



ESTUDO DO COMPORTAMENTO AO DESGASTE DO REVESTIMENTO TiAlN/DLC EM FERRAMENTAS DE CORTE, NA FRESAGEM DE LIGAS DE COBRE-BERÍLIO - AMPCOLOY® 83

FÁBIO RAFAEL DA SILVA FREITAS

outubro de 2023

ESTUDO DO COMPORTAMENTO AO DESGASTE DO REVESTIMENTO TiAlN/DLC EM FERRAMENTAS DE CORTE, NA FRESAGEM DE LIGAS DE COBRE-BERÍLIO AMPCOLOY® 83

Fábio Rafael da Silva Freitas

Mestrado Materiais e Tecnologias de Fabrico

2023

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

ESTUDO DO COMPORTAMENTO AO DESGASTE DO REVESTIMENTO TiAlN\DLc EM FERRAMENTAS DE CORTE, NA FRESAGEM DE LIGAS DE COBRE-BERÍLIO AMPCOLOY® 83

Fábio Rafael da Silva Freitas

1040137

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 da Doutora Rafaela Carla Barros Casais e coorientação do Professor Doutor Francisco José Gomes da Silva, e do Doutor Filipe Daniel Fernandes.

2023

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

AGRADECIMENTOS

Desejo expressar os meus sinceros agradecimentos a todos os que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, nomeadamente à Doutora Rafaela Carla Barros Casais, pela orientação, apoio e encorajamento prestado ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho, assim como em todo o meu percurso académico.

Ao coorientador, Professor Doutor Francisco José Gomes da Silva, pela sua visão e capacidade de fazer acontecer, permitindo dessa forma criar as condições para a realização do trabalho.

Ao coorientador, Doutor Filipe Daniel Fernandes, que se demonstrou incansável na obtenção de material necessário a realização da maquinagem, assim como no processo de caracterização do mesmo.

Ao Engenheiro Victor Moreira, pela disponibilidade e ajuda na realização dos ensaios práticos apresentados neste trabalho.

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

Ao Doutor Rui Rocha, técnico de Microscopia Eletrónica de Varrimento do Centro de Materiais da Universidade do Porto (CEMUP), obrigado pela ajuda prestada na obtenção de detalhes análise e interpretação das imagens apresentadas neste trabalho.

Aos colegas Vítor Sousa e Naiara Sebbe, por toda a ajuda e disponibilidade prestada na parte prática do trabalho.

Um obrigado à INOVATOOLS, S.A. pelo fornecimento das ferramentas de corte, à *Durit Coatings*, em especial ao Engenheiro Renato Monteiro, pela realização dos revestimentos das ferramentas.

À minha família, amigos e, principalmente à minha filha e 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.

E não poderia deixar de dedicar todo o trabalho que realizei à Pandora, minha companheira de sempre e para sempre, que em todas as noites que fiquei acordado ao longo destes últimos 5 anos, fez questão de se deitar aos meus pés, enquanto estudava ou trabalhava neste documento, mas que infelizmente não está cá para me poder ouvir dizer que finalmente acabei.

Obrigado por tudo Pandora, tu eras a minha felicidade.

RESUMO

O crescimento exponencial da indústria da maquinagem e as suas necessidades, impulsionou nos últimos anos o desenvolvimento de novas tecnologias de fabrico, tipos de ferramentas de corte mais avançadas, e o desenvolvimento de novos revestimentos que permitam estender o tempo de vida das ferramentas.

Às ferramentas de maquinagem, têm sido estudadas e implementadas novas soluções de revestimentos, que proporcionam baixo coeficiente de atrito e lubrificação, potenciando um aumento do seu tempo de vida.

Seguindo essa linha de raciocínio, torna-se pertinente desenvolver trabalho científico que vise estudar o comportamento de ferramentas de corte revestidas com filmes finos que promovam baixo atrito e elevada lubrificação. É este o caso dos revestimentos do sistema DLC - *Diamond like carbon films*, os quais promovem boa resistência à oxidação e elevadas velocidades de maquinagem, propriedades presentes nos revestimentos de TiAlN - Nitreto de Titânio Alumínio. Assim, pretendeu-se estudar o efeito de um revestimento depositado em multicamada (TiAlN/DLC) sobre fresas, para estudar o seu rendimento de corte durante a fresagem de uma liga de Cobre-Berílio, designada comercialmente como AMPCOLOY®83. A qualidade da superfície maquinada foi avaliada e o desgaste da ferramenta de corte estudado.

O revestimento depositado sobre as fresas foi caracterizado relativamente à sua espessura, estrutura, composição química, morfologia, propriedades mecânicas e adesão ao substrato. Tal como esperado, as observações SEM mostraram que o revestimento é composto por duas camadas e transição gradiente entre essas mesmas camadas. A dureza e o módulo de Young do revestimento mostrou ser 5.6 GPa e 93.2 GPa, respetivamente. De acordo com os ensaios de adesão por deslizamento (*Scratch Test*), apresentaram falha adesiva F_{C2} na ordem dos 35 N, e um padrão de fissuração aceitável, do tipo HF2, segundo a Norma VDI 3198: 1991, para testes de indentação.

Os ensaios de fresagem foram realizados variando a velocidade de avanço, velocidade de corte e o comprimento de corte. Os parâmetros de corte de referência foram escolhidos tendo em conta trabalhos anteriores e as indicações do fabricante. Após fresagem, as ferramentas revestidas e não revestidas foram observadas em microscópio eletrónico e os mecanismos de desgaste avaliados. Além disso, o volume de desgaste da fresa foi avaliado, bem como a rugosidade superficial da peça maquinada.

As ferramentas revestidas apresentaram um melhor desempenho do que as ferramentas não revestidas, para quaisquer que fossem as condições e parâmetros de corte utilizados. Além disso, a rugosidade superficial obtida na peça maquinada foi sempre menor nos ensaios realizados com as fresas revestidas. O desgaste apresentado nas ferramentas revestidas foi menor do que o das ferramentas não revestidas.

PALAVRAS-CHAVE

Revestimentos TiAlN/DLC; Ferramentas de corte; Revestimentos PVD; Maquinagem; AMPCOLOY® 83; Ligas de Cobre-Berílio.

ABSTRACT

In recent years, the exponential growth of the machining industry and its needs has driven the development of new manufacturing technologies, more advanced cutting tool types and new types of coatings to extend tool lifetime.

New coating solutions have been studied and implemented for machining tools, which provide a low friction coefficient and lubrication, thus increasing tool lifetime.

Following this line of reasoning, it is relevant to develop scientific work aimed at studying the behavior of cutting tools coated with thin films that promote low friction and high lubrication, as is the case with DLC (Diamond like carbon films) coatings. These coatings promote good resistance to oxidation and allow high machining speeds, properties present in TiAlN (Titanium Aluminum Nitride) coatings. The aim was to study the effect of a multilayer coating (TiAlN/dlc) on milling tools to analyze their cutting performance when milling a copper-beryllium alloy known commercially as AMPCOLOY®83. The quality of the machined surface was evaluated, and the wear of the cutting tool was studied.

The coating deposited in the milling tools was characterized in terms of its thickness, structure, chemical composition, morphology, mechanical properties, and adhesion to the substrate. As expected, SEM observations showed that the coating is composed of two layers and a gradient transition between layers. The hardness and modulus of elasticity of the coating were 5.6 GPa and 93.2 GPa, respectively. According to the Scratch Test, the adhesive failure F_{C2} was about 35 N and the cracking pattern was HF2, which is considered as acceptable, according to VDI Standard 3198: 1991, for indentation tests.

The milling tests were carried out by varying the feed speed, cutting speed, and cutting length. The reference cutting parameters were chosen considering previous work and the tools manufacturers instructions. After milling, the coated and uncoated tools were observed under an electron microscope and the wear mechanisms evaluated. In addition, the wear volume of the milling cutter was evaluated, as well as the surface roughness of the machined part.

The coated tools had a better performance than the uncoated tools, whatever the cutting conditions and parameters used. In addition, the surface roughness obtained on the machined part was always lower in the tests carried out with the coated milling tools. Wear on the coated tools was lower than on the uncoated tools.

KEYWORDS

TiAlN/DLC coatings; Cutting tools; PVD coatings; Machining; AMPCOLOY® 83; Copper-Beryllium alloys

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABELAS	XI
LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS	XIII
1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Contextualização	15
1.2. Objetivos	16
1.3. Metodologia científica	17
1.4. Estrutura da dissertação	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA CONTEXTUALIZAÇÃO TEÓRICA E ESTADO DA ARTE	19
2.1. Princípio do corte por arranque de apra	20
2.2. Mecanismos de desgaste associados a ferramentas de corte	24
2.3. Revestimentos Tribológicos	28
2.4. Técnicas de realização de revestimentos tribológicos	31
2.4.1. CVD - <i>Chemical Vapour Deposition</i>	33
2.4.2. PVD - <i>Physical Vapour Deposition</i>	36
2.5. Métodos de caracterização de revestimentos	39
2.5.1. Testes de Adesão	40
2.5.2. Testes de dureza	41
2.6. Técnicas de revestimento para ferramentas de corte	42
2.6.1. Revestimentos DLC	43
2.6.2. Revestimentos TiAlN	45
2.7. Maquinagem de ligas de cobre	47
2.7.1. Estudos de maquinagem em ligas de cobre	47
2.7.2. Liga de Cobre-Berílio AMPCOLOY® 83	48
3. MATERIAIS E MÉTODOS	51
3.1. Materiais	51
3.1.1. Material a maquinar	51
3.1.2. Substrato e geometria da ferramenta	53
3.1.3. Revestimento usado	54
3.2. Métodos e Equipamentos	54
3.2.1. Revestimento das Ferramentas - PVD	54
3.2.2. Equipamento e condições de fresagem	56
3.2.3. Plano de Ensaio	59
3.2.4. Análise da rugosidade da superfície maquinada	62
3.2.5. Análise de desgaste e espessura do revestimento	64
3.2.6. Testes efetuados para a caracterização do revestimento das ferramentas de corte	

3.2.7. Análise morfologia em secção transversal e superfície	70
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	71
4.1. Caracterização do revestimento	71
4.1.1. Espessura e estrutura do revestimento	71
4.1.2. Morfologia da secção transversal e da superfície do revestimento	73
4.1.3. Composição química do revestimento	74
4.1.4. Propriedades mecânicas do revestimento	76
4.1.5. Avaliação da adesão do revestimento	77
4.2. Análise da rugosidade da superfície maquinada	79
4.3. Análise das ferramentas – SEM	84
4.3.1. Análise do desgaste – Comparação visual	84
4.3.2. Quantificação do desgaste – Medição	92
4.3.3. Caracterização dos mecanismos de desgaste	97
4.4. Discussão de resultados	102
5. CONCLUSÕES	105
5.1. Conclusões finais	105
5.2. Constrangimentos e trabalhos futuros	107
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
ANEXO A – Parâmetros de corte e dimensões 998.063.992	123
ANEXO B – Revestimento DiaPlus TiAlN\DLC	125
ANEXO C – Material a maquinar AMPCOLOY® 83	127
ANEXO D – Fluido de corte - Alusol SL 61 XBB	129

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de fresagem: (a) periférica e (b) de topo. Adaptado (Reddy & Swamy, 2012)	21
Figura 2 - Operações de fresagem. Adaptado de (TecTron, 2022)	21
Figura 3 - Variáveis que influenciam o processo de maquinagem (Salem et al., 2021)	22
Figura 4 - Profundidade e largura de corte (Sandvik, 2017)	23
Figura 5 - Relação entre os parâmetros f_z , h_{ex} , h_m e a_e (Sandvik, 2017).....	24
Figura 6 - Desgastes possíveis da ferramenta de corte: (a) flanco e (b) lascagem (Sandvik, 2017, 2022a)	25
Figura 7 - Desgastes adesivo: (a) tipo entalhe e (b) aresta postiça (Sandvik, 2017, 2022a).....	25
Figura 8 - Desgastes do tipo químico e térmico: (a) formação de cratera; (b) deformação e (c) fratura (Sandvik, 2017, 2022a).....	25
Figura 9 - Aresta de corte com desgaste abrasivo e revestimento com lascagem (Reis, 2014).....	26
Figura 10 - Sistema tribológico substrato/revestimento (Silva, 2001).....	29
Figura 11 - Variáveis de um processo tribológico de contacto entre duas superfícies animadas de movimento relativo de deslizamento. Adaptado de (Casais, 2020; Holmberg et al., 2000)	29
Figura 12 - Esquema das modificações macromecânicas de atrito provocadas pelo movimento de deslizamento de um corpo sobre uma superfície revestida (Silva, 2001)	30
Figura 13 - Diagrama esquemático resumido das diversas variantes desenvolvidas em torno do processo CVD (Silva, 2022)	33
Figura 14 - Representação do princípio de síntese de diamante pelo processo CVD (May, 1995; Silva, 2022).....	34
Figura 15 – a) Morfologia de diamante nanocristalino (NCD) obtido através da técnica HFCVD - Reproduzido de (Silva et al., 2009) b) Imagem SEM - secção transversal de revestimento de diamante (Ali & Ürgen, 2012).....	35
Figura 16 – Esquema abreviado de variantes da técnica PVD (Silva, 2022).....	36
Figura 17 – Diagrama esquemático do processo de evaporação (Silva, 2022)	37
Figura 18 – Diagrama esquemático do processo de <i>Sputtering</i> (Silva, 2022)	38
Figura 19 – Representação esquemática do fluxo do processo de deposição (Gassner et al., 2016)	38
Figura 20 - Funcionamento do AFM. Adaptado de (Pinto et al., 2015)	39
Figura 21 - Teste de adesão (“Scratch-test”) (Casais, 2020)	40
Figura 22 - Resumo dos mecanismos que originam falhas de adesão do revestimento ao substrato: a) fissuração por deformação de proa; b) pequenas delaminações; c) delaminação lateral; d) pequenos rebentamentos superficiais; e) levantamento repentino de grande quantidade de material; f) descascamentos laterais e de pequenas porções no trilho onde o substrato se torna visível; g) remoção do revestimento com exposição do substrato na zona trilho e h) delaminação contínua e completa (Casais, 2020)	40
Figura 23 - Falhas segundo norma VDI 3198: 1991. Adaptado de (Vidakis et al., 2003).....	41
Figura 24 - Representação do ensaio de nanoindentação: (a) representação esquemática, e (b) gráfico referente às etapas do ensaio. Adaptado de (Hu, 2017)	42
Figura 25 – Configurações para revestimentos depositados em ferramentas de corte (Caliskan et al., 2017)	43

Figura 26 - Combinações de proporções e configurações resultantes para o DLC (Robertson, 2002)	44
Figura 27 – Bloco de AMPCOLOY® 83	52
Figura 28 – Ferramenta de corte: a) Diagrama esquemático legendado; b) Lâminas de corte (vista de topo)	53
Figura 29 – Fresa não revestida	54
Figura 30 – Fresa revestida	54
Figura 31 – Limpeza com acetona em equipamento de ultrassons	55
Figura 32 – Equipamento CemeCom CC800/9 ML PVD	55
Figura 33 – HAAS VF-2 – Centro de Maquinagem	56
Figura 34 – Sistema de Aperto a) Cone e Porta Pinças ER-32 H70 com ferramenta; b) Chave para abertura ER-32 c) Ferramenta de corte em centro HAAS VF-2	57
Figura 35 – Prensa modelo One-Lok da CHICK	58
Figura 36 – Sonda de contacto OMP40 Renishaw	58
Figura 37 – Sensor de ferramentas OTS da Renishaw	59
Figura 38 – a) Rugosímetro Mahr Perthometer M1; b) Apalpador montado no bloco	63
Figura 39 – a) Apalpador montado longitudinalmente; b) Apalpador montado transversalmente	63
Figura 40 – Limpeza com álcool etílico em equipamento de ultrassons Branson 5200	64
Figura 41 – Amostra para análise de espessura SEM	65
Figura 42 – Microscópio eletrónico de varrimento: Hitachi SU3800	65
Figura 43 – Numeração das lâminas utilizada na análise das ferramentas	67
Figura 44 – Tipos de desgaste de flanco em fresas de topo (ISO, 1989)	67
Figura 45 – Equipamento “Scratch Tester”	68
Figura 46 – Durómetro marca EMCO modelo M4U 025 G3	69
Figura 47 – a) Lupa metalográfica modelo SZ60; b) Microscópio ótico modelo BX51M	69
Figura 48 – Equipamento de Nanoindentação NanoTest Micro Materials	70
Figura 49 – Caracterização do revestimento: a) identificação das diferentes camadas (Z1 – TiAlN, Z2 – DLC, Z3 – Ti); b) medição da espessura do revestimento	71
Figura 50 – Espectros EDS para as diferentes zonas da Figura 49: a) Z1; b) Z2; c) Z3 d) Substrato	73
Figura 51 – Morfologia do revestimento: a) Secção transversal; b) Superfície	74
Figura 52 – Composições químicas dos revestimentos: a) Secção transversal; b) Superfície	74
Figura 53 – Mapas de distribuição elementar dos elementos químicos mais significativos obtidos em secção transversal	75
Figura 54 – Resultados obtidos no ensaio de nanoindentação	76
Figura 55 – Resultados obtidos na análise do ensaio de deslizamento	77
Figura 56 – a) Início de falha adesiva F_{c2} do revestimento com ampliação 100x; b) Transição para falha completa do revestimento com ampliação 200x	78
Figura 57 – a) 1ª Indentação efetuada com um indentador Rockwell C, com ampliação 100x; b) 3ª Indentação efetuada com um indentador Rockwell C, com ampliação 100x; c) Falha HF2, aceitável, segundo a norma VDI 3198:1991	79
Figura 58 – Gráfico de superfície da rugosidade da superfície maquinada produzida pelas ferramentas não revestidas para as condições da 1ª fase de teste	80
Figura 59 – Gráfico de superfície da rugosidade da superfície maquinada produzida pelas ferramentas revestidas para as condições da 1ª fase de teste	80

Figura 60 – Comparação dos valores da rugosidade superficial transversal, longitudinal e global das ferramentas não revestidas e revestidas para cada uma das condições de ensaio da 1ª fase ...	81
Figura 61 – Comparação dos valores da rugosidade superficial transversal, longitudinal e global das ferramentas não revestidas e revestidas para condições de ensaio fabricante da 2ª fase	82
Figura 62 – Comparação dos valores da rugosidade superficial das ferramentas revestidas ou não revestidas, para ensaios realizados a velocidade de avanço de 715 mm/min e 750 mm/min ...	83
Figura 63 – Comparação dos valores da rugosidade superficial das ferramentas revestidas ou não revestidas, para ensaios realizados a velocidade de corte de 126 m/min e 188 m/min	84
Figura 64 – Imagens SEM com ampliação de 120x vista edge das ferramentas testadas nas condições de: a) N1T0L18F750V126; b) N7T1L18F750V126; c) N4T0L18F1500V126; d) N10T1L18F1500V126	85
Figura 65 – Imagens SEM com ampliação de 270x vista de clearance face das ferramentas testadas nas condições de: a) N2T0L36F750V126; b) N8T1L36F750V126; c) N5T0L36F1500V126; d) N11T1L36F1500V126	86
Figura 66 – Imagens SEM com ampliação de 450x vista de rake face das ferramentas testadas nas condições de: a) N3T0L48F750V126; b) N9T1L48F750V126; c) N6T0L48F1500V126; d) N12T1L48F1500V126	87
Figura 67 – Imagens SEM com ampliação de 120x vista edge das ferramentas testadas nas condições de: a) N13T0L18F715V117; b) N17T1L18F715V117; c) N14T0L36F715V117; d) N18T1L36F715V117; e) N15T0L48F715V117; f) N19T1L48F715V117; g) N16T0L72F715V117; h) N20T1L72F715V117	88
Figura 68 – Imagens SEM com ampliação de 270x vista de clearance face das ferramentas testadas nas condições de: a) N13T0L18F715V1176; b) N17T1L18F715V117; c) N14T0L36F715V117; d) N18T1L36F715V117; e) N15T0L48F715V1176; f) N19T1L48F715V117; g) N16T0L72F715V117; h) N20T1L72F715V117	90
Figura 69 – Imagens SEM com ampliação de 42x vista top das ferramentas testadas nas condições de: a) N21T0L18F1500V188; b) N23T1L18F1500V188; c) N22T0L36F1500V188; d) N24T1L36F1500V188	91
Figura 70 – Imagens SEM com ampliação de 270x vista de clearance face das ferramentas testadas nas condições de: a) N21T0L18F1500V188; b) N23T1L18F1500V188; c) N22T0L36F1500V18; d) N24T1L36F1500V18	92
Figura 71 – Medição do desgaste de flanco VB segundo a norma ISO 8688-2:1989	93
Figura 72 – Gráfico de superfície do valor médio do desgaste de flanco (VB) das ferramentas não revestidas para as velocidades de avanço de 715 mm/min, 750 mm/min e 1500 mm/min	94
Figura 73 – Gráfico de superfície do valor médio do desgaste de flanco (VB) das ferramentas revestidas para as velocidades de avanço de 715 mm/min, 750 mm/min e 1500 mm/min	94
Figura 74 – Comparação do desgaste de flanco (VB) das ferramentas não revestidas e revestidas, para as velocidades de avanço de 715 mm/min, 750 mm/min e 1500 mm/min	95
Figura 75 – Comparação do desgaste de flanco (VB) das ferramentas não revestidas e revestidas, para a velocidade de avanço de 750 mm/min	96
Figura 76 – Comparação do desgaste de flanco (VB) das ferramentas não revestidas e revestidas, para a velocidade de avanço de 1500 mm/min	96
Figura 77 – Comparação do desgaste de flanco (VB) das ferramentas não revestidas e revestidas, para a velocidade de avanço de 715 mm/min	96

Figura 78 – Comparação do desgaste de flanco (VB) das ferramentas não revestidas e revestidas, para a velocidade de corte de 126 m/min e 188 m/min, e velocidade de avanço de 1500 mm/min	97
Figura 79 – a) Mecanismos de desgaste presentes numa clearance face de ferramenta não revestida, testada a 48 metros de comprimento de corte e 750 mm/min de velocidade de avanço, com ampliação de 270x; b) Ampliação 1200x da face topo, para EDS; c) Espetros EDS de material aderido.....	98
Figura 80 – Imagens SEM com ampliação 270x numa clearance face de ferramenta revestida, testada a 48 metros de comprimento de corte e 750 mm/min, com a identificação de quatro zonas destacadas a vermelho para análise EDS (Z1 – zona do substrato; Z2 – zona de material aderido; Z3 – zona do revestimento de TiAlN; Z4 – zona do revestimento de DLC).....	99
Figura 81 – Espetros EDS das zonas correspondentes à Figura 75: a) Z1; b) Z2; c) Z3; d) Z4	99
Figura 82 – Mecanismos de desgaste registados na face de ataque (<i>rake face</i>) de uma ferramenta não revestida, testada a 36 metros de comprimento: a) N14TOL36F715V117 b) N02TOL36F750V126 c) N05TOL36F1500V126 d) N22TOL36F1500V188	100
Figura 83 – Mecanismos de desgaste registados na face de ataque (<i>rake face</i>) de uma ferramenta revestida, testada em 36 metros de comprimento: a) N18T1L36F715V117 b) N08T1L36F750V126 c) N11T1L36F1500V126 d) N24T1L36F1500V188	101

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Estrutura da Dissertação	18
Tabela 2 – Estudos do desgaste resultante em operações de maquinagem	26
Tabela 3 – Estudos do desgaste resultante de operações de maquinagem em ferramentas revestidas com DLC	27
Tabela 4 – Principais técnicas de deposição, para os métodos PVD e CVD	31
Tabela 5 – Diferenças na deposição por PVD ou CVD (Martin, 2000)	33
Tabela 6 – Valores de dureza indicados em diferentes trabalhos para vários revestimentos realizados por CVD. Adaptado de (Silva, 2022)	35
Tabela 7 – Características do processo PVD por processo (Martin, 2000; Mattox, 2003, 2010; Tracton, 2005)	37
Tabela 8 – Estudos relevantes sobre técnicas de deposição e revestimentos para ferramentas de corte.....	43
Tabela 9 – Estudos recentes que trazem o DLC como revestimento em ferramentas de corte	44
Tabela 10 – Estudos de revestimentos em ferramentas de corte com TiAlN	46
Tabela 11 – Estudos relevantes sobre maquinagem de ligas de Cobre	47
Tabela 12 – Parâmetros de operações de fresagem da liga AMPCOLOY® 83	49
Tabela 13 – Composição química da liga AMPCOLOY® 83	51
Tabela 14 – Propriedades físicas e mecânicas da liga AMPCOLOY® 83	52
Tabela 15 – Dimensões da ferramenta de corte	53
Tabela 16 – Parâmetros de deposição utilizados	56
Tabela 17 – Componentes do sistema de aperto	57
Tabela 18 – Parâmetros utilizados nos ensaios de maquinagem 1ª fase	61
Tabela 19 – Parâmetros utilizados nos ensaios de maquinagem 2ª fase	62
Tabela 20 – Informações técnicas do rugosímetro <i>Mahr Perthometer M1</i>	63
Tabela 21 – Especificações técnicas <i>Hitachi SU3800</i>	66
Tabela 22 – Valores médios da medição da espessura e composição das camadas	72
Tabela 23 – Propriedades mecânicas dos revestimentos	76
Tabela 24 – Valor médio da carga crítica.....	78
Tabela 25 – Valores médios da rugosidade da superfície registados para condições da 1ª fase.....	79
Tabela 26 – Diferença percentual do acabamento superficial com iguais parâmetros de maquinagem	81
Tabela 27 – Valores médios da rugosidade da superfície registados para condições da 2ª fase.....	82
Tabela 28 – Diferença percentual do acabamento superficial com iguais parâmetros de maquinagem F715V117	83
Tabela 29 – Valores médios do desgaste de flanco nas ferramentas de corte	93
Tabela 30 – Descrição dos objetivos traçados inicialmente e os seus resultados	106

LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS

Lista de Siglas

AFM	<i>Atomic Force Microscopy</i>
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio - Alumina
ASME	<i>The American Society of Mechanical Engineers</i>
BSE	<i>Backscattered Electron Detector</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CAM	<i>Computer-Aided Manufacturing</i>
CBN	Nitreto cúbico de boro
CFRP	<i>Carbon-fiber-reinforced polymers</i>
CNC	Controle Numérico Computadorizado
CrAlN	Nitreto de Crómio e Alumínio
CrC	Carboneto de Crómio
CrN	Nitreto de Crómio
CVD	<i>Chemical Vapour Deposition</i>
DLC	<i>Diamond Like Carbon</i>
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
EDS	<i>Energy Dispersive Spectroscopy</i>
EN	<i>European Norm</i>
GC	Cobertura Gamma
ICDD	<i>International Centre for Diffraction Data</i>
IPP	Instituto Politécnico do Porto
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MoS ₂	Dissulfeto de Molibdénio
PECVD	<i>Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition</i>
PVD	<i>Physical Vapor Deposition</i>
SE	<i>Secondary Electron Detector</i>
SEM	<i>Scanning Electron Microscopy</i>
SFM	<i>Scanning Force Microscopy</i>
TiAlN	Nitreto de Titânio e Alumínio
TiAlSiN	Nitreto de Titânio e Alumínio e Silício
TiB ₂	Diboreto de Titânio
TiC	Carboneto de Titânio
TiN	Nitreto de Titânio
TiSiN	Nitreto de Titânio e Silício
VDI	<i>Verein Deutscher Ingenieure</i>

WC	Carboneto de Tungstênio
WC-C	Carboneto de Tungstênio e Carbono
WC-Co	Carboneto de Tungstênio e Cobalto
XRD	<i>X-Ray Diffraction</i>
ZrN	Nitreto de Zinco

Lista de Símbolos

λ	Comprimento de onda	m/s
a_e	Largura de corte	mm
a_p	Profundidade	mm
D	Dureza	GPa
D_i	Diagonal de indentação	nm
E_r	Módulo de elasticidade (Young)	GPa
F	Carga normal	N
F_c	Carga crítica	N
f_n	Avanço por rotação	mm/rot
f_z	Avanço por dente	mm
h_{ex}	Espessura máxima da apara	mm
h_m	Espessura média da apara	mm
$h_{máx}$	Profundidade de penetração	mm
h_{pc}	Profundidade de indentação	mm
HV	Dureza <i>Vickers</i>	<i>Vickers</i>
M_c	Binário de corte	Nm
P	Pressão	Pa
P_c	Potência de corte	kW
$P_{máx}$	Carga máxima	N
R_a	Rugosidade média aritmética	μm
R_{max}	Rugosidade máxima	μm
R_z	Rugosidade média	μm
T	Temperatura	$^{\circ}\text{C}$
T_c	Tempo de maquinagem	min
T_r	Taxa de remoção de material	mm^3/min
V_c	Velocidade de corte	m/min
V_f	Velocidade de avanço	mm/rot
z_c	Número de lâminas de corte	unid

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

Genericamente, o termo maquinagem designa um conjunto de processos de fabrico que removem material de uma peça, recorrendo a ferramentas de corte, que retiram material por arranque de apara. As ferramentas de corte são, por definição, mais duras que o material a cortar, e quando pressionadas contra o material a maquinar com uma determinada força, sob determinadas condições de corte, provocam a deformação plástica do material de base, levando à sua remoção sobre a forma de apara.

Durante o processo de maquinagem, a apara retirada do material deforma-se e desliza contra a ferramenta de corte, levando ao aquecimento da sua superfície devido ao atrito. Portanto, os materiais de base utilizados nas ferramentas de corte, ou os revestimentos aplicados, têm de ser capazes de conservar a sua dureza, não oxidar e resistir ao desgaste a temperaturas muito elevadas.

A diminuição do atrito e redução da temperatura na ponta da ferramenta de corte podem ser conseguidas recorrendo a fluidos de corte, jatos de gás, entre outros, que para além desta funcionalidade, podem também contribuir para a fácil remoção da apara na zona de corte.

Os parâmetros de corte e as propriedades do material, tais como: velocidade, avanço e penetração, a condutividade térmica, dureza e a geometria da ferramenta de corte, influenciam o tipo de apara. Genericamente perante materiais dúcteis ou velocidades elevadas de corte, a apara tende a ser contínua. Já no caso de materiais frágeis, ou quando velocidades de corte baixas são utilizadas, a apara apresenta forma descontínua. A apara pode ainda aderir à ferramenta quando materiais dúcteis são maquinados a baixa velocidade, ou quando se usam velocidades elevadas para maquinar materiais com baixo ponto de fusão, formando o que se designa por aresta postiça. Esta aresta postiça degrada a qualidade da superfície maquinada e diminui o tempo de vida da ferramenta.

O desgaste nas ferramentas de corte é um problema identificado desde o início dos processos de maquinagem, sendo considerada como uma das principais causas de desgaste o atrito gerado no contacto. Este desgaste pode ser reduzido, recorrendo à aplicação de diversas técnicas conhecidas e amplamente utilizadas, tais como: o uso de lubrificação, tratamentos químicos superficiais, tratamentos térmicos, estudo adequado da apetência metalúrgica das superfícies em contacto, a aplicação de revestimentos, etc.

As técnicas de deposição de revestimentos tiveram uma evolução significativa, desde que os processos industriais passaram a ser extremamente controlados e monitorizados, graças à aplicação do controlo eletrónico. Portanto, a deposição de revestimentos encontra-se tecnicamente mais evoluída, tendo em conta que o processo de criação de revestimento é cada vez mais preciso, permitindo a realização de revestimentos de melhor qualidade, influenciando assim positivamente a resistência ao desgaste e baixando o atrito.

Nestas circunstâncias, para além da evolução da tecnologia dos equipamentos, as ferramentas de corte utilizadas nos processos por arranque de apara têm vindo a ser otimizadas. Os revestimentos aplicados às ferramentas de corte têm mostrado uma maquinagem mais eficaz e eficiente. Paralelamente às evoluções descritas, tem-se também observado grande evolução nas ligas

metálicas desenvolvidas, entre as quais se encontra a liga de Cobre-Berílio, ideal para a produção de componentes, vulgarmente designados como insertos, utilizados em moldes de injeção de plásticos. A condutividade térmica desta liga é a principal razão da aplicação na indústria de injeção de plásticos, visto que permite aumentar a eficiência da produção, através da redução do tempo do ciclo de injeção.

Por tudo o que foi supramencionado, e de forma a melhorar a eficiência de maquinagem da liga Cobre-Berílio (AMPCOLOY® 83), é essencial e necessário estudar novas estratégias e soluções de maquinagem. A utilização dos revestimentos de dupla camada TiAlN/DLC, em que a camada superior tem propriedades autolubrificantes, tem grande potencial para melhorar a maquinagem desta liga, devendo ser estudado.

1.2. Objetivos

O controlo do atrito entre superfícies em contacto, minimizando o desgaste entre metais é um dos principais objetivos da tribologia. A inovação, através da otimização de revestimentos existentes, é cada vez mais difícil, visto que nos últimos anos foram registados avanços significativos nesta área. Assim, a investigação a realizar centra esforços no desenvolvimento de soluções ainda pouco exploradas, e na sua otimização.

Neste trabalho, procurou-se diminuir o atrito entre a ferramenta e a peça no processo de fresagem de uma liga Cobre-Berílio (AMPCOLOY® 83), através da aplicação de revestimentos de dupla camada, do tipo TiAlN/DLC (Nitreto de Titânio Alumínio e *Diamond Like Carbon*). O revestimento referido permite obter propriedades como lubrificação e baixo atrito na superfície (concedidas pela camada superficial de DLC), resistência a elevadas velocidades de maquinagem, e resistência à oxidação (conferidas pela camada intermédia de TiAlN), numa ferramenta base de Carboneto de Tungsténio, procurando obter um incremento da produtividade.

Com vista a desenvolver melhorias das condições de maquinagem, este trabalho teve como principal objetivo avaliar se o revestimento de dupla camada TiAlN/DLC permite maquinar eficientemente uma liga de Cobre-Berílio (AMPCOLOY® 83), ao mesmo tempo que prolonga o tempo de vida das ferramentas de corte e assegura uma boa rugosidade superficial da peça maquinada, por realização de estudo comparativo de maquinagem com ferramentas revestidas e não revestidas.

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

- Estudar o revestimento de dupla camada TiAlN/DLC, analisando a sua composição química, dureza e comportamento ao desgaste;
- Compreender a influência da variação da velocidade de corte e avanço, largura de corte e profundidade, avanço por rotação no tempo de vida da ferramenta, desgaste resultante e qualidade superficial da peça maquinada;
- Identificar os principais mecanismos de desgaste no revestimento da ferramenta, entre os quais, adesão e delaminação, e verificar a possível adesão do material a maquinar ao revestimento;
- Caracterizar a superfície maquinada e analisar a rugosidade superficial, correlacionando-a com o desgaste do revestimento;

- Aprofundar o conhecimento na área da maquinagem e parâmetros de corte, particularmente destinado à fresagem de uma liga de Cobre-Berílio (AMPCOLOY® 83).

Antes da realização do trabalho experimental, foi efetuada uma pesquisa bibliográfica tendo por base três temas principais: técnicas de deposição de revestimentos para aplicações tribológicas em ferramentas de corte, técnicas de caracterização de revestimentos e avaliação do coeficiente de atrito e da resistência ao desgaste.

De forma a atingir todos os objetivos, foi necessário:

- Desenvolver o procedimento de ensaios de maquinagem;
- Executar ensaios de maquinagem na liga AMPCOLOY® 83;
- Analisar e caracterizar o revestimento das ferramentas de corte revestidas com dupla camada TiAlN/DLC;
- Examinar e avaliar a superfície maquinada;
- Analisar as ferramentas de corte testadas, identificando os mecanismos de desgaste que se encontram presentes para as diferentes condições de ensaios;
- Executar uma análise detalhada de todos os resultados, com auxílio da técnica de Microscopia Eletrónica de Varrimento.

1.3. Metodologia científica

A elaboração da presente dissertação necessitou de uma investigação científica transversal sob temas necessários à compreensão de assuntos relacionados com maquinagem e fabrico de ferramentas de corte revestidas, tais como:

- Processo de fresagem e os principais parâmetros que o afetam;
- Revestimentos para aplicações tribológicas aplicados a ferramentas de corte, processos de deposição por projeção catódica em fase de vapor (PVD - *Physical Vapor Deposition*) e deposição química em fase de vapor (CVD - *Chemical Vapour Deposition*);
- Métodos de avaliação e caracterização de revestimentos;
- Recentes avanços em revestimentos para ferramentas de corte;
- Descrição dos fatores de desgaste associados às ferramentas de corte, permitindo dessa forma relacionar o desgaste essencialmente com parâmetros de maquinagem.

Realizando uma revisão geral do estado atual dos revestimentos aplicados a ferramentas de corte, com principal incidência nos parâmetros de maquinagem que influenciam o desgaste da ferramenta, permitiu (a) definir os aspetos fundamentais para a definição do procedimento experimental de desgaste; (b) entender os aspetos relacionados com as técnicas e tipos de deposição e respetivos ensaios de caracterização dos revestimentos, destacando os aspetos relativos a revestimentos do tipo DLC e TiAlN, de forma a permitir caracterizar a ferramenta revestida.

A Revisão Bibliográfica foi essencialmente obtida por análise e estudo de artigos científicos recentes, assim como livros e trabalhos com grande destaque sobre o tema. Desta forma, torna-se possível a seleção de um conjunto de parâmetros que serão ajustados durante o processo experimental, permitindo identificar como os mesmos afetam as forças de corte e o desgaste.

O conhecimento adquirido na Revisão Bibliográfica, permitiu organizar e esquematizar o estudo experimental das ferramentas, sendo que para a realização experimental foi necessário:

- Escolher as ferramentas e caracterizá-las, assim como do revestimento a utilizar;
- Estabelecer parâmetros de maquinagem e realização do plano de ensaios para a primeira fase, permitindo a comparação de resultados com trabalhos anteriores;
- Medir e analisar a rugosidade superficial da peça maquinada, para cada ensaio;
- Analisar através de SEM as ferramentas de corte testadas na primeira fase, permitindo a adaptação e ajuste de segunda fase de plano de ensaios;
- Adaptar e ajustar parâmetros de maquinagem para realização de uma segunda fase de ensaios, permitindo avaliar os parâmetros fornecidos pelo fabricante das ferramentas de corte;
- Medir e analisar a rugosidade superficial da peça maquinada, para cada ensaio;
- Analisar através de SEM todas as ferramentas de corte testadas;
- Caracterizar o revestimento das ferramentas revestidas;
- Quantificar o nível de desgaste e caracterizar os mecanismos de desgaste das ferramentas de corte testadas;
- Redigir a presente dissertação.

1.4. Estrutura da dissertação

A dissertação aqui apresentada encontra-se dividido em seis capítulos, descritos na Tabela 1:

Tabela 1 – Estrutura da Dissertação

Capítulo	Designação	Conteúdo
1	Introdução	Contextualização do trabalho apresentado, assim como os objetivos a que se propõe, a metodologia utilizada para os atingir e a estrutura do mesmo.
2	Revisão Bibliográfica	Componente teórica, contém detalhes das técnicas e metodologias aplicadas, assim como desenvolvimentos recentes.
3	Métodos e Materiais	Apresenta as principais apreciações sobre o trabalho experimental, indicando-se todos os materiais e equipamentos utilizados, e descreve-se todos os métodos necessários, finalizando com a análise e interpretação dos resultados obtidos.
4	Resultados e Discussão	Apresenta e analisa os dados obtidos nos diferentes ensaios realizados para cada tipo de ferramenta, designadamente: caracterização dos revestimentos, análise da rugosidade da superfície maquinada e análise do desgaste das ferramentas, assim como, identificação dos mecanismos de desgaste para todas as ferramentas e condições de ensaio.
5	Conclusões	Apresenta as principais apreciações sobre os resultados obtidos, destacando os principais desenvolvimentos concretizados através deste estudo, nomeadamente as suas conclusões mais relevantes, decorrentes da análise de resultados face ao objetivo proposto, bem como as propostas de trabalhos futuros.
6	Referências Bibliográficas	Fontes de informação, de origens fidedignas, consultadas para a realização do trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA CONTEXTUALIZAÇÃO TEÓRICA E ESTADO DA ARTE

A maquinagem é um processo de fabrico bastante utilizado e de enorme importância na indústria, particularmente devido à crescente necessidade de produzir peças de elevada qualidade e complexidade, especialmente nas indústrias aeroespacial e aeronáutica, procurando que o processo se torne cada vez mais economicamente viável e ambientalmente sustentável (Kulkarni et al., 2020; Mersni et al., 2020; Wickramasinghe et al., 2021).

Devido aos recentes avanços realizados nesta área, desde a utilização de novas técnicas de maquinagem ou materiais, até ao desenvolvimento de novas máquinas, como os centros de maquinagem de controlo numérico computadorizado (CNC) de seis eixos, é possível a transformação do material em bruto em peças de elevada complexidade e qualidade, produzidas num único processo contínuo (Gabicchini et al., 2011; Moriya et al., 2010; Toh, 2004).

A indústria da maquinagem sofreu um crescimento significativo nos últimos dez anos, e estima-se que até ao ano de 2026, será responsável por um mercado global de 126 biliões de dólares (CNC Machining Projected, 2022). O elevado crescimento desta indústria nos últimos anos deve-se particularmente ao desenvolvimento de novos componentes em materiais mais resistentes, usados em aplicações de grande responsabilidade. A evolução que as ferramentas de corte têm sofrido, permitem o desenvolvimento de produtos complexos, de elevada qualidade, e com tempos de produção cada vez mais curtos (Global Milling Market, 2022).

Os processos de torneamento e fresagem são os processos mais utilizados na indústria de produção de peças e, tendo em conta a sua constante utilização, estes são constantemente estudados pela comunidade científica, havendo um constante esforço para a sua otimização. Esta otimização é feita alterando os procedimentos de maquinagem, uso de ferramentas de corte revestidas, etc., sem nunca esquecer a perspetiva energética e ecológica dos processos. Paralelamente ao estudo dos processos, existe também o estudo contínuo de sobre processos de maquinagem de certos materiais, principalmente sobre materiais com maquinabilidade complexa (Sousa & Silva, 2020).

As ferramentas utilizadas nos processos de maquinagem sofreram uma evolução constante, a qual acompanhou a evolução tecnológica dos centros de maquinagem. Nos dias de hoje, são utilizadas no processo de maquinagem uma vasta gama de ferramentas com diversos materiais, que vão desde ferramentas em aço com geometrias simples, até ferramentas de metal duro revestidas, que representam a grande maioria das ferramentas de maquinagem para os processos de fabrico atuais.

A utilização de ferramentas de metal duro revestidas, proporcionam melhorias significativas no processo de maquinagem, pois permitem maiores taxas de remoção de material do que ferramentas convencionais sem revestimento, enquanto garantem o bom acabamento superficial das peças a serem maquinadas (Lakshmanan & Xavier, 2014). As técnicas de revestimento aplicadas atualmente, para além de permitirem o revestimento de metais, são aplicadas a outros tipos de substratos, como cerâmicos, possibilitando uma ferramenta com elevada dureza no seu núcleo (Sokovic et al., 2006).

Os revestimentos são depositados na superfície das ferramentas de corte para proporcionar um menor coeficiente de atrito e melhorar a resistência ao desgaste, obtendo melhorias no processo

de maquinagem de materiais difíceis de maquinar, fundamentalmente aumentando a velocidade, mantendo uma boa qualidade geral da superfície, mas com resultados particularmente significativos no aumento da vida útil da ferramenta (Holmberg & Matthews, 1994). Além disso, os revestimentos aplicados podem ser adaptados ao material a maquinar de forma a reduzir as forças de corte desenvolvidas, temperatura e, conseqüentemente, o desgaste da ferramenta. Os desenvolvimentos mais recentes em ferramentas de metal duro, recorrem a processos de revestimento por camadas, onde as camadas de diferentes composições químicas (sistema de revestimento) são depositadas com o objetivo de conferir à ferramenta diferentes propriedades. Por exemplo, uma das camadas pode conferir dureza, para permitir uma maquinagem eficiente, outra camada pode funcionar como barreira térmica, e outra como camada de baixo atrito (Ji et al., 2018).

O fabrico de ferramentas com revestimentos de composição variável, e particularmente com variação de propriedades gradual, proporciona ferramentas com uma maior versatilidade, permitindo a melhoria à superfície das propriedades do substrato que compõe a base da ferramenta, apresentando conseqüências positivas ao nível do desempenho.

Diversos estudos foram realizados com o objetivo de analisar o comportamento das ferramentas com a espessura das camadas de revestimento (Ji et al., 2016, 2018). A realização de testes de corte com uma liga de Titânio utilizando uma elevada velocidade de corte, com ferramentas de corte revestidas com diferentes espessuras, permitiu observar que a espessura da camada do revestimento influencia o processo de corte, sendo a camada mais espessa que apresenta os melhores resultados, e que essa espessura pode ser controlada e alterada no processo de deposição (Ji et al., 2016; Zhou et al., 2019).

Neste capítulo, de forma a esclarecer alguns conceitos já referidos, faz-se uma revisão geral dos principais temas relacionados com o processo de corte por arranque de aparas, ferramentas de corte para maquinagem, mecanismos de desgaste normalmente presentes nas ferramentas de corte, revestimentos usados em aplicações tribológicas/desgaste, técnicas de deposição de revestimentos, métodos de caracterização de revestimentos, finalizando com os recentes avanços nas técnicas de revestimentos em ferramentas de corte. Atendendo a isso, o capítulo foi subdividido em sete subcapítulos principais:

- Princípio do corte por arranque de aparas;
- Mecanismos de desgaste associados a ferramentas de corte;
- Revestimentos para aplicações tribológicas;
- Técnicas de realização de revestimentos;
- Métodos de caracterização de revestimentos;
- Técnicas de revestimentos em ferramentas de corte e avanços recentes;
- Maquinagem de ligas de cobre.

2.1. Princípio do corte por arranque de aparas

O corte por arranque de aparas, ou maquinagem, é um processo mecânico na qual ocorre a remoção de material de uma peça em bruto, a fim de se obterem geometrias complexas com elevado grau de precisão (Batista, 2010). Dentro desta abordagem existem diferentes processos possíveis, nomeadamente a fresagem, torneamento, retificação, entre outros, sendo a fresagem e o torneamento os mais utilizados (Mersni et al., 2020).

A fresagem, irá ser o processo utilizado no desenvolvimento do caso de estudo prático deste trabalho. Este processo consiste em remover material por arranque de aparas através de uma ferramenta de corte (fresa) em rotação, com várias arestas, podendo ser classificada de duas formas: fresagem periférica, e fresagem de topo (Harling, 2021). Na fresagem periférica, a rotação da fresa ocorre paralelamente à face da peça. Por outro lado, na fresagem de topo a rotação ocorre na direção perpendicular ao movimento de avanço (Kordabad & Boroushaki, 2020). A Figura 1 mostra, como exemplo, estas duas classificações.

