



# ESTUDO DOS MECANISMOS DE DESGASTE EM FERRAMENTAS REVESTIDAS COM TiAlTaN, NA FRESAGEM DE AMPCO

FRANCISCA RIBEIRO DE NOGUEIRA

outubro de 2023

# ESTUDO DOS MECANISMOS DE DESGASTE EM FERRAMENTAS REVESTIDAS COM TiAlTaN, NA FRESAGEM DE AMPCO

Francisca Ribeiro de Nogueira

**2023**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

# ESTUDO DOS MECANISMOS DE DESGASTE EM FERRAMENTAS REVESTIDAS COM TiAlTaN, NA FRESAGEM DE AMPCO

Francisca Ribeiro de Nogueira

1181004

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor Francisco José Gomes da Silva e coorientação do Doutor Filipe Daniel Fernandes, Mestre Vítor Sousa Crespim Sousa e Mestre Andresa Baptista da Silva.

**2023**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos os aqueles que de alguma maneira contribuíram para que isto fosse possível.

Em primeiro lugar, agradecer ao Professor Doutor Francisco José Gomes da Silva pelas oportunidades que me deu ao longo de todo o percurso, que me proporcionaram que me tornasse uma pessoa e profissional mais capaz, mais sabedora, com mais competências, não só a nível científico, mas também no que diz respeito ao desenvolvimento de *soft skills*.

Aos meus coorientadores, Professor Doutor Filipe Daniel Fernandes e ao Mestre Vítor Sousa Crespim Sousa, por se mostrar sempre disponíveis para esclarecer qualquer tipo de dúvida e ajudar no que fosse necessário, e à Mestre Andresa Baptista da Silva.

Ao Dr. Rui Rocha, técnico de Microscopia Eletrónica de Varrimento do Centro de Materiais da Universidade do Porto, pela disponibilidade prestada ao longo das sessões de microscopia, tanto pela obtenção de imagens como pela pré-disposição em esclarecer todas as dúvidas existentes.

Ao técnico José Bouças, do Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial pelo acompanhamento e esclarecimentos ao longo de todos os ensaios de maquinaria.

À Engenheira Fátima Andrade, técnica do Laboratório de Metalografia do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), pelo auxílio na preparação das amostras.

Às empresas INOVATOOLS, S.A. e TEandM – Tecnologia, Engenharia e Materiais pelo material disponibilizado para que fosse possível realizar todo o procedimento experimental.

Ao meu colega André Pedroso por toda a disponibilidade e ajuda prestada desde o primeiro dia.

A todos os colegas do grupo DRIVOLUTION e demais intervenientes que me deram a oportunidade de trocar ideias e aprofundar conhecimento.

À minha família e amigos, que constituíram um papel fundamental no decorrer de todo o processo, pelo apoio incondicional, amizade, suporte, motivação, encorajamento e incentivo constante, que fizeram com que o alcance deste objetivo fosse conseguido.

A todos os que direta ou indiretamente contribuíram para que o objetivo fosse atingido, o meu sincero obrigada.

página propositadamente em branco

## RESUMO

Ao longo dos anos tem-se verificado uma constante evolução nos diferentes materiais desenvolvidos para a indústria e nos processos de maquinagem por arranque de aparas. O desenvolvimento de ferramentas de corte com recurso à aplicação de revestimentos avançados tem sido de grande importância, pois permite aumentar o tempo de vida das ferramentas de corte, ao mesmo tempo que a qualidade da superfície das peças é assegurada de forma mais efetiva. Em determinados casos, permite mesmo diminuir os custos de produção. Devido ao desenvolvimento contínuo de uma enorme variedade de revestimentos, torna-se fulcral analisar, conhecer, e estudar os fenómenos originados durante o corte de metais, de forma a permitir: i) selecionar os parâmetros de corte a usar para maquinar determinados materiais e ii) perceber e estimar o tempo de vida das ferramentas.

O principal objetivo desta tese é avaliar os mecanismos de desgaste, para a qual se sujeitará um conjunto de ferramentas a um revestimento, com o intuito de maquinar uma liga cobre-berílio, tendo por base um processo de deposição física em fase de vapor.

Os ensaios a realizar tiveram como principal objetivo avaliar o comportamento das ferramentas que foram usadas na fresagem para este tipo de ligas, fazendo variar dois parâmetros, nomeadamente o comprimento de corte e a velocidade de avanço, em três níveis distintos. Para além disto, foi analisada a rugosidade superficial para cada ensaio realizado, tendo sido também identificados os mecanismos de desgaste observados.

Após a realização dos mesmos, foi verificado que os resultados obtidos nas ferramentas revestidas foram distintos dos obtidos com as ferramentas sem revestimento. Nas ferramentas não revestidas, os principais mecanismos de desgaste foram a abrasão e adesão ao substrato, sendo que nas ferramentas não revestidas o mecanismo predominante foi a delaminação, seguida do *chipping*. Verificou-se ainda que tanto a velocidade de avanço como o comprimento de corte são dois parâmetros que têm muita influência na qualidade da superfície maquinada, ou seja, quanto maior for a distância de corte, pior será a qualidade da superfície. Relativamente ao revestimento, verificou-se que as ferramentas revestidas obtiveram um desempenho muito inferior às sem revestimento, concluindo-se assim que o revestimento não constituiu um fator vantajoso à ferramenta.

### PALAVRAS-CHAVE

Fresagem; Mecanismos de desgaste; Revestimento TiAlTaN; Revestimentos; Rugosidade superficial; Liga de AMPCO

página propositadamente em branco

## ABSTRACT

Over the years, there has been a constant evolution in the different materials developed for industry and in the machining processes. The development of cutting tools using the application of advanced coatings has been of great importance, as it allows the lifespan of cutting tools to be increased, while at the same time the surface quality of the parts is ensured more effectively. In certain cases, it even allows production costs to be reduced. Due to the continuous development of a huge variety of coatings, it is essential to analyze, understand and study the phenomena arising during the cutting of metals, in order to allow: i) selecting the cutting parameters to be used to machine certain materials, and ii) understand and estimate the lifespan evolution of tools in those machining processes. To this end, it is essential to analyze, understand and deepen knowledge regarding the respective associated wear mechanisms, to monitor this development and thus make a positive contribution to the scientific community.

The main objective of this dissertation is to evaluate the wear mechanisms, for which a set of tools will be subjected to a coating based on a physical deposition process in the vapor phase, with the aim of machining a copper-beryllium alloy.

The main objective of the tests to be carried out was to evaluate the behavior of the tools used in milling for this type of alloys, varying two parameters, namely feed rate and cutting length at three different levels. In addition, the surface roughness was analyzed for each test carried out, and the observed wear mechanisms were also identified.

After carrying out the tests, it was verified that the results obtained with coated tools were different from those obtained with uncoated tools. In uncoated tools, the main wear mechanisms were abrasion and adhesion to the substrate, while in coated tools the predominant wear mechanism was delamination of the coating, followed by chipping. It was also found that both the feed rate and the cutting length are two parameters that have presented a great influence on the quality of the machined surface, i.e., the higher the cutting length, the worse the surface quality. Regarding the coating, it was found that the coated tools performed much worse than the uncoated ones, concluding that the coating did not constitute an advantageous factor for the tool.

## KEYWORDS

Milling; Wear mechanisms; TiAlTaN film; Coatings; Surface roughness; AMPCO alloy

página propositadamente em branco

# ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	5
RESUMO .....	I
ABSTRACT.....	III
ÍNDICE .....	V
ÍNDICE DE FIGURAS .....	IX
ÍNDICE DE TABELAS .....	XIV
LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS .....	XVI
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objetivos .....	1
1.3. Metodologia .....	2
1.4. Estrutura da dissertação.....	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. Princípio do corte por arranque de apra .....	5
2.1.1. Definição de maquinagem.....	6
2.1.2. Tipos de operações de fresagem .....	9
2.1.3. Ferramentas de corte .....	9
2.1.4. Parâmetros e cálculos na fresagem .....	10
2.1.5. Forças de corte.....	12
2.1.6. Formação da apra.....	13
2.2. Técnicas de revestimento para ferramentas de corte (PVD/CVD).....	14
2.2.1. <i>Physical Vapour Deposition</i> .....	15
2.2.2. <i>Chemical Vapour Deposition</i> .....	20
2.3. Recentes avanços em revestimentos para ferramentas de corte .....	25
2.4. Mecanismos de desgaste associados a ferramentas de corte .....	27
2.4.1. Tipologias de desgaste.....	29
2.4.2. Análise do desgaste das ferramentas revestidas .....	34
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	37
3.1. Materiais .....	37
3.1.1. Material maquinado.....	37
3.1.2. Ferramentas de corte .....	38
3.1.2.1. Material base da ferramenta de corte.....	38
3.1.2.2. Geometria das ferramentas.....	39
3.1.2.3. Revestimento da ferramenta de corte .....	40
3.3. Métodos.....	42

3.3.1. Equipamentos.....	42
3.3.1.1. Centro de maquinagem .....	42
3.3.1.2. Sistema de aperto da ferramenta de corte.....	43
3.3.1.3. Sistema de fixação da peça.....	44
3.3.1.4. Posicionamento.....	44
3.3.1.5. Rugosímetro .....	45
3.3.1.6. Microscópio eletrónico de varrimento (MEV) .....	45
3.3.2. Procedimento .....	46
3.3.2.1. Plano de ensaios.....	46
3.3.2.2. Teste de rugosidade superficial .....	48
3.3.2.3. Preparação das amostras para análise SEM .....	49
4. RESULTADOS .....	51
4.1. Caracterização do revestimento .....	51
4.2. Análise da espessura do revestimento .....	52
4.3. Superfície maquinada .....	53
4.3.1. Medição do desgaste.....	53
4.3.2. Análise da rugosidade.....	54
4.3.3. Mecanismos de Desgaste .....	60
4.3.3.1. Análise do desgaste das ferramentas de corte .....	60
4.3.3.2. Análise do desgaste de flanco .....	79
5. DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	84
5.1. Comparação do estado superficial da peça maquinada .....	84
5.1.1. Velocidade de avanço (influencia do avanço na superfície) .....	84
5.1.2. Comprimento de corte .....	86
5.2. Comparação com o desgaste apresentado .....	88
5.2.1. Mecanismos de desgaste.....	88
5.2.2. Desgaste de flanco.....	93
5.3. Comparação com outros revestimentos usados .....	95
6. CONCLUSÃO .....	97
6.1. Conclusões científicas.....	97
6.2. Contributos pessoais e profissionais .....	99
6.3. Limitações e trabalhos futuros .....	99
6.3.1. Limitações.....	99
6.3.2. Trabalhos futuros.....	100
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	102
APÊNDICE a .....	111
ANEXO A - Ficha técnica AMPCOLOY®83.....	112
ANEXO B - Ficha técnica Rugosímetro .....	113

---

ANEXO C - Norma ISO 8688-2:1986.....	114
--------------------------------------	-----

página propositadamente em branco

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama esquemático do processo de formação da apara adaptado de [4] .....	6
Figura 2 - Diagrama esquemático do processo de fresagem adaptado de [7].....	7
Figura 3 – Centro de maquinagem vertical cinco eixos [13] .....	8
Figura 4 - Maquinagem usando a orientação segundo a direção cristalográfica adaptado de [27] 12	
Figura 5 - Set-up para medição de forças de corte numa operação de fresagem adaptado de [35] .....	13
Figura 6 - Simulação de quebra da apara adaptado de [39] .....	13
Figura 7 - Possível influência dos revestimentos, adaptado de [1,16, 17,18,19] .....	14
Figura 8 - Esquematização do processo PVD [46].....	15
Figura 9 - Processo PVD, adaptado de [48] .....	16
Figura 10 - Etapas do processo PVD, adaptado de [48] .....	16
Figura 11 - Diagrama sistemático da técnica de deposição evaporação a vácuo adaptado de [45] 17	
Figura 12 - Diagrama sistemático da técnica de deposição iónica adaptado de [54] .....	17
Figura 13 - Diagrama sistemático da técnica de deposição sputtering adaptado de [45] .....	18
Figura 14 - Esquematização do processo CVD a) reator micro-ondas; b) reator de filamento quente adaptado de [45].....	21
Figura 15 - Tipologias de revestimentos avançados adaptado de [81, 82].....	25
Figura 16 - Classificação de parâmetros de desgaste adaptado de [91].....	28
Figura 17 - Causas de desgaste, mecanismos de desgaste, tipos de desgaste e consequências de desgaste adaptado de [94].....	29
Figura 18 - Tendência de casais de metais aderirem mutuamente [92].....	30
Figura 19 - Desgaste adesivo [96].....	30
Figura 20 - Desgaste abrasivo [97] .....	31
Figura 21 - Desgaste por fadiga [91].....	31
Figura 22 - Desgaste por oxidação [91] .....	31
Figura 23 - Bloco de material de base (AMPCOLOY®83) usado nas operações de fresagem .....	37
Figura 24 – Exemplo de fresa não revestida usada nos ensaios de corte .....	39
Figura 25 – a) Vista de cima da fresa; b) Imagem SEM .....	39
Figura 26 - Diagrama esquemático das dimensões da fresa.....	39
Figura 27 - Geometria de uma ferramenta de corte adaptado de [109] .....	40
Figura 28 – Máquina de pulverização catódica (CemeCom CC800) usada na produção dos revestimentos .....	40
Figura 29 - Centro de maquinagem DMG DMU 60 eVo.....	42
Figura 30 - Refrigeração do material .....	43
Figura 31 - Porta-cones .....	43
Figura 32 - a) cone hidráulico, b) fixação da peça, c) chave dinamométrica .....	44
Figura 33 - Prensa de aperto do bloco a maquinar .....	44
Figura 34 - Apalpador ótico .....	45
Figura 35 - Rugosímetro Mahr .....	45
Figura 36 - Microscópio eletrónico de varrimento FEI Quanta 400 FEG [114] .....	46
Figura 37 - Esboço de um desbaste linear .....	47
Figura 38 - Medição da rugosidade transversal.....	48

Figura 39 - Medição da rugosidade longitudinal .....	48
Figura 40 - Espectros EDS: a) Imagem SEM da ferramenta T1L27S1500V126; b) zona 1 de análise EDS; b) zona 2 de análise EDS.....	52
Figura 41 - Valores obtidos por SEM da espessura do revestimento .....	52
Figura 42 - Valores de rugosidade média aritmética na direção transversal para 750mm/min .....	55
Figura 43 - Valores de rugosidade média aritmética na direção longitudinal para 750mm/min.....	55
Figura 44 - Valores de rugosidade média aritmética na direção transversal para 1500mm/min ....	56
Figura 45 - Valores de rugosidade média aritmética na direção longitudinal para 1500mm/min...	56
Figura 46 - Valores de rugosidade média aritmética na direção transversal em função do comprimento de corte .....	57
Figura 47 - Valores de rugosidade média aritmética na direção transversal mediante a velocidade de avanço .....	57
Figura 48 - Valores de rugosidade média aritmética na direção longitudinal, mediante a velocidade de avanço .....	58
Figura 49 - Valores de rugosidade média aritmética na direção transversal, mediante a velocidade de avanço (revestidas) .....	58
Figura 50 - Valores de rugosidade média aritmética na direção longitudinal, mediante a velocidade de avanço (revestidas) .....	59
Figura 51 - Valores de rugosidade média aritmética na direção transversal mediante a velocidade de avanço e a presença de revestimento .....	60
Figura 52 - Referência utilizada na análise das ferramentas .....	61
Figura 53 - Imagem SEM com ampliações 100x, 220x e 500x respetivamente da a) face de folga; b) face de ataque; c) face de topo da ferramenta sem revestimento .....	62
Figura 54 - Espectros EDS das zonas correspondentes à Figura 52: a) Imagem SEM da ferramenta TOL27S750V126; b) zona 1 de análise EDS; b) zona 2 de análise EDS.....	62
Figura 55 - Imagem SEM com ampliações 35x, 100x e 220x respetivamente da a) face de folga - dente 1; b) face de folga - dente 2; c) face de ataque - dente 2; d) face de topo da ferramenta com revestimento .....	63
Figura 56 - Imagens SEM para 27 m de comprimento de corte e 75 0mm/min de velocidade de avanço e a) ampliação de 100x e sem revestimento; b) ampliação de 100x e com revestimento; c) ampliação de 1000x e sem revestimento; d) ampliação de 1000x e com revestimento .....	64
Figura 57 - Imagem SEM com ampliações 100x e 220x da a) face de folga - dente 1; b) face de folga - dente 2; c) face de ataque - dente 2; d) face de ataque - dente 3; e) face de topo da ferramenta sem revestimento .....	66
Figura 58 - Imagem SEM com ampliações 100x e 220x da a) face de folga - dente 1; b) face de folga - dente 2; c) face de ataque - dente 2; d) face de topo da ferramenta com revestimento .....	66
Figura 59 - Imagens SEM para 54 m de comprimento de corte e 750 mm/min de velocidade de avanço e a) ampliação de 100x e sem revestimento; b) ampliação de 100x e com revestimento; c) ampliação de 1000x e sem revestimento; d) ampliação de 1000x e com revestimento .....	67
Figura 60 - Imagem SEM com ampliações 100x e 220x respetivamente da a) face de folga; b) face de ataque; c) face de topo da ferramenta sem revestimento .....	68
Figura 61 - Imagem SEM com ampliações 100x e 220x respetivamente da a) face de folga - dente 1; b) face de folga - dente 2; c) face de ataque - dente 2; d) face de topo da ferramenta com revestimento .....	69

Figura 62 - Imagens SEM para 74m de comprimento de corte e 750mm/min de velocidade de avanço e a) ampliação de 100x e sem revestimento; b) ampliação de 100x e com revestimento; c) ampliação de 1000x e sem revestimento; d) ampliação de 1000x e com revestimento .....	69
Figura 63 - Imagem SEM com ampliações 220x, 500x, 2500x e 5000x respetivamente da a) clearance face; b) face de topo da ferramenta sem revestimento .....	70
Figura 64 - Espectros EDS das zonas correspondentes à face de topo da Figura 62: a) Imagem SEM da ferramenta TOL27S750V126; b) zona 1 de análise EDS .....	71
Figura 65 - Imagem SEM com ampliações 35x, 100x e 220x respetivamente da a) face de folga; b) face de ataque; c) face de topo da ferramenta com revestimento .....	72
Figura 66 - Espectros EDS das zonas correspondentes à Figura 64: a) Imagem SEM da ferramenta TOL74S1500V126; c) zona 1 de análise EDS; c) zona 2 de análise EDS; d) zona 3 de análise EDS .....	72
Figura 67 - Imagens SEM para 27 m de comprimento de corte e 1500 mm/min de velocidade de avanço e a) ampliação de 100x e sem revestimento; b) ampliação de 100x e com revestimento; c) ampliação de 1000x e sem revestimento; d) ampliação de 1000x e com revestimento .....	73
Figura 68 - Imagem SEM com ampliações 100x e 220x da a) face de folga - dente 2; b) face de ataque - dente 2; c) face de ataque - dente 3; d) face de topo da ferramenta sem revestimento .....	74
Figura 69 - Imagem SEM com ampliações 35x, 100x e 220x, da a) face de folga; b) face de ataque; c) face de topo da ferramenta com revestimento.....	75
Figura 70 - Imagens SEM para 54 m de comprimento de corte e 1500 mm/min de velocidade de avanço e a) ampliação de 100x e sem revestimento; b) ampliação de 100x e com revestimento; c) ampliação de 1000x e sem revestimento; d) ampliação de 1000x e com revestimento .....	76
Figura 71 - Imagem SEM com ampliações 220x, 220x e 100x respetivamente da a) face de folga - dente 1; b) face de folga - dente 2; c) face de topo da ferramenta sem revestimento .....	77
Figura 72 - Imagem SEM com ampliações 100x da a) face de folga - dente 1; b) face de folga - dente 2; c) face de ataque - dente 2; d) face de ataque - dente 3; e) face de topo da ferramenta com revestimento.....	78
Figura 73 - Imagens SEM para 74 m de comprimento de corte e 1500 mm/min de velocidade de avanço e a) ampliação de 100x e sem revestimento; b) ampliação de 100x e com revestimento; c) ampliação de 1000x e sem revestimento; d) ampliação de 1000x e com revestimento .....	79
Figura 74 - Demonstração da medição de VB pelo ImageJ.....	80
Figura 75 - Valores do desgaste de flanco (VB) para uma velocidade de avanço de 750 mm/min .	81
Figura 76 - Valores do desgaste de flanco (VB) para uma velocidade de avanço de 1500mm/min	82
Figura 77 - Valores finais de rugosidade média aritmética na direção transversal para a velocidade de avanço de a) 750 mm/min; b) 1500 mm/min .....	84
Figura 78 - Valores finais de rugosidade média aritmética na direção longitudinal para a velocidade de avanço de a) 750 mm/min; b) 1500 mm/min .....	85
Figura 79 - Valores finais de rugosidade média aritmética na direção transversal em função do comprimento de corte .....	86
Figura 80 - Valores finais de rugosidade média aritmética na direção longitudinal em função do comprimento de corte .....	87
Figura 81 - Imagens SEM da face de folga, com ampliação 500x, das ferramentas a) TOL27S750V126; b) TOL54S750V126; c) TOL74S750V126; d) TOL27S1500V126; e) TOL54S1500V126; f) TOL74S1500V126.....	90

---

Figura 82 - Imagens SEM da face de folga, com ampliação 500x, das ferramentas a) T1L27S750V126; b) T1L54S750V126; c) T1L74S750V126; d) T1L27S1500V126; e) T1L54S1500V126; f) T1L74S1500V126.....	91
Figura 83 - Clearance face da ferramenta T0L27S750V126.....	92
Figura 84 - Valores do desgaste de flanco (VB) em função das condições de ensaio.....	93
Figura 85 - Presença da aparas no seu revestimento na ferramenta T1L27S1500V126.....	95

página propositadamente em branco

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Vantagens dos diferentes tipos de orientações da árvore [13] .....	8
Tabela 2 - Operações de fresagem [13, 16].....	9
Tabela 3 - Tipos de fresas [13].....	10
Tabela 4 - Parâmetros de fresagem .....	10
Tabela 5 - Fórmulas para o processo de fresagem .....	11
Tabela 6 - Diferentes estudos de aplicação da técnica PVD .....	19
Tabela 7 - Diferentes estudos de aplicação da técnica CVD .....	22
Tabela 8 - Quadro resumo processos PVD e CVD .....	24
Tabela 9 - Estudos para os diferentes tipos de estruturas dos revestimentos .....	26
Tabela 10 - Tipos de desgaste das ferramentas de corte .....	32
Tabela 11 - Diferentes estudos de desgaste de ferramentas .....	34
Tabela 12 - Características do bloco de AMPCOLOY®83.....	37
Tabela 13 - Composição química AMPCOLOY®83 .....	38
Tabela 14 - Propriedades físicas e mecânicas do AMPCOLOY®83 .....	38
Tabela 15 – Dimensões das fresas em milímetros.....	40
Tabela 16 - Parâmetros de deposição utilizados para a obtenção do revestimento .....	41
Tabela 17 - Especificações técnicas do centro de maquinagem .....	42
Tabela 18 - Parâmetros do plano de ensaios.....	47
Tabela 19 - Medições de rugosidade longitudinal.....	53
Tabela 20 - Medições de rugosidade transversal .....	53
Tabela 21 - Média dos valores obtidos para o desgaste de flanco nas diferentes ferramentas, para uma velocidade de avanço de 750 mm/min .....	80
Tabela 22 - Média dos valores obtidos para o desgaste de flanco nas diferentes ferramentas, para uma velocidade de avanço de 1500 mm/min .....	82
Tabela 23 - Tabela resumo dos valores das rugosidades médias aritméticas, na direção transversal, obtidas em função do comprimento de corte, para um comprimento de corte de 26,8 m .....	85
Tabela 24 - Tabela resumo dos valores das rugosidades médias aritméticas, na direção transversal, obtidas em função do comprimento de corte, para um comprimento de corte de 53,6 m .....	86
Tabela 25 - Tabela resumo dos valores das rugosidades médias aritméticas, na direção transversal, obtidas em função do comprimento de corte, para um comprimento de corte de 73,7 m .....	86
Tabela 26 - Tabela resumo dos valores das rugosidades médias aritméticas, na direção transversal, obtidas em função do comprimento de corte, para a velocidade de avanço de 750 mm/min ..	87
Tabela 27 - Tabela resumo dos valores das rugosidades médias aritméticas, na direção transversal, obtidas em função do comprimento de corte, para a velocidade de avanço de 1500 mm/min	87
Tabela 28 - Tabela resumo dos mecanismos de desgaste .....	88

página propositadamente em branco

## LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS

### Lista de Siglas

AMPCOLOY®83	Liga comercial de cobre-berílio
CAM	<i>Computer-Aided Manufacturing</i>
CF	<i>Clearance Face</i>
CNC	Controle Numérico Computadorizado
CVD	<i>Chemical vapor deposition</i>
DSS	<i>Duplex stainless steel</i>
EDS	<i>Energy-dispersive X-ray spectroscopy</i>
MEV	Microscopia eletrônica de varrimento
PVD	<i>Physical vapor deposition</i>
RF	<i>Rake Face</i>
TOP	<i>Top Face</i>

