quantidade de material alvo	3	1
Densidade de corrente do alvo	9 W/cm <sup>2</sup>	13,5 W/cm <sup>2</sup>
Tempo	1,5 horas	2,5 horas

### 3.2.2 Centro de maquinagem

O centro de maquinagem utilizado para a realização dos ensaios de fresagem do AMPCOLOY® 83 é da marca HAAS, modelo VF-2 (Figura 44), localizado no Laboratório de Tecnologia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP).



Figura 44 – Centro de Maquinagem – HAAS VF-2

#### 3.2.2.1 Especificações técnicas do centro de maquinagem

As especificações técnicas do centro de maquinagem HAAS VF-2 estão representadas na Tabela 17.

Tabela 17 – Especificações técnicas: HAAS VF-2 (adaptado de [95])

<b>Cursos</b>	<b>S.A.E</b>	<b>Métrico</b>
Eixo X	30"	762 mm
Eixo Y	16"	406 mm
Eixo Z	20"	508 mm
Do nariz da árvore à mesa (~ máx)	24"	610 mm
Do nariz da árvore à mesa (~ min)	2"	102 mm
<b>Mesa</b>	<b>S.A.E</b>	<b>Métrico</b>
Comprimento	36"	914 mm
Largura	14"	356 mm
Largura da ranhura T	5/8"	16 mm
Distância do centro da ranhura T	4.92"	125 mm
Número de ranhuras T padrão	3	3
Peso máximo na mesa (distribuição uniforme)	3000 lb	1361 kg
<b>Árvore</b>	<b>S.A.E</b>	<b>Métrico</b>
Potência máxima	30 hp	22,4 kW
Velocidade máxima	8100 rpm	8100 rpm
Torque máximo	90 ft-lbf @ 2000 rpm	122 Nm @ 2000 rpm
Torque máx. com caixa de transmissão opcional	250 ft-lbf @ 450 rpm	339 Nm @ 450 rpm
Cone	CT ou BT 40	CT ou BT 40
Lubrificação do rolamento	Ar / Injeção de óleo	Ar / Injeção de óleo
Líquido de refrigeração	Liquid Cooled	Liquid Cooled
<b>Avanços</b>	<b>S.A.E</b>	<b>Métrico</b>
Corte máximo	650 ipm	16,5 m/min
Rápidos em X	1000 ipm	25,4 m/min
Rápidos em Y	1000 ipm	25,4 m/min
Rápidos em Z	1000 ipm	25,4 m/min
<b>Motores dos eixos</b>	<b>S.A.E</b>	<b>Métrico</b>
Impulso máximo X	2550 lbf	11343 N
Impulso máximo Y	2550 lbf	11343 N
Impulso máximo Z	4200 lbf	18683 N
<b>Troca ferramentas</b>	<b>S.A.E</b>	<b>Métrico</b>
Tipo	Carousel	Carousel
Capacidade	20	20

Diâmetro máximo da ferramenta (cheio)	3,5"	89 mm
Peso máximo da ferramenta	12 lb	5,4 kg
Ferramenta a ferramenta	4,2 s	4,2 s
Apara a apara (média)	4,5 s	4,5 s
<b>Ar</b>	<b>S.A.E</b>	<b>Métrico</b>
Capacidade de refrigeração	55 gal	208 L
Ar necessário	4 scfm @ 100 psi	113 L/min @ 6,9 bar
Pressão mínima do ar	80 psi	5,5 bar

### 3.2.3 Sistema de fixação da peça

Para a fixação do bloco de AMPCOLOY® 83 foi utilizada uma prensa de precisão manual da marca CHICK, modelo OneLock, com abertura máxima de 200 mm. A prensa foi fixa à mesa do centro de maquinagem, como visualizado na Figura 45.

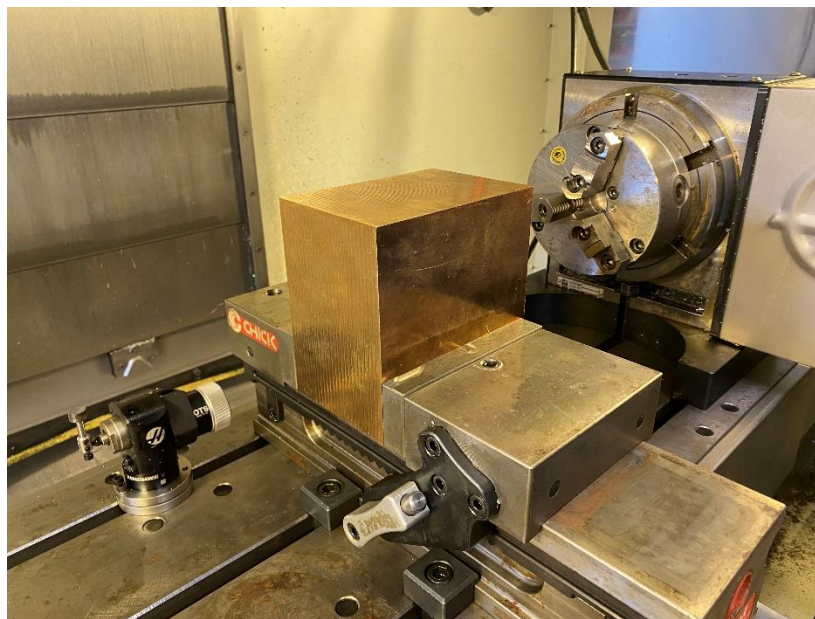


Figura 45 – Prensa de precisão manual CHICK OneLock

### 3.2.4 Posicionamento zero-peça no centro de maquinagem

O posicionamento do zero-peça no centro de maquinagem foi realizado com a tecnologia de apalpador de contacto com transmissão ótica da marca Renishaw (Reino Unido, Inglaterra) e modelo OMP40, como apresentado na Figura 46.

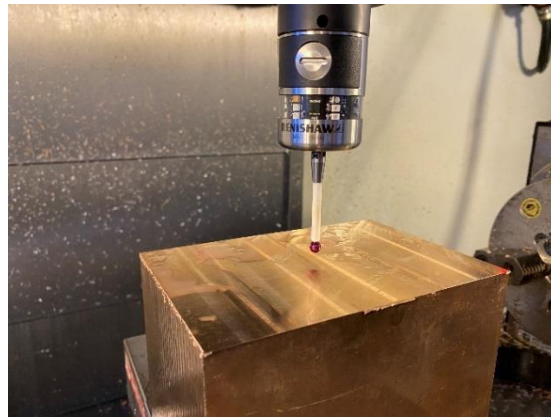
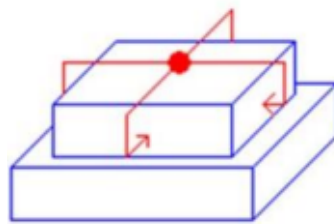
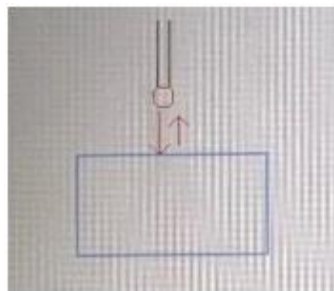


Figura 46 – Apalpador por contacto Renishaw OMP40

A sonda foi montada na árvore do centro de maquinagem e a atribuição do zero-peça nos eixos X e Y, foi realizada segundo um programa designado “*Rectangle Block*”, demonstrado na Figura 47, através do controlador do centro de maquinagem. Neste programa, colocou-se a sonda o mais próximo possível do centro do bloco de material e próximo da sua superfície. Atribuiu-se no controlador do centro de maquinagem os valores aproximados do comprimento em X e da largura em Y, assim como o valor aproximado da altura que a ponta da sonda se encontra da superfície da peça. Iniciou-se o ciclo de centragem e a sonda deslocou-se tocando nos pontos correspondentes à atribuição do zero-peça em X e em Y.

Figura 47 – Modo de atuação do programa “*Rectangle Block*”

Para determinar o zero-peça segundo o eixo Z, foi utilizado o programa “*Single Surface*”, como demonstrado na Figura 48. Colocou-se a sonda próxima da superfície da peça e inseriu-se no controlador a distância aproximada a que a ponta da sonda se encontra da peça. Iniciou-se o respetivo ciclo e a sonda efetuou o contacto para atribuição do zero-peça no eixo Z.

Figura 48 – Programa “*Single Surface*”

### 3.2.5 Medição das ferramentas

A medição do comprimento e diâmetro das ferramentas de corte, foi efetuado utilizando o sistema OTS (*Optical Tool Sensor*) da marca Renishaw (Reino Unido, Inglaterra), como apresentado na Figura 49.



Figura 49 – Sistema de medição de ferramenta OTS da Renishaw

### 3.2.6 Plano de ensaios

Com o objetivo de caracterizar os mecanismos de desgaste em ferramentas de corte revestidas e não revestidas, e de avaliar o estado da superfície maquinada, o plano foi dividido em duas fases. Numa primeira fase, foram realizados ensaios preliminares com o intuito de se verificar o ponto de partida dos parâmetros mais eficazes para a obtenção dos ensaios definitivos e, posteriormente, realizar então os ensaios definitivos.

#### 3.2.6.1 Ensaios de maquinagem preliminares

Estes foram os ensaios de teste para verificar qual o comportamento da ferramenta no seu processo de corte, atendendo aos parâmetros do fabricante. Estes ensaios foram realizados apenas em quatro ferramentas, duas revestidas e duas não revestida. A sua realização permitiu avaliar a extensão do desgaste para diferentes comprimentos de corte, e ajudou no ajuste da largura de corte, com vista a otimizar a rugosidade.

Os ensaios preliminares permitiram decidir que nos ensaios definitivos, as análises das ferramentas seriam apenas realizadas até um comprimento de corte de 48 metros, uma vez que ultrapassado este valor, a vida útil da ferramenta tende a diminuir drasticamente.

A profundidade de corte radial também foi possível otimizar, através dos ensaios preliminares. Inicialmente foi utilizada uma profundidade de corte radial de 70% do diâmetro da ferramenta. Durante os ensaios, foi notório que a ferramenta deixava na peça maquinada uns pequenos relevos que comprometiam a rugosidade superficial. Posto isto, foi possível otimizar a profundidade de corte radial para aproximadamente 60% do diâmetro da ferramenta. Assim sendo, foi possível obter superfícies com um excelente acabamento superficial.

### 3.2.6.2 Ensaios de maquinagem definitivos

Os ensaios de maquinagem foram realizados com o auxílio de um centro de maquinagem CNC HAAS VF-2, que atinge uma rotação máxima de 10 000 rpm. A ferramenta de corte foi fixa à árvore da máquina, com a utilização de um cone porta-pinças ISO40 DIN69871, uma pinça ER32 DIN6499 e um tirante ISO 7388-2. Para fixação do bloco de material à mesa da máquina, foi utilizada uma prensa de precisão manual com abertura máxima de 200 mm.

A estratégia de maquinagem utilizada nos ensaios foi delineada de modo a garantir maiores distâncias de corte, ou seja, aproveitar o menor número de passagens com maior distância de corte da ferramenta. O *software* CAD utilizado para a realização do programa foi o *Fusion 360*. Como representado na Figura 50, é realizada uma fresagem de topo onde a entrada da ferramenta é realizada perpendicularmente e exterior à aresta da peça, efetuando um programa linear de facejamento ao longo da sua face maior, com extensão à saída de 2 mm.

A maquinagem foi realizada com a inclusão de um lubrificante/refrigerante na zona de contacto da ferramenta com o material, utilizando um fluído de corte contínuo. Este é composto por uma emulsão de 5%, ou seja, 5% de óleo solúvel e 95% de água.

Os diferentes parâmetros recomendados pelo fabricante e utilizados nos ensaios de maquinagem, podem ser visualizados na Tabela 18. A nomenclatura das ferramentas foi organizada de forma a ser fácil a sua identificação. Assim sendo, TxLyFz é a identificação da referência da ferramenta de corte. De forma a identificar a ferramenta revestida da não revestida, é atribuído um valor à letra x, onde o valor 0 representa não revestida e 1 representa revestida. Relativamente ao comprimento de corte, é representado pela letra L e pode assumir o valor de 18, 36 e 48, que representam os metros de comprimento de corte realizados pela ferramenta. Por último, a letra F representa a velocidade de avanço, podendo tomar como valores 350, 750 ou 1500 mm/min.

A profundidade de corte axial utilizada foi de 0,5 mm e a profundidade de corte radial foi de 2,5 mm (aproximadamente 60% do diâmetro da ferramenta). A velocidade de corte e a velocidade de rotação da árvore mantiveram-se inalteradas nos 126 m/min e 10 000 rpm, respetivamente, fazendo-se variar a velocidade de avanço e o comprimento de corte, de forma a verificar a sua influência nos mecanismos de desgaste das ferramentas.

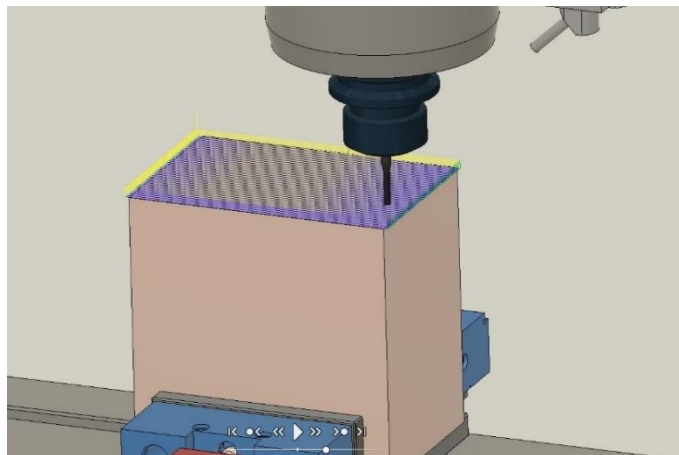


Figura 50 – Simulação no *software Fusion 360* da estratégia de maquinagem utilizada nos ensaios

Os primeiros ensaios foram realizados em três ferramentas não revestidas, utilizando uma velocidade de avanço de 750 mm/min e um comprimento de corte de 18, 36 e 48 m, no primeiro, segundo e terceiro ensaios, respetivamente. Entre cada intervalo de ensaios, a análise da rugosidade superficial foi realizada (procedimento este que será descrito mais à frente neste capítulo). Seguidamente, foram realizados os ensaios em mais três ferramentas não revestidas, utilizando uma velocidade de avanço de 1500 mm/min e um comprimento de corte de 18, 36 e 48 m, no primeiro, segundo e terceiro ensaios, respetivamente. Da mesma forma, os resultados das rugosidades superficiais foram retirados entre intervalos de cada ensaio.

Para concluir os ensaios de ferramentas não revestidas, e com a finalidade de se estudar a tendência do desgaste com a redução da velocidade de avanço, três ferramentas foram ensaiadas utilizando uma velocidade de avanço de 350 mm/min para os diferentes comprimentos de corte (até 48 metros), medindo a rugosidade superficial da peça maquinada.

Cada ensaio foi repetido três vezes, de forma a dissipar possíveis erros de leitura ou fenómenos inesperados/aleatórios. Este procedimento permitiu que fossem extraídos os resultados médios dos valores em análise.

O mesmo procedimento foi repetido para os ensaios das ferramentas revestidas, de forma a verificar e comparar quais os mecanismos de desgaste nas ferramentas de corte, a fim de se chegar a uma conclusão de qual a melhor ferramenta para a maquinagem do AMPCOLOY® 83. Estes ensaios permitiram verificar a evolução do desgaste das ferramentas de corte sob diferentes velocidades de avanço, permitindo também relacionar o comprimento de corte com o valor da rugosidade superficial da peça maquinada.