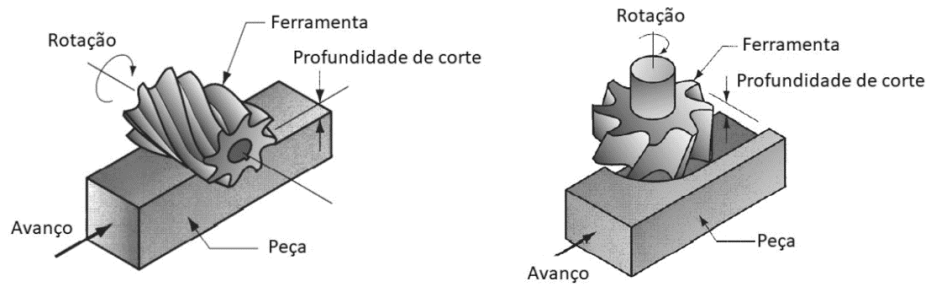


Figura 1 - Tipos de fresagem: (a) periférica e (b) de topo. Adaptado (Reddy & Swamy, 2012)

A importância da fresagem aumentou com o avanço da tecnologia e do desenvolvimento de novos centros de maquinagem CNC, e de *software* CAD/CAM, o que fez com que fosse possível aumentar a complexidade das peças produzidas, mantendo a qualidade superficial das peças maquinadas (Kordabad & Boroushaki, 2020). Dentro da fresagem de topo, surgiram novas operações: facejamento, fresagem de canais, fresagem de contorno a 90°, contorno da superfície e fresagem de caixas (Groover, 2013):

- **Facejamento:** utilizada quando se deseja obter uma face plana na peça;
- **Fresagem de canais:** quando se deseja obter um canal, de uma dada dimensão, sendo que a fresa deve ser escolhida de acordo com esta dimensão desejada;
- **Fresagem de contorno:** quando se deseja obter cantos com 90°, e com isso, este tipo de fresagem conflui para a junção das duas principais (topo e periférica);
- **Contorno da superfície:** quando se utiliza um fresa esférica que traça uma trajetória curvilínea de uma superfície mais ou menos complexa;
- **Fresagem de caixas:** neste caso, a fresa deve penetrar na peça, criando uma caixa.

A Figura 2 exemplifica de uma forma esquemática as diferentes operações.

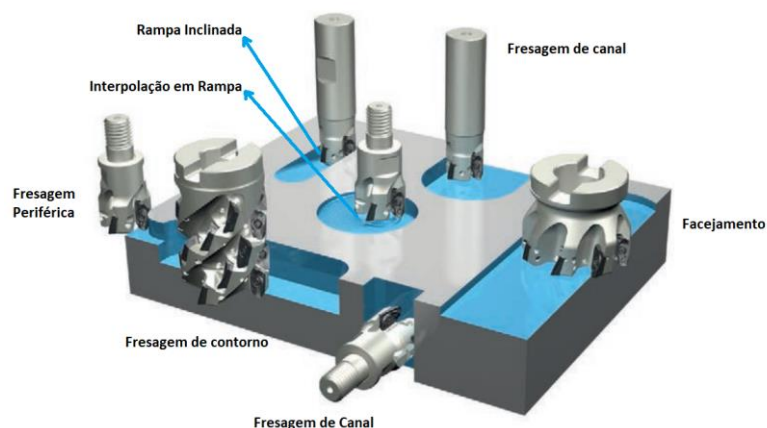


Figura 2 - Operações de fresagem. Adaptado de (TecTron, 2022)

Além disso, vários parâmetros influenciam o processo, pelo que devem ser selecionados e definidos corretamente, para que o processo seja otimizado (Sousa et al., 2020).

Para além disso, muitas variáveis também afetam o desempenho, como é o caso do tipo de fresa, da condição de ensaio, utilização de lubrificação e o próprio centro de maquinagem CNC. Com base nisso, Salem et al. (2021), desenvolveu um modelo que decompôs as variáveis de primeiro nível identificadas como categorias, e de segundo nível como parâmetros (Salem et al., 2021). As variáveis categorias são as entradas do processo, ou seja, as estratégias de maquinagem, sendo que cada uma dessas variáveis contém vários parâmetros.

A Figura 3 exemplifica este modelo, identificando as categorias e os parâmetros que influenciam o processo de maquinagem (Salem et al., 2021).

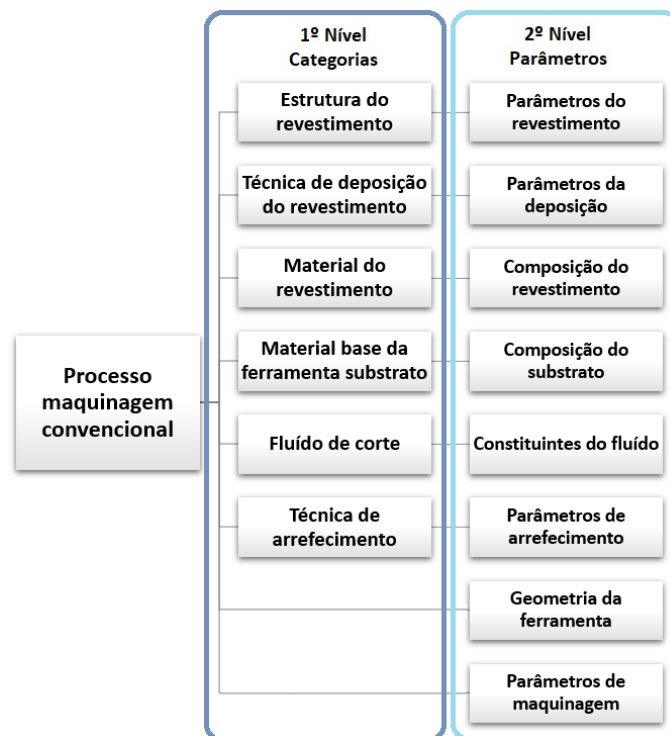


Figura 3 - Variáveis que influenciam o processo de maquinagem (Salem et al., 2021)

Como visto anteriormente, a correta seleção dos parâmetros de maquinagem é crucial para o sucesso da operação, sendo possível também prolongar a vida útil da ferramenta de corte e reduzir o seu desgaste (Sousa et al., 2021).

Caso a escolha não seja a mais adequada, pode ocorrer: desgaste excessivo da ferramenta, quebra da ferramenta, e gasto de energia superior ao planeado (Costa, 2012). Assim, pode-se dizer que a otimização do processo é dependente da correta escolha dos parâmetros de maquinagem, o que traz inúmeras vantagens, como por exemplo, a redução das forças de corte resultantes, que, consequentemente, faz com que melhore a eficiência do processo (Wojciechowski et al., 2017).

Como no mercado existem muitos tipos de ferramentas de corte, cada uma com sua particularidade, os parâmetros de maquinagem são diferentes em cada caso, sendo que a velocidade de corte (V_c), a velocidade de avanço (V_f), a profundidade (a_p) e a largura de corte (a_e), são os parâmetros que devem ser recomendados pelos próprios fabricantes das ferramentas, e que dependem do material que será maquinado (Chen et al., 2019; Li et al., 2017).

- **Velocidade de corte (V_c – [m/min]):** é a velocidade no contacto entre a aresta de corte da fresa e a peça que está submetida ao processo de maquinagem. Este parâmetro é dependente do diâmetro da ferramenta e da velocidade de rotação. A velocidade de corte é uma das variáveis que mais afeta a vida útil da ferramenta (Wrublak et al., 2008);
- **Velocidade de avanço (V_f – [mm/min]):** é o movimento relativo da ferramenta por unidade de tempo. Também pode ser denominado avanço por minuto, e depende do avanço por dente (f_z) e número de dentes (z_c) da ferramenta de corte (Neves, 2017);
- **Profundidade e largura de corte (a_p e a_e – [mm]):** dimensão que indica o quanto a fresa pode penetrar na peça, sendo que no caso da fresagem de topo é considerada a profundidade de corte, e no caso da fresagem periférica considera-se a largura de corte. Este parâmetro tem pouco efeito no desgaste e na rugosidade superficial, sendo relacionado com a taxa de remoção do material (Wrublak et al., 2008).

A Figura 4 ilustra estes dois parâmetros.

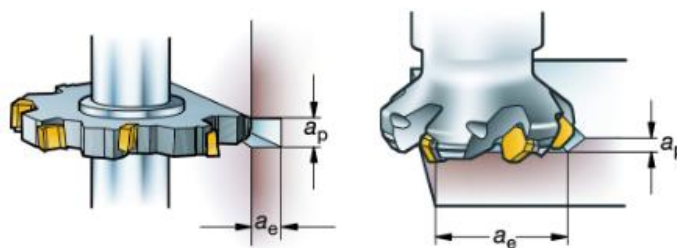


Figura 4 - Profundidade e largura de corte (Sandvik, 2017)

Além desses parâmetros, que são indicados pelo fabricante, outros parâmetros também merecem destaque: avanço por dente (f_z), avanço por rotação (f_n), taxa de remoção de material (T_r), tempo de maquinagem (T_c), potência de corte (P_c), binário de corte (M_c), espessura média da apara (h_m) e espessura máxima da apara (h_{ex}):

- **Avanço por dente (f_z – [mm]):** é a distância que uma aresta de corte percorre, dependente, portanto, do tipo de ferramenta utilizada, do material da ferramenta e do acabamento superficial. Deve assumir valores comedidos em acabamento (Wrublak et al., 2008);
- **Avanço por rotação (f_n – [mm/rot]):** também relacionado com o acabamento superficial, é utilizado nos cálculos da velocidade de avanço, e indica a distância percorrida pela fresa numa rotação da mesma (Neves, 2017);
- **Taxa de remoção do material (T_r – [mm³/min]):** é o volume de material que é removido, estando relacionado com a profundidade de corte, largura de corte e velocidade de avanço (Wrublak et al., 2008);
- **Tempo de maquinagem (T_c – [min]):** tempo em que ocorre a operação de maquinagem (Sandvik, 2017);
- **Potência líquida de corte (P_c – [kW]):** parâmetro relacionado com o equipamento, ou seja, é a potência que ele necessita para que seja possível realizar a operação de maquinagem, sendo resultado do produto entre o momento e a velocidade angular da fresa;
- **Binário de corte (M_c – [Nm]):** binário resultante da ferramenta de corte;
- **Espessura média da apara (h_m – [mm]):** é utilizado para o cálculo da potência líquida, e auxilia na determinação da força de corte (Sandvik, 2017);

- **Espessura máxima da apara (h_{ex} - mm):** é um parâmetro importante para a definição do avanço por dente. A Figura 5 ilustra como esses parâmetros se relacionam (f_z , h_{ex} , h_m e a_e).

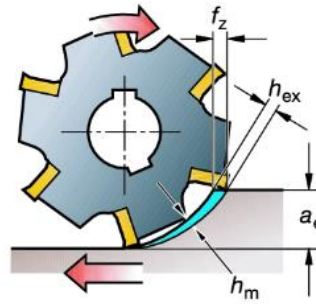


Figura 5 - Relação entre os parâmetros f_z , h_{ex} , h_m e a_e (Sandvik, 2017)

Além disso, existem no mercado diferentes tipos de fresas: fresas integrais e fresas de insertos. O tipo de fresa, assim como os parâmetros de maquinagem, também são importantes para um bom resultado no processo, sendo a sua geometria e estrutura, fatores que influenciam a operação.

As fresas integrais, também são conhecidas como fresas monobloco, são constituídas por um único material em toda a sua configuração, sendo que a extremidade pode conter revestimento específico depositado pelos métodos já aqui referidos. Os materiais frequentemente utilizados nestas fresas são: aço rápido (HSS) e carbonetos sinterizados (WC com Co como ligante) (Szigety et al., 2012).

Por sua vez, as fresas de insertos têm um custo mais reduzido, pois os insertos de maquinagem são montados na sua configuração. Este tipo de fresa é diferente das fresas integrais, pode possuir um elevado diâmetro, o que faz com que a taxa de remoção de material seja mais elevada. Os materiais frequentemente utilizados neste tipo de fresa são o Carboneto de Tungstênio (WC) com um ligante de Cobalto (Co), que também podem ser revestidos (Sousa et al., 2021).

2.2. Mecanismos de desgaste associados a ferramentas de corte

Como se sabe, as ferramentas de corte estão sujeitas ao desgaste causado pelo processo de maquinagem, principalmente quando se trata de materiais duros e de alta resistência, ou seja, de elevada dificuldade de maquinagem (Sousa et al., 2021). O desgaste da ferramenta influencia diretamente o tempo de vida útil da ferramenta e o seu desempenho mecânico. O mesmo pode ocorrer de várias formas, o que corresponde a diferentes mecanismos de desgaste. Estes mecanismos dependem do material a ser maquinado, bem como do revestimento da ferramenta de corte, e dos parâmetros utilizados no processo (Sousa & Silva, 2020). Dessa forma, os seguintes tipos de desgaste podem ser observados: desgaste do flanco, lascagem, entalhe, aresta postíça, cratera, deformação e fratura (Sandvik, 2017).

O desgaste do flanco, é um desgaste de origem abrasiva, e que não tem tanto impacto na vida útil da ferramenta. Este desgaste é causado pela abrasão entre a ferramenta revestida e o material a ser maquinado, e devido às suas características, é o desgaste menos severo no processo de maquinagem (Manarelli, 2018).

Por sua vez, a lascagem, a qual é um desgaste de origem mecânica, ocorre devido a sobrecarga de tensões mecânicas presentes no processo devido a diversos parâmetros como profundidade de

corte, avanço, e até mesmo as vibrações da ferramenta (Carneiro, 2020; Sandvik, 2017). A Figura 6 ilustra estes dois tipos de desgaste.



Figura 6 - Desgastes possíveis da ferramenta de corte: (a) flanco e (b) lascagem (Sandvik, 2017, 2022a)

Os tipos de desgaste de entalhe e aresta postiça possuem origem adesiva, sendo o primeiro resultante de microfissuras presentes na face de ataque e no flanco da pastilha, as quais se propagam resultando em fraturas, e adesão de aparas por pressão. Na aresta postiça, também é observada a adesão de aparas por pressão, a qual é acentuada devido a baixas velocidades de corte, e com isso a qualidade superficial da peça maquinada é comprometida. O desgaste tipo entalhe é mais observado em aços inoxidáveis, e a aresta postiça em aços com baixo teor de Carbono, ou ligas de Alumínio (Sandvik, 2017, 2022a). A Figura 7 representa estes dois tipos de desgaste adesivo.



Figura 7 - Desgastes adesivo: (a) tipo entalhe e (b) aresta postiça (Sandvik, 2017, 2022a)

A craterização, ou formação de cratera, é um desgaste químico causado pela velocidade de corte elevada, ou avanço de grande dimensão e falta de arrefecimento, ocorrendo uma reação química entre o material a ser maquinado e a ferramenta de corte (Sandvik, 2022d). Por outro lado, a deformação e a fratura possuem origem térmica, e são caracterizadas pelas elevadas temperaturas de maquinagem, sendo que a deformação plástica ocorre mais frequentemente em materiais macios, e a fratura é agravada pelo arrefecimento. Ocorre devido a mudanças bruscas de temperatura no processo, podendo ser verificadas várias fissuras perpendiculares à aresta de corte (Sandvik, 2017, 2022a). A Figura 8 ilustra os tipos de desgaste químico e térmico.

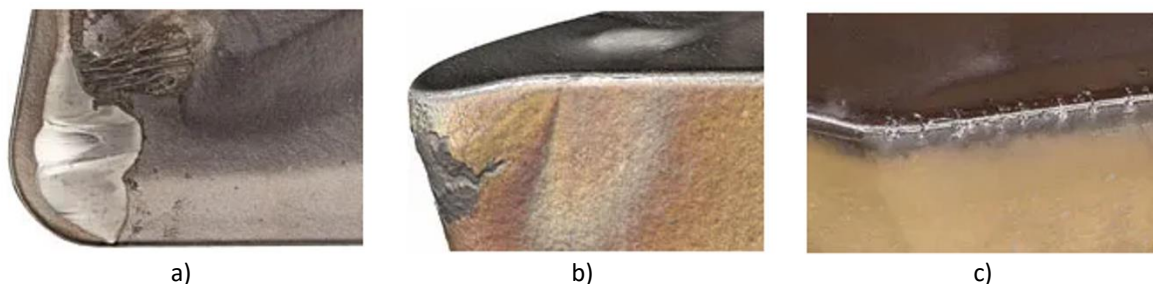


Figura 8 - Desgastes do tipo químico e térmico: (a) formação de cratera; (b) deformação e (c) fratura (Sandvik, 2017, 2022a)

Portanto, ao observar-se a presença de algum tipo de desgaste e seu respectivo mecanismo, percebe-se a possibilidade de que alguns parâmetros do processo não estejam adequados, ou ainda, o revestimento selecionado para o tipo de material a ser maquinado não ser o mais correto (Sousa & Silva, 2020a).

Assim, analisar o revestimento selecionado é crucial para otimizar o processo e para aumentar o tempo de vida útil das ferramentas (Sousa et al., 2021). Por exemplo, a Figura 9 ilustra o desgaste de uma fresa utilizada na maquinagem de aço duplex, e que sofreu lascagem.

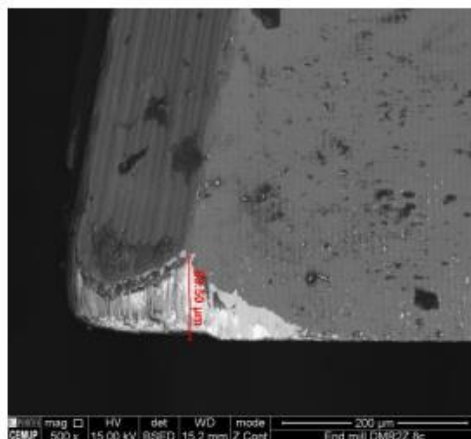


Figura 9 - Aresta de corte com desgaste abrasivo e revestimento com lascagem (Reis, 2014)

Por ser um tema de grande discussão e importância na escolha correta do revestimento, otimização do processo e seleção adequada dos parâmetros de maquinagem, a fim de aumentar a vida útil das ferramentas e reduzir o desgaste ao qual é submetida, muitos autores basearam os seus estudos na abordagem dos mecanismos de desgaste de diferentes revestimento e materiais a maquinar. Com isso, na Tabela 2 estão sumarizados vários estudos a respeito do desgaste resultante em operações de maquinagem.

Tabela 2 – Estudos do desgaste resultante em operações de maquinagem

Autores	Descrição do Trabalho
(Martinho et al., 2019)	Neste trabalho, foram estudados dois tipos de ferramentas revestidas por PVD e CVD, na maquinagem de aço inoxidável duplex (X2CrNiMoCu25-6-3-3). Foram avaliadas a rugosidade superficial das peças maquinadas, o desgaste da ferramenta de corte, e as vibrações. O revestimento TiAlN foi depositado PVD e o TiN/TiCN/Al ₂ O ₃ foi depositado por CVD. Os autores observaram que os revestimentos de TiAlN tiveram mais problemas de falha e um comportamento mais frágil, sendo mais adequado para operações de acabamento e não de desbaste. Além disso, as ferramentas com revestimento CVD mostraram menor desgaste. O revestimento PVD apresentou a melhor adesão ao substrato.
(Zuo et al., 2019)	No trabalho de Zuo et. Al (2019), foi feita uma comparação entre diferentes velocidades de corte (200 m/min, 400 m/min, 600 m/min, 800 m/min e 1000 m/min) durante a fresagem da liga Be/Cu, a fim de avaliar o desgaste resultante nestas várias velocidades, em ferramentas revestidas com TiAlN. Os autores observaram desgaste do tipo de entalhe na aresta de corte e aresta postiça para as velocidades de 400 m/min e 600 m/min. A 800 m/min, foi verificada aresta postiça e desgaste adesivo, e a 1000 m/min, aresta postiça, entalhe e desgaste adesivo.

Tabela 2 – Estudos do desgaste resultante em operações de maquinagem (cont.)

(Chang & Lai, 2014)	Nesta investigação, foi avaliada a fresagem da liga Ti6Al4V sem lubrificação, e com ferramentas revestidas por TiAlN, CrAlSiN e TiAlSiN, depositadas via evaporação por arco catódico. Foi observado que os principais mecanismos de desgaste para as ferramentas revestidas com TiAlSiN, TiAlN e para as não revestidas, foram a abrasão e adesão, e para o revestimento de CrAlSiN foi verificada uma elevada resistência ao desgaste, com vida útil superior em relação às ferramentas revestidas com TiAlSiN e TiAlN e não revestidas, 2,9, 4,2 e 9,5 vezes, respetivamente.
(Liu et al., 2017)	No trabalho em questão, foi avaliada influência da velocidade de corte na vida útil da ferramenta, mecanismo de desgaste e qualidade da superfície das peças de ferro fundido cinzento, em facejamento de alta velocidade, e utilizando ferramentas de corte não revestidas, e revestidas com CrAlN e TiAlN, para comparação. As velocidades de corte utilizadas foram de 600 m/min a 1500 m/min. Foi verificada diminuição da vida útil conforme se aumentava a velocidade de corte, até que numa dada velocidade, a vida útil da ferramenta demonstrou uma inversão de comportamento. Relativamente ao desgaste, os autores verificaram que, conforme se aumentou a velocidade de corte, foi verificado desgaste adesivo. No que diz respeito à qualidade superficial da peça, as ferramentas revestidas com CrAlN exibiram a melhor qualidade, seguida das ferramentas com TiAlN, e por fim, as ferramentas sem revestimento.
(Gouveia et al., 2016)	Este trabalho avaliou a maquinagem de aço inoxidável duplex, com dois comprimentos de corte diferentes, com ferramentas com 2, 3 e 4 lâminas de corte, e revestidas com AlCrN e TiAlN, a fim de comparar o mecanismo de desgaste em cada condição. Os autores verificaram que as ferramentas com 4 lâminas de corte tiveram melhores resultados na rugosidade superficial, e o revestimento de TiAlN teve melhor resistência ao desgaste, visto que o revestimento de AlCrN apresentou desgaste precoce e grave.

Além destes estudos, é importante salientar o comportamento dos revestimentos do sistema DLC, visto ser a abordagem que foi avaliada no trabalho. Seguindo esta base de estudo, a Tabela 3, apresenta trabalhos recentes acerca deste tipo de revestimento.

Tabela 3 – Estudos do desgaste resultante de operações de maquinagem em ferramentas revestidas com DLC

Autores	Descrição do Trabalho
(Ucun et al., 2015)	Neste trabalho, foi avaliada a maquinagem da superliga Inconel 718, usando uma ferramenta revestida DLC, em condições de corte a seco. O mecanismo de desgaste mais encontrado foi abrasivo e difusivo, com formação de aresta postiça na ferramenta que não continha o revestimento DLC. Os autores também verificaram que com o revestimento DLC a rugosidade superficial foi superior, e a presença de aresta postiça diminuiu significativamente, sendo, portanto, um ótimo revestimento a ser utilizado quando está em causa a maquinagem de Inconel 718.
(Sousa, et al., 2021)	Sousa et al., (2021), avaliaram o desgaste que ocorre em ferramentas não revestidas e revestidas com DLC/CrN durante a maquinagem da liga Cu-Be AMPICOLOY 83. Foi observado que, para menores comprimentos de corte, as ferramentas revestidas tiveram menos desgaste que as ferramentas não revestidas. Todavia, para comprimentos de corte superiores a ferramenta sem revestimento teve melhor desempenho, tanto relativamente ao mecanismo de desgaste, quanto em relação à rugosidade superficial da peça maquinada.

Tabela 3 – Estudos do desgaste resultante de operações de maquinagem em ferramentas revestidas com DLC (cont.)

(D’Orazio et al., 2017)	Nesta investigação, avaliou-se brocas helicoidais revestidas com DLC e TiAlN para a perfuração de um composto formado por dois laminados em plástico reforçado com fibra de carbono e uma placa central na liga AA7075. Verificou-se a presença dos mecanismos de desgaste de lascagem, arredondamento de aresta, abrasão, e adesão de partículas na liga AA7075. Além disso, comparando ambos os revestimentos, os autores observaram que as ferramentas revestidas com DLC apresentaram um desgaste muito menor do que as revestidas com TiAlN. Um aspeto importante foi a delaminação, que aumentou com o número crescente de furos.
(Vereschaka et al., 2022)	No trabalho em questão, foi analisada a resistência ao desgaste das fresas de topo com revestimento DLC, Zr-ZrN-(Zr,Cr,Al)N e Ti-TiN-(Ti,Al,Cr)N na fresagem de polímeros reforçados com fibra de carbono (CFRP). Foi observada maior resistência ao desgaste em ferramentas com revestimento DLC e Zr-ZrN-(Zr,Cr,Al)N, sendo que para ferramentas revestidas com (Ti,Al,Cr)N, foi verificado desgaste da aresta de corte.
(Ziberov et al., 2020)	Neste artigo foram comparadas ferramentas revestidas com TiAlN, revestimento de DLC, e sem revestimento, na fresagem da liga Ti6Al4V, em condições com e sem lubrificação. Os autores verificaram melhor desempenho nas ferramentas revestidas com DLC, a qual teve uma redução do desgaste de 640% e 267%, ao se comparar com as ferramentas revestidas com TiAlN e não revestidas, respetivamente. O mecanismo de desgaste mais verificado foi desgaste de flanco.

2.3. Revestimentos Tribológicos

Os revestimentos podem ser aplicados a diversas superfícies, com diferentes características e propriedades, tendo como função proteger as superfícies contra o desgaste, corrosão, oxidação, etc., e tendo como objetivos melhorar o tempo útil de vida dos componentes mecânicos e minimizar a energia perdida por atrito, como por exemplo:

- Moldes de fundição de alta pressão de ligas metálicas para indústria automóvel (Nunes et al., 2017; Peter et al., 2015);
- Moldes de injeção de compósitos reforçados com fibras de vidro que se encontram sujeitos a elevada abrasão, devido a injeção do material de reforço (Silva et al., 2011);
- Diversos tipos de ferramentas aplicadas a vários processos, como o caso do processo de estampagem (Fernandes et al., 2017b, 2017a, 2018).

A aplicação de revestimentos permite a melhoria de propriedades, como propriedades óticas da superfície, sendo amplamente aplicados na indústria de produção óculos e indústria automóvel (Baptista et al., 2021; Ferreira et al., 2021; Helmut Fischer, 2022).

O conceito de realização de um revestimento envolve a deposição de um material sobre um substrato, com propriedades distintas. Neste sistema, existe a presença de uma interface entre substrato e revestimento, obtendo-se assim um sistema tribológico substrato/revestimento, representado na Figura 10.

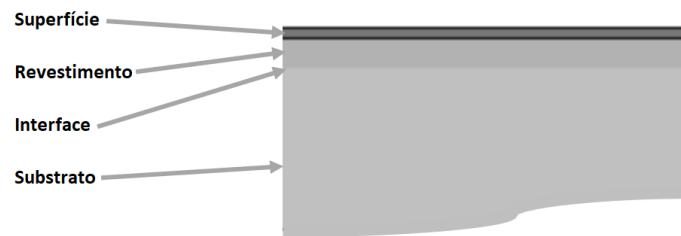


Figura 10 - Sistema tribológico substrato/revestimento (Silva, 2001)

A coerência entre as propriedades do substrato e do revestimento origina características tribológicas favoráveis, necessárias para que este sistema consiga alcançar os objetivos pretendidos. Para obtenção de uma boa adesão do revestimento ao substrato, é fundamental que haja uma forte adesão e elevada resistência a tensões de corte, na zona da interface. As propriedades como coeficiente de expansão térmica, condutividade térmica, dureza, elasticidade e tenacidade, necessitam de uma maior uniformidade. As características fundamentais da superfície são a elevada resistência a tensões de corte, baixa rugosidade e ser quimicamente estável (Holmberg et al., 2000).

O conjunto de variáveis implicadas num processo tribológico com movimento deslizante é muito complexo, porque envolve simultaneamente mecanismos de atrito e desgaste a diferentes níveis e de diferentes tipos, conforme se pode verificar na Figura 11.

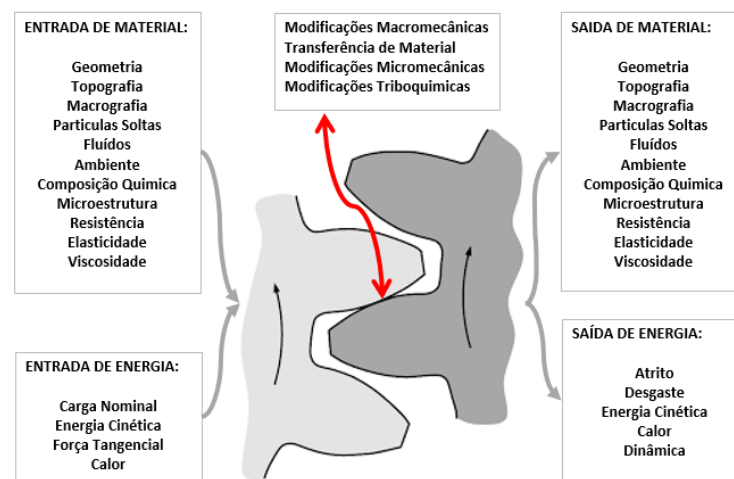


Figura 11 - Variáveis de um processo tribológico de contacto entre duas superfícies animadas de movimento relativo de deslizamento. Adaptado de (Casais, 2020; Holmberg et al., 2000)

A rugosidade da superfície, espessura do revestimento, o rácio entre a dureza do substrato e do revestimento, a dureza e dimensão das partículas de desgaste libertadas, são responsáveis pelas modificações micromecânicas que originam atrito e desgaste durante o contacto tribológico (Holmberg & Matthews, 1994).

Fenómenos de corte e fratura desencadeiam a propagação de fendas que progridem, dando origem a fenómenos macromecânicos de libertação de partículas de desgaste com grandeza na ordem dos nanómetros (Holmberg & Matthews, 1994; Hu, 2017). A Figura 12 demonstra de forma esquemática a origem e a propagação desses fenómenos, tendo em consideração o gradiente de dureza e espessura de revestimento.

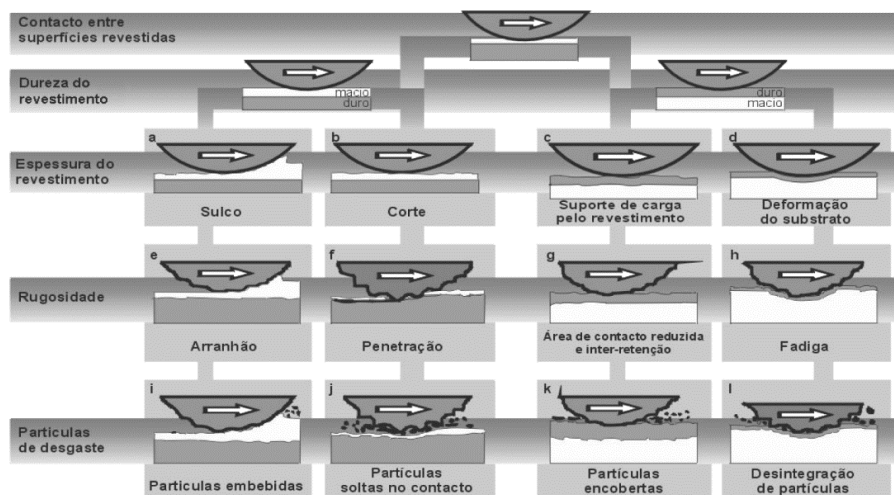


Figura 12 - Esquema das modificações macromecânicas de atrito provocadas pelo movimento de deslizamento de um corpo sobre uma superfície revestida (Silva, 2001)

Durante o contacto de deslizamento, ocorrem alterações na composição química e das propriedades das superfícies, alterando consideravelmente as condições de atrito e resistência ao desgaste das superfícies, por fenómenos de corte, fissuração, arranque de partículas de desgaste e compactação de rugosidades (Holmberg & Matthews, 1994). Estas alterações originam as modificações triboquímicas que são a formação de microrevestimento na superfície de revestimentos duros, que diminuem a área de contacto e possuem uma baixa resistência ao corte, e a oxidação de revestimentos macios, através da formação de uma película de óxidos que potencia a lubrificação durante o contacto (Holmberg et al., 2000).

Os fenómenos anteriormente descritos levam à libertação de partículas de desgaste. Estas tendem a associar-se à superfície oposta, formando uma tribocamada de transferência que altera as condições de contacto por atrito e desgaste. A importância deste fenómeno é tanto mais significativa quanto maior for a diferença de durezas entre as superfícies em contacto.

O comportamento tribológico de um revestimento, de uma forma resumida, é influenciado por (Holmberg et al., 2000; Meng et al., 2020):

- Materiais em contacto, e as suas propriedades físicas e químicas;
- Condições de contacto, como carga, velocidade e temperatura;
- Microestruturas em contacto, densidade, porosidade e tamanho do grão;
- Sistema substrato/revestimento, influenciado pela espessura do revestimento, durezas, rugosidade superficial, adesão do revestimento ao substrato, elasticidade do substrato e compatibilidade térmica e química do sistema.

Para avaliar e estimar o coeficiente de atrito e taxa específica de desgaste para um determinado sistema revestimento/substrato, existem inúmeras condições e métodos de ensaio que podem ser utilizados. A consideração de outros fatores também preponderantes nesta avaliação, por exemplo, os revestimentos duros, são mais indicados para reduzir danos provocados pelo desgaste por abrasão ou por erosão (Schalk et al., 2022). A espessura do revestimento também assume uma particular importância, já que os revestimentos finos são mais indicados para situações de desgaste por abrasão, enquanto os mais espessos são indicados para situações sujeitas a desgaste por erosão (Holmberg et al., 2000).

2.4. Técnicas de realização de revestimentos tribológicos

As primeiras informações sobre revestimentos em ferramentas de corte para maquinagem surgiram na segunda metade da década de 1960, culminando com a apresentação da gama de ferramentas com cobertura *Gamma* ou GC, comercializadas pelo fabricante Sandvik no ano de 1969. O revestimento GC aumentava o desempenho das ferramentas de corte, visto que aumentava a sua resistência à oxidação (Behera et al., 2021; Sandvik, 2022b).

Estes desenvolvimentos continuaram a evoluir ao longo dos tempos, permitindo desenvolver materiais mais resistentes para aplicar em ferramentas de corte (Sandvik, 2022b)

O aumento da produtividade e a redução do consumo de ferramentas de corte, apesar de ter acontecido com a utilização de ferramentas de metal duro revestido, não demonstrou ser suficiente. Esta situação levou os centros de investigação a procurar novas tecnologias de deposição de revestimentos e novos elementos químicos que permitissem aumentar a vida útil da ferramenta de corte (Lakshmanan & Xavior, 2014; Sandvik, 2022c; Sokovic et al., 2006).

As técnicas utilizadas para a obtenção de revestimentos podem ser divididas em duas categorias principais: processo de deposição química em fase de vapor (CVD – *Chemical Vapor Deposition*) e pulverização catódica (PVD – *Physical Vapor Deposition*) (Baptista et al., 2018b; May, 1995). As várias técnicas de deposição PVD e CVD estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Principais técnicas de deposição, para os métodos PVD e CVD

Método de deposição	Técnicas de deposição
PVD	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Projeção catódica (<i>Sputtering</i>) ▪ Evaporação no vácuo ▪ Deposição iónica
CVD	<ul style="list-style-type: none"> ▪ CVD realizado em vácuo ▪ CVD sem vácuo

Os processos de deposição de revestimentos utilizavam inicialmente o processo CVD, que ocorre por meio de reações químicas, geralmente a temperaturas entre os 850 °C e 1050 °C. No entanto, devido à necessidade de arestas mais vivas, os processos começaram a ser realizados também pelo processo PVD, ocorrendo a deposição por vapores gerados no interior da câmara de baixa pressão, com temperaturas entre os 400 °C e 600 °C (Trent & Wright, 2000).

Esses processos criam revestimentos que provaram ser especialmente úteis quando se trata de melhorar o desempenho e vida útil da ferramenta, e particularmente aplicados nos materiais difíceis de maquinar (Lim & Lim, 2001). As melhorias são alcançadas devido à melhoria da qualidade superficial, redução do coeficiente de atrito, aumento de dureza, tenacidade, estabilidade térmica e resistência à oxidação, melhorando genericamente as propriedades mecânicas da ferramenta devido ao seu revestimento (Arunnath & Masooth, 2021; Lim & Lim, 2001).

As principais propriedades que se pretendem obter com a aplicação de revestimentos em ferramentas de corte, são: elevada dureza a alta temperatura, estabilidade térmica e química, boa

condutividade térmica, boa resistência ao desgaste, baixo atrito, baixa capacidade para formar aresta postiça e boa adesão ao substrato.

- **Dureza:** a dureza elevada do revestimento em altas temperaturas, aumenta a resistência ao desgaste, reduzindo o aparecimento de desgaste abrasivo e propensão de formação de fendas e posterior aparecimento de crateras (Chowdhury et al., 2005; He et al., 2020).
- **Microestrutura e morfologia:** o processo e os parâmetros de deposição são determinantes para a formação da microestrutura, tamanho de grão, estrutura, dureza, etc. O desempenho de um revestimento é diferente quando depositado por um processo de PVD ou de CVD (Thakur & Gangopadhyay, 2016). A deposição PVD cria revestimentos com maior densidade na sua estrutura cristalina. Em conjunto com as tensões residuais de compressão, possibilitam um incremento de dureza (Ferreira et al., 2021; S. C. Santos et al., 2004).
- **Condutividade Térmica:** a elevada condutividade térmica é determinante para o bom comportamento dos revestimentos, e as propriedades de isolamento térmico são fundamentais para o processo de maquinagem (Lim & Lim, 2001; Sousa & Silva, 2020).

Apesar dos grandes avanços e desenvolvimento de novas tecnologias, as indústrias continuam a procurar formas de melhorar a qualidade dos seus produtos e incrementar a produtividade. O desgaste da ferramenta é o principal problema encontrado nos processos de torneamento e fresagem em operações de maquinagem, principalmente quando realizadas com materiais de elevada resistência mecânica e dureza (Mahmood et al., 2022). A natureza destes materiais resulta em maiores tensões de corte e aumento da temperatura, no material e na ferramenta.

As ferramentas influenciam o processo de maquinagem, o que leva a que muitas investigações sejam direcionadas para o desenvolvimento de novas geometrias e novos revestimentos (Ji et al., 2018; Sousa et al., 2021).

Considerando os principais métodos de deposição, este estudo terá uma abordagem sobre os métodos de deposição por PVD e CVD, que se consideram os métodos que atualmente proporcionam os melhores resultados na deposição de revestimentos (Martin, 2000). Tratando-se de revestimentos superficiais, eles têm como principal função (Silva, 2001):

- Proteger as superfícies da corrosão, desgaste por abrasão, erosão e fadiga (particularmente importante nas ferramentas de corte);
- Prolongar o tempo de vida do produto (importante nas ferramentas de corte);
- Aumentar a resistência mecânica e dureza;
- Melhorar a qualidade visual ou estética das superfícies.

Ambas as técnicas de deposição permitem a criação de revestimentos importantes para as ferramentas de corte, permitindo revestimentos finos na ordem de alguns nanômetros até alguns micrómetros (10 nm até 5 μ m) (Martin, 2000). De forma a compreender as suas diferenças no que toca ao método de deposição, são apresentadas resumidamente as suas diferenças na Tabela 5.

Tabela 5 – Diferenças na deposição por PVD ou CVD (Martin, 2000)

CVD - Chemical Vapour Deposition	PVD – Physical Vapour Deposition
Temperaturas de operação: entre os 600 °C - 1000 °C	Temperaturas de operação: entre os 200 °C - 600 °C
A elevada temperatura do processo limita os materiais que podem ser revestidos	A deposição dá-se pela aplicação de diferença de potencial. Neste caso, os iões são atraídos para a superfície dos substratos a serem revestidos. Existe menor limitação de materiais
Usa gases em estado de vapor e o revestimento é criado através de reações químicas	Vaporiza o material a depositar que se encontra em alvos em estado sólido, formando o plasma que em forma de vapor será depositado na superfície do substrato
Pode ser aplicada em produtos com geometrias complexas	Para promover uma deposição homogénea, os substratos devem estar posicionados na linha de visão do cátodo. Limita o revestimento de peças com geometrias complexas
Necessária câmara de vácuo	

2.4.1. CVD - Chemical Vapour Deposition

O processo de deposição CVD, envolve uma reação química das fontes gasosas sobre a superfície de um substrato sólido, a qual promove a nucleação e crescimento de cristais sobre a superfície (May, 1995). Para que ocorram as reações, é necessária uma fonte de energia, a qual pode assumir diversas formas, tal como pode ser observado na Figura 13.

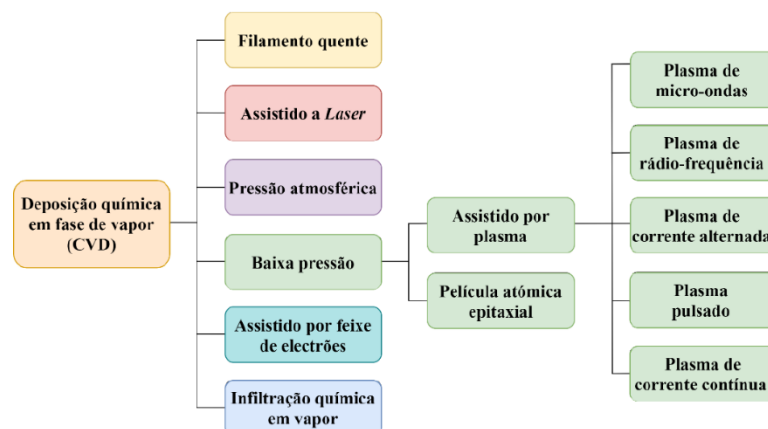


Figura 13 - Diagrama esquemático resumido das diversas variantes desenvolvidas em torno do processo CVD (Silva, 2022)

Esta técnica permite depositar diversos revestimentos com boa resistência ao desgaste, tais como: boretos, carbonetos, nitretos, óxidos ou carbonitretos. No entanto, a microestrutura do revestimento vai depender da temperatura de deposição (Silva, 2022).

O diamante sintético é um dos produtos normalmente produzido por CVD. Todas as técnicas de produção de diamante por CVD, requerem um meio de ativação das fases gasosas de alimentação, as quais contêm as moléculas precursoras do carbono (May, 1995; Mosińska et al., 2020).

O princípio do processo é ilustrado na Figura 14.

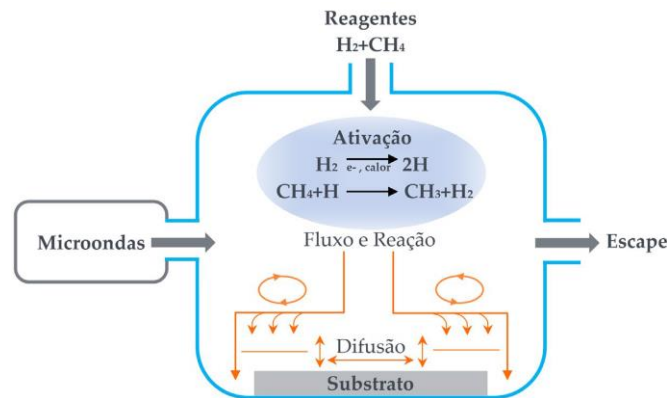


Figura 14 - Representação do princípio de síntese de diamante pelo processo CVD (May, 1995; Silva, 2022)

A ativação dos gases de alimentação origina um aumento do nível energético do sistema, podendo essa ativação ser realizada segundo uma das reações referidas no esquema da Figura 14 (Silva, 2022). Verifica-se uma quantidade indeterminada de reações químicas devido às colisões dos gases, quando os mesmos são ativados no interior de um reator, e os tempos das reações estão na ordem dos 10^{-9} segundos (Silva, 2022). O fluxo forçado transporta as espécies que participam nestas reações, por difusão e por convecção através do reator, até atingir a superfície do substrato onde as mesmas se difundem na superfície do substrato por processos como adsorção, segregação, difusão de espécies a partir da superfície, e reações químicas que podem ser vantajosas ou prejudiciais ao processo de crescimento do revestimento (Carlsson & Martin, 2010).

A classificação dos processos CVD é realizada em função da forma de ativação dos gases de alimentação. Para a criação de geração de revestimentos em diamante, a realização do processo utiliza essencialmente os seguintes processos CVD e a chama:

- Jato de plasma DC (PJCVD – Plasma Jet CVD)
- Micro-ondas (MPCVD – Microwave Plasma-Assisted CVD)
- Filamento quente (HFCVD – Hot Filament CVD)
- Combustão (Oxyacetylene Combustion)

O revestimento de pastilhas de corte e uma das principais aplicações dos revestimentos realizados por CVD, pelo facto dos substratos suportarem elevadas temperaturas (Martinho et al., 2019). De notar que a operação de desbaste é extremamente exigente para as ferramentas. Em condições de corte interrompido, essa exigência é ainda maior, devido ao impacto da peça sobre a ferramenta, que, sendo mais duro, tende a ser também menos resistente ao impacto (Martinho et al., 2019; Sokovic et al., 2006).

Conforme referido anteriormente, a técnica CVD permite obter diamante de elevada qualidade (Griffith et al., 1997; Hirmke et al., 2006). O diamante sintético obtido pode apresentar elevada dureza e pureza, conferindo excelentes propriedades às superfícies das ferramentas (Griffith et al., 1997; Mosińska et al., 2020). Na Figura 15 a) é apresentada a morfologia de diamante sintético obtido num reator HFCVD, sendo apresentada a sua seção transversal na Figura 15 b).

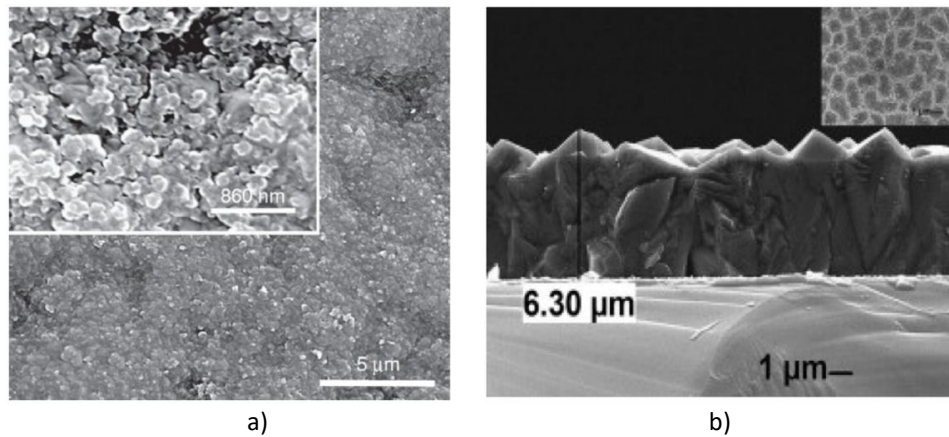


Figura 15 – a) Morfologia de diamante nanocristalino (NCD) obtido através da técnica HFCVD - Reproduzido de (Silva et al., 2009) b) Imagem SEM - secção transversal de revestimento de diamante (Ali & Ürgen, 2012)

Apesar das aplicações serem muito diversas, o foco de aplicação dos revestimentos CVD está maioritariamente direcionado na resolução dos problemas originados nos processos de maquinagem, essencialmente na melhoria da qualidade das superfícies maquinadas e no prolongamento da vida útil das ferramentas. As aplicações de maquinagem, estão muito dependentes da dureza do revestimento, embora outras propriedades como a adesão do revestimento ao substrato, o coeficiente de atrito e a condutividade térmica, também condicionem a aplicação e uso de cada revestimento (Sousa & Silva, 2020). Apenas a título de exemplo, a Tabela 6 mostra alguns valores de dureza típicos para revestimentos obtidos por CVD.