### Lista de Unidades

°C	Graus Celcius
GPa	Gigapascal
kg	Quilograma
$kg/m^3$	Quilograma por metro cúbico
kW	Quilowatt
m	Metro
min	Minuto
mm	Milímetro
$mm^3$	Milímetro cúbico
m/min	Metro por minuto
mm/s	Milimetro por segundo
MPa	Megapascal
rpm	Rotação por minuto
μin	Microinch
μm	Micrometro
V	Volt

### Lista de Símbolos

$a_e$	Largura de corte
$Al_2O_3$	Óxido de alumínio (alumina)
$a_p$	Profundidade de corte
Be	Berílio
$CH_3 - CN$	Acetonitrilo
Co	Cobalto
$CoCr$	Crômio Cobalto
Cu	Cobre
D1	Diâmetro
$D_{cap}$	Diâmetro de corte na profundidade de corte, $a_p$
$D_m$	Diâmetro maquinado
$D_w$	Diâmetro não maquinado (diâmetro da peça)
EF	Chanfro canto
$f_n$	Avanço / rotação
$f_z$	Avanço por navalha/dente
L	Comprimento de corte
Lda.	Limitada
$M_c$	Momento
$MgO$	Óxido de magnésio
$Mo$	Molibdênio
n	Velocidade da árvore
Ni	Níquel
®	Registado
$P_c$	Potencia líquida
Q	Taxa de remoção de metal
$R_a$	Rugosidade média aritmética
$R_z$	Rugosidade média das alturas máximas entre picos
$R_{máx}$	Rugosidade máxima
$TaC$	Carboneto de tântalo
$TiAlN$	Nitreto de titânio alumínio
$TiAlSiN$	Nitreto de titânio-alumínio-silício
$TiBN$	Nitreto de titânio berílio
$TiC$	Carboneto de titânio
$TiCN$	Carbonitreto de titânio
$TiN$	Nitreto de titânio
VB	Desgaste de flanco
$v_c$	Velocidade de corte
$v_f$	Velocidade de avanço

---

<i>WC</i>	Carboneto de tungstênio
<i>W-Ta</i>	Tungstênio Tântalo
<i>z</i>	Número de navalhas
<i>z<sub>c</sub></i>	Número efetivo de dentes
<i>z<sub>n</sub></i>	Número total de dentes da fresa
<i>ZrO<sub>2</sub></i>	Óxido de zircônio

---

página propositadamente em branco



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento

O desenvolvimento de novos materiais e consequente avanço da tecnologia no processar esses materiais, têm sofrido uma grande evolução nos últimos anos. Deste modo, torna-se necessário adaptar as necessidades da tecnologia aos objetivos pretendidos. Na indústria metalomecânica, especificamente na indústria da maquinagem, é crucial o estudo e desenvolvimento de estratégias adequadas ao processamento de novos materiais, de forma a melhorar a eficiência do processo.

Neste sentido, a exigência e complexidade do mercado dos moldes de injeção e da maquinagem (aliado ao seu constante progresso e forte concorrência), requer a melhoria dos processos, das ferramentas de corte, dos revestimentos e dos materiais de base das ferramentas. Atender a cada propriedade e cada parâmetro permite que, após análise contínua do comportamento da ferramenta, se consigam combinar os melhores fatores para o avanço e constantes melhorias daquelas que são as propriedades mecânicas finais, dos parâmetros de maquinagem obtidos e, consequentemente, o melhor desempenho das ferramentas.

As ligas de cobre-berílio são de grande importância em engenharia na produção de moldes de injeção, no entanto são sabidas serem difíceis de maquinar. O desenvolvimento de revestimentos avançados nos últimos vinte anos tem permitido melhorar o tempo de vida das ferramentas. O estudo dos diferentes revestimentos na maquinagem de diferentes materiais ainda não está totalmente estudado. Portanto, esta dissertação pretende avaliar o impacto do revestimento TiAlTaN por PVD, na maquinagem da liga AMPCOLOY®83. Serão elucidados todos os conteúdos teóricos necessários para o desenvolvimento de revestimentos para uma maquinagem mais eficiente e eficaz, ao longo de todo o capítulo 2.

## 1.2. Objetivos

Uma vez que a liga de AMPCO é bastante utilizada na produção de moldes de injeção, é necessário desenvolver novas soluções de maquinagem para competir no mercado. O principal objetivo desta dissertação centra-se em avaliar o efeito do comprimento de corte (26,8 m, 53,6 m e 73,7 m) e de dois níveis de velocidades de avanço (750 mm/min e 1500 mm/min) na rugosidade superficial da peça maquinada (AMPCOLOY®83), e analisar o tempo de vida das fresas revestidas com TiAlTaN comparativamente às mesmas fresas não revestidas. É fundamental analisar este revestimento e a sua influência no comportamento ao desgaste, uma vez que este integra um elemento que não é muito comum neste tipo de revestimentos, o tântalo. Será importante também avaliar qualitativamente os principais mecanismos de desgaste na ferramenta e quantificar o respetivo desgaste de flanco, analisar a influência dos parâmetros escolhidos, e perceber quais os que permitem obter melhores resultados, tanto no que respeita ao desempenho das ferramentas, como na qualidade da superfície maquinada.

### 1.3. Metodologia

A metodologia seguida para a elaboração da presente dissertação teve como base os pontos abaixo apresentados e, na secção 1.4., será possível visualizar como é que o presente documento se encontra estruturado:

- Elaboração da revisão bibliográfica
- Caracterização do revestimento em estudo
- Estudo das ferramentas para fresagem com principal atenção à geometria, materiais e respetivos revestimentos
- Planeamento da estratégia de trabalho e dos ensaios de maquinagem
- Realização dos ensaios de maquinagem
- Análise dos resultados (desgaste da ferramenta e qualidade superficial produzida)
- Estudo dos mecanismos de desgaste, tipologias de desgaste e melhoramento dos mesmos
- Tratamento dos dados e redação da dissertação

### 1.4. Estrutura da dissertação

Esta dissertação está dividida essencialmente em seis partes. O presente capítulo (capítulo 1) constitui a primeira parte, cujo principal objetivo é fazer uma nota introdutória ao trabalho, onde é explicitado o enquadramento, objetivos e metodologia da dissertação e finalmente a estrutura da mesma.

O segundo capítulo, corresponde à revisão bibliográfica, no qual são abordados os principais conceitos que vão ser desenvolvidos e analisados ao longo de todo o projeto, de modo a enquadrar o leitor no tema e nas ideias que serão apresentadas.

O terceiro capítulo é subdividido em duas secções principais. A primeira (secção 3.1.) diz respeito à apresentação dos materiais que serão utilizados na tese, tanto o material a maquinar como o da ferramenta de corte. A segunda (secção 3.2.) aborda os métodos utilizados, nomeadamente os equipamentos necessários e o respetivo planeamento do procedimento experimental.

Seguidamente, no capítulo quatro são apresentados e esquematizados todos os resultados, fundamentais para a discussão que é apresentada no capítulo seguinte.

No quinto capítulo são discutidos os resultados anteriormente apresentados, correspondendo assim a uma das partes mais importantes de toda a dissertação, comparados os resultados teóricos apresentados na literatura, com os resultados experimentais obtidos.

Finalmente no capítulo seis são apresentadas as principais conclusões da dissertação, na qual serão sumariados os pontos chave do projeto, assim como a indicação de limitações do projeto e propostas para trabalhos futuros.

página propositadamente em branco



## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A maquinagem é um processo de fabrico que tem como principal objetivo a criação e aperfeiçoamento de componentes metálicos que continuam a ser muito usados na indústria, sobretudo em setores onde é pretendida a precisão patenteada por este processo e uma elevada qualidade de superfície [1]. Ao longo deste capítulo será apresentada toda a informação considerada relevante para o desenvolvimento deste trabalho, subdividindo-se em quatro principais subsecções. Na primeira, 2.1., Princípio do corte por arranque de apara, será descrita a definição de maquinagem e fresagem respetivamente, visto que é a operação que vai ser desenvolvida ao longo de todo o trabalho experimental. Serão, ainda, abordados quais os tipos de operações de fresagem mais comuns, bem como os parâmetros, cálculos, vibrações e forças de corte envolvidas no processo. Finalmente, será apresentada literatura referente à formação da apara e à ferramenta de corte, para que seja mais fácil a compreensão da parte prática. Seguidamente na secção 2.2., Técnicas de revestimento para ferramentas de corte (PVD/CVD), serão explicitadas as principais características de cada um destes processos, e um quadro síntese comparativo. Posteriormente, na secção 2.3., Recentes avanços em revestimentos para ferramentas de corte, serão resumidas algumas notas de autores que referem as vantagens e resultados de procedimentos experimentais relativos ao teste de revestimentos na maquinagem, tendo em conta a recente literatura, uma vez que pretendemos conhecer os avanços mais “recentes”.

Finalmente, na secção 2.4., Mecanismos de desgaste associados a ferramentas de corte, serão apresentadas as tipologias de desgaste existentes, categorizadas, e realizada a respetiva análise de mecanismos de desgaste associados a ferramentas de corte, acompanhados de literatura específica de autores que desenvolveram trabalhos práticos neste âmbito.

### 2.1. Princípio do corte por arranque de apara

Hoje em dia, os processos de fabrico na indústria da maquinagem são cada vez mais usados, direta ou indiretamente, e devem ser compreendidos, estudados e analisados para que sejam aproveitados da forma mais benéfica e eficiente [1].

O arranque de apara é fundamental no processo de maquinagem, uma vez que a sua formação (Figura 1) tem impacto sobre a força de corte, a temperatura durante o corte e a estabilidade da operação. Além disso, a sua capacidade de quebrar, de forma controlada, é fundamental para influenciar a integridade da superfície maquinada e a eficiência do processo [2, 3].

Na Figura 1 está ilustrado o processo de formação da apara. É possível visualizar três principais zonas de deformação, sendo elas a primária, secundária e terciária, considerando  $v$  como a velocidade de corte,  $v_c$  é a velocidade de deslizamento ao longo da face de folga da ferramenta e  $v_s$  corresponde à velocidade de corte ao longo da zona de deformação primária.

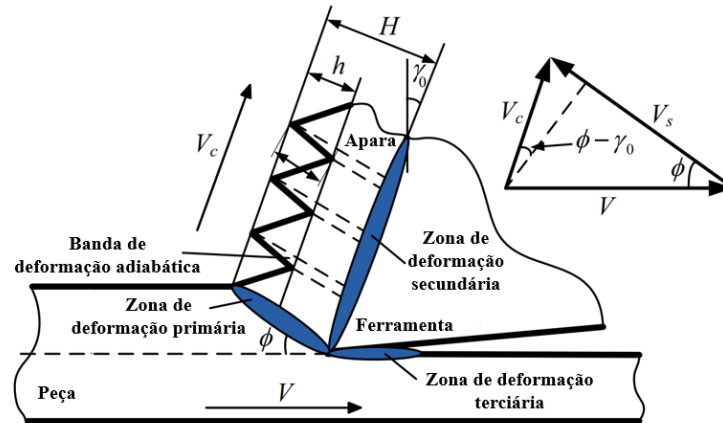


Figura 1 - Diagrama esquemático do processo de formação da apara adaptado de [4]

É possível visualizar, ainda, outros parâmetros tais como  $H$ , a altura máxima da apara, e  $h$ , a altura da seção descontínua (distância vertical entre o vale e o pico da seção de corte). Já relativamente aos ângulos formados pelo processo de formação da apara, temos  $\gamma_0$  que corresponde ao ângulo de inclinação da ferramenta, e  $\phi$  como o ângulo de corte entre o plano e a direção de  $v$  [4].

### 2.1.1. Definição de maquinagem

Os processos convencionais de maquinagem são técnicas de fabricação que cortam materiais em formas ou tamanhos específicos, sendo utilizados para modificar os materiais com o auxílio de ferramentas de corte. A maquinagem é um processo de fabrico através do qual um componente é obtido a partir de uma peça inicial não elaborada (esboço bruto), na qual se realiza a remoção de todo o material em excesso através da técnica de arranque de apara [5]. Este processo apresenta determinadas características, nomeadamente:

- Elevada qualidade dimensional;
- Elevada rentabilidade;
- Grande flexibilidade e possibilidade de automatização;
- Necessidade de recursos externos praticamente nula.

Essas técnicas são conhecidas por causar delaminação em laminados, áreas afetadas pelo calor nos bordos de camadas metálicas monolíticas e promover uma taxa mais rápida de desgaste das ferramentas [6]. Além disso, a maquinagem tradicional introduz tensões residuais nos blocos de metal, o que requer a colocação de um sulco para libertação de tensões.

Ao longo deste trabalho vai ser desenvolvido e cuidadosamente aprofundado o processo de fresagem (Figura 2), processo esse definido para a parte experimental do mesmo.

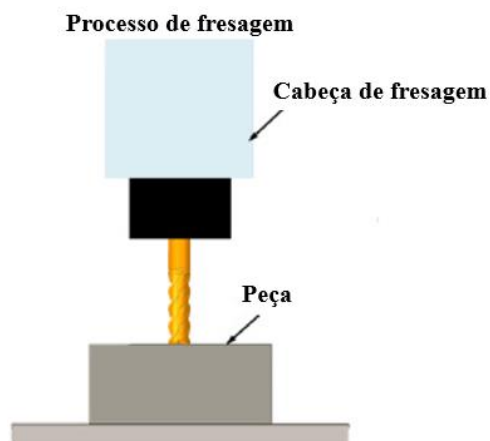


Figura 2 - Diagrama esquemático do processo de fresagem adaptado de [7]

Essas técnicas de maquinagem têm vindo a ser utilizadas há muitos anos e ainda são comumente empregues na indústria para maquinar metais e outros materiais [8]. Geralmente, as indústrias aeroespacial e aeronáutica são algumas das principais usufruidoras da maquinagem, uma vez que requerem peças com alta precisão dimensional, e, neste campo, tanto a fresagem como o torneamento conseguem responder bem às necessidades [9, 10].

A fresagem é uma operação mecânica, sendo também a forma mais comum de maquinagem por arranque de aparas. Tal como ilustrado na Figura 2, este processo consiste no levantamento do material por auxílio de uma ferramenta de corte que roda sobre si própria, enquanto a mesa se mantém em movimento. Este tipo de ferramenta (fresa) é muito versátil permitindo assim trabalhar num grande leque de materiais. À medida que o processo de fresagem avança, a ferramenta retira o material da superfície da peça, a fim de lhe conferir uma forma e acabamento desejados [11, 12]. A ferramenta de corte percorre toda a superfície do material, removendo sucessiva e parcialmente camadas de material. Assim, é caracterizada pelo seu rigor dimensional, conseguindo obter peças com geometrias complexas.

É cada vez mais fundamental a previsão dos parâmetros de maquinagem e o modo como estes vão influenciar o processo, para que desta forma seja possível uma monitorização e melhoramento dos processos de maquinagem, tendo em vista a otimização do mesmo.

Atualmente, e com o desenvolvimento da tecnologia, as máquinas desenvolvem-se em todas as direções, graças aos desenvolvimentos do fabrico assistido por computador (CAM, do inglês: *Computer-Aided Manufacturing*), que permitem que as máquinas com cinco eixos (Figura 3) sejam cada vez mais comuns. Com a evolução destas máquinas, surgem novas oportunidades para as ferramentas, entre elas [13]:

- Aumento da flexibilidade
- Menos *set-ups* para executar completamente uma peça
- Incremento da estabilidade
- Possibilidade de utilização de ferramentas mais longas
- Profundidade de corte mais flexível

Consoante a orientação da árvore, horizontal ou vertical, apresentam-se na

Tabela 1 algumas das vantagens para cada direção.

Tabela 1 - Vantagens dos diferentes tipos de orientações da árvore [13]

Orientação da árvore		Vantagens
<b>Horizontal</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peças grandes</li> <li>• Menos massa para acelerar/desacelerar</li> </ul>
<b>Vertical</b>	<b>Pequenos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta velocidade / avanço</li> <li>• Pequena volumetria, requer pouco espaço na fábrica</li> </ul>
	<b>Grandes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peças grandes e pesadas</li> <li>• Melhor estabilidade quando a peça está apoiada na mesa</li> </ul>

A máquina é fundamental para o trabalho que se quer realizar. Enquanto uma máquina de três eixos consegue realizar cantos a 90°, para a fresagem 3D são necessárias máquinas de quatro ou cinco eixos [13].

Geralmente, quando se pretendem formas 2D, recorre-se a centros de maquinagem de três eixos, sendo eles X, Y e Z. No entanto, quando se pretende obter uma geometria mais complexa, é necessário recorrer a uma CNC com cinco eixos (Figura 3) para conseguir produzir aquilo que uma máquina de três eixos não é capaz.

No entanto, e com as vantagens de cada um dos sistemas, o operador deve sempre fazer uma escolha consciente do que vai efetivamente usar, tendo em conta os custos envolvidos em cada um destes tipos de máquinas [14].

Como é possível observar, na Figura 3 está representado um centro de maquinagem com a orientação da árvore vertical. Este, quando comparado com a árvore horizontal, apresenta determinadas vantagens, nomeadamente o facto de ser mais apropriado para maquinagem de alta velocidade/avanço, oferece melhor estabilidade quando a peça está apoiada na mesa, é adequado para peças grandes e pesadas, e pode trabalhar com *set-ups* mais longos de peças [13].

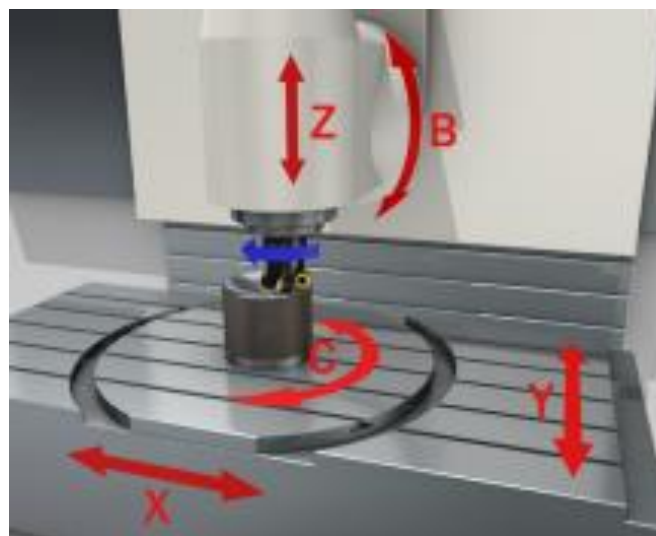


Figura 3 – Centro de maquinagem vertical cinco eixos [13]

## 2.1.2. Tipos de operações de fresagem

A fresagem pode ser categorizada segundo vários parâmetros, como é possível verificar a partir da Tabela 2.

Tabela 2 - Operações de fresagem [13, 16]

Representação	Designação e descrição
	<p><b>Faceamento (topo)</b> – Realização da operação com uma face como área de contacto, no mesmo plano [17].</p>
	<p><b>Fresagem em contorno (topo e periférica)</b> – Possibilidade de maquinagem de duas faces em simultâneo. Permite a criação de cantos a 90°. [3,4]</p>
	<p><b>Fresagem de perfis (periférica)</b> – Penetração da ferramenta na caixa do material a maquinar. Dada a complexidade do processo é necessário que esteja previamente estabelecido um planeamento da estratégia de maquinagem. Os valores de profundidade de corte podem variar. [13]</p>
	<p><b>Fresagem de canais (periférica)</b> – Abertura de canal ou rasgo. Normalmente recorre-se ao uso de ferramentas de facejar ou de topo, mediante a largura e profundidade pretendidas. Geralmente, a largura da ferramenta é selecionada de acordo com a profundidade do canal pretendida. [13]</p>
	<p><b>Fresagem em mergulho (topo)</b> – Abertura de canal ou rasgo, constituindo um método alternativo quando a fresagem lateral não é possível devido à vibração.</p>

## 2.1.3. Ferramentas de corte

Num processo de maquinagem, e nos custos que a este se encontram associados, o comportamento da ferramenta é muito importante para a sua produtividade. O desempenho da ferramenta pode ser avaliado por variados fatores, sendo um dos principais a rugosidade que esta produz na superfície maquinada. No entanto, há outros parâmetros, nomeadamente as forças de corte, que podem ser determinadas por previsão ou medição, usando dinamómetros e outros sensores [18, 19].

Como já foi mencionado, dada a complexidade e precisão deste processo, as ferramentas constituem um parâmetro fundamental, pelo que a sua escolha deve ser ponderada para o seu sucesso e eficácia, de maneira a preencher e corresponder aos requisitos impostos pelo cliente.

Existem duas normas importantes para definir a geometria de cada uma destas ferramentas: ISO 3002/1:1982 [20] e ANSI/ASME B94.50-1975 [21]. Ambas as normas são semelhantes e servem para definir a terminologia geral da superfície da peça e da ferramenta, elementos da ferramenta, arestas de corte, movimento da peça, e definição dos referenciais a usar (para definir os vários ângulos de corte da apara) [22]. Assim, na Tabela 3 estão ilustradas e categorizadas as várias fresas, com base na sua geometria.

Tabela 3 - Tipos de fresas [13]

Fresas periféricas e faciais			
Fresas de Radial	Fresa de Disco	Fresas de Topo	
			
Fresas de topo			
Fresas de Topo	Fresas Esféricas	Fresas Cilíndricas	Micro-Fresas
			

#### 2.1.4. Parâmetros e cálculos na fresagem

Para que seja possível um constante desenvolvimento e aperfeiçoamento dos processos de maquinagem, há que atender e definir adequadamente os parâmetros a ser estudados. De acordo com Grabowski [23], todos os parâmetros e o conseqüente comportamento que advém destes, pode condicionar as operações a serem executadas. Entre todos os parâmetros, destacam-se os indicados na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros de fresagem

Parâmetro	Símbolo	Unidade
Velocidade de corte	$v_c$	m/min
Velocidade de avanço	$v_f$	mm/min
Velocidade de rotação	$n$	rpm
Avanço por dente	$f_z$	mm
Profundidade de radial	$a_e$	mm
Profundidade de corte axial	$a_p$	mm
Largura de corte	$L$	mm

Momento	M	N·m
Potência útil	Q	kW
Taxa de remoção de material	MRR	mm <sup>3</sup> /min

É imperativo que a seleção dos parâmetros seja a mais correta e realizada com base nas recomendações feitas pelos fabricantes das ferramentas de corte em uso [24]. Cada um destes parâmetros vai ser definido e analisado nos capítulos seguintes.