Tabela 18 - Parâmetros utilizados nos ensaios de maquinagem para cada ferramenta de corte

Ref. TxLyFz x – Revestimento 0 – Não revestida 1 – Revestida y – comp. de corte z – vel. de avanço	Revestimento	Velocidade de corte ( $V_c$ )	Velocidade de avanço ( $V_f$ )	Profundidade de corte axial ( $a_p$ )	Profundidade de corte radial ( $a_e$ )	Comprimento de corte
		[m/min]	[mm/min]	[mm]	[mm]	[m]
		<b>TOL18F750</b>	Não revestida	126	750	0,5
<b>TOL36F750</b>	Não revestida	126	750	0,5	2,5	36
<b>TOL48F750</b>	Não revestida	126	750	0,5	2,5	48
<b>TOL18F1500</b>	Não revestida	126	1500	0,5	2,5	18
<b>TOL36F1500</b>	Não revestida	126	1500	0,5	2,5	36
<b>TOL48F1500</b>	Não revestida	126	1500	0,5	2,5	48
<b>TOL18F350</b>	Não revestida	126	1500	0,5	2,5	18
<b>TOL36F350</b>	Não revestida	126	1500	0,5	2,5	36
<b>TOL48F350</b>	Não revestida	126	1500	0,5	2,5	48
<b>T1L18F750</b>	DLC (diextra)	126	750	0,5	2,5	18
<b>T1L36F750</b>	DLC (diextra)	126	750	0,5	2,5	36
<b>T1L48F750</b>	DLC (diextra)	126	750	0,5	2,5	48
<b>T1L18F1500</b>	DLC (diextra)	126	1500	0,5	2,5	18
<b>T1L36F1500</b>	DLC (diextra)	126	1500	0,5	2,5	36
<b>T1L48F1500</b>	DLC (diextra)	126	1500	0,5	2,5	48
<b>T1L18F350</b>	DLC (diextra)	126	350	0,5	2,5	18
<b>T1L38F350</b>	DLC (diextra)	126	350	0,5	2,5	36
<b>T1L48F350</b>	DLC (diextra)	126	350	0,5	2,5	48

No final de cada ensaio, as ferramentas foram devidamente preparadas (sujeitas a limpeza em banho de ultrassons com acetona, durante 5 minutos), como demonstrado na Figura 51 e embaladas em caixas adequadas, devidamente rotuladas.



Figura 51 – Limpeza de ferramenta de corte em banho de ultrassons

### 3.2.7 Dinamómetro

Como forma de análise das forças de corte desenvolvidas na fresagem do AMPCOLOY® 83, foi utilizado um dinamómetro KISTLER 9171A (Kistler, Winterthur, Suíça) acoplado a um sistema de aquisição de dados KISTLER 5697A1, visualizado na Figura 52. Este equipamento permitiu o registo das forças de corte desenvolvidas nos eixos X, Y e Z, assim como o momento desenvolvido ( $M_z$ ).

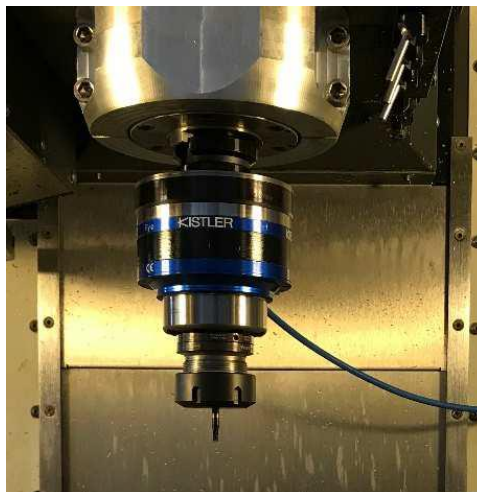


Figura 52 – Dinamómetro KISTLER 9171A

O equipamento foi acoplado à árvore do centro de maquinagem CNC e a ferramenta foi apertada ao equipamento. A aquisição de dados das forças de corte, foi seleccionada com base na velocidade de rotação da árvore, permitindo registar as forças geradas nas arestas de corte da ferramenta, em cada rotação.

Foram realizados ensaios preliminares analisando as forças de corte, verificando que estas eram muito baixas. Também foi possível concluir que a variação das forças de corte era mínima ao longo do período estipulado para o corte. Assim sendo, não foram tidas em consideração as forças de corte, admitindo que estas não têm uma influência suficientemente notória para detetar alterações no nível de desgaste das ferramentas.

### 3.2.8 Preparação das amostras para análise SEM

De forma a avaliar e efetuar medições da espessura do revestimento das ferramentas de corte, através da análise por microscopia eletrónica de varrimento, uma amostra revestida foi cortada com o auxílio de uma serra de disco STRUERS MINITOM (Struers, Inc., Cleveland, OH, USA), equipada com um disco fino com revestimento de partículas diamantadas, representado na Figura 53 a). Finalizado o processo de corte, a amostra foi incorporada em resina termoendurecível e colocada na prensa a quente, num equipamento STRUERS PEDOPRESS (Struers, Inc., Cleveland, OH, USA), visualizada na Figura 53 b). Este processo permite obter melhores condições para o processo subsequente de manuseamento das amostras necessário no processo de lixagem e polimento da secção transversal.

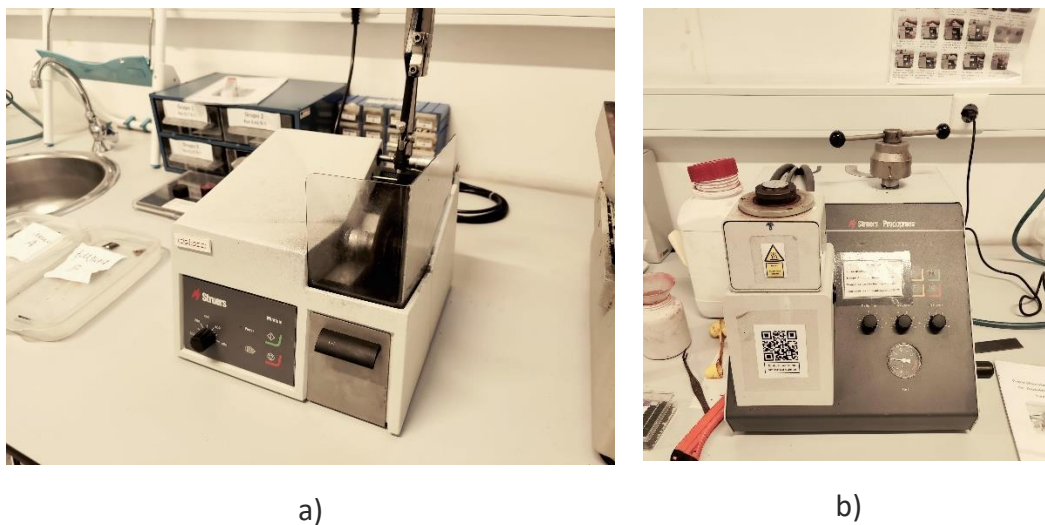


Figura 53 – Preparação das amostras: a) serra de disco STRUERS MINITOM; b) prensa STRUERS PEDOPRESS

Dado o revestimento exterior da ferramenta ser composto maioritariamente por carbono, e sabendo que a resina utilizada é composta por carbono, poderia estar em causa a perfeita visualização na análise SEM. Para garantir uma perfeita análise, caso fosse necessário, foi preparada uma ferramenta adicional. Para tal, realizou-se um corte incompleto (cerca de 90% do seu diâmetro) na ferramenta, e procedeu-se à fratura frágil da mesma, de modo a colocar expostas as camadas do revestimento.

Na operação de lixagem, foram utilizadas lixas de granulometria decrescente, procedendo à seguinte sequência: 220, 500, 800 e 1200 grit. Depois do processo de lixagem, as amostras foram rodadas 90°, tentando minimizar as ranhuras deixadas na superfície pela lixagem anterior. Para a eliminação das ranhuras, foi efetuado primeiramente o polimento da amostra utilizando pasta diamantada de 3  $\mu\text{m}$  de tamanho de grão de diamante, seguido de um polimento com utilização de pasta diamantada de 1  $\mu\text{m}$ , durante aproximadamente 5 minutos cada polimento. A Figura 54 apresenta o resultado final da preparação da amostra.



Figura 54 – Amostra embebida em resina termoendurecível, pronta para ser analisada

### 3.2.9 Microscópio eletrônico de varrimento (MEV)

Foi utilizado um microscópio eletrônico de varrimento para a análise do desgaste das ferramentas de corte após a maquinagem, assim como para caracterizar o seu revestimento. O MEV utilizado é da marca FEI, modelo Quanta 400 FEG, sendo apresentado na Figura 55.



Figura 55 – Microscópio eletrônico de varrimento: FEI Quanta 400 FEG

As especificações técnicas do MEV FEI Quanta 400 FEG encontram-se na Tabela 19.

Tabela 19 - Especificações técnicas FEI Quanta 400 FEG

<b>Ótica eletrónica</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Emissão de campo de alta resolução – SEM coluna otimizada para alto brilho / alta corrente;</li> <li>• Lente objetiva de 45° de geometria com bombardeamento diferencial através da lente de abertura das objetivas aquecidas;</li> </ul>
<b>Resolução</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto vácuo: <ul style="list-style-type: none"> <li>- 0,8 Nm a 30 kV (STEM);</li> <li>- 1,2 Nm a 30 kV (SE);</li> <li>- 2,5 Nm a 30 kV (BSE);</li> <li>- 3,0 Nm a 1 kV (SE).</li> </ul> </li> <li>• Baixo vácuo: <ul style="list-style-type: none"> <li>- 1,5 Nm a 30 kV (SE);</li> <li>- 2,5 Nm a 30 kV (BSE);</li> <li>- 3,0 Nm a 3 kV (SE).</li> </ul> </li> <li>• Modo de vácuo estendido (ESEM): <ul style="list-style-type: none"> <li>-1,5 Nm a 30 kV (SE).</li> </ul> </li> <li>• Voltagem de aceleração: 200 V – 30 kV;</li> <li>• Corrente da sonda: até 100 nA – continuamente ajustável.</li> </ul>
<b>Detetores</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Everhardt-Thornley SED;</li> <li>• Baixo vácuo SED (LFD);</li> <li>• Gasoso SED (GSED);</li> <li>• IR-CCD;</li> <li>• Estado sólido BSED</li> </ul>
<b>Câmara de vácuo</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto vácuo: &lt; 6 e<sup>-4</sup> Pa;</li> <li>• Baixo vácuo: 10 a 130 Pa;</li> <li>• ESEM vácuo: 10 - 4000 Pa.</li> </ul>
<b>Sistema de vácuo</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 x 240 l/s TMP, 2 x PVP</li> <li>• Patentado através da lente diferencial de bombardeamento;</li> <li>• Comprimento do caminho de gás: 10 ou 2 mm.</li> </ul>
<b>Câmara</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 379 mm esquerda para a direita;</li> <li>• 10 mm WD analítica;</li> <li>• EDX ângulo de saída: 35°</li> </ul>

### 5-eixos motorizados

- X, Y = 100 mm;
- Z = 60 mm;
- T = -5° a +70°;
- R = 360° contínuos.

### Processador de imagem

- Até 4096 x 3536 *pixels*;
- Tipo ficheiro: TIFF (8 ou 16 *bit*), BMP ou JPEG

#### 3.2.10 Análise da espessura do revestimento

Para a análise da espessura dos revestimentos das ferramentas de corte, foi utilizada a amostra realizada através do procedimento anteriormente descrito. A medição da espessura do revestimento foi realizada com o auxílio de um microscópio eletrónico de varrimento da marca FEI e modelo Quanta 400 FEG, fornecido com um sistema de microanálise por espectroscopia EDAX Genesys Energy Dispersive X-Ray.

Na análise SEM, utilizou-se a mesma gama de ampliação em todas as imagens para análise da estrutura do revestimento, permitindo uma maior facilidade na análise e comparação dos resultados obtidos. Foi utilizada uma tensão de aceleração do feixe de 15 kV e usado preferencialmente um detetor de eletrões retrodifundidos (*Backscattered Electron Detector – BSED*). Foi adquirido o espectro EDS como forma de confirmar a composição química do revestimento e retirar as conclusões necessárias. Para a aquisição dos espectros EDS, apenas foi utilizada uma tensão de aceleração do feixe de 10 kV, uma vez que, dentro desse intervalo, foi possível obter todos os elementos constituintes do revestimento. Na Figura 56, é possível visualizar a legenda de uma imagem SEM.



Figura 56 – Legenda da aquisição das imagens MEV

#### 3.2.11 Análise do desgaste das ferramentas de corte

Após os ensaios de maquinagem e a preparação das ferramentas, as mesmas foram submetidas a análise por microscopia eletrónica de varrimento (MEV). Deste modo, foi possível a identificação e quantificação do nível de desgaste das ferramentas de corte usadas nos ensaios.

Para a análise das ferramentas de corte, foi necessário criar uma referência como visualizado na Figura 57, onde cada navalha de corte é identificada com um número. A

Figura 57 b), representa a análise da face de ataque da navalha de corte número 1. Esta numeração permite uma fácil análise e identificação da navalha de corte em estudo. Ao longo do estudo, foi necessário criar referências de forma a simplificar a nomenclatura das ferramentas. Assim sendo, RF significa *Rake Face* e CF, *Clearance Face*.

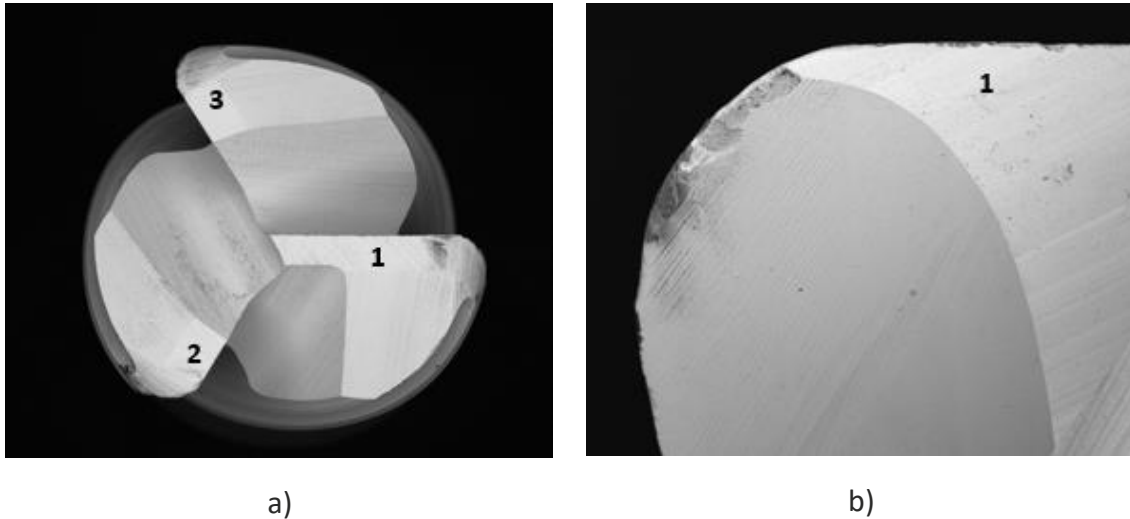


Figura 57 – Referência utilizada na análise das ferramentas: a) Numeração das lâminas; b) Referência utilizada para a RF da lâmina de corte 1

As medições do desgaste do flanco (VB) das ferramentas de corte, foram realizadas segundo a norma ISO 8688-2:1989. Os resultados serão tratados no capítulo 3.3.3.2.

### 3.2.12 Rugosímetro

Foi utilizado um rugosímetro da marca Mahr (Mahr, Gottingen, Alemanha) e modelo Perthometer M1 para a medição do estado superficial da peça, após os ensaios de maquinagem. Na Figura 58, é apresentado o rugosímetro que serviu para determinar os parâmetros mais comuns da rugosidade superficial segundo a norma DIN EN ISO/AMSE/prEN 10049,  $R_a$ ,  $R_z$  e  $R_{máx}$ .



Figura 58 – Rugosímetro Mahr Perthometer M1

Os dados técnicos do rugosímetro Mahr Perthometer M1 encontram-se na Tabela 20.

Tabela 20 - Dados técnicos rugosímetro Mahr Perthometer M1

Princípio de medição	Stylus method
Velocidade de medição	0,5 mm/s
Alcance de medição	até 150 $\mu\text{m}$
Unidades de medição	$\mu\text{m}/\mu\text{in}$
Filtro	Gaussian
Cutoffs	0,25/0,8/2,5 mm
Comprimento de deslocação conforme DIN/ISO	1,75/5,6/17,5 mm
Comprimento de amostra	1 – 5 mm
Standards	DIN/ISSO/JIS
Parâmetros conforme DIN/ISSO/SEP	$R_a/R_z/R_{\text{máx}}/R_{P_c}$
Parâmetros conforme JIS	$R_a/R_z$
Tipo de impressão	Perfil e medição de rugosidades

### 3.2.13 Teste de rugosidade superficial

A avaliação da rugosidade da superfície maquinada é um fator considerado bastante importante, uma vez que os requisitos de precisão assim o exigem. Cada teste à rugosidade foi realizado com um *cut-off* de 0,8 mm, e um comprimento de medição de 5,6 mm, que corresponde a sete *cut-offs*, sendo o primeiro e o último segmento de 0,8 mm eliminado, devido a erros que podem resultar da aceleração e desaceleração do palpador na altura da medição.