Tabela 6 – Valores de dureza indicados em diferentes trabalhos para vários revestimentos realizados por CVD. Adaptado de (Silva, 2022)

Tipo de Revestimento	Dureza (GPa)
Diamante	105
TiCN	20,3 – 21,8
Al ₂ O ₃	21,1 – 24,6
TiN	25,1 – 28,3
TiSiCN	27,0 – 45,0
TiCN	27,2 – 32,8
TiC0.47N0.53	28,6 – 31,4

É possível combinar métodos de deposição, como camadas de PVD e CVD, no mesmo revestimento, em ferramentas de corte e outros componentes, funcionando a deposição pelo método de CVD como um pré-revestimento com maiores espessuras, com o objetivo de aumentar a durabilidade dos substratos, diminuir o atrito e adequar a camada às condições térmicas pretendidas, ou seja, que a mesma atue como barreira térmica, ou como condutor de calor (Saketi & Olsson, 2017).

O revestimento poderá ser constituído por um conjunto de camadas, com propriedades distintas, contribuindo para que, globalmente, a vida das ferramentas/componentes possa ser incrementada. Em determinadas situações, os substratos podem ser revestidos com diferentes camadas e por diferentes processos de deposição. Por vezes, poderá ser realizada uma preparação do substrato por revestimento PVD, para incrementar a adesão ao substrato ou melhorar a deposição CVD, permitindo maiores espessuras por revestimentos CVD, finalizadas por revestimento por PVD, para conferir um melhor acabamento (Silva, 2022).

O processo CVD apenas foi abordado pontualmente, dado não ser o foco deste trabalho. Deu-se relevo ao processo PVD, que é apresentado de seguida.

2.4.2. PVD - *Physical Vapour Deposition*

O processo de pulverização catódica - PVD, foi descoberto há cerca de 100 anos. Já a deposição assistida por plasma foi patenteada há cerca de 80 anos. No entanto, o termo PVD apenas surgiu nos anos 60 (Geremew, 2021). Nos últimos 30 anos, ocorreu uma evolução do processo relativamente às suas diferentes variantes (Baptista et al., 2018).

A técnica de deposição PVD é um excelente processo de revestimento a vácuo para melhorar o desgaste e a resistência à corrosão. Este processo é amplamente utilizado para aplicações funcionais, como ferramentas de corte, peças decorativas, proteção anti-risco de sistemas óticos, moldes, matrizes e lâminas. Estes são apenas alguns exemplos de uma ampla gama de aplicações já bem conhecidas (Fox-Rabinovich et al., 2016; Korhonen et al., 2018).

O material a depositar advém de alvos por ação de um processo físico e térmico de colisão, que direciona átomos para a superfície a revestir. Teoricamente, o crescimento do revestimento faz-se pela adição de material átomo após átomo (Martin, 2000; Silva, 2022). Quando as partículas entram em contacto com os substratos, condensam e formam um revestimento extremamente fino, na ordem dos nanómetros (Mattox, 2003). O processo de partículas aceleradas a partir do alvo em direção ao substrato por bombardeamento de iões de árgon, é designado por *Sputtering* (Čyviene et al., 2005; Lundin et al., 2019).

O diagrama esquemático simplificado dos processos PVD mais correntes, e suas variantes, é apresentado na Figura 16.

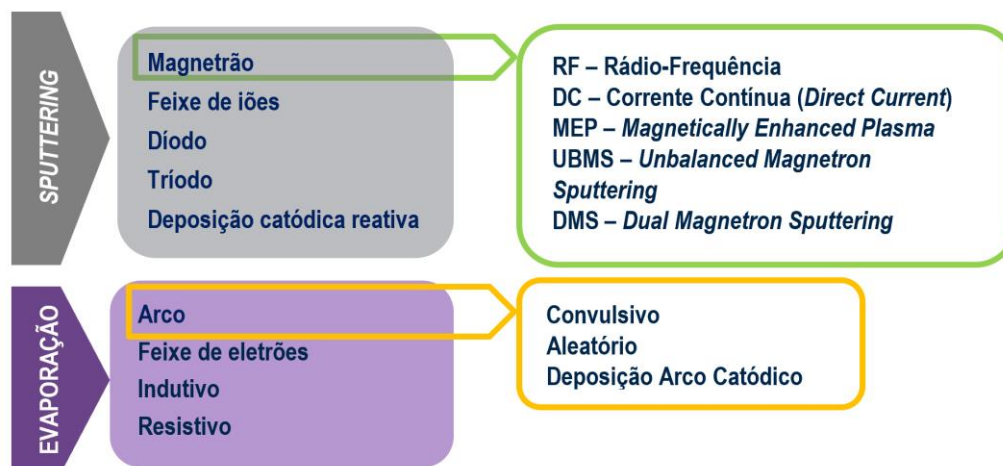


Figura 16 – Esquema abreviado de variantes da técnica PVD (Silva, 2022)

No caso do processo de *Sputtering*, o material é vaporizado por bombardeamento iónico, entre os iões de árgon e o material do alvo, enquanto no caso do processo de evaporação, o material a depositar é evaporado a partir do alvo devido à temperatura (Martinho, 2009).

A Tabela 7 foi criada de forma a resumir os tópicos apresentados anteriormente.

Tabela 7 – Características do processo PVD por processo (Martin, 2000; Mattox, 2003, 2010; Tracton, 2005)

Parâmetros do Processo	Evaporação	Sputtering
Vácuo	+	-
Taxa de deposição	+	-
Homogeneidade do revestimento	-	+
Adesão	-	+
Tamanho do grão	+	-
Absorção	-	+
Partículas atômicas	Direcionadas	Dispersas
Energia das partículas depositadas	-	+

O processo de *Sputtering* é muito versátil, visto que permite revestir peças dos mais variados materiais (Čyviene et al., 2005).

A técnica de evaporação possibilita a projeção de partículas do alvo para o substrato a pressões muito baixas (50 Pa a 200 Pa), recorrendo à utilização de um reator de alto vácuo. Estas condições permitem uma baixa energia atômica e menor adsorção de gases na deposição de revestimentos (S. H. Liu et al., 2021), resultando numa transferência de partículas com menores taxas de adesão ao substrato, particularmente devido ao tamanho do grão das partículas, em comparação com a técnica de *Sputtering* (Baptista, et al., 2018; Tracton, 2005).

No processo de evaporação, a pureza do revestimento é reduzida por contaminação de partículas que são libertadas do material do alvo fundido, e movidas para o substrato. Este é o motivo pelo qual o processo de evaporação é normalmente utilizado para revestimentos mais espessos e com menores exigências de pureza morfológica. No entanto, esta técnica apresenta maiores taxas de deposição, quando comparada com o processo de *Sputtering* (Baptista, et al., 2018; Mattox, 2010).

O diagrama esquemático do processo de evaporação é apresentado na Figura 17, proporcionando uma melhor compreensão dos componentes necessários.

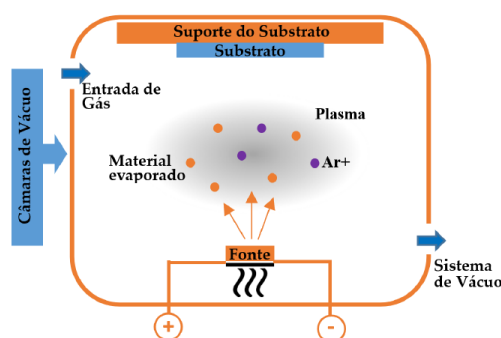


Figura 17 – Diagrama esquemático do processo de evaporação (Silva, 2022)

O processo de *Sputtering* é o processo mais usado para aplicações que exijam maior qualidade morfológica de superfícies onde granulometria, tamanho de grão, rugosidade, estequiometria e outras exigências são mais importantes do que a taxa de deposição (Baptista, et al., 2018a; Mattox, 2010).

O gás iônico introduzido dentro da câmara de deposição tem como objetivo eliminar contaminações no processo de deposição por *Sputtering*. No entanto, o seu principal objetivo é de,

quando atinge o alvo, permitir a libertação de partículas de tamanho atômico, que serão violentamente projetadas para o substrato, criando a deposição (Silva, 2022).

Este processo de deposição permite a obtenção de revestimentos multicamada através da utilização de mais do que um material ou liga em diferentes alvos. Neste caso, as peças a revestir podem sofrer movimento de rotação e translação dentro da câmara, ficando expostas a cada um dos diferentes alvos durante um determinado intervalo de tempo, o que irá permitir a obtenção de camadas sucessivas de cada um dos materiais utilizados como alvo. O tempo e a taxa de deposição de cada material é o que determina a espessura do revestimento. A alteração do tipo de deposição permite ainda uma maior flexibilidade do processo, por controlo de deposição e manipulação das camadas depositadas (Mattox, 2003). O diagrama esquemático do processo de *Sputtering*, é apresentado na Figura 18, permitindo identificar os componentes necessários e compreender esquematicamente o processo.

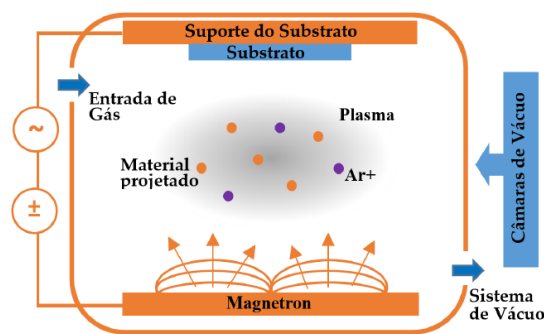


Figura 18 – Diagrama esquemático do processo de *Sputtering* (Silva, 2022)

As fases do processo de *Sputtering* podem ser verificadas na Figura 19. Este diagrama é apresentado como forma de ilustrar as fases que surgem sequencialmente dentro da câmara de deposição.

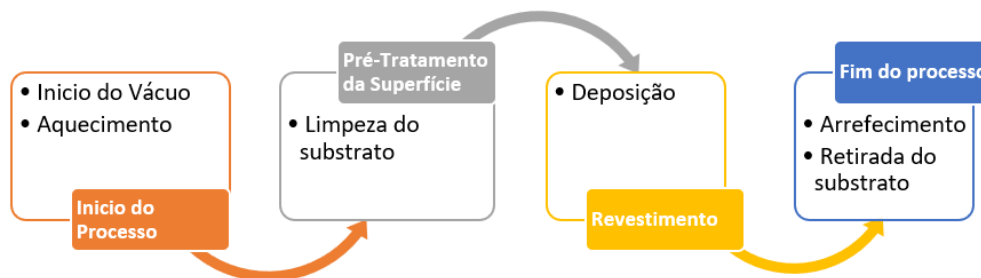


Figura 19 – Representação esquemática do fluxo do processo de deposição (Gassner et al., 2016)

As propriedades dos materiais, quando sujeitos a tratamentos superficiais, físicos ou químicos, são alteradas. Os parâmetros que são estudados repetidamente e que apresentam influência significativa nas características das peças revestidas, segundo Barshilia et al., 2012, são as seguintes:

- Taxa de deposição;
- Espessura do revestimento;
- Qualidade do revestimento e adesão.

Os fatores mais importantes para uma boa adesão do revestimento, são:

- Limpeza da câmara por plasma, remoção de óxidos e possíveis contaminações;
- Energia superficial do substrato;
- Pressão do vácuo deve manter-se entre 101 Pa e 104 Pa;

- Diferença de potencial aplicada aos alvos e ao substrato;
- Tipo e fluxo de gás.

2.5. Métodos de caracterização de revestimentos

Os revestimentos possuem propriedades únicas e individuais. Portanto, surge a necessidade de serem caracterizados com o objetivo de prever o comportamento mecânico e desempenho dos revestimentos em condições reais de serviço (Holmberg & Matthews, 1994).

Relativamente à espessura resultante do processo de deposição do revestimento, principalmente em revestimentos PVD, a sua análise é geralmente realizada através de SEM (*Scanning Electron Microscopy*) (Goldstein et al., 2017)

A técnica de difração de raios-X consiste na detecção dos raios X provenientes da interação com a amostra, após serem excitados por um feixe de raios X (Asfora, 2010; Khoury et al., 2019). A vantagem deste método é que ele é não destrutivo. No entanto, pode não ser tão eficaz em revestimentos multicamada, já que por um lado a difração de raios X depende da sua absorção na superfície, podendo não penetrar na segunda camada, e por outro porque camadas com a mesma estrutura cristalina originam picos na mesma posição, não sendo possível o cálculo do tamanho de grão e parâmetro de rede das camadas individuais (Casais, 2020; Khoury et al., 2019).

As espessuras dos revestimentos são também analisadas em SEM, ou por perfilometria. Além disso, a composição química qualitativa e quantitativa dos revestimentos é analisada também em SEM utilizando EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*) (Coxito, 2016). Menos utilizado que o SEM, mas igualmente importante na análise da morfologia e rugosidade superficial, têm-se a microscopia de força atômica, ou AFM (*Atomic Force Microscopy*), ou ainda, SFM (*Scanning Force Microscopy*), que também é utilizada na medição da rugosidade superficial.

A Figura 20 ilustra o esquema de funcionamento do AFM. Quando a ponta se aproxima da superfície da amostra, inicia a interação com a superfície, de modo que o “cantilever” se deforma, reorientando o laser, e isso faz com que o fotodiodo detete esta posição e envie sinais para o processador, onde é gerada a topografia da amostra (Pinto et al., 2015).

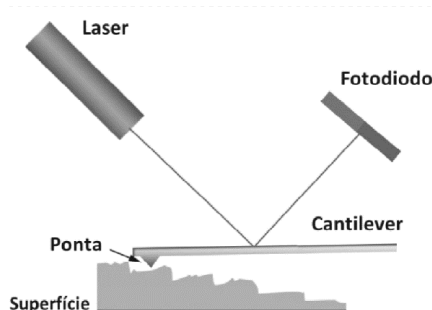


Figura 20 - Funcionamento do AFM. Adaptado de (Pinto et al., 2015)

Para avaliação das propriedades tribológicas e mecânicas dos revestimentos, é necessário utilizar tribômetros e equipamento de nano-indentação, respetivamente. A adesão do revestimento ao substrato é também uma propriedade importante.

Segundo Ohring (2002), existem três formas de adesão: adesão fundamental, adesão termodinâmica e adesão prática, sendo a última a que foi analisada neste trabalho (Ohring, 2002). Dessa forma, são utilizadas três técnicas para a medição da adesão: testes de deslizamento e de

penetração (“*scratch-test*”), testes de arrancamento (“*pull-off tests*”) e testes de indentação (Andrade, 2008).

2.5.1. Testes de Adesão

2.5.1.1 Testes de indentação de carga deslizante (“*Scratch-test*”)

O teste indentação de carga deslizante consiste em riscar a amostra com o uso de um indentador de ponta de diamante lisa e arredondada, até que os modos de adesão apareçam na pista com o aumento de carga. No decorrer do processo de aplicação, pode ser observado que à medida que o revestimento vai sendo desprendido são emitidas ondas acústicas, que podem indicar o início da falha adesiva ou coesiva (Casais et al., 2022). No entanto, por norma, ambos os modos ocorrem, o que se denomina falha mista (Martinho, 2009).

A Figura 21 ilustra esta técnica, onde F indica a carga normal aplicada e F_c a carga crítica de adesão na interface do revestimento com o substrato.

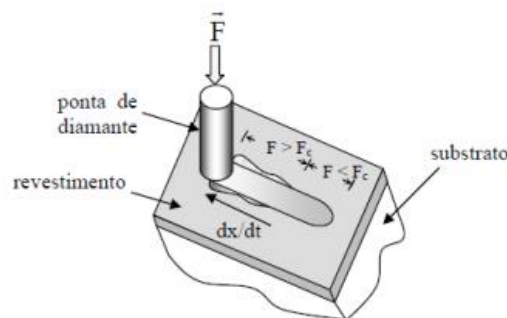


Figura 21 - Teste de adesão (“*Scratch-test*”) (Casais, 2020)

A classificação das falhas de adesão entre o revestimento e o substrato está prevista na norma (EN 1071-3:2005 - *Advanced Technical Ceramics - Methods of Test for Ceramic Coatings - Part 3*), que também identifica os principais mecanismos responsáveis pelas mesmas, e podem ser observados na Figura 22.

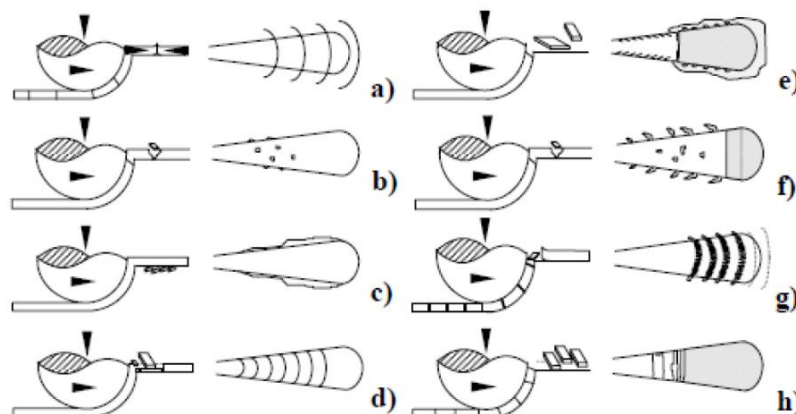


Figura 22 - Resumo dos mecanismos que originam falhas de adesão do revestimento ao substrato: a) fissuração por deformação de proa; b) pequenas delaminações; c) delaminação lateral; d) pequenos rebentamentos superficiais; e) levantamento repentino de grande quantidade de material; f) descascamentos laterais e de pequenas porções no trilho onde o substrato se torna visível; g) remoção do revestimento com exposição do substrato na zona trilho e h) delaminação contínua e completa (Casais, 2020)

Os fatores que afetam os resultados obtidos pelo teste são (Holmberg & Matthews, 1994):

- Acabamento e topografia da superfície do revestimento;
- Humidade relativa do ar, durante o ensaio;
- Material do indentador;
- Acabamento superficial e geometria do indentador.

As falhas podem dividir-se nas de natureza adesiva ou coesiva, sendo as mais relevantes as seguintes (Casais, 2020):

- Fissuração por deformação (falha coesiva até atingir substrato);
- Delaminações e levantamento de lascas – falha coesiva;
- Delaminações e levantamento de grande quantidade de material – falha adesiva;
- Descascamentos;
- Rebentamentos;
- Remoção do revestimento com exposição do substrato.

2.5.1.2 Testes de Indentação com indentador Rockwell C

Os testes de indentação foram desenvolvidos em torno da norma VDI (*Verein Deutscher Ingenieure*), permitindo a realização de testes que avaliam a adesão de revestimentos. O teste é realizado através do método *Rockwell C*, aplicando cargas pré-definidas sobre a superfície em teste. A análise é efetuada através de um microscópio ótico aos bordos das indentações, e são comparadas com as impressões padrão de qualidade de adesão (Andrade, 2008). A Figura 23 ilustra, segunda a norma VDI 3198: 1991, as falhas classificadas de aceitáveis e não aceitáveis.

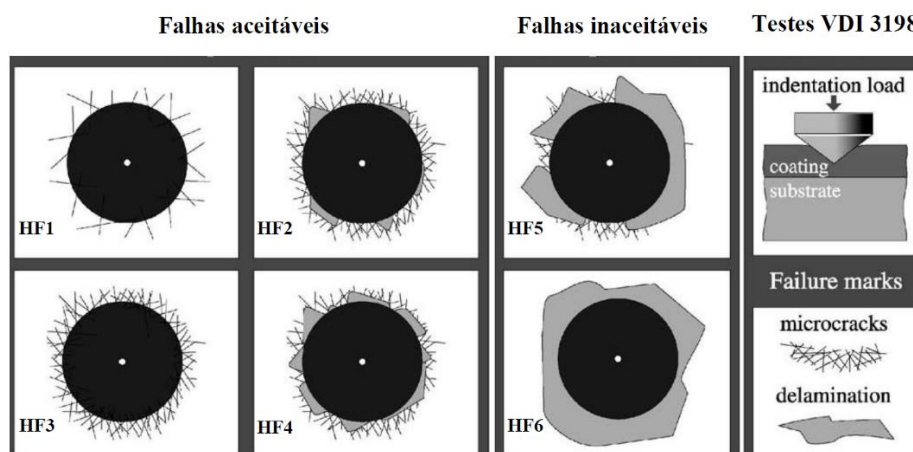


Figura 23 - Falhas segundo norma VDI 3198: 1991. Adaptado de (Vidakis et al., 2003)

Os padrões que apresentam resistência e adesão com falhas aceitáveis, apenas criam perfis com pequenas fissuras e pequenas zonas de destacamento da camada depositada. Quando os perfis apresentam um destacamento total ou quase total na zona envolvente da indentação, a adesão é considerada insuficiente.

2.5.2. Testes de dureza

Outra propriedade que deve ser caracterizada, como dito anteriormente, é a dureza. Para tal, duas técnicas podem ser aplicadas: ultramicroindentação e a nanoindentação. Os métodos de medição

da dureza convencionais não podem ser utilizados, pois as cargas são demasiado elevadas e, portanto, durante a medição, a influência do substrato nos valores medidos iria fazer-se sentir (Fischer-Cripps, 2006; Hu, 2017). Assim, a norma ISO 14577-1 determina a profundidade de penetração e a carga aplicada para (ISO 14577-1, 2015):

- Nanoindentação: $h_{máx} \leq 200$ nm;
- Microindentação: $h_{máx} \leq 200$ nm e $F < 2$ N;

De entre as duas técnicas referidas acima, a técnica mais adequada é a nanoindentação. Esta técnica permite medir e registar continuamente a carga aplicada e a profundidade de penetração durante o tempo do ensaio, sendo constituída por três etapas: a fase de carga, fase de fluência, e descarga ou relaxamento (Mann, 2005). Durante a carga, o indentador de diamante penetra na amostra, a carga é aplicada, e a profundidade de penetração aumenta, ocorrendo a segunda fase de manutenção da carga. Em seguida, com a retirada da carga, é observada uma profundidade, que é por onde é realizada a medida da dureza. Dessa forma, além da dureza, também é possível determinar o módulo de Young e a tensão residual (Casais, 2020).

A Figura 24 ilustra o processo, apresentando-se em (a) uma representação esquemática e em (b) o gráfico com as três fases do ensaio.

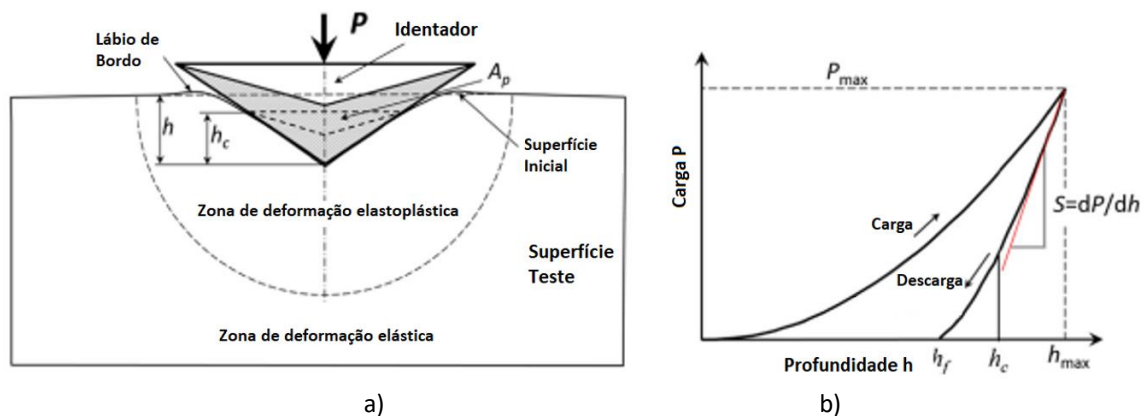


Figura 24 - Representação do ensaio de nanoindentação: (a) representação esquemática, e (b) gráfico referente às etapas do ensaio. Adaptado de (Hu, 2017)

Além disso, para se calcular a dureza do material (HV), é utilizada a Equação 1 (dureza *Vickers*).

$$HV = 1.854 \frac{P}{Di^2} = \frac{P}{240.25 \times h_{pc}^2} \quad (1)$$

Sendo, P a carga aplicada, Di a diagonal de indentação, e h_{pc} a profundidade de indentação.

2.6. Técnicas de revestimento para ferramentas de corte

Os revestimentos utilizados em ferramentas de corte podem ter seis configurações distintas: monocamada, dupla camada, composição em gradiente, multicamada, nanoestruturado (multicamada com espessura nanométrica) ou nanocompósito (Caliskan et al., 2017). Conforme se aumenta o número de camadas, pode ser observado um aumento da resistência à propagação de fendas, além de melhorar as propriedades de adesão, melhorando assim o desempenho mecânico da ferramenta no processo de maquinagem, e a sua resistência ao desgaste (Sousa & Silva, 2020). A Figura 25 ilustra as diferentes configurações possíveis.



Figura 25 – Configurações para revestimentos depositados em ferramentas de corte (Caliskan et al., 2017)

Além disso, a composição do revestimento é de extrema importância do ponto de vista de suas propriedades finais e desempenho. Estes revestimentos podem ser de nitretos, carbonetos, boretos, óxidos de transição e revestimentos de baixo atrito (caso do DLC). Entre os nitretos, podem ser encontrados revestimentos de TiN, TiAlN, CrN, ZrN, TiSiN, TiAlSiN, CrAlN e CBN. Entre os carbonetos, realçam-se os revestimentos de TiC, CrC e WC. Por outro lado, para os boretos têm-se o TiB₂, para os óxidos têm-se o Al₂O₃, e, no caso dos revestimentos de baixo atrito, têm-se o DLC, MoS₂ e WC-C (Sousa & Silva, 2020; Silva et al., 2022).

O uso destes revestimentos no processo de maquinagem, tem sido objeto de estudo intensivo por vários investigadores. As suas vantagens, limitações, e comparações entre eles tem também merecido particular atenção. A Tabela 8 sumariza alguns estudos recentes acerca deste tema.

Tabela 8 – Estudos relevantes sobre técnicas de deposição e revestimentos para ferramentas de corte

Autores	Descrição do Trabalho
(Du et al., 2013)	Nesta investigação, analisou-se a adição de duas camadas intermediárias de Ti e Cr na estrutura e no crescimento de revestimentos à base de TiAlN, sendo a deposição feita pelo método PVD. Foi observada uma difusão superior na camada intermédia de Cr, o que promoveu a criação de uma zona de transição e, conseqüentemente, melhoria da adesão ao substrato de WC-Co, apresentando dureza superior.
(Kainz et al., 2019)	Kainz et al., neste trabalho, avaliaram o comportamento do revestimento multicamada TiN/TiBN em comparação com os revestimentos monocamada destes compostos. Os revestimentos foram depositados pela técnica CVD. Foi verificado que, com a adição de Boro e aumento do número de camadas, teve um aumento da tenacidade à fratura. Entretanto, o revestimento multicamada apresentou maior dureza e resistência mecânica entre os revestimentos analisados.
(An et al., 2020)	Neste trabalho analisou-se o desempenho ao desgaste de ferramentas revestidas por Ti(C,N)+Al ₂ O ₃ +TiN em processo CVD e (Ti, Al)N+TiN por PVD, relativamente a ferramentas sem revestimento, em operações de fresagem das ligas Ti-6242S e Ti-555. No caso da fresagem da liga Ti-6242S, todas as ferramentas sofreram desgaste (adesivo e por difusão), sendo o desgaste do revestimento de Ti(C,N)+Al ₂ O ₃ +TiN mais severo. Relativamente ao revestimento (Ti,Al)N+TiN, além dos tipos de desgaste citados, também foram observados lascagem e descamação.

2.6.1. Revestimentos DLC

Os revestimentos DLC são constituídos por Carbono, tal como o diamante (sp³), mas com uma configuração molecular diferente. A sua constituição assenta maioritariamente numa configuração sp², as quais representam as ligações do tipo grafite, e ligações com hidrogénio (Lu et al., 2021). A Figura 26 ilustra as possíveis combinações de proporções e configurações resultantes para o DLC.

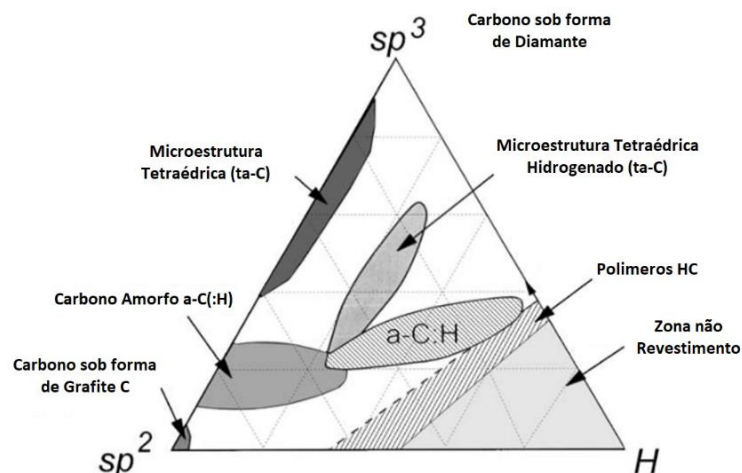


Figura 26 - Combinações de proporções e configurações resultantes para o DLC (Robertson, 2002)

Como revestimento em ferramentas de corte, o DLC apresenta boa resistência ao desgaste, devido ao seu baixo coeficiente de atrito e capacidade de autolubrificação, o que faz com que seja muito utilizado (Patnaik et al., 2021).

Além dessas propriedades, com a finalidade de se melhorar a sua adesão ao substrato, muitos autores, em seus trabalhos, acrescentaram elementos de liga como Si, Cr e W. Por exemplo, Vercammen et al. (2000), no seu trabalho, realizou um estudo comparativo com revestimentos DLC com adição de Si, Cr e W por diferentes métodos de deposição e tipos de configuração, sendo medida a dureza, módulo de elasticidade, resistência adesiva, coeficiente de atrito e analisado o mecanismo de desgaste resultante. Os autores verificaram grande variação das propriedades, sendo que cada revestimento traz vantagens específicas e tem características próprias e adequadas para uma determinada aplicação. Foi verificado que o revestimento com adição de Cr ofereceu uma combinação de boa resistência ao desgaste e baixo atrito, com elevada capacidade de carga, o que pode evitar uma falha sob tensão (Vercammen et al., 2000).

A Tabela 9 sumariza alguns estudos recentes com DLC como revestimento em ferramentas de corte.

Tabela 9 – Estudos recentes que trazem o DLC como revestimento em ferramentas de corte

Autores	Descrição do Trabalho
(Yokota et al., 2014)	Neste estudo foi analisado o processo de maquinagem de liga de Alumínio AA5052 em condições a seco, a fim de comparar o comportamento de ferramentas de corte revestidas com DLC e sem revestimento. A deposição do revestimento foi feita pelo processo de deposição a arco catódico, e CVD. Os autores verificaram menores forças de corte nas ferramentas revestidas, bem como redução do coeficiente de atrito, sendo que este último teve um aumento quando se realizaram os ensaios com ferramentas sem revestimento. Além disso, foi verificada uma região em que não era observada a adesão de Alumínio na face de inclinação da ferramenta revestida, e depositada pelo primeiro método.
(Badiger et al., 2018)	Nesta investigação, foi feita uma comparação entre ferramentas revestidas com DLC depositado pela técnica PVD e sem revestimento, em maquinagem de aço MDN431, fabricados pela Midhani, em condições secas e húmidas. Os autores verificaram que a ferramenta revestida teve melhor desempenho, com redução da rugosidade superficial e da força de corte, e com isso, melhorou a resistência ao desgaste durante a operação de maquinagem.

Tabela 9 – Estudos recentes que trazem o DLC como revestimento em ferramentas de corte (cont.)

(Bhowmick et al., 2015)	Neste trabalho foi avaliado o comportamento de ligas Al-Si fundidas com variadas composições de Al: composições hipoeutéticas (Al–6,5% Si), eutéticas (Al–12% Si) e hipereutéticas (Al–18,5% Si). Estas ligas foram sujeitas ao processo de maquinagem com ferramentas em carbono hidrogenado tipo diamante (H-DLC), brocas revestidas com diamante depositado via CVD e não revestidas. No caso das ligas Al-Si hipoeutéticas e eutéticas utilizando a ferramenta sem revestimento, observou-se muita adesão de alumínio à broca. Já no caso das brocas revestidas, verificou-se menor adesão, bem como menor formação de aresta postiça. No caso das ligas Al-Si hipereutéticas, a broca revestida com H-DLC teve uma redução da sua vida útil, com excessivo desgaste do flanco. Por sua vez, as brocas com diamante CVD tiveram um menor desgaste.
(Santos et al., 2007)	Neste trabalho, Santos et al., (2007) fizeram uma caracterização completa de um revestimento DLC depositado pelo método PECVD, com base no teor de hidrogénio, nanodureza, módulo de Young, coeficiente de atrito, rugosidade e espessura do revestimento, e compararam com a ferramenta sem revestimento. Em seguida, avaliaram as forças de corte e avanço no torneamento de ligas Al-Si (com 12 e 16% de Si), utilizando ferramentas revestidas e não revestidas, e verificaram que a força de corte não foi afetada pelo uso de ferramentas revestidas, visto que não ocorreu influência da adesão do Alumínio na aresta de corte.
(Kannan & Ghosh, 2014)	No artigo em questão, avaliou-se o desempenho de ferramentas revestidas por H-DLC na maquinagem da liga AA7075, comparando-o com o desempenho de ferramentas não revestidas. Os autores afirmaram que a vantagem deste revestimento é ser mais macio que o DLC não hidrogenado, e com isso, adequado para maquinagem em velocidades intermédias. A presença do revestimento fez com que não se verificasse formação de aresta postiça e o acabamento superficial foi superior em velocidades de corte entre 60 e 180 m/min.

2.6.2. Revestimentos TiAlN

Os revestimentos TiN (Nitreto de Titânio) foram os primeiros a ser aplicados a ferramentas de corte. Os mesmos foram melhorados com a adição de Alumínio ao revestimento, criando assim TiAlN (Nitreto de Titânio e Alumínio). O revestimento com TiAlN, é muito útil para operações de maquinagem, possibilitando a utilização de altas velocidades, sendo atualmente utilizado amplamente em operações de maquinagem. Um dos principais fatores que potenciam a utilização é a camada de óxidos criada à superfície deste revestimento, conferindo elevada resistência à oxidação à ferramenta (Hsieh et al., 1998; Sousa, et al., 2021).

O bom desempenho atingido em aplicações de maquinagem com o revestimento TiAlN, leva a contínuos e atuais desenvolvidos de vários tipos de revestimentos, tendo sempre como base o TiAlN, conferindo diversos tipos de características, dependendo das suas configurações e estruturas, e melhorando as suas propriedades. O revestimento TiAlN, também tem sido utilizado no desenvolvimento de novos revestimentos, nanocompósitos e nanoestruturados, com múltiplas camadas de ordem nanométrica, que exibem excelente resistência à propagação de fissuras e elevadas propriedades mecânicas, sendo objeto de estudos recentes acerca da dopagem do mesmo com outros elementos, possibilitando modificações da sua macroestrutura e, conseqüentemente, alterações nas propriedades mecânicas (D’Orazio et al., 2017; Sousa, et al., 2021).

Na Tabela 10 estão apresentados vários estudos realizados acerca da utilização de revestimentos TiAlN em operações de maquinagem, avaliando o seu desempenho e comportamento ao desgaste.

Tabela 10 – Estudos de revestimentos em ferramentas de corte com TiAlN

Autores	Descrição do Trabalho
(Silva et al., 2019)	<p>Neste estudo foram analisadas pastilhas de Carboneto de Tungstênio revestidas pelos processos PVD e CVD no processo de maquinagem de aço inoxidável super-duplex, de forma a identificar os mecanismos de desgaste dos revestimentos e aferir a qualidade da superfície da peça. Durante os estudos realizados, foi medido e analisado o nível de vibração, de forma a descartar a ocorrência de falhas do revestimento da pastilha de corte pelas vibrações geradas na árvore da máquina.</p> <p>Foi possível aferir que as ferramentas revestidas com TiAlN por PVD apresentam um melhor comportamento de desgaste e permitem a criação de superfícies com menor rugosidade, demonstrando as vantagens deste tipo de revestimento pela técnica de PVD em relação ao revestimento por CVD, na maquinagem do aço inoxidável super-duplex (GX2CrNiMoN26-7-4).</p>
(Sousa, et al., 2021)	<p>Nesta investigação, foi efetuado um estudo comparativo em operações de fresagem numa liga de aço para ferramentas, W 1.2711, de ferramentas revestidas com TiAlN e TiAlSiN. Foi avaliada a influência de vários parâmetros no desgaste apresentado pelas ferramentas, na rugosidade superficial produzida, e nas forças de corte geradas durante a operação.</p> <p>Foi também avaliada a influência do tipo da ferramenta, sendo realizados testes comparativos com fresa de topo e fresa esférica. Relativamente à influência do comprimento de corte e velocidade de corte, através da realização de testes às ferramentas para valores de 2 e 4 metros de comprimento de corte, e velocidade de corte de 40 m/min, 80 m/min e 120 m/min, sendo registado para todas as ferramentas quais os valores ótimos de rugosidade superficial, independentemente do comprimento de corte. Quanto à velocidade de corte, os melhores resultados de rugosidade registados foram para velocidade de corte de 80 m/min. Para as fresas de topo, não foram registadas diferenças consideráveis no acabamento da superfície maquinada e no desgaste apresentado para as diferentes geometrias e revestimentos (TiAlN e TiAlSiN). No entanto, as fresas esféricas que foram revestidas com TiAlSiN apresentaram os melhores resultados, em termos de valores mínimos de rugosidade e desgaste obtidos.</p>
(Bandapalli et al., 2018)	<p>Neste trabalho foi analisado e avaliado o desempenho dos revestimentos PVD AlTiN e TiAlN, utilizados em operações de fresagem de uma liga de Titânio. O estudo consistiu na avaliação e comparação do desgaste das ferramentas revestidas e não revestidas, sendo registado, para os dois tipos de revestimento, mecanismos de desgaste iguais, sendo estes fundamentalmente adesão do material maquinado à superfície da ferramenta e delaminação do revestimento. As altas temperaturas de maquinagem, provocadas pelo corte da liga de Titânio promovem a adesão de material. Relativamente à ferramenta não revestida, o principal mecanismo de desgaste apresentado foi a adesão de material. No entanto, apresentou uma menor quantidade, quando comparado com a encontrada nas ferramentas revestidas, significando que, para as condições adotadas, é preferível a utilização de uma ferramenta não revestida.</p>
(Hsieh et al., 1998)	<p>No artigo em questão, avaliou-se o desempenho do revestimento multicamada TiN/TiAlN depositados por magnetron <i>sputtering</i>, visando caracterizar este revestimento e identificar vantagens em relação aos revestimentos monocamada de TiN e TiAlN. Foi observado menor coeficiente de desgaste em comparação com o revestimento de TiAlN, para todas as velocidades testadas. Relativamente ao revestimento monocamada de TiN, a resistência ao desgaste foi menor em algumas velocidades. Os autores tentaram ir mais além, e para melhorar ainda mais o desempenho, depositaram uma camada a mais de TiCN, formando o revestimento TiCN-(TiN/TiAlN), que por sua vez, teve resistência ao desgaste superior.</p>

2.7. Maquinagem de ligas de cobre

A informação científica referente ao processo de fresagem da liga Cobre-Berílio AMPCOLOY® 83 é praticamente inexistente, originando a necessidade de investigação deste processo neste material. Considerando essa necessidade, com o objetivo de entender o processo, definir a estratégia e parâmetros para o trabalho prático, o estudo foi especialmente focado nas ligas de cobre, e posteriormente adaptado à liga de Cobre-Berílio AMPCOLOY® 83.

2.7.1. Estudos de maquinagem em ligas de cobre

Resumidamente, foram observados e apresentados alguns resultados relativos à maquinagem em ligas de Cobre na Tabela 11, visto que o AMPCOLOY® 83 é uma liga de Cobre-Berílio.

Tabela 11 – Estudos relevantes sobre maquinagem de ligas de Cobre

Autores	Descrição do Trabalho
(Shihan et al., 2021)	Este estudo consistiu na observação da ocorrência de vibração no processo de fresagem de topo da liga Monel K-400, que se trata de uma liga de Cobre-Níquel com excelente resistência à corrosão e elevada dureza. A vibração afeta a vida útil da ferramenta e, conseqüente, origina má qualidade superficial na peça maquinada. Neste estudo, foram identificados e selecionados os parâmetros de entrada, tais como, velocidade de rotação da árvore, velocidade de avanço e profundidade de corte axial, para posterior análise da vibração. As ferramentas dispunham de um revestimento multicamada TiN/TiAlN através da técnica de <i>magnetron sputtering</i> , permitindo caracterização do mesmo e identificação de vantagens em relação aos revestimentos monocamada de TiN e TiAlN. Foi verificado um menor coeficiente de desgaste comparativamente com o revestimento de TiAlN, para todas as velocidades em teste. Relativamente ao revestimento monocamada de TiN, a resistência ao desgaste foi menor em algumas velocidades.
(Dehen et al., 2020)	Este estudo apresenta grandes semelhanças com o realizado nesta dissertação, sendo o principal objetivo a análise da qualidade da peça maquinada e dos mecanismos de desgaste. Para a realização do estudo, recorreram a ferramentas de corte de 1,5 mm de diâmetro e 4 lâminas de corte, sendo o latão o material de base escolhido para a realização do estudo, tratando-se de uma liga de Cobre-Zinco. Investigou-se experimentalmente, a influência da estratégia e parâmetros de corte do processo na topografia da superfície resultante. Assim, variando a direção do corte, velocidade de corte e a velocidade de avanço, realizou-se um facejamento de topo na peça. Foram registradas as forças de corte geradas no processo e a rugosidade obtida na superfície da peça. A rugosidade mostrou-se superior para ferramentas com maior desgaste e o parâmetro que mais influenciou a rugosidade superficial foi a velocidade de avanço. A análise de resultados demonstrou a influência do desgaste da ferramenta, originando vibrações durante o processo de fresagem, que influenciaram negativamente a qualidade superficial e levam ao aumento das forças de corte.

Tabela 11 – Estudos relevantes sobre maquinagem de ligas de Cobre (cont.)

(Alagarsamy et al., 2020)	O estudo apresentado, consistiu na otimização dos parâmetros de maquinagem, utilizando-se o método de Taguchi, tendo por base o processo de fresagem de uma liga de Cobre-Zinco, no caso, o latão C26130. De forma a ser possível chegar ao nível onde a rugosidade superficial da peça a maquinar é mínima, os critérios a considerar foram de velocidade de rotação da árvore de 750 rpm, velocidade de avanço de 20 mm/rot e uma profundidade de corte axial de 1 mm. Por outro lado, para o desgaste na ferramenta de corte ser mínimo (fresa HSS 12 mm), os resultados apontam para 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. Resumindo, foi possível identificar que os parâmetros que influenciam a rugosidade superficial da peça e o desgaste na ferramenta de corte, são a velocidade de rotação da árvore e velocidade de avanço.
(Castanheira, et al., 2021)	Neste trabalho foi avaliado o comportamento de ferramentas de corte revestidas e não revestidas, em processos de fresagem em ligas de Cobre-Berílio (AMPCOLOY® 83). Estas ligas são particularmente difíceis de maquinar, devido à adesão do material à superfície da ferramenta, causada pela natureza dúctil do material, originando a rápida deterioração das ferramentas. Foram realizados ensaios, variando a velocidade de avanço e comprimento de corte, sendo posteriormente realizadas medições de rugosidade superficial da peça maquinada, assim como a avaliação do desgaste das ferramentas de igual geometria, revestidas por multicamada DLC/CrN e não revestidas, permitindo obter uma comparação do desempenho e identificação dos principais mecanismos de desgaste. A análise de resultados demonstrou que as ferramentas revestidas apresentaram melhor desempenho para comprimentos de corte menores, produzindo menor grau de rugosidade na superfície do material maquinado, mas a diferença é mínima em relação a ferramentas não revestidas. No entanto, observou-se que, para maiores comprimentos de corte, as ferramentas não revestidas apresentavam menor desgaste e, conseqüentemente, menores valores de rugosidade da superfície da peça em maquinagem.

2.7.2. Liga de Cobre-Berílio AMPCOLOY® 83

No desenvolvimento do estudo experimental, foi utilizada uma liga de Cobre-Berílio comercialmente designada por AMPCOLOY® 83, e universalmente conhecida por liga Cu-Be C17200, que irá ser alvo de operações de maquinagem. A mesma é amplamente utilizada em atividades de engenharia, por dispor de boas propriedades mecânicas, combinadas com uma elevada condutividade térmica e elétrica (Castanheira, et al., 2021). Está disponível no mercado em lingote, tubo, barra, placas, fio, entre outros, e dependendo da sua forma, a liga forjada pode ser conformada a frio por processos convencionais, estampada e maquinada.

Genericamente, a liga Cu-Be apresenta boa resistência à corrosão atmosférica, e resistência à corrosão semelhante a ligas com elevado teor em Cobre. Embora possa manchar, quando exposto a outros elementos, não coloca em causa as suas propriedades mecânicas.

Na indústria dos moldes para injeção, existem zonas moldantes que o circuito de refrigeração do molde não consegue alcançar e é extremamente importante a refrigeração desse mesmo local. A utilização das ligas Cu-Be no fabrico de insertos para moldes de injeção de plásticos permite que essas zonas apresentem uma maior dissipação de calor, visto que apresentam até dez vezes mais

condutividade térmica que os aços comum utilizado no fabrico de moldes, permitindo garantir um maior rendimento no ciclo de injeção. A maior resistência ao desgaste, por outro lado, leva à utilização de insertos em localizações com movimento, sendo habitual encontrar os mesmos em zonas de deslizamento recorrente como, por exemplo, na realização de uma extração da peça no interior do molde de injeção.

A maquinabilidade do AMPCOLOY® 83 é excelente e bastante competitiva em relação a aços comuns, sendo certo que a velocidade de corte depende muito das ferramentas de maquinagem, dos equipamentos onde as operações são realizadas e da sua estabilidade, do tipo de lubrificação e refrigeração. Para a fresagem da liga AMPCOLOY® 83, é usual utilizarem-se ferramentas de Carboneto de Tungsténio, utilizando água com 5 a 10% de óleo solúvel, como refrigeração e limpeza do processo de maquinagem. Devem respeitar-se os parâmetros indicados na Tabela 12 pelo fabricante.

Tabela 12 – Parâmetros de operações de fresagem da liga AMPCOLOY® 83

Operação	Parâmetro	Valor
Desbaste	a_p - Profundidade de corte [mm]	Até 4
	V_c - Velocidade de corte [m/min]	105 - 140
	f_n - Avanço por rotação [mm/rot]	0,1 – 0,25
Acabamento	a_p - Profundidade de corte [mm]	Até 0,5
	V_c - Velocidade de corte [m/min]	105 - 140
	f_n - Avanço por rotação [mm/rot]	0,05 – 0,1

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, apresenta-se um conjunto de tópicos que retratam o desenvolvimento experimental desta dissertação de mestrado.

Este trabalho experimental foi realizado com a participação de várias instituições, tais como a *InovaTools* no fornecimento das fresas utilizadas no trabalho, a *Durit Coatings*, responsável pela produção de revestimentos sobre as fresas, e o Laboratório de Ensaios Tecnológicos – LET e o Laboratório de Metalografia – LMET do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia do Porto, onde foram realizadas as operações de maquinagem, efetuada a preparação metalográfica com vista à medição da espessura do revestimento, realizados os ensaios de avaliação da adesão dos revestimentos por testes de indentação e, finalmente, as observações e medições dos mesmos por microscopia ótica.

No Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade de Coimbra, foram realizados os testes de adesão e deslizamento, os ensaios de medição da dureza do revestimento e a análise do desgaste por Microscopia Eletrónica de Varrimento. No Centro de Materiais da Universidade do Porto – CEMUP, foi efetuada a Microscopia Eletrónica de Varrimento em algumas ferramentas, de forma a permitir resultados com maior detalhe.

3.1. Materiais

Na presente subsecção, serão apresentados os materiais utilizados na realização dos ensaios de maquinagem, nomeadamente o material maquinado, mencionando qual o seu formato inicial, as suas principais propriedades mecânicas, e a sua composição química. As ferramentas de corte usadas serão também apresentadas, referindo qual o material do substrato e revestimento, e a sua geometria.

3.1.1. Material a maquinar

O material utilizado nos ensaios de maquinagem foi uma liga de Cobre-Berílio forjada, mais concretamente, a liga AMPCOLOY® 83. A elevada importância da liga na indústria dos moldes para injeção de plástico, foi um fator preponderante na sua escolha, visto que permite o fabrico de componentes a aplicar nas zonas moldantes dos moldes. O material foi fabricado e fornecido pela empresa AMPCO (Porto, Portugal), sendo fornecido sob o formato de um paralelepípedo, com dimensões de 155 x 115 x 155 mm³ e 22,5 kg, sendo que no início dos trabalhos o mesmo se encontrava com 155 x 115 x 120 mm³ e 17,4 kg. A composição química da liga em questão é apresentada na Tabela 13.

Tabela 13 – Composição química da liga AMPCOLOY® 83

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

Tendo em consideração a composição química da liga AMPCOLOY® 83, devem ser tomadas precauções no decorrer das operações de maquinagem, como torneamento e fresagem, visto que a liga contém 1,9% de Berílio, e são operações que originam “pó ou fumos”.

Assim, é recomendado que sejam tomadas precauções de forma a evitar a inalação ou contacto com os olhos e pele das partículas retiradas durante a operação, sendo que a utilização do fluido de corte é recomendável.



Figura 27 – Bloco de AMPCOLOY® 83

A liga de Cobre-Berílio AMPCOLOY® 83, apresenta uma boa condutividade térmica e elétrica, juntamente com excelentes propriedades mecânicas. Por consequência, é muito utilizada em diversas aplicações, particularmente na indústria de moldes de injeção. Na Tabela 14 estão expostas resumidamente as propriedades mecânicas e físicas para a liga utilizada nos ensaios.

Tabela 14 – Propriedades físicas e mecânicas da liga AMPCOLOY® 83

Propriedades	Valor	Unidades
Tensão de cedência	1000	MPa
Resistência à tração	1250	MPa
Deformação	4	%
Módulo de elasticidade	131	GPa
Dureza Rockwell	40	HRC
Dureza Brinell	380	HBW 10/3000
Densidade	8,26	g/cm ³
Coefficiente de expansão	17,5	10 ⁻⁶ /K
Condutividade elétrica	12,8	m/Ω·mm ²
Condutividade térmica 20 °C	106	W/m·K
Calor específico	0,38	J/g·K

A liga de Cobre-Berílio é muito pouco explorada no que respeita à sua maquinagem, e a pouca literatura existente não permitiu recolher informação suficiente sobre as melhorias obtidas pela utilização de ferramentas revestidas com DLC, de forma a melhorar o acabamento da superfície e aumentar o tempo de vida das ferramentas. A escolha da liga de Cobre-Berílio para a realização da dissertação de mestrado, contribuirá para o aumento do conhecimento da sua maquinagem.

3.1.2. Substrato e geometria da ferramenta

As ferramentas de corte utilizadas nos ensaios de fresagem, tinham por base um substrato de Carboneto de Tungstênio, monobloco e tórico com 6 mm de diâmetro, representada na Figura 28 a). As ferramentas não revestidas foram fornecidas pela empresa *InovaTools*, S.A.

As fresas dispõem de quatro lâminas de corte ($Z=4$), sendo as lâminas representadas com o número 1 e 3 na Figura 28 b), e com lâmina de corte ao centro. Apenas foram utilizadas ferramentas desta geometria na realização dos ensaios, sendo a única diferença a deposição do revestimento de dupla camada sobre alguma delas. As dimensões das fresas estão apresentadas na Tabela 15.

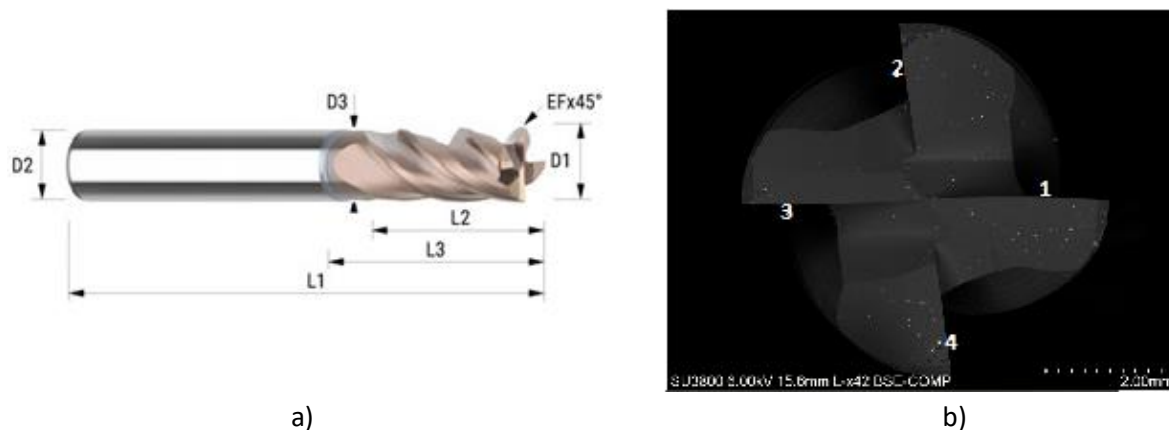


Figura 28 – Ferramenta de corte: a) Diagrama esquemático legendado; b) Lâminas de corte (vista de topo)

Tabela 15 – Dimensões da ferramenta de corte

Referencia	D1 [mm]	D2 [mm]	D3 [mm]	L1 [mm]	L2 [mm]	L3 [mm]	Chanfro de canto	Lâminas
998.063.992	6,00	6,00	5,50	57,00	13,00	21,00	0,13	4

As ferramentas utilizadas nos ensaios tiveram por base os seguintes critérios:

- Diâmetro de 6 mm, muito utilizado em operações de fresagem de desbaste e acabamento de peças;
- Encabadouro de 6 mm, garante elevada robustez, evitando vibrações geradas durante a maquinagem;
- Fresas de metal duro, as quais são muito resistentes e eficazes no processo de corte por arranque de aparas;
- Fresas de metal duro revestidas (TiAlN/DLC), apropriadas para a maquinagem de materiais macios e com tendência a formar aresta postiça, facilitando assim a remoção da aparas e permitindo a eficiência do corte;
- Quatro lâminas de corte, não sendo considerado o número ideal para a maquinagem de materiais macios (três lâminas), permitindo dessa forma perceber que a qualidade dos acabamentos superficiais na peça maquinada poderiam ter sido ainda melhores.

O substrato usado na concepção das ferramentas de corte utilizadas nos ensaios de fresagem, foi concebido recorrendo a um Carboneto de Tungstênio sintetizado de grau 6110, com uma

granulometria de cerca de $0,3 \mu\text{m}$. Na sua concepção, foi ainda adicionado Cobalto, como elemento aglomerante. A Figura 29 ilustra uma fresa não revestida.



Figura 29 – Fresa não revestida

3.1.3. Revestimento usado

O material a maquinar (liga de Cobre-Berílio AMPCOLOY® 83), serviu de base para a seleção do revestimento das ferramentas de corte. Considerando que o AMPCOLOY® 83 apresenta características de um material macio, e no decorrer do processo de fresagem tende a aderir à ferramenta de corte, foi selecionado um revestimento que funciona como autolubrificante. O revestimento selecionado foi de dupla camada, tendo TiAlN na base, e uma camada de DLC Hidrogenado no topo. Entre as duas camadas existe uma camada com composição química gradiente, que foi depositada para evitar a mudança abrupta de composição entre as camadas. Antes da camada de TiAlN, foi depositada uma camada de adesão de Ti. O revestimento foi realizado pela *Durit Coatings*, usando um equipamento *CemeCom CC800/9ML PVD Unbalanced Magnetron Sputtering*. A Figura 30 ilustra uma fresa revestida utilizada nos ensaios realizados.



Figura 30 – Fresa revestida

3.2. Métodos e Equipamentos

De seguida, irão ser apresentados os equipamentos, o método e parâmetros utilizados para a deposição do revestimento nas ferramentas, os procedimentos efetuados para a análise do desgaste, e para a realização das restantes análises efetuadas.

3.2.1. Revestimento das Ferramentas - PVD

Antes da realização de qualquer deposição do revestimento, é extremamente necessário a realização de limpeza com acetona em banho de ultrassons. A mesma deve ser realizada em duas etapas: a primeira com duração de cerca de 15 minutos, posteriormente a acetona é renovada e procede-se à segunda fase de limpeza, com uma duração de 5 minutos. Após estas duas etapas, o processo de limpeza está concluído.



Figura 31 – Limpeza com acetona em equipamento de ultrassons

Foi utilizado o método PVD para a deposição do revestimento nas fresas, recorrendo a um equipamento com capacidade de alojamento de quatro alvos, denominado como *CemeCom CC800/9 ML PVD Unbalanced Magnetron Sputtering*. O porta-substratos esteve animado de movimento rotativo de 1 rpm durante todo o processo de deposição, garantindo que os revestimentos depositados apresentavam elevada homogeneidade.



Figura 32 – Equipamento CemeCom CC800/9 ML PVD

Para a deposição da camada de base de TiAlN, foram utilizados três alvos com uma composição química de TiAl. No entanto, no caso da deposição do revestimento DLC, foi utilizado um alvo de carbono. Os parâmetros de deposição utilizados para a realização do revestimento mencionado para as ferramentas de corte, encontram-se na Tabela 16.

Tabela 16 – Parâmetros de deposição utilizados

Parâmetros	TiAlN	DLC
Tempo de deposição [min.]	120	
Gases utilizados no reator	Ar + N ₂ (300 mln+ 100 mln)	Ar + N ₂ (300 mln+ 100 mln)
Quantidade x Material do alvo	3xTiAl	1xC - Grafite
Pressão de trabalho [mPa]	600	600
Bias [V]	-60	-60
Velocidade de rotação do porta-amostras [rpm]	1	1

3.2.2. Equipamento e condições de fresagem

Todos os ensaios de fresagem do AMPCOLOY® 83 foram realizados recorrendo ao centro de maquinagem HAAS, modelo VF-2. Este equipamento utiliza três eixos para maquinar. A distância da mesa à árvore é de 610 mm, mesa essa com 914 mm de comprimento e 356 mm de largura. Dispõe de uma potência máxima de 20 kW e velocidade de rotação máxima 10 000 rpm. Este equipamento apresenta a possibilidade de arrefecimento, recorrendo a um fluido de corte em emulsão composto por 5% de óleo de base sintética e 95% água.



Figura 33 – HAAS VF-2 – Centro de Maquinagem

O centro de maquinagem é parte integrante do Laboratório de Tecnologia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

No processo de fixação e troca da ferramenta, foram utilizados diversos componentes, nomeadamente um tirante ISO 7388-2, porta-pinças ER32 H70, paquímetro para posicionamento da fresa, pinça ER DIN 6499 e um cone ISO40 DIN69871. Estes componentes encontram-se ilustrados na Figura 34.

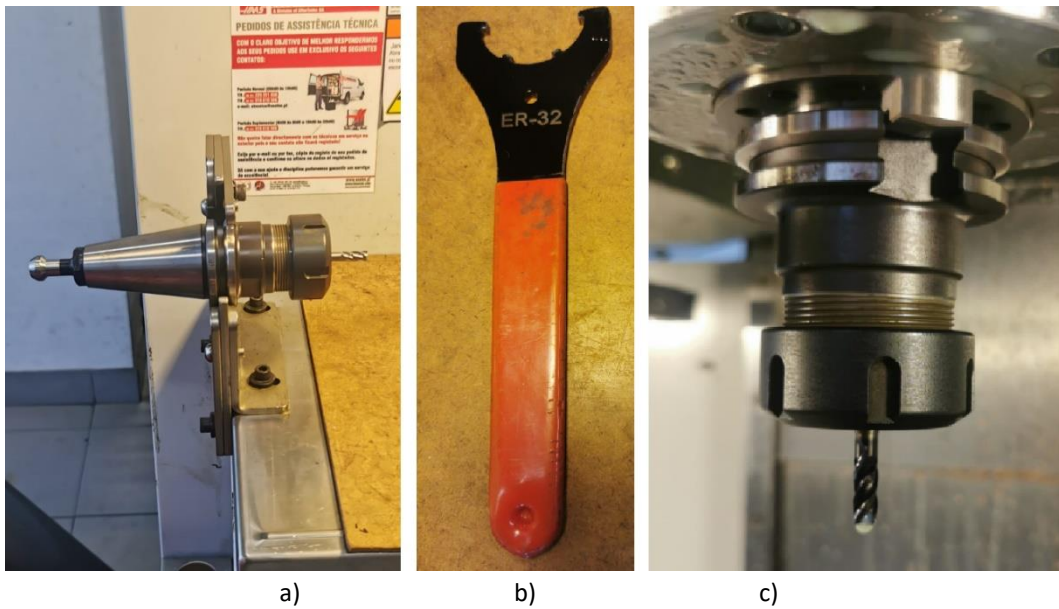


Figura 34 – Sistema de Aperto a) Cone e Porta Pinças ER-32 H70 com ferramenta; b) Chave para abertura ER-32 c) Ferramenta de corte em centro HAAS VF-2

Os componentes que fazem parte do sistema de aperto da ferramenta de corte à árvore da máquina, encontram-se esquematizados na Tabela 17.

Tabela 17 – Componentes do sistema de aperto

Tirante	ISO 7388-2
	L [mm] 57
	L1 [mm] 32
	D1 [mm] 17
	D2 [mm] 10
	D5 M16
Piça	DIN6499 ER 32
	d [mm] 5
	D [mm] 33
	L [mm] 40
Cone	DIN69871 ISO40 ER32
	A [mm] 70
	D [mm] 50
	L1 [mm] 50
	SK 40
	Peso [kg] 1

Devido à geometria retangular do bloco de AMPCOLOY® 83, para a fixação foi utilizada uma prensa de precisão manual modelo *One-Lok*, da marca *CHICK*, com máxima abertura de 200 mm. A prensa foi montada na mesa do centro de maquinagem, como apresentado na Figura 35.



Figura 35 – Prensa modelo *One-Lok* da *CHICK*

Para determinar o zero-peça no centro de maquinagem, foi necessário efetuar a medição da peça de trabalho, recorrendo a uma sonda de contacto com transmissão ótica, modelo OMP40 da marca *Renishaw*.

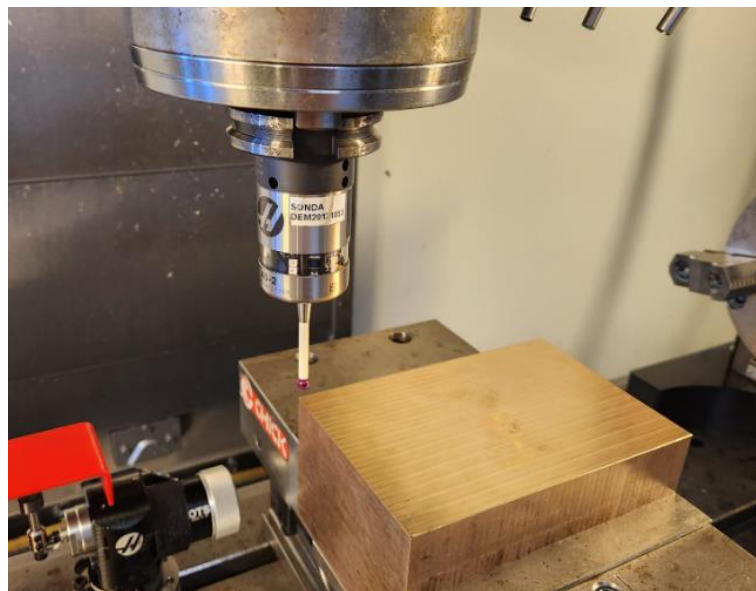


Figura 36 – Sonda de contacto OMP40 *Renishaw*

Executando o programa *Rectangle Block*, pelo controlador do centro de maquinagem, a sonda montada na árvore do centro de maquinagem permite a atribuição do zero-peça nos eixos X e Y. A execução do referido programa, coloca a sonda o mais próximo possível do centro do bloco de material, e próximo da sua superfície. De seguida, atribuiu-se no controlador os valores aproximados do comprimento em X, da largura em Y e a distância aproximada da superfície da peça à ponta da sonda. Procedeu-se depois ao ciclo de centragem, onde a sonda se deslocou até tocar

na superfície e nas laterais do bloco, fixando os pontos correspondentes à atribuição do zero-peça nos referenciais X e Y.

O programa *Single Surface* permite determinar o zero-peça no eixo Z, sendo o processo semelhante ao anterior. Necessita de posicionamento da sonda próxima da superfície da peça, e atribui-se a distância aproximada a que a ponta da sonda se encontra da peça no controlador. Quando se inicia o programa, a sonda desloca-se até efetuar o contacto com o bloco e atribui o zero-peça no eixo Z.

A medição do posicionamento e diâmetro das ferramentas de corte, é realizada antes de iniciar qualquer operação de maquinagem com uma ferramenta, e deve ser realizado em todos os ensaios. Este, foi realizado utilizando o sensor de ferramentas ótico OTS, da marca *Renishaw*, apresentado na Figura 37.

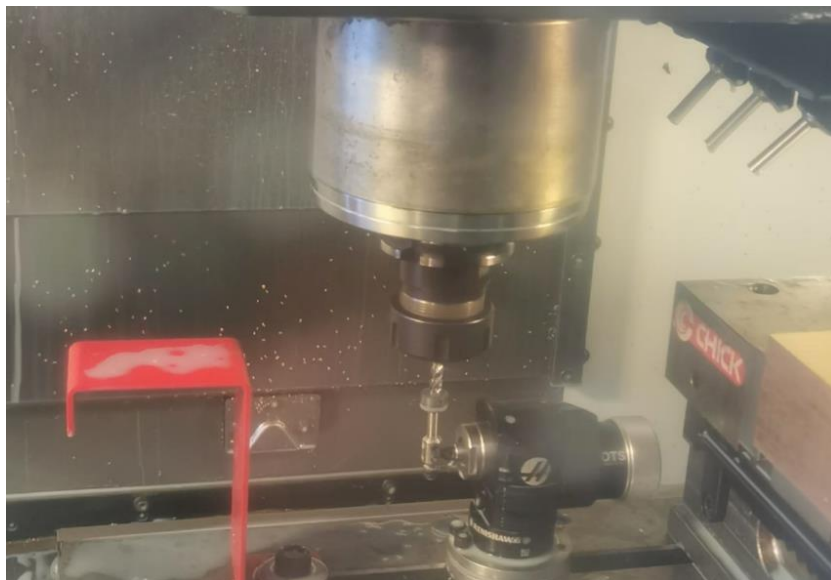


Figura 37 – Sensor de ferramentas OTS da *Renishaw*

3.2.3. Plano de Ensaio

De forma a caracterizar os mecanismos de desgaste em ferramentas de corte revestidas e não revestidas, e comparar os resultados obtidos com trabalhos anteriormente desenvolvidos, foi necessário avaliar o estado da superfície maquinada, assim como o desgaste das ferramentas. Inicialmente, foram utilizados parâmetros de maquinagem equivalentes a trabalhos anteriores, de forma a permitir uma base de comparação. Posteriormente, usaram-se parâmetros recomendados pelo fabricante das fresas. Assim, o plano foi dividido em duas fases.

Numa primeira fase, os parâmetros de corte usados em trabalhos anteriores, funcionaram como uma forma de realização de ensaios preliminares, isto é, como ponto de partida dos parâmetros de maquinagem. Além disso, estes testes permitiram estabelecer uma comparação com os resultados obtidos. Estes parâmetros sofreram posteriormente ajustes, de forma a melhorar os resultados, quer ao nível de desgaste da ferramenta, assim como da qualidade da superfície maquinada.

O primeiro conjunto de ensaios permitiram perceber que as ferramentas sofriam um desgaste considerável nos primeiros 48 metros de comprimento de corte, pelo que, uma vez ultrapassado este valor, a vida útil da ferramenta diminui consideravelmente. De realçar que para as ferramentas não revestidas, este valor era consideravelmente elevado.

O centro de maquinagem CNC HAAS VF-2 permitiu a realização dos diversos ensaios, onde se procurou atingir a rotação máxima de 10 000 rpm, de forma a perceber qual o acabamento superficial da superfície maquinada.

Foi delineada uma estratégia de maquinagem de forma a garantir maiores distâncias de corte, com o menor número de passagens. Foi executada uma fresagem de topo, sendo que a entrada da ferramenta foi efetuada perpendicularmente e exterior à aresta da peça, realizando ao longo da face maior do bloco um movimento linear de facejamento.

Apesar das propriedades auto-lubrificantes do revestimento DLC, a maquinagem foi realizada recorrendo a um composto lubrificante, com 95% de água e 5% de óleo solúvel de base sintética, adicionado continuamente na zona de contacto da ferramenta com o material. Este composto, para além de permitir lubrificação e refrigeração da superfície e ferramenta, permite a remoção de partículas derivadas do processo de corte.

A nomenclatura das ferramentas, à semelhança de trabalhos anteriores, foi organizada de forma a permitir uma rápida e fácil identificação dos parâmetros de corte usados. Dessa forma, a identificação da ferramenta de corte segue a referência NwTxLyFz. Nesta nomenclatura, a letra w representa o número do ensaio, a letra x identifica a existência de revestimento da ferramenta, admitindo o valor 0 para não revestida ou 1 para revestida. O comprimento de corte realizado pela ferramenta é representado pela letra y e pode assumir o valor de 18, 36, 48 e 72 metros. Por último, a letra z, diz respeito à velocidade de avanço, e pode apresentar como valores 715, 750 ou 1500 mm/min.

Os diferentes parâmetros utilizados nos ensaios de maquinagem, podem ser visualizados nas Tabelas 18 e 19.

A profundidade de corte radial foi de 3,6 mm (60% do diâmetro da ferramenta), enquanto a profundidade de corte axial foi constante e de 0,5 mm. A velocidade de corte adotou valores de 117, 126 ou 188 m/min, e foi alterada a velocidade de rotação da árvore, por consequência da alteração da velocidade de corte. No entanto, foram adaptados os valores da velocidade de avanço e o comprimento de corte, de forma a verificar a sua influência nos mecanismos de desgaste originados nas ferramentas.

Os primeiros ensaios foram realizados em seis ferramentas não revestidas, utilizando uma velocidade de avanço de 750 mm/min no primeiro, segundo e terceiro ensaios, e 1500 mm/min no quarto, quinto e sexto ensaios. Já o comprimento de corte variou entre 18, 36 e 48 m, replicando os comprimentos de corte para as diferentes velocidades de avanço.

Seguidamente, foram realizados os mesmos ensaios em ferramentas não revestidas, o que permitiu identificar e comparar quais as fresas que permitem um maior rendimento e os mecanismos de desgaste nas ferramentas de corte. Para além disso, estes ensaios permitiram verificar a evolução do desgaste das ferramentas de corte sob diferentes velocidades de avanço, e também relacionar o comprimento de corte com o valor da rugosidade superficial da peça maquinada.

Tabela 18 – Parâmetros utilizados nos ensaios de maquinagem 1ª fase

Referência NwTxLyFzVk	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]
N1T0L18F750V126	Não	126	750	0,5	3,6	18
N2T0L36F750V126	Não	126	750	0,5	3,6	36
N3T0L48F750V126	Não	126	750	0,5	3,6	48
N4T0L18F1500V126	Não	126	1500	0,5	3,6	18
N5T0L36F1500V126	Não	126	1500	0,5	3,6	36
N6T0L48F1500V126	Não	126	1500	0,5	3,6	48
N7T1L18F750V126	Sim	126	750	0,5	3,6	18
N8T1L36F750V126	Sim	126	750	0,5	3,6	36
N9T1L48F750V126	Sim	126	750	0,5	3,6	48
N10T1L18F1500V126	Sim	126	1500	0,5	3,6	18
N11T1L36F1500V126	Sim	126	1500	0,5	3,6	36
N12T1L48F1500V126	Sim	126	1500	0,5	3,6	48

Para concluir os testes, e tal como anteriormente descrito, foram realizados ensaios com parâmetros de acordo com as recomendações do fabricante. Estes ensaios foram realizados com a finalidade de estudar a tendência do desgaste com a redução da velocidade de corte, e identificar a existência de um aumento do tempo de vida da ferramenta, apresentando ensaios para um comprimento de corte superior com 72 m. Também foram realizados ensaios com uma velocidade de corte de 188 m/min, atingindo a velocidade máxima de 10 000 rpm. A Tabela 19 mostra os parâmetros de corte utilizados na segunda fase dos ensaios de maquinagem efetuados.

No final de cada ensaio, foi realizada a análise e medição da rugosidade superficial (procedimento este que está descrito e abordado de forma mais detalhada, mais à frente neste capítulo), sendo de referir que cada medição foi repetida cinco vezes, de forma a despistar possíveis erros de leitura ou fenómenos inesperados/aleatórios. Este procedimento permitiu que fossem extraídos os resultados médios dos valores em análise.

No final de cada ensaio, as ferramentas de corte foram devidamente embaladas em caixas adequadas, devidamente identificadas, sendo a limpeza realizada imediatamente antes das análises efetuadas no microscópio eletrónico de varrimento, de forma a evitar possíveis contaminações ou oxidações das superfícies em análise.

Tabela 19 – Parâmetros utilizados nos ensaios de maquinagem 2ª fase

Referência NwTxLyFzVk w – nº ensaio x – Revestimento 0 – Não revestida 1 – Revestida y – comp. de corte z – vel. de avanço k – vel. de corte	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]
N13T0L18F715V117	Não	117	715	0,5	3,6	18
N14T0L36F715V117	Não	117	715	0,5	3,6	36
N15T0L48F715V117	Não	117	715	0,5	3,6	48
N16T0L72F715V117	Não	117	715	0,5	3,6	72
N17T1L18F715V117	Sim	117	715	0,5	3,6	18
N18T1L36F715V117	Sim	117	715	0,5	3,6	36
N19T1L48F715V117	Sim	117	715	0,5	3,6	48
N20T1L72F715V117	Sim	117	715	0,5	3,6	72
N21T1L18F1500V188	Não	188	1500	0,5	3,6	18
N22T1L36F1500V188	Não	188	1500	0,5	3,6	36
N23T1L18F1500V188	Sim	188	1500	0,5	3,6	18
N24T1L36F1500V188	Sim	188	1500	0,5	3,6	36

3.2.4. Análise da rugosidade da superfície maquinada

A análise da rugosidade superficial da superfície maquinada é um dos parâmetros mais importantes, considerando que está diretamente relacionada com o desgaste e desempenho das ferramentas, e com a estabilidade do processo de maquinagem.

Assim, foi utilizado um rugosímetro modelo *Perthometer* M1 da marca *Mahr* para a medição do estado superficial da peça, após os ensaios de maquinagem, sendo medidos e analisados os valores de rugosidade aritmética (R_a), rugosidade média (R_z) e rugosidade máxima (R_{max}), transversalmente e longitudinalmente à direção da maquinagem.

O rugosímetro é parte integrante do Laboratório de Ensaios Tribológicos do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Na Figura 38, é apresentado o rugosímetro que funciona de acordo com a norma DIN EN ISO/AMSE/prEN 10049, e a montagem do medidor no bloco.



Figura 38 – a) Rugosímetro *Mahr Perthometer M1*; b) Apalpador montado no bloco

As especificações técnicas mais relevantes do rugosímetro *Mahr Perthometer M1*, encontram-se na Tabela 20.

Tabela 20 – Informações técnicas do rugosímetro *Mahr Perthometer M1*

Velocidade de medição	0,5 mm/s
Alcance de medição	100 ou 150 μm
Resolução do perfil	12 nm
Cutoffs	0,25/0,8/2,5 mm
Filtro	Gaussian
Comprimento de deslocação	1,75/5,6/17,5 mm
Comprimento de amostra	1 – 5 mm
Parâmetros DIN/ISO/ASME	R_a R_z $R_{\text{máx}}$ R_{PC}

A medição da rugosidade da superfície maquinada foi realizada com um *cut-off* de 0,8 mm, e um comprimento de medição de 5,6 mm, que corresponde a sete *cut-offs*, sendo desconsiderados o primeiro e o último segmento de 0,8 mm, devido a erros que podem ser introduzidos no processo de aceleração e desaceleração do apalpador durante a medição.

Após cada ensaio de maquinagem, efetuaram-se um mínimo de cinco medições da rugosidade superficial em ambas as direções mencionadas, e os valores obtidos foram utilizados para calcular o valor médio dos parâmetros medidos.

Na Figura 39 é demonstrado o método de medição da rugosidade superficial da peça maquinada, com montagem longitudinal e transversal.



Figura 39 – a) Apalpador montado longitudinalmente; b) Apalpador montado transversalmente

3.2.5. Análise de desgaste e espessura do revestimento

Limpeza das ferramentas de corte

Antes da realização de qualquer análise SEM, foi necessária a realização de limpeza com álcool etílico a 96% vol., em banho de ultrassons. A limpeza teve uma duração de cerca de 15 minutos. Após a mesma, procedeu-se à secagem das fresas, recorrendo a um secador ou estufa de ar quente, quando disponível, sendo que em alguns casos, deixar secar à temperatura ambiente foi a solução.

Na Figura 40, apresenta-se uma imagem do equipamento *Branson 5200*, que realizou a limpeza das ferramentas da corte.



Figura 40 – Limpeza com álcool etílico em equipamento de ultrassons *Branson 5200*

Após os ensaios de maquinagem e a preparação e limpeza das ferramentas, as fresas foram sujeitas a análise por Microscopia Eletrónica de Varrimento. Dessa forma, foi possível conhecer e quantificar o desgaste das ferramentas de corte.

Preparação da amostra para análise da espessura do revestimento

De forma a ser possível medir a espessura do revestimento das ferramentas de corte, uma fresa revestida foi cortada, recorrendo a uma serra de disco equipada com um disco fino revestido de partículas diamantadas. Posteriormente, a amostra foi embebida em resina termoendurecível e colocada na prensa a quente, permitindo dessa forma obter condições de manuseamento necessárias para o processo de lixamento e polimento da secção transversal da amostra.

De notar que o revestimento exterior da ferramenta é composto maioritariamente por carbono, e sabendo que a resina também é composta por carbono, pode causar dificuldades acrescidas na análise SEM. Foram realizadas análises de espessura em fresas fraturadas por trabalho, em zonas sem desgaste, permitindo aferir a espessura.

Para a execução de uma correta operação do procedimento de lixamento, foram utilizadas lixas de granulometria decrescente, com a seguinte sequência: 220, 500, 800 e 1200 mesh. Após concluído um processo de polimento, as amostras foram rodadas 90°, eliminando as ranhuras criadas na superfície pela lixa de granulometria superior. O processo de polimento permite a eliminação das ranhuras, sendo efetuado primeiramente com abrasivo de diamante de 3 µm de tamanho de grão,

seguido de um polimento com utilização de abrasivo de diamante de 1 μm de tamanho de grão, durante aproximadamente 10 minutos. A Figura 41 apresenta o resultado da preparação da amostra.



Figura 41 – Amostra para análise de espessura SEM

Equipamento de análise SEM

Para a análise do desgaste das ferramentas de corte após a maquinagem e efetuar a medição da espessura do revestimento, foi utilizado um microscópio eletrónico de varrimento. O equipamento utilizado é da marca *Hitachi*, modelo SU3800, e encontra-se instalado no Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, sendo apresentado na Figura 42.

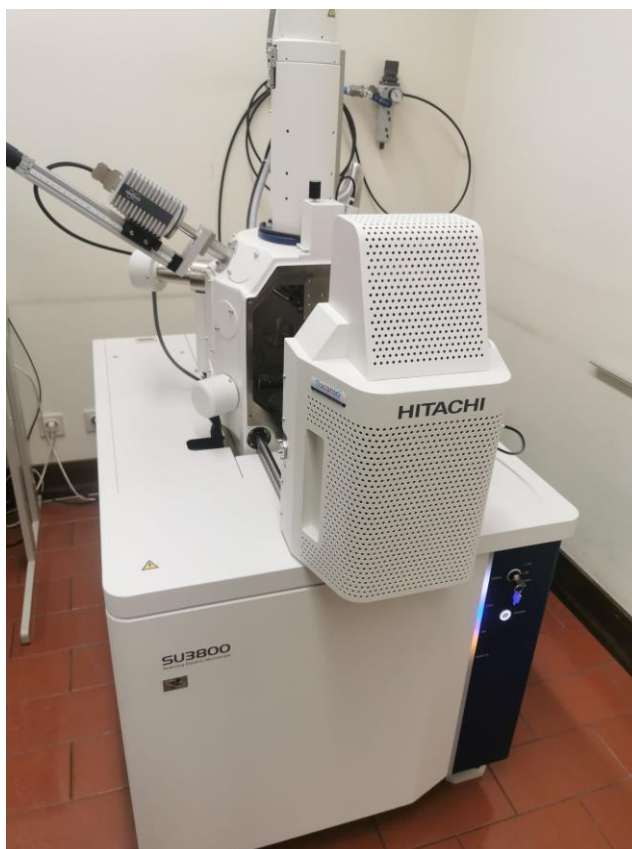


Figura 42 – Microscópio eletrónico de varrimento: *Hitachi* SU3800

As especificações técnicas do SEM *Hitachi*, modelo SU3800 encontram-se na Tabela 21.

Tabela 21 – Especificações técnicas *Hitachi SU3800*

Funções \ Equipamento		SU3800
Resolução do Elétron Secundário (WD = 5 mm, modo de alto vácuo)		3.0 nm com tensão de aceleração 30 kV
		15.0 nm com tensão de aceleração 30 kV
Resolução do Elétron <i>Backscattered</i> (WD = 5 mm, modo de baixo vácuo)		4.0 nm com tensão de aceleração 30 kV
Ampliação		De 5 a 300000 x (ampliação da imagem 127 x 95 mm)
		De 7 a 800000 x (ampliação da imagem 509,8 x 286,7 mm)
Tensão de Aceleração		0.3 kV a 30 kV
Configuração do modo de baixo vácuo		6 a 650 Pa
Deslocamento de imagem		± 75 µm (WD=10 mm)
Tamanho Máximo da Amostra		Ø200 mm
Deslocamento na Amostra	X	0 a 100 mm
	Y	0 a 50 mm
	Z	5 a 65 mm
	Raio	360° modo contínuo
	T	-20 to +90°
	Alcance máximo	Ø130 mm
	Altura máxima	80 mm (WD= 10 mm)
	Motorização	5 Eixos
	Ótica Eletrônica	Canhão de elétrons
Detetores		Detetor de elétrons secundários Detetor de elétrons retroespalhados (<i>backscattered</i>)
WD para análise EDX		WD=10 mm (T.O.A=35°)
Exibição de imagem	Função Alinhamento de eixo	Controle de feixe: automático (AFS→ABA→AFC→ABCC)
		Ajuste do eixo ótico: automático
		Brilho do feixe: automático
	Função de ajuste automático de imagem	Controle automático de brilho e contraste (ABCC)
		Controle de foco automático (AFC)
		Automático estigma e foco (ASF)
		Saturação automática do filamento (AFS)
	Alinhamento automático do feixe (ABA)	
	Início automático (HV-ON→ABCC→AFC)	
Funções Auxiliares de Operação		Rotação <i>raster</i>
		Foco dinâmico
		Função de melhoria de imagem
		Entrada de dados (medição ponto a ponto, medição de ângulo)
		Ampliação predefinida
Funções Opcionais		Função navegação e posicionamento (SEM MAP)
		Função de marcação de feixe
		Detetor ultrasensível de baixo vácuo (UVD)
		Integração EDS
		Espectrometria dispersiva de raios X (Energia - EDS e Comprimento - WDS)

Análise do desgaste das ferramentas de corte

Para a análise das ferramentas de corte, foi necessário criar uma referência como visualizado na Figura 43, onde cada um dos gumes ou navalha de corte é identificada com um número de 1 a 4.

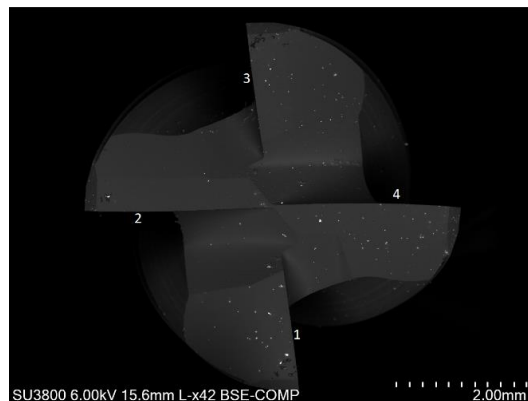


Figura 43 – Numeração das lâminas utilizada na análise das ferramentas

Esta numeração permite uma fácil análise, comentário e identificação das lâminas de corte em estudo. Foram analisadas a face de ataque (*rake face* - RF) e a face de folga (*clearance face* - CF), de forma a analisar os mecanismos de desgaste predominantes, e foi medido o desgaste em todos os gumes, observando as fresas de topo, e segundo a norma ISO 8688-2:01-05-1989.

A norma ISO 8688-2:1989 recomenda analisar a presença de todos os fenômenos de desgaste e adotar como critério de vida aquele que tem maior influência. Assim sendo, foi necessário analisar a influência dos parâmetros de fresagem no tipo de desgaste gerado.

A Figura 44 detalha os tipos de desgaste de flanco (VB1, VB2 e VB3) na aresta de corte de uma ferramenta (ISO, 1989).

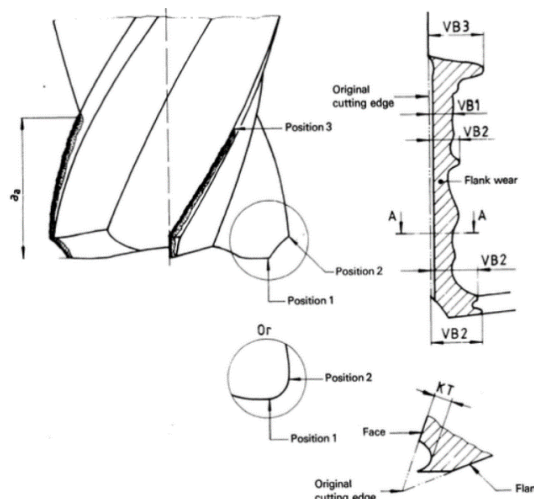


Figura 44 – Tipos de desgaste de flanco em fresas de topo (ISO, 1989)

Dessa forma, pode ser visto na Figura 44 o desgaste.

- VB1 (desgaste de flanco uniforme): desgaste constante e uniforme presente em grande parte do flanco da ferramenta;
- VB2 (desgaste de flanco não uniforme): é o desgaste com largura irregular e que sofre variações dimensionais em cada posição medida em relação à aresta original;

- VB3 (desgaste de flanco localizado): desgaste localizado que ocorre em uma região específica do flanco da ferramenta, correspondendo ao desgaste máximo.

Análise da espessura do revestimento

Para a análise da espessura dos revestimentos depositados nas ferramentas de corte, foi utilizada a amostra preparada, tal como referido na sub-secção 3.2.5. A amostra foi analisada por microscopia eletrónica de varrimento, permitindo dessa forma efetuar as medições da espessura das diferentes camadas do revestimento, assim como caracterizar a composição química do revestimento através da análise por espectroscopia de dispersão de energia - EDS.

Na análise SEM, ajustou-se a gama de ampliação dependendo da zona a medir, permitindo uma melhor análise da morfologia do revestimento. Foi utilizada uma tensão de aceleração do feixe de 15 kV, e usado o detetor de eletrões retrodifundidos (*Backscattered Electron Detector* – BSE).

Relativamente ao procedimento de medição da espessura dos revestimentos, foram realizadas quatro medições, escolhendo zonas desfasadas em 90°.

A amostra foi sujeita a recolha de espectros EDS utilizando uma energia do feixe de 15 keV, uma vez que, com este valor de energia foi possível obter todos os elementos constituintes do revestimento, sem que se verificasse interferência do substrato ou camada adjacente.

3.2.6. Testes efetuados para a caracterização do revestimento das ferramentas de corte

Testes de Adesão

Por forma a avaliar com rigor a adesão do revestimento depositado nas ferramentas de corte ao substrato, foi utilizado um equipamento de indentação de carga deslizante, normalmente designado por “*Scratch Testing*”. Neste ensaio, foi utilizado um indentador com ponta de diamante hemisférica *Rockwell C* com um raio de 0,2 mm, com a aplicação de uma carga linearmente crescente de 5 a 60 N, velocidade de avanço de 10 mm/min, e um incremento de carga de 100 N/min, aplicado numa amostra plana de aço sujeita ao mesmo processo de deposição das ferramentas, de acordo com recomendações da norma EN 1071-3:2005.

O equipamento utilizado encontra-se instalado no Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, e está representado na Figura 45.



Figura 45 – Equipamento “*Scratch Tester*”

Outro método utilizado na avaliação da adesão dos revestimentos, foi o teste de indentação *Rockwell*. Este pode ser realizado seguindo a norma VDI por aplicação de uma carga de 150 kgf com um indentador cónico de diamante, do tipo *Rockwell C*, e posterior observação do comportamento do revestimento no bordo de uma indentação realizada.

Neste ensaio, foi utilizado um durómetro marca EMCO modelo M4U 025 G3, que se encontra instalado no Laboratório de Ensaios Tecnológicos do Instituto Superior de Engenharia do Porto, e está representado na Figura 46.



Figura 46 – Durómetro marca EMCO modelo M4U 025 G3

Avaliação das cargas críticas de adesão/observação das marcas induzidas pelos ensaios de adesão

As marcas originadas pelos equipamentos que foram utilizados para caracterizar a adesão do revestimento ao substrato foram observadas através da utilização de um microscópio ótico e uma lupa metalográfica, modelo BX51M e SZ60, respetivamente, de marca OLYMPUS. Ambos os equipamentos estão equipados com um sistema de aquisição e registo de imagem em formato digital, encontrando-se instalados no Laboratório de Metalografia do Instituto Superior de Engenharia do Porto, e que se apresentam na Figura 47 a) e b).

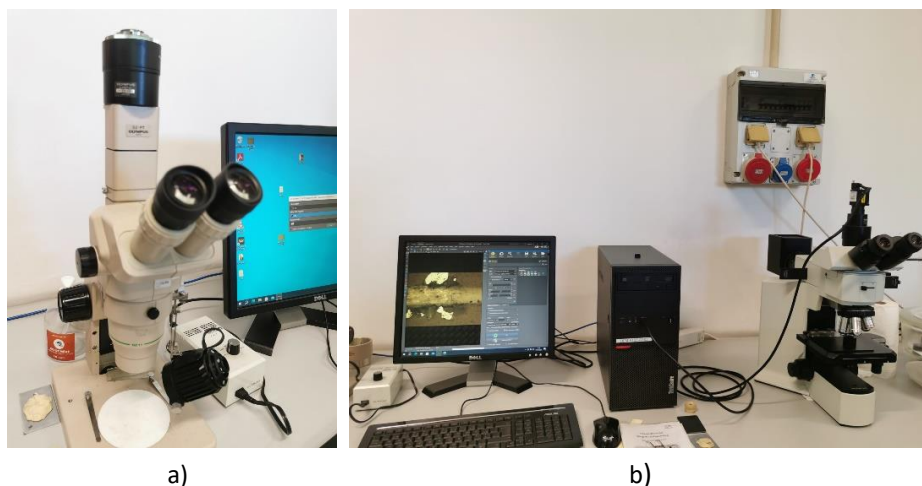


Figura 47 – a) Lupa metalográfica modelo SZ60; b) Microscópio ótico modelo BX51M

Medição da Dureza e Módulo de Elasticidade

Para determinar com rigor a dureza e módulo de elasticidade dos revestimentos, foi utilizado um nanoindentómetro, de marca *NanoTest Micro Materials*, equipado com indentador de diamante *Berkovich*, aplicado em amostras planas de silício, sujeitas ao mesmo processo de deposição das ferramentas de corte. O equipamento em questão permite a medição da dureza de filmes finos até 50 nm de espessura, e encontra-se instalado no Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Para evitar a influência do substrato nos resultados, a profundidade de indentação foi mantida abaixo de 10% da espessura total dos revestimentos. A carga aplicada foi de 15 mN, e realizaram-se 16 medições por cada amostra, assegurando maior assertividade nos valores determinados.

Na Figura 48, podemos ver o aspeto geral deste equipamento.

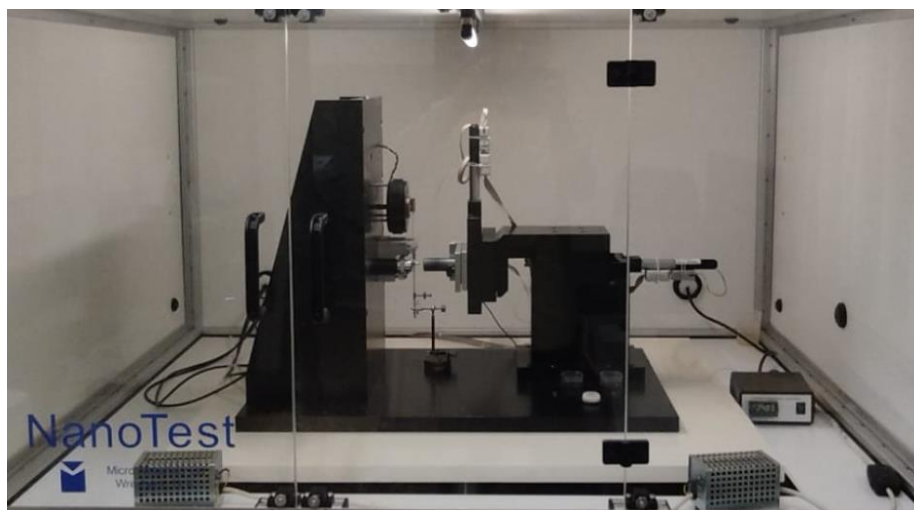


Figura 48 – Equipamento de Nanoindentação *NanoTest Micro Materials*

3.2.7. Análise morfologia em secção transversal e superfície

Para avaliar a morfologia (secção transversal e superfície) dos revestimentos depositados, foram analisadas amostras planas de silício sujeitas ao mesmo processo de deposição das ferramentas, através de um microscópio de alta resolução *ZEISS Merlin* (FEG-SEM), equipado com módulo EDS da empresa *Oxford Instruments*, que permitiu avaliar a sua composição química.

O equipamento em questão encontra-se instalado no Laboratório de Ensaios, Desgaste e Materiais do Instituto Pedro Nunes em Coimbra.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, vão ser apresentados os principais resultados obtidos, designadamente: caracterização do revestimento, análise da rugosidade da superfície maquinada e análise do desgaste das ferramentas.