Lee, Zhou e Ngoi [25, 26] utilizaram o modelo de Taylor, o qual foi aplicado à maquinagem de monocristais, abordando especificamente o deslizamento múltiplo em cristais individuais. Os autores examinaram como o fator de Taylor varia quando um único cristal é torneado ao longo de uma direção cristalográfica e compararam essas estimativas com os resultados experimentais. Segundo o que está descrito na Lei de Taylor, a interação entre a apara e a face de ataque da ferramenta causa uma diminuição no ângulo de corte. Dessa forma, é possível incorporar o atrito no modelo por meio de um coeficiente de fricção assumido, o que restringe o intervalo de possíveis ângulos de corte [27, 28]. No entanto, é importante ressaltar que o coeficiente de atrito também é afetado pela orientação do corte, já que a área de contacto varia com o tipo de apara. É ainda referido pela lei de Taylor que a vida de uma ferramenta está fortemente relacionada com a velocidade de corte da operação. Assim, é necessário variar estes parâmetros para se perceber quais as melhores combinações para o aumento da vida útil da ferramenta [29].

Na Tabela 5 estão representadas as principais equações relativas ao processo de fresagem.

Tabela 5 - Fórmulas para o processo de fresagem

Parâmetro	Símbolo	Fórmula	Unidade
Velocidade de corte	$v_c$	$v_c = \frac{D_{cap} \times \pi \times n}{1000}$	m/min
Velocidade da árvore	$n$	$n = \frac{v_c \times 1000}{D_{cap} \times \pi}$	rpm
Avanço por dente	$F_z$	$f_z = \frac{v_f}{z_c \times n}$	mm
Taxa de remoção de metal	$Q$	$Q = \frac{a_p \times a_e \times v_f}{1000}$	cm <sup>3</sup> /min
Velocidade de avanço	$v_f$	$v_f = f_z \times n \times z_c$	mm/min
Momento	$M_c$	$M_c = \frac{P_c \times 30 \times 1000}{n \times \pi}$	N·m
Potência líquida	$P_c$	$P_c = \frac{a_p \times a_e \times v_f \times k_c}{60 \times 10^6}$	kW
Espessura média de cavacos para fresagem de disco	$h_m$	$h_m = \frac{360 \times \sin K_r \times a_e \times f_z}{D_{cap} \times \pi \times \arccos\left(\frac{2 \times a_e}{D_{cap}}\right)}$	mm
Espessura média de cavacos para facejamento	$h_m$	$h_m = \frac{180 \times \sin K_r \times a_e \times f_z}{D_{cap} \times \pi \times \arcsin\left(\frac{a_e}{D_{cap}}\right)}$	mm
Força específica de corte	$k_c$	$k_c = k_{c1} \times h_m^{-m_c} \times \left(1 - \frac{Y_0}{100}\right)$	N/mm <sup>2</sup>

Foram realizados estudos experimentais com base na deformação por tração de monocristais, que mostraram diferenças cristalográficas nos sólidos cristalinos em estudo. A deformação em monocristais verifica-se ao longo de direções planas. Os metais com estrutura Cúbica de Faces Centradas (CFC) apresentam doze possíveis sistemas de deslizamento compostos por três direções em quatro planos [27].

A Figura 4 mostra a direção de corte (DC) alinhada com a direção  $[010]$ , e o plano de corte (PC) que está contido no plano  $[100]$ . A deformação de corte simples no plano de corte (SP) é mostrada com o movimento do material da posição ABCD para  $(ABCD)'$ .

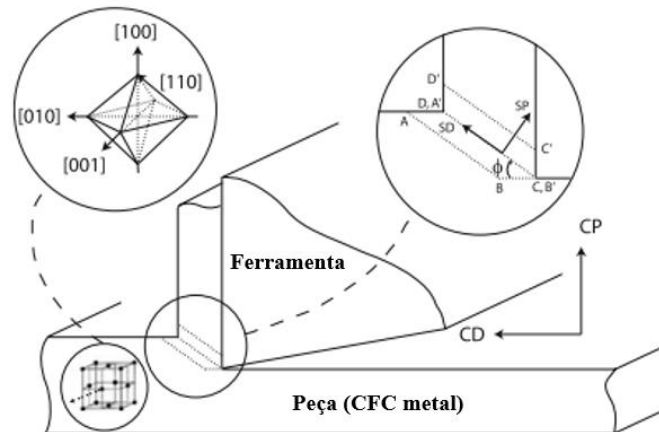


Figura 4 - Maquinagem usando a orientação segundo a direção cristalográfica adaptado de [27]

### 2.1.5. Forças de corte

As forças de corte desenvolvidas durante o processo de maquinagem fornecem informação essencial para a produtividade do processo. O conhecimento destas é fundamental para a otimização e melhoria, permitindo assim o estudo e desenvolvimento de novas ferramentas e sistemas de fixação [19, 30].

É ainda de relevante interesse a seleção de parâmetros ideais, com o objetivo de minimizar estas forças, para que a eficiência do processo aumente [31]. Num estudo realizado por Martinho et al. [32], foi concluído que o aumento das forças de corte esteve relacionado com o aumento da velocidade de avanço, e sem relação com a velocidade de corte, concluindo então que como foi referido anteriormente é fulcral a correta seleção dos parâmetros para o plano de ensaios de um procedimento experimental.

Dos resultados de um estudo feito por JunYan Zuo [33], concluiu-se que as forças de corte no flanco da ferramenta e a temperatura de corte aumentam com o aumento da velocidade de corte. Já no caso de Stephan Dehen [28, 34], foi possível concluir que o desgaste da ferramenta apresenta uma influência significativa, pois é responsável por vibrações ao longo do processo que influenciam negativamente a qualidade superficial e, conseqüentemente, aumentam as forças de corte.

Na Figura 5 está ilustrado o *set-up* para a medição de forças de corte durante uma operação de fresagem, com recurso a um dinamómetro.

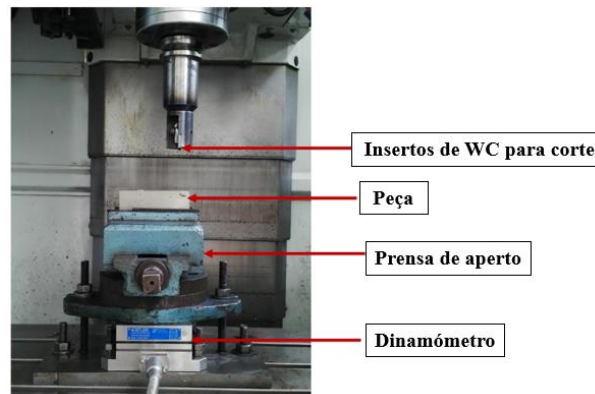


Figura 5 - Set-up para medição de forças de corte numa operação de fresagem adaptado de [35]

### 2.1.6. Formação da apara

A fresagem é definida como uma tecnologia de arranque de apara onde uma ou várias arestas de corte removem material da peça. Quando a apara tem menos tendência para ser arrastada pela lâmina, conseguimos um melhor acabamento superficial, como é pretendido. Quando estas são removidas pela parte de trás da ferramenta, a sua disposição é mais fácil [36]. Assim, o seu estudo é deveras importante, uma vez que a formação de apara é um fator que influencia muito a qualidade e as propriedades da superfície maquinada [37].

Este processo divide-se em duas principais fases:

- **Encalcamento:** com a penetração da ferramenta de corte, há o levantamento de uma pequena quantidade de material (Figura 6), por ação do travamento do escorregamento da formação de apara. As temperaturas altas provenientes do atrito aceleram o processo de deformação que resulta da formação da apara [38].
- **Formação de fissura:** por ação do movimento da ferramenta de corte, há um escorregamento da apara sobre a face de ataque, fazendo com que uma porção de material seja encalcada. Esta pode dar origem a apara contínua ou descontínua, mediante a parcialidade ou totalidade da fissura [38].

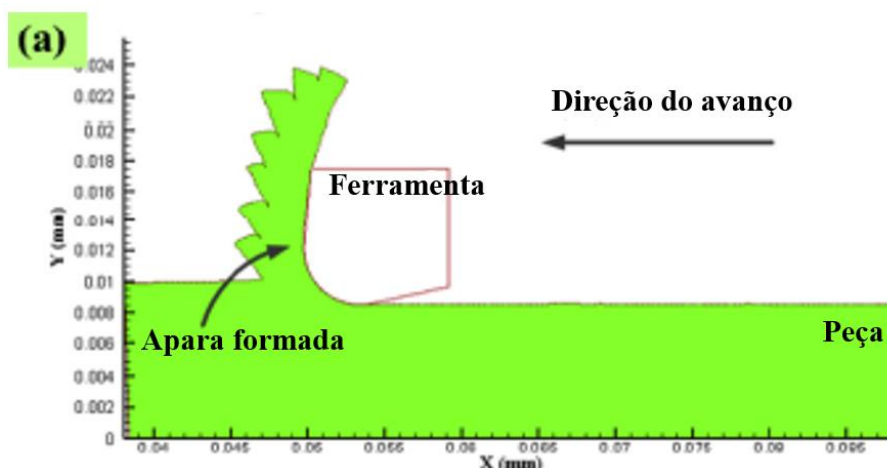


Figura 6 - Simulação de quebra da apara adaptado de [39]

A utilização de um número maior de arestas de corte contribui para que o tamanho da avara seja menor, fazendo com que seja possível obter melhores acabamentos superficiais.

Jacob et al. [40] realizaram um estudo no qual descobriram que aparas produzidas em diferentes direções eram descontínuas e apresentavam diferentes graus de fratura para diferentes profundidades de corte. Pelo contrário, quando perante grandes profundidades de corte, as aparas eram contínuas e independentes da direção de corte.

## 2.2. Técnicas de revestimento para ferramentas de corte (PVD/CVD)

O método de revestimento de ferramentas é fundamental para a execução e melhoramento dos processos de fresagem, visto que têm várias vantagens associadas, nomeadamente a sua proteção contra a oxidação, aumento da resistência ao desgaste e da vida da ferramenta, endurecimento da superfície e redução das forças de corte [18]. O principal objetivo na implementação de revestimento nas ferramentas passa por proteger o material base a partir da sua exposição a processo químicos ou físicos, reduzindo assim a probabilidade de desgaste. Uma vez conseguida a verificação desta característica, é assim possível que aços de baixa liga sejam maquinados em condições e mediante parâmetros diferentes, nomeadamente velocidades de corte e velocidades de avanço elevadas, bem como temperaturas elevadas [41]. Na Figura 7 é possível ver alguns exemplos da influência dos revestimentos.

É imperativo que o revestimento da superfície seja o correto, uma vez que este virá a afetar, posteriormente, parâmetros como a estrutura e microestrutura, tensões residuais e propriedades mecânicas [18]. Muitos revestimentos têm a flexibilidade de serem depositados pelas técnicas PVD ou CVD, que em muito influenciarão as propriedades do revestimento e o desempenho na respetiva ferramenta e processo de maquinagem [42].

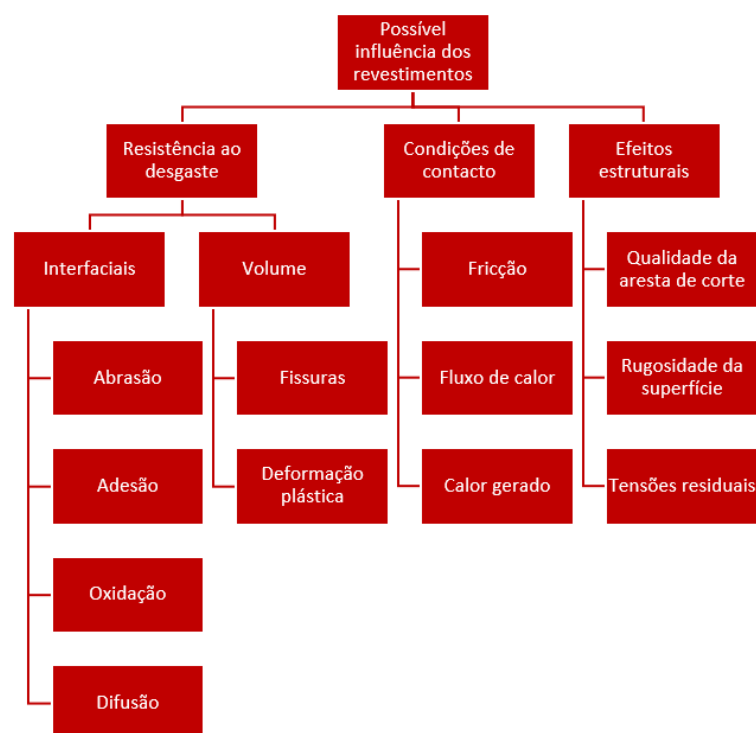


Figura 7 - Possível influência dos revestimentos, adaptado de [1,16, 17,18,19]

Todas estas vantagens trazem benefícios, nomeadamente à melhoria do comportamento ao desgaste das ferramentas. Assim, verifica-se a existência de uma divisão em duas categorias a nível de técnicas de revestimento, sendo elas: (1) *Physical vapour deposition* – PVD, (2) *Chemical vapour deposition* – CVD.

### 2.2.1. *Physical Vapour Deposition*

Os processos designados por PVD (Figura 8) ocorrem no interior de uma câmara de vácuo, onde o material do alvo, que vai ser depositado nos substratos, é vaporizado e ionizado, através de um plasma. Posteriormente, por ação de uma forte diferença de potencial, origina um revestimento por influência da atração de iões no estado puro ou combinados com átomos de azoto e/ou outro gás inerte para os substratos [34]. A esquematização do processo está representada nas Figura 9 e Figura 10. Esta tecnologia é amplamente usada na deposição de filmes finos, quando estamos sujeitos a determinadas exigências, nomeadamente ao comportamento tribológico, aprimoramento ótico, atualização visual e estética, entre outros. Estes processos podem ainda ser subdivididos em categorias, consoante a tecnologia utilizada [45], como será descrito nos próximos capítulos.

De salientar ainda que esta técnica é muito mais ecologicamente amigável, quando comparado com a técnica CVD, visto que não liberta efluentes líquidos nem gasosos com efeito de estufa, e não utiliza misturas gasosas nocivas ao ambiente [44].

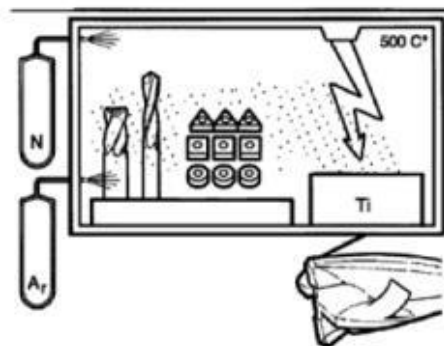


Figura 8 - Esquematização do processo PVD [46]

Os parâmetros de deposição devem ser ajustados com o objetivo de modificar a nanoestrutura de crescimento ou a composição do filme, através do controlo das variáveis dependentes, nomeadamente a quantidade e intensidade de iões reativos de alta energia, aquecimento do substrato, composição da atmosfera e pressão parcial, taxa e ângulo de incidência do vapor [47].

Independentemente da técnica associada, todo e qualquer processo PVD baseia-se no mesmo princípio (Figuras 9 e 10), transformar material do alvo em partículas de tamanho quase atómico aceleradas contra o substrato, em que o revestimento é obtido pela adição de material sobre o substrato por um processo físico, criando uma fina e sólida película que pode apresentar espessura variante e dependente do tempo de deposição, oscilando geralmente entre 2  $\mu\text{m}$  a 5  $\mu\text{m}$  [48].

Este processo é obtido a temperaturas baixas, geralmente na ordem dos 400°C e 600°C.

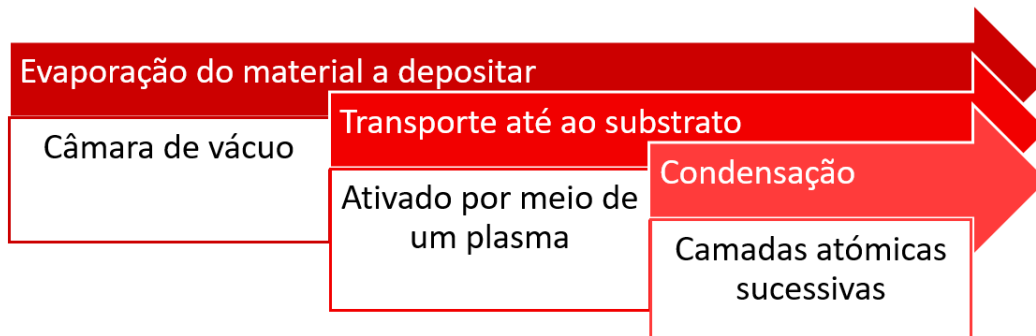


Figura 9 - Processo PVD, adaptado de [48]

Estes revestimentos possuem uma elevada dureza, resistência à fissuração térmica e têm ainda a particularidade de apresentarem usualmente tensões compressivas, que melhoram substancialmente a sua tenacidade à fratura [49].



Figura 10 - Etapas do processo PVD, adaptado de [48]

Quando se está perante este tipo de revestimento, é possível concluir que apresentam diversas características benéficas, que acabam por ter uma vantagem principal significativa para a ferramenta, sendo esta o aumento da vida útil da aresta de corte. Isto faz com que possa ser evitada a formação da aresta postiça de corte, assim como o desgaste por abrasão [45, 51]. Este processo é sobretudo recomendado para arestas de corte tenazes e afiadas, e para a maquinagem de materiais com tendência a provocar abrasão na aresta de corte da ferramenta [50]

### Evaporação a vácuo

Na evaporação a vácuo, o material é transformado por ação do calor [48]. O metal a ser depositado é evaporado a temperaturas elevadas, sendo que a câmara de vácuo necessita de alto vácuo para a sua execução. Posteriormente, é acelerado e depositado no substrato que, por sua vez, se encontra a uma temperatura mais reduzida, geralmente à temperatura ambiente. Podem ser obtidos revestimentos uniformes mesmo em formas complexas [52]. Geralmente esta técnica apresenta menor energia atômica e menor absorção de gases na deposição. Durante todo este processo, alguns contaminantes são libertados do revestimento que, no caso de aderir ao substrato, influenciam negativamente a pureza do revestimento. Verifica-se então nesta técnica uma adesão menos efetiva e taxas de deposição mais altas que no *sputtering* [49], processo que será descrito posteriormente nesta secção.

Este tipo de técnica é o mais indicado para filmes de maior espessura e com uma morfologia de baixa desordenada.

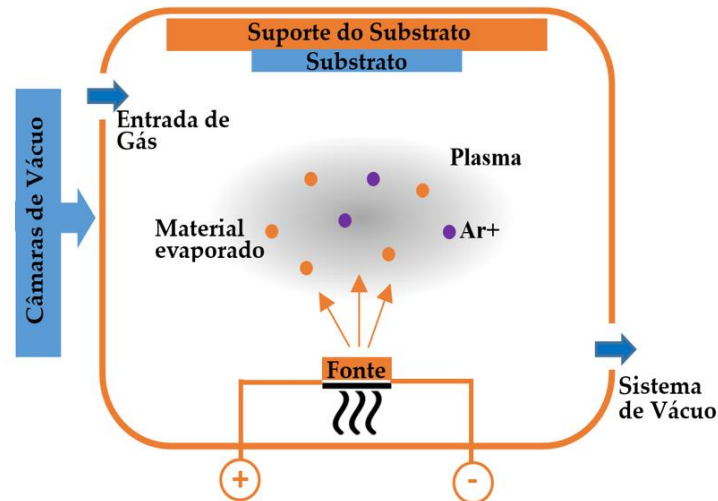


Figura 11 - Diagrama sistemático da técnica de deposição evaporação a vácuo adaptado de [45]

### Deposição iônica

Neste processo, o material é transformado por ação do calor, a baixas pressões [48, 53]. Por ação de um campo elétrico, há uma descarga luminosa que gera um plasma, enquanto os átomos vaporizados são apenas parcialmente ionizados [52].

Este método mostrou-se bastante eficaz no que diz respeito às características do processo, provenientes de altos níveis de eficiência de ionização [53].

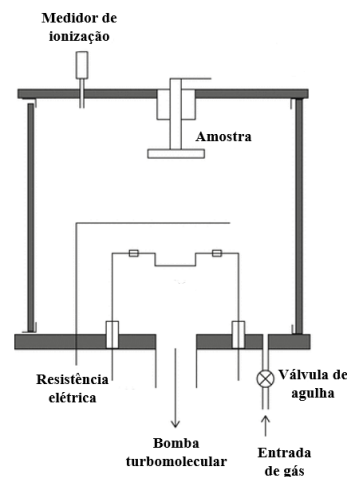


Figura 12 - Diagrama sistemático da técnica de deposição iônica adaptado de [54]

### Pulverização catódica (sputtering)

O material é arrancado do alvo por bombardeamento iônico do gás, através de um campo elétrico [48]. Os íons de carga positiva bombardeiam o alvo, provocando assim uma pulverização catódica de átomos arrancados do alvo. Por sua vez, estes condensam nos substratos que se encontram aquecidos para melhorar a adesão [52].

A pulverização catódica constitui ainda uma alternativa para aplicações onde fatores como o tamanho de grão, rugosidade, estequiometria, entre outros, prevalecem sobre a taxa de deposição. Já no caso de fatores como as tensões induzidas pelo arrefecimento, a consequência não é tão positiva, visto que pode condicionar a aplicação deste processo, dependendo da aplicação.

Esta técnica apresenta taxas de deposição mais baixas que as da evaporação e tem a capacidade de produzir superfícies lisas, mesmo usando temperaturas mais baixas. Apresenta ainda excelentes propriedades mecânicas e boa adesão aos principais materiais que são usados como substrato. É um dos processos mais complexos, bem como dos mais caros [55].

No seguinte esquema é possível visualizar esquematicamente as principais diferenças entre o *sputtering* (Figura 13 a)) e a evaporação (Figura 13 b)).

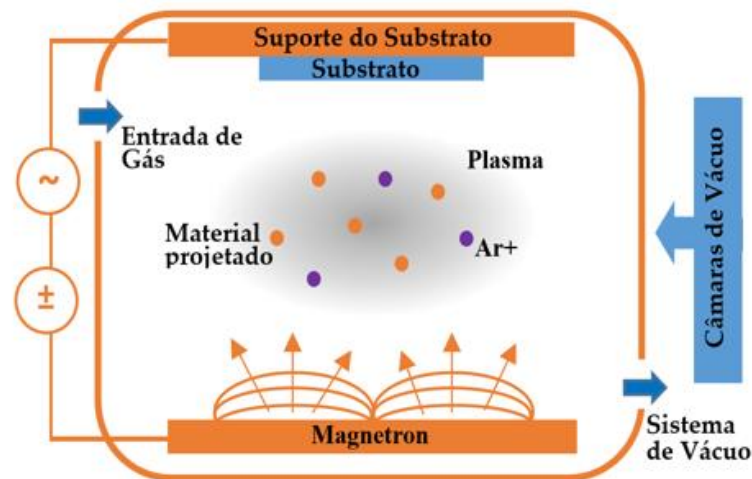


Figura 13 - Diagrama sistemático da técnica de deposição sputtering adaptado de [45]

Como é possível observar pela Figura 13, os reatores de PVD são constituídos por uma câmara de vácuo e dois elétrodos conectados a uma fonte de alta voltagem. Os revestimentos passíveis de serem realizados abrangem um leque muito vasto de combinações, destacando-se três muito usuais [50]:

- Nitreto de titânio (TiN)
- Carbonitreto de titânio (TiCN)
- Nitreto de titânio alumínio (TiAlN)
- Óxido PVD

Graças às suas propriedades mecânicas, quando se pretende uma elevada tenacidade por parte da ferramenta durante operações severas, deve fazer-se uma escolha cuidada e consciente do substrato e do revestimento, evitando assim problemas de vibração e formação de apara.