A medição da rugosidade foi realizada na direção da maquinagem e na zona correspondente onde a ferramenta de corte atingiu o comprimento de corte pretendido para análise. Na Figura 59 é visualizado o método de medição da rugosidade superficial da peça maquinada.

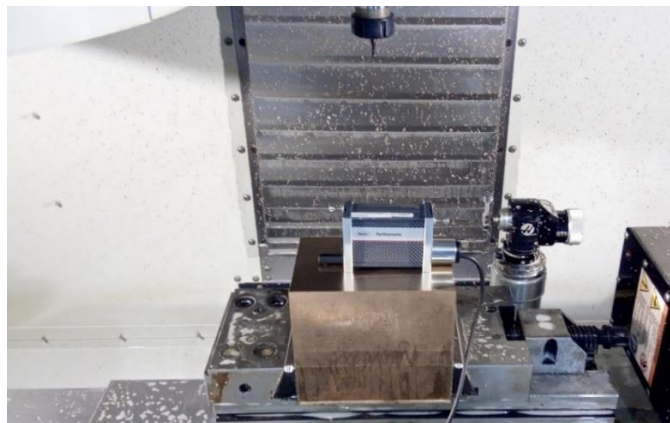


Figura 59 – Teste de medição da rugosidade da superfície da peça maquinada

### 3.3 Resultados

#### 3.3.1 Caracterização do revestimento das ferramentas de corte

Para caracterizar o revestimento das ferramentas de corte, foram preparadas amostras de acordo com o procedimento descrito no capítulo 3.2.8. As amostras foram então submetidas a uma análise por microscopia eletrônica de varrimento em alto vácuo (MEV). A estrutura foi analisada por MEV, bem como a sua composição química, através da realização de uma microanálise por Raios-X (EDS). Foi determinado que o revestimento tinha uma estrutura com várias camadas, sendo composto por camadas de CrN e DLC, como pode ser observado na Figura 60 a). A espessura das camadas foi também determinada, através da realização de diferentes medições em diferentes locais da amostra. Um exemplo das medições efetuadas pode ser observado na Figura 60 b).

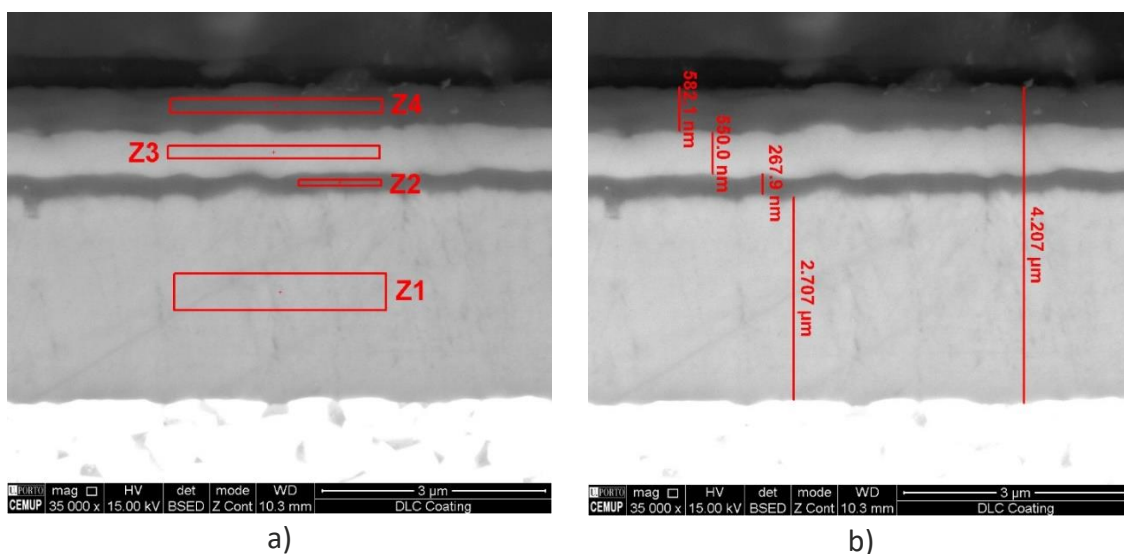


Figura 60 – Caracterização do revestimento: a) identificação das diferentes camadas (Z1 – CrN, Z2 – DLC, Z3 – CrN, Z4 – DLC); b) medição da espessura do revestimento

Como se pode observar na Figura 60 a), o revestimento é composto por quatro camadas, cada uma delas foi submetida a análise EDS obtendo-se assim a sua composição química. Os espectros obtidos da análise EDS podem ser observados na Figura 61.

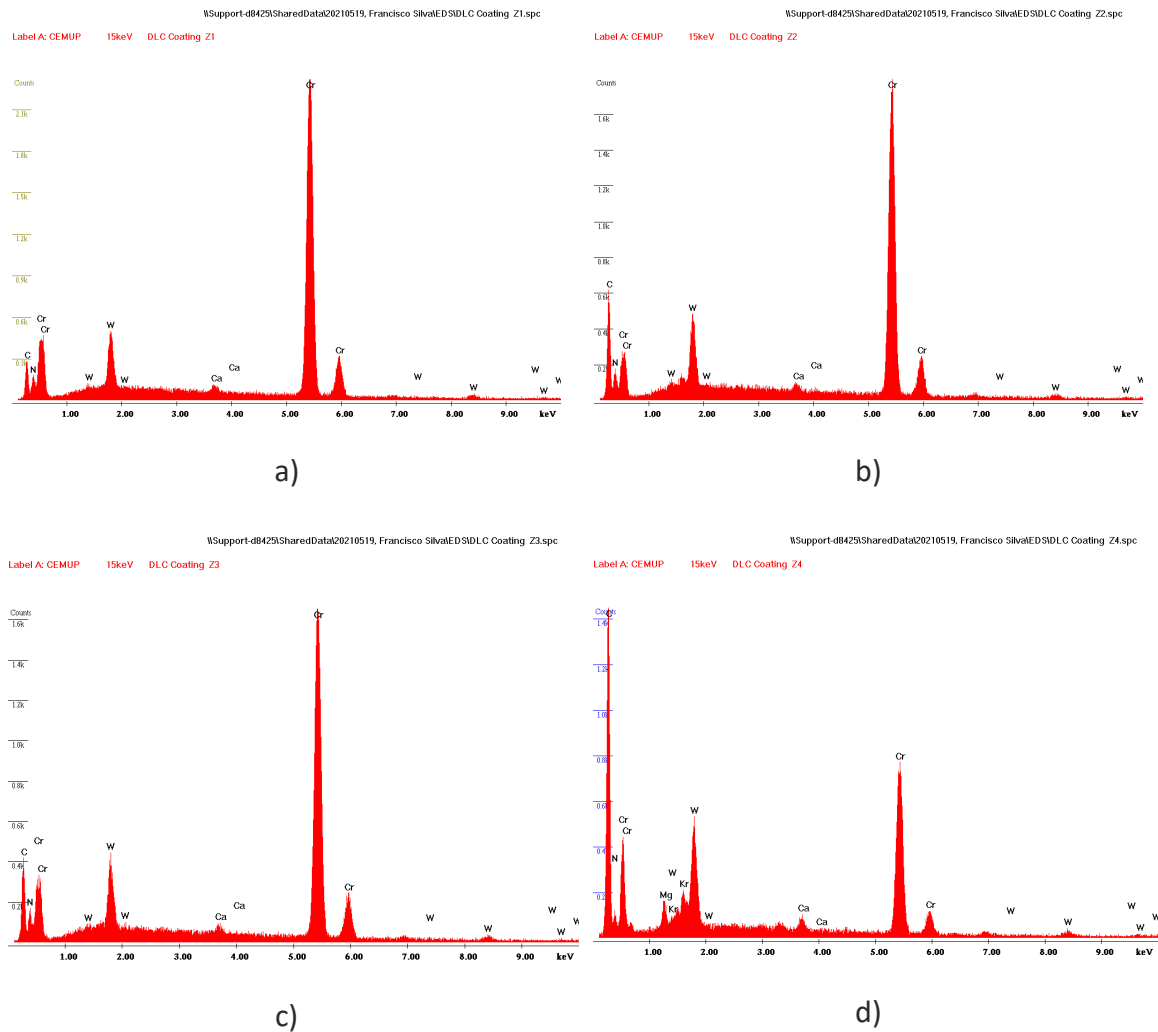


Figura 61 – Espectros EDS para as diferentes zonas da Figura 60: a) Z1; b) Z2; c) Z3; d) Z4

Na Tabela 21, é apresentada a espessura média do revestimento para cada camada (identificada por zona, de acordo com a Figura 60 a)) e a sua respetiva composição química.

Tabela 21 - Composição das camadas e média da medição da sua espessura

Camada	Composição	Espessura (µm)
Z1	CrN	2,689 ± 0,081
Z2	DLC	0,271 ± 0,020
Z3	CrN	0,570 ± 0,031
Z4	DLC	0,601 ± 0,018

O revestimento é composto por camadas alternadas de CrN e DLC (tal como anteriormente mencionado), sendo a primeira deposição a de CrN. Esta estrutura multicamada melhora a resistência à propagação da fenda do revestimento e, além disso, a camada exterior de DLC atua como um lubrificante sólido, permitindo uma menor fricção gerada durante a maquinagem.

### 3.3.2 Resultados dos ensaios de maquinagem

#### 3.3.2.1 Análise da rugosidade superficial

Nesta subsecção serão apresentados os resultados a partir da análise da rugosidade da superfície maquinada. O método de avaliação da rugosidade da superfície foi descrito no capítulo 3.2.13. Na Tabela 22, são apresentados os valores médios de  $R_a$ .

Tabela 22 - Valores da rugosidade da superfície registados para cada uma das condições testadas

Referência	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )
T0L18F750	$0,102 \pm 0,005$
T0L36F750	$0,128 \pm 0,006$
T0L48F750	$0,137 \pm 0,007$
T1L18F750	$0,096 \pm 0,020$
T1L36F750	$0,134 \pm 0,023$
T1L48F750	$0,244 \pm 0,030$
T0L18F1500	$0,399 \pm 0,048$
T0L36F1500	$0,459 \pm 0,051$
T0L48F1500	$0,595 \pm 0,012$
T1L18F1500	$0,400 \pm 0,019$
T1L36F1500	$0,572 \pm 0,022$
T1L48F1500	$0,800 \pm 0,040$

Estes valores são apresentados como gráficos de superfície nas Figura 62 e Figura 63, para avaliar a variação do valor da rugosidade superficial em relação às condições de cada ensaio de maquinagem.

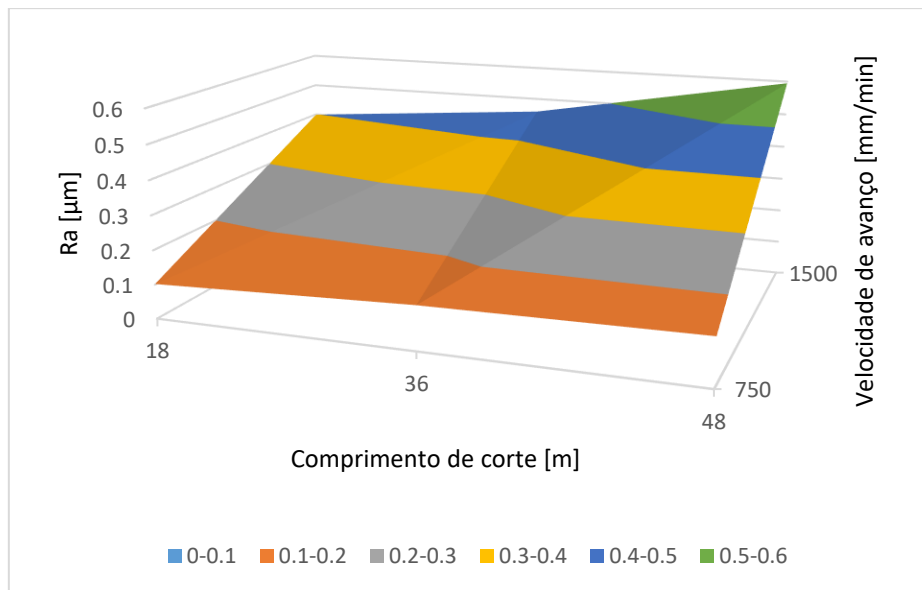


Figura 62 – Gráfico de superfície da rugosidade da superfície maquinada produzida pelas ferramentas não revestidas para cada uma das condições testadas

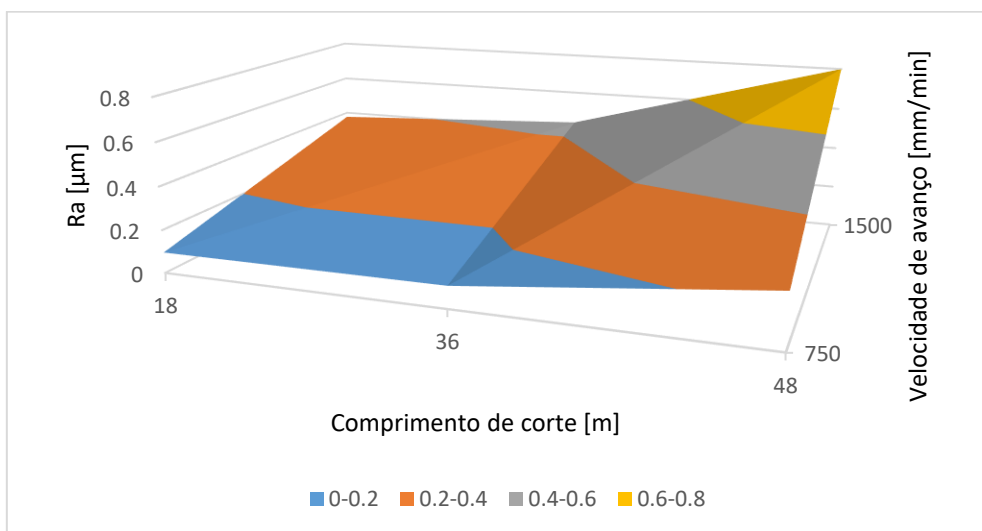


Figura 63 – Gráfico de superfície da rugosidade da superfície maquinada produzida pelas ferramentas revestidas para cada uma das condições testadas

Como se pode ver pelas figuras (Figura 62 e Figura 63) e tabela acima apresentada (Tabela 22), os valores de rugosidade superficial tendem a aumentar para valores mais elevados da velocidade de avanço e do comprimento de corte. Para a condição da velocidade de avanço de 1500 mm/min, os valores da rugosidade da superfície são os mais elevados, quer para as ferramentas revestidas, quer para as não revestidas. Embora os valores da rugosidade da superfície tenham o mesmo padrão para as ferramentas revestidas e não revestidas, os valores mais baixos da rugosidade foram detetados para as ferramentas revestidas, com comprimento de corte até 36 metros. Contudo, para a condição de comprimento de corte máximo (48 metros), as

ferramentas não revestidas produziram um melhor acabamento superficial na peça maquinada, quando comparado com a ferramenta revestida.

A Figura 64 apresenta um gráfico de barras comparando a rugosidade da superfície de ambas as ferramentas para cada uma das condições de corte testadas.