Complementarmente, irão ser identificados, os mecanismos de desgaste para todas as ferramentas e condições de ensaio. Posteriormente, vai ser realizada uma comparação e discussão destes resultados, determinando o tipo de ferramenta que sofre menos desgaste e que produz uma melhor rugosidade superficial na peça.

Este capítulo, será concluído realizando uma comparação dos resultados com trabalhos realizados anteriormente.

4.1. Caracterização do revestimento

4.1.1. Espessura e estrutura do revestimento

Para a medição e análise da espessura do revestimento de dupla camada, foi utilizada a técnica de Microscopia Eletrónica de Varrimento (SEM), após a realização do procedimento indicado no subcapítulo 3.2.5.

Na Figura 49 apresenta-se a morfologia do revestimento observado em SEM. Tal como esperado, é visível que o revestimento depositado apresenta uma estrutura com dupla camada, observando-se duas camadas principais de TiAlN e DLC, contendo entre elas uma camada de transição. É ainda possível observar a presença de uma camada de adesão Ti junto ao substrato (ver Figura 49 a). Foram realizadas diferentes medições de espessura, de cada camada, em diversos locais da amostra, permitindo obter a espessura média das camadas. Uma das medições efetuadas pode ser observada na Figura 49 b).

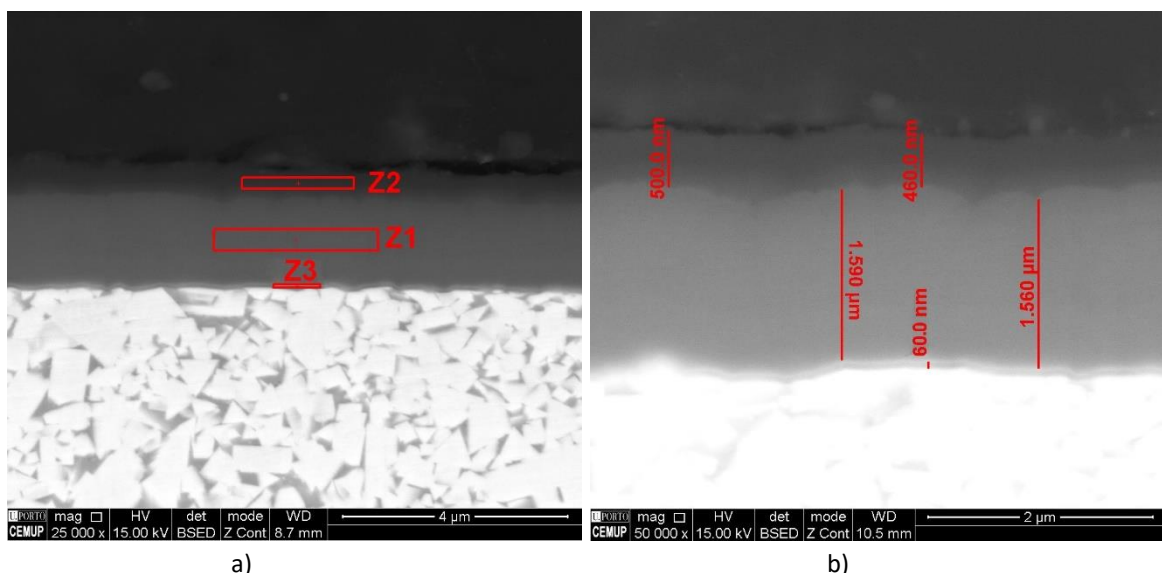


Figura 49 – Caracterização do revestimento: a) identificação das diferentes camadas (Z1 – TiAlN, Z2 – DLC, Z3 – Ti); b) medição da espessura do revestimento

Como se pode constatar na Figura 49 a), as duas camadas do revestimento não têm uma transição abrupta entre elas, sendo difícil de identificar com exatidão onde existem os limites e transições entre camadas. Esta camada de gradiente é depositada entre camadas para permitir atenuar tensões residuais entre camadas, originadas pela diferença da composição química entre o DLC e TiAlN, e ajudar na coesão entre camadas. A camada de Ti, inicialmente aplicada no substrato, promove a nucleação e o crescimento do revestimento, aumentando a adesão entre o revestimento e o substrato, evitando possíveis fenômenos de delaminação quando o revestimento se encontra sujeito a maiores tensões e esforços aplicados.

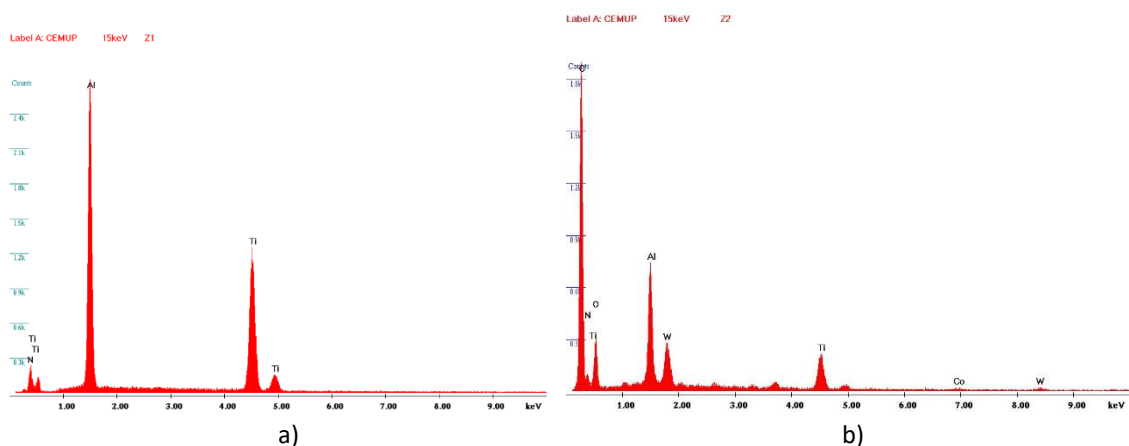
Na Tabela 22, é apresentada a espessura média do revestimento para cada camada, e a sua respetiva composição química (identificada por zona, de acordo com a Figura 49 a)). Para a determinação da espessura das camadas Z1 e Z2, foi considerada uma zona intermédia, tendo em conta a existência de transição gradiente.

Tabela 22 – Valores médios da medição da espessura e composição das camadas

Camada	Espessura [μm]	Composição
Z1	1.589 \pm 0.032	TiAlN
Z2	0.495 \pm 0.019	DLC
Z3	0.060 \pm 0.007	Ti

A camada inicial de adesão de Ti metálico funciona como um elemento de ligação/transição entre o substrato e a camada TiAlN. Desta forma, foi possível evitar a delaminação completa de todo o revestimento por falha da adesão entre o mesmo e o substrato, possibilitando ainda uma melhor taxa de crescimento do revestimento. Apesar da sua espessura muito reduzida, na ordem dos 60 nm, trata-se de um elemento fundamental para a durabilidade do revestimento. A camada TiAlN representa cerca de 75% da espessura do revestimento, conferindo propriedades como elevada resistência mecânica e baixa propagação de fissuras. A transição gradiente para a camada exterior de DLC, minimiza as tensões criadas pela alteração da composição química, que poderiam levar à descoesão prematura entre camadas, e incrementa a resistência à propagação de fendas. A camada de DLC atua como um lubrificante sólido, reduzindo o atrito durante o processo de maquinagem.

Cada uma das camadas e o substrato, foram submetidas a análises EDS, obtendo-se dessa forma a respetiva composição química. Os espectros EDS podem ser observados na Figura 50.



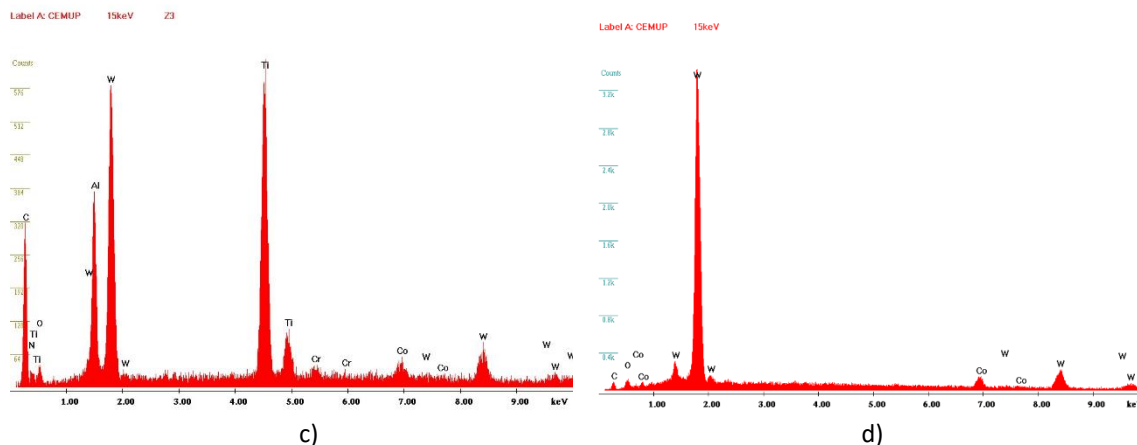


Figura 50 – Espetros EDS para as diferentes zonas da Figura 49: a) Z1; b) Z2; c) Z3 d) Substrato

No espectro representado na Figura 50 a) foi possível identificar os elementos constituintes da camada Z1, sendo identificados com clareza os elementos Ti, Al e N, correspondendo à camada de TiAlN. O elemento detetado em maior concentração foi o Alumínio. Considerando o tipo de deposição que foi realizada, com variações de elementos e transição gradiente que origina variações na quantidade dos elementos, outra posição dentro da mesma zona poderia apresentar uma diferente proporção entre elementos.

Na Figura 50 b) é perfeitamente perceptível que o carbono é o elemento em maior quantidade, na camada superior, tal como seria suposto, visto que estamos perante a zona do revestimento DLC. É ainda possível identificar a presença de elementos como Ti, Al e N, referentes à transição gradiente. Mesmo que não existisse transição gradiente, era natural a presença dos mesmos, visto que apesar de existir uma grande precisão na aplicação da técnica EDS, ocorre a interação de elementos na proximidade da zona analisada, podendo ser essa a razão, em conjunto com uma falha de revestimento, a origem da deteção de tungsténio na análise realizada à superfície.

Como é possível observar na Figura 50 c), referente à zona de transição entre o substrato e a primeira camada de TiAlN, para além do Titânio, que naturalmente é o elemento com maior expressividade nesta zona, foram detetados todos os elementos que compõem a camada de TiAlN, o Carboneto de Tungsténio e o Cobalto, que funciona como elemento aglutinante.

No espectro representado na Figura 50 d), foram detetados novamente os elementos referentes ao substrato, sendo detetado com uma grande representatividade o Tungsténio, assim como os elementos Cobalto e Carbono, estes em menor quantidade, já detetados anteriormente na Figura 50 c).

4.1.2. Morfologia da secção transversal e da superfície do revestimento

A morfologia do revestimento em secção transversal e da superfície apresentam-se na Figura 51. O revestimento apresenta uma morfologia colunar, sendo que este tipo de morfologia é característico de revestimentos depositados por PVD utilizando uma fonte de potência de corrente contínua.

Superficialmente, o revestimento apresenta uma topografia lembrando uma couve flor, que correspondem ao topo das colunas observadas em secção transversal. Na secção transversal, é possível observar a existência de uma primeira camada fina para ligação ao substrato de Ti. A

mesma faz ligação entre o substrato e a camada de TiAlN, finalizando com transição gradiente para uma camada de acabamento de DLC, corroborando a informação apresentada pelas análises SEM e EDS.

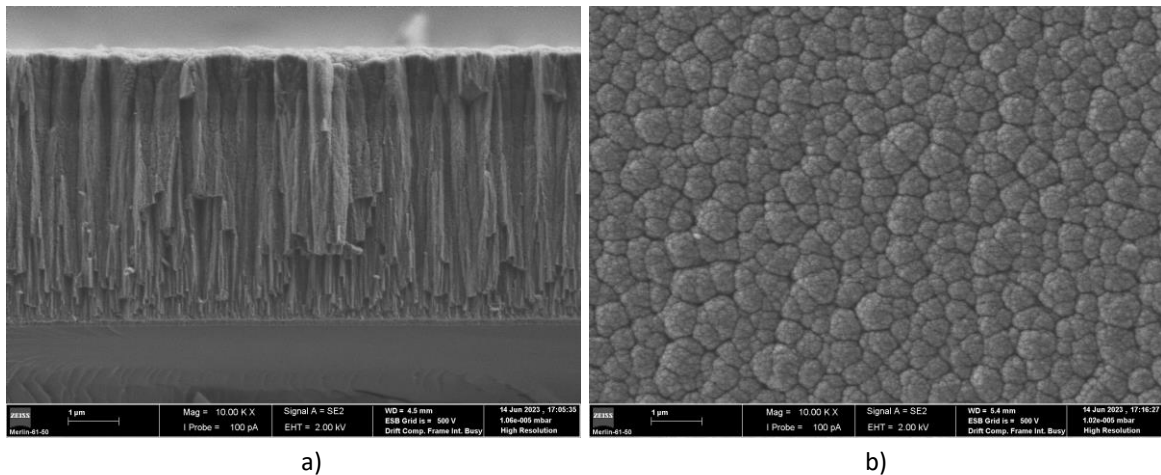


Figura 51 – Morfologia do revestimento: a) Secção transversal; b) Superfície

4.1.3. Composição química do revestimento

As composições químicas do revestimento, obtidas por EDS em secção transversal e superfície, são apresentadas na Figura 52. É possível verificar os elementos metálicos presentes no revestimento produzido, sendo que na Figura 52 a) apresenta uma percentagem 16.4% (em peso) de Silício referente à amostra plana, 11.4% de Titânio, referente à camada de adesão (Ti) camada intermedia e gradiente (TiAlN), e também se pode encontrar 24.9% de Azoto e 10.4% de Alumínio, assim como 33.7% de Carbono referentes à camada superficial. Quando verificada a composição química da superfície, é possível verificar a presença de 74.8% de Carbono referente ao revestimento de DLC.

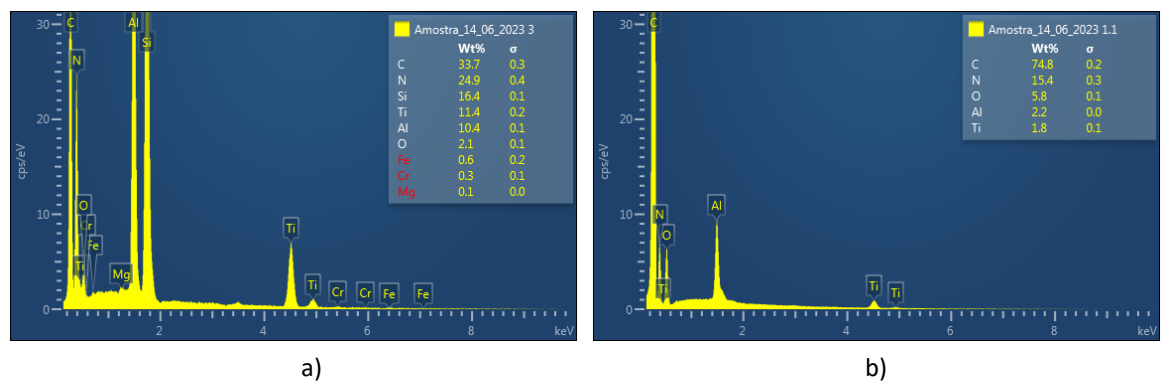


Figura 52 – Composições químicas dos revestimentos: a) Secção transversal; b) Superfície

Também foram detetados elementos, com representatividade residual como Ferro, Crómio, Magnésio e Oxigénio, como é possível verificar na Figura 52 a), fazendo esses elementos parte da constituição da composição química do substrato.

Para melhor compreender a distribuição dos elementos químicos no revestimento, foram obtidos os mapas de distribuição elementar dos diferentes elementos (ver Figura 53).

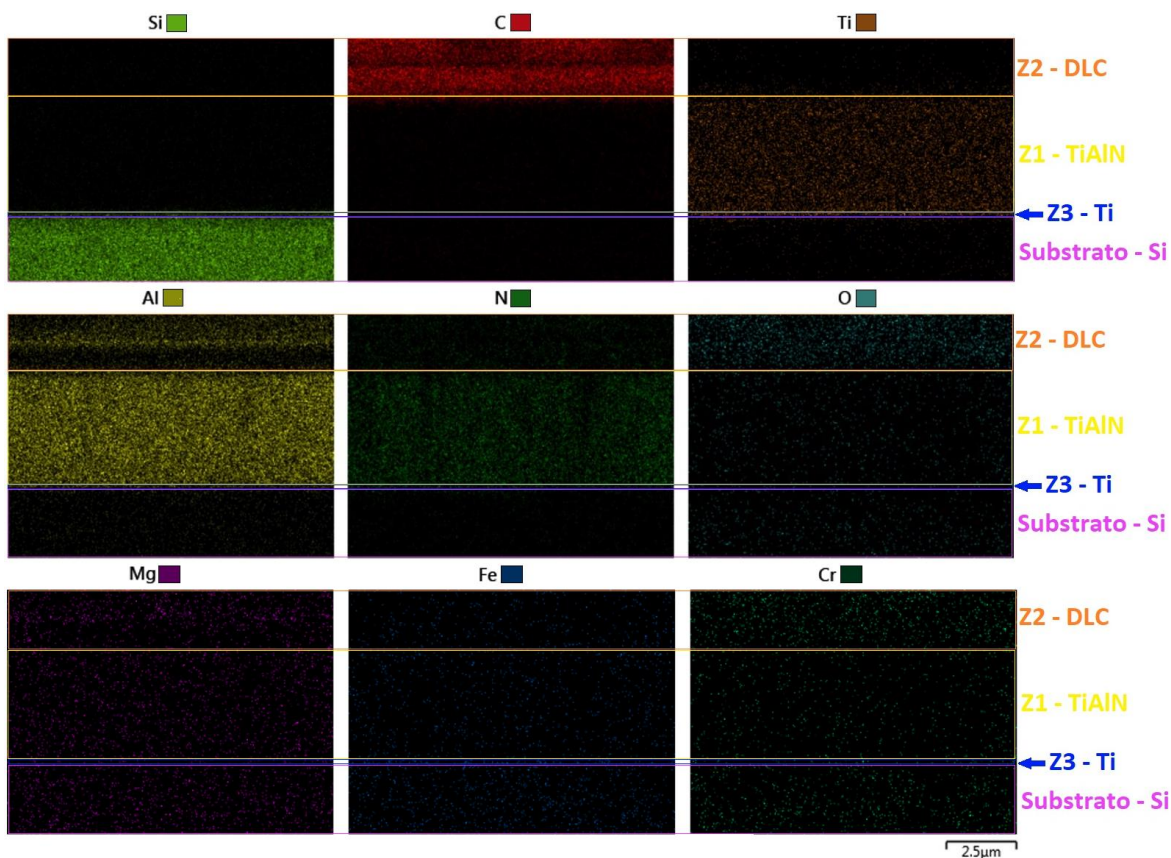


Figura 53 – Mapas de distribuição elemental dos elementos químicos mais significativos obtidos em secção transversal

Nos mapas de distribuição elemental apresentados na Figura 53, foi possível identificar as diferentes zonas anteriormente indicadas. Para a execução da análise, foi realizada a deposição num substrato de Silício, sendo que na zona referente ao substrato apenas foi detetada elevada presença de Si, com concentração residual de Oxigénio.

Na camada de adesão, designada por Z3, para além de detetada a presença predominante de Titânio, foi detetada também a presença de Silício e Alumínio, visto serem elementos com presença na proximidade, e se tratar de uma camada com espessura muito reduzida.

Na zona prevista da camada TiAlN, designada anteriormente por Z1, é notória a elevada presença de Alumínio, Azoto e Titânio, assim como era expectável. Foi também notória uma diminuição da quantidade de Oxigénio presente nesta zona.

Na zona da camada de DLC, é possível identificar uma predominância de Carbono, assim como Alumínio, com menor representatividade, mas ainda assim com alguma importância. Verifica-se ainda o aumento da presença de Oxigénio, Titânio e Azoto, com representação residual. No entanto, foi possível detetar uma ligeira descontinuidade na zona central desta camada, que corresponde exactamente a um aumento da incidência de Alumínio.

Elementos químicos como Ferro, Crómio e Magnésio, apesar da sua baixa representatividade, como foi possível verificar na Figura 52 a), encontram-se distribuídos de uma forma praticamente uniforme por toda a secção transversal em análise.

4.1.4. Propriedades mecânicas do revestimento

A avaliação da dureza e do módulo de elasticidade do revestimento utilizado nas ferramentas de corte foi efetuada pelo método de nanoindentação, visto ser o mais adequado devido ao facto do revestimento apresentar espessura aproximada de 2.0 μm , o que corresponde a profundidades de indentação de aproximadamente 200 nm. Dessa forma, é possível minimizar a influência do substrato na determinação das duas propriedades mecânicas referidas. De facto, a profundidade de indentação não deve exceder 10% da espessura dos filmes, como já foi referido anteriormente. Os resultados obtidos no ensaio de nanoindentação podem ser observados na Figura 54.

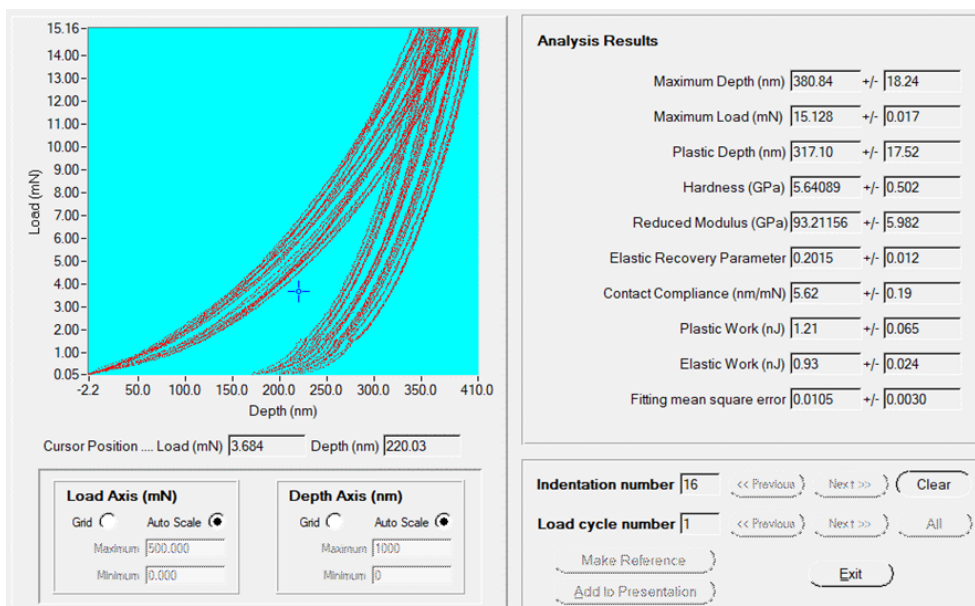


Figura 54 – Resultados obtidos no ensaio de nanoindentação

Tabela 23 – Propriedades mecânicas dos revestimentos

Propriedades	Valor	Unidades
Dureza (H)	5.641 ± 0.502	GPa
Módulo de Elasticidade (E_r)	93.212 ± 5.982	GPa
Rácio D/E_r	0.061	-
Rácio D^3/E_r^2	0.021	-

O reduzido valor de dureza do revestimento (5.6 GPa) deve-se ao facto da camada exterior de DLC exibir uma estrutura formada por átomos de carbono com ligações essencialmente do tipo sp^2 , semelhantes à ligação característica da grafite, que originam um reduzido coeficiente de atrito, conferindo à ferramenta propriedades lubrificantes. O valor de dureza apresentado pelo revestimento foi inferior a resultados anteriormente divulgados em outros trabalhos realizados por diversos investigadores ((Vercammen et al., 2000),(Santos et al., 2007)), que apresentam valores de dureza que variam entre 10.0 e 30.0 GPa para os diferentes tipos de DLC.

O baixo valor da dureza deste revestimento pode estar relacionado com os parâmetros de deposição, considerando que: a razão de gases usados na deposição, a pressão de deposição, as potências aplicadas aos alvos, a voltagem aplicada ao substrato, as distâncias dos substratos aos alvos, entre outros, levam à obtenção de revestimentos com propriedades distintas.

O comportamento ao desgaste dos revestimentos é influenciado pelo rácio entre a dureza e o módulo de elasticidade. Dessa forma, e para se conseguir ter uma boa resistência do revestimento, são essenciais um valor elevado de dureza e um reduzido módulo de elasticidade. O referido rácio apresentou um valor relativamente baixo, particularmente influenciado pelo baixo valor de dureza.

A resistência que o revestimento oferece à deformação plástica é diretamente proporcional ao valor obtido pelo rácio entre a dureza e o módulo de elasticidade (D^3/E_r^2). Assim, reduzido módulo de elasticidade e elevada dureza, originam elevada resistência à deformação plástica e garantem uma maior resistência ao desgaste adesivo e abrasivo dos revestimentos.

Estes critérios têm sido utilizados por diversos autores, visto se tratar de relações adequadas para realizar a previsão da resistência ao desgaste.

4.1.5. Avaliação da adesão do revestimento

Os testes de indentação de carga deslizante (“*Scratch Test*”) e o teste de indentação *Rockwell* (VDI), permitem a avaliação da adesão do revestimento estudado.

Para a análise e avaliação da adesão do revestimento, os testes foram realizados na amostra plana de aço, de forma a permitir que o deslizamento e a indentação sejam realizados perpendicularmente à superfície. Foram executados três ensaios na amostra, de forma a evitar possíveis erros devido a falhas do revestimento. Após os ensaios, a amostra foi analisada por microscopia ótica e comparada com padrões apresentados na Figura 22. Observando os sulcos, foi calculada a relação entre o incremento de carga e a distância total percorrida. Desta forma, e após a identificação visual do local onde existe a primeira falha coesiva (F_{C1}) e/ou adesiva (F_{C2}), foi possível calcular qual o valor da carga aplicada. É importante referir que as falhas coesivas se verificam ao nível do revestimento, enquanto as falhas adesivas, para valores superiores de carga, dão-se entre o revestimento e o substrato.

A norma EN 1071-3:2005, indica que as cargas críticas correspondentes à ocorrência dos mecanismos de falha, dependem das propriedades do revestimento e do substrato, tais como: a dureza, rugosidade e a espessura (particularmente importantes no revestimento). Mas as cargas críticas não dependem apenas da adesão entre o revestimento e o substrato, estando diretamente relacionadas com outros parâmetros, tais como: a velocidade de translação da mesa, o desgaste do indentador e a carga aplicada.

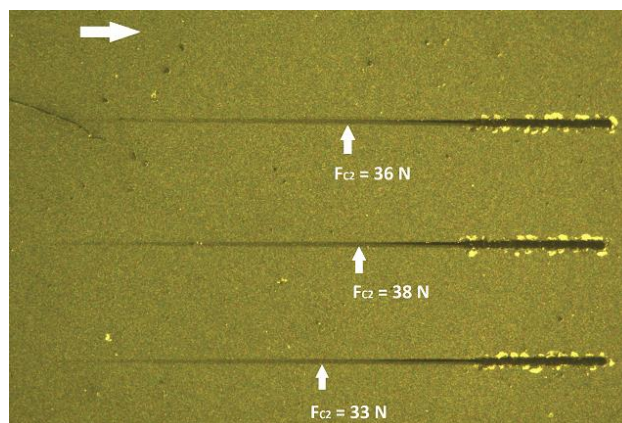


Figura 55 – Resultados obtidos na análise do ensaio de deslizamento

Tabela 24 – Valor médio da carga crítica

Tipo de Falha	Valor	Unidades
F_{C2}	$35,67 \pm 2,67$	N

Na Figura 55 estão apresentados os valores das cargas críticas adesivas (F_{C2}) referentes aos três ensaios realizados, calculados com base na média aritmética dos valores. O resultado está apresentado na Tabela 24, não sendo detetadas quaisquer falhas coesivas

Por norma, é verificada uma relação direta entre a dureza do revestimento (H) e a carga crítica (F_C), sendo o valor da carga crítica numericamente aproximado ao valor da dureza do revestimento. No entanto, em revestimentos como é o caso do DLC, rico em Carbono sob a forma de grafite, este atua como lubrificante sólido, reduzindo desta forma o atrito no revestimento, não sendo então verificada esta relação.

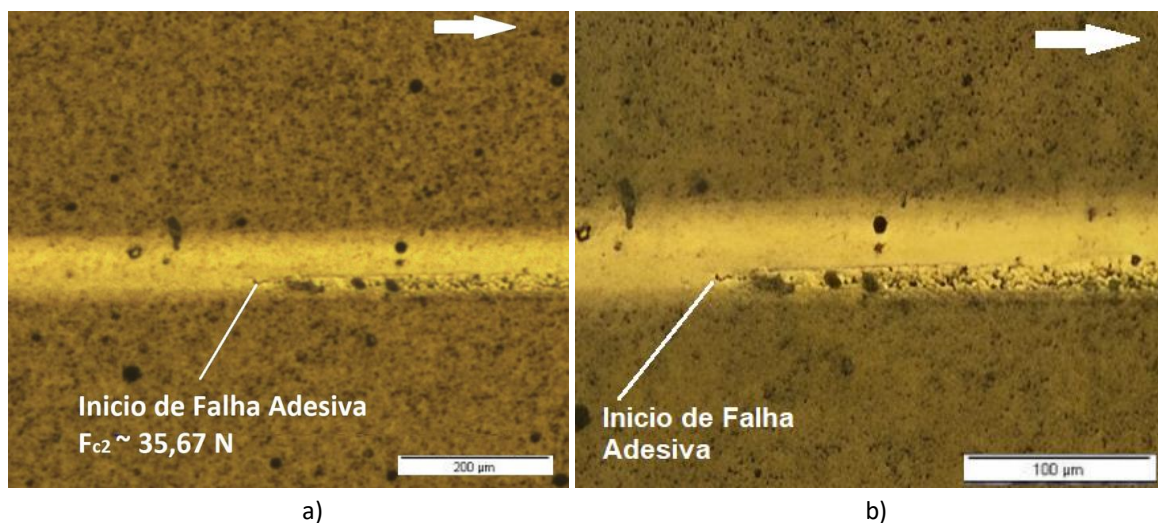


Figura 56 – a) Início de falha adesiva F_{C2} do revestimento com ampliação 100x; b) Transição para falha completa do revestimento com ampliação 200x

Como é possível observar na Figura 56, o valor da falha adesiva ocorre por volta dos 35 N. Iniciando-se o fenómeno de falha adesiva do revestimento superficial, estas tendem a aumentar à medida que a carga aplicada aumenta, sendo que este fenómeno consiste no arrancamento de porções de revestimento, culminando em falha catastrófica com exposição do substrato.

Outro dos métodos utilizado na avaliação da adesão, foi o teste de indentação *Rockwell*. Esta análise, conforme já foi referido anteriormente na revisão bibliográfica e métodos e equipamentos, baseia-se na observação do comportamento do revestimento no bordo de uma indentação quando sujeito a uma carga 150 kgf, aplicada no durómetro da marca ECMO, equipado com um indentedor cónico de diamante (escala C).

Após a realização de três indentações na amostra plana, as crateras produzidas foram observadas por microscopia ótica, para ampliações de 100x, de forma a analisar pormenorizadamente o bordo da indentação, para verificar a adesão do filme ao substrato e compará-lo com a Figura 23 ,que permite caracterizar as falhas segundo a norma VDI 3198:1991, e indicar se o comportamento do revestimento é ou não aceitável.

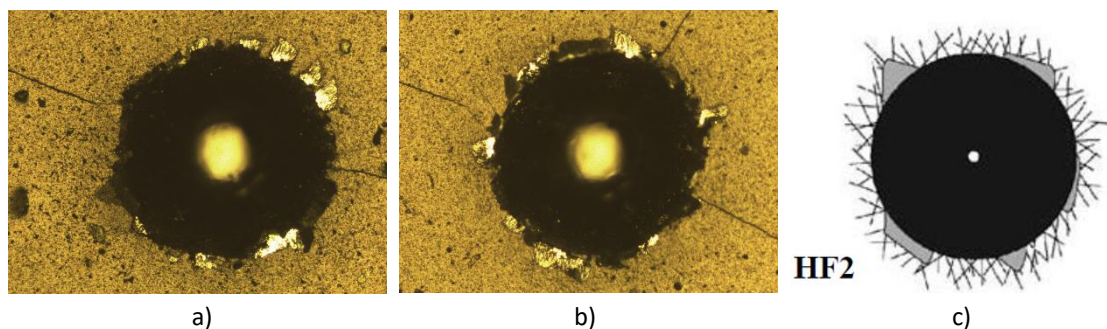


Figura 57 – a) 1ª Indentação efetuada com um indentador *Rockwell C*, com ampliação 100x; b) 3ª Indentação efetuada com um indentador *Rockwell C*, com ampliação 100x; c) Falha HF2, aceitável, segundo a norma VDI 3198:1991

Segundo o que é possível verificar na Figura 57 a) e b), em ambos os ensaios, são visíveis fissuras radiais, de baixa amplitude, distribuídas de forma aleatória pelo bordo da indentação, causadas pela deformação do substrato devido à carga aplicada, que levou ao deslocamento do revestimento, conduzindo a fissuração circunferencial e longitudinal que se propaga ao longo do revestimento. Nas Figura 57 a) e b), também existem pequenas falhas adesivas do revestimento espalhadas pelo bordo do revestimento, que indicam que em alguns dos casos a carga aplicada levou a delaminação do revestimento. Deste modo, é possível classificar o padrão de fissuração encontrado como do tipo HF2. Esta falha é classificada como aceitável, de acordo com a Norma VDI 3198: 1991.

4.2. Análise da rugosidade da superfície maquinada

Nesta secção, são apresentados os resultados de rugosidade da superfície da peça maquinada para cada condição avaliada. O método de avaliação da rugosidade da superfície está descrito no subcapítulo 3.2.4. Na Tabela 25, são apresentados os valores médios de R_a transversal, longitudinal e global.

Tabela 25 – Valores médios da rugosidade da superfície registados para condições da 1ª fase

Referência	R_a Transversal [μm]	R_a Longitudinal [μm]	R_a Global [μm]
N1T0L18F750V126	0.4246 \pm 0.0322	0.2970 \pm 0.0408	0.3608
N2T0L36F750V126	0.5290 \pm 0.0395	0.3066 \pm 0.0424	0.4178
N3T0L48F750V126	0.6358 \pm 0.0459	0.3334 \pm 0.0699	0.4846
N4T0L18F1500V126	0.7992 \pm 0.0593	0.8212 \pm 0.0512	0.8102
N5T0L36F1500V126	0.9508 \pm 0.0372	1.1426 \pm 0.0749	1.0467
N6T0L48F1500V126	1.1522 \pm 0.0486	1.2626 \pm 0.1649	1.2074
N7T1L18F750V126	0.3416 \pm 0.0552	0.2040 \pm 0.0384	0.2728
N8T1L36F750V126	0.4750 \pm 0.0541	0.2232 \pm 0.0586	0.3491
N9T1L48F750V126	0.5054 \pm 0.0229	0.2690 \pm 0.0380	0.3872
N10T1L18F1500V126	0.7700 \pm 0.0595	0.5038 \pm 0.0820	0.6369
N11T1L36F1500V126	0.8624 \pm 0.0375	0.5846 \pm 0.0552	0.7235
N12T1L48F1500V126	0.9426 \pm 0.0494	0.6142 \pm 0.0548	0.7784

Estes valores são apresentados como gráficos de superfície na Figura 58 e Figura 59, para avaliar a variação do valor da rugosidade superficial global em relação às condições de cada ensaio de maquinagem, permitindo com uma rápida análise visual verificar a grande diferença entre os valores de rugosidade da superfície, entre as ferramentas revestidas e as não revestidas. Estes

gráficos podem funcionar como uma ferramenta útil, permitindo escolher rapidamente parâmetros de corte para determinado acabamento superficial. Assim, é possível verificar que uma ferramenta revestida, com uma velocidade de avanço de 750 mm/min e velocidade de corte 126 m/min, permite realizar comprimento de corte até 48 m, obtendo uma rugosidade superficial inferior a 0.4 μm . Por outro lado, com uma ferramenta sem revestimento, esse valor será atingido logo ao fim de cerca de 25 m.

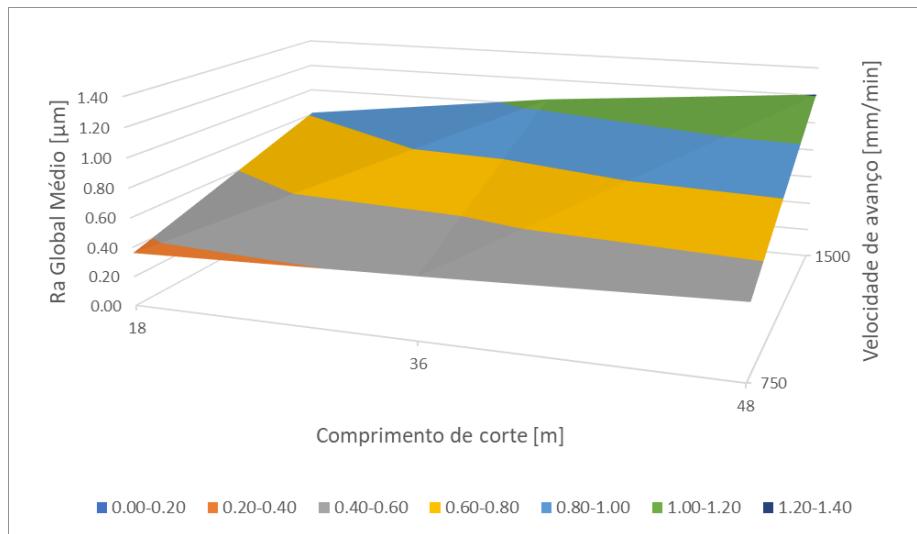


Figura 58 – Gráfico de superfície da rugosidade da superfície maquinada produzida pelas ferramentas não revestidas para as condições da 1ª fase de teste

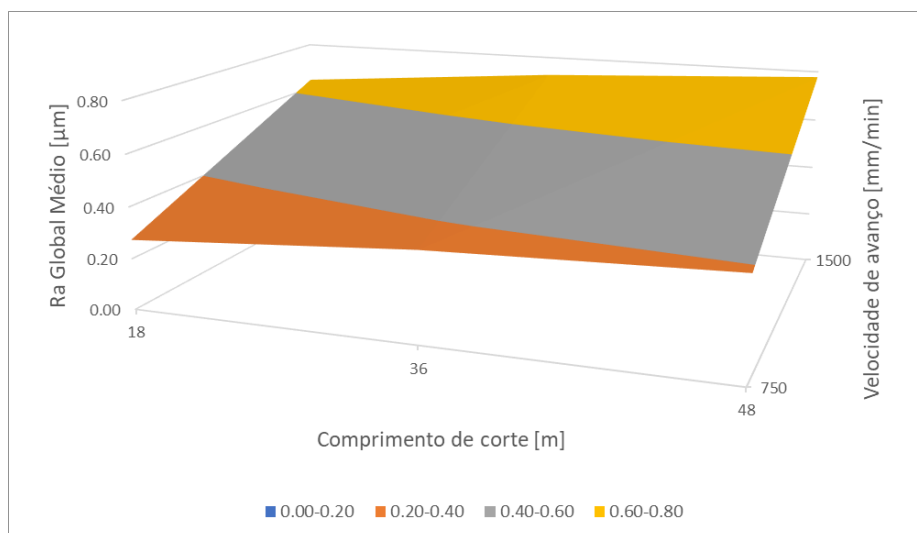


Figura 59 – Gráfico de superfície da rugosidade da superfície maquinada produzida pelas ferramentas revestidas para as condições da 1ª fase de teste

Como é possível observar nos gráficos da Figura 58, da Figura 59 e Tabela 25 anteriormente apresentados, os valores de rugosidade superficial tendem a aumentar, tal como era expectável, para comprimentos de corte e velocidades de avanço mais elevados. Para a condição da velocidade de avanço de 1500 mm/min, os valores da rugosidade da superfície são os mais elevados, independentemente da existência ou não de revestimento nas ferramentas, sendo que de uma forma geral, o revestimento permite um acabamento superficial de melhor qualidade.

Tabela 26 – Diferença percentual do acabamento superficial com iguais parâmetros de maquinagem

Não revestida vs. Revestida	R _a Transversal [%]	R _a Longitudinal [%]	R _a Global [%]
N1TOL18F750V126 vs N7T1L18F750V126	20%	31%	25%
N2TOL36F750V126 vs N8T1L36F750V126	10%	27%	19%
N3TOL48F750V126 vs N9T1L48F750V126	21%	19%	20%
N4TOL18F1500V126 vs N10T1L18F1500V126	4%	39%	21%
N5TOL36F1500V126 vs N11T1L36F1500V126	9%	49%	29%
N6TOL48F1500V126 vs N12T1L48F1500V126	18%	51%	35%
Diferença Global	14%	36%	25%

Foi possível verificar na Tabela 26 que os valores mais baixos da rugosidade foram detetados para as ferramentas revestidas, sendo globalmente inferiores em cerca de 25%. No entanto, se analisarmos apenas a rugosidade longitudinal, a diferença sobe para 36%. Mas existe uma tendência de maior diferença de rugosidade entre ferramentas revestidas e não revestidas nas leituras realizadas longitudinalmente, à medida que o comprimento de corte aumenta, sendo essa diferença cerca de 51% para o comprimento de corte de 48 m, com iguais condições de ensaio, podendo dessa forma afirmar-se que o revestimento permite prolongar o tempo de vida da ferramenta revestida.

Considerando o exposto anteriormente, foi possível verificar em todos os ensaios, que as ferramentas revestidas produziram um melhor acabamento superficial na peça maquinada, quando comparado com a ferramenta não revestida.

A Figura 60 apresenta um gráfico de barras comparando a rugosidade da superfície de ambas as ferramentas para cada uma das condições de corte testadas.

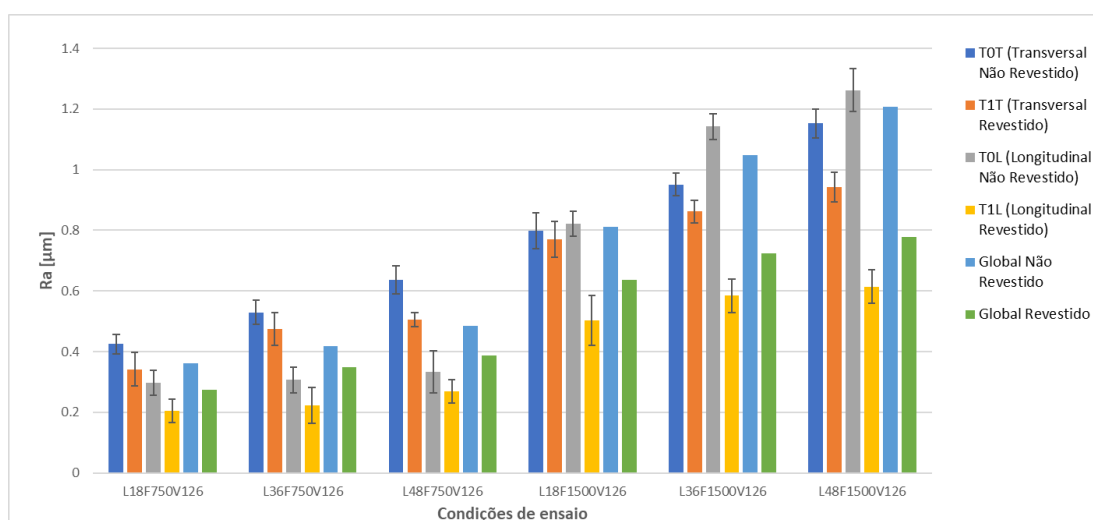


Figura 60 – Comparação dos valores da rugosidade superficial transversal, longitudinal e global das ferramentas não revestidas e revestidas para cada uma das condições de ensaio da 1ª fase

Numa tentativa de reduzir a rugosidade superficial da peça maquinada e de aumentar o tempo de vida da ferramenta, foram ajustados os parâmetros de maquinagem às condições limite do fabricante, de forma a minimizar a fratura nas ferramentas de corte. A situação descrita ocorreu frequentemente nos primeiros ensaios, onde foi comum a fratura de todas as ferramentas testadas. Assim, e seguindo os parâmetros definidos na Tabela 19, foi reduzida a velocidade de corte e

velocidade de avanço, para verificar a melhoria obtida na qualidade da superfície maquinada, assim como no desgaste da ferramenta.

Os ensaios foram realizados, para ferramentas revestidas e não revestidas, a 715 mm/min de velocidade de avanço, 117 m/min de velocidade de corte, e com uma profundidade de corte radial de 3,6 mm, realizando ensaios com 18, 36, 48 e 72 metros de comprimento de corte. Estes ensaios também permitem perceber o comportamento da rugosidade superficial desde o início do ensaio, até se ter atingido 72 metros de comprimento de corte. Também foram realizados ensaios com 1500 mm/min de velocidade de avanço, 188 m/min de velocidade de corte e com uma profundidade de corte radial de 3,6 mm, realizando ensaios com 18 e 36 metros de comprimento de corte, permitindo obter resultados para velocidades de corte superiores.

Tabela 27 – Valores médios da rugosidade da superfície registados para condições da 2ª fase

Referência	R _a Transversal [μm]	R _a Longitudinal [μm]	R _a Global [μm]
N13T0L18F715V117	0.4996 ± 0.0198	0.2284 ± 0.0148	0.3640
N14T0L36F715V117	0.5132 ± 0.0545	0.2482 ± 0.0291	0.3807
N15T0L48F715V117	0.5142 ± 0.0331	0.2610 ± 0.0341	0.3876
N16T0L72F715V117	0.6360 ± 0.0716	0.2996 ± 0.0520	0.4678
N17T1L18F715V117	0.3410 ± 0.0356	0.2058 ± 0.0115	0.2734
N18T1L36F715V117	0.3880 ± 0.0197	0.2152 ± 0.0202	0.3016
N19T1L48F715V117	0.4404 ± 0.0224	0.2196 ± 0.0240	0.3300
N20T1L72F715V117	0.4994 ± 0.0455	0.2482 ± 0.0231	0.3738
N21T0L18F1500V188	0.7182 ± 0.0445	0.6254 ± 0.0504	0.6718
N22T0L36F1500V188	1.0800 ± 0.0302	1.0538 ± 0.0601	1.0667
N23T1L18F1500V188	0.5418 ± 0.0217	0.3789 ± 0.0469	0.4608
N24T1L36F1500V188	0.6186 ± 0.0269	0.4078 ± 0.0319	0.5132

Na Figura 61, pode ser observada a evolução da rugosidade superficial transversal, longitudinal e global, tanto para ferramentas revestidas como não revestidas.