A dureza é uma propriedade fundamental a ser contemplada. Segundo *Podgornika et al.* [56], os resultados obtidos mostraram que a maioria dos ensaios nos quais a resistência ao desgaste teve uma melhoria mais acentuada, as ferramentas eram revestidas com materiais duros, ainda que o aço estivesse a ser usado como substrato.

Os revestimentos PVD são o principal método usado quando se pretende uma melhoria do comportamento da ferramenta face ao desgaste sob determinadas condições de trabalho. Após uma concreta avaliação de parâmetros como o coeficiente de atrito, taxa de desgaste e temperatura ambiente, estudos presentes na Tabela 6 confirmaram que o melhor desempenho da

resistência ao desgaste verifica-se quando estão presentes duas cargas normais diferentes [57]. A Tabela 6 apresenta vários artigos realizados sobre deposição pelo processo PVD.

Tabela 6 - Diferentes estudos de aplicação da técnica PVD

Estudo/Autor	Análise
<p><b>Holleck et al.</b> [58]</p>	<p>No que diz respeito ao revestimento PVD, os revestimentos multicamadas parecem ser os mais promissores para compósitos sujeitos a condições complexas de desgaste, porque atendem aos mais variados requisitos, nomeadamente boa adesão a substratos metálicos, tensões residuais moderadas, dureza adequada e baixos coeficientes de atrito. Foram usados os seguintes parâmetros:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidade de corte de 250 m/min</li> </ul> <p>As espessuras das camadas de revestimento foram de 50 nm para TiC e TiN e 2 nm para as camadas de TiBC. Foi concluído que:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Multicamadas por CVD e revestimentos por PVD foram executadas com sucesso, verificando-se uma redução do desgaste a uma escala industrial.</li> <li>• PVD é uma técnica mais apropriada para revestimentos multicamada num intervalo de 100 a 1000 camadas individuais.</li> <li>• Fatores como seleção do material adequado, ajuste do número e espessura das camadas, tensão e deformação do revestimento, são fundamentais para a melhoria do comportamento de desgaste.</li> </ul> <p><i>Sputtering</i> é, sem dúvida, o processo mais versátil para revestimentos multicamada.</p>
<p><b>Baptista et al.</b> [49]</p>	<p>Estes revestimentos são normalmente usados para ferramentas de maquinaria por causa da sua alta dureza e resistência ao desgaste. Algumas variantes foram desenvolvidas em torno de duas principais técnicas: Evaporação no vácuo e pulverização catódica (<i>sputtering</i>). Foi concluído que:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Em termos de otimização de energia, a técnica PVD consome muito mais energia do que a técnica CVD.</li> <li>• As técnicas de revestimento PVD têm vindo a ser aprimoradas, nomeadamente no uso do método HiPIMS/HPPMS.</li> </ul> <p>A redução do consumo de energia deve focar-se em cada passo do processo de revestimento.</p>
<p><b>Ali et al.</b> [59]</p>	<p>Ao longo deste estudo é analisada a técnica PVD e é feita uma comparação e análise das suas propriedades, usando as técnicas de evaporação no vácuo e pulverização catódica. Ao longo de todo o processo, estas técnicas foram substancialmente modificadas no sentido de fazer com que a adesão fosse efetuada sem a emissão de macrogotículas. Foi concluído que:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Os parâmetros de deposição devem ser diferentes para ambas as técnicas (evaporação e <i>sputtering</i>).</li> </ul> <p>Os parâmetros selecionados para o processo desempenham um papel fundamental para a otimização de propriedades dos revestimentos tendo como foco uma aplicação específica.</p>
<p><b>Romero et al.</b> [60]</p>	<p>Neste estudo, foram aplicados revestimentos de múltiplas camadas de TiAlN/TaN em nanoescala, utilizando o processo de <i>sputtering</i> num aço AISI M2. A técnica de deposição consistiu em iniciar com uma camada de</p>

	<p>TiAlN/TaN, seguida por uma camada de TiAlTaN. Para além disto, foi realizada uma exploração de quatro outras combinações potenciais. Adicionalmente, a velocidade de rotação do substrato foi ajustada para obter várias espessuras distintas. Identificou-se que:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• A melhor combinação em percentual de camada é 48% TiAlTaN e 52% TiAlN/TaN, dado o melhor equilíbrio entre as propriedades mecânicas, como alta adesão, dureza (29 GPa) e coeficiente de atrito (0,68).</li> </ul>
<p><b>Moarrefzadeh et al.</b> [47]</p>	<p>No presente trabalho foram depositadas camadas por métodos PVD, e é complementada através de várias técnicas que foram descritas ao longo deste artigo, bem como os equipamentos usados para a sua produção em grande volume. A deposição uniforme dos revestimentos em superfícies complexas necessita de rotação ou de uma estratégia de evaporação. Foi concluído que revestimentos em alumínio possuem uma ótima uniformidade.</p>

### 2.2.2. Chemical Vapour Deposition

Relativamente aos revestimentos CVD (Figura 14), há um conjunto de reações químicas que ocorrem numa fase gasosa, geralmente em condições de vácuo. Este processo consiste num aquecimento numa câmara de vácuo, contendo hidrogénio e outros gases para reação [31, 32]. Sob a ação da temperatura e baixa pressão, a mistura gasosa reage e forma moléculas que sintetizam sob a forma de um filme sobre o substrato. Efetivamente, dá-se uma interação entre a mistura de gases e substrato, que através de uma decomposição química de alguns constituintes dos diferentes gases utilizados e recombinação com o hidrogénio, formam o pretendido revestimento [63]. Neste caso, os revestimentos dão origem a uma camada geralmente uniforme, devido às combinações químicas ocorrentes entre o revestimento e o substrato [44]. Este tipo de processo tem um excelente desempenho quando destinado a materiais com elevado potencial de corrosão e abrasão [64].

Muitas vezes é usada esta técnica com o objetivo de aumentar a vida útil da ferramenta, diminuir o atrito e melhorar as propriedades térmicas (condução/dissipação, ou isolamento) [45]. Sendo este um dos fatores que diferencia este processo do PVD, o CVD necessita de um intervalo de temperaturas de deposição mais elevado, estando compreendidas entre 450°C e 1100°C, consoante o método utilizado [65]:

- HT-CVD – Alta temperatura, entre 900°C e 1100°C;
- MT-CVD – Media temperatura, entre 700°C e 900°C;

Há ainda outros processos, nomeadamente o ativo por plasma, que necessita de temperaturas 450°C - 750°C.

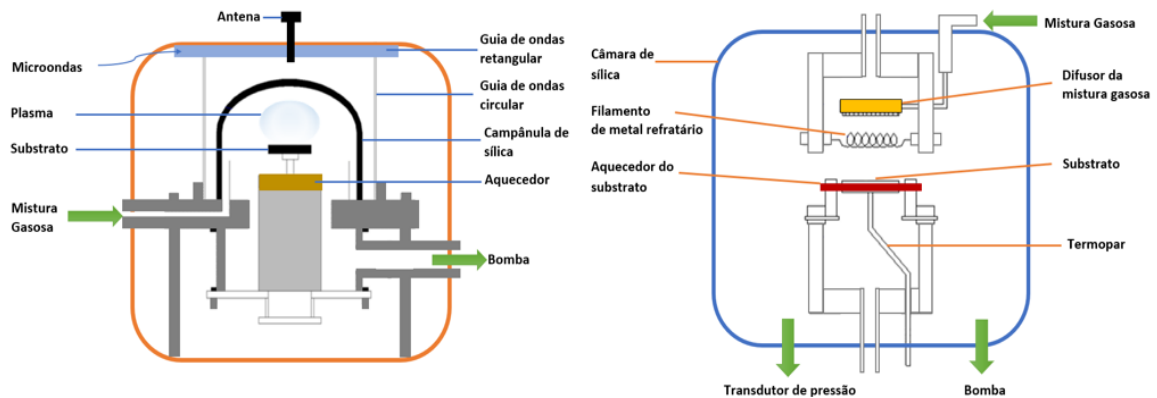


Figura 14 - Esquemática do processo CVD a) reator micro-ondas; b) reator de filamento quente adaptado de [45]

### Alta Temperatura (HT-CVD)

O método de alta temperatura é caracterizado por manter um forte nível de adesão ao substrato, num processo que assegura a sua repetibilidade [65]. O material do revestimento é formado através da mistura de metano,  $CH_4$ , ou azoto,  $N_2$ , na fase gasosa, por via de transferência direta para a ferramenta [20,37].

No entanto, este processo apresenta uma desvantagem: a tenacidade dos revestimentos de carbonetos sinterizados (que são os mais comuns neste método) é reduzida, quando comparada com o substrato não revestido [36,38]. Com o aumento da temperatura e da espessura do revestimento, a resistência à flexão reduz significativamente [65].

### Média Temperatura (MT-CVD)

Neste processo, na reação química no qual é utilizado o acetonitrilo ( $CH_3 CN$ ), é possível conseguir temperaturas de revestimento mais baixas, até  $200^\circ C$ , em comparação com o processo HT-CVD. O revestimento de titânio, zircónio e háfnio, pode ser efetuado com altas taxas de deposição [65].

Estabelecendo um método comparativo com o processo HT-CVD, este processo apresenta várias vantagens, sendo algumas delas:

- As tensões térmicas na ferramenta de corte são mais baixas por causa da redução de temperatura à qual o revestimento é efetuado. Apresenta menores tensões residuais;
- É menos provável que se formem fases frágeis;
- Menor probabilidade de provocar fissuras transversais na sua superfície.

Este processo requer um aumento do nível energético para a ativação dos gases. A categorização dos processos CVD é realizada de acordo com o modo como os gases são ativados, e como a alimentação é efetuada, e neste sentido temos:

- **Plasma Assistido por Micro-ondas (MPCVD):** Neste processo, um plasma é gerado por micro-ondas para decompor reagentes gasosos e depositar materiais na superfície de um substrato. A energia do plasma de micro-ondas permite que as reações ocorram em temperaturas mais baixas em comparação com o CVD térmico convencional. Este processo tem determinadas vantagens tais como a baixa pressão e baixa presença de impurezas [68, 69]. A taxa de deposição dos materiais é ainda afetada pelas estruturas do dispositivo que criam intensidades de campo elétrico e distribuições de plasma distintas [70, 71].

- **Filamento Quente (HFCVD):** Um filamento quente é aquecido a altas temperaturas. O gás reagente é introduzido na câmara de reação, onde o filamento quente atua como uma fonte de energia para decompor o reagente em átomos ou moléculas reativas. Essas espécies reativas depositam-se na superfície do substrato para formar o revestimento desejado. Uma das principais vantagens deste processo é o facto de o reator ser facilmente dimensionado. É fundamentalmente reconhecido pelo facto de ser apropriado para depositar em uma grande área, o que torna a produção em massa possível [72, 73].
- **Jato de Plasma DC (PJCVD):** Um jato de plasma é gerado usando um gás inerte, que é ionizado por um campo elétrico de corrente contínua (DC). Os reagentes gasosos são introduzidos no jato de plasma, no qual são ativados e depositados na superfície do substrato. Este processo é muito eficaz e amplamente usado para depositar filmes de diamante policristalino em grandes áreas. Os principais reagentes usados são o hidrogénio e o metano, podendo também ser utilizado o árgon. [74]
- **Combustão de Oxiacetileno (OC):** Um gás de oxiacetileno é usado como reagente. O acetileno é altamente reativo e, quando combinado com oxigénio, forma uma chama quente que é usada para decompor o reagente e depositar o material na superfície do substrato [75].

A Tabela 7 apresenta vários artigos realizados sobre deposição pelo processo CVD.

Tabela 7 - Diferentes estudos de aplicação da técnica CVD

Tema/Autor	Análise
<p><b>Fitzsimmons and Sarin</b> [55]</p>	<p>Neste estudo foram depositados revestimentos de WC-Co a alta temperatura, para a maquinagem de titânio e respetivas ligas. A adesão não foi considerada um problema significativo nestes substratos. Estes testes demonstraram que os revestimentos apresentam uma clara resistência ao desgaste a temperaturas elevadas, e podem ser usadas para altas velocidades de corte no caso de ligas de Titânio. Assim, foi concluído que:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• O desempenho das ferramentas com desgaste de flanco é determinado pelas propriedades do substrato, enquanto o das crateras geradas é determinado pelas propriedades do revestimento;</li> <li>• Foi ainda observada uma dependência entre a velocidade e o desgaste por cratera, sugerindo que tanto melhor é o desempenho quanto maior for a velocidade.</li> </ul> <p>O revestimento pela técnica CVD foi desenvolvido com o objetivo inicial de resolver o problema das altas velocidades de maquinagem, em substratos resistentes à deformação em alta temperatura, e foi concluído que seriam atingidas essas altas velocidades com a combinação do desenvolvimento do revestimento com o substrato apropriado.</p>
<p><b>Ginting and Nouari</b> [76]</p>	<p>Os autores ao longo deste caso, analisaram qual a aplicabilidade da ferramenta de carboneto não revestida e da ferramenta multicamada revestida por <i>Chemical Vapour Deposition</i> (CVD), para cortar uma liga de titânio sob condição de corte a seco. Foram usados os seguintes parâmetros:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidades de corte de 100 - 125 m/min</li> <li>• Velocidade de avanço de 0,15 - 0,20 mm/dente</li> </ul>

	<p>Assim, foi verificou-se que:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ocorreram fraturas frágeis, nomeadamente fissuras e lascas, geralmente seguidas;</li> <li>• O desgaste de flanco afeta significativamente a integridade da superfície;</li> <li>• Os melhores valores de rugosidade foram obtidos para valores de velocidades de corte e velocidades de avanço intermédios (110-115 m/min e 0,165 – 0,185 mm/dente respetivamente);</li> </ul>
<p><b>Ginting et al.</b> [77]</p>	<p>Este estudo é baseado numa superfície maquinada de liga de titânio, num processo de maquinagem a seco. Foram usados os seguintes parâmetros:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidades de corte de 55 m/min e 100 m/min</li> <li>• Velocidade de avanço de 0,10 mm/dente e 0,15 mm/dente</li> </ul> <p>Assim, foi verificou-se que:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• A similaridade entre os resultados de rugosidade obtidos sugere que os materiais de revestimento usados para a ferramenta revestida por CVD (nomeadamente TiN, TiC e TiCN) são ineficazes devido à sua remoção logo no início do processo de corte (delaminação do revestimento);</li> <li>• Tanto a ferramenta revestida como não revestida apresentaram adesão, causado pela remoção de material da ferramenta;</li> <li>• Para a ferramenta revestida, a delaminação apresenta-se como um mecanismo inicial de desgaste.</li> </ul> <p>Concluiu-se então que a melhor combinação de parâmetros para se obter uma boa qualidade superficial foi baixa velocidade de avanço e elevada velocidade de corte.</p>
<p><b>Jawaid et al.</b> [78]</p>	<p>Os autores relataram que o metal duro com revestimento CVD (<math>W-Ta/Nb-C-Co+TiCN/Al_2O_3</math>) mostrou um bom desempenho ao facejar Ti-6Al-4V sob condições de corte húmido. Foram usados os seguintes parâmetros:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidades de corte de 55 m/min, 65 m/min 80 m/min e 100 m/min</li> <li>• Velocidade de avanço de 0,10 mm/dente e 0,15 mm/dente</li> </ul> <p>Assim, foi verificou-se:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ferramentas revestidas por CVD obtiveram melhor desempenho que as revestidas por PVD;</li> <li>• Os mecanismos predominantes das ferramentas revestidas foram a delaminação, adesão do material maquinado, difusão, deformação plástica e crateras térmicas;</li> <li>• Para ambas as velocidades de avanço, o efeito da velocidade de corte na vida útil da ferramenta foi menos significativo em velocidades de corte mais elevadas;</li> <li>• A taxa de desgaste no flanco das ferramentas CVD foi ligeiramente menor do que nas ferramentas PVD (maior resistência ao desgaste das ferramentas CVD do que as de PVD);</li> <li>• O desgaste de flanco não uniforme foi o padrão de desgaste dominante (ambas as ferramentas exibiram um padrão semelhante);</li> <li>• Verificaram-se lascas excessivas na aresta de corte na face de folga (modo de falha dominante);</li> </ul> <p>No geral, as ferramentas com revestimento pela técnica CVD apresentaram melhor desempenho do que as ferramentas com revestimento pela técnica PVD.</p>

**Jetpurwala et al.**  
[79]

No presente estudo, os autores produziram revestimentos microcristalinos de diamante (MCD) e nanocristalino de diamante (NCD) em brocas de carboneto de tungstênio, utilizando a técnica de deposição de filamento quente (HFCVD - *Hot Filament Chemical Vapor Deposition*). Foi concluído que o revestimento NCD aderiu melhor em comparação com o MDC, e assim foi possível abrir novos horizontes para filmes de CVD específicos para as aplicações em estudo.

Na Tabela 8 estão sintetizadas as características principais de cada um dos processos, PVD e CVD, respetivamente.

Tabela 8 - Quadro resumo processos PVD e CVD

	PVD	CVD
<b>Procedimento</b>	Material do alvo é vaporizado e/ou ionizado e projetado com o auxílio de um gás, dentro de uma câmara de vácuo	Aquecimento numa câmara de vácuo a baixa pressão e reação entre gases, fazendo com que as moléculas reajam e se sintetizem sobre o substrato formando um filme
<b>Intervalo de temperaturas</b>	400°C e 600°C	450°C e 1100°C
<b>Materiais comuns</b>	Nitreto de titânio ( <i>TiN</i> ) Nitreto de titânio alumínio ( <i>TiAlN</i> ) Nitreto de crómio ( <i>CrN</i> )	Carboneto de titânio ( <i>TiC</i> ) Nitreto de titânio ( <i>TiN</i> ) Carbonitreto de titânio ( <i>Ti(C,N)</i> ) Óxido de alumínio ( <i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i> )
<b>Métodos</b>	Evaporação no vácuo Deposição iónica <i>Sputtering</i>	Plasma Assistido por Micro-ondas (MPCVD) Filamento Quente (HFCVD) Jato de Plasma DC (PJCVD) Combustão de Oxiacetileno (OC)
<b>Vantagens</b>	- Ecologicamente amigáveis - Menor dispêndio de energia - Versatilidade de adaptação para diferentes revestimentos e substratos	- Geralmente mais espessos que os obtidos por PVD [47] - Capacidade de deposição em materiais refratários a temperaturas inferiores à sua temperatura de fusão - Controlo da morfologia - Controlo do tamanho do grão - Possibilidade de realização à pressão atmosférica [80]

### 2.3. Recentes avanços em revestimentos para ferramentas de corte

Os revestimentos podem apresentar diferentes tipos de estruturas, como é possível observar pelos exemplos das Figura 15 *Erro! A origem da referência não foi encontrada.*:

- Revestimento monocamada
- Revestimento camada dupla
- Revestimento gradiente
- Revestimento multicamada
- Revestimento nanoestruturado
- Revestimento nanocompósito

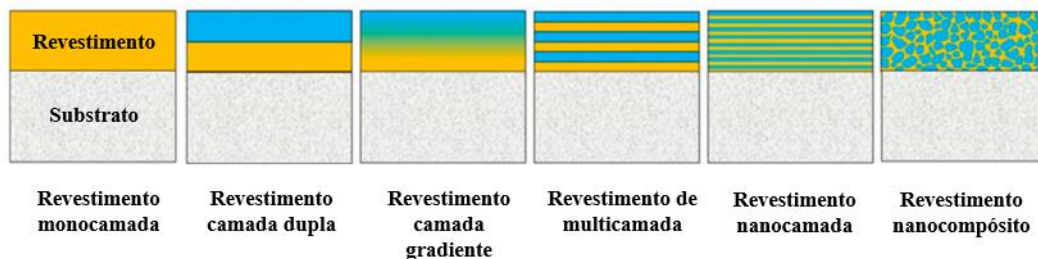


Figura 15 - Tipologias de revestimentos avançados adaptado de [81, 82]

Cada tipologia de revestimento está preparada e direcionada para diferentes situações. Quanto maior for o número de camadas do revestimento, maior é a tenacidade deste revestimento, fazendo com que a propagação de fissuras seja mais difícil de ocorrer [82].

Quanto aos tipos de revestimento destacam-se quatro, sendo três destes provenientes de um elemento que origina uma família de ligas, sendo este o titânio:

- Carboneto de titânio ( $TiC$ )
- Nitreto de titânio ( $TiN$ )
- Carbonitreto de titânio ( $TiCN$ )
- Óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ )

Todas as ligas com base no titânio possuem propriedades semelhantes, entre elas a elevada dureza e tenacidade, e resistência à corrosão, e por isso, são frequentemente usadas como revestimento. No entanto, estas propriedades têm vindo a ser alvo de uma melhoria contínua no que se refere à adesão, desgaste e tenacidade, tendo em vista tratamentos microestruturais e otimizações do projeto. Um dos exemplos de uma melhoria foi a adição de alumínio aos revestimentos ( $TiAlN$ ), dada a sua elevada resistência ao corte, para elevadas velocidades de maquinagem. Independentemente das ferramentas e da variedade de aplicações a estas associadas, é fundamental que tenha uma boa resistência ao desgaste. No entanto, não são as únicas opções no que se refere à escolha dos materiais para as ferramentas. Também a adição de cromo, Cr, e níquel, Ni, são opções vantajosas no caso de se querer promover microestruturas homogêneas. No caso do estudo de Yi et al. [83], a incorporação de Ni em revestimentos  $AlTiN$  levou à formação de uma estrutura nanocristalina compacta nos revestimentos  $AlTiN-Ni$ , em comparação com a estrutura colunar nos revestimentos  $AlTiN$ . No que diz respeito à dureza, o principal componente responsável é o carboneto [13]. Na Tabela 9 serão apresentadas análises de vários autores para diferentes tipos de estruturas dos revestimentos.