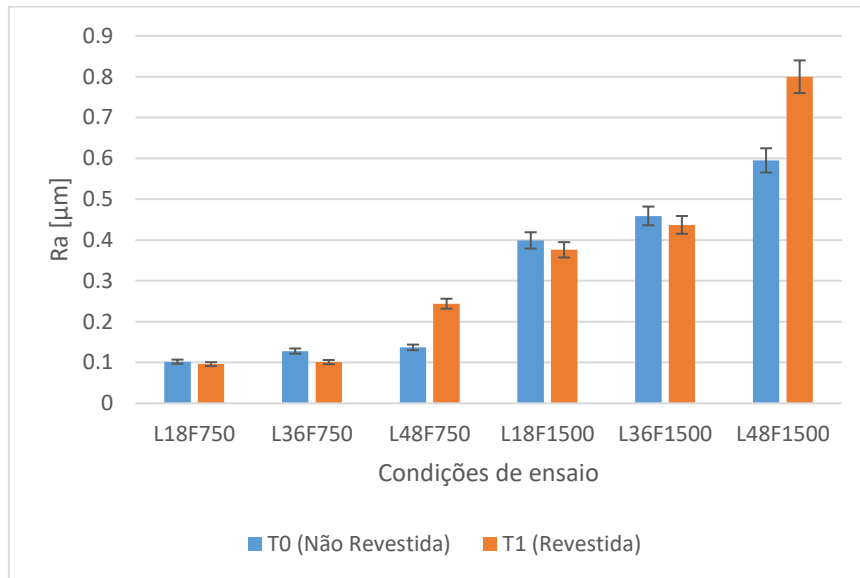


Figura 64 – Comparação dos valores da rugosidade superficial das ferramentas não revestidas e revestidas para cada uma das condições de ensaio

### 3.3.2.2 Análise da rugosidade superficial para baixo valor de velocidade de avanço

Numa tentativa de analisar a influência da velocidade de avanço na qualidade da superfície maquinada, foram realizados ensaios adicionais. Estes ensaios foram realizados a 350 mm/min de velocidade de avanço, até 48 metros de comprimento de corte. Realizaram-se estes ensaios com a finalidade de perceber, se reduzindo a velocidade de avanço, seria possível realizar a maquinagem evitando posteriores operações de polimento manual na peça (operação comum em componentes para moldes de injeção). Foram realizados três ensaios para cada ferramenta, não revestida e revestida, analisando o comportamento da rugosidade superficial desde o início do ensaio, até se ter atingido 48 metros de comprimento de corte. Na Figura 65, pode ser observada a evolução da rugosidade superficial, tanto para ferramentas revestidas como não revestidas.

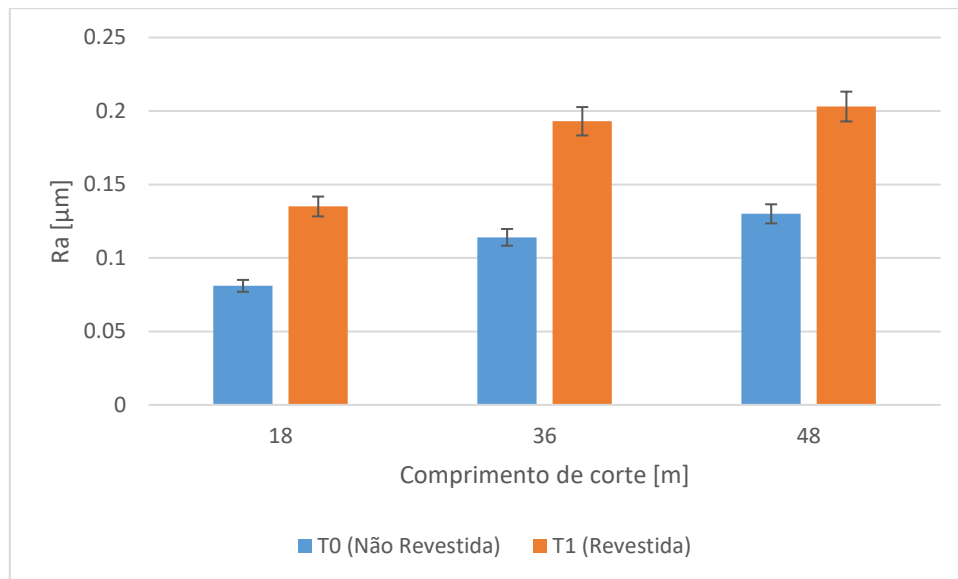


Figura 65 – Comparação dos valores da rugosidade superficial das ferramentas não revestidas e revestidas para ensaios realizados a velocidade de avanço de 350 mm/min

Como se pode observar na Figura 65, a ferramenta revestida provoca maiores valores na rugosidade superficial. Contudo, os valores globais da rugosidade superficial obtidos utilizando uma velocidade de avanço de 350 mm/min, são muito satisfatórios, tanto nas ferramentas não revestidas como nas revestidas. Assim sendo, as ferramentas provocam na peça maquinada, um bom acabamento superficial. Porém, são as ferramentas não revestidas que produzem menores valores na rugosidade da peça maquinada. A obtenção do acabamento desejado, faz com que as operações de polimento manual sejam uma etapa que pode não ser necessária. Contudo, e como visualizado na Figura 66, comparando os valores das rugosidades provocadas pelas ferramentas não revestidas para uma velocidade de avanço de 350 mm/min e 750 mm/min, é possível verificar que os valores são muito próximos. Desta forma, é preferível utilizar uma velocidade de avanço de 750 mm/min face à velocidade de 350 mm/min, uma vez que a produtividade é mais elevada, para um grau de acabamento muito semelhante.

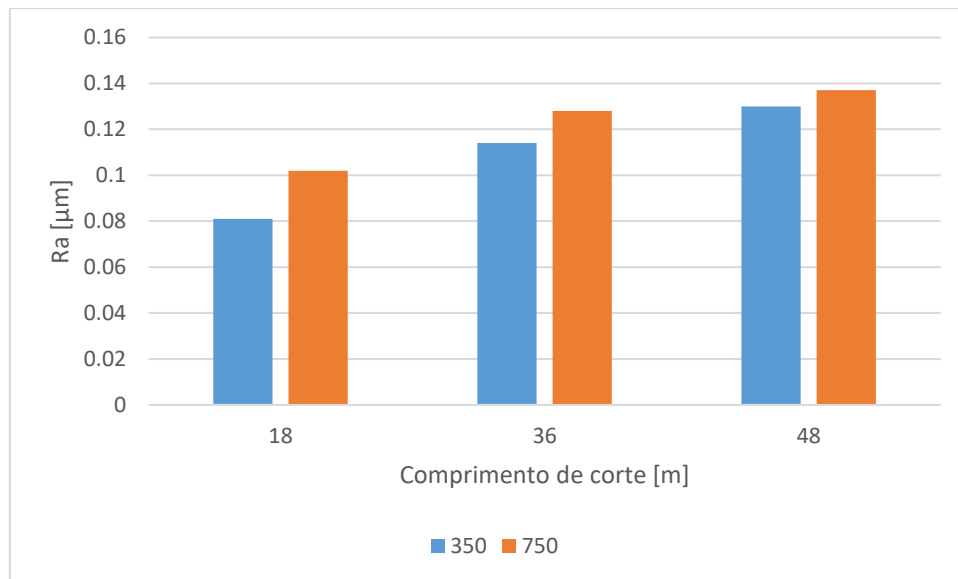


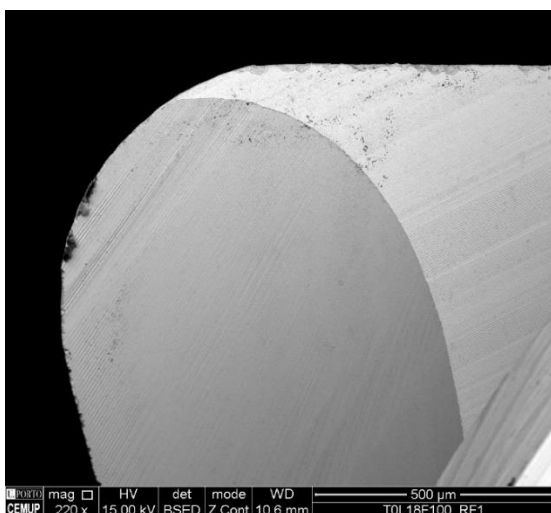
Figura 66 – Comparação dos valores da rugosidade superficial das ferramentas não revestidas para ensaios realizados a velocidade de avanço de 350 mm/min e 750 mm/min

### 3.3.3 Análises MEV das ferramentas

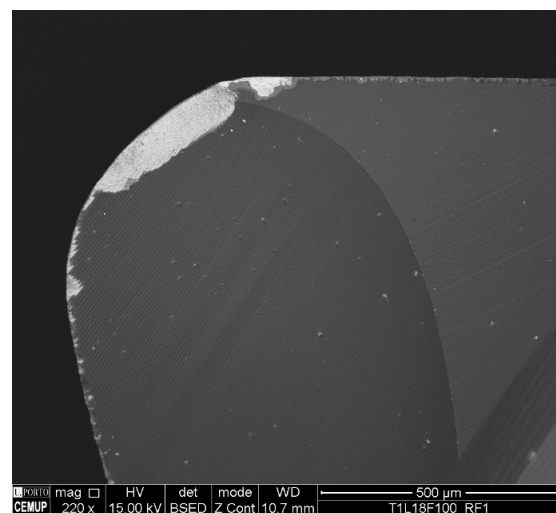
#### 3.3.3.1 Análise do desgaste

Cada uma das ferramentas testadas nos ensaios foram sujeitas a análise por MEV, de forma a avaliar o seu desgaste. O desgaste do flanco das ferramentas (VB) também foi avaliado, e os valores obtidos serão apresentados no subcapítulo 3.3.3.2.

Como anteriormente dito, foi analisada a influência da velocidade de avanço e do comprimento de corte das ferramentas, oferecendo uma comparação entre as ferramentas revestidas e as não revestidas. Na Figura 67, Figura 68 e Figura 69, pode ser observado o desgaste das ferramentas testadas a uma velocidade de avanço de 750 mm/min e 1500 mm/min e comprimentos de corte de 18, 36 e 48 metros.



a)



b)

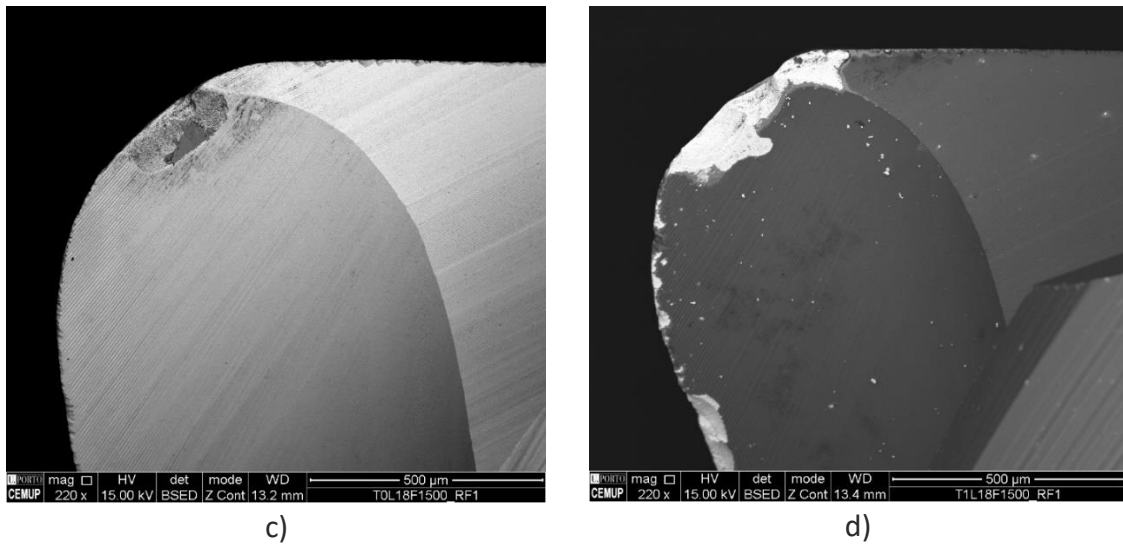


Figura 67 – Imagens SEM com ampliação de 220x da rake face das ferramentas testadas nas condições de: a) TOL18F750; b) T1L18F750; c) TOL18F1500; d) T1L18F1500

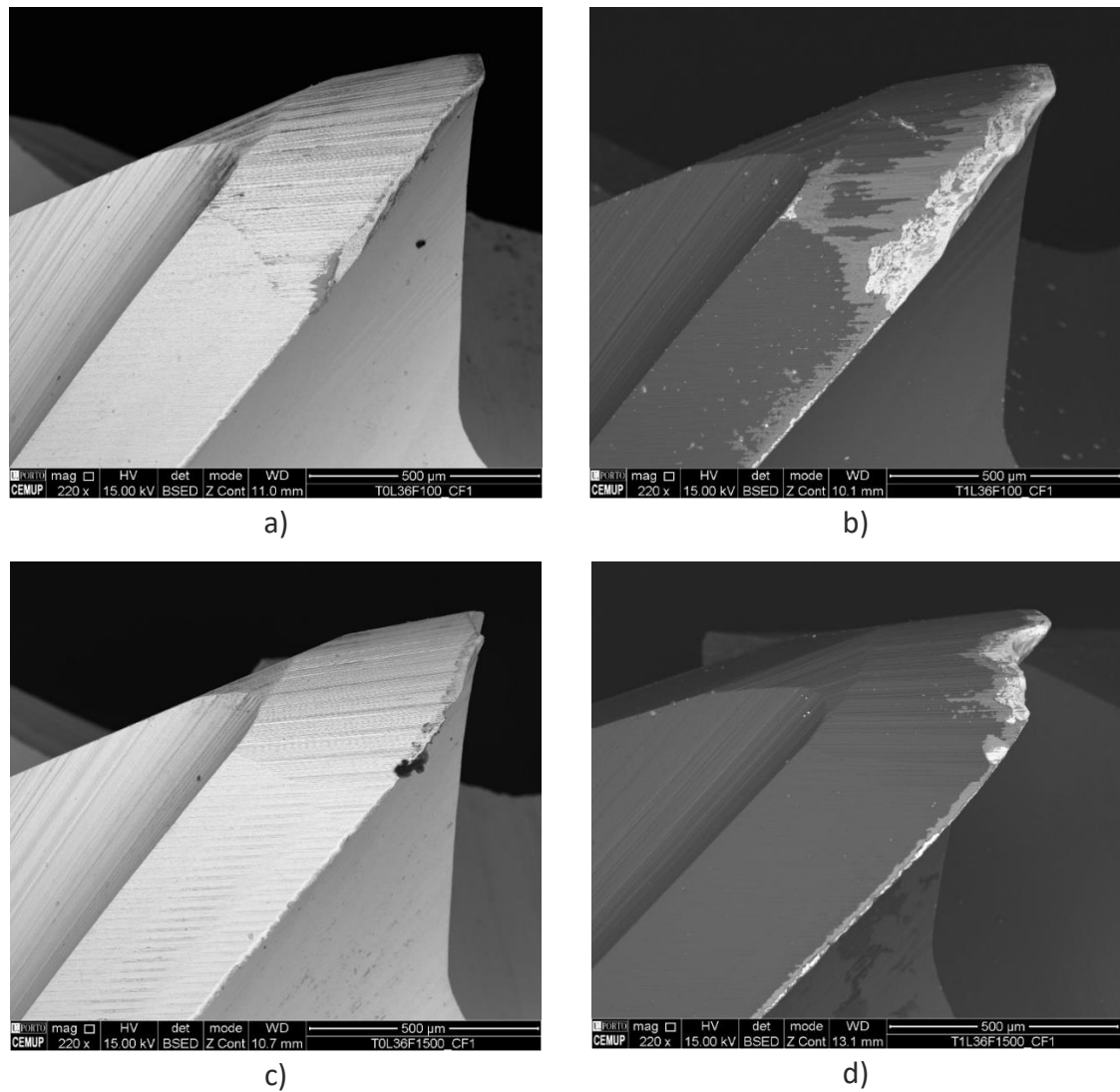


Figura 68 – Imagens SEM com ampliação de 220x da clearance face das ferramentas testadas nas condições de: a) TOL36F750; b) T1L36F750; c) TOL36F1500; d) T1L36F1500