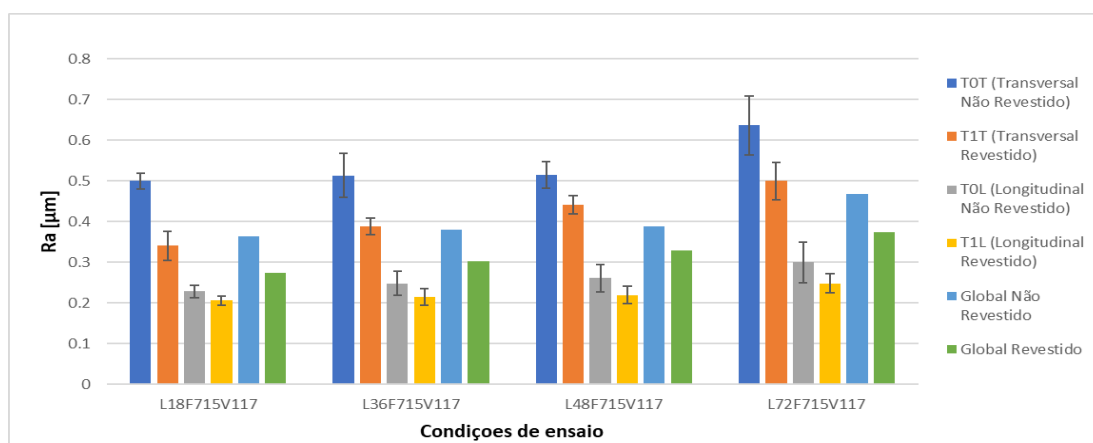


Figura 61 – Comparação dos valores da rugosidade superficial transversal, longitudinal e global para ferramentas não revestidas e revestidas para condições de ensaio fabricante da 2ª fase

Como se pode observar na Figura 61, a ferramenta revestida induz menores valores de rugosidade superficial. Ambas as ferramentas provocam na peça maquinada, um acabamento superficial similar, porém, são as ferramentas revestidas que produzem superfícies com menor rugosidade. A obtenção do acabamento de melhor qualidade passaria pela redução da velocidade de corte e

velocidade de avanço. Contudo, os valores globais da rugosidade superficial obtidos utilizando uma velocidade de avanço de 715 mm/min, são relativamente aproximados, particularmente para medições longitudinais, obtendo uma diferença global de cerca de 18% de redução, das ferramentas não revestidas para as revestidas, como pode ser observado na Tabela 28.

Tabela 28 – Diferença percentual do acabamento superficial com iguais parâmetros de maquinagem F715V117

Não Revestida vs Revestida	R _a Transversal [%]	R _a Longitudinal [%]	R _a Global [%]
N13T0L18F715V117 vs N17T1L18F715V117	32%	10%	21%
N14T0L36F715V117 vs N18T1L36F715V117	24%	13%	19%
N15T0L48F715V117 vs N19T1L48F715V117	14%	16%	15%
N16T0L72F715V117 vs N20T1L72F715V117	21%	17%	19%

Contudo, e como visualizado na Figura 62, comparando os valores da rugosidade provocada pelas ferramentas revestidas para uma velocidade de avanço de 715 mm/min e 750 mm/min, é possível verificar que os valores são muito próximos, particularmente para pequenas distâncias de corte. No entanto, o diferencial vai aumentando à medida que o comprimento de corte aumenta. Desta forma, é preferível utilizar uma velocidade de avanço de 715 mm/min e velocidade de corte 117 m/min, face à velocidade de corte de 126 m/min e avanço de 750 mm/min, uma vez que, em média, a diferença de rugosidade é de 0.06 μm , apresentando uma produtividade muito semelhante.

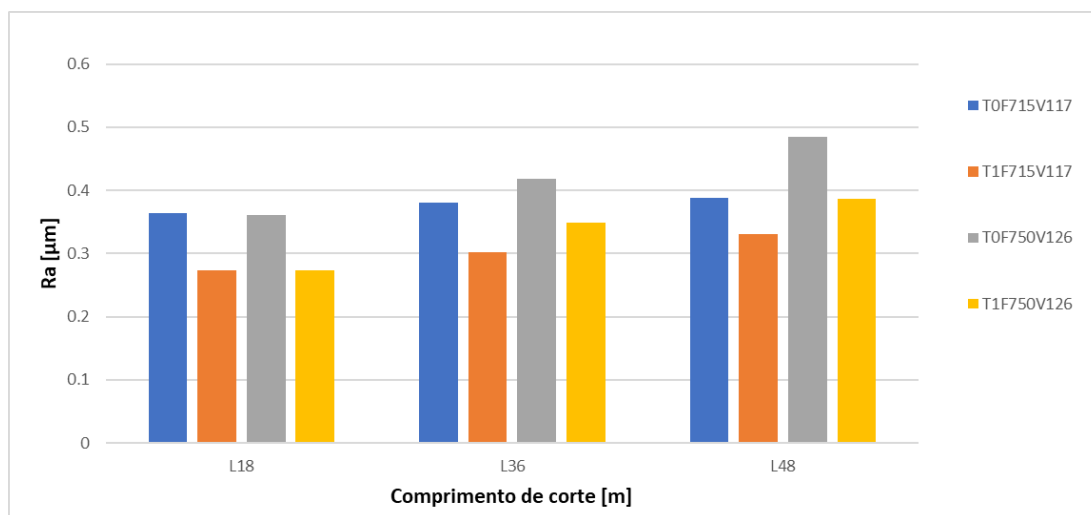


Figura 62 – Comparação dos valores da rugosidade superficial das ferramentas revestidas ou não revestidas, para ensaios realizados a velocidade de avanço de 715 mm/min e 750 mm/min

Como se pode observar na Figura 63, novamente as ferramentas não revestidas provocam maiores valores na rugosidade superficial. Contudo, os valores globais da rugosidade superficial obtidos utilizando uma velocidade de corte de 188 m/min, são menores que os valores atingidos com uma velocidade de corte de 126 m/min, tanto nas ferramentas não revestidas como nas revestidas, sendo necessário avaliar o desgaste da ferramenta para permitir retirar conclusões sobre as melhorias da utilização das mesmas.

Relativamente à rugosidade produzida, foi notória a sua melhoria com o aumento da velocidade de corte, sendo possível verificar na Figura 63, uma redução genérica na rugosidade produzida. A

redução é mais evidente nas ferramentas revestidas, onde existe uma redução de cerca de 40% quando aplicada uma velocidade de corte de 188 m/min.

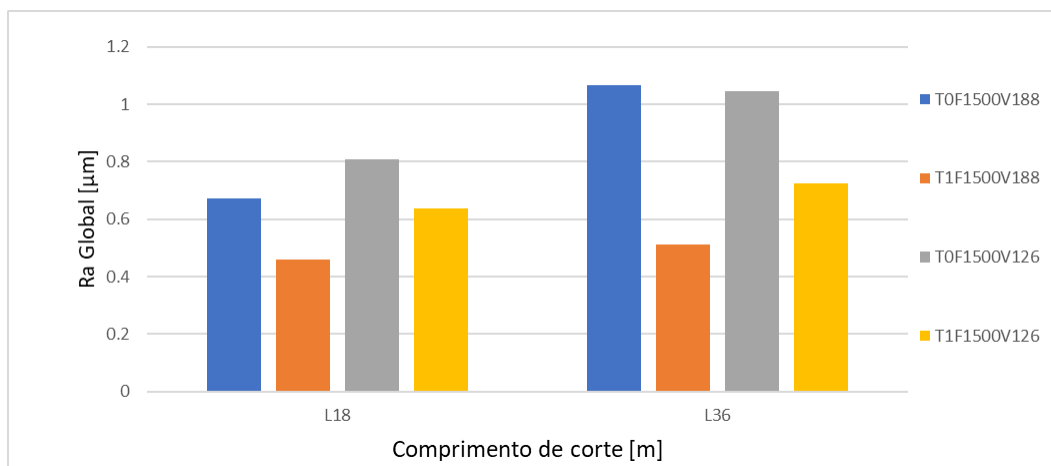


Figura 63 – Comparação dos valores da rugosidade superficial das ferramentas revestidas ou não revestidas, para ensaios realizados a velocidade de corte de 126 m/min e 188 m/min

4.3. Análise das ferramentas – SEM

De seguida, irá ser apresentada uma análise detalhada do desgaste apresentado por todas as condições de ensaio e ferramentas, apresentando e comentando os principais mecanismos de desgaste observados. Com esse propósito, cada uma das ferramentas testadas nos ensaios foram sujeitas a análise por SEM, de forma a avaliar a quantidade de desgaste e analisar os mecanismos de desgaste presentes. O desgaste do flanco das ferramentas (VB) também foi avaliado, e os valores obtidos serão apresentados no subcapítulo 4.3.2.

4.3.1. Análise do desgaste – Comparação visual

Como anteriormente referido, foi analisada a influência da velocidade de avanço, velocidade de corte e do comprimento de corte das ferramentas, oferecendo uma comparação entre as ferramentas revestidas e as não revestidas. Na Figura 64, Figura 65 e Figura 66, pode ser observado e comparado o desgaste das ferramentas com e sem revestimento, testadas a uma velocidade de avanço de 750 mm/min e 1500 mm/min, e comprimentos de corte de 18, 36 e 48 metros.

As figuras serão analisadas e comentadas individualmente, tentando posteriormente fazer um comentário global e final das mesmas, considerando as principais ilações retiradas das análises individuais.

Na Figura 64 a) e Figura 64 b), estão apresentadas imagens de análises SEM referentes a arestas de corte de duas fresas em iguais condições de ensaio, com uma velocidade de avanço de 750 mm/min, sendo a existência ou não de revestimento a única diferença a apontar. Assim, e seguindo essa mesma lógica, todas as imagens apresentadas com cor da fresa mais clara dizem respeito a fresas sem revestimento e, paralelamente, será apresentada situação idêntica de ensaio, mas desta vez com revestimento.

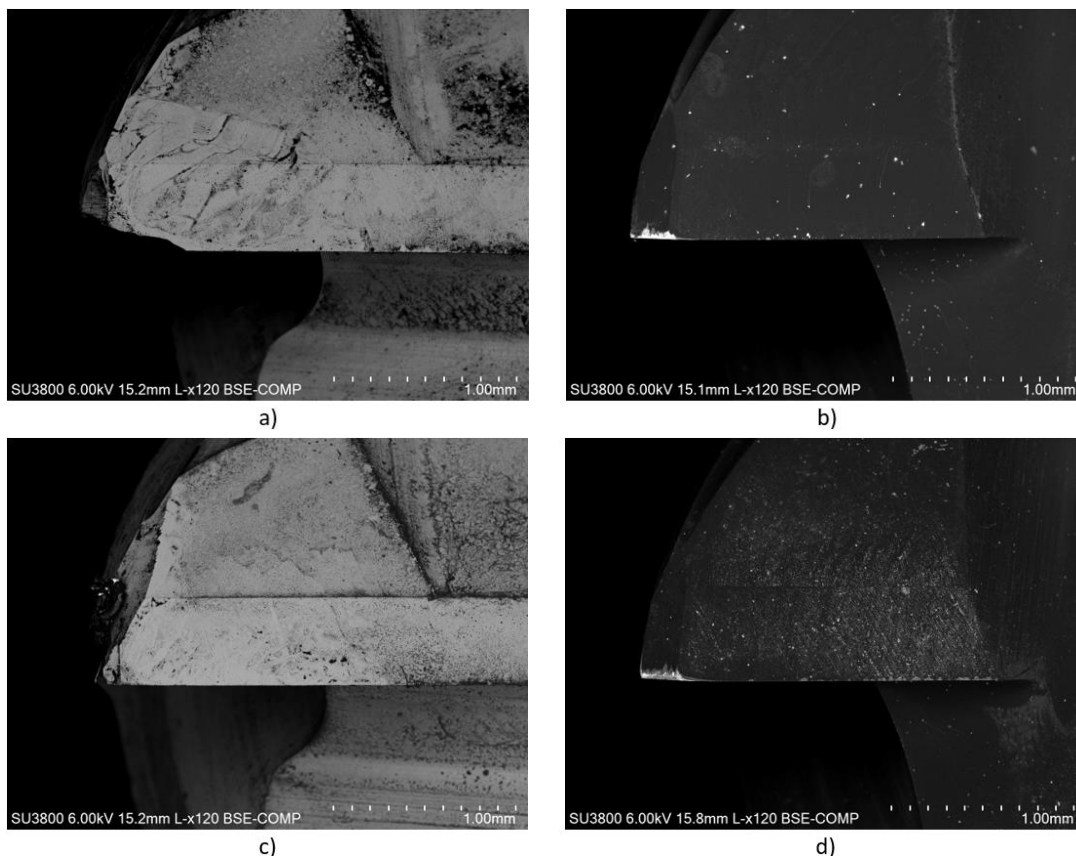


Figura 64 – Imagens SEM com ampliação de 120x vista *edge* das ferramentas testadas nas condições de: a) N1T0L18F750V126; b) N7T1L18F750V126; c) N4T0L18F1500V126; d) N10T1L18F1500V126

Como visualizado na Figura 64 a) e Figura 64 b), existe uma diferença considerável no desgaste das arestas de corte das duas fresas em iguais condições de ensaio. Na Figura 64 a), é possível observar uma pequena fratura da aresta com arrancamento do material na lateral da fresa. No entanto, na Figura 64 b) apenas existe início de desgaste no revestimento, ocorrendo o aparecimento de pequenas falhas no revestimento na superfície da fresa devido ao deslizar da apra sobre a mesma.

Ao incrementar a velocidade de avanço para 1500 mm/min, em que são criadas condições de trabalho mais severas para a ferramenta, foram ensaiadas as fresas que resultaram nas Figura 64 c) e Figura 64 d), onde se continua a encontrar uma diferença considerável no desgaste das arestas de corte das duas fresas, em iguais condições de ensaio. Na Figura 64 c) existiu uma pequena fratura da aresta, com arrancamento do material na lateral da fresa. No entanto, na Figura 64 d), apenas existe início de desgaste no revestimento, sendo notório um maior desgaste no revestimento na superfície da fresa devido ao deslizar da apra.

Preliminarmente, foi detetada uma diferença de desgaste no revestimento por incremento da velocidade de avanço, traduzindo-se num maior desgaste do mesmo e, por consequência, um menor tempo de vida da ferramenta. Esse maior desgaste do revestimento vai potenciar a ocorrência de fenómenos de adesão de material na fresa.

O revestimento nas fresas, permitiu até ao comprimento de 18 metros evitar a ocorrência de fenómenos de fratura, sendo as propriedades lubrificantes do revestimento e a minimização de fenómenos de adesão fundamentais para proporcionar este resultado.

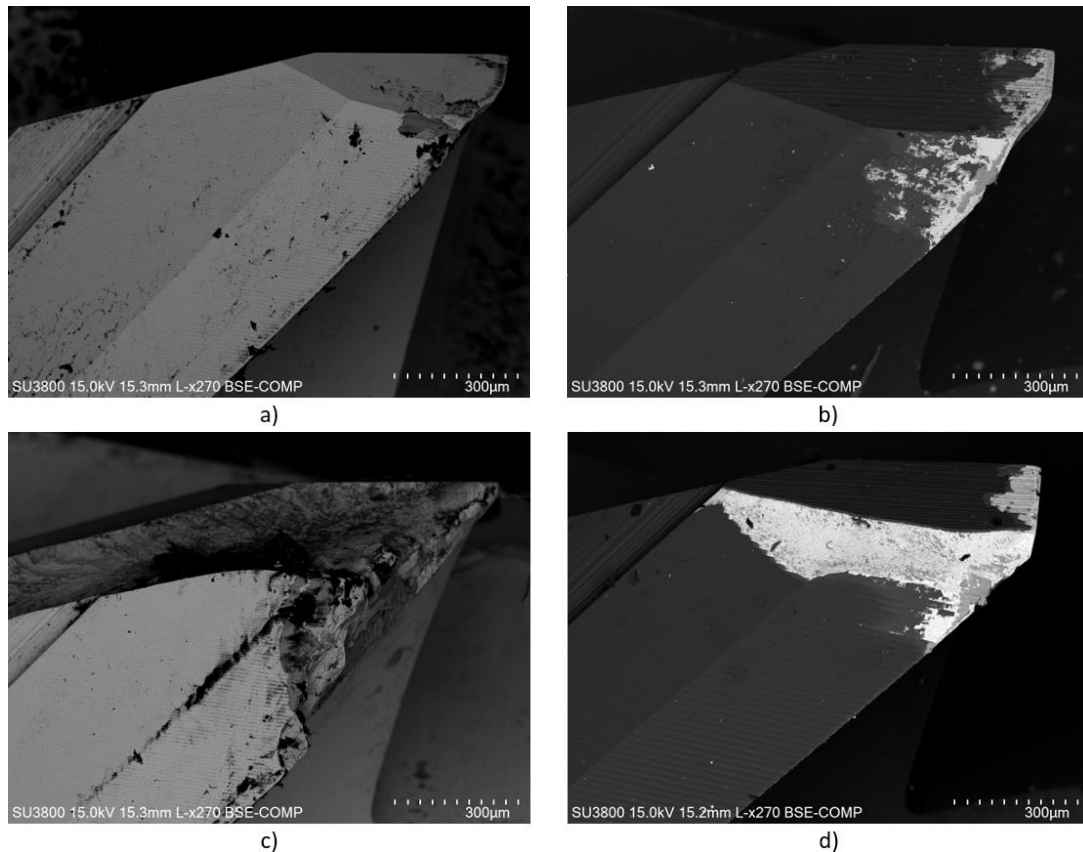


Figura 65 – Imagens SEM com ampliação de 270x vista de *clearance face* das ferramentas testadas nas condições de: a) N2T0L36F750V126; b) N8T1L36F750V126; c) N5T0L36F1500V126; d) N11T1L36F1500V126

Na Figura 65, foram representadas condições idênticas de ensaio das fresas da Figura 64, mas neste caso para um comprimento de corte de 36 metros, e para uma vista de *clearance face* das ferramentas.

Comparando as Figura 65 a) e Figura 65 c) com as Figura 65 b) e Figura 65 d), torna-se evidente uma ocorrência de fratura muito superior para as ferramentas não revestidas, sendo para o caso da velocidade de avanço para 1500 mm/min quase uma destruição da ferramenta na vista *clearance face*, para as mesmas condições da Figura 65 d), onde apenas existiu uma pequena fratura superficial.

A observação das Figura 65 b) e Figura 65 d) corrobora o indicado anteriormente, sendo visível que o aumento da velocidade de avanço origina fenômenos mais intensos de perda de revestimento e, por sua vez, a ocorrência de adesão de material à superfície do substrato da ferramenta.

O incremento do comprimento de corte para 36 metros, originou maior perda de revestimento nas fresas, sendo detetados fenômenos de fratura, particularmente para o caso de velocidade de avanço de 1500 mm/min. O aumento da velocidade de avanço, ao acelerar a perda do revestimento, potencia a adesão de material maquinado ao substrato, sendo esse um fenômeno prejudicial ao acabamento superficial e a durabilidade da própria ferramenta, vindo para este caso o seu tempo de vida comprometido com o incremento da referida velocidade.

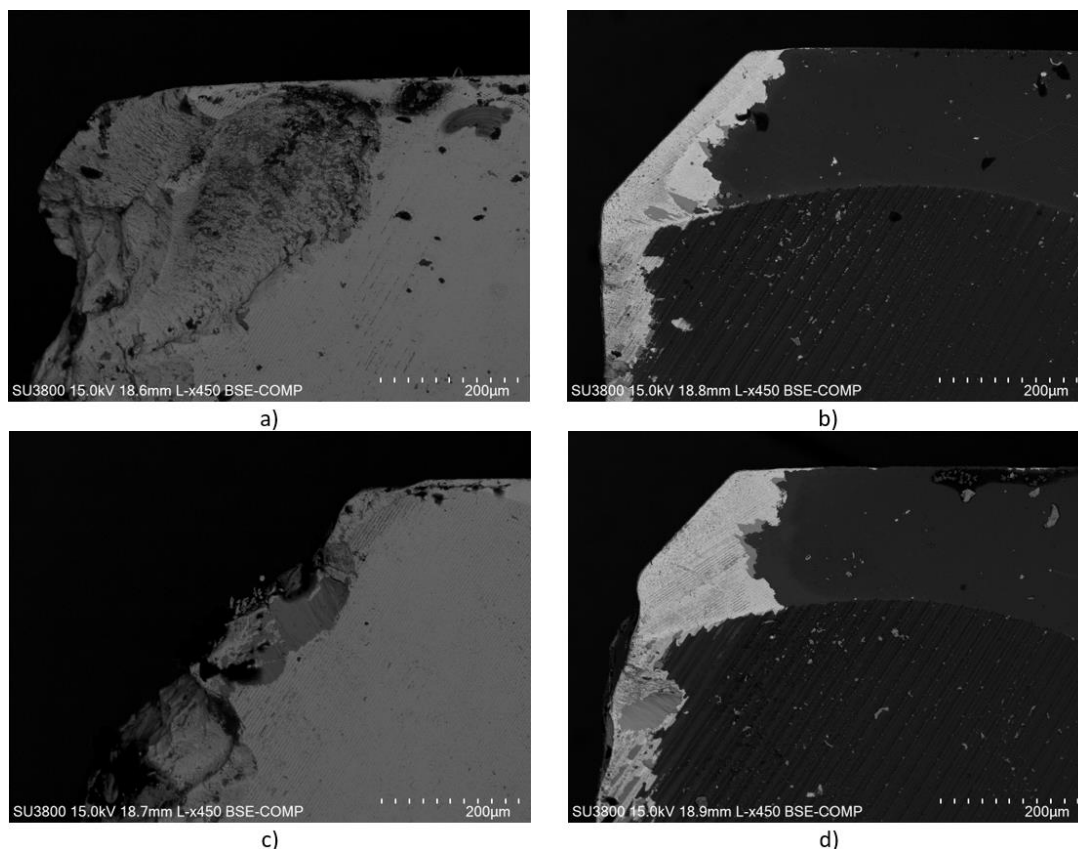


Figura 66 – Imagens SEM com ampliação de 450x vista de *rake face* das ferramentas testadas nas condições de: a) N3T0L48F750V126; b) N9T1L48F750V126; c) N6T0L48F1500V126; d) N12T1L48F1500V126

Na Figura 66 foram apresentadas imagens da vista da face de ataque (*rake face*) da ferramenta, à semelhança de ensaios anteriores, mas para ensaios de 48 metros de comprimento de corte. As restantes condições foram semelhantes às aplicadas em ensaios anteriores, permitindo perceber a evolução do desgaste.

Na Figura 66 a) é possível observar fratura da aresta de corte, existindo um aumento considerável na dimensão da fratura, por aumento da velocidade de avanço, como pode ser observado na Figura 66 c), sendo possível observar material aderido nas zonas de fratura.

Nas Figura 66 b) e Figura 66 d), existiram fenómenos de delaminação do revestimento, sendo possível observar que na zona de transição, ou fronteira entre o substrato e o revestimento, existe adesão do material maquinado, que promove a progressiva delaminação do revestimento. O fenómeno descrito é mais intenso para velocidades de avanço superiores.

Resumidamente, pela análise das Figura 64, Figura 65 e Figura 66, 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 ao desgaste para os dois tipos de ferramentas: para as ferramentas não revestidas, pode ser analisado um desgaste prematuro, com início para o caso de 18 metros de comprimento de corte, e com tendência de evolução exponencial à medida que o comprimento de corte aumenta. Com o aumento do comprimento de corte, o nível de desgaste das ferramentas revestidas aumenta significativamente, especialmente na velocidade de avanço de 1500 mm/min. Este aumento de desgaste é também verificado nas ferramentas não revestidas, existindo neste caso o fenómeno de fratura das lâminas de corte.

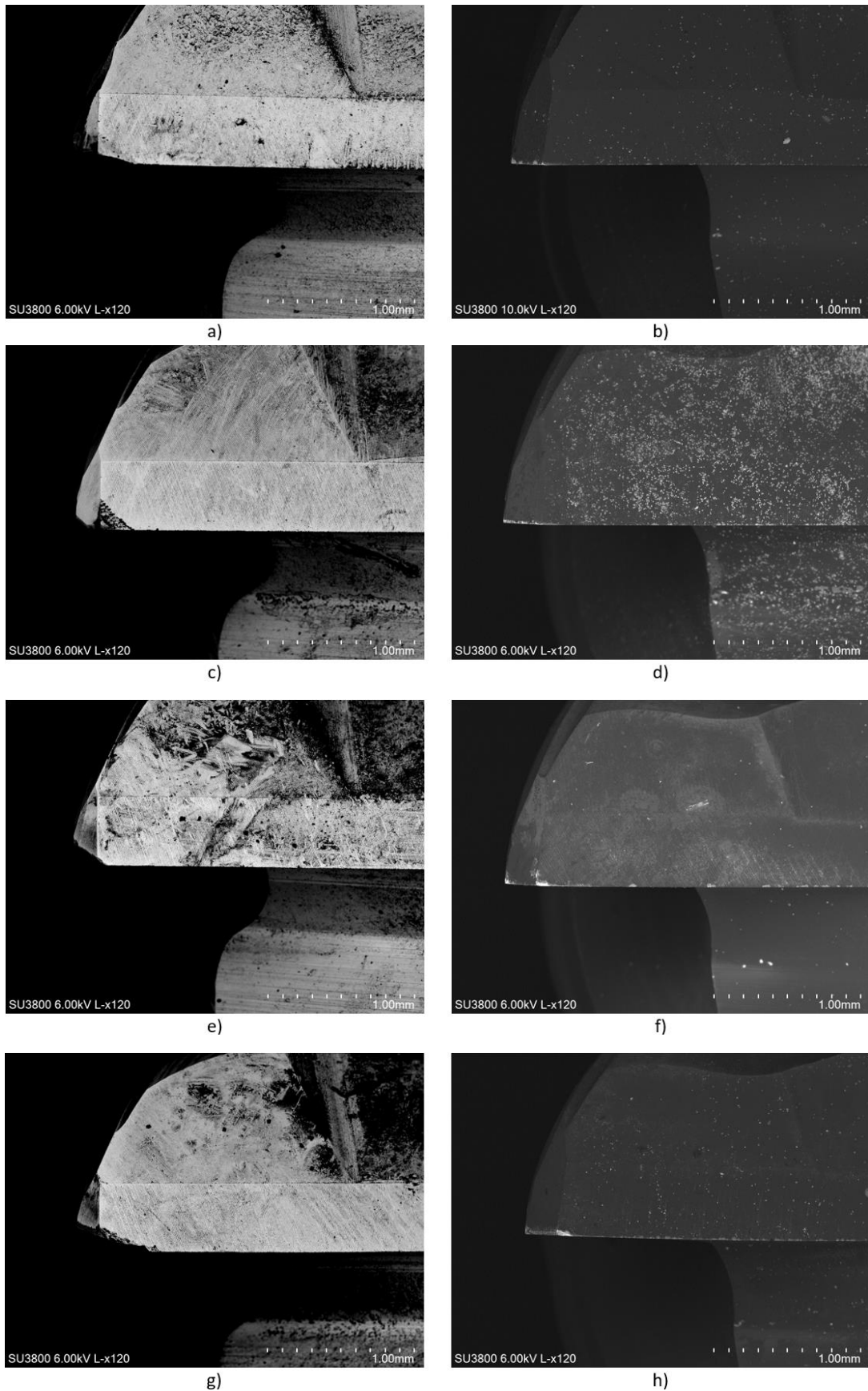


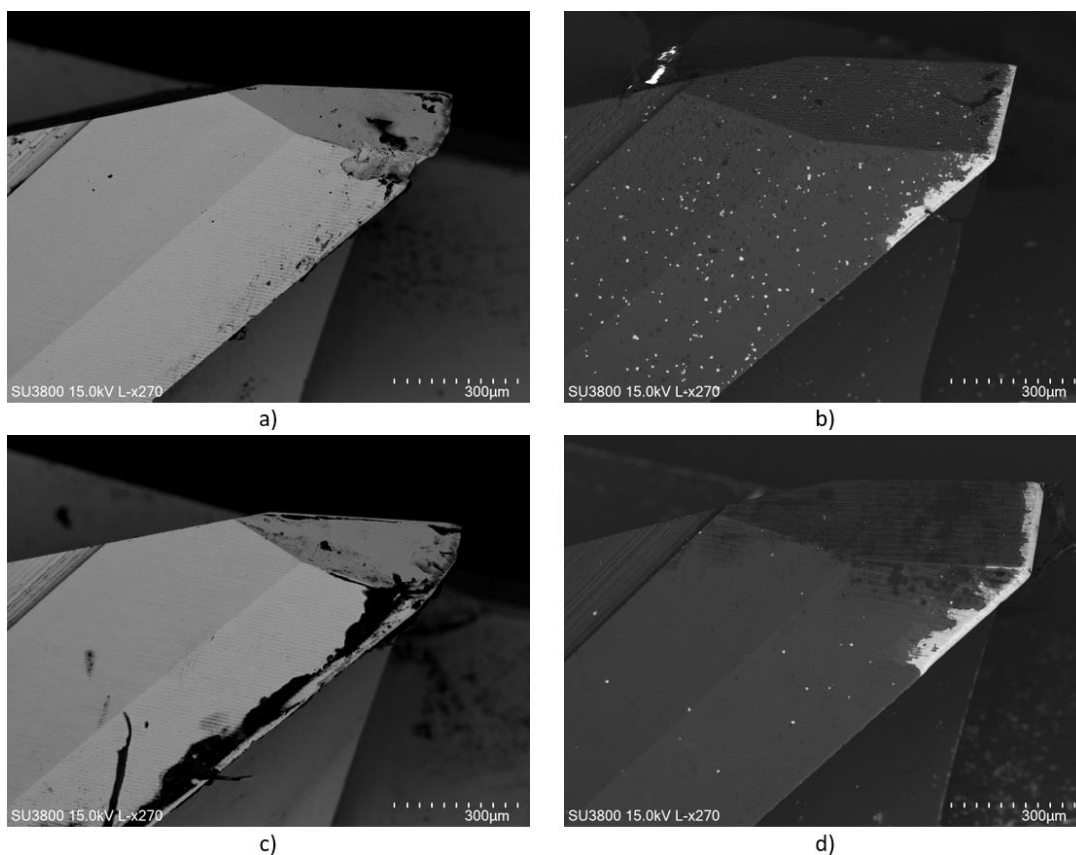
Figura 67 – Imagens SEM com ampliação de 120x vista *edge* das ferramentas testadas nas condições de: a) N13T0L18F715V117; b) N17T1L18F715V117; c) N14T0L36F715V117; d) N18T1L36F715V117; e) N15T0L48F715V117; f) N19T1L48F715V117; g) N16T0L72F715V117; h) N20T1L72F715V117

A análise das Figura 64, Figura 65 e Figura 66, permite verificar que o aumento da velocidade de avanço, incrementa consideravelmente o desgaste das ferramentas com e sem revestimento. Assim, procurando alcançar um resultado melhor de tempo de vida da ferramenta, evitando a fratura prematura da ferramenta e a melhoria da rugosidade do material maquinado, foi reduzido o valor da velocidade de avanço em cerca de 5%, e da velocidade de corte em 7%, respeitando os limites máximos de trabalho impostos pelo fabricante, assumindo valores de 715 mm/min e 117 m/min, respetivamente.

Nas Figura 67 e Figura 68, pode ser observado e comparado o desgaste das ferramentas com e sem revestimento, testadas a uma velocidade de avanço de 715 mm/min, velocidade de corte de 117 m/min e comprimentos de corte de 18, 36, 48 e 72 metros.

Observando as Figura 67 a), Figura 67 c), Figura 67 e) e Figura 67 g), foi possível verificar uma evolução crescente na dimensão da fratura das ferramentas. Mas este aumento é muito inferior ao registado nas Figura 64 a) e Figura 64 c) com a Figura 67 a), sendo possível aferir que o ajuste dos parâmetros é de extrema importância e possibilita uma melhoria significativa no desgaste da ferramenta não revestida, assim como nas ferramentas revestidas, onde foi eliminada a ocorrência de fratura (Figura 67 b), d), f) e h)).

As ferramentas revestidas apresentadas nas Figura 67 b), d), f) e h), permitiram identificar adesão de partículas do material maquinado na superfície da ferramenta, com particular incidência nos casos de comprimentos de corte de 18 e 36 metros. Esta situação poderá ser originada pelas características morfológicas da superfície, os grãos arredondados e as fendas entre os mesmos, originam fenómenos de adesão de micropartículas, que tende a desaparecer à medida que o comprimento de corte aumenta, podendo originar falhas no revestimento.



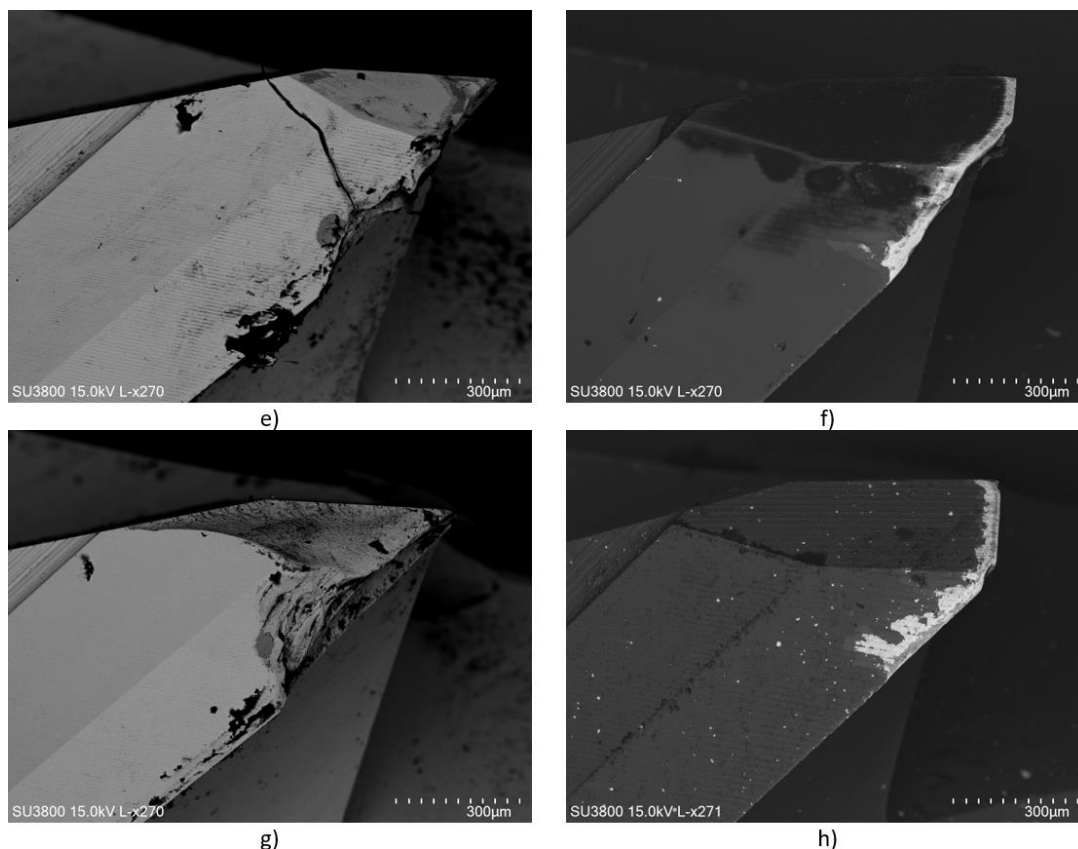


Figura 68 – Imagens SEM com ampliação de 270x vista de *clearance face* das ferramentas testadas nas condições de: a) N13T0L18F715V1176; b) N17T1L18F715V117; c) N14T0L36F715V117; d) N18T1L36F715V117; e) N15T0L48F715V1176; f) N19T1L48F715V117; g) N16T0L72F715V117; h) N20T1L72F715V117

A análise SEM permitiu verificar uma confirmação da vista *clearance face* apresentada na Figura 68, que possibilita uma observação mais detalhada que a vista *edge* apresentada na Figura 67. Pela observação das Figura 68 a), c), e) e g), foi detetada fratura das ferramentas não revestidas para comprimentos de corte superiores a 48 metros, e existe uma redução considerável nos fenómenos de fratura, quando comparados com as Figura 65 a) e Figura 65 c), para apenas 36 metros de comprimentos de corte.

As Figura 68 b), d), f) e h), permitem identificar um desgaste do revestimento que vai evoluindo à medida que o comprimento de corte aumenta, sendo que para as condições de maquinagem em ensaio, apenas foi detetada adesão do material maquinado ao substrato para comprimentos de corte de 72 metros.

Resumidamente, pela análise da Figura 67 e Figura 68, é possível verificar que o aumento do comprimento de corte, induz um aumento do desgaste nas ferramentas de corte, tanto para as ferramentas revestidas como para as não revestidas, sendo o mesmo consideravelmente mais significativo para as ferramentas não revestidas.

Contudo, existe uma diferença no comportamento do desgaste para os dois tipos de ferramentas: para as ferramentas não revestidas, pode ser identificado a fratura da ferramenta, sendo detetado o seu início para o caso 36 metros de comprimento de corte, com tendência de evolução exponencial à medida que o comprimento de corte aumenta. Para comprimentos de corte reduzidos, é observado nas ferramentas de corte revestidas adesão do material maquinado, com

particular incidência nos casos de comprimento de corte de 18 e 36 metros. No entanto, este fenômeno tende a desaparecer para distâncias superiores.

Nas Figura 69 e Figura 70 é possível comparar o estado das ferramentas de corte, revestidas e não revestidas, para condições de maquinagem limite da CNC (10 000 rpm), aumentando a velocidade de corte para 188 m/min, e mantendo velocidade de avanço de 1500 mm/min.

Deve notar-se que foram realizados ensaios para comprimento de corte de 18 e 36 metros, visto que o desgaste apresentado pelas ferramentas já era extremamente elevado.

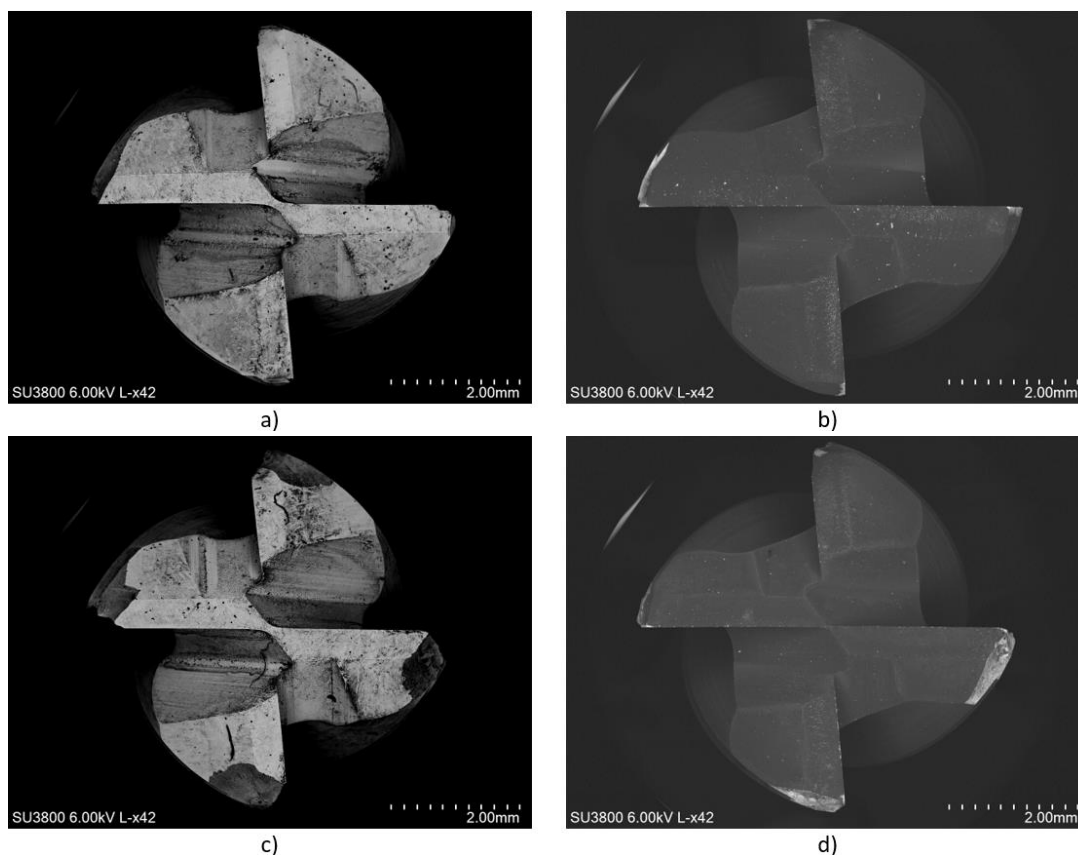


Figura 69 – Imagens SEM com ampliação de 42x vista *top* das ferramentas testadas nas condições de: a) N21T0L18F1500V188; b) N23T1L18F1500V188; c) N22T0L36F1500V188; d) N24T1L36F1500V188

Os ensaios finais procuraram identificar a influência do revestimento na integridade estrutural da fresa, e ainda aferir os valores de rugosidade superficial. Quando comparadas as Figura 69 a) e Figura 69 b), foi perceptível que o revestimento permitiu uma melhor conservação das arestas de corte, visto apresentar uma menor fratura. Com o aumento do comprimento de corte para 36 metros, esse fenômeno torna-se ainda mais evidente, como poderá ser observado na Figura 69 c) e Figura 69 d).

Existiu uma redução do material aderido na superfície das ferramentas revestidas, tal como pode ser verificado nas Figura 69 c) e Figura 69 d), quando comparadas com a Figura 64 b) e Figura 64 d).

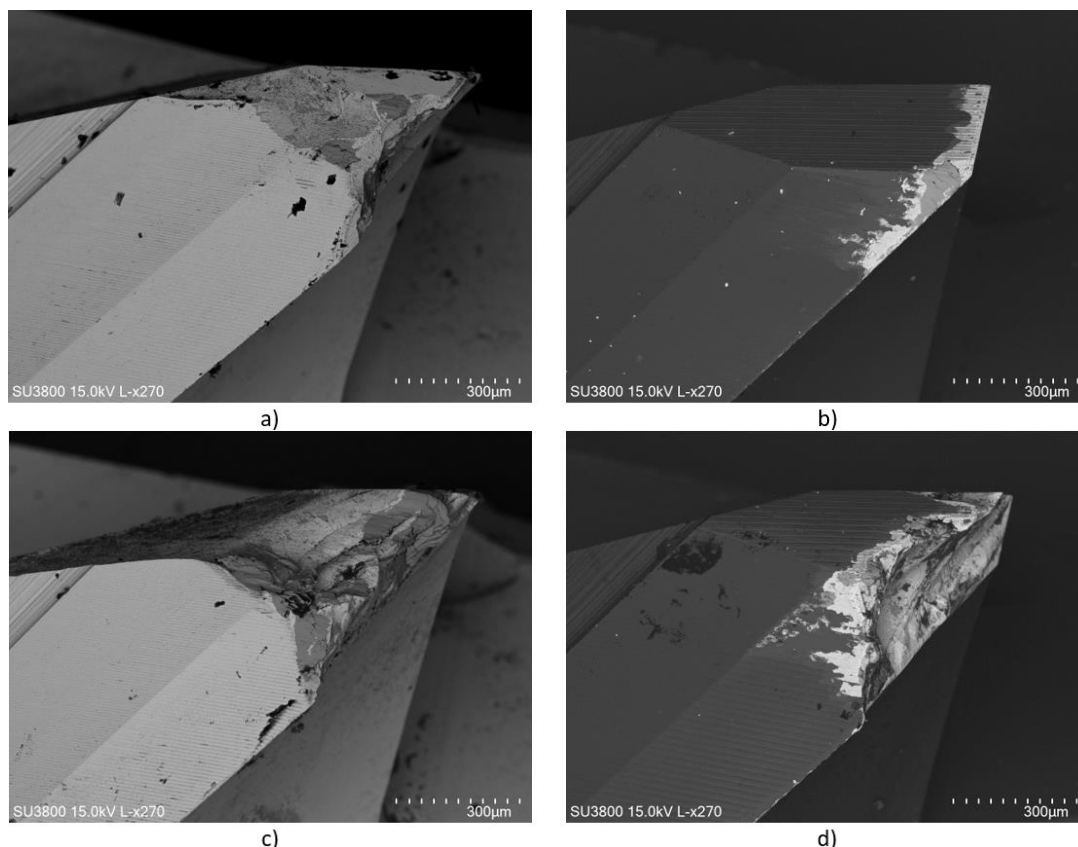


Figura 70 – Imagens SEM com ampliação de 270x vista de *clearance face* das ferramentas testadas nas condições de: a) N21T0L18F1500V188; b) N23T1L18F1500V188; c) N22T0L36F1500V18; d) N24T1L36F1500V18

Na Figura 70 foi possível identificar em todas as imagens realizadas com a vista *clearance face* a presença de material maquinado aderido, sendo que, nas Figura 70 a), Figura 70 c) e Figura 70 d), existe a adesão na zona de fratura do substrato e na Figura 70 b), por não existir fratura, existe adesão na zona da aresta de corte, e próxima da transição de substrato e revestimento, podendo originar a posterior fratura da ferramenta para comprimentos de corte superiores.

Para comprimentos de corte idênticos, como pode ser observado em conjunto na Figura 70 a), Figura 70 b), Figura 70 c) e Figura 70 d), foi verificado que o revestimento preservou a ferramenta, sendo notada uma melhoria relevante no estado final das ferramentas com revestimento.

No entanto, as condições de ensaio são extremas, não sendo recomendada a sua aplicação nem utilização devido à ocorrência de fratura prematura de todas as arestas de corte, para o caso das ferramentas revestidas. Apesar da melhoria considerável do revestimento na conservação estrutural da ferramenta, revelou-se ser insuficiente para suportar as condições de maquinagem aplicadas.

4.3.2. Quantificação do desgaste – Medição

No presente subcapítulo, serão apresentados os valores médios das medições do desgaste de flanco em vista de topo das ferramentas de corte, de forma a apresentar valores de todas as lâminas de corte, para todas as condições testadas. Todas as medições foram efetuadas segundo a norma ISO 8688-2:1989, como apresentado na Figura 71.

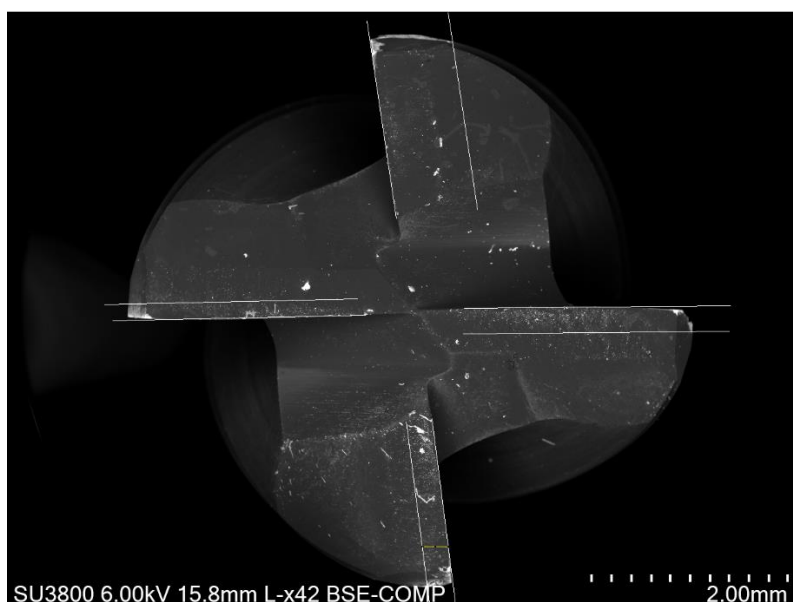


Figura 71 – Medição do desgaste de flanco VB segundo a norma ISO 8688-2:1989

Após as medidas realizadas a todas as ferramentas, são apurados os resultados médios de desgaste de flanco de todas as lâminas de corte em todas as ferramentas, independentemente das condições de corte. O método de avaliação do desgaste das ferramentas de corte foi descrito no subcapítulo 3.2.7. Na Tabela 29, são apresentados os valores médios de VB global da ferramenta.