Tabela 9 - Estudos para os diferentes tipos de estruturas dos revestimentos

Tema/Autor	Análise
<p><b>Kivak et al.</b> [84]</p>	<p><b>Monocamada</b></p> <p>O presente estudo foi realizado com objetivo de obter os mínimos valores de rugosidade superficial sob condições de corte a seco. Foram usados os seguintes parâmetros:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidades de corte de 12 m/min, 14 m/min, 16 m/min e 18 m/min</li> <li>• Velocidade de avanço de 0,10 mm/dente e 0,12 mm/dente</li> </ul> <p>Foi verificado que os valores que garantiram o melhor desempenho da ferramenta de corte foram a velocidade de corte e velocidade de avanço mais elevadas (18 m/min e 0,12 mm/dente, respectivamente)</p>
<p><b>Tan et al.</b> [85]</p>	<p><b>Camada dupla</b></p> <p>Neste artigo foi realizado um estudo comparativo entre revestimentos monocamada e de camada dupla (revestimento de WC-CoCr, HVOF). Este revestimento tinha como principal função constituir-se como um protetor para o desgaste severo. Tanto a microestrutura como a morfologia e propriedades mecânicas do revestimento de camada dupla foram estudadas num modo comparativo com as estruturas monocamada. Os resultados mostram que:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Revestimento com camada dupla oferece melhor resistência ao desgaste do que os monocamada;</li> <li>• Peças resistentes ao desgaste severo com os revestimentos de camada dupla inibiram a formação de crateras e, conseqüentemente, o prolongamento do seu limite de vida útil;</li> <li>• O tamanho das partículas foi um dos fatores diferenciadores na estrutura de revestimentos, pois não foi possível observar nenhum defeito na interface das duas camadas;</li> <li>• A estrutura de camada dupla combina as duas camadas, conseguindo assim um conjunto de propriedades mecânicas muito favorável, nomeadamente excelente resistência ao desgaste e alta tenacidade à fratura.</li> </ul> <p>A estrutura de camada dupla apresenta menor propagação de fissuras.</p>
<p><b>Ding et al.</b> [86]</p>	<p><b>Camada gradiente</b></p> <p>Um revestimento de gradiente Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/Mg foi depositado na liga de magnésio AZ31 através da técnica <i>sputtering</i>. A microestrutura e as propriedades do revestimento foram investigadas por diversos métodos e parâmetros. Os resultados mostram que:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• O revestimento de gradiente Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/Mg mostra uma mudança gradual na composição química ao longo da espessura, diminuindo as tensões residuais do revestimento/substrato, e reduzindo assim o risco de fissuras e aumentando a compactação do revestimento;</li> <li>• A adesão foi excelente.</li> </ul> <p>O revestimento gradiente tem melhor resistência à corrosão.</p>
<p><b>Silva et al.</b> [87]</p>	<p><b>Multicamada</b></p> <p>Este estudo compara o comportamento de uma monocamada de B<sub>4</sub>C com uma multicamada CrN/CrCN/DLC revestidas por PVD, com o objetivo de caracterizar os mecanismos de desgaste presentes nos diferentes revestimentos. Foi verificado que:</p>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A adesão verificada entre os revestimentos e o substrato foi satisfatória, uma vez que foi avaliada com base na indentação e no teste de dureza;</li> <li>• Foram encontrados apenas dois mecanismos de desgaste, sendo eles crateras, consequentemente causadas pela abrasão de contacto.</li> </ul> <p>A multicamada teve um desempenho superior à monocamada, devendo-se principalmente à lubrificação promovida pelo revestimento DLC, avaliando o parâmetro <math>R_a</math>.</p>
<p><b>Biksa et al.</b> [88]</p>	<p><b>Nanoestrutura</b></p> <p>Ao longo deste estudo, foram investigados revestimentos de nanoestrutura em multicamada com AlTiN/MexN, bem como vários parâmetros de maquinagem, nomeadamente a vida útil da ferramenta revestida, o comportamento ao desgaste, e formação da apar. Foram usados os seguintes parâmetros:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidades de corte de 40 - 60 m/min</li> <li>• Velocidade de avanço de 0,125 mm/dente</li> </ul> <p>Assim, foi verificado que:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Os mecanismos de desgaste observados foram a formação de aresta postiça, <i>chipping</i>, crateras;</li> <li>• AlTiN/MexN nanoestruturado e multicamada é mais adequado quando comparado com AlTiN monocamada;</li> </ul> <p>Os revestimentos AlTiN/MexN são os revestimentos que apresentam melhor desempenho ao desgaste na maquinagem de Inconel 718, enquanto para maquinar ligas de titânio, o revestimento AlTiN/VN confere melhor vida útil da ferramenta e um melhor comportamento ao desgaste.</p>
<p><b>Pshyk et al.</b> [89]</p>	<p><b>Camada nanocompósito</b></p> <p>No presente estudo, o autor avaliou uma camada nanocompósito (TiAlSiY)N e uma multicamada também em nanoescala com revestimento (TiAlSiY)N/MoN. A multicamada admitia uma espessura de 10 nm por camada.</p> <p>Foi concluído que a multicamada teve um melhor desempenho a nível de desgaste.</p>

## 2.4. Mecanismos de desgaste associados a ferramentas de corte

Tendo em conta o comportamento ao desgaste de cada material, é fundamental analisar as ferramentas de corte em questão, pois estas serão a chave para retirar a informação essencial ao estudo pretendido, ou seja, quais as melhores ferramentas e estratégias a desenvolver, e até mesmo perceber quais as ferramentas mais indicadas para cada material [90]. Na Figura 16 é possível analisar como é feita a classificação dos diversos parâmetros de desgaste.

	Parâmetro						
Forma do contacto	Esfera/esfera	Cilindro/cilindro	Plana/plana	Esfera/plana	Cilindro/plana	Punção/Plana	
Nível de pressão de contacto	Elástico		Elasto-plástico		Plástico		
Velocidade de deslizamento	Baixo		Médio		Alto		
Temperatura de contacto	Baixo		Médio		Alto		
Material no ponto de contacto	Igual	Forte	Suave	Compatível	Incompatível		
Ambiente	Vácuo	Gás	Líquido	Pasta de polimento			
Ciclo de contacto	Baixo (singular)		Médio		Alto		
Distância de contacto	Pequena		Média		Grande		
Fase de desgaste	Sólido	Líquido	Gás	Átomos	Iões		
Estrutura da partícula de desgaste	Original		Mecanicamente misturados		Triboquimicamente formado		
Liberdade da partícula de desgaste	Livre	Presas	Embutidas	Aglomerado			
Unidade (do desgaste)	Escala mm		Escala µm		Escala nm		
Física elementar e química no desgaste	Absorção física, absorção química, ativação químico-tribológica e formação de filmes tribológicos, oxidação e delaminação, oxidação e dissolução, oxidação e formação de gás, transição de fase, recristalização, nucleação de fissuras e propagação, transferência adesiva e retransferência						
Dinâmica de sistemas elementares relacionados com desgaste	Vibração vertical		Vibração horizontal		Vibração por auto-excitação		Vibração harmónica
Processo de desgaste dominante	Fratura (dúctil ou frágil)		Dissolução		Oxidação		Evaporação
Modo de desgaste	Abrasão	Adesão	Fadiga	Corrosão	Difusão		
Tipo de desgaste	Mecânico		Químico		Térmico		

Figura 16 - Classificação de parâmetros de desgaste adaptado de [91]

Uma das repercussões que o desgaste da ferramenta pode apresentar é a falha da ferramenta, pois está dependente dos mais variados fatores, nomeadamente geometria, material a maquinar, parâmetros de corte, características da máquina, fluídos de corte, entre outros [92]. No entanto, entre estas, há propriedades que se distinguem a nível de importância, para melhorar o comportamento ao desgaste das ferramentas, sendo elas [41]:

- Dureza;
- Resistência mecânica;
- Rácio dureza/módulo de *Young*;
- Coeficiente de atrito.

A Figura 17 apresenta as causas iniciais do desgaste, posteriormente os mecanismos de desgaste associados, que por sua vez levam a diferentes tipos de desgaste, que podem ter associadas várias consequências de desgaste, nomeadamente o aumento da rugosidade superficial, forma e tolerâncias geométricas associadas. Estes fatores que pioram as propriedades mecânicas da superfície maquinada, o oposto do objetivo pretendido [93].

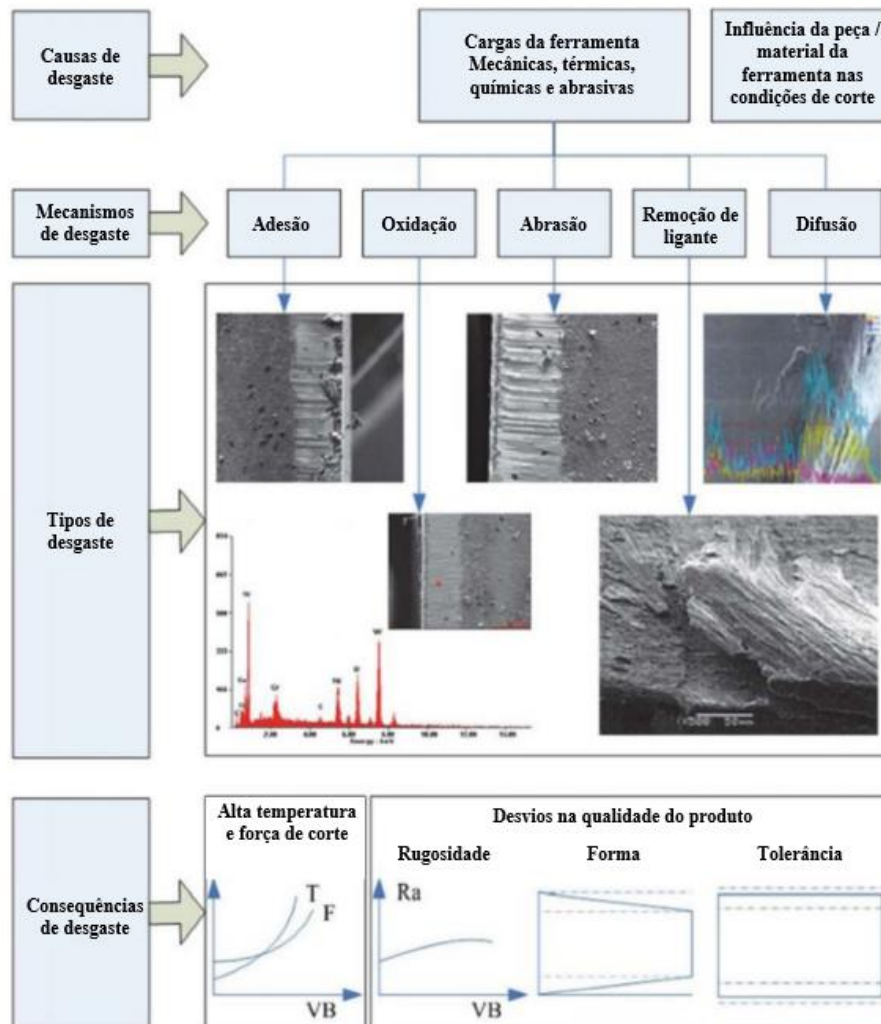


Figura 17 - Causas de desgaste, mecanismos de desgaste, tipos de desgaste e consequências de desgaste adaptado de [94]

### 2.4.1. Tipologias de desgaste

Segundo recentes desenvolvimentos, uma maneira de desenvolver os mecanismos de desgaste é implementar estruturas multicamada, pois estas conferem propriedades que promovem dissipação térmica e melhoram a resistência à propagação de fissuras que, por consequência, aumentam o tempo de vida da ferramenta [95]. A falha pode ocorrer de várias maneiras, entre elas:

#### Difusão

A difusão é um tipo de desgaste que ocorre geralmente quando a temperatura gerada nas interfaces promove a interpenetração de átomos no estado sólido na superfície contrária. Dada estas diferenças de temperaturas, podemos considerar um tipo de desgaste térmico [91].

### Adesão

Este tipo de desgaste envolve o contacto e interação entre a avara e a ferramenta. As tensões locais podem ser altas, mesmo quando a carga aplicada é baixa. Na Figura 18 é possível observar conjugações de metais e a respetiva tendência para aderirem entre si [92].

	W	Mo	Cr	Co	Ni	Fe	Nb	Pt	Zr	Ti	Cu	Au	Ag	Al	Zn	Mg	Cd	Sn	Pb
In				2	3				4	3	3	4	4	1	3	4	4	4	4
Pb	2	2	1	1	1	1	1	4	4	4	1	2	3	1	1	3	3	4	
Sn	3		1	3	3	2	3	4	3	4	3	4	4	2	3	2	4		
Cd			3	3	2	2		4	4	3	3	4	4	1	4	4			
Mg		3		3	2	2	2		4	2	4	4	4	4	4	3			
Zn			3	4	4	4	4	2	4	2	3	4	4	4	4				
Al			4	3	4	3	4	4	4	3	3	4	4	4	4				
Ag			1	2	1	1	1	1	2	4	3	4	3	4					
Au			4	3	4	3	4	4		4	4	3	4						
Cu			2	1	1	4	4	3	2	4	4	3							
Ti			4	4	4	3	4	4	4	4	4								
Zr			3	4	3	4	3	2	4	3									
Pt			4	4	4	4	4	4	4										
Nb			4	4	4	4	4	4											
Fe			4	4	4	4	4												
Ni			4	4	4	4													
Co			4	4	4														
Cr			4	4															
Mo		4																	

Figura 18 - Tendência de casais de metais aderirem mutuamente [92]

A adesão (Figura 19) é promovida principalmente por dois fatores [92]:

- Tendência de diferentes materiais formarem soluções sólidas ou compostos intermetálicos, que leva à combinação de diferentes estruturas cristalinas e propriedades químicas, que conseqüentemente e mediante a sua combinação, podem aderir mais ou menos entre si (Figura 18).
- Limpeza da superfície: se esta possuir óxido espesso, tem um baixo desgaste. Aços e ligas que não formem óxidos espessos, têm baixa resistência a este tipo de desgaste.

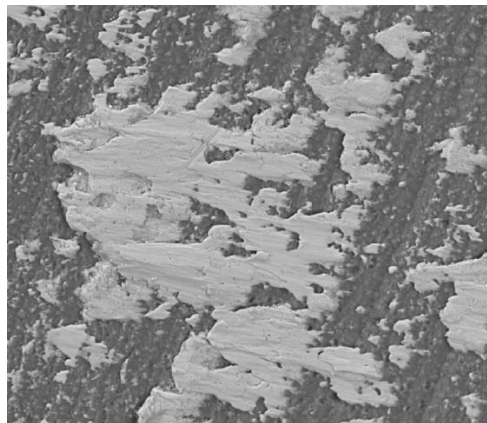


Figura 19 - Desgaste adesivo [96]

### Abrasão

Tanto as taxas de desgaste abrasivo como a resistência relativa ao desgaste, variam consideravelmente para abrasivos de dureza, tamanho e formas diferentes. Este tipo de desgaste ocorre quando zonas duras da apanha removem material por abrasão mecânica, ao passar na face da ferramenta. As taxas aumentam aproximadamente linearmente com o aumento da carga aplicada, por unidade de área. Geralmente, a resistência ao desgaste aumenta à medida que a dureza do material também aumenta, exceto nos casos em que o material é endurecido anteriormente por deformação plástica [92]. Na Figura 20 é possível observar um exemplo de desgaste abrasivo.

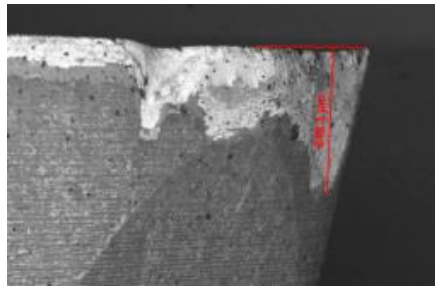


Figura 20 - Desgaste abrasivo [97]

### Fadiga

No desgaste por fadiga (Figura 21), as condições de tensão são assumidas como elásticas ou elasto-plásticas. Após um contacto repetido entre a peça e a ferramenta, a peça entra em ciclo de tensões cada vez mais elevadas, acabando por atingir o limite de fadiga, constituindo um dano progressivo à superfície [91].



Figura 21 - Desgaste por fadiga [91]

### Oxidação

O desgaste por oxidação (Figura 22) ocorre por meio de uma reação química entre os materiais da superfície de contacto e os meios circundantes, provocado pela transferência de iões entre a ferramenta e a peça de trabalho, levando à oxidação da ferramenta. O desgaste corrosivo inicial reduz o subsequente desgaste corrosivo, ou seja, quanto maior for o desgaste corrosivo numa fase inicial, menor será numa fase posterior. Assim as superfícies desgastadas tornam-se mais lisas e adaptam-se melhor [91].

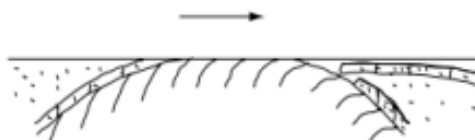
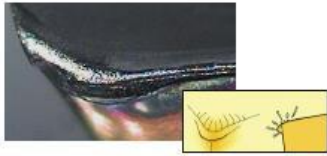
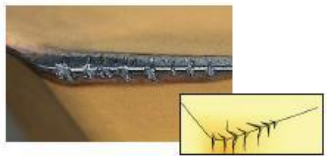

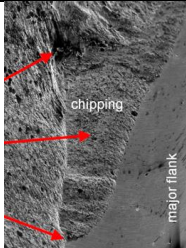

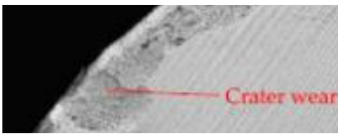
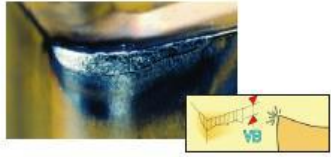
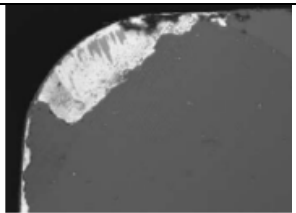

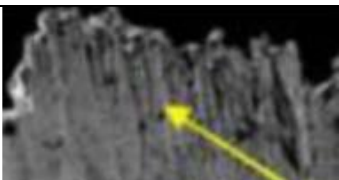



Figura 22 - Desgaste por oxidação [91]

Na Tabela 10 é possível verificar os diferentes tipos de desgaste e respetiva ilustração de ferramentas desgastadas, aliados ainda à descrição do tipo de desgaste.

Tabela 10 - Tipos de desgaste das ferramentas de corte

Tipo de desgaste / representação		Definição / Citação
Térmico	<b>Deformação plástica</b>  [50]	<p>Dada a ocorrência de amolecimento do material, a ferramenta sofre deformação plástica por causa das elevadas temperaturas desenvolvidas no processo. De um modo geral, as classes mais duras e os revestimentos mais espessos melhoram a resistência ao desgaste por deformação plástica [23,55].</p>
	<b>Trincas térmicas</b>  [50]	<p>A ocorrência de fissuras térmicas ocorre devido ao choque térmico proveniente dos intervalos entre as respetivas operações de corte, ou seja, quando a temperatura na aresta muda rapidamente de quente para frio, várias fissuras podem surgir perpendicularmente à aresta de corte [23,52].</p>
Mecânico	<b>Quebra de aresta</b>  [50]	<p>Este processo é proveniente da sobrecarga de tensões de tração mecânica. Podem surgir devido ao martelamento de lascas, escolha incorreta dos parâmetros, inclusões no material da peça, aresta postiça, vibrações, entre outros, causando uma má qualidade superficial [23,52].</p>
	<b>Chipping</b>  [99]	<p>Este processo é mais específico materiais duros, como metais, no entanto, à semelhança da quebra de aresta, consiste na remoção de material, porém, em fragmentos maiores e mais bem definidos [23,52].</p>
Químico	<b>Craterização</b>  [50]	<p>Tipo de desgaste que ocorre na saída da ferramenta, provocado pela reação química entre o material e a ferramenta de corte, que ocorre na face de ataque da ferramenta. Esta aumenta com o aumento da velocidade de corte. Com a evolução do processo e redução da vida útil da ferramenta, dada a craterização excessiva, há a probabilidade de fragilizar a aresta de corte, podendo levar ao colapso da mesma [23,55].</p>

		 <p>[95]</p>	<p><b>Sugihara et al. [100]</b></p> <p>Os autores chegaram a duas conclusões particularmente interessantes no que diz respeito às zonas das craterizações:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• A textura de microestrias na face de corte de uma ferramenta de corte foi eficaz na supressão do desgaste de craterização na maquinagem de aços de médio carbono.</li> </ul> <p>Verificou-se que a superfície texturizada melhorou a resistência ao desgaste da cratera, servindo como (i) um micro-reservatório para um fluido de corte e (ii) uma micro-armadilha para detritos de desgaste.</p>
Abrasivo	Desgaste de flanco	 <p>[50]</p>	<p>O desgaste de flanco é o tipo de desgaste mais comum. Oferece uma vida útil à ferramenta previsível e estável, pelo que é um tipo de desgaste aceitável. Este tipo de desgaste ocorre por abrasão do flanco principal da peça, a partir do contacto da ferramenta com partículas duras no material a maquinar [23,55].</p>
		 <p>[44]</p>	<p><b>Sousa et al. [44]</b></p> <p>No final deste estudo conclui-se que ambas as ferramentas analisadas ao longo deste projeto sofreram mais desgaste de flanco para grandes comprimentos de corte.</p>
Adesivo	Aresta postiça (Build-up Edge)	 <p>[50]</p>	<p>A formação de aresta postiça é um processo que é causado pela adesão do material maquinado à superfície de corte da ferramenta. No entanto, esta adesão de partículas externas não é favorável, pois provocará pequenas irregularidades na superfície, e por isso, mau acabamento superficial. Baixa velocidade de corte aumenta a formação de aresta postiça [23, 55].</p>
		 <p>[41]</p>	<p><b>Sousa et al. [81]</b></p> <p>O autor concluiu que a maior parte dos processos de torneamento sofrem desgaste abrasivo e adesivo, nomeadamente aresta postiça.</p>
	Desgaste tipo entalhe	 <p>[50]</p>	<p>Em casos com este tipo de desgaste, verifica-se dano excessivo na face de folga e no flanco da ferramenta. É causado pela adesão e deformação na superfície endurecida [23,52].</p>

 <p style="text-align: center;">[101]</p>	<p style="text-align: right;"><b>Zeng et al. [101]</b></p> <p>Neste estudo, os autores concluíram que a melhoria do desgaste tipo entalhe é principalmente causado pelo alívio de tensões locais na ferramenta.</p>
--	---

### 2.4.2. Análise do desgaste das ferramentas revestidas

Um dos principais parâmetros a avaliar tendo como objetivo a otimização do processo de maquinagem é a análise do desgaste das ferramentas revestidas. Assim, e com base na observação e percepção dos resultados, será possível o desenvolvimento de novas ferramentas e revestimentos que produzam melhores resultados, tanto a nível de rugosidade da superfície da peça maquinada, como qualidade, eficiência e eficácia do processo, e vida útil da ferramenta [102, 103].

No entanto, tendo em conta o material a usar, os parâmetros definidos, entre outros pontos, as conclusões e os resultados esperados poderão não ser os mesmos para todos os estudos. Na Tabela 11 podemos observar alguns estudos e as respetivas conclusões.