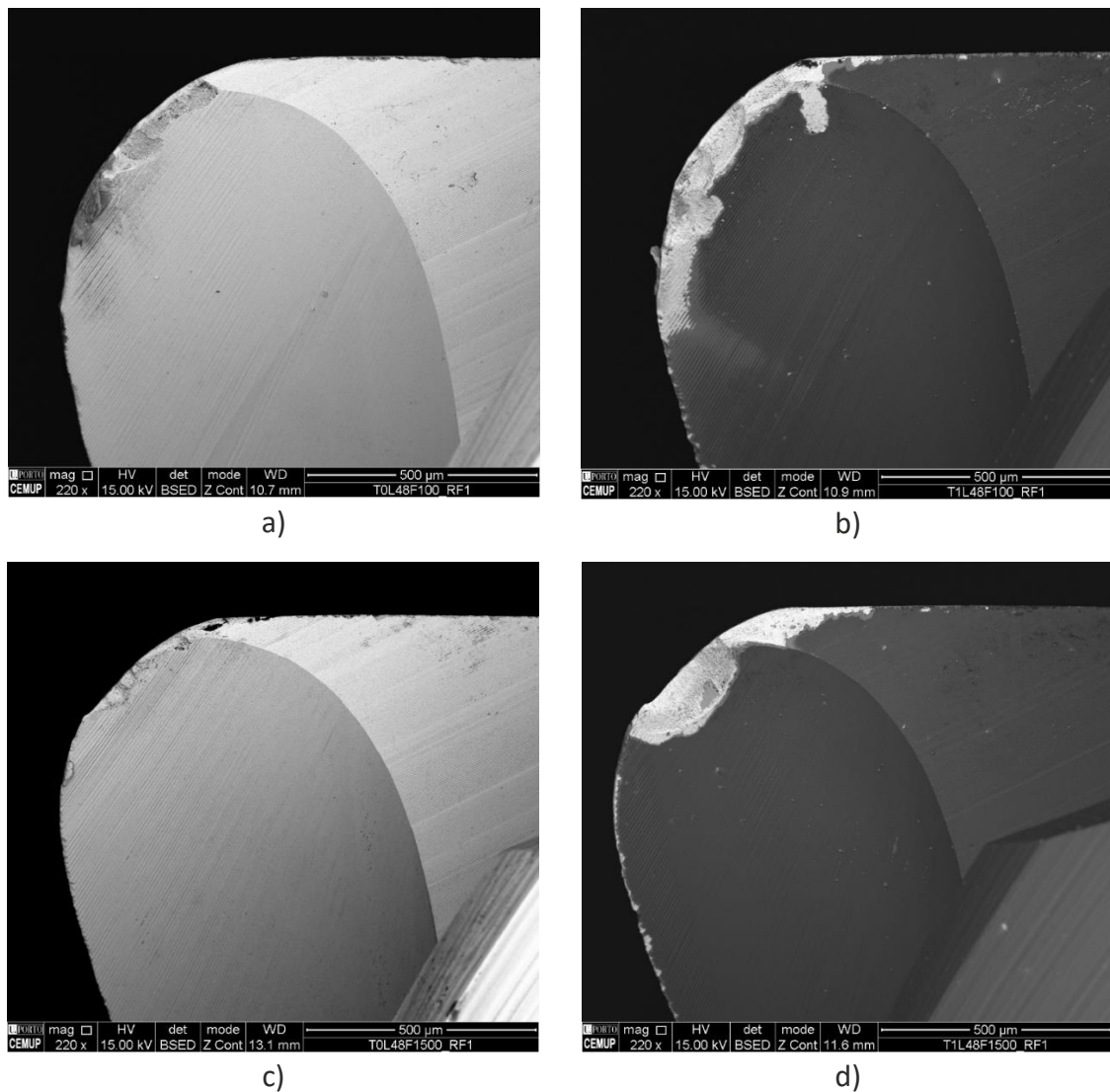


Figura 69 – Imagens SEM com ampliação de 220x da *rake face* das ferramentas testadas nas condições de: a) TOL48F750; b) T1L48F750; c) TOL48F1500; d) T1L48F1500

Pela análise da Figura 67, Figura 68 e Figura 69, é possível verificar que o aumento da velocidade de avanço de 750 mm/min para 1500 mm/min, induz um aumento significativo no desgaste das ferramentas de corte, tanto para as ferramentas revestidas como para as não revestidas. Contudo, existe uma diferença no comportamento do desgaste para ambos os tipos de ferramentas: para as ferramentas revestidas, testadas a uma velocidade de avanço de 750 mm/min, pode ser analisado um desgaste prematuro do revestimento a 18 metros de comprimento de corte. Com o aumento do comprimento de corte, o nível de desgaste aumenta significativamente, especialmente nas ferramentas revestidas. Este aumento de desgaste é também observado nas ferramentas não revestidas, no entanto, em menor grau e particularmente para valores de comprimentos de corte mais elevados.

### 3.3.3.2 Quantificação do desgaste

Nesta subsecção, serão apresentados os valores médios das medições ao desgaste do flanco (VB) das ferramentas de corte, para todas as condições testadas. Todas as medições foram efetuadas segundo a norma ISO 8688-2:1989, como apresentada na Figura 70. Estes valores serão apresentados sob a forma de gráficos de superfície.

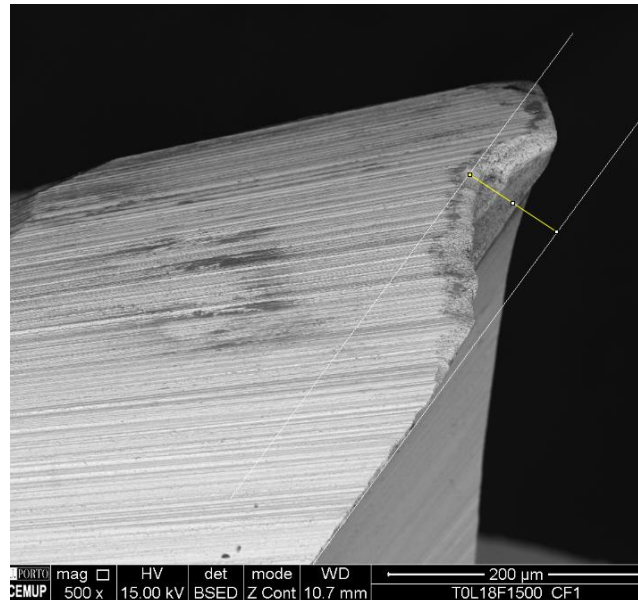


Figura 70 – Medição do desgaste do flanco VB segundo norma ISO 8688-2:1989

Os valores médios do desgaste são apresentados na Figura 71 e Figura 72, sob a forma de gráficos de superfícies.

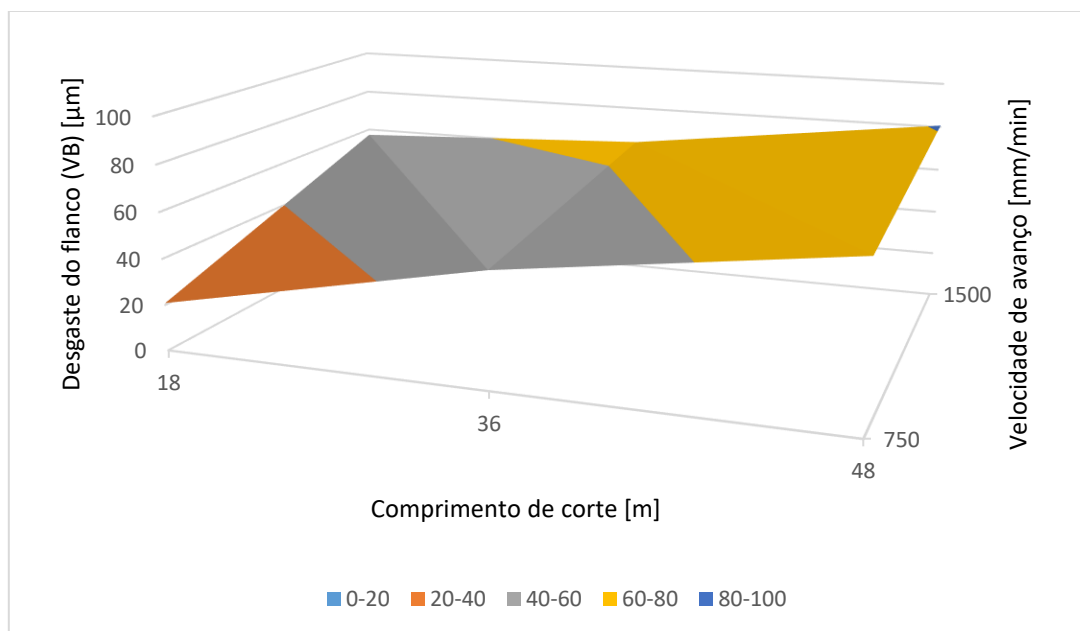


Figura 71 – Gráfico de superfície do valor médio do desgaste do flanco (VB) das ferramentas não revestidas para cada condição de ensaio

Como visualizado na Figura 71, o desgaste do flanco correspondente às ferramentas não revestidas, é menor para a condição de comprimento de corte de 18 metros, com o desgaste do flanco a aumentar, quanto maior for o comprimento de corte. Além disso, também é registado um aumento do desgaste do flanco das ferramentas para maiores valores de velocidade de avanço. O desgaste a que estas ferramentas estão sujeitas, influencia a rugosidade superficial da peça maquinada, com este valor a aumentar para valores de desgaste mais elevados.

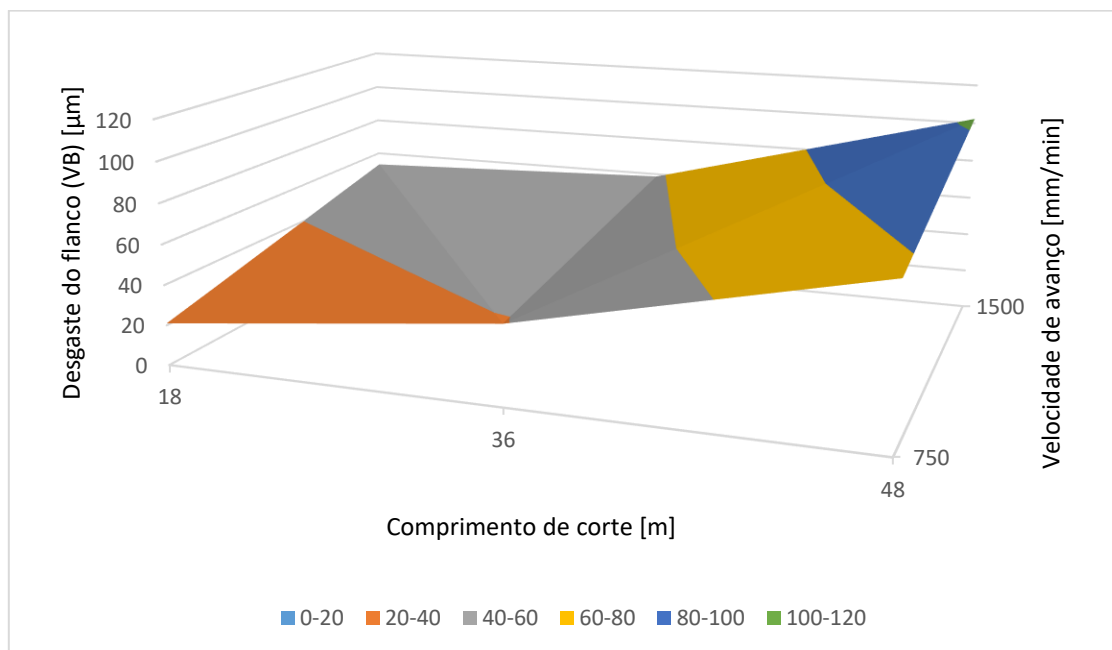


Figura 72 – Gráfico de superfície do valor médio do desgaste do flanco (VB) das ferramentas revestidas para cada condição de ensaio

Do mesmo modo ao que foi registado nas ferramentas não revestidas, os valores mínimos do desgaste do flanco nas ferramentas revestidas foram obtidos para comprimentos de corte e valores de velocidade de avanço mais baixos. Além disso, e como registado na análise dos dados da rugosidade superficial, as ferramentas revestidas sofrem menos desgaste do que as não revestidas para comprimentos de corte até 36 metros, tanto com velocidade de avanço de 750 mm/min, como para 1500 mm/min. A comparação destes valores pode ser observada sob a forma de gráfico de barras na Figura 73.

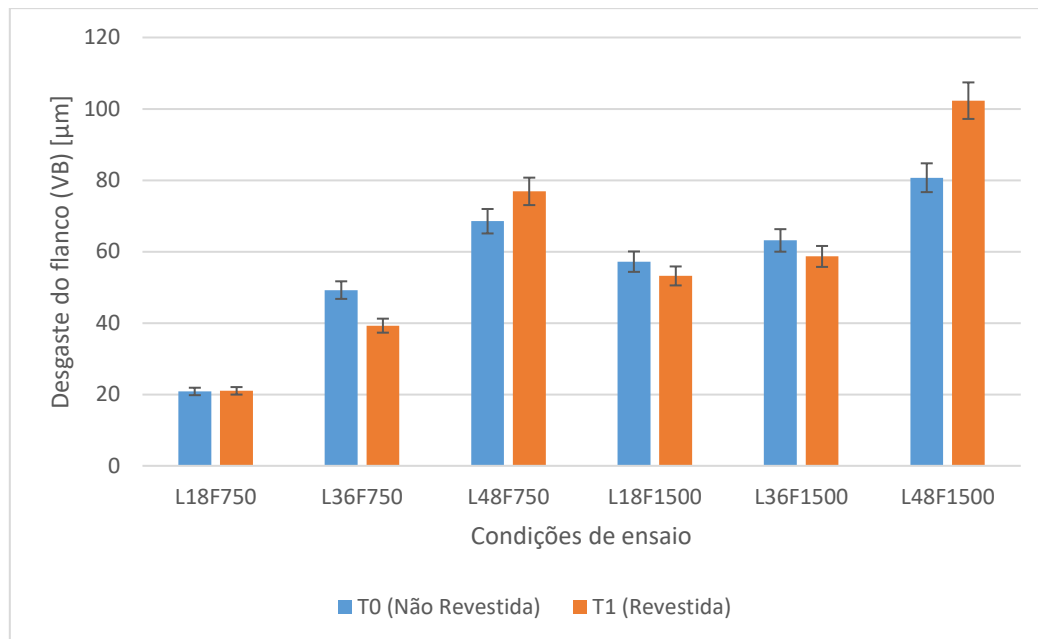


Figura 73 – Comparação do desgaste do flanco (VB) das ferramentas não revestidas e revestidas, para cada condição de ensaio

### 3.3.3.3 Caracterização dos mecanismos de desgaste

No presente subcapítulo, serão apresentados os mecanismos de desgaste identificados nas ferramentas de corte ao longo dos ensaios. Estes foram determinados através de análise por MEV. O principal mecanismo de desgaste observado foi o desgaste adesivo na face de saída da ferramenta. Este mecanismo já seria de prever, uma vez que o material maquinado é bastante dúctil. Na Figura 74 a) é possível identificar o desgaste adesivo de aresta postiça de corte numa ferramenta não revestida. A lascagem do substrato também é perceptível. Foram efetuadas análises EDS, para determinar a presença de material aderido, como se pode analisar na Figura 74 b) e c), onde é notória a presença de cobre na zona Z2.