Tabela 29 – Valores médios do desgaste de flanco nas ferramentas de corte

Ferramenta não Revestida	VB Global [mm]	Ferramenta Revestida	VB Global [mm]
N1T0L18F750V126	0.2275 ± 0.1404	N7T1L18F750V126	0.0950 ± 0.0333
N2T0L36F750V126	0.3250 ± 0.1436	N8T1L36F750V126	0.2575 ± 0.1992
N3T0L48F750V126	0.8650 ± 0.3629	N9T1L48F750V126	0.2625 ± 0.2296
N7T1L18F750V126	0.6675 ± 0.4295	N10T1L18F1500V126	0.1725 ± 0.0764
N8T1L36F750V126	1.4225 ± 0.2772	N11T1L36F1500V126	0.3800 ± 0.2661
N9T1L48F750V126	1.5225 ± 0.2605	N12T1L48F1500V126	0.7425 ± 0.4214
N13T0L18F715V117	0.3025 ± 0.2316	N17T1L18F715V117	0.0600 ± 0.0122
N14T0L36F715V117	0.1800 ± 0.0659	N18T1L36F715V117	0.0650 ± 0.0086
N15T0L48F715V117	0.2025 ± 0.0227	N19T1L48F715V117	0.1000 ± 0.0291
N16T0L72F715V117	0.4475 ± 0.2506	N20T1L72F715V117	0.1150 ± 0.0269
N21T0L18F1500V188	0.5150 ± 0.4148	N23T1L18F1500V188	0.4125 ± 0.3428
N22T0L36F1500V188	1.2200 ± 0.0515	N24T1L36F1500V188	0.8325 ± 0.3394

Foram verificados elevados valores de desvio, face à média de desgaste medida, visto que por diversas vezes, e particularmente em ferramentas não revestidas, ocorreram fraturas de apenas uma ou duas arestas de corte, levando à ocorrência dos referidos desvios.

Estes valores serão apresentados sob a forma de gráficos de superfície com os valores médios do desgaste, na Figura 72 e Figura 73, para as velocidades de avanço de 715 mm/min, 750 mm/min e 1500 mm/min, desconsiderando as diferenças residuais nas velocidades de corte.

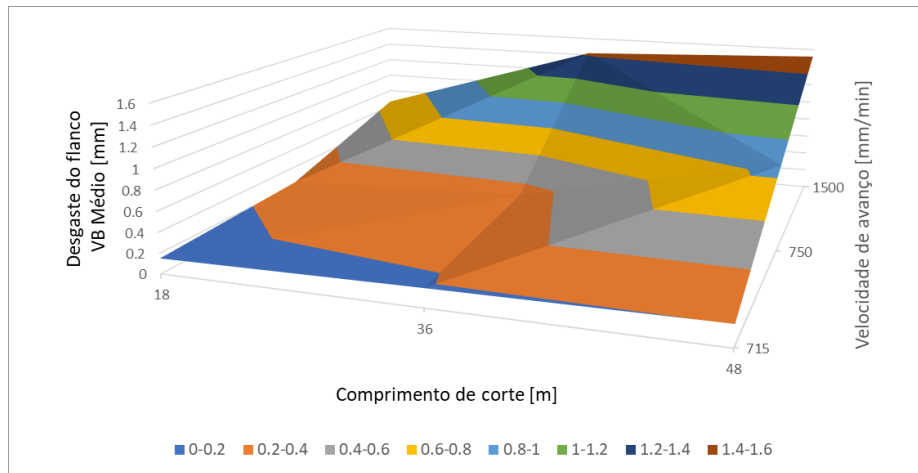


Figura 72 – Gráfico de superfície do valor médio do desgaste de flanco (VB) das ferramentas não revestidas para as velocidades de avanço de 715 mm/min, 750 mm/min e 1500 mm/min

Como visualizado na Figura 72, o desgaste do flanco correspondente às ferramentas não revestidas, é menor para a condição de menor velocidade de avanço de 715 mm/min, com desgaste de flanco a aumentar à medida que se aumenta a velocidade de avanço. Além disso, também é registado um aumento do desgaste do flanco à medida que se aumenta o comprimento de corte, salvo em casos de quebra de ferramenta que origina uma influência extremamente elevada no desgaste. A rugosidade superficial da peça maquinada aumenta à medida que o comprimento de corte se acumula e influencia o desgaste a que estas ferramentas estão sujeitas, sendo notória uma evolução do desgaste mais rápida para comprimentos e velocidades de avanço superiores.

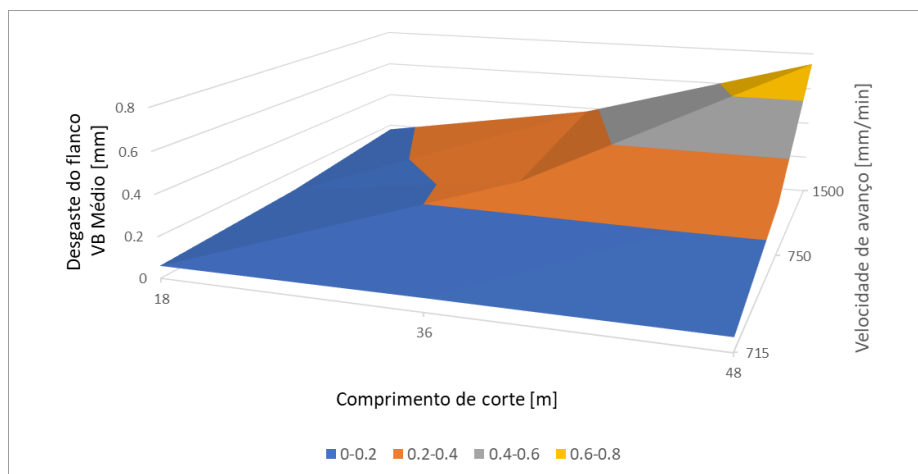


Figura 73 – Gráfico de superfície do valor médio do desgaste de flanco (VB) das ferramentas revestidas para as velocidades de avanço de 715 mm/min, 750 mm/min e 1500 mm/min

Analisando o gráfico da Figura 73, o desgaste do flanco correspondente às ferramentas revestidas é menor para condições de velocidade de avanço de 715 mm/min, sendo esta a menor velocidade de avanço testada. O desgaste aumentou com o aumento da velocidade de avanço, atingindo um registo máximo de VB médio próximo de 0.8 mm, que diz respeito à velocidade de avanço de 1500 mm/min. O desgaste também aumentou à medida que o comprimento de corte aumentou, no entanto, para a velocidade de avanço de 715 mm/min, praticamente foi impercetível o seu aumento, visto que foram registadas diferenças mínimas entre os valores de desgaste. Quando

comparado o gráfico da Figura 73 com o da Figura 72, foi possível identificar que o comprimento de corte e velocidade de avanço, são fatores que aumentam em grande medida o valor do desgaste médio, particularmente quando estamos a trabalhar com ferramentas sem revestimento, que apresentam um valor do desgaste médio global duas vezes superior, quando comparado com a utilização de ferramentas 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 comparação visual, as ferramentas revestidas sofrem menos desgaste do que as não revestidas, para todas as velocidades de avanço e comprimentos de corte. A comparação destes valores pode ser observada sob a forma de gráfico de barras na Figura 74.

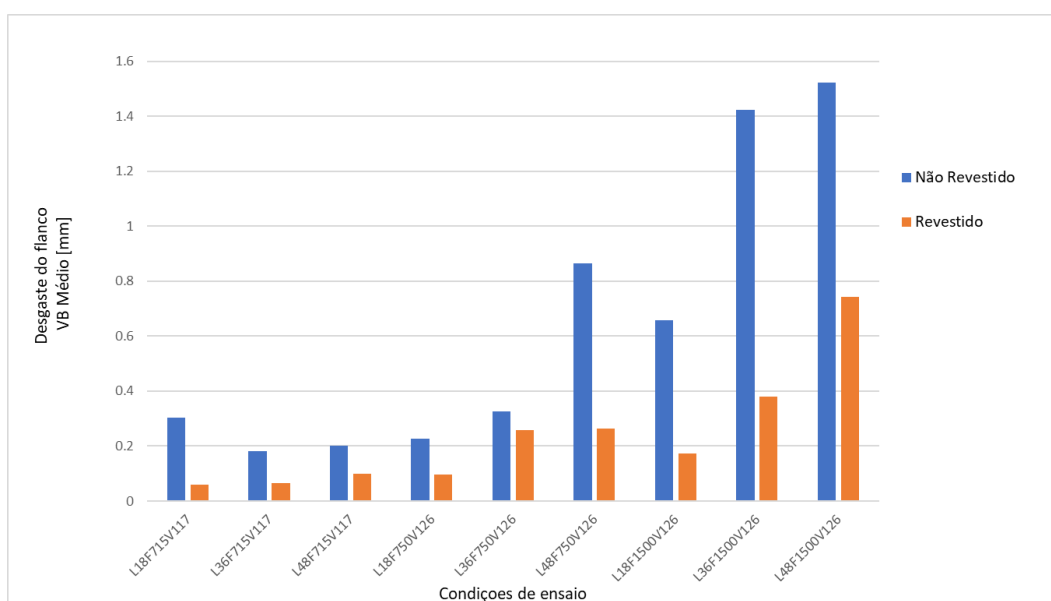


Figura 74 – Comparação do desgaste de flanco (VB) das ferramentas não revestidas e revestidas, para as velocidades de avanço de 715 mm/min, 750 mm/min e 1500 mm/min

Analisando o gráfico comparativo do desgaste nas ferramentas, um dos aspetos que salta de imediato à vista é o maior desgaste nas ferramentas com comprimentos de corte inferiores e igual velocidade de avanço. Esta situação deve-se basicamente à diferença de desgaste medido devido à fratura das arestas de corte. Esse aspeto é particularmente relevante para a fresa não revestida, com velocidades de avanço de 715 mm/min, que devido à fratura prematura de uma ou mais arestas de corte, cria um maior valor de desgaste na ferramenta para todos os comprimentos de corte, com condições semelhantes. Genericamente, as ferramentas revestidas com velocidades de corte mais baixas, apresentam um desgaste de flanco médio baixo, quando comparado com as restantes condições. Isto significa que estas ferramentas têm um melhor comportamento ao desgaste para comprimentos de corte mais elevados, sofrendo menos desgaste de flanco e permitindo maiores distâncias de maquinagem.

É ainda possível notar, um claro aumento do valor médio de VB com o aumento do comprimento de corte, particularmente para as ferramentas não revestidas. Este aumento é experienciado por todas as ferramentas. No entanto, não é tão intenso para as ferramentas com velocidade de corte inferior.

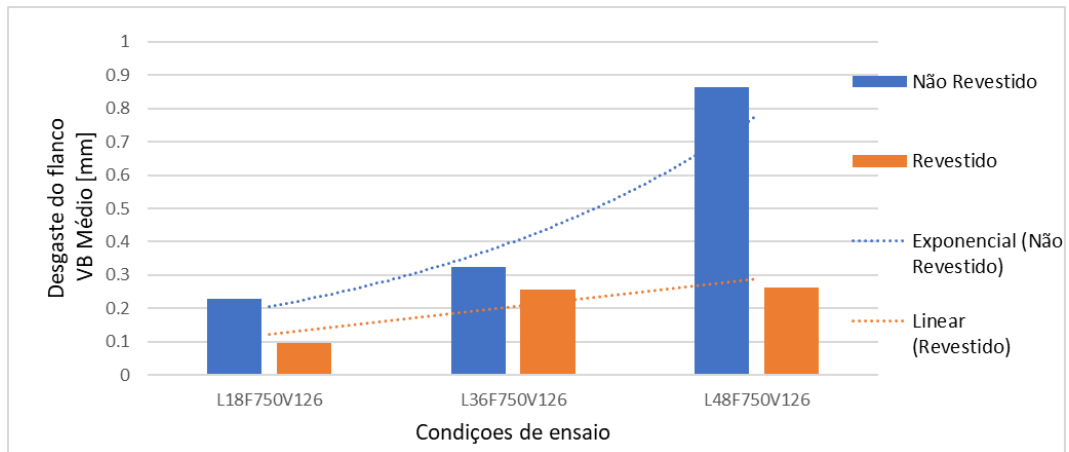


Figura 75 – Comparação do desgaste de flanco (VB) das ferramentas não revestidas e revestidas, para a velocidade de avanço de 750 mm/min

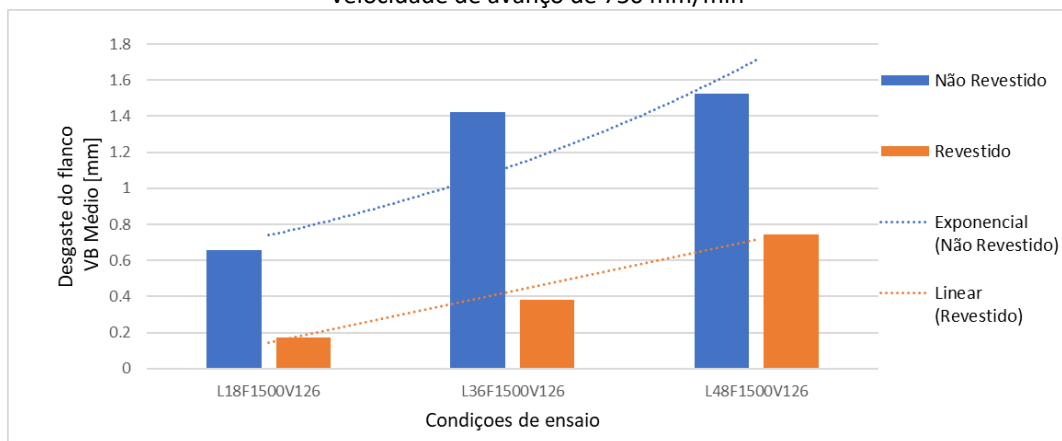


Figura 76 – Comparação do desgaste de flanco (VB) das ferramentas não revestidas e revestidas, para a velocidade de avanço de 1500 mm/min

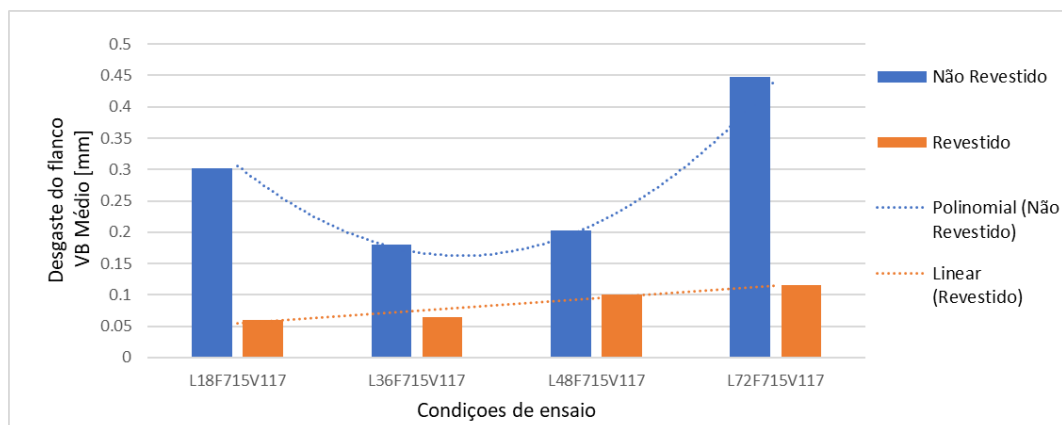


Figura 77 – Comparação do desgaste de flanco (VB) das ferramentas não revestidas e revestidas, para a velocidade de avanço de 715 mm/min

Analisando as Figura 75, Figura 76 e Figura 77, e desconsiderando aspetos isolados, a evolução do desgaste das ferramentas não revestidas apresenta um comportamento exponencial, particularmente acentuado nas ferramentas não revestidas, devido a existir fratura, com exceção do comportamento ao desgaste para a velocidade de avanço de 715 mm/min que, devido a existir fratura prematura da ferramenta, leva a um comportamento polinomial de 2º grau para a linha de tendência. No entanto, o expectável seria o comportamento exponencial.

Relativamente ao desgaste de flanco das ferramentas revestidas, praticamente em todos os casos existe uma evolução linear, apresentando uma degradação mais acentuada à medida que é incrementada a velocidade de avanço, sendo necessário existir um compromisso entre a rapidez de execução da tarefa e o tempo de vida da ferramenta.

Existe uma clara influência da velocidade de avanço nos valores médios de VB registados para as ferramentas, independentemente do revestimento. No entanto, nota-se uma maior influência deste parâmetro no desgaste das ferramentas não revestidas, apresentando para todos os casos valores de desgaste médio superiores em mais de 50%.

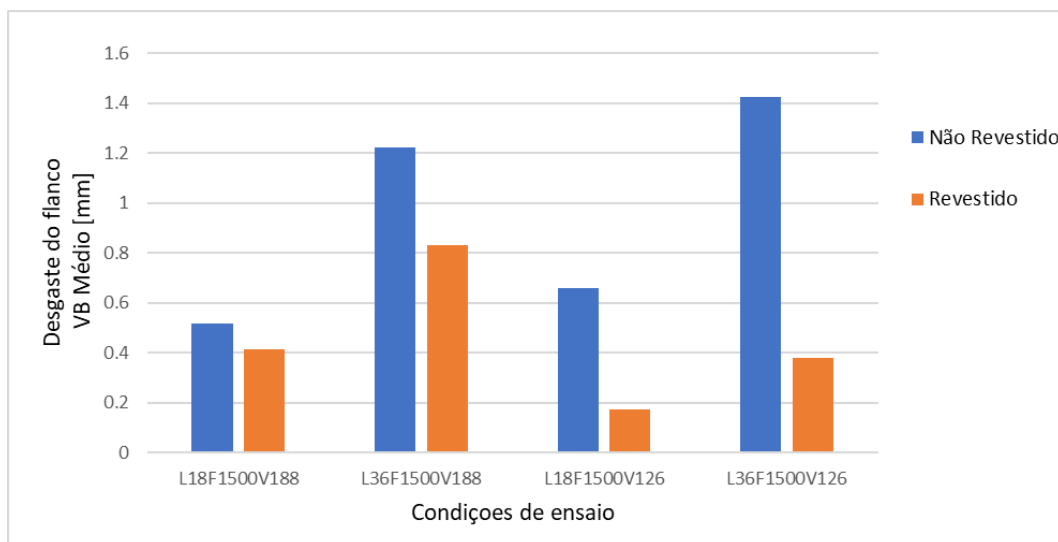


Figura 78 – Comparação do desgaste de flanco (VB) das ferramentas não revestidas e revestidas, para a velocidade de corte de 126 m/min e 188 m/min, e velocidade de avanço de 1500 mm/min

Analisando os valores de desgaste do flanco apresentados no gráfico da Figura 78, é observado um aumento de desgaste para comprimentos de corte mais longos, para todas as condições de ensaio testadas. No entanto, quando comparado o desgaste do flanco (VB) das ferramentas não revestidas e revestidas, o valor é muito próximo para velocidade de corte de 188 m/min, ao contrário do que acontece para velocidade de corte de 126 m/min.

Relativamente à influência da velocidade de corte no desgaste do flanco das ferramentas, podemos afirmar que o aumento da mesma afeta o tempo de vida da ferramenta, sendo o revestimento um fator retardador relativamente aos valores de desgaste de flanco.

4.3.3. Caracterização dos mecanismos de desgaste

Uma análise detalhada do desgaste apresentado por todas as ferramentas e condições de ensaio irá ser realizada de seguida, apresentando e comentando o volume de desgaste e principais mecanismos de desgaste registados.

Nesta secção, serão realizadas análises detalhadas dos mecanismos de desgaste apresentado por todas as ferramentas, e condições de ensaio nas ferramentas de corte ao longo dos ensaios. Estes foram determinados através de análise por SEM, com apoio em análises EDS. A principal ocorrência observada foi a fratura da ferramenta, particularmente nas ferramentas não revestidas, sendo também identificado desgaste adesivo na superfície e face de saída da ferramenta. O desgaste adesivo era um fenómeno previsível, tendo em conta que o material maquinado se trata de um

material dúctil. Nas Figura 79 a) e Figura 79 b), é possível identificar o desgaste adesivo de aresta postíça de corte e lascagem do substrato numa ferramenta não revestida. Foram efetuadas análises EDS, para determinar a presença de material aderido, como se pode observar na Figura 79 c), onde é notória a presença de Cobre na zona Z1.

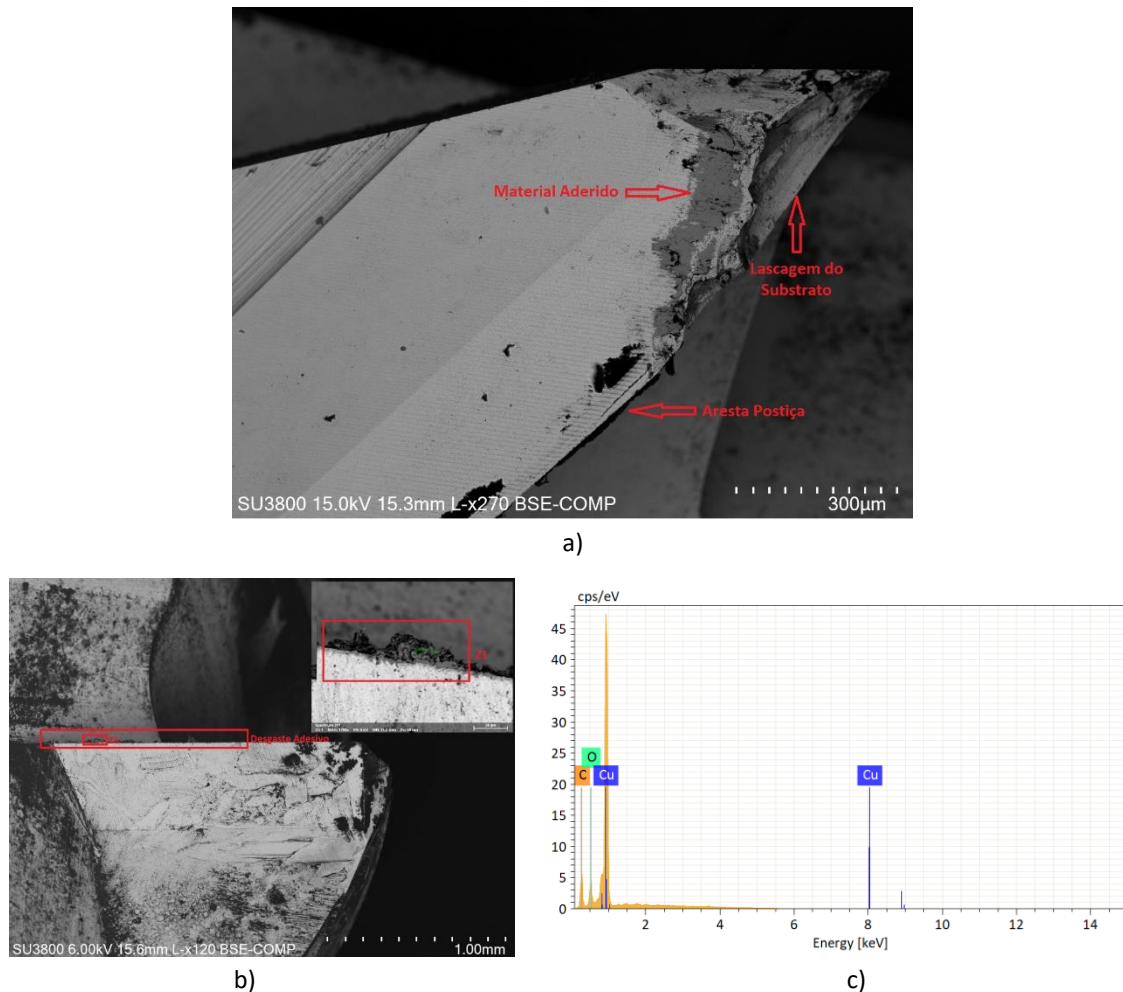


Figura 79 – a) Mecanismos de desgaste presentes numa *clearance face* de ferramenta não revestida, testada a 48 metros de comprimento de corte e 750 mm/min de velocidade de avanço, com ampliação de 270x; b) Ampliação 1200x da face topo, para EDS; c) Espectros EDS de material aderido

As ferramentas revestidas foram também sujeitas a desgaste adesivo, com menor incidência do que encontrado nas ferramentas não revestidas, como pode ser observado na Figura 80, na zona Z2. Para além dos mecanismos de desgaste registados nas ferramentas não revestidas, estes tipos de ferramentas sofreram delaminação do revestimento, causada principalmente pela adesão do material à superfície das ferramentas, e entre camadas.

Na Figura 80, é possível visualizar que a ferramenta sofreu exposição do substrato, bem como delaminação da camada exterior de DLC, como se observa na zona Z3, que corresponde à camada de TiAlN. Foram também detetadas pequenas partículas de material maquinado depositadas nas diversas faces da ferramenta, com principal incidência a baixas velocidades e para os ensaios com menores comprimentos de maquinagem. A análise EDS desta ferramenta pode ser observada na Figura 81.

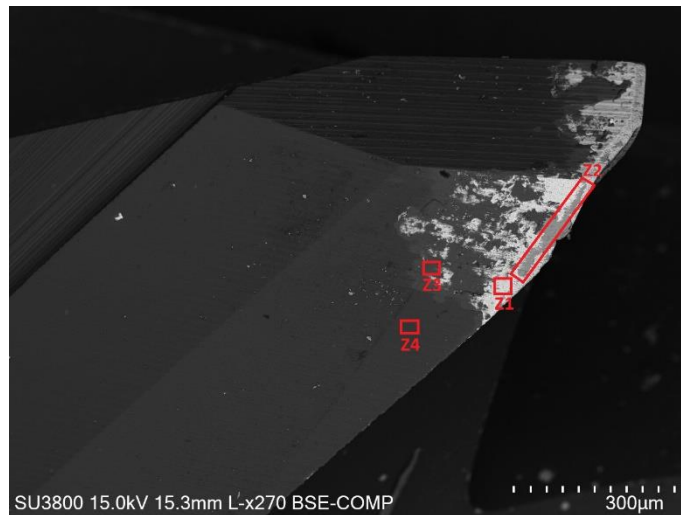


Figura 80 – Imagens SEM com ampliação 270x numa *clearance face* de ferramenta revestida, testada a 48 metros de comprimento de corte e 750 mm/min, com a identificação de quatro zonas destacadas a vermelho para análise EDS (Z1 – zona do substrato; Z2 – zona de material aderido; Z3 – zona do revestimento de TiAlN; Z4 – zona do revestimento de DLC)

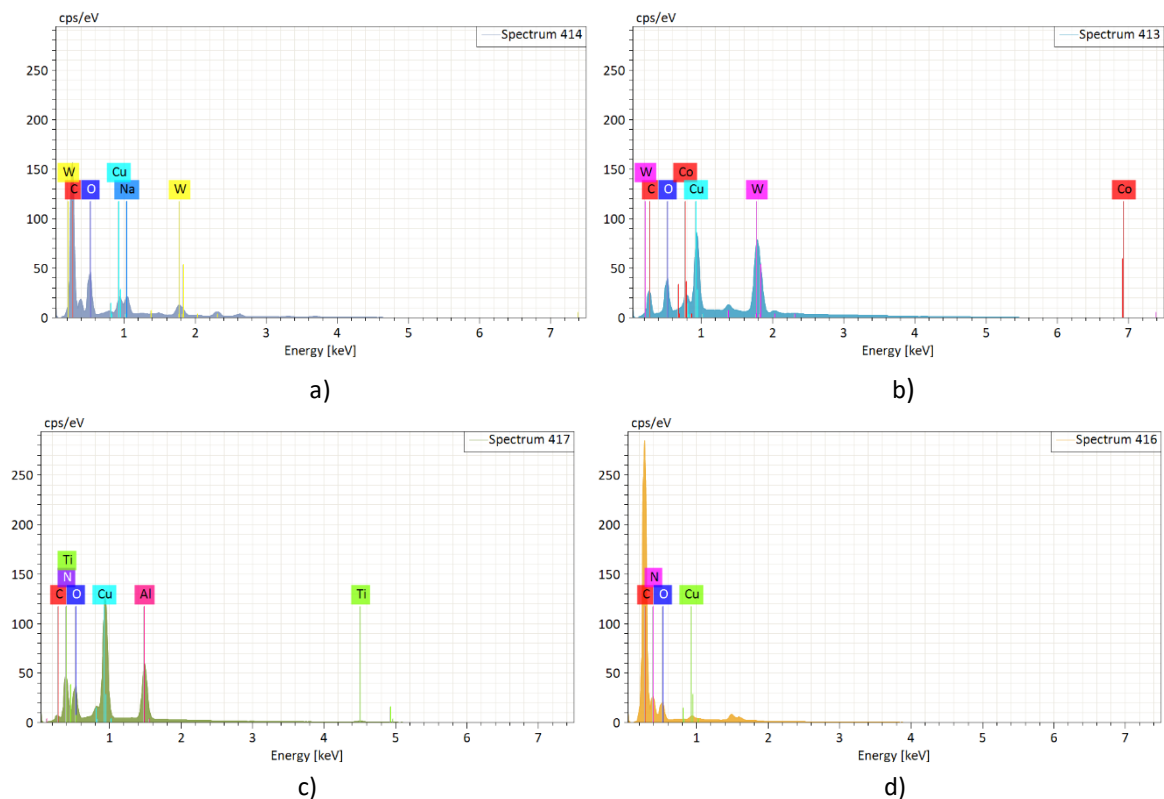


Figura 81 – Espectros EDS das zonas correspondentes à Figura 75: a) Z1; b) Z2; c) Z3; d) Z4

A análise das ferramentas revestidas, permitiu observar delaminação e erosão da primeira camada de DLC, sendo esta situação evolutiva menor nas fases iniciais do ensaio de maquinagem (para comprimentos de corte inferiores). Foi ainda possível aferir que o aumento da velocidade de avanço origina um desgaste mais rápido da ferramenta.

As Figura 82 a), b), c) e d) apresentam os principais mecanismos de desgaste registados nas ferramentas não revestidas, mais especificamente para as ferramentas testadas a 36 metros de comprimento de corte. Foi novamente identificada a presença de material aderido, que se deposita nas crateras provocadas pela maquinagem, e na superfície da ferramenta. Nas Figura 82 c) e d), pode observar-se que, para valores de velocidade de avanço mais elevados (1500 mm/min), a quebra da aresta e formação de cratera ocorreu de forma mais severa, comparativamente ao observado na Figura 82 a) e b), que apresenta menor intensidade de danos no substrato, para menores velocidades de avanço (715 e 750 mm/min). Pode-se ainda observar nas Figuras 72 c) e d), que, para valores de velocidade de avanço mais elevados (1500 mm/min), o desgaste adesivo é mais severo, comparativamente ao observado na Figura 72 a), que apresenta menor adesão, para uma velocidade de avanço de 715 mm/min, particularmente por não apresentar zonas de fratura que se demonstram propícias à adesão do material maquinado.

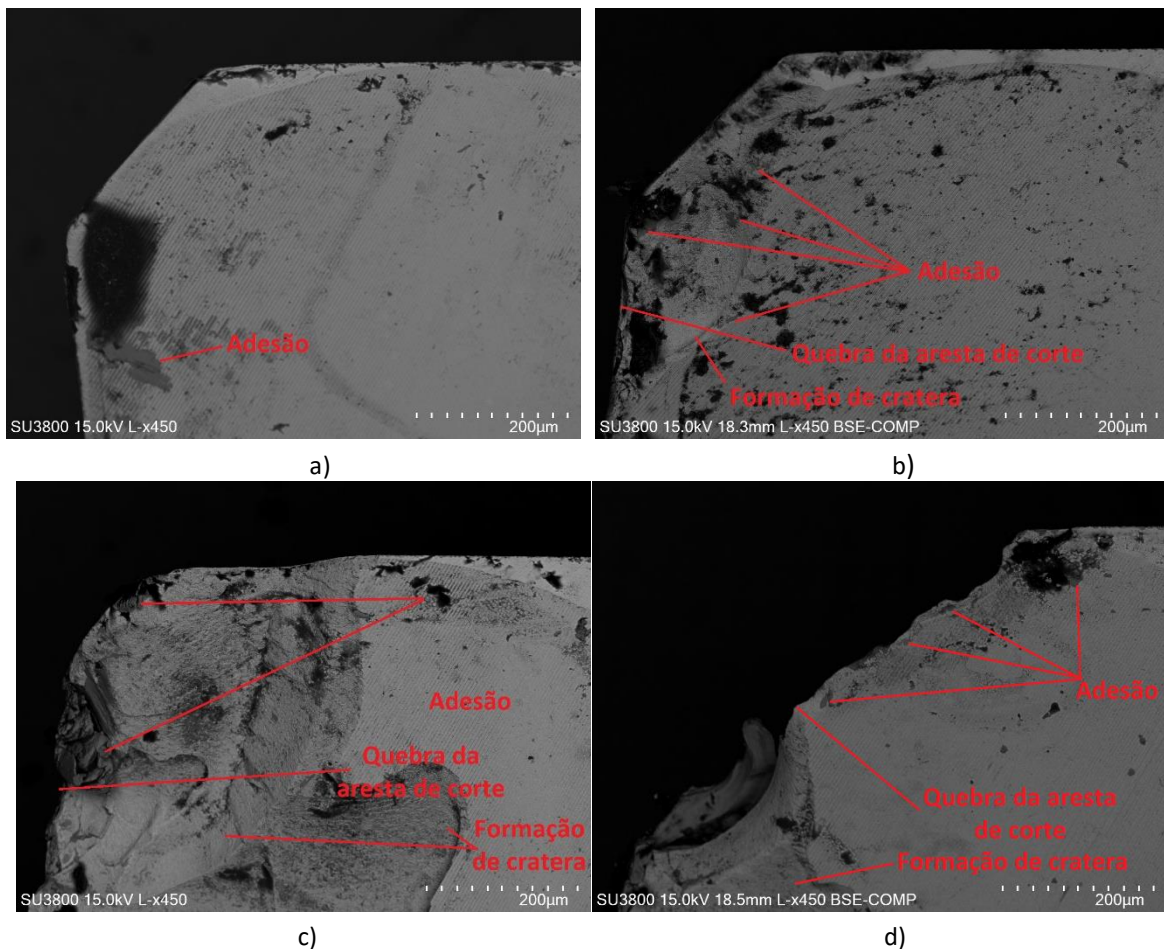


Figura 82 – Mecanismos de desgaste registados na face de ataque (*rake face*) de uma ferramenta não revestida, testada a 36 metros de comprimento: a) N14T0L36F715V117 b) N02T0L36F750V126 c) N05T0L36F1500V126 d) N22T0L36F1500V188

Na Figura 83, é feita uma comparação dos mecanismos de desgaste de uma ferramenta revestida, testada a 36 metros de comprimento de corte, com a variação da velocidade de avanço e velocidade de corte anteriormente referidas. A Figura 83 a) apresenta a ferramenta testada a 715 mm/min de velocidade de avanço e velocidade de corte de 115 m/min, a Figura 83 b) 750 mm/min e 126 m/min e a Figura 83 c) e d) a 1500 mm/min e a velocidade de corte de 126 m/min ou 188 m/min, respectivamente.

Os principais mecanismos de desgaste registados neste tipo de ferramentas, para as condições de ensaio referidas anteriormente, foram: adesão, delaminação do revestimento e 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 (quebra da aresta de corte superior), como se pode verificar nas Figura 83 c) e d).

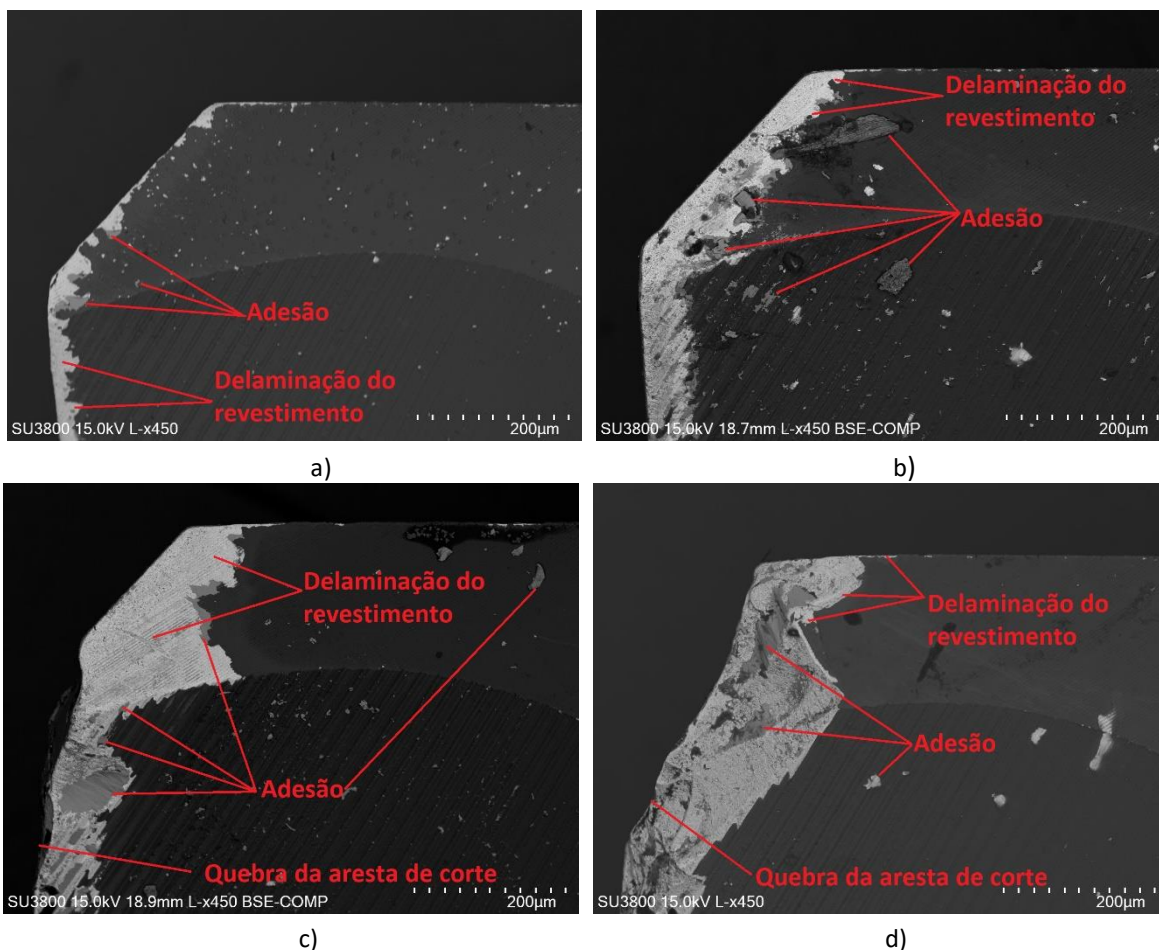


Figura 83 – Mecanismos de desgaste registados na face de ataque (*rake face*) de uma ferramenta revestida, testada em 36 metros de comprimento: a) N18T1L36F715V117 b) N08T1L36F750V126 c) N11T1L36F1500V126 d) N24T1L36F1500V188

4.4. Discussão de resultados

Considerando os resultados obtidos, é importante realçar os seguintes pontos, que serão alvo de comparação com os trabalhos de alguns dos autores referenciados na revisão bibliográfica:

- 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 demonstrou uma redução da adesão, e redução dos fenómenos de desgaste, apesar de apresentar alguns fenómenos de delaminação, principalmente nas arestas de corte, analogamente ao observado nos estudos realizados por Yokota et al. (2014) e Santos et al. (2007);
- Os resultados permitiram observar que, para a maquinagem do AMPCOLOY® 83, as ferramentas revestidas com TiAlN/DLC são mais eficazes, contrariamente ao verificado por Castanheira, et al. (2021), com revestimento multicamada DLC/CrN. Assim sendo, as ferramentas revestidas com TiAlN/DLC são recomendadas para a maquinagem de AMPCOLOY® 83, devendo ser ponderada a sua utilização, uma vez que os seus custos de aquisição são mais elevados, mas permitem um maior tempo de vida da ferramenta e melhor qualidade da superfície maquinada;
- A rugosidade superficial obtida na superfície maquinada apresentou resultados satisfatórios, sendo menor o seu valor médio com iguais condições de maquinagem para as ferramentas revestidas, à semelhança do que foi verificado nos estudos realizados por Badiger et al. (2018), Silva et al. (2019) e Sousa, et al. (2021). Contudo, o revestimento mostra-se mais eficaz para menores comprimentos de corte, sendo que a redução da velocidade de avanço, permite melhorar a rugosidade, aumentando, conseqüentemente, o tempo de trabalho;
- Relativamente à quantificação do desgaste de flanco da ferramenta de corte, este apresenta um desgaste de cerca de metade nas ferramentas revestidas, quando comparado com iguais condições utilizando ferramentas não revestidas. Esta observação não está de acordo com o que tinha sido apurado por Bhowmick et al. (2015) e Bandapalli et al. (2018), onde as ferramentas revestidas apresentaram maior desgaste;
- No que toca aos mecanismos de desgaste das ferramentas de corte, ambas apresentam adesão, à semelhança do que foi observado por Bhowmick et al. (2015) com ferramentas revestidas com H-DLC na maquinagem de Alumínio. As ferramentas revestidas com TiAlN/DLC apresentam delaminação, levando à formação de zonas que servem de “alojamento” do material maquinado, levando à adesão do mesmo;
- Quando comparados os resultados obtidos, com o trabalho realizado por Castanheira, et al. (2021) no estudo de mecanismos de desgaste em ferramentas revestidas e não revestidas na fresagem de AMPCOLOY® 83, o revestimento dupla camada TiAlN/DLC demonstrou ser muito mais eficiente do que o revestimento multicamada de DLC e CrN, visto que este tipo de revestimento apenas apresentou uma melhoria mínima nos resultados para comprimentos de corte até 18 metros. Por outro lado, o revestimento de dupla camada TiAlN/DLC apresentou melhores resultados em todos os ensaios de maquinagem, e em todas as comparações efetuadas.

Os resultados obtidos apresentaram coerência entre as análises realizadas, tendo as ferramentas revestidas demonstrado melhores resultados. Estes resultados apresentaram-se particularmente relevantes à medida que o comprimento de corte aumenta. Também é visível uma redução considerável na ocorrência de quebra da aresta de corte para os casos das ferramentas revestidas, em iguais condições de ensaio.

5. CONCLUSÕES

De seguida irão ser descritas as principais conclusões retiradas do trabalho realizado e apresentado na presente dissertação.

5.1. Conclusões finais

Na presente dissertação, foi realizado um estudo comparativo do desempenho de ferramentas revestidas e não revestidas, com geometrias iguais na maquinagem da liga de Cobre-Berílio AMPCOLOY® 83. O revestimento das ferramentas foi estudado de forma exaustiva, permitindo perceber as suas características, tais como morfologia e composição química, e compreender o seu comportamento quando sujeitas a maquinagem. Foi utilizado um revestimento de dupla camada, TiAlN/DLC com transição gradiente entre ambas, sendo ainda detetada a presença de uma intercamada de Ti depositada para melhorar a adesão. Relativamente à sua morfologia, o revestimento apresenta uma estrutura colunar com morfologia tipo couve flor. Ainda relativamente ao revestimento estudado, este apresenta um reduzido valor de dureza, rondando os 5.6 GPa, e módulo de elasticidade de 93.2 GPa, influenciados pela camada exterior do revestimento, que exibe uma estrutura formada por átomos de Carbono, semelhantes à ligação característica da grafite, que originam um reduzido coeficiente de atrito, conferindo à ferramenta propriedades lubrificantes. Os testes de indentação e deslizamento (*“Scratch Test”*) e testes de indentação *Rockwell* (VDI), determinaram que a falha adesiva (F_{C2}) ocorre por volta da 35 N. Foi ainda observado um padrão de fissuração nos testes de indentação, uma falha classificada como aceitável (tipo HF2), de acordo com a Norma VDI 3198: 1991.

Os ensaios de maquinagem efetuados, permitiram fazer a comparação do desempenho das ferramentas de corte não revestidas e revestidas com TiAlN/DLC, na maquinagem de AMPCOLOY® 83, que se trata de uma liga de Cobre-Berílio. Os ensaios de maquinagem que foram realizados, permitiram ainda avaliar a influência da velocidade de avanço e do comprimento de corte na qualidade superficial produzida e no comportamento ao desgaste. Assim, é possível retirar as seguintes conclusões:

- Relativamente à rugosidade superficial da peça maquinada, foi detetada uma elevada influência da velocidade de avanço, com valores da rugosidade a aumentar até duas vezes nas ferramentas não revestidas, e entre três e quatro vezes para ferramentas não revestidas, quando a velocidade de avanço foi incrementada de 750 mm/min para 1500 mm/min. Contudo, as ferramentas revestidas produziram sempre melhores resultados, independentemente dos comprimentos de corte. As ferramentas não revestidas produziram qualidade superficial próxima das revestidas apenas para um comprimento de corte dos 18 metros, sendo que à medida que aumenta o comprimento de corte, existe um aumento exponencial da degradação da qualidade;
- A velocidade de avanço influenciou o comportamento ao desgaste das ferramentas de corte, sendo que ocorreu aumento do desgaste quando incrementada a velocidade de avanço. Para além disso, para comprimentos de corte mais elevados, o desgaste das ferramentas é mais significativo, com as ferramentas não revestidas a apresentarem maior desgaste. Contudo, o desgaste do flanco das ferramentas não revestidas apresentou uma

evolução exponencial em ensaios com velocidades de avanço mais elevadas. No que diz respeito as ferramentas revestidas apesar do aumento da velocidade o desgaste aumenta de forma linear para os comprimentos de corte testados;

- Em relação aos mecanismos de desgaste das ferramentas de corte não revestidas, foi possível observar que os principais mecanismos foram: adesão, formação de cratera e quebra da aresta de corte. Relativamente às ferramentas revestidas, o principal mecanismo observado foi a delaminação do revestimento. No entanto, também foram identificadas adesão e quebra da aresta de corte. A quebra da aresta de corte ocorre principalmente para uma velocidade de avanço de 1500 mm/min, sendo este fenómeno registado tanto nas ferramentas revestidas, como nas não revestidas.

As ferramentas revestidas apresentam um comportamento ao desgaste menos intenso e produzem uma melhor qualidade superficial, quando comparadas com as ferramentas não revestidas, com idênticas condições de ensaio. Genericamente, foram detetadas melhorias significativas no tempo de vida proporcionadas pelo revestimento da ferramenta de corte na maquinagem da liga AMPCOLOY® 83. Apesar de o revestimento ir sendo sujeito a delaminação, o mesmo proporciona uma maior resistência e vida útil da ferramenta. As ferramentas não revestidas originaram sempre um pior acabamento superficial da superfície maquinada e apresentaram maior desgaste. Isto indica que este revestimento é mais adequado para operações de maquinagem de ligas de Cobre-Berílio, para a estratégia de maquinagem utilizada.

Foi possível apurar também que a velocidade de avanço tem uma influência significativa na qualidade da superfície maquinada. Para velocidades de avanço mais reduzidas, foram obtidos valores de rugosidade superficial da peça maquinada mais baixos. Os ensaios realizados a uma velocidade de avanço de 715 mm/min produziram valores de rugosidade bastante satisfatórios, particularmente para ensaios com ferramentas revestidas.