Tabela 11 - Diferentes estudos de desgaste de ferramentas

Tema/Autor	Análise
<p style="text-align: center;"><b>Sai et al.</b> [104]</p>	<p>O presente estudo analisa a evolução de determinados parâmetros, nomeadamente a rugosidade, tensões residuais, microestrutura e microdureza para diferentes parâmetros de fresagem, quando maquinando um aço ao carbono e um DSS. Foi verificado que:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidades de corte baixas, levam a uma qualidade da superfície degradada, principalmente devido à formação de arestas postiças.</li> <li>• Valores elevados de velocidade de corte não afetam de forma significativa a espessura (100 – 150 <math>\mu\text{m}</math>)</li> </ul> <p>Os valores ideais para a velocidade de corte devem estar compreendidos entre os valores 220 m/min e 440 m/min.</p>
<p style="text-align: center;"><b>Caliskan et al.</b> [105]</p>	<p>Os autores, ao longo deste estudo, investigaram o comportamento ao desgaste e o desempenho de ferramentas de corte de metal duro revestidas com AlTiN/TiN e TiAlSiN/TiSiN/TiAlN no facejamento sem lubrificação do aço-ferramenta AISI 02. Foram usados os parâmetros:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidades de corte 100 m/min e 150 m/min</li> <li>• Velocidades de avanço de 0,10 mm/dente, 0,20 mm/dente e 0,30 mm/dente</li> </ul> <p>Verificou-se que:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Os valores de espessura dos revestimentos foram 3,2 <math>\mu\text{m}</math> (AlTiN/TiN), 3,6 <math>\mu\text{m}</math> (TiAlSiN/TiSiN/TiAlN), 3,9 <math>\mu\text{m}</math> (TiAlN), 4,0 <math>\mu\text{m}</math> (TiN) e 2,0 <math>\mu\text{m}</math> (TiN/TiAlN comercial)</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Os principais mecanismos de desgaste foram o desgaste abrasivo e oxidação. No entanto, também se verificaram fissuras, formação de aresta postiça (BUE) e <i>chipping</i>;</li> <li>• Melhor adesão ao substrato proporcionada pelo revestimento AlTiN/TiN, bem como maior resistência ao desgaste no processo de fresagem;</li> <li>• A monocamada TiN apresenta a menor taxa de desgaste;</li> </ul>
<p><b>Silva et al.</b> [97]</p>	<p>Neste estudo, observou-se essencialmente desgaste do flanco, formação de crateras e falha. O desgaste da monocamada de TiAlN, obtida pela técnica PVD é lenta mas, quando o revestimento falha, a ferramenta degrada muito facilmente por formação de crateras.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Devido à elevada tenacidade que este tipo de ligas possuem, apresentam grande tendência para a formação de aresta postiça, torna o processo de maquinagem e remoção de aparas muito mais difícil;</li> <li>• Formação de aresta postiça persistente e desgaste adesivo [57, 106]</li> <li>• Usando condições de corte a seco, a rugosidade da superfície é mais alta, no entanto o comportamento ao desgaste não é linear, e as velocidades de corte aumentam significativamente. A rugosidade num momento inicial aumenta, depois estabiliza e posteriormente decresce, à medida que a velocidade de corte aumenta;</li> <li>• Usando condições de corte com lubrificação, a rugosidade tende a decrescer continuamente com o aumento das velocidades de corte.</li> </ul> <p>Foi concluído que um bom acabamento de superfície é obtido através de baixas velocidades de avanço, altas velocidades de corte e condições de corte com lubrificação.</p>
<p><b>An et al.</b> [82]</p>	<p>No presente estudo é apresentada uma investigação sobre o desgaste de ferramentas revestidas por PVD e CVD, após operações de faceamento em ligas de titânio Ti-6242S e Ti-555.</p> <p>Foi verificado que:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Após os ensaios de maquinagem de Ti-6242S, o revestimento CVD apresentava leves indícios de lascagem e adesão de material;</li> <li>• A liga de titânio Ti-555 com revestimento de CVD sofreu delaminação, desgaste adesivo e lascagem severa;</li> <li>• No caso do revestimento PVD, este sofreu desgaste térmico na face de ataque e adesão na face de folga.</li> </ul> <p>Os autores concluíram que o revestimento pela técnica PVD apresentou um melhor comportamento ao desgaste, devido a uma maior resistência à propagação de fissuras, que provocaram a falha do revestimento CVD.</p>
<p><b>Sousa et al.</b> [95]</p>	<p>No presente estudo foi maquinada uma liga de CuBe, usando ferramentas não revestidas e revestidas (multicamada de DLC/CrN). O desenvolvimento de várias e diferentes estratégias de maquinagem tornam-se muito vantajosas para a otimização do comportamento ao desgaste destas ferramentas de corte. Foram usados os parâmetros:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidade de corte de 126 m/min</li> <li>• Velocidades de avanço de 350 mm/min, 750 mm/min e 1500 mm/min</li> </ul>

	<p>As espessuras das camadas foram 2,689 <math>\mu\text{m}</math> (Z1, CrN), 0,271 <math>\mu\text{m}</math> (Z2, DLC), 0,570 <math>\mu\text{m}</math> (Z3, CrN) e 0,601 <math>\mu\text{m}</math> (Z4, DLC). As conclusões tiradas deste estudo foram as seguintes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Verificou-se formação de aresta postiça de corte, abrasão e delaminação do revestimento;</li> <li>• A formação de uma camada adesiva de material na superfície da ferramenta está diretamente relacionada com o desgaste verificado no flanco da ferramenta;</li> <li>• A temperatura de corte estipulada durante o processo de maquinagem promove a adesão, causando formação de aresta postiça de corte.</li> </ul> <p>O desgaste verificado nas ferramentas em estudo, como seria de esperar, foi muito menos intenso do que nas ferramentas que não apresentam revestimento na superfície, o que provoca fenómenos de adesão e abrasão muito mais intensos, sendo o principal a adesão.</p>
<p><b><i>Bandapalli et al.</i></b> [107]</p>	<p>Bandapalli et al. analisaram revestimentos realizados por PVD em AlTiN e TiAlN numa operação de microfresagem de alta velocidade de titânio. Verificou-se que:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• A adesão de material é promovida por altas temperaturas de maquinagem;</li> <li>• O desgaste apresentado pela ferramenta não revestida foi principalmente adesão de material, mas menos severo quando comparado as ferramentas revestidas;</li> <li>• Os principais mecanismos de desgaste foram difusão, oxidação, adesão, abrasão, e delaminação do revestimento.</li> </ul> <p>As ferramentas sem revestimento tiveram melhor desempenho que as ferramentas com revestimento de AlTiN e TiAlN, pelo que é preferível a sua utilização, principalmente devido ao seu custo.</p>

### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

No presente capítulo vão ser descritos os materiais usados e testados, bem como os métodos utilizados no decorrer da execução deste trabalho experimental. Uma vez já identificado o objetivo do trabalho, e sendo este avaliar a rugosidade das superfícies maquinadas no bloco de AMPCOLOY®83 e avaliar o tempo de vida e mecanismos de desgaste de ferramentas revestidas e não revestidas, serão descritos todos os equipamentos necessários à elaboração do mesmo, os materiais usados e os respetivos procedimentos. Posteriormente, será feito um registo de todos os resultados obtidos, nomeadamente a identificação dos principais mecanismos de desgaste na ferramenta, bem como o desempenho das ferramentas na qualidade de produção e os respetivos valores de rugosidades.

A organização da presente secção em “Materiais” e “Métodos” foi estruturada para dar a conhecer ao leitor de forma lógica quais os materiais envolvidos, posteriormente os métodos, equipamentos e procedimentos usados e aplicados a estes materiais.

#### 3.1. Materiais

Neste subcapítulo vão ser abordados os materiais utilizados neste projeto, tanto o material a ser maquinado, como as ferramentas de corte, assim como as suas dimensões, geometrias e revestimentos respetivos, no caso de existência dos mesmos.

##### 3.1.1. Material maquinado

O material de base maquinado neste trabalho foi uma liga designada por AMPCOLOY®83 fornecida pela AMPCO Metal Portugal, Lda. (Porto, Portugal) e ilustrada na Figura 23, no estado forjado, sendo fornecido sob a forma de um bloco paralelepípedo, cujas informações referentes a este material se resumem na Tabela 12.



Figura 23 - Bloco de material de base (AMPCOLOY®83) usado nas operações de fresagem

Tabela 12 - Características do bloco de AMPCOLOY®83

Características	Valor	Unidades
Liga	AMPCOLOY®83	-
Dimensões	101,6×150×150	mm <sup>3</sup>
Peso	20,3	kg
Estado	Forjado	-

AMPCOLOY®83 é uma liga de cobre-berílio, com uma percentagem significativa de cobre, como é possível observar na Tabela 13. Esta liga constitui uma ótima opção quando se pretende uma boa condutividade elétrica e térmica, boa resistência ao desgaste e uma elevada dureza.

*Tabela 13 - Composição química AMPCOLOY®83*

<b>Elemento</b>	<b>Percentagem</b>
<b>Cu</b>	Restante
<b>Be</b>	2,0
<b>Co + Ni</b>	0,5
<b>Outros</b>	Máx. 0,5

Na Tabela 14 é possível verificar as especificações e propriedades físicas e mecânicas da presente liga segundo o fornecedor (Anexo A).

*Tabela 14 - Propriedades físicas e mecânicas do AMPCOLOY®83*

<b>Propriedade</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
<b>Tensão de cedência</b>	1000	MPa
<b>Tensão de rotura</b>	1140	MPa
<b>Módulo de elasticidade</b>	128	GPa
<b>Alongamento</b>	5	%
<b>Dureza Vickers</b>	376	HV
<b>Densidade</b>	8,26	kg/m <sup>3</sup>

A seleção deste material para o estudo foi fundamentada no seu significativo interesse, dado que desempenha um papel crucial na indústria de moldes de injeção. Assim, a pesquisa em torno desse material pode ser refinada visando a otimização da indústria. Para além disto, a nível de maquinaria também é de grande interesse visto que a informação e respetiva investigação científica no que diz respeito a esta liga é muito reduzida, constituindo assim um desafio fulcral e muito interessante o desenvolvimento nesta área, contribuindo neste sentido para a comunidade científica de engenharia [8].

### **3.1.2. Ferramentas de corte**

#### **3.1.2.1. Material base da ferramenta de corte**

As ferramentas de corte (Figura 24) utilizadas nesta tese são produzidas em carboneto de tungsténio (grau 6110), tamanho médio de grão correspondente a 0,3 µm e um ligante de 6%(wt) de cobalto (WC-Co), que foi usado como aglomerante. Estas foram fornecidas pela empresa InovaTools, S.A. (Marinha Grande, Portugal), e revestidas pela TEandM (Coimbra, Portugal).



Figura 24 – Exemplo de fresa não revestida usada nos ensaios de corte

### 3.1.2.2. Geometria das ferramentas

As ferramentas usadas para a fresagem de AMPCOLOY®83 possuem um diâmetro de 6 mm e 4 lâminas, como é possível ver pela Figura 25. As restantes dimensões apresentam-se na Tabela 15. Para os ensaios de maquinagem foram usadas seis ferramentas não revestidas e seis revestidas, sendo este revestimento abordado no subcapítulo 3.1.2.3. O uso de um encabadouro mais espesso e comprido visou diminuir tanto quanto possível as vibrações na maquinagem.

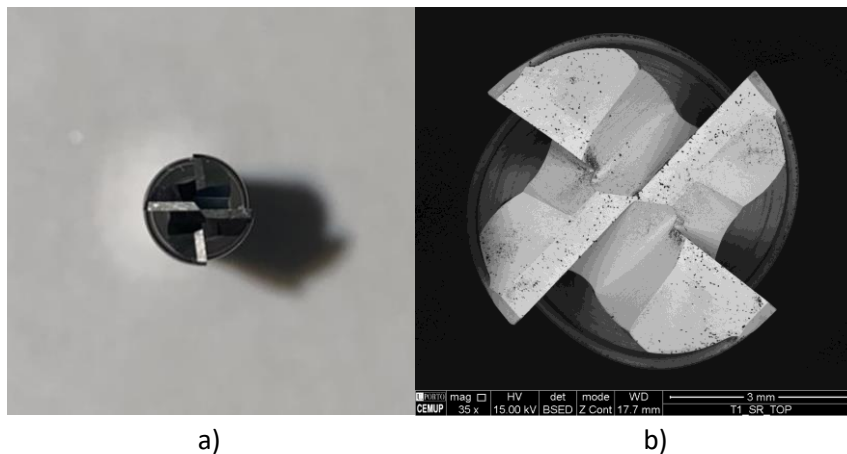


Figura 25 – a) Vista de cima da fresa; b) Imagem SEM

Um dos principais objetivos do trabalho consistiu em avaliar quais as zonas de maior desgaste na ferramenta, e daí a importância da sua geometria e respetivas dimensões (Figura 26).

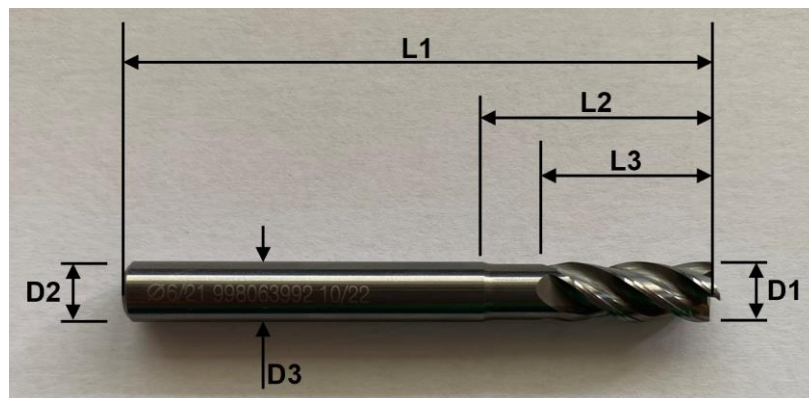


Figura 26 - Diagrama esquemático das dimensões da fresa

Tabela 15 – Dimensões das fresas em milímetros

Referência	D1	D2	D3	L1	L2	L3	EF	Z
<b>288.060.00</b>	6,00	6,00	5,50	57	13	21	0,13	4

É fundamental ainda a percepção da geometria da ferramenta de corte, e as faces que as constituem. Como é possível observar pela Figura 27, estão identificadas três faces distintas, sendo elas a face de folga, a face de ataque e a face de topo, de acordo com a norma ISO 3002-1:1982 [108]. Posteriormente no desenvolvimento desta dissertação vão ser analisados os mecanismos de desgaste presentes em cada uma delas.

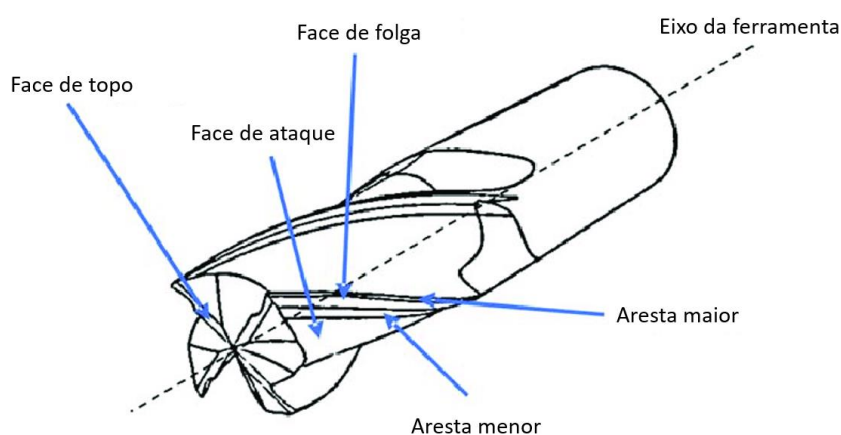


Figura 27 - Geometria de uma ferramenta de corte adaptado de [109]

### 3.1.2.3. Revestimento da ferramenta de corte

O revestimento usado na proteção da superfície das fresas usadas na maquinagem são do sistema TiAlTaN com 3,369  $\mu\text{m}$  de espessura média. Este revestimento foi produzido por PVD (*Physical Vapor Deposition* – pulverização catódica), usando um equipamento CemeCom CC800 (Figura 26). A fonte de potência usada foi o HiPIMS (*High Power Impulse Magnetron Sputtering*) e o revestimento das ferramentas foi realizado na empresa TEandM (Coimbra, Portugal).



Figura 28 – Máquina de pulverização catódica (CemeCom CC800) usada na produção dos revestimentos

Um dos pontos importantes a realçar nesta técnica de deposição, usando HiPIMS, é o facto de garantir uma melhor homogeneidade da espessura do revestimento depositado e de permitir depositar revestimentos mais compactos devido à fração de ionização que esta técnica possibilita.

Nas deposições foram utilizados quatro alvos com uma composição química similar, que foram distribuídos homogeneamente na câmara de deposição fazendo 90° entre eles, o que resultou na produção de um revestimento rico em tântalo, titânio e azoto. O azoto foi adicionado ao revestimento através de uma atmosfera reativa de azoto introduzida na câmara durante a deposição.

Os parâmetros de deposição utilizados para esses revestimentos estão listados na Tabela 16. Esses parâmetros foram selecionados com base em experiências bem-sucedidas encontradas na literatura, realizadas em substratos semelhantes.

Após este processo de deposição, seguiu-se o processo de embalamento para todas as ferramentas, de forma cuidada, evitando qualquer manuseio na zona de corte das mesmas.

*Tabela 16 - Parâmetros de deposição utilizados para a obtenção do revestimento*

<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
<b>Tempo de deposição</b>	110	min
<b>Gases utilizados no reator</b>	$Ar + Kr + N_2$	[-]
<b>Material do alvo</b>	TiAlTa	[-]
<b>Pressão de trabalho</b>	580	mPa
<b>Temperatura</b>	470	°C
<b>Bias</b>	-60	V
<b>Velocidade de rotação do porta-ferramentas</b>	1	rpm

Neste revestimento foi incluído um elemento que não é muito comum de integrar o revestimento deste tipo de ferramentas. O tântalo é um metal refratário com alto ponto de fusão, baixo coeficiente de expansão térmica, baixa pressão de vapor e excelente resistência à corrosão por ácidos e metais líquidos, grande alongamento à tração em deformação quase estática e deformação por bandas de corte adiabáticas em compressão dinâmica [2, 3]. Este elemento apresenta um interesse significativo para aplicações de alta temperatura e alta resistência, visto que também é apropriado para maquinagem de alta velocidade. Assim, e devido à existência de todas estas características e propriedades, este elemento influencia na qualidade de produção. Conclui-se então que o TiAlTaN se trata de um revestimento inovador, pois não é comumente usado para ferramentas de corte. No entanto, torna-se, por isso, um desafio maior para ultrapassar [109, 111].

Deste modo, deparamo-nos com um novo objetivo, sendo este perceber se efetivamente as características teóricas do tântalo vão influenciar positivamente este revestimento e o seu comportamento, trazendo benefícios ao seu desempenho [113].

### 3.3. Métodos

No presente subcapítulo vão ser descritos os equipamentos usados na realização dos vários ensaios necessários ao teste das fresas e à respetiva caracterização. Os procedimentos de ensaios serão também abordados.

#### 3.3.1. Equipamentos

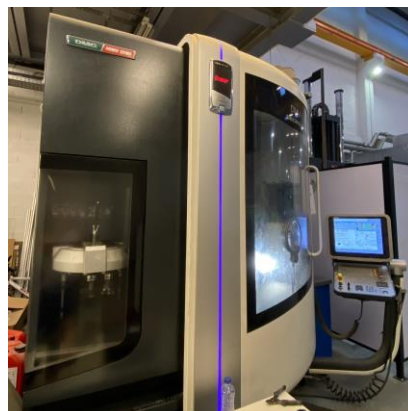
##### 3.3.1.1. Centro de maquinagem

Os ensaios de maquinagem foram realizados num centro de maquinagem (Figura 29) DMG/Mori Seiki, modelo DMU 60 eVo, Deckel Maho (Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial (INEGI)), cinco eixos. As principais especificações técnicas do centro de maquinagem estão discriminadas na Tabela 17.

*Tabela 17 - Especificações técnicas do centro de maquinagem*

Propriedade	Valor	Unidades
Rotação máxima	18000	rpm
Potência máxima	54,4	kW
Curso máximo do eixo x	600	mm
Curso máximo do eixo y	500	mm
Curso máximo do eixo z	500	mm
Número de eixos	5	-

Foi realizada uma operação de fresagem com estratégia de desbaste linear, com o eixo da fresa perpendicular à superfície do bloco. Esta estratégia de maquinagem foi aplicada com o objetivo de analisar qual a influência da variação dos parâmetros selecionados, nomeadamente velocidade de avanço e comprimento de corte, e neste sentido, estudar qual a variação da rugosidade para cada parâmetro, e quais os mecanismos de desgaste que poderiam surgir associados a este processo.



*Figura 29 - Centro de maquinagem DMG DMU 60 eVo*

Durante a fresagem foi adicionado um fluido de corte para refrigeração (*flood cooling*) como se vê na Figura 30, na zona de contacto da ferramenta com o material. O fluido de corte usado foi o AVILUB METACOOOL BFH, do fornecedor Avía Bantleon (Alemanha), composto por 10% de óleo e 90% de água.



Figura 30 - Refrigeração do material

### 3.3.1.2. Sistema de aperto da ferramenta de corte

Para fixar a ferramenta de corte, foi usado um cone hidráulico HSK63A, CoroChuck 930. Sendo este um cone hidráulico, cuja pinça encontra-se incorporada no mesmo. Como se trata de um cone com refrigeração interna, as pinças usadas foram do tipo 393.CGS. Assim, é retirado o cone do porta-cones, como é possível observar pela Figura 31. Posteriormente, a fresa é inserida com uma profundidade de reentrância de 25 mm, sendo esta medida com o auxílio de um paquímetro.

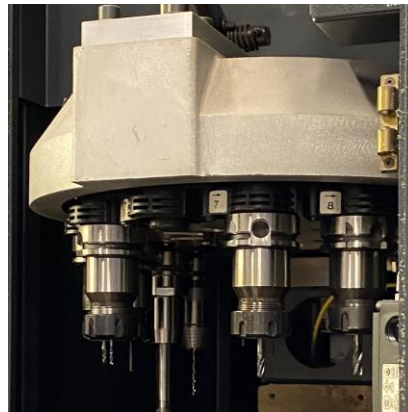


Figura 31 - Porta-cones

Este tipo de ferramenta proporciona uma elevada segurança e estabilidade à ferramenta, devido ao seu modo de funcionamento. Desta forma, é alcançada uma força de fixação constante, o que reduz significativamente as vibrações durante o seu uso.

Como é possível observar pela Figura 32 a) e b), há uma cavidade circular destinada à aplicação de um momento específico para apertar a pinça. Aplicando este momento, o óleo contido no interior deste mecanismo comprime a pinça, conferindo assim alta precisão e força de fixação. A aplicação deste momento (8 N·m) é conseguida por via de uma chave dinamométrica (Figura 32 c)), na qual é possível regular o momento pretendido aplicar, ação essa que não é possível manualmente.

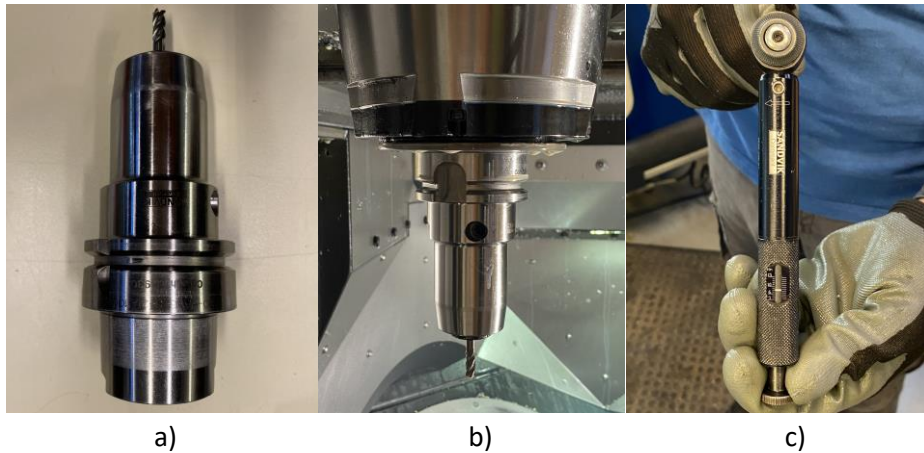


Figura 32 - a) cone hidráulico, b) fixação da peça, c) chave dinamométrica

É de prever que os valores de rugosidade obtidos por este tipo de equipamento sejam mais reduzidos do que em operações de maquinagem que utilizem cones de fixação convencionais, uma vez que este transmite menos vibrações e por isso uma maior estabilidade de maquinagem. A qualidade do desempenho é mantida ao longo de vários ciclos de fixação, garantindo superfícies de trabalho sempre de alto nível e uma vida útil mais longa para a ferramenta.

### 3.3.1.3. Sistema de fixação da peça

Para a fixação do bloco de AMPCOLOY®83 foi utilizada uma prensa de aperto fixo da marca ROHM, como é possível verificar na Figura 33.

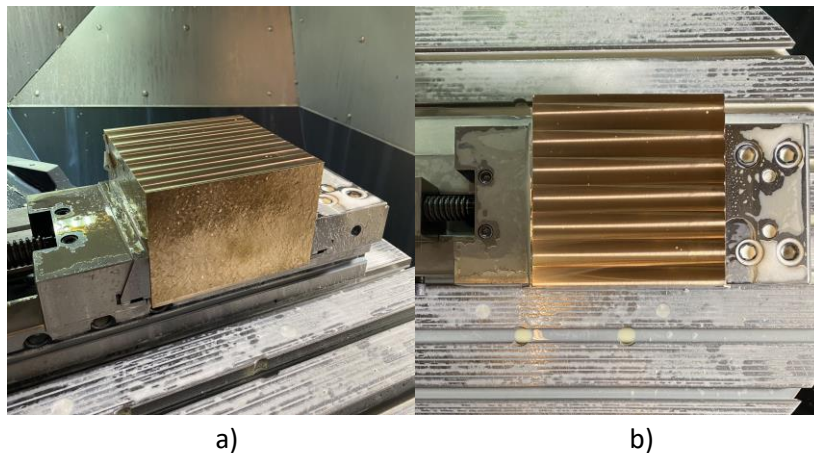


Figura 33 - Prensa de aperto do bloco a maquinar

### 3.3.1.4. Posicionamento

Para que seja conseguida uma precisão de posicionamento, foi usado um apalpador com transmissão ótica, a fim de determinar o zero da ferramenta de maquinagem em relação à superfície da peça, no centro de maquinagem. Este equipamento é conjunto com a máquina, já tendo vindo incorporado de raiz. Assim, colocou-se a sonda o mais próximo possível do bloco, para que após definição dos valores aproximados de X, Y e Z, fosse possível determinar posteriormente a posição inicial destes eixos. Na Figura 34 está representado o sensor ótico usado para a medição da ferramenta, responsável por medir a altura e diâmetro desta.