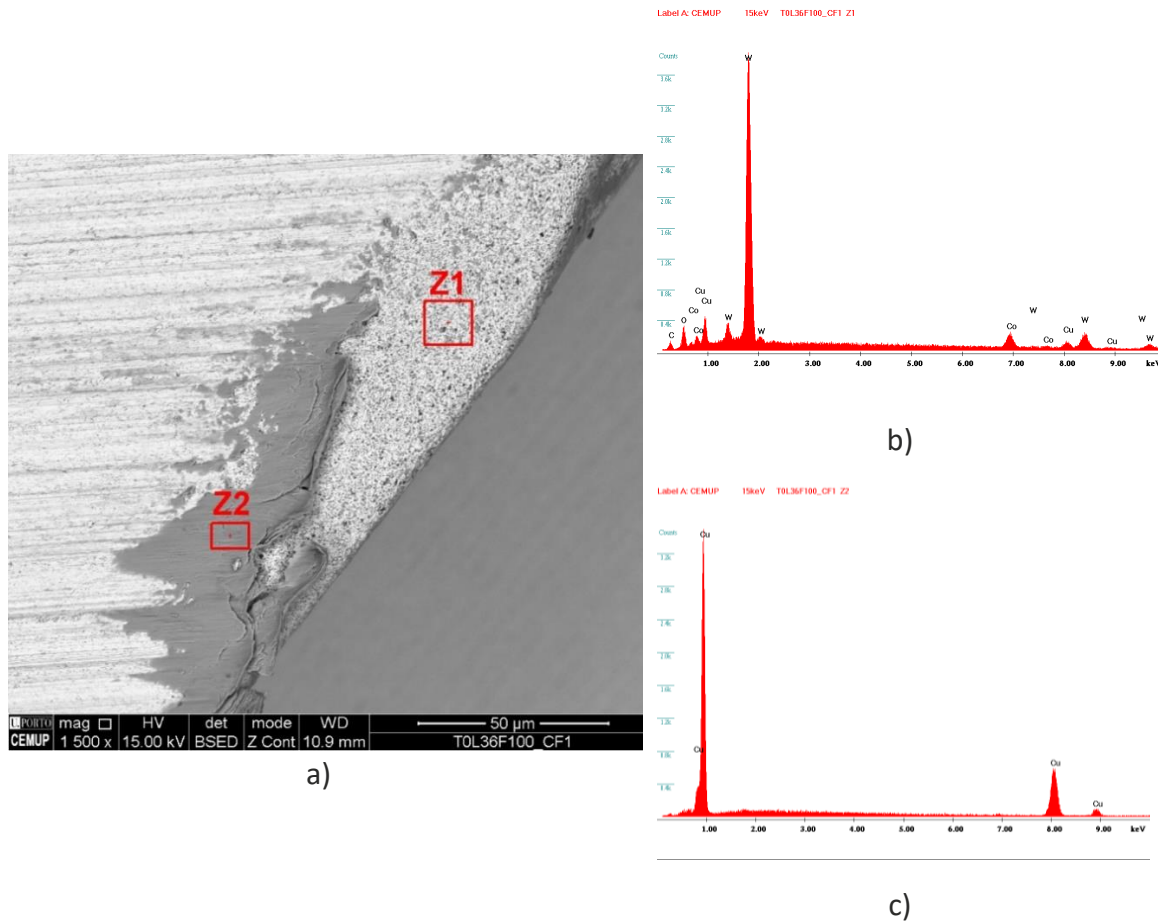


Figura 74 – a) Mecanismos de desgaste presentes numa *clearance face* de ferramenta não revestida, testada a 36 metros de comprimento de corte e 750 mm/min de velocidade de avanço; b) Espectros EDS de Z1; c) Espectros EDS de Z2

As ferramentas revestidas foram também sujeitas a desgaste adesivo, como pode ser observado na Figura 75, na zona Z4. Para além dos mecanismos de desgaste registados nas ferramentas não revestidas, estes tipos de ferramentas sofreram delaminação do revestimento, causada principalmente pela aderência do material à superfície das ferramentas. Na Figura 75, é possível visualizar que a ferramenta sofreu exposição do substrato, bem como a delaminação da camada exterior, como se observa na zona Z2, que corresponde à camada intermédia de CrN. A análise EDS desta ferramenta pode ser observada na Figura 76.

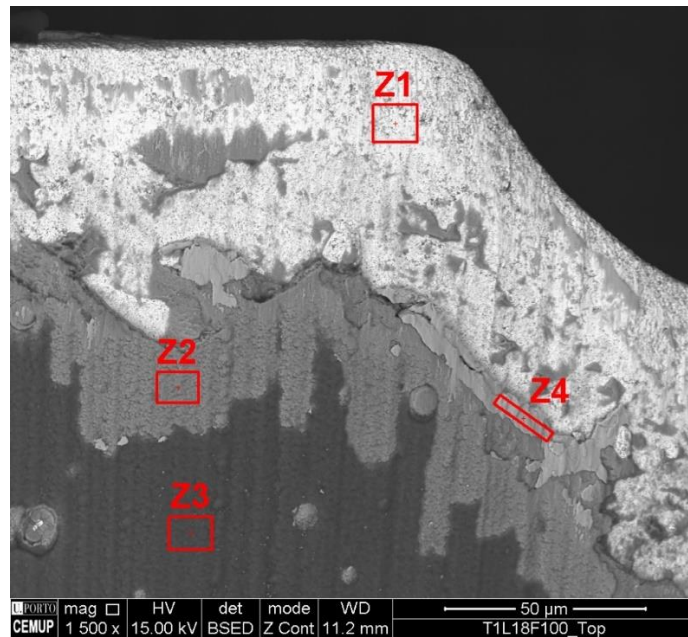


Figura 75 – Imagens SEM (1500x): Face de topo T1L18F100 com a identificação de quatro zonas destacadas a vermelho para análise EDS (Z1 – zona do substrato; Z2 – zona do revestimento de CrN; Z3 – zona do revestimento de CrN; Z4 – zona de material aderido)

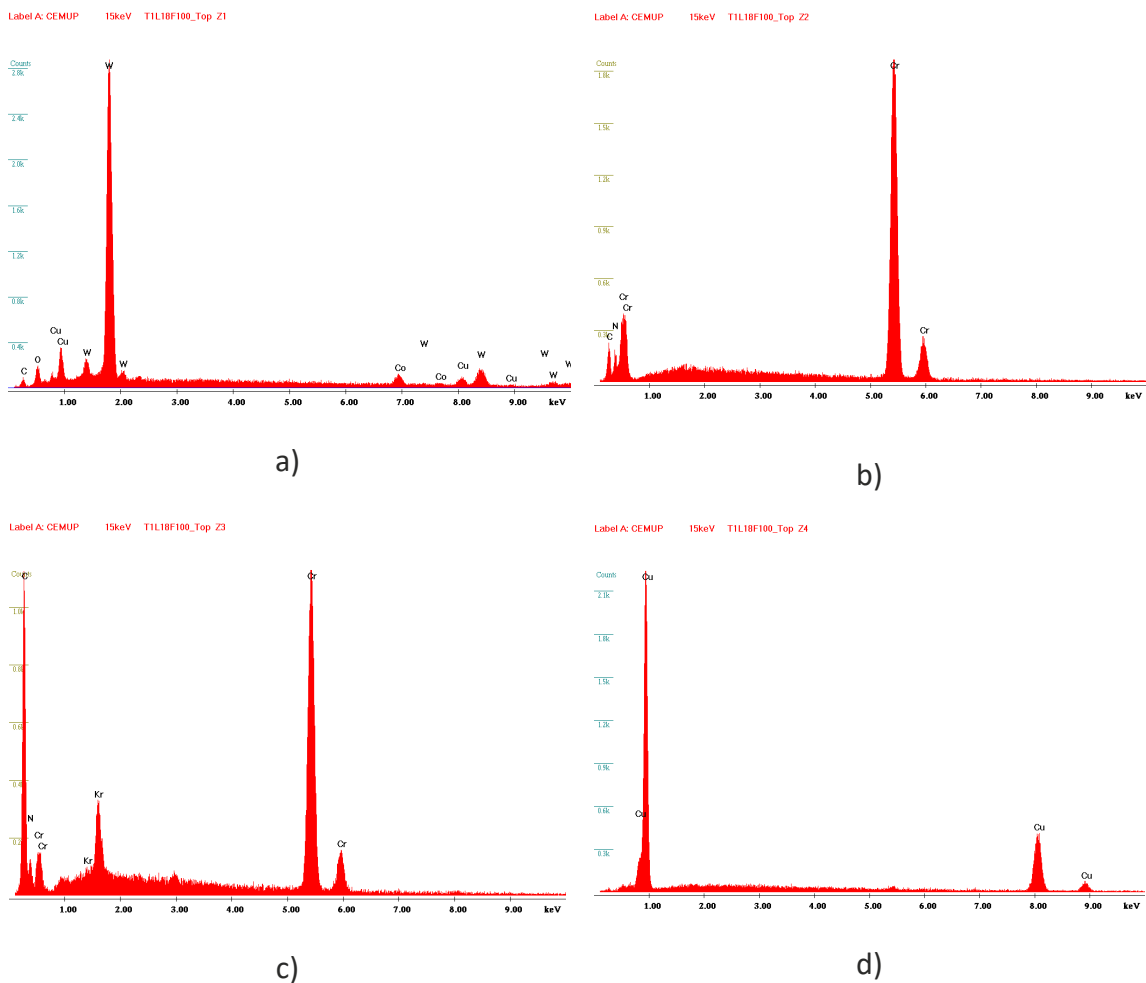


Figura 76 – Espectros EDS das zonas correspondentes à Figura 75: a) Z1; b) Z2; c) Z3; d) Z4

Em todas as ferramentas revestidas analisadas, foi observada delaminação e erosão da primeira camada de DLC, sendo esta camada logo destruída nas fases iniciais do ensaio de maquinagem (para comprimentos de corte de 18 metros).

A Figura 77 a) e b) apresentam os principais mecanismos de desgaste registados nas ferramentas não revestidas, mais especificamente para as ferramentas testadas a 48 metros de comprimento de corte e velocidade de avanço de 750 mm/min (à esquerda) e 1500 mm/min (à direita). Mais uma vez, identifica-se a presença de material aderido, que se deposita nas crateras provocadas pela maquinagem. Na Figura 77 b), pode-se observar que, para valores de velocidade de avanço mais elevados (1500 mm/min), o desgaste adesivo é mais severo, comparativamente ao observado na Figura 77 a), que apresenta menor adesão, para uma velocidade de avanço de 750 mm/min. Na Figura 77 b), pode-se observar que o material adere ao topo da ferramenta de corte, comprometendo a qualidade da superfície maquinada. Além disso, o substrato sofre consideravelmente mais danos para velocidades de avanço mais elevadas, sendo registada a quebra da aresta de corte.

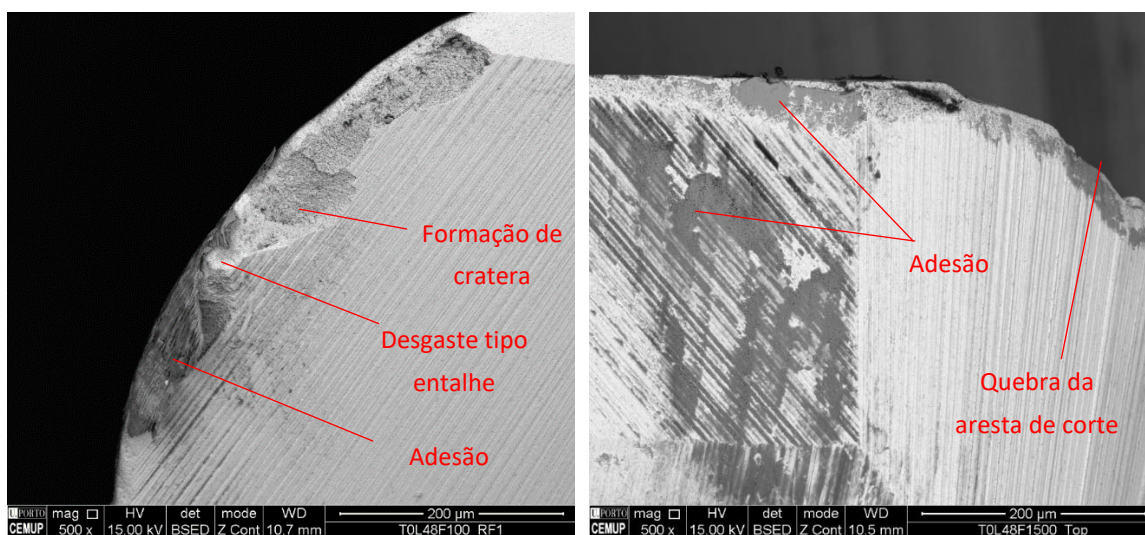


Figura 77 – a) Mecanismos de desgaste registados na face de ataque de uma ferramenta não revestida testada a 48 metros de comprimento de corte e 750 mm/min de velocidade de avanço; b) Mecanismos de desgaste registados no topo de uma ferramenta não revestida testada a 48 metros de comprimento de corte e 1500 mm/min de velocidade de avanço

Na Figura 78, é feita uma comparação dos mecanismos de desgaste de uma ferramenta revestida, testada a 48 metros de comprimento de corte com a variação da velocidade de avanço. A Figura 78 a) apresenta a ferramenta testada a 750 mm/min de velocidade de avanço e a Figura 78 b) a 1500 mm/min. Os principais mecanismos de desgaste registados neste tipo de ferramentas, para as condições de ensaio referidas anteriormente, foram: a delaminação do revestimento, a adesão e a quebra da aresta de corte. No entanto, para valores de velocidade de avanço mais elevados (1500 mm/min), são registados danos consideravelmente mais graves na ferramenta (maior quebra da aresta de corte), como se pode verificar na Figura 78 b).

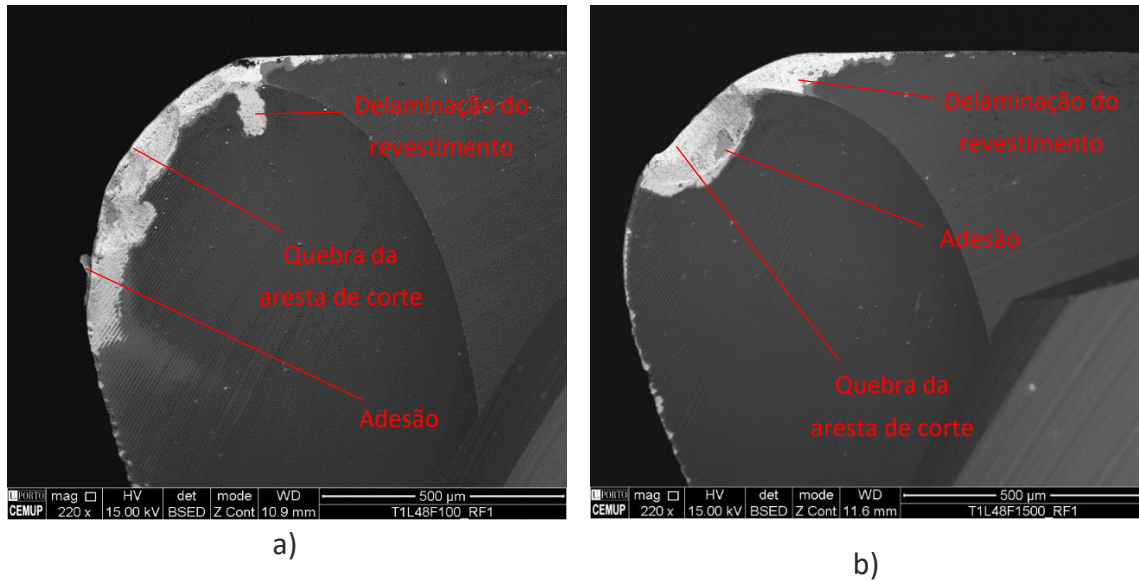


Figura 78 – Imagens SEM com ampliação de 220x da face de ataque de ferramentas revestidas testadas a 48 metros de comprimento de corte e: a) para 750 mm/min de velocidade de avanço; b) para 1500 mm/min de velocidade de avanço

### 3.3.3.4 Caracterização dos mecanismos de desgaste para baixo valor de velocidade de avanço

Como já dito anteriormente, a redução da velocidade de avanço para 350 mm/min, permite determinar melhor quais os comportamentos das ferramentas de corte na maquinagem. Desta forma, foi realizada uma análise dos mecanismos de desgaste para a condição de velocidade de avanço de 350 mm/min, apresentando os resultados na Figura 79.