De forma a retratar o estado final do trabalho desenvolvido, é possível observar na Tabela 30 os objetivos traçados inicialmente e os seus resultados.

Tabela 30 – Descrição dos objetivos traçados inicialmente e os seus resultados

Objetivo	Resultado
Estudar o revestimento de dupla camada TiAlN/DLC, analisando a sua composição química, dureza e comportamento ao desgaste	Cumprido
Compreender a influência da variação da velocidade de corte e avanço, largura de corte e profundidade, avanço por rotação no tempo de vida da ferramenta, desgaste resultante e qualidade superficial da peça maquinada;	Cumprido
Identificar os principais mecanismos de desgaste no revestimento da ferramenta, entre os quais adesão e delaminação, e verificar possível adesão do material de base ao revestimento.	Cumprido
Caracterizar a superfície maquinada e analisar a rugosidade superficial, e correlacionar com o desgaste do revestimento.	Cumprido
Aprofundar o conhecimento na área da maquinagem e parâmetros de corte, particularmente destinados à fresagem de uma liga de Cobre-Berílio (AMPCOLOY® 83).	Cumprido

5.2. Constrangimentos e trabalhos futuros

No desenrolar do presente projeto, foram encontrados diversos constrangimentos que, ao serem assinalados, podem ser levados em conta em trabalhos futuros. Estes são:

- Ferramentas apresentam custo elevado para a sua aquisição, e podem apresentar algumas diferenças entre si, originando resultados enviesados que deverão ser verificados cuidadosamente;
- Dificuldade em controlar o fluxo de injeção de lubrificante na zona de maquinagem;
- Material a maquinar, AMPCOLOY® 83 com um custo muito elevado. Deve ser tido em consideração que replicar testes para corroborar os resultados implica um custo extremamente elevado.

No decurso do projeto, vários trabalhos surgiram com interesse para a continuação deste trabalho, nomeadamente:

- Estudar outro tipo de revestimento, ou o mesmo com diferentes espessuras de camadas, na maquinagem de ligas de Cobre-Berílio;
- Averiguar a influência da estratégia de maquinagem no desgaste das ferramentas de corte, especialmente a aplicação de uma estratégia de maquinagem em espiral, evitando inúmeras “entradas” e “saídas” do bloco e o choque da ferramenta com o mesmo;
- Redução dos valores globais da rugosidade, por otimização dos parâmetros de corte;
- Analisar pormenorizadamente a influência da velocidade de corte na maquinagem deste material;
- Executar ensaios com intervalos de comprimentos de corte inferiores, permitindo obtenção de resultados mais detalhados;
- Realização de estudo do tempo de vida da ferramenta;
- Procurar controlar as condições de lubrificação ou realização de maquinagem sem lubrificação, verificando as propriedades lubrificantes do revestimento.

A elaboração da presente dissertação ira resultar na elaboração de dois artigos:

- Será realizado um artigo, com os resultados obtidos e do estudo realizado acerca da caracterização de revestimentos de dupla camada TiAlN/DLC, aplicados a ferramentas de carboneto de tungsténio utilizados na maquinagem, e da utilização e desempenho deste tipo de revestimento nos processos de maquinagem.
- Com os resultados obtidos de rugosidade superficial e de desgaste de ferramentas de corte, com e sem revestimento, será realizado um artigo com estudos comparativos da maquinagem da liga de cobre-berílio AMPCOLOY® 83, focado na comparação das vantagens da utilização das ferramentas com revestimentos dupla camada TiAlN/DLC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alagarsamy, S. V., Ravichandran, M., Meignanamoorthy, M., Sakthivelu, S., & Dineshkumar, S. (2020). Prediction of surface roughness and tool wear in milling process on brass (C26130) alloy by Taguchi technique. *Materials Today: Proceedings*, 21, 189–193.
<https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2019.04.219>
- Ali, M., & Ürgen, M. (2012). Diamond films grown without seeding treatment and bias by hot-filament CVD system. *Solid State Sciences*, 14(4), 540–544.
<https://doi.org/10.1016/J.SOLIDSTATESCIENCES.2012.01.015>
- An, Q., Chen, J., Tao, Z., Ming, W., & Chen, M. (2020). Experimental investigation on tool wear characteristics of PVD and CVD coatings during face milling of Ti6242S and Ti-555 titanium alloys. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 86, 105091.
<https://doi.org/10.1016/J.IJRMHM.2019.105091>
- Andrade, M. (2008). *Análise da morfologia e da resistência ao desgaste de revestimentos TiAlSiN efectuados por PVD*. <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/58371/2/Texto%20integral.pdf>
- Arunnath, A., & Masooth, P. (2021). Optimization of process parameters in CNC turning process on machining SCM440 steel by uncoated carbide and TiCN/Al₂O₃/TiN coated carbide tool under dry conditions. *Materials Today: Proceedings*, 45, 6253–6269.
<https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.10.699>
- Asfora, V. (2010). *Fluorescência de Raios X por dispersão de energia aplicada à caracterização de tijolos de sítios históricos de Pernambuco*.
<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/9476>
- Badiger, P. v., Desai, V., & Ramesh, M. R. (2018). Performance of DLC coated tool during machining of MDN431 alloyed steel. *Materials Today: Proceedings*, 5(9), 17360–17370.
<https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2018.04.149>
- Bandapalli, C., Sutaria, B. M., Prasad Bhatt, D. V., & Singh, K. K. (2018). Tool wear analysis of micro end mills - Uncoated and PVD coated TiAlN & AlTiN in high speed micro milling of titanium alloy - Ti-0.3Mo-0.8Ni. *Procedia CIRP*, 77, 626–629.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.191>
- Baptista, A., Pinto, G., Silva, F. J. G., Ferreira, A. A., Pinto, A. G., & Sousa, V. F. C. (2021). Wear Characterization of Chromium PVD Coatings on Polymeric Substrate for Automotive Optical Components. *Coatings 2021, Vol. 11, Page 555*, 11(5), 555.
<https://doi.org/10.3390/COATINGS11050555>

- Baptista, A., Silva, F. J. G., Porteiro, J., Míguez, J. L., Pinto, G., & Fernandes, L. (2018a). On the Physical Vapour Deposition (PVD): Evolution of Magnetron Sputtering Processes for Industrial Applications. *Procedia Manufacturing*, *17*, 746–757.
<https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2018.10.125>
- Baptista, A., Silva, F., Porteiro, J., Míguez, J., & Pinto, G. (2018). Sputtering Physical Vapour Deposition (PVD) Coatings: A Critical Review on Process Improvement and Market Trend Demands. *Coatings 2018, Vol. 8, Page 402*, *8*(11), 402.
<https://doi.org/10.3390/COATINGS8110402>
- Baptista, A., Silva, F., Porteiro, J., Míguez, J., Pinto, G., & Fernandes, L. (2018b, January 1). On the Physical Vapour Deposition (PVD): Evolution of Magnetron Sputtering Processes for Industrial Applications. *Procedia Manufacturing*, *17*, 746–757.
<https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2018.10.125>
- Barshilia, H. C., Ananth, A., Khan, J., & Srinivas, G. (2012). Ar + H₂ plasma etching for improved adhesion of PVD coatings on steel substrates. *Vacuum*, *86*(8), 1165–1173.
<https://doi.org/10.1016/J.VACUUM.2011.10.028>
- Batista, R. (2010). *Tendências do Corte por Arranque de Apara-Maquinagem* [Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto].
<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/58387/1/000143359.pdf>
- Behera, G. C., Thrinadh, J., & Datta, S. (2021). Influence of cutting insert (uncoated and coated carbide) on cutting force, tool-tip temperature, and chip morphology during dry machining of Inconel 825. *Materials Today: Proceedings*, *38*, 2664–2670.
<https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.08.332>
- Bhowmick, S., Banerji, A., & Alpas, A. T. (2015). Tribological behavior of Al–6.5%, –12%, –18.5% Si alloys during machining using CVD diamond and DLC coated tools. *Surface and Coatings Technology*, *284*, 353–364. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2015.08.073>
- Caliskan, H., Panjan, P., & Kurbanoglu, C. (2017). Hard Coatings on Cutting Tools and Surface Finish. In *Comprehensive Materials Finishing* (Vols. 3–3, pp. 230–242). Elsevier Inc.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.09178-5>
- Carlsson, J. O., & Martin, P. M. (2010). Chemical Vapor Deposition. *Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings: Science, Applications and Technology*, 314–363.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-2031-3.00007-7>
- Carneiro, P. (2020). *Estudo comparativo de maquinagem em Duplex 2205* [Instituto Superior de Engenharia do Porto]. <https://recipp.ipp.pt/handle/10400.22/17023>

- Casais, R. (2020). *Caracterização de revestimentos finos avançados efectuados por PVD* [Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto]. <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/126690>
- Casais, R., Monteiro, B., Silva, F., Andrade, F., Sousa, V., & Marques, M. (2022). Experimental study on the wear behavior of B4C and TiB2 monolayered PVD coatings under high contact loads. *Int J Adv Manuf Technol* 120, 6585–6604 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09182-4>
- Chang, Y. Y., & Lai, H. M. (2014). Wear behavior and cutting performance of CrAlSiN and TiAlSiN hard coatings on cemented carbide cutting tools for Ti alloys. *Surface and Coatings Technology*, 259(PB), 152–158. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2014.02.015>
- Chen, X., Li, C., Tang, Y., Li, L., Du, Y., & Li, L. (2019). Integrated optimization of cutting tool and cutting parameters in face milling for minimizing energy footprint and production time. *Energy*, 175, 1021–1037. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2019.02.157>
- Chowdhury, S., de Barra, E., & Laugier, M. T. (2005). Hardness measurement of CVD diamond coatings on SiC substrates. *Surface and Coatings Technology*, 193(1–3), 200–205. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2004.08.131>
- CNC Machining Projected. (2022). *CNC Machining Projected to Become \$129 Billion Industry by 2026*. <https://www.thomasnet.com/insights/cnc-machining-projected-to-be-100b-industry-by-2025/>
- Costa, A. L. M. (2012). *Estudo dos parâmetros de usinagem e seleção de ferramenta no torneamento CNC do aço SAE 4140 em condições reais de produção*. <https://www.researchgate.net/publication/304626398>
- Coxito, A. M. T. (2016). *Estudo de ligas de ouro por XRF e SEM-EDS*. <https://estudogeral.sib.uc.pt/handle/10316/32037>
- Čyviene, J., Laurikaitis, M., & Dudonis, J. (2005). Deposition of nanocomposite Zr–ZrO₂ films by reactive cathodic vacuum arc evaporation. *Materials Science and Engineering: B*, 118(1–3), 238–241. <https://doi.org/10.1016/J.MSEB.2004.12.036>
- Dehen, S., Segebade, E., Gerstenmeyer, M., Zanger, F., & Schulze, V. (2020). Milling parameter and tool wear dependent surface quality in micro-milling of brass. *Procedia CIRP*, 87, 95–100. <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2020.02.024>
- D’Orazio, A., El Mehtedi, M., Forcellese, A., Nardinocchi, A., & Simoncini, M. (2017). Tool wear and hole quality in drilling of CFRP/AA7075 stacks with DLC and nanocomposite TiAlN coated tools. *Journal of Manufacturing Processes*, 30, 582–592. <https://doi.org/10.1016/J.JMAPRO.2017.10.019>

- Du, H., Zhao, H., Xiong, J., & Xian, G. (2013). Effect of interlayers on the structure and properties of TiAlN based coatings on WC-Co cemented carbide substrate. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 37, 60–66.
<https://doi.org/10.1016/J.IJRMHM.2012.10.017>
- EN 1071-3:2005 - Advanced technical ceramics - Methods of test for ceramic coatings - Part 3: (n.d.). Retrieved December 18, 2022, from
<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/77dd1b60-08b3-490d-a1ec-85883c6b1238/en-1071-3-2005>
- Fernandes, L., Silva, F. J. G., Andrade, M. F., Alexandre, R., Baptista, A. P. M., & Rodrigues, C. (2017a). Improving the punch and die wear behavior in tin coated steel stamping process. *Surface and Coatings Technology*, 332, 174–189.
<https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2017.06.086>
- Fernandes, L., Silva, F. J. G., Andrade, M. F., Alexandre, R., Baptista, A. P. M., & Rodrigues, C. (2017b). Increasing the stamping tools lifespan by using Mo and B4C PVD coatings. *Surface and Coatings Technology*, 325, 107–119. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2017.06.043>
- Fernandes, L., Silva, F. J. G., Paiva, O. C., Baptista, A., & Pinto, G. (2018). Minimizing the Adhesion Effects in Food Packages Forming by the Use of Advanced Coatings. *Procedia Manufacturing*, 17, 886–894. <https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2018.10.141>
- Ferrawidia. (2022). *Ferrawidia | Fresas Intercambiáveis | Fresa de Corte*.
<http://www.ferrawidia.com.br/fresas-intercambiaveis.html>
- Ferreira, A. A., Silva, F. J. G., Pinto, A. G., & Sousa, V. F. C. (2021). Characterization of Thin Chromium Coatings Produced by PVD Sputtering for Optical Applications. *Coatings 2021*, Vol. 11, Page 215, 11(2), 215. <https://doi.org/10.3390/COATINGS11020215>
- Fischer-Cripps, A. C. (2006). Critical review of analysis and interpretation of nanoindentation test data. *Surface and Coatings Technology*, 200(14–15), 4153–4165.
<https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2005.03.018>
- Fox-Rabinovich, G., Paiva, J. M., Gershman, I., Aramesh, M., Cavelli, D., Yamamoto, K., Dosbaeva, G., & Veldhuis, S. (2016). Control of Self-Organized Criticality through Adaptive Behavior of Nano-Structured Thin Film Coatings. *Entropy 2016*, Vol. 18, Page 290, 18(8), 290.
<https://doi.org/10.3390/E18080290>
- Gabiccini, M., Bracci, A., & Battaglia, E. (2011). On the estimation of continuous mappings from cradle-style to 6-axis machines for face-milled hypoid gear generation. *Mechanism and Machine Theory*, 46(10), 1492–1506.
<https://doi.org/10.1016/J.MECHMACHTHEORY.2011.05.003>

- Gassner, M., Rebelo de Figueiredo, M., Schalk, N., Franz, R., Weiß, C., Rudigier, H., Holzschuh, H., Bürgin, W., Pohler, M., Czettel, C., & Mitterer, C. (2016). Energy consumption and material fluxes in hard coating deposition processes. *Surface and Coatings Technology*, 299, 49–55. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2016.04.062>
- Geremew, T. (2021). Review of Thin Film Deposition Technique and Its Application. *Review of Thin Film Deposition Technique and Its Application*. https://www.academia.edu/45048737/Review_of_Thin_Film_Deposition_Technique_and_Its_Application
- Global Milling Market. (2022). *Global Milling Machines Market 2017-2021*. <https://www.maschinenmarkt.international/global-milling-machines-market-2017-2021-a-586045/>
- Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Michael, J. R., Ritchie, N. W. M., Scott, J. H. J., & Joy, D. C. (2017). Scanning electron microscopy and x-ray microanalysis. *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*, 1–550. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6676-9/COVER>
- Gouveia, R. M., Silva, F. J. G., Reis, P., & Baptista, A. P. M. (2016). Machining Duplex Stainless Steel: Comparative Study Regarding End Mill Coated Tools. *Coatings 2016, Vol. 6, Page 51, 6(4)*, 51. <https://doi.org/10.3390/COATINGS6040051>
- Griffith, P. W., Wisbey, A., Shatwell, R. A., Ubhi, H. S., Meaden, G. M., & Loader, C. B. (1997). Diamond fibres by a hot filament CVD process. *Diamond and Related Materials*, 6(5–7), 822–825. [https://doi.org/10.1016/S0925-9635\(96\)00673-5](https://doi.org/10.1016/S0925-9635(96)00673-5)
- Groover, M. P. (2013). *Fundamentals of modern manufacturing : materials, processes, and systems*. 1101. <https://www.fcusd.org/cms/lib/CA01001934/Centricity/Domain/4529/Fundamentals%20of%20Modern%20Manufacturing%20Materials%20%20Processes%20and%20Systems%20%204th%20Edition.pdf>
- Harling, V. N. van. (2021). Comparative analysis of speed and cutting results of st-37 soft steel using HSS and carbide chisel knife. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1088(1), 012068. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1088/1/012068>
- He, Q., Paiva, J. M., Kohlscheen, J., Beake, B. D., & Veldhuis, S. C. (2020). An integrative approach to coating/carbide substrate design of CVD and PVD coated cutting tools during the machining of austenitic stainless steel. *Ceramics International*, 46(4), 5149–5158. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2019.10.259>
- Helmut Fischer. (2022). *DUREZA DE NANO REVESTIMENTOS EM LENTES DE ÓCULOS*. <https://www.helmut-fischer.com/Pt/Dureza-de-Nano-Revestimentos-Em-Lentes-de->

- Oculos. <https://www.helmut-fischer.com/pt/dureza-de-nano-revestimentos-em-lentes-de-oculos>
- Hirmke, J., Hempel, F., Stancu, G. D., Röpcke, J., Rosiwal, S. M., & Singer, R. F. (2006). Gas-phase characterization in diamond hot-filament CVD by infrared tunable diode laser absorption spectroscopy. *Vacuum*, *80*(9), 967–976. <https://doi.org/10.1016/J.VACUUM.2005.12.009>
- Holmberg, K., & Matthews, A. (1994). *Coatings Tribology – Properties, Techniques and Applications in Surface Engineering: Vol. Tribology Series* (D. Dowson, Ed.; 28th ed.). Elsevier.
- Holmberg, K., Ronkainen, H., & Matthews, A. (2000). Tribology of thin coatings. *Ceramics International*, *26*(7), 787–795. [https://doi.org/10.1016/S0272-8842\(00\)00015-8](https://doi.org/10.1016/S0272-8842(00)00015-8)
- Hsieh, J. H., Liang, C., Yu, C. H., & Wu, W. (1998). Deposition and characterization of TiAlN and multi-layered TiN/TiAlN coatings using unbalanced magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*, *108–109*, 132–137. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(98\)00684-7](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(98)00684-7)
- Hu, Z. (2017). Characterization of Materials, Nanomaterials, and Thin Films by Nanoindentation. *Microscopy Methods in Nanomaterials Characterization*, 165–239. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-46141-2.00006-7>
- International Organization for Standardization. (1989). *ISO 8688-2 Tool life testing in milling-Part 2 : End milling*.
- ISO. (2015). *ISO 14577-1, -2, -3, Metallic Materials - Instrumented Indentation Test for Hardness and Materials Parameters - Part 1: Test Method, Part 2: Verification and Calibration of Testing Machines, Part 3: Calibration*. International Organization for Standardization. https://infostore.saiglobal.com/preview/98705521348.pdf?sku=872107_SAIG_NSAI_NSAI_2073598
- Ji, W., Zou, B., Huang, C., Huang, C., Liu, Y., & Guo, P. (2016). Microstructure and mechanical properties of self-diffusion gradient cermet composite tool materials with different characteristics of surface layer. *Ceramics International*, *42*(16), 19156–19166. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2016.09.078>
- Ji, W., Zou, B., Zhang, S., Xing, H., Yun, H., & Wang, Y. (2018). Design and fabrication of gradient cermet composite cutting tool, and its cutting performance. *Journal of Alloys and Compounds*, *732*, 25–31. <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2017.10.187>
- Kainz, C., Schalk, N., Tkadletz, M., Mitterer, C., & Czettel, C. (2019). Microstructure and mechanical properties of CVD TiN/TiBN multilayer coatings. *Surface and Coatings Technology*, *370*, 311–319. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2019.04.086>
- Kannan, S., & Ghosh, A. (2014). Dry Machining of AA7075 by H-DLC Coated Carbide End Mill. *Procedia Materials Science*, *5*, 2615–2621. <https://doi.org/10.1016/J.MSPRO.2014.07.522>

- Khoury, H. J., Araújo, R., Barreto, S. D. B., & Asfora, V. K. (2019). Fluorescência de raios x por dispersão de energia aplicada à caracterização de tijolos de sítios históricos de pernambuco. *Clio Arqueológica*, 34(1), 163. <https://doi.org/10.20891/CLIO.V34N1P163-193>
- Kordabad, A. B., & Boroushaki, M. (2020). Emotional Learning Based Intelligent Controller for MIMO Peripheral Milling Process. *J. Appl. Comput. Mech*, 6(3), 480–492. <https://doi.org/10.22055/JACM.2019.30188.1696>
- Korhonen, H., Syväluoto, A., Leskinen, J. T. T., & Lappalainen, R. (2018). Optically transparent and durable Al₂O₃ coatings for harsh environments by ultra short pulsed laser deposition. *Optics & Laser Technology*, 98, 373–384. <https://doi.org/10.1016/J.OPTLASTEC.2017.07.050>
- Kulkarni, H. B., Nadakatti, M. M., Kulkarni, S. C., & Kulkarni, R. M. (2020). Investigations on effect of nanofluid based minimum quantity lubrication technique for surface milling of Al7075-T6 aerospace alloy. *Materials Today: Proceedings*, 27, 251–256. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2019.10.127>
- Lakshmanan, S., & Xavier, M. A. (2014). Performance of Coated and Uncoated Inserts during Intermittent Cut Milling of AISI 1030 Steel. *Procedia Engineering*, 97, 372–380. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2014.12.261>
- Li, C., Chen, X., Tang, Y., & Li, L. (2017). Selection of optimum parameters in multi-pass face milling for maximum energy efficiency and minimum production cost. *Journal of Cleaner Production*, 140, 1805–1818. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.07.086>
- Lim, S. C., & Lim, C. Y. H. (2001). Effective use of coated tools — the wear-map approach. *Surface and Coatings Technology*, 139(2–3), 127–134. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(00\)01163-4](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(00)01163-4)
- Liu, S. H., Trelles, J. P., Murphy, A. B., He, W. T., Shi, J., Li, S., Li, C. J., Li, C. X., & Guo, H. B. (2021). Low-pressure plasma-induced physical vapor deposition of advanced thermal barrier coatings: Microstructures, modelling and mechanisms. *Materials Today Physics*, 21, 100481. <https://doi.org/10.1016/J.MTPHYS.2021.100481>
- Liu, W., Chu, Q., Zeng, J., He, R., Wu, H., Wu, Z., & Wu, S. (2017). PVD-CrAlN and TiAlN coated Si₃N₄ ceramic cutting inserts-2. High speed face milling performance and wear mechanism study. *Ceramics International*, 43(12), 9488–9492. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2017.04.127>
- Lu, Y., Huang, G., Wang, S., Mi, C., Wei, S., Tian, F., Li, W., Cao, H., & Cheng, Y. (2021). A review on diamond-like carbon films grown by pulsed laser deposition. *Applied Surface Science*, 541, 148573. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2020.148573>
- Lundin, D., Gudmundsson, J. T., & Minea, T. (2019). High power impulse magnetron sputtering : Fundamentals, technologies, challenges and applications. *High Power Impulse Magnetron*

- Sputtering: Fundamentals, Technologies, Challenges and Applications*, 1–384.
<https://doi.org/10.1016/C2016-0-02463-4>
- Mahmood, J., Mustafa, G. e., & Ali, M. (2022). Accurate estimation of tool wear levels during milling, drilling and turning operations by designing novel hyperparameter tuned models based on LightGBM and stacking. *Measurement*, *190*, 110722.
<https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2022.110722>
- Manarelli, F. H. (2018). *Estudo do desgaste das ferramentas no microfresamento frontal*.
<https://doi.org/10.17616/R31N39>
- Mann, A. (2005). Nanoindentation. *Surfaces and Interfaces for Biomaterials*, 225–247.
<https://doi.org/10.1533/9781845690809.2.225>
- Martin, P. M. (2000). *Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings : Science, Applications and Technology*. (William Andrew, Ed.; 3rd Edition). Elsevier Science.
- Martinho, R. (2009). *Revestimentos PVD mono e multicamada para moldes utilizados na injeção de plásticos reforçados* [Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto].
<https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/59162>
- Martinho, R. P., Silva, F. J. G., Martins, C., & Lopes, H. (2019). Comparative study of PVD and CVD cutting tools performance in milling of duplex stainless steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *102*(5–8), 2423–2439.
<https://doi.org/10.1007/S00170-019-03351-8>
- Mattox, D. M. (2003). The Foundations of Vacuum Coating Technology. In *The Foundations of Vacuum Coating Technology*. Elsevier. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-10329-6/COVER>
- Mattox, D. M. (2010). Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing. In *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing*. Elsevier Inc.
<http://www.sciencedirect.com:5070/book/9780815520375/handbook-of-physical-vapor-deposition-pvd-processing>
- May, P. W. (1995). CVD diamond: a new technology for the future? *Endeavour*, *19*(3), 101–106.
[https://doi.org/10.1016/0160-9327\(95\)97494-S](https://doi.org/10.1016/0160-9327(95)97494-S)
- Meng, Y., Xu, J., Jin, Z., Prakash, B., & Hu, Y. (2020). A review of recent advances in tribology. *Friction* *2020* 8:2, *8*(2), 221–300. <https://doi.org/10.1007/S40544-020-0367-2>
- Mersni, W., Boujelbene, M., Salem, S. ben, & Singh, H. P. (2020). Machining time and quadratic mean roughness optimization in ball end milling of titanium alloy Ti-6Al-4V – Aeronautic field. *Materials Today: Proceedings*, *26*, 2619–2624.
<https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.02.553>

- Moriya, T., Nakamoto, K., Ishida, T., & Takeuchi, Y. (2010). Creation of V-shaped microgrooves with flat-ends by 6-axis control ultraprecision machining. *CIRP Annals*, 59(1), 61–66.
<https://doi.org/10.1016/J.CIRP.2010.03.054>
- Mosińska, L., Popielarski, P., Fabisiak, K., & Dychalska, A. (2020). Effects of hydrogen termination of CVD diamond layers. *Optical Materials*, 101, 109676.
<https://doi.org/10.1016/J.OPTMAT.2020.109676>
- Neves, T. B. (2017). *Definição de parâmetros de utilização para ferramentas de corte com insertos PCD* [Instituto Politécnico de Leiria]. <https://iconline.ipleiria.pt/handle/10400.8/2580>
- Nunes, V., Silva, F. J. G., Andrade, M. F., Alexandre, R., & Baptista, A. P. M. (2017). Increasing the lifespan of high-pressure die cast molds subjected to severe wear. *Surface and Coatings Technology*, 332, 319–331. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2017.05.098>
- Ohring, M. (2002). Materials Science of Thin Films. In *Materials Science of Thin Films* (Vol. 2). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-524975-1.X5000-9>
- Patnaik, L., Ranjan Maity, S., & Kumar, S. (2021). DLC/CrN or AlCrN/CrN composite films: The better candidate in terms of anti-Wear performance and lesser ion release in hip implant. *Materials Today: Proceedings*, 44, 1214–1220.
<https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.11.242>
- Peter, I., Rosso, M., & Gobber, F. S. (2015). Study of protective coatings for aluminum die casting molds. *Applied Surface Science*, 358, 563–571.
<https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2015.08.013>
- Pinto, E., Pinto, E. P., Ramos, G. Q., & Filho, H. D. da F. (2015). O Microscópio de Força Atômica (AFM): importante ferramenta no estudo da morfologia de superfícies na escala nanométrica. *Estação Científica (UNIFAP)*, 3(2), 41–50.
<https://periodicos.unifap.br/index.php/estacao/article/view/1167>
- Reddy, V. G., & Kumara Swamy, M. (2012). Modeling and Analysis of a Surface Milling Cutter Using Finite Element Analysis. *International Journal of Engineering Research and Development*. www.ijerd.com
- Reis, P. (2014). *Estudo comparativo do comportamento de diferentes ferramentas na fresagem de aços duplex* [Instituto Superior de Engenharia do Porto].
<https://recipp.ipp.pt/handle/10400.22/6315>
- Robertson, J. (2002). Diamond-like amorphous carbon. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 37(4–6), 129–281. [https://doi.org/10.1016/S0927-796X\(02\)00005-0](https://doi.org/10.1016/S0927-796X(02)00005-0)
- Saketi, S., & Olsson, M. (2017). Influence of CVD and PVD coating micro topography on the initial material transfer of 316L stainless steel in sliding contacts – A laboratory study. *Wear*, 388–389, 29–38. <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2016.12.003>

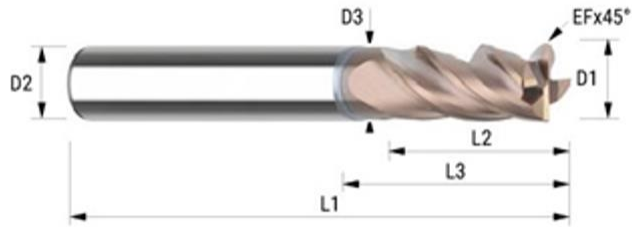
- Salem, A., Hegab, H., & Kishawy, H. A. (2021). An integrated approach for sustainable machining processes: Assessment, performance analysis, and optimization. *Sustainable Production and Consumption*, 25, 450–470. <https://doi.org/10.1016/J.SPC.2020.11.021>
- Sandvik. (2017). *Manual técnico de treinamento*. www.sandvik.coromant.com
- Sandvik. (2022a). *Desgaste das arestas de corte*. <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/wear-on-cutting-edges>
- Sandvik. (2022b). *Linha do tempo*. <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/aboutus/our-history/pages/timeline.aspx>
- Sandvik. (2022c). *Materiais de ferramentas de corte*. <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/pages/cutting-tool-materials.aspx>
- Sandvik. (2022d). *Problemas e soluções em cortes e canais*. <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/parting-and-grooving/troubleshooting-parting-and-grooving>
- Santos, G., da Costa, D. D., Amorim, F. L., & Torres, R. D. (2007). Characterization of DLC thin film and evaluation of machining forces using coated inserts in turning of Al–Si alloys. *Surface and Coatings Technology*, 202(4–7), 1029–1033. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2007.07.100>
- Santos, S. C., Sales, W. F., da Silva, F. J., Franco, S. D., & da Silva, M. B. (2004). Tribological characterisation of PVD coatings for cutting tools. *Surface and Coatings Technology*, 184(2–3), 141–148. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2003.10.153>
- Schalk, N., Tkadletz, M., & Mitterer, C. (2022). Hard coatings for cutting applications: Physical vs. chemical vapor deposition and future challenges for the coatings community. *Surface and Coatings Technology*, 429, 127949. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2021.127949>
- Shihan, M., Chandradass, J., & Kannan, T. T. M. (2021). Investigation of vibration analysis during end milling process of monel alloy. *Materials Today: Proceedings*, 39, 695–699. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.09.193>
- Silva, F. (2001). *Estudo da estrutura e comportamento tribológico de revestimentos duros e ultra-duros executados no vácuo* (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Ed.). Departamento de Engenharia Mecânica. <https://repositorio.aberto.up.pt/handle/10216/11111>
- Silva, F. (2022). *Revestimentos avançados realizados em vácuo e sua caracterização - Processos Avançados de Fabrico*.
- Silva, F. J. G., Martinho, R. P., Martins, C., Lopes, H., & Gouveia, R. M. (2019). Machining GX2CrNiMoN26-7-4 DSS alloy: Wear analysis of TiAlN and TiCN/Al₂O₃/TiN coated carbide

- tools behavior in rough end milling operations. *Coatings*, 9(6).
<https://doi.org/10.3390/COATINGS9060392>
- Silva, F., Martinho, R., Alexandre, R., & Baptista, A. (2011). Increasing the wear resistance of molds for injection of glass fiber reinforced plastics. *Wear*, 271(9–10), 2494–2499.
<https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2011.01.074>
- Silva, F., Neto, M. A., Fernandes, A. J. S., Costa, F. M., Oliveira, F. J., & Silva, R. F. (2009). Adhesion and wear behaviour of NCD coatings on Si 3N 4 by micro-abrasion tests. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 9(6), 3938–3943. <https://doi.org/10.1166/JNN.2009.NS93>
- Silva, F., Casais, R., Baptista, A., Marques, J., Sousa, V., & Alexandre, R. (2022). Comparative Study of the Wear Behavior of B4C Monolayered and CrN/CrCN/DLC Multilayered Physical Vapor Deposition Coatings Under High Contact Loads: An Experimental Analysis. *Journal of Tribology* <https://doi.org/10.1115/1.4051226>
- Sokovic, M., Kopac, J., Dobrzanski, L., Mikula, J., Golombek, K., & Pakula, D. (2006). Cutting Characteristics of PVD and CVD-Coated Ceramic Tool Inserts. *Tribology in Industry*, 28.
<http://www.tribology.fink.rs/journals/2006/1-2/1.pdf>
- Sousa, V., Castanheira, J., Silva, F., Fecheira, J., Pinto, G., & Baptista, A. (2021). Wear behavior of uncoated and coated tools in milling operations of ampco (Cu-be) alloy. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(16). <https://doi.org/10.3390/APP11167762>
- Sousa, V. F. C., & Silva, F. J. G. (2020). Recent Advances on Coated Milling Tool Technology—A Comprehensive Review. *Coatings 2020, Vol. 10, Page 235, 10(3)*, 235.
<https://doi.org/10.3390/COATINGS10030235>
- Sousa, V. F. C., Silva, F. J. G., Fecheira, J. S., Lopes, H. M., Martinho, R. P., Casais, R. B., & Ferreira, L. P. (2020). Cutting Forces Assessment in CNC Machining Processes: A Critical Review. *Sensors 2020, Vol. 20, Page 4536, 20(16)*, 4536. <https://doi.org/10.3390/S20164536>
- Sousa, V., & Silva, F. (2020a). Recent Advances in Turning Processes Using Coated Tools—A Comprehensive Review. *Metals 2020, Vol. 10, Page 170, 10(2)*, 170.
<https://doi.org/10.3390/MET10020170>
- Sousa, V., & Silva, F. (2020b). Recent Advances on Coated Milling Tool Technology—A Comprehensive Review. *Coatings 2020, Vol. 10, Page 235, 10(3)*, 235.
<https://doi.org/10.3390/COATINGS10030235>
- Sousa, V., Silva, F., Alexandre, R., Fecheira, J. S., & Silva, F. P. N. (2021). Study of the wear behaviour of TiAlSiN and TiAlN PVD coated tools on milling operations of pre-hardened tool steel. *Wear*, 476, 203695. <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2021.203695>

- Sousa, V., Silva, F. J. G., Pinto, G. F., Baptista, A., & Alexandre, R. (2021). Characteristics and wear mechanisms of TiAlN-based coatings for machining applications: A comprehensive review. In *Metals* (Vol. 11, Issue 2, pp. 1–49). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/met11020260>
- Szigety, M., Bobrovsky, R., Czánová, T., & Pilc, J. (2012). STUDY OF PRIMARY CONTACT IN PROCESS OF FACE MILLING. *ADVANCES IN MANUFACTURING SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 36(4). <https://doi.org/10.2478/v10264-012-0025-0>
- TecTron. (2022). *Sistema de usinagem a 90° para aplicações universais e de desbaste*. Ceratizit. http://www.tectronmetalduro.com.br/index.php?src=produto&produto=maximill_211
- Thakur, A., & Gangopadhyay, S. (2016). Influence of tribological properties on the performance of uncoated, CVD and PVD coated tools in machining of Incoloy 825. *Tribology International*, 102, 198–212. <https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2016.05.027>
- Toh, C. K. (2004). Surface topography analysis in high speed finish milling inclined hardened steel. *Precision Engineering*, 28(4), 386–398. <https://doi.org/10.1016/J.PRECISIONENG.2004.01.001>
- Tracton, A. A. (2005). *Coatings technology handbook*. Taylor & Francis.
- Trent, E. M. (Edward M., & Wright, P. Kenneth. (2000). Metal cutting, 4th ed. *Butterworth-Heinemann, Boston*, 446.
- Ucun, I., Aslantas, K., & Bedir, F. (2015). The performance Of DLC-coated and uncoated ultra-fine carbide tools in micromilling of Inconel 718. *Precision Engineering*, 41, 135–144. <https://doi.org/10.1016/J.PRECISIONENG.2015.01.002>
- Vercammen, K., Haefke, H., Gerbig, Y., van Hulsel, A., Pflüger, E., & Meneve, J. (2000). A comparative study of state-of-the-art diamond-like carbon films. *Surface and Coatings Technology*, 133–134, 466–472. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(00\)00925-7](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(00)00925-7)
- Vereschaka, A., Fyodorov, S., Seleznev, A., Bolsunovskiy, S., Titov, S., & Bolsunovskaya, T. (2022). Development of nitride and DLC coatings for high performance milling of CFRP products. *Procedia CIRP*, 107, 417–421. <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2022.05.001>
- Vidakis, N., Antoniadis, A., & Bilalis, N. (2003). The VDI 3198 indentation test evaluation of a reliable qualitative control for layered compounds. *Journal of Materials Processing Technology*, 143–144(1), 481–485. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00300-5](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00300-5)
- Wickramasinghe, K. C., Sasahara, H., Rahim, E. A., & Perera, G. I. P. (2021). Recent advances on high performance machining of aerospace materials and composites using vegetable oil-based metal working fluids. *Journal of Cleaner Production*, 310, 127459. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.127459>
- Wojciechowski, S., Maruda, R. W., Barrans, S., Nieslony, P., & Krolczyk, G. M. (2017). Optimisation of machining parameters during ball end milling of hardened steel with various surface

- inclinations. *Measurement*, 111, 18–28.
<https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2017.07.020>
- Wrublak, O., Alberto Pilatti, L., & Pedroso, B. (2008). *Parâmetros e métodos de usinagem e sua relação com os custos do processo e o acabamento final do produto*.
http://www.4eetcg.uepg.br/painel/64_1.pdf
- Yokota, T., Sawa, T., Yokouchi, M., Tozawa, K., Anzai, M., & Aizawa, T. (2014). Frictional properties of diamond-like carbon coated tool in dry intermittent machining of aluminum alloy 5052. *Precision Engineering*, 38(2), 365–370.
<https://doi.org/10.1016/J.PRECISIONENG.2013.11.007>
- Zhou, X., Wang, K., Li, C., Wang, Q., Wu, S., & Liu, J. (2019). Effect of ultrafine gradient cemented carbides substrate on the performance of coating tools for titanium alloy high speed cutting. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 84, 105024.
<https://doi.org/10.1016/J.IJRMHM.2019.105024>
- Ziberov, M., de Oliveira, D., da Silva, M. B., & Hung, W. N. P. (2020). Wear of TiAlN and DLC coated microtools in micromilling of Ti-6Al-4V alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, 56, 337–349. <https://doi.org/10.1016/J.JMAPRO.2020.04.082>
- Zuo, J. Y., Lin, Y. X., Zheng, J. C., Zhong, P., & He, M. (2019). An investigation of thermal-mechanical interaction effect on PVD coated tool wear for milling Be/Cu alloy. *Vacuum*, 167, 271–279. <https://doi.org/10.1016/J.VACUUM.2019.06.017>

ANEXO A – Parâmetros de corte e dimensões 998.063.992



D1 (Diâmetro):	6,00
D2 (Diâmetro do eixo):	6,00
L2 (Comprimento de corte):	13
L1 (Comprimento total):	57
D3 (Liberação de diâmetro):	5,50
L3 (Comprimento liberando):	21
EF (Chanfro canto):	0,13
Z (Número de navalhas):	4
Tipo de encabadoiro:	HA

Parametros de corte

Acabamento		Desbaste	
ap (mm) Profundi. de corte	ae (mm) Largura de corte	ap (mm) Profundi. de corte	ae (mm) Largura de corte
6,000	3,000	6,000	6,000
vc (m/min) Velocidade de corte	fz (mm) Avanço por navalha	vc (m/min) Velocidade de corte	fz (mm) Avanço por navalha
117	0,029	83	0,024
n (U/min) Rotação	vf (mm/min) Velocidade de avanço	n (U/min) Rotação	vf (mm/min) Velocidade de avanço
6.207	715	4.389	425

ANEXO B – Revestimento DiaPlus TiAlN\DLc



FICHA DE PRODUTO

TEandM - Tecnologia e Engenharia de Materiais, S.A.
Parque Industrial de Taveiro Lotes 41 e 42
3040 Coimbra Portugal
(T) 351.239 980 430 (F) 351.239980 439
(E) tem@teandm.pt
http://www.teandm.com

Revestimento
PVD

Ano: 2004

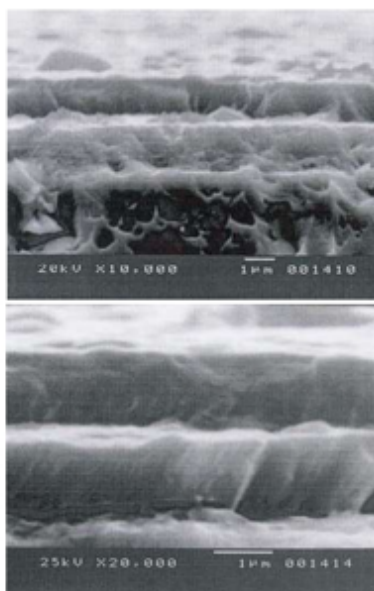
Ref:

DiaPlus

Código: 6847

Caracterização

Estrutura



Estrutura colunar de base completada com camada amorfa de Carbono.

Propriedades Típicas

(Suporte: Aço rápido M2)

(a) Espessura (μm)	2 a 5
(b) Microdureza (HV 0,05)	3100 a 3300
(c) Ultra Microdureza (HV 0,01)	3300 a 5050
(d) Coeficiente de Atrito (DIN 100 Cr6)	0,2 a 0,3
(e) Carga Crítica de Adesão (N)	44 a 49
Módulo de Elasticidade (N/mm^2) $\times 10^3$	180 a 190
Temperatura Máxima de Serviço ($^{\circ}\text{C}$)	850
Cor	Cinzeno / Preto

Características Gerais

Muito elevada resistência ao desgaste e baixo coeficiente de atrito. Elevadas dureza e resistência à oxidação a alta temperatura. Elevado coeficiente de dilatação térmico. Boa Tenacidade. Boa resistência à corrosão. Revestimento da família dos "DLC - Diamond Like Carbon".

Aplicações Típicas

Ferramentas de corte por arranque de apra: revestimento de ferramentas em metal duro ou aço rápido especialmente concebido para corte de Alumínio e suas ligas. Materiais de difícil corte. Corte de materiais a seco ou com pouca refrigeração.

Moldes de Injecção: componentes de moldes sujeitos a altas temperaturas como a na injeção de ligas de Alumínio e outras ligas leves. Componentes de moldes de injeção de plásticos submetidos a forte desgaste, corrosão e fenómenos de gripagem. A melhor solução para revestimento de elementos móveis sujeitos à fricção metal-metal com possibilidade de gripagem.

Ferramentas de Conformação: revestimento de ferramentas de corte, estampagem e conformação plástica de aços, ligas de Alumínio, de Cobre e latões. Moldes para prensagem de pós.

Aplicações de desgaste em geral.

Normas de Referência: (a) Pr EN 1071-2; (b) ASTM E 384-99; (c) Pr ENV 1071-7; (d) ASTM G 99-95; (e) Pr EN 1071-3.

Cod: EP 7.8

pág. 1 / 1

ANEXO C – Material a maquinar AMPCOLOY® 83



AMPCO METAL
Excellence in engineered alloys

Technical Data Sheet AMPCOLOY® 83 Forgings

Nominal composition:

Beryllium	(Be)	1.9%
Cobalt + Nickel	(Co + Ni)	0.5%
Others		0.5% max.
Copper	(Cu)	balance

Specifications:

EN	101C	A4/2
D	DIN 17672	W. Nr. 2.1247
F	AFNOR	UBe2
GB	BS	
USA	CDA RWMA	C17200 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 ³	8.26
Coefficient of expansion α	10 ⁻⁶ / K	17.5
Thermal conductivity λ	W / m · K	106
Electrical conductivity γ	m / Ω · mm ²	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.

ANEXO D – Fluido de corte - Alusol SL 61 XBB



Product Data

Alusol™ SL 61 XBB

High performance semi-synthetic metalworking fluid

Description

Castrol Alusol™ SL 61 XBB (previously called Alusol RBF) is a high performance semi-synthetic metalworking fluid which is boron, formaldehyde releasing agent and chlorine-free. It contains an additive package that may help to enhance machining performance and surface finish. It also provides excellent product stability which helps to lower the overall operational costs.

Alusol SL 61 XBB is suitable for large central systems and single sump machines.

Application

Alusol SL 61 XBB is especially designed for the machining of aluminium alloys. The product can also be used for the machining of ferrous alloys.

suggested core application possible application, please consult Castrol representative prior to use

	Cast Iron	Low-medium alloyed steel	High alloyed - stainless steel	Aluminium alloys	Magnesium alloys	Yellow metals
Grinding						
Milling, Turning (general machining)						
Drilling						
Reaming, Tapping						
Broaching						

Advantages

- Extended fluid life can help to reduce maintenance and downtime
- Low foam in recommended water conditions (see details below)
- Lubrication package designed to try to help enhance tool life and improve surface finish on aluminium machining
- Good wetting properties can help to reduce coolant drag out and help deliver cleaner machine tools and components
- Boron free to meet boron free waste requirements where applicable
- Chlorine, formaldehyde releasing agent and nitrite free which help you to fulfil aspects of legislative requirements and waste treatment requirements where applicable

Typical Characteristics

Name	Method	Units	Alusol SL 61 XBB
Concentrate			
Appearance	Visual		Amber
Mineral oil content	Calculated	Wt%	35
Emulsion			
Appearance	Visual		milky
pH (5%)	DIN 51369 ASTM E70-97		9,3
Refractometer Factor			1,0

Subject to usual manufacturing tolerances.

Recommended Concentrations

Grinding	6-7 %
General Machining	6-8 %
Drilling	6-10%
Reaming and Tapping	6-10%
Broaching	6-10%
Water range	100 – 600 ppm CaCO ₃

Additional Information

	Boron	Formaldehyde releasing agent	EP-Ester	Amines	Chlorine
Additives					

Storage

To avoid product deterioration always keep the container/drum tightly sealed. Store the product in a cool, dry place away from direct sunlight. Prevent exposure to frost and avoid water ingress. For optimum product stability, it is preferable to store the product indoors between 5°C and 45 °C / 41°F and 113°F.

For more details, please refer to the product safety data sheet.

This product was previously called Alusol RBF. The name was changed in 2015.

Alusol™ SL 61 XBB
14 May 2018
Castrol, the Castrol logo and related marks are trademarks of Castrol Limited, used under licence.

This data sheet and the information it contains is believed to be accurate as of the date of printing. However, no warranty or representation, express or implied, is made as to its accuracy or completeness. Data provided is based on standard tests under laboratory conditions and is given as a guide only. Users are advised to ensure that they refer to the latest version of this data sheet. It is the responsibility of the user to evaluate and use products safely, to assess suitability for the intended application and to comply with all applicable laws and regulations. Material Safety Data Sheets are available for all our products and should be consulted for appropriate information regarding storage, safe handling, and disposal of the product. No responsibility is taken by either BP plc or its subsidiaries for any damage or injury resulting from abnormal use of the material, from any failure to adhere to recommendations, or from hazards inherent in the nature of the material. All products, services and information supplied are provided under our standard conditions of sale. You should consult our local representative if you require any further information.

Castrol (UK) Limited, PO BOX 352, Chertsey Road, Sunbury On Thames, Middlesex, TW16 9AW
Orders/Enquiries: 0345 9645111 Technical Enquiries: 0345 082 1719
www.castrol.com/industrial

Page: 2/2