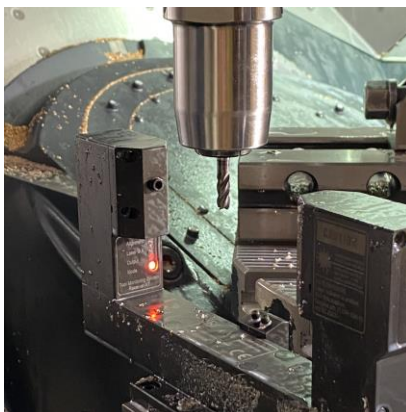


Figura 34 - Apalpador ótico

### 3.3.1.5. Rugosímetro

O rugosímetro, da marca Mahr (Mahr, Gottingen, Alemanha) e modelo Perthometer M2, foi usado para a medição do estado superficial da peça, após os ensaios de maquinagem (Figura 35). É possível consultar a ficha técnica no anexo B, para conferir quais as suas características específicas.



Figura 35 - Rugosímetro Mahr

### 3.3.1.6. Microscópio eletrónico de varrimento (MEV)

Os mecanismos de desgaste e o desgaste produzido pelas diferentes condições de corte foram avaliados através de observações em microscópio eletrónico de varrimento – MEV (SEM), da marca FEI, modelo Quanta 400 FEG (Figura 36), equipado com um sistema de microanálise EDAX Genesys Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy. Este sistema de espectroscopia de raios-X por dispersão de energia (EDS) permite realizar uma análise elementar ou caracterizar quimicamente as amostras em análise. A composição química de algumas zonas deterioradas foi também avaliada neste equipamento, com recurso à espectroscopia dispersiva de eletrões - EDS.

Este equipamento foi também usado para a análise da composição química e espessura do revestimento, como será possível visualizar posteriormente na secção 4.2. Foi escolhida uma ferramenta para ser submetida a corte na região do revestimento, com o intuito de criar uma

secção transversal que possibilitasse essa mesma análise. Nesta análise por MEV foi adotada uma uniformidade na escala de ampliação em todas as imagens, com o propósito de examinar a estrutura do revestimento. Isso proporcionou uma maior conveniência na avaliação e comparação dos resultados alcançados.

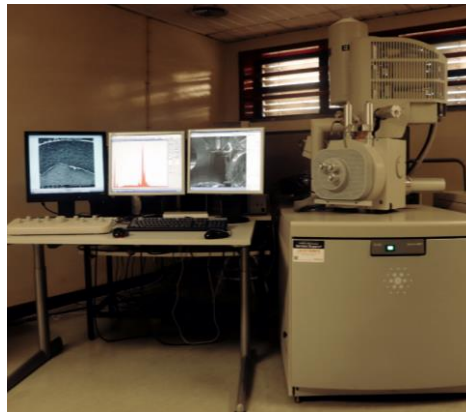


Figura 36 - Microscópio eletrônico de varrimento FEI Quanta 400 FEG [114]

### 3.3.2. Procedimento

#### 3.3.2.1. Plano de ensaios

Antes da execução deste plano de ensaios, houve a necessidade de se estabelecerem previamente os parâmetros de maquinagem, sendo apenas alguns constantes ao longo dos diversos ensaios. Estes ensaios foram realizados com o intuito de verificar qual o comportamento das ferramentas, tendo sempre em conta os parâmetros previamente estabelecidos pelo fabricante, e verificar qual o comportamento da ferramenta aquando do respetivo processo de corte, e quais os mecanismos de desgaste associados. Os parâmetros que variaram ao longo da execução foram a velocidade de avanço ( $v_f$ ) e o comprimento de corte (L). Relativamente à velocidade de avanço foram fixados dois valores, nomeadamente 750 mm/min e 1500 mm/min. A variação destes parâmetros foi interessante para que fosse possível tirar uma conclusão mais ampla, percebendo qual a influência destes no comportamento ao desgaste e ao corte das ferramentas. Os valores dos comprimentos de corte realizados pela ferramenta variaram entre 26,8 m, 53,6 m e 73,7 m. A velocidade de corte também se manteve constante nos 126 m/mm. A profundidade de corte radial ( $a_e$ ) de 3,6 mm e a profundidade de corte axial ( $a_p$ ) de 0,5 mm, foram mantidas constantes ao longo de todos os ensaios. A profundidade de corte radial foi definida tendo em conta 60% do valor do diâmetro inicial, sendo este de 6 mm. Todos os valores estão registados na Tabela 18, com a respetiva referência da fresa. A referência utilizada pode seguir-se acompanhada de "T0", que representa as ferramentas não revestidas, ou "T1" que representa as revestidas. Segue-se ainda acompanhado de "L", "S" e "V", representando o comprimento de corte, velocidade de avanço e velocidade de corte, respetivamente. A mesma nomenclatura servirá como exemplo a partir daqui para todo o relatório.

Tabela 18 - Parâmetros do plano de ensaios

Referência das amostras	Revestimento	Parâmetros							
		Não constantes				Constantes			
		Velocidade de corte ( $V_c$ ) [m/min]	Velocidade avanço ( $V_f$ ) [mm/min]	Comprimento de corte (L) [m]	Refrigeração	D [mm]	Z [mm]	$\alpha_p$ [mm]	$\alpha_e$ [mm]
TOL27S750V1216	Não	126	750	26,8	Sim	6	4	0,5	3,6
TOL54S750V126	Não	126	750	53,6	Sim	6	4	0,5	3,6
TOL74S750V126	Não	126	750	73,7	Sim	6	4	0,5	3,6
TOL27S1500V126	Não	126	1500	26,8	Sim	6	4	0,5	3,6
TOL54S1500V126	Não	126	1500	53,6	Sim	6	4	0,5	3,6
TOL74S1500V126	Não	126	1500	73,7	Sim	6	4	0,5	3,6
TOL27S750V126	Sim	126	750	26,8	Sim	6	4	0,5	3,6
TOL54S750V126	Sim	126	750	53,6	Sim	6	4	0,5	3,6
TOL74S750V126	Sim	126	750	73,7	Sim	6	4	0,5	3,6
TOL27S1500V126	Sim	126	1500	26,8	Sim	6	4	0,5	3,6
TOL54S1500V126	Sim	126	1500	53,6	Sim	6	4	0,5	3,6
TOL74S1500V126	Sim	126	1500	73,7	Sim	6	4	0,5	3,6

Importante ainda referir como foi realizado o procedimento, e qual a estratégia de maquinagem seguida. Foi usada uma estratégia de desbaste linear, como é visível pela Figura 37, uma profundidade de corte axial de 0,5 mm e uma profundidade de corte radial de 3,6 mm (correspondente a aproximadamente 60% do diâmetro da fresa), sendo a velocidade de corte constante nos 126 m/min.

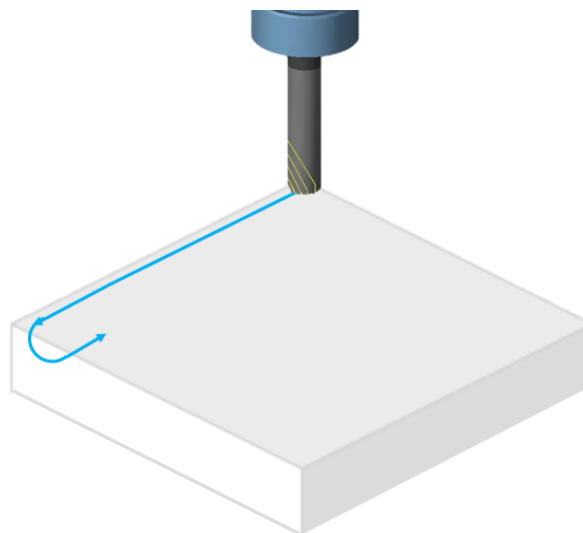


Figura 37 - Esboço de um desbaste linear

Os primeiros ensaios foram fixados no valor de 750 mm/min para as ferramentas revestidas e não revestidas, para os respectivos comprimentos de corte previamente apresentados. Posteriormente,

realizaram-se os mesmos ensaios variando apenas o valor da velocidade de avanço para 1500 mm/min. Após a realização de cada ensaio, foram medidos cinco valores experimentais da rugosidade transversal e cinco valores experimentais da rugosidade longitudinal em zonas distintas da peça, para que fosse possível obter valores mais precisos, diminuindo a hipótese de incluir erros de leitura, erros aleatórios e erros sistemáticos, como por exemplo do rugosímetro.

### 3.3.2.2. Teste de rugosidade superficial

Esta análise é fundamental no decorrer do desenvolvimento deste projeto, visto que se prende com um dos principais objetivos, análise do desgaste. Foram feitas medições de seis ferramentas não revestidas e seis ferramentas revestidas, e posteriormente registados os valores de rugosidade superficial, nomeadamente a média das alturas máximas entre picos ( $R_z$ ) e rugosidade máxima ( $R_{máx}$ ).

Cada teste usou como base um *cut-off* de 0,8 mm, e um comprimento equivalente a sete segmentos do valor de *cut-off*, ou seja, 5,6 mm. Devido à inércia do apalpador, tendo em conta que a aceleração e desaceleração do apalpador pode induzir erros nas medições da rugosidade, tanto o primeiro como o último segmentos não são considerados. Assim, é possível eliminar possíveis erros de medições.

A estabilidade do processo de maquinagem foi também um fator importante a determinar, e como tal, a rugosidade da peça maquinada foi avaliada na direção transversal (Figura 38) e longitudinal (Figura 39), em relação à direção de maquinagem, imediatamente após cada ensaio de maquinagem. A rugosidade superficial foi avaliada em diferentes zonas (três) e, portanto, a rugosidade apresentada corresponde à rugosidade média aritmética ( $R_a$ ) desses valores.

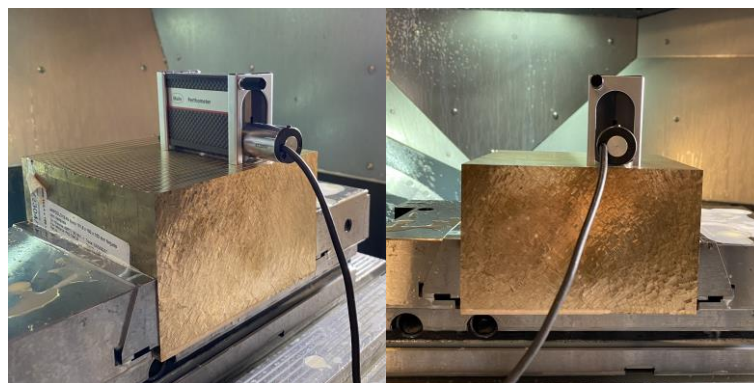


Figura 38 - Medição da rugosidade transversal



Figura 39 - Medição da rugosidade longitudinal

### **3.3.2.3. Preparação das amostras para análise SEM**

Para analisar quais os mecanismos de desgaste predominantes em cada ferramenta de corte, a composição química da superfície e do revestimento, bem como a espessura do mesmo, foi usada a técnica de microscopia eletrónica de varrimento (MEV).

Selecionou-se uma ferramenta para ser cortada na zona de corte revestida, de forma a produzir uma secção transversal que permitisse analisar a composição e espessura do revestimento. Posteriormente, submeteu-se a fresa a vários processos, nomeadamente:

#### **Corte**

Inicialmente a ferramenta foi cortada com recurso a uma serra de disco STRUERS MINITOM (Struers, Inc., Cleveland, OH, USA) para, de seguida, ser possível a montagem das etapas de retificação e polimento.

#### **Montagem**

Posteriormente, montou-se a mesma com recurso a uma resina termoendurecível, para a qual foi utilizado um equipamento de prensagem a quente, STRUERS PEDOPRESS (Struers, Inc., Cleveland, OH, USA).

#### **Lixagem**

Seguidamente, e para iniciar o processo de lixagem, começou-se por utilizar uma lixa de granulometria 220. Seguiu-se uma sequência de granulometria da lixa decrescente, nomeadamente 220, 500, 800 e por fim 1200. Entre cada lixa a amostra era rodada 90°, de maneira a reduzir ao máximo as marcas deixadas na superfície pela lixagem anterior. Dadas as propriedades específicas do substrato, o facto de este ser de carboneto de tungsténio faz com que o processo de lixagem se torne mais complicado dada a sua dureza. Este provoca desníveis na superfície, gastando mais rapidamente a resina do que efetivamente a secção transversal. Isto influencia negativamente os resultados, uma vez que o desnível da amostra irá prejudicar as medições da espessura na MEV, visto que a superfície poderá estar inclinada, não deixando obter os valores corretos da rugosidade. Assim, apresentará um grande erro.

#### **Polimento**

Após o processo de lixagem, as amostras foram então submetidas a uma operação de polimento. Este processo foi dividido em duas etapas, sendo a primeira o polimento com uma suspensão com partículas de diamante de 3 µm durante 15 minutos, e a segunda suspensão de partículas de diamante de 1 µm, durante o mesmo tempo que a primeira, 15 minutos.

### **Limpeza**

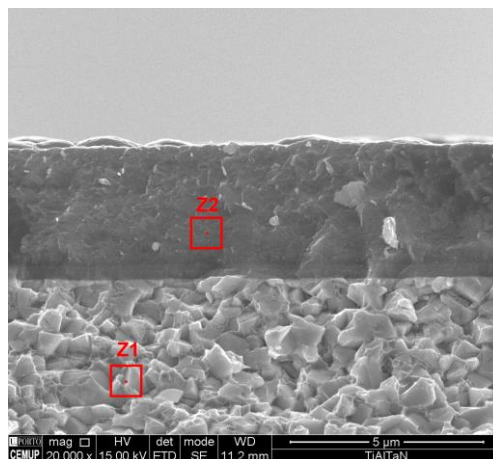
Foi ainda necessário submeter as fresas a um processo de limpeza de forma a garantir a inexistência de impurezas e contaminação provenientes da deposição dos revestimentos. Assim, foram submetidas a dois agentes de limpeza para o banho por ultrassons, com duração de 5 minutos, sendo o primeiro com álcool etílico e o segundo com álcool isopropílico. Esta etapa foi cuidadosamente realizada para garantir que os substratos estivessem livres de impurezas antes da deposição dos revestimentos, prevenindo ou reduzindo possíveis defeitos e erros nos revestimentos aplicados.

## 4. RESULTADOS

Ao longo deste capítulo, vão ser apresentados e comentados os resultados obtidos ao longo de todo o procedimento experimental. Este capítulo assenta em três secções principais, sendo elas 4.1. Caracterização do revestimento; 4.2. Análise da espessura do revestimento; 4.3. Superfície maquinada e avaliação dos mecanismos de desgaste. Na primeira secção, avalia-se a morfologia, espessura e composição química do revestimento produzido. Já no que diz respeito à secção da superfície maquinada, serão apresentados os valores do desgaste que foram medidos, e a análise dessa mesma rugosidade, obtidos em função das várias condições de corte e de condição de fresa usada (revestida ou não revestida). Por fim, a secção dos mecanismos de desgaste será dividida pela análise dos mecanismos de desgaste presentes nas ferramentas de corte e valores de desgaste de flanco obtidos. Cada um dos capítulos e secções é dividido pelos respetivos níveis de parâmetros que variaram ao longo de todo o processo experimental.

### 4.1. Caracterização do revestimento

O revestimento foi analisado recorrendo a um EDS (Figura 40), ou seja, espectroscopia por dispersão de raios-X (CEMUP, Centro de Materiais da Universidade do Porto, Porto), para confirmar a composição química do mesmo. Utilizou-se um potencial de feixe de 15 kV, ocasionalmente diminuído para 10 kV, com o propósito de minimizar a interação e, conseqüentemente, reduzir o nível de ruído nos espectros. É importante observar que essa abordagem pode apresentar algumas limitações em termos de precisão em análises quantitativas. Entretanto, foi considerada adequada para a confirmação da composição química dos revestimentos em análise, permitindo evitar o uso de técnicas mais dispendiosas.



a)

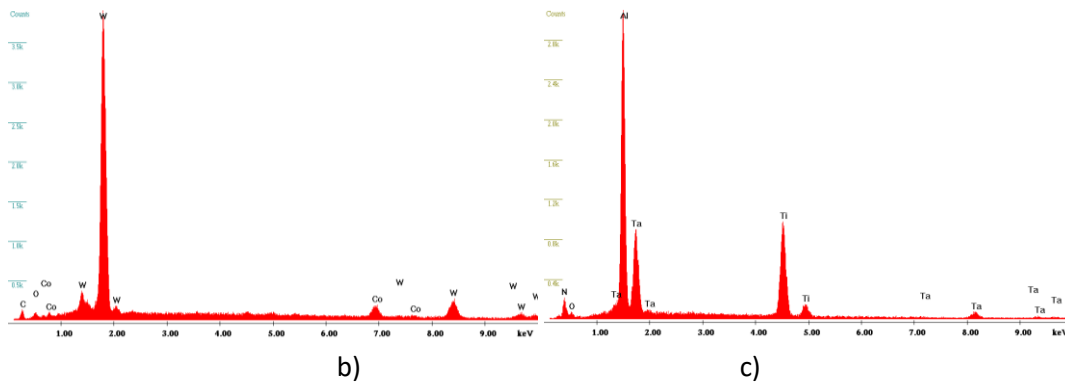


Figura 40 - Espectros EDS: a) Imagem SEM da ferramenta T1L27S1500V126; b) zona 1 de análise EDS; b) zona 2 de análise EDS

De acordo com a análise química realizada à camada superior do revestimento (ver espectro EDS da Figura 40), é possível verificar que esta camada, correspondente à zona 2, é rica em Ti, Al, Ta e N, correspondendo como esperado a um revestimento, TiAlTaN. A zona 1 corresponde ao substrato da ferramenta (WC-Co).

#### 4.2. Análise da espessura do revestimento

O valor da espessura foi conseguido através da média das várias medições nas diferentes zonas do revestimento, como é possível observar pela Figura 41.

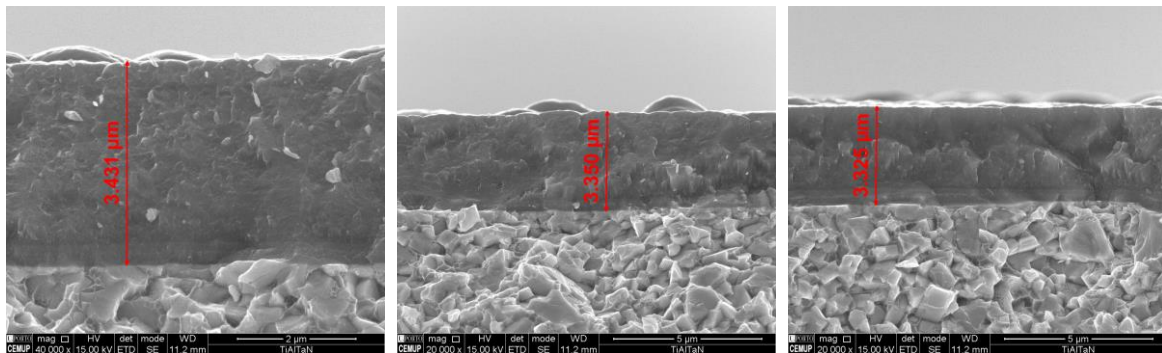


Figura 41 - Valores obtidos por SEM da espessura do revestimento

Assim, pode admitir-se um valor médio de 3,369  $\mu\text{m}$  afetado de um desvio padrão pouco significativo de  $\pm 0,045 \mu\text{m}$ .

A medição da espessura foi conseguida com recurso ao microscópio eletrónico de varrimento. Esta espessura é adequada para ferramentas de fresagem, não sendo crítica em termos de compromisso para a adesão, facto que ocorre essencialmente a partir dos 5  $\mu\text{m}$  de espessura. Esta espessura permite que possa existir alguma abrasão do revestimento, sem que o substrato fique exposto e se percam as propriedades exibidas pelo revestimento na maquinagem. Acresce ainda referir que a espessura usada neste trabalho está em linha com a espessura total usada por outro trabalho realizada igualmente na maquinagem de ligas CuBe [74].

### 4.3. Superfície maquinada

Para análise da superfície maquinada, recorreu-se a um rugosímetro para que, após cada ensaio, fossem medidos os valores de rugosidade transversal e longitudinal, para posterior análise.

#### 4.3.1. Medição do desgaste

Neste tópico serão apresentados os valores médios de rugosidade originados pelos diferentes testes de maquinagem (sendo ferramentas revestidas e não revestidas), tanto na direção longitudinal como transversal. Poderão ainda ser consultados os valores da média das alturas máximas entre picos ( $R_z$ ) e rugosidade máxima ( $R_{máx}$ ), para cada ferramenta ensaiada, nas Tabela 19 e Tabela 20.

Foi necessária a criação de nomenclatura para simplificar toda a análise. Por exemplo, sempre que se pretender indicar velocidade de avanço de 750 mm/min, esta será indicada como S750. No caso de um comprimento de corte de 26,7 m, e para figuras ou gráficos que seja mais simples o seu arredondamento, deve ler-se L27.

Tabela 19 - Medições de rugosidade longitudinal

Referência	Revestimento	Valores $R_a$ média [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{max}$ [ $\mu\text{m}$ ]
TOL27S750V126	Não	0,175 $\pm$ 0,050	1,404	1,574
TOL54S750V126	Não	0,266 $\pm$ 0,055	1,614	1,938
TOL74S750V126	Não	0,360 $\pm$ 0,017	1,926	2,090
TOL27S1500V126	Não	0,363 $\pm$ 0,016	2,066	2,440
TOL54S1500V126	Não	0,384 $\pm$ 0,050	2,192	2,490
TOL74S1500V126	Não	0,432 $\pm$ 0,060	2,654	2,962
T1L27S750V126	Sim	0,248 $\pm$ 0,035	1,502	1,660
T1L54S750V126	Sim	0,334 $\pm$ 0,012	1,790	2,088
T1L74S750V126	Sim	0,496 $\pm$ 0,039	2,540	3,230
T1L27S1500V126	Sim	0,799 $\pm$ 0,079	4,488	4,710
T1L54S1500V126	Sim	1,054 $\pm$ 0,027	4,532	4,742
T1L74S1500V126	Sim	1,347 $\pm$ 0,097	4,784	6,060

Tabela 20 - Medições de rugosidade transversal

Referência	Revestimento	Valores $R_a$ média [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{max}$ [ $\mu\text{m}$ ]
TOL27S750V126	Não	0,370 $\pm$ 0,047	1,992	3,108
TOL54S750V126	Não	0,428 $\pm$ 0,016	1,992	3,576
TOL74S750V126	Não	0,470 $\pm$ 0,022	2,228	3,654
TOL27S1500V126	Não	0,747 $\pm$ 0,031	3,410	6,194
TOL54S1500V126	Não	0,780 $\pm$ 0,092	3,468	6,194
TOL74S1500V126	Não	0,812 $\pm$ 0,040	4,152	7,078
T1L27S750V126	Sim	0,453 $\pm$ 0,035	2,264	3,542
T1L54S750V126	Sim	0,484 $\pm$ 0,019	2,334	3,992
T1L74S750V126	Sim	0,584 $\pm$ 0,055	3,120	4,192
T1L27S1500V126	Sim	0,816 $\pm$ 0,063	4,136	5,054
T1L54S1500V126	Sim	0,940 $\pm$ 0,036	4,834	6,872
T1L74S1500V126	Sim	1,092 $\pm$ 0,084	5,256	7,146

Estes valores servirão para uma futura análise da rugosidade da superfície maquinada, cujos valores analisados serão estudados e comentados.