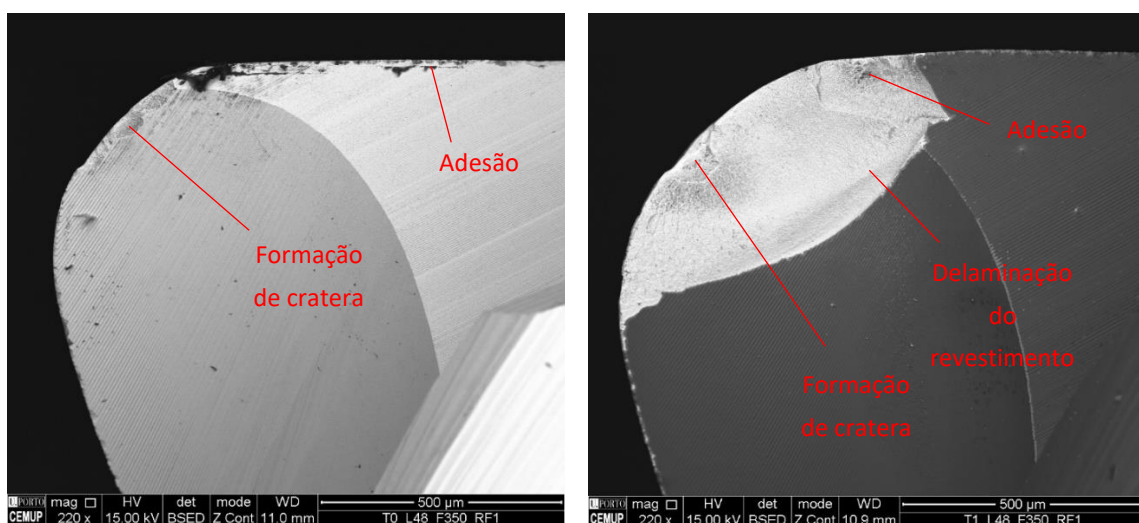


Figura 79 – Imagens SEM com ampliação de 220x da face de ataque da ferramenta testada a 350 mm/min e 48 metros de comprimento de corte: a) ferramenta não revestida; b) ferramenta revestida

Como é possível visualizar na Figura 79, as ferramentas revestidas e não revestidas testadas com uma velocidade de avanço de 350 mm/min e 48 metros de comprimento de corte, apresentam ambas um desgaste com formação de cratera e adesão. Para as ferramentas revestidas, a ferramenta apresenta uma delaminação da camada de DLC, deixando exposto o revestimento de CrN.

Dos ensaios, confirma-se mais uma vez que a maquinagem a baixa velocidade de avanço (350 mm/min) da liga cobre-berílio AMPCOLOY® 83, é mais eficaz com ferramentas de corte não revestidas.

### 3.3.4 Análise crítica dos resultados

Tendo em conta os resultados obtidos para o estudo, é importante realçar os seguintes pontos:

- Sendo o revestimento, ideal para a maquinagem de materiais macios, onde a tendência de adesão de material na ferramenta é grande, o revestimento em estudo não demonstrou ser eficaz dada a sua delaminação prematura;
- Dos resultados é possível observar que, para a maquinagem do AMPCOLOY® 83, as ferramentas de carboneto de tungsténio não revestidas, são mais eficazes. Assim sendo, as ferramentas revestidas com CrN/DLC não são recomendadas para a maquinagem deste material, uma vez que os seus custos de aquisição são mais elevados, sem trazer qualquer benefício em troca;
- A rugosidade superficial deixada na superfície maquinada apresentou resultados satisfatórios, tanto para as ferramentas revestidas, como para as não revestidas. Contudo, nos primeiros 36 metros de comprimento de corte, as ferramentas revestidas apresentam melhores valores de rugosidade superficial da maquinagem, uma vez que a atuação do revestimento nesses primeiros metros mostrou-se mais eficaz;
- No que toca à quantificação do desgaste do flanco da ferramenta de corte, este apresenta uma tendência igual ao que acontece com a rugosidade superficial. Inicialmente, e durante os primeiros 36 metros de comprimentos de corte, as ferramentas revestidas apresentam melhores valores. Ultrapassados os 36 metros, as ferramentas de carboneto de tungsténio não revestidas, apresentam menor desgaste do flanco;
- Quanto aos mecanismos de desgaste das ferramentas de corte, ambas apresentam adesão. As ferramentas revestidas com a multicamada de DLC e CrN, apresentam delaminação desse mesmo revestimento, provocando a formação de crateras que servem de alojamento para a adesão do material maquinado.

Dos resultados, foi possível notar uma coerência para cada análise realizada, tendo as ferramentas revestidas demonstrado melhores resultados nos primeiros metros de corte e as não revestidas mostraram-se mais eficazes para comprimentos de corte mais longos.



# CONCLUSÕES

4.1 Conclusões

4.2 Proposta de trabalhos futuros



## 4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

### 4.1 Conclusões

Os ensaios realizados neste estudo permitiram fazer a comparação do desempenho das ferramentas de corte revestidas com multicamada de CrN/DLC e não revestidas, na maquinagem de uma liga de cobre-berílio (AMPCOLOY® 83). Foram efetuados vários ensaios de maquinagem, avaliando a influência tanto do comprimento de corte como da velocidade de avanço, no comportamento ao desgaste e na qualidade superficial produzida.

De forma geral, é possível retirar as seguintes conclusões:

- Em relação à rugosidade superficial da peça maquinada, foi claramente notório que a velocidade de avanço tinha uma grande influência sobre este fator, com valores da rugosidade a aumentar até quatro vezes com o aumento da velocidade de avanço de 750 mm/min para 1500 mm/min. Este facto foi registado tanto nas ferramentas não revestidas como nas revestidas. Contudo, as ferramentas revestidas produziram melhores resultados para comprimentos de corte até os 36 metros, com a deterioração da qualidade superficial da peça a partir deste valor até aos 48 metros de comprimento de corte. As ferramentas não revestidas produziram melhor qualidade superficial para um comprimento de corte dos 36 metros aos 48 metros.
- O comportamento ao desgaste das ferramentas de corte, foi semelhante com um aumento da velocidade de avanço. Contudo, o desgaste do flanco das ferramentas apresentou-se maior para velocidades de avanço mais elevadas. Isto foi novamente registado tanto para as ferramentas revestidas como para as não revestidas. Para além disso, para comprimentos de corte mais elevados, o desgaste das ferramentas é mais significativo, com as ferramentas revestidas a apresentarem maior desgaste. No entanto, para comprimentos de corte até 36 metros, estas ferramentas exibiram menos desgaste do que as não revestidas. Assim, parece que o comprimento de corte de 36 metros apresenta um ponto de viragem para o comportamento ao desgaste das ferramentas. Para um comprimento de corte de 48 metros, as ferramentas não revestidas apresentam um melhor comportamento ao desgaste do que as revestidas.
- Relativamente aos mecanismos de desgaste das ferramentas de corte não revestidas, foi possível observar que os principais mecanismos foram: adesão e

quebra da aresta de corte. Como complemento a estes mecanismos, o principal mecanismo observado nas ferramentas revestidas foi a delaminação do revestimento de corte e a adesão. A quebra da aresta de corte é mais notória para uma velocidade de avanço de 1500 mm/min, sendo este fenómeno registado tanto nas ferramentas revestidas, como nas não revestidas.

Tanto as ferramentas revestidas como as não revestidas, apresentam um comportamento ao desgaste semelhante, com as ferramentas revestidas a apresentarem menos desgaste e a produzirem uma melhor qualidade superficial no início dos ensaios. Isto reflete-se na vida que o revestimento oferece à maquinação desta liga, sendo que o mesmo é fraturado logo nos instantes iniciais. No entanto, para comprimentos de corte mais elevados, as ferramentas revestidas são ultrapassadas pelas não revestidas, uma vez que as primeiras apresentavam um pior acabamento superficial e sofriam maior desgaste. Isto indica que este revestimento não é o mais adequado para operações de acabamento de ligas de cobre-berílio, seguindo a estratégia de maquinação utilizada. A partir de 36 metros de comprimento de corte, a deterioração do revestimento torna-se mais efetiva, o que tem as respetivas repercussões no acabamento superficial produzido.

Verificou-se também que a velocidade de avanço tem uma influência muito grande na qualidade da superfície maquinação, com valores de rugosidade superficial da peça maquinação mais baixos para velocidades de avanço mais reduzidas. Os ensaios realizados a uma velocidade de avanço de 350 mm/min produziram valores de rugosidade bastante satisfatórios, tanto para ferramentas revestidas como para não revestidas. No entanto, as ferramentas não revestidas tiveram um desempenho superior ao das ferramentas revestidas, ou seja, produziram uma melhor qualidade superficial global. Ao baixar a velocidade de avanço para 350 mm/min, é possível produzir componentes (insertos em zonas moldantes) para moldes de injeção, com elevada qualidade superficial. Com isto, é possível conseguir diminuir ou até mesmo eliminar a etapa de polimento da superfície do inserto, que normalmente funciona como zona moldante num molde de injeção.

## 4.2 Proposta de trabalhos futuros

Ao longo do projeto e após retiradas as conclusões, vários trabalhos surgiram como viáveis e com interesse para a continuação deste trabalho, nomeadamente:

- Estudar outro tipo de revestimento na maquinação de ligas de cobre-berílio;
- Verificar a influência da estratégia de acabamento no desgaste das ferramentas de corte;
- Otimizar os parâmetros de corte de forma a obter superfícies com rugosidade inferior a 0,1  $\mu\text{m}$ , de forma a eliminar a etapa de polimento de peças;
- Analisar a influência de outros parâmetros de corte na maquinação deste material, como por exemplo: velocidade de corte, profundidade de corte, ou até mesmo outras condições de lubrificação.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES  
DE INFORMAÇÃO**



## 5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

- [1] “Notícias.” [Online]. Available: [https://www.compete2020.gov.pt/noticias/detalhe/Setor\\_moldes](https://www.compete2020.gov.pt/noticias/detalhe/Setor_moldes). [Acedido em: 30-Jan-2021].
- [2] G. Adams, “*ASM Handbook - Machining*,” 9th ed., vol. 16. Ohio, USA: ASM International, 1989. ISBN: 9780871700223
- [3] V. F. C. Sousa, F.J.G. Silva, J.S. Fecheira, H.M. Lopes, R.P. Martinho, R.B. Casais, L.P. Ferreira, “Cutting Forces Assessment in CNC Machining Processes: A Critical Review,” *Sensors*, vol. 20, no. 16, p. 4536, 2020.
- [4] A. Salem, H. Hegab, and H. A. Kishawy, “An integrated approach for sustainable machining processes: Assessment, performance analysis, and optimization,” *Sustain. Prod. Consum.*, vol. 25, pp. 450–470, Jan. 2021.
- [5] M. P. Groover, “*Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems*,” 4th ed. USA: John Wiley & Sons, 2020. ISBN: 9780470467002
- [6] “*Manual técnico de usinagem*,” vol. 16. São Paulo, Brasil: Sandvik Coromant, 2005.
- [7] M. C. Shaw and J. O. Cookson, “*Metal cutting principles*,” vol. 2. New York, USA: Oxford university press New York, 2005. ISBN: 9780198086116
- [8] “UMC-1000SS | Fresadora de 5 eixos | Cones ISO40 | Supraveloz | Fresadoras Verticais – Máquinas CNC Haas.” [Online]. Available: <https://www.haascnc.com/pt/machines/vertical-mills/universal-machine/models/umc-1000SS.html>. [Acedido em: 26-Jan-2021].
- [9] “*Manual técnico de usinagem, torneamento, fresamento, furação, mandrilamento e sistemas de fixação*.” São Paulo, Brasil: Sandvik Coromant, 2010.
- [10] S. Kumar, R. Campilho, and F. J. G. Silva, “Rethinking modular jigs’ design regarding the optimization of machining times,” *Procedia Manuf.*, vol. 38, pp. 876–883, 2019.
- [11] C. Costa, F. J. G. Silva, R. M. Gouveia, and R. P. Martinho, “Development of hydraulic clamping tools for the machining of complex shape mechanical components,” *Procedia Manuf.*, vol. 17, pp. 563–570, 2018.
- [12] J. P. Davim, “*Princípios da Maquinagem*,” 2th ed. Porto: Publindustria, 2008. ISBN: 9789728953249
- [13] “Iscar Chip Formation.wmv - YouTube.” [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=mRuSYQ5Npek>. [Acedido em: 21-Apr-2021].

- [14] R. Grabowski, B. Denkena, and J. Köhler, "Prediction of process forces and stability of end mills with complex geometries," in *Procedia CIRP*, 2014, vol. 14, pp. 119–124.
- [15] S. Wojciechowski, R. W. Maruda, S. Barrans, P. Nieslony, and G. M. Krolczyk, "Optimisation of machining parameters during ball end milling of hardened steel with various surface inclinations," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 111, pp. 18–28, Dec. 2017.
- [16] X. Chen, C. Li, Y. Tang, L. Li, Y. Du, and L. Li, "Integrated optimization of cutting tool and cutting parameters in face milling for minimizing energy footprint and production time," *Energy*, vol. 175, pp. 1021–1037, May 2019.
- [17] C. Li, X. Chen, Y. Tang, and L. Li, "Selection of optimum parameters in multi-pass face milling for maximum energy efficiency and minimum production cost," *J. Clean. Prod.*, vol. 140, pp. 1805–1818, Jan. 2017.
- [18] T. Czánová, J. Pilc, S. M., and R. Bobrovsky, "Study of Primary Contact in Process of Face Milling," *Adv. Manuf. Sci. Technol.*, no. No 4, 2012.
- [19] "Materiais de ferramentas de corte." [Online]. Available: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/pages/cutting-tool-materials.aspx>. [Acedido em: 14-Jan-2021].
- [20] R. (Ronald) Edwards, *"Cutting tools,"* 1st ed. London: CRC Press, 1993. ISBN: 9780901716484
- [21] "Fresamento de diferentes materiais." [Online]. Available: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/pages/milling-different-materials.aspx>. [Acedido em: 27-Jan-2021].
- [22] N. L. Bhirud and R. R. Gawande, "Optimization of process parameters during end milling and prediction of work piece temperature rise," *Arch. Mech. Eng.*, vol. 64, no. No 3, pp. 327–346, 2017.
- [23] V. F. C. Sousa, F. J. G. Silva, R. Alexandre, J. S. Fecheira, and F. P. N. Silva, "Study of the wear behaviour of TiAlSiN and TiAlN PVD coated tools on milling operations of pre-hardened tool steel," *Wear*, p. 203695, 2021.
- [24] F. J. G. Silva, R. C. B. Casais, R. P. Martinho, and A. P. M. Baptista, "Mechanical and tribological characterization of TiB<sub>2</sub> thin films," *J. Nanosci. Nanotechnol.*, vol. 12, no. 12, pp. 9187–9194, 2012.
- [25] R. P. Martinho, F. J. G. Silva, and A. P. M. Baptista, "Cutting forces and wear analysis of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> diamond coated tools in high speed machining," *Vacuum*, vol. 82, no. 12, pp. 1415–1420, 2008.
- [26] "Precision Solid Carbide and PCD Cutting Tools | Cutting Tool Engineering." [Online]. Available: <https://www.ctemag.com/products/precision-solid-carbide-and-pcd-cutting-tools>. [Acedido em: 24-Jan-2021].
- [27] P. A. M. Loureiro, "Otimização da utilização de ferramentas de corte em fresagem CNC", Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2020.

- [28] “Technical Information - Destiny Tool.” [Online]. Available: <https://www.destinytool.com/technical.html>. [Acedido em: 20-Apr-2021].
- [29] “Dormer: Technical Handbook.” [Online]. Available: <http://www.boudrant.com.tn/front/docs/DORMER.pdf>. [Acedido em: 15-Jan-2021].
- [30] “Sistemas de ferramentas.” [Online]. Available: <https://www.dormerpramet.com/pt-pt/productssite/pages/tooling-systems.aspx?country=pt#1>. [Acedido em: 14-Jan-2021].
- [31] S. Klotz, M. Gerstenmeyer, F. Zanger, and V. Schulze, “Influence of clamping systems during drilling carbon fiber reinforced plastics,” in *Procedia CIRP*, 2014, vol. 13, pp. 208–213.
- [32] “CNC Milling Toolholders | Redline Tools.” [Online]. Available: <https://www.redlinetools.com/products/cnc-milling-tool-holders>. [Acedido em: 15-Jan-2021].
- [33] “Staffaggi e Sistemi di Automazione Industriale - FCS System.” [Online]. Available: <https://www.fcssystem.com/pt/>. [Acedido em: 15-Jan-2021].
- [34] “Strap Clamps Guide | Carr Lane.” [Online]. Available: <https://www.carrlane.com/engineering-resources/technical-information/manual-workholding/strap-clamps>. [Acedido em: 15-Jan-2021].
- [35] “Strap Clamp Tips - Tormach CNC - YouTube.” [Online]. Available: [https://www.youtube.com/watch?v=cS\\_KkHOe8dc](https://www.youtube.com/watch?v=cS_KkHOe8dc). [Acedido em: 15-Jan-2021].
- [36] “Mesa Magnética - CR TOOLS - YouTube.” [Online]. Available: [https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=DYcOx\\_L\\_8N8](https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=DYcOx_L_8N8). [Acedido em: 15-Jan-2021].
- [37] “High Precision Single Station Vises | Kurt Workholding.” [Online]. Available: <https://www.kurtworkholding.com/product-category/workholding/single-station-vises/>. [Acedido em: 15-Jan-2021].
- [38] “Kurt Air VersatileLock Reverse Vise, 6" - 3610A | Kurt Workholding.” [Online]. Available: <https://www.kurtworkholding.com/product/kurt-air-versatilelock-reverse-vise-6/>. [Acedido em: 15-Jan-2021].
- [39] “How to Square and Indicate a Vise on Your CNC Mill – Haas Automation Tip of the Day - YouTube.” [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=cn05fx55pqc>. [Acedido em: 15-Jan-2021].
- [40] J. Fleischer, B. Denkena, B. Winfough, and M. Mori, “Workpiece and Tool Handling in Metal Cutting Machines,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 55, no. 2, pp. 817–839, Jan. 2006.
- [41] “Sistemi di Staffaggio per Macchine Utensili - FCS System.” [Online]. Available: <https://www.fcssystem.com/pt/clamping>. [Acedido em: 15-Jan-2021].
- [42] “How to Design and Analyze the Right Clamping System | MoldMaking Technology.” [Online]. Available: <https://www.moldmakingtechnology.com/articles/how-to-design-and-analyze->

- the-right-clamping-system. [Acedido em: 15-Jan-2021].
- [43] V. F. C. Sousa, F. J. G. Da Silva, G. F. Pinto, A. Baptista, and R. Alexandre, "Characteristics and wear mechanisms of TiAlN-based coatings for machining applications: A comprehensive review," *Metals (Basel)*, vol. 11, no. 2, p. 260, 2021.
- [44] F. J. G. Silva, "Estudo da estrutura e comportamento tribológico de revestimentos duros e ultra-duros executados no vácuo", Tese de Douturamento, Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2001.
- [45] K. Bobzin, "High-performance coatings for cutting tools," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 18. Elsevier Ltd, pp. 1–9, 01-Aug-2017.
- [46] W. Grzesik, "Advanced Protective Coatings for Manufacturing and Engineering." Munich, Germany: Hanser Gardner Publications, 2003. ISBN: 9781569903391
- [47] K. Cheng, "Machining dynamics: fundamentals, applications and practices." London: Springer Science & Business Media, 2008. ISBN: 9781846283673
- [48] 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*, 2018, vol. 17, pp. 746–757.
- [49] L. Fernandes, F. J. G. Silva, M. F. Andrade, R. Alexandre, A. P. M. Baptista, and C. Rodrigues, "Increasing the stamping tools lifespan by using Mo and B4C PVD coatings," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 325, pp. 107–119, 2017.
- [50] V. Nunes, F. J. G. Silva, M. F. Andrade, R. Alexandre, and A. P. M. Baptista, "Increasing the lifespan of high-pressure die cast molds subjected to severe wear," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 332, pp. 319–331, 2017.
- [51] R. P. C. S. Martinho, "Revestimentos PVD mono e multicamada para moldes utilizados na injeção de plásticos reforçados", Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.
- [52] R. P. Martinho, F. J. G. Silva, C. Martins, and H. Lopes, "Comparative study of PVD and CVD cutting tools performance in milling of duplex stainless steel," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 102, no. 5–8, pp. 2423–2439, Jun. 2019.
- [53] L. Patnaik, S. Ranjan Maity, and S. Kumar, "DLC/CrN or AlCrN/CrN composite films: The better candidate in terms of anti-Wear performance and lesser ion release in hip implant," *Mater. Today Proc.*, Jan. 2021.
- [54] J. Čyviene, M. Laurikaitis, and J. Dudonis, "Deposition of nanocomposite Zr–ZrO<sub>2</sub> films by reactive cathodic vacuum arc evaporation," *Mater. Sci. Eng. B*, vol. 118, no. 1–3, pp. 238–241, Apr. 2005.
- [55] F. J. G. Silva, A.P.M. Baptista, E. Pereira, V. Teixeira, Q.H. Fan, A.J.S. Fernandes, "Microwave plasma chemical vapour deposition diamond nucleation on ferrous

- substrates with Ti and Cr interlayers,” *Diam. Relat. Mater.*, vol. 11, no. 9, pp. 1617–1622, 2002.
- [56] F. J. G. Silva, A. J. S. Fernandes, F. M. Costa, A. P. M. Baptista, and E. Pereira, “A new interlayer approach for CVD diamond coating of steel substrates,” *Diam. Relat. Mater.*, vol. 13, no. 4–8, pp. 828–833, 2004.
- [57] K.-L. Choy, “*Chemical vapour deposition (CVD): advances, technology and applications.*” New York, USA: CRC Press, 2019. ISBN: 9781466597761
- [58] F. J. G. Silva, A. J. S. Fernandes, F. M. Costa, V. Teixeira, A. P. M. Baptista, and E. Pereira, “Tribological behaviour of CVD diamond films on steel substrates,” *Wear*, vol. 255, no. 7–12, pp. 846–853, 2003.
- [59] V. F. C. Sousa and F. J. G. Silva, “Recent Advances in Turning Processes Using Coated Tools—A Comprehensive Review,” *Metals (Basel)*, vol. 10, no. 2, p. 170, 2020.
- [60] C. Kainz, N. Schalk, M. Tkadletz, C. Mitterer, and C. Czettel, “Microstructure and mechanical properties of CVD TiN/TiBN multilayer coatings,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 370, pp. 311–319, Jul. 2019.
- [61] Y. Lu, G. Huang, S. Wang, C. Mi, S. Wei, F. Tian, W. Li, H. Cao, Y. Cheng, “A review on diamond-like carbon films grown by pulsed laser deposition,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 541, p. 148573, Mar. 2021.
- [62] C. Donnet and A. Erdemir, “*Tribology of diamond-like carbon films: fundamentals and applications.*” New York, USA: Springer Science & Business Media, 2007. ISBN: 9780387302645
- [63] J. Robertson, “Diamond-like amorphous carbon,” *Mater. Sci. Eng. R Reports*, vol. 37, no. 4–6, pp. 129–281, May 2002.
- [64] A. Tyagi, R. S. Walia, Q. Murtaza, S. M. Pandey, P. K. Tyagi, and B. Bajaj, “A critical review of diamond like carbon coating for wear resistance applications,” *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, vol. 78, pp. 107–122, Jan. 2019.
- [65] G. Rocha Dos Santos, “Caracterização de Filme DLC e Avaliação dos Esforços de Usinagem em Insertos Revestidos no Torneamento de Ligas Al-Si”, Dissertação de Mestrado, Departamento de Ciências Exatas e de Tecnologia, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2006.
- [66] F. J. G. Silva, R. P. Martinho, and A. P. M. Baptista, “Characterization of laboratory and industrial CrN/CrCN/diamond-like carbon coatings,” *Thin Solid Films*, vol. 550, pp. 278–284, 2014.
- [67] T. Aizawa, E. Masaki, and Y. Sugita, “Complete ashing of used DLC coating for reuse of the end-milling tools,” *Manuf. Lett.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–3, Jan. 2014.
- [68] K. Vercaemmen, H. Haefke, Y. Gerbig, A. Van Hulsel, E. Pflüger, and J. Meneve, “A comparative study of state-of-the-art diamond-like carbon films,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 133–134, pp. 466–472, Nov. 2000.
- [69] “DLC Diamond Like Carbon Coating | RobbJack Corporation.” [Online]. Available: <https://robbjack.com/support-article/dlc-diamond-like-carbon-coating/>.

[Acedido em: 27-Jan-2021].

- [70] E. Konca, Y. T. Cheng, A. M. Weiner, J. M. Dasch, and A. T. Alpas, "Elevated temperature tribological behavior of non-hydrogenated diamond-like carbon coatings against 319 aluminum alloy," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 200, no. 12–13, pp. 3996–4005, Mar. 2006.
- [71] A. Vanhulsel, B. Blanpain, J. P. Celis, J. Roos, E. Dekempeneer, and J. Smeets, "Study of the wear behaviour of diamond-like coatings at elevated temperatures," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 98, no. 1–3, pp. 1047–1052, Jan. 1998.
- [72] T. Yokota, T. Sawa, M. Yokouchi, K. Tozawa, M. Anzai, and T. Aizawa, "Frictional properties of diamond-like carbon coated tool in dry intermittent machining of aluminum alloy 5052," *Precis. Eng.*, vol. 38, no. 2, pp. 365–370, Apr. 2014.
- [73] R. M. Gouveia, F. J. G. Silva, P. Reis, and A. P. M. Baptista, "Machining Duplex Stainless Steel: Comparative Study Regarding End Mill Coated Tools," *Coatings*, vol. 6, no. 4, 2016.
- [74] R. P. Martinho, F. J. G. Silva, and A. P. M. Baptista, "Wear behaviour of uncoated and diamond coated Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> tools under severe turning conditions," *Wear*, vol. 263, no. 7-12 SPEC. ISS., pp. 1417–1422, Sep. 2007.
- [75] F. J. G. Silva, R. P. Martinho, C. Martins, H. Lopes, and R. M. Gouveia, "Machining GX2CrNiMoN26-7-4 DSS alloy: wear analysis of TiAlN and TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN coated carbide tools behavior in rough end milling operations," *Coatings*, vol. 9, no. 6, p. 392, 2019.
- [76] V. F. C. Sousa, F. J. G. Silva, H. Lopes, R. Casais, A. Baptista, G. Pinto, R. Alexandre, "Wear Behavior and Machining Performance of TiAlSiN-Coated Tools Obtained by dc MS and HiPIMS: A Comparative Study," *Materials*, vol. 14, no. 18, p. 5122, 2021.
- [77] N. Hassan, A.-G. E.-H. Hassan, and A.-G. El-Hofy, "Machining Processes Conventional and Nonconventional Processes," 2nd ed. New York, USA: CRC Press, 2013. ISBN: 9780429194979
- [78] H. Tschätsch, "Applied Machining Technology." Berlin, Germany: Springer Science & Business Media, 2010. ISBN: 9783642010064
- [79] J. P. Davim, "Machining: fundamentals and recent advances." England, UK: Springer Science & Business Media, 2008. ISBN: 9781848002128
- [80] H. H. Ferreira, "Importância do estudo em Microscopia Eletrónica de Varrimento de amostras incluídas em parafina para fins de diagnóstico", Dissertação de Mestrado, Departamento de Bioengenharia, Instituto Superior Técnico, 2016.
- [81] J. I. Goldstein, D. E. Newbury, J. R. Michael, N. W. M. Ritchie, J. H. J. Scott, and D. C. Joy, "Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis." New York, USA: Springer, 2017. ISBN: 9781493966745
- [82] P. J. C. de M. Reis, "Estudo comparativo do comportamento de diferentes ferramentas na fresagem de aços duplex", Dissertação de Mestrado,

- Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2014.
- [83] J. P. Davim, G. P. Petropoulos, and C. N. Pandazaras, "Surface texture characterization and evaluation related to machining," in *Surface Integrity in Machining*, England, UK: Springer London, 2010, pp. 37–66. ISBN: 9781848828735
- [84] G. A. Oosthuizen, K. Nunco, P. J. T. Conradie, and D. M. Dimitrov, "The effect of cutting parameters on surface integrity in milling Ti6Al4V," *South African J. Ind. Eng.*, vol. 27, no. 4, pp. 115–123, 2016.
- [85] M. Shihan, J. Chandradass, and T. T. M. Kannan, "Investigation of vibration analysis during end milling process of monel alloy," in *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 39, pp. 695–699.
- [86] S. V. Alagarsamy, M. Ravichandran, M. Meignanamoorthy, S. Sakthivelu, and S. Dineshkumar, "Prediction of surface roughness and tool wear in milling process on brass (C26130) alloy by Taguchi technique," in *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 21, pp. 189–193.
- [87] S. Dehen, E. Segebade, M. Gerstenmeyer, F. Zanger, and V. Schulze, "Milling parameter and tool wear dependent surface quality in micro-milling of brass," in *Procedia CIRP*, 2020, vol. 87, pp. 95–100.
- [88] J. Y. Zuo, Y. X. Lin, J. C. Zheng, P. Zhong, and M. He, "An investigation of thermal-mechanical interaction effect on PVD coated tool wear for milling Be/Cu alloy," *Vacuum*, vol. 167, pp. 271–279, Sep. 2019.
- [89] "AMPCOLOY® 83 | AMPCO METAL." [Online]. Available: <https://www.ampcometal.com/pt-br/productos/ligas-de-alta-condutividade/ampcoloy-83-extrudado/>. [Acedido em: 27-Jan-2021].
- [90] "China UNS C17200 Beryllium Copper Alloys Manufacturers, Suppliers, Factory, Exporter, Seller - Linkun." [Online]. Available: <https://www.lksteelpipe.com/uns-c17200-beryllium-copper-alloys>. [Acedido em: 30-Jul-2021].
- [91] R. N. UFRGS *et al.*, "ASM Handbook Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials." Ohio, USA: ASM International, 1990. ISBN: 9780871703781
- [92] "Beryllium-Copper Alloys." [Online]. Available: <http://www.ngkbf.com/brochure1.html>. [Acedido em: 17-Jul-2021].
- [93] "Thermoplastic Injection Molds | JMMS." [Online]. Available: <https://www.jmmsinc.com/plastics-tooling-injection-molding/thermoplastic-injection-molding/>. [Acedido em: 27-Jan-2021].
- [94] "Services." [Online]. Available: <https://www.legacyprecisionmolds.com/services>. [Acedido em: 27-Jan-2021].
- [95] "VF-2 | Fresadora de Cones ISO40 | Fresadoras verticais – Máquinas CNC Haas." [Online]. Available: <https://www.haascnc.com/pt/machines/vertical-mills/vf-series/models/small/vf-2.html>. [Acedido em: 25-May-2021].




# ANEXOS

6.1 Anexo 1: Ficha técnica – AMPCOLOY® 83



## 6 ANEXOS

### 6.1 Anexo 1: Ficha técnica – AMPCOLOY® 83



**AMPCO METAL**  
 Excellence in engineered alloys

**Technical Data Sheet**  
**AMPCOLOY® 83**  
 Forgings

Nominal composition:	Specifications:
Beryllium (Be) 1.9%	EN 101C A4/2
Cobalt + Nickel (Co + Ni) 0.5%	D DIN 17672 W. Nr. 2.1247
Others 0.5% max.	F AFNOR UBe2
Copper (Cu) balance	GB BS
	USA CDA C17200 RWMA Class 4

Mechanical and physical properties	Units	Nominal Values
Tensile strength Rm	MPa	1140
Yield strength Rp 0.5	MPa	1000
Elongation A5	%	5
Brinell hardness	HBW 10/ 3000	360
Rockwell hardness	HRC	38
Modulus of elasticity E	GPa	128
Density ρ	g / cm <sup>3</sup>	8.26
Coefficient of expansion α	10 <sup>-6</sup> / K	17.5
Thermal conductivity λ	W / m ·K	106
Electrical conductivity γ	m / Ω · mm <sup>2</sup>	12.8
Electrical conductivity	% I.A.C.S.	22
Specific heat Cp	J / g ·K	0.38

Assurances given with respect to properties or uses are subject to written approval from AMPCO METAL.

AMPCOLOY® 83 is a 1.9 % Beryllium copper alloy which displays very high mechanical properties with a reasonably good electrical and thermal conductivity.

**APPLICATIONS:**  
 Wherever good wear resistance or high mechanical properties are desired coupled with a good electrical or thermal conductivity, such as:  
 Flash butt welding and butt welding  
 Parts for electrical components  
 In the plastic mould industry AMPCOLOY® 83 is sometimes used as chill plates and inserts in the moulds, cooling pins and neck rings or bottom plates for blow moulds of plastic bottles.

**WARNING**  
 Since the alloy contains 1.9 % Beryllium, it is recommended that during any operation which is liable to create dust or fumes (for example dry grinding, polishing or welding) precautions should be taken to ensure there is no inhalation or exposure to eyes or skin. Conventional machining (for example milling and turning) is not generally considered hazardous.

info@ampcometal.com
www.ampcometal.com

Figura 80 - Ficha técnica AMPCOLOY® 83