Como é possível observar pelas Tabela 19 e Tabela 20 estão registados os valores de  $R_z$  e  $R_{max}$ . O valor de  $R_{max}$  representa o valor de rugosidade máxima, ou seja, o pico mais elevado da rugosidade da superfície, enquanto  $R_z$  representa a média entre as alturas máximas entre os picos, considerando 5 segmentos. É possível concluir que ambos os valores se encontram muito distantes do valor da rugosidade média aritmética. Este facto pode ser facilmente justificado pela presença de um pico de rugosidade mais acentuado, sendo a restante superfície mais regular, com picos bastante inferiores.

É possível ainda verificar que para velocidades de avanço mais altas, os valores de  $R_z$  são mais elevados, podendo concluir que quanto maior é a velocidade, mais irregularidades (picos) vai provocar na superfície. Relativamente ao comprimento de corte, verifica-se a mesma tendência, ainda que não de maneira tão acentuada. É possível concluir ainda que os valores de rugosidade máxima para as ferramentas revestidas são superiores às ferramentas não revestidas, em alguns casos duplicando o seu valor.

### **4.3.2. Análise da rugosidade**

Nos seguintes gráficos de barras é possível verificar as discrepâncias entre os valores de  $R_a$  das respetivas ferramentas revestidas e não revestidas.

#### **Velocidade de avanço de 750mm/min**

Tal como esperado, o aumento do comprimento de corte origina um aumento da rugosidade para as ferramentas revestidas e não revestidas, em ambas as direções. Para ambas as ferramentas (sem revestimento e revestidas) verifica-se um aumento da rugosidade com o aumento do comprimento de corte, ainda que pouco significativo, como seria de esperar teoricamente.

As Figura 42, Figura 43, Figura 44 e Figura 45 apresentam a evolução da rugosidade da superfície maquinada para cada velocidade de avanço, em função do comprimento de corte para uma melhor perceção do leitor. Nestas figuras, as barras azuis representam os testes realizados com ferramentas sem revestimento e a rugosidade induzida pelas ferramentas revestidas apresentam-se a cor de laranja.

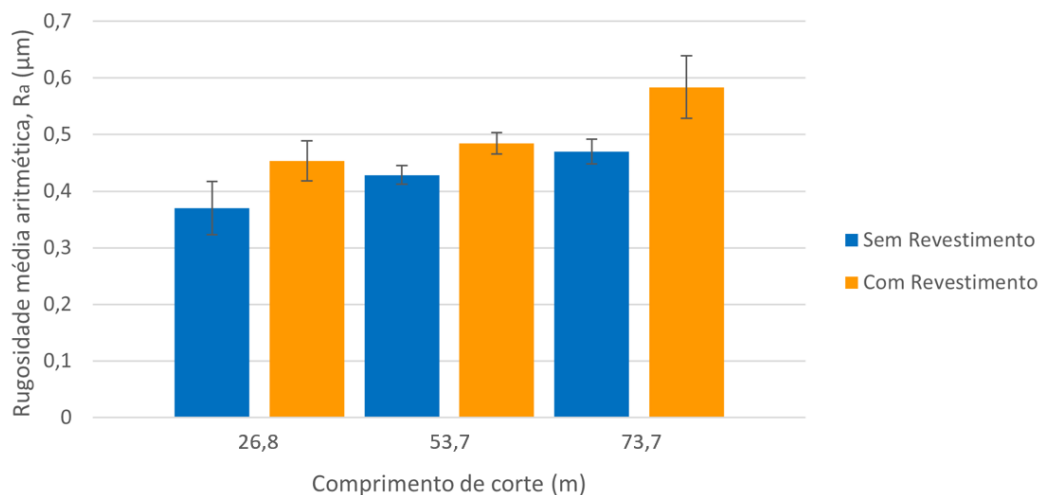


Figura 42 - Valores de rugosidade média aritmética na direção transversal para 750mm/min

No que diz respeito à rugosidade na direção transversal, as ferramentas sem revestimento induzem sempre valores de rugosidade mais reduzidos que as revestidas. Verificou-se ainda que, à medida que o comprimento de corte aumenta, aumenta o valor da rugosidade. Este aumento de rugosidade deve-se ao maior desgaste da ferramenta de corte originado pelo maior comprimento de corte realizado. Quanto maior o desgaste, maior a rugosidade, negligenciando a qualidade da superfície maquinada. O valor máximo de rugosidade é obtido para a ferramenta revestida, para o comprimento de corte 73,7 m (condição S750L74).

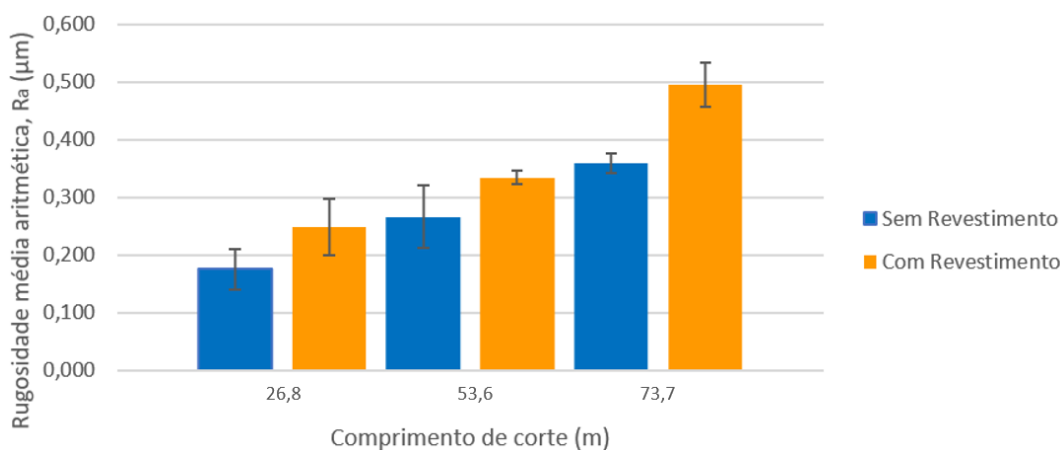


Figura 43 - Valores de rugosidade média aritmética na direção longitudinal para 750mm/min

É notório que a maior influência do comprimento de corte foi para ferramentas revestidas, ou seja, na condição S750L74, com revestimento. É possível verificar que os valores de  $R_a$  também são mais elevados na direção transversal, como é possível observar pelas Tabela 19 e Tabela 20. Isto é facilmente compreendido pelo facto do rugosímetro estar perpendicular à direção de maquinagem, e por isso poder encontrar mais irregularidades na superfície, sulcos ou cavidades entre as sucessivas trajetórias realizadas.

### Velocidade de avanço de 1500mm/min

À semelhança do que foi observado para a velocidade de avanço de 750mm/min, ainda que com uma diferença menor, os valores da rugosidade aumentam com o aumento do comprimento de corte. Continua a verificar-se valores mais baixos de rugosidades para fresas sem revestimento do que para fresas com revestimento, podendo-se deduzir então que para este substrato de ferramenta o revestimento até ao momento não foi vantajoso.

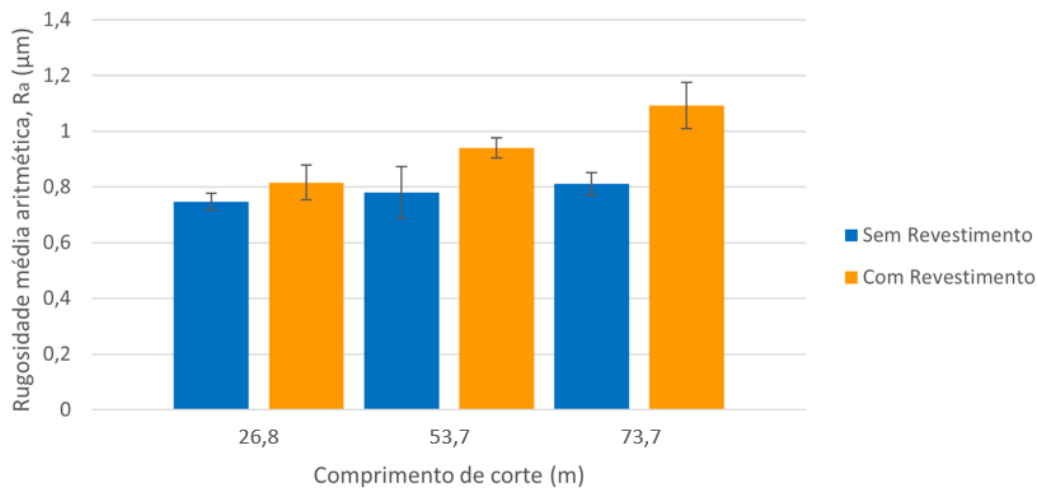


Figura 44 - Valores de rugosidade média aritmética na direção transversal para 1500mm/min

Como é possível observar na Figura 45, os valores da rugosidade longitudinal na condição de 1500 mm/min para as ferramentas não revestidas, assumem valores relativamente semelhantes à condição longitudinal de 750 mm/min. No entanto, a previsão teórica relativa ao comprimento de corte continua a manter-se, sendo os valores de rugosidade mais baixos para comprimentos de corte mais baixos, tanto para as ferramentas revestidas, como para as não revestidas. Para comprimentos de corte mais elevados, o desgaste das ferramentas é superior. Assim, nos 73,7 m de comprimento de corte, a deterioração do revestimento é mais acentuada, apresentando uma pior qualidade superficial.

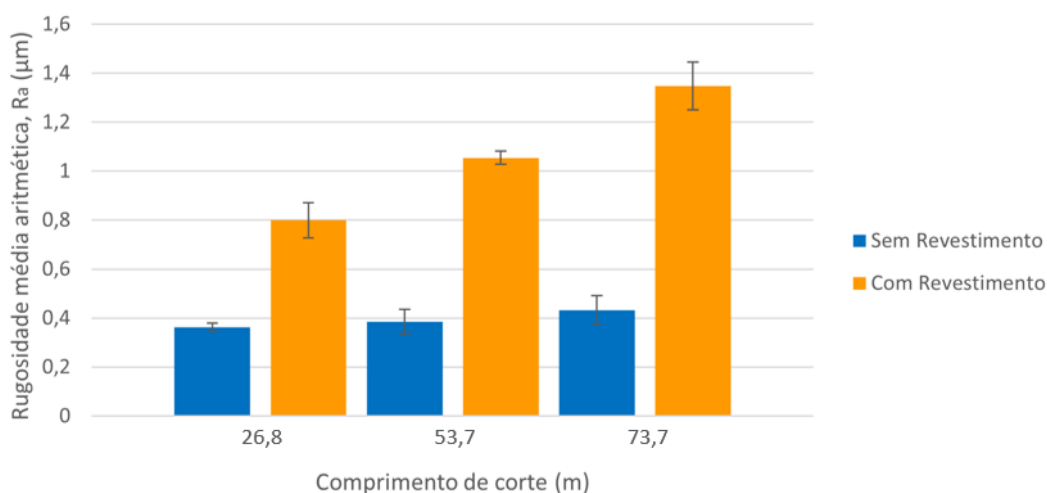


Figura 45 - Valores de rugosidade média aritmética na direção longitudinal para 1500mm/min

Finalmente, e para que seja mais fácil visualizar os resultados finais e agregados, na Figura 46 organizaram-se os dados da rugosidade média aritmética em função do comprimento de corte. Foram organizadas em quatro séries, sendo a amarela referente à velocidade de avanço (S) 750 mm/min e sem revestimento, a laranja referente à velocidade de avanço de 750 mm/min, porém revestida. No caso das séries vermelha e rosa, são ambas para a velocidade de avanço de 1500 mm/min, porém, não revestidas e revestidas, respetivamente. É possível observar que o melhor desempenho foi obtido para a velocidade de avanço de 750 mm/min e sem revestimento, para todos os comprimentos de corte, sendo o seu desempenho tanto melhor quanto menor o comprimento de corte. A rugosidade aumenta quanto maior for a velocidade de avanço, e aumenta tanto mais quanto maior for o comprimento de corte.

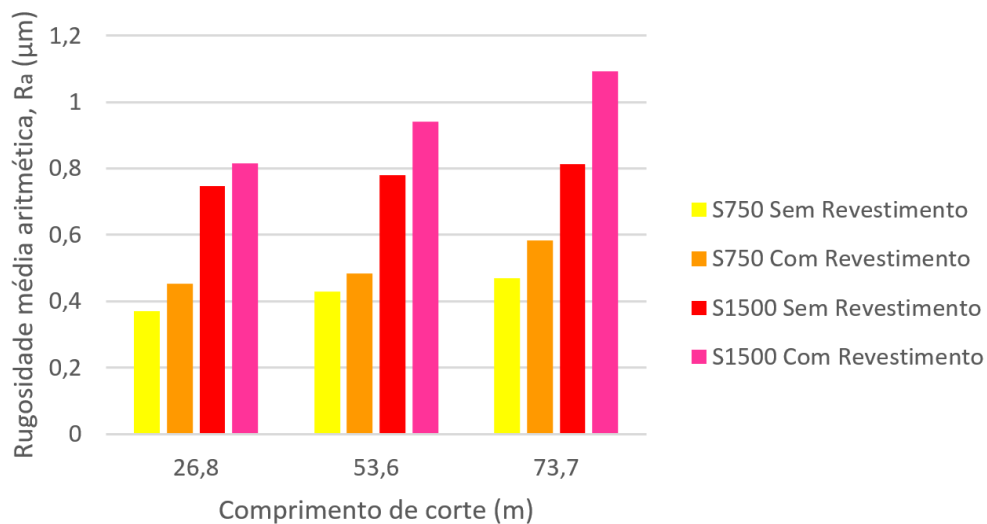


Figura 46 - Valores de rugosidade média aritmética na direção transversal em função do comprimento de corte

### Sem Revestimento

As Figura 47 e Figura 48 ilustram um gráfico comparativo da rugosidade média aritmética, em função da velocidade de avanço.

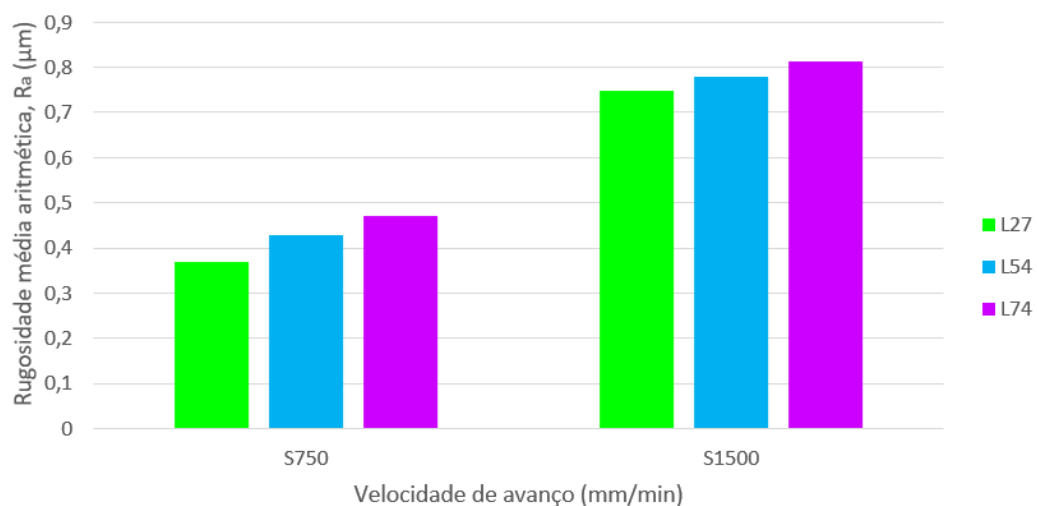


Figura 47 - Valores de rugosidade média aritmética na direção transversal mediante a velocidade de avanço

É possível verificar que, tanto para a direção transversal como para a direção longitudinal, à medida que o comprimento de corte aumentou, a qualidade da superfície maquinada diminuiu. É possível confirmar ainda que, normalmente, os valores transversais mantêm-se superiores aos longitudinais, seguindo as tendências anteriores, pelos mesmos motivos já justificados anteriormente (perpendicularidade do rugosímetro à direção de maquinagem).

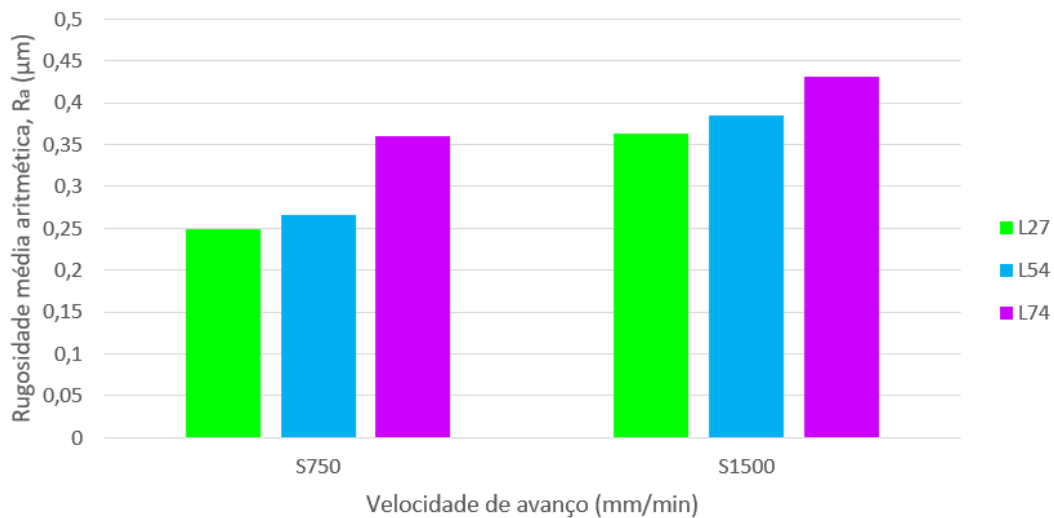


Figura 48 - Valores de rugosidade média aritmética na direção longitudinal, mediante a velocidade de avanço

Assim, conclui-se que a rugosidade aumentou com o aumento dos comprimentos de corte, e é tanto maior quanto maior for a sua velocidade de avanço [95].

### **Com Revestimento**

Relativamente às ferramentas revestidas, o padrão segue o mesmo que nas não revestidas, ainda que com valores muito superiores, para uma velocidade de avanço superior (Figura 49).

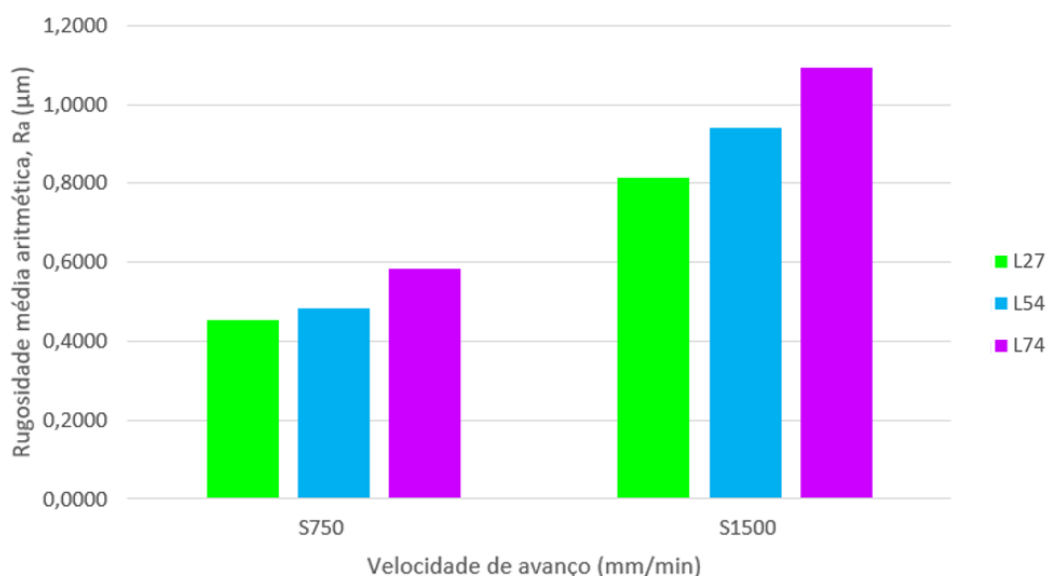


Figura 49 - Valores de rugosidade média aritmética na direção transversal, mediante a velocidade de avanço (revestidas)

Os valores de rugosidade para a condição de maquinagem S750 são bastante inferiores do que para a condição de maquinagem S1500, tanto na direção transversal como longitudinal, podendo esse comportamento ser justificado pela análise dos mecanismos de desgaste indicados mais adiante.

Para velocidades de avanço superior, o revestimento da ferramenta deteriora-se cada vez mais, provocando irregularidades na sua superfície causadas pelos mecanismos de desgaste mais severos, levando a um aumento do desgaste na superfície da ferramenta. Assim, e tendo uma geometria de fresa pouco uniforme, naturalmente os valores de rugosidade serão mais elevados.

Na Figura 50 a mesma tendência é verificada, apresentando valores de rugosidades inferiores para uma velocidade de avanço inferior.

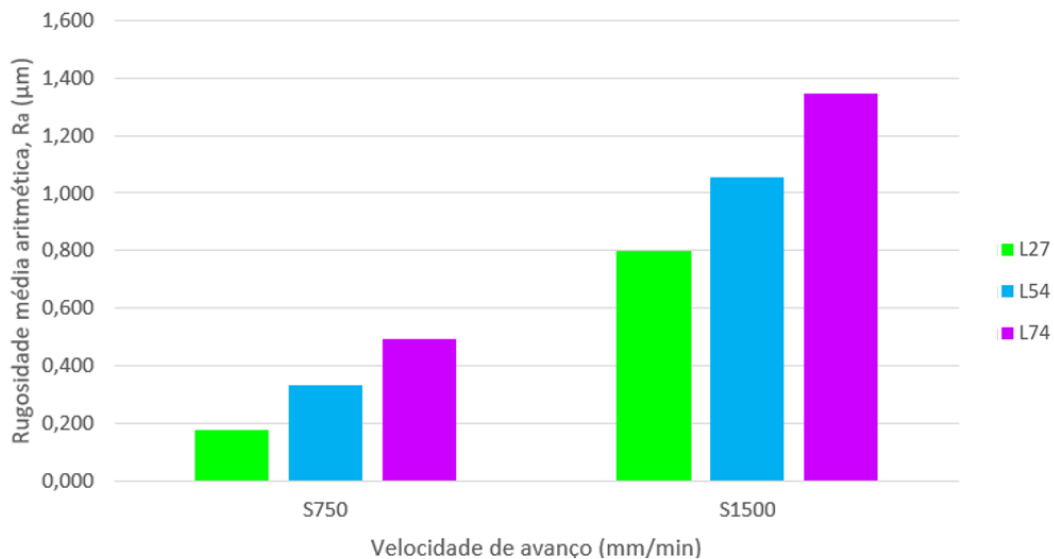


Figura 50 - Valores de rugosidade média aritmética na direção longitudinal, mediante a velocidade de avanço (revestidas)

Na Figura 51, apresentam-se os valores de rugosidade em função das velocidades de avanço e da condição do revestimento. É possível verificar que há um nítido aumento da rugosidade com o aumento do comprimento de corte (séries a verde, azul e roxo, 26,8 m, 53,6 m e 73,7 m, respetivamente, organizadas de forma crescente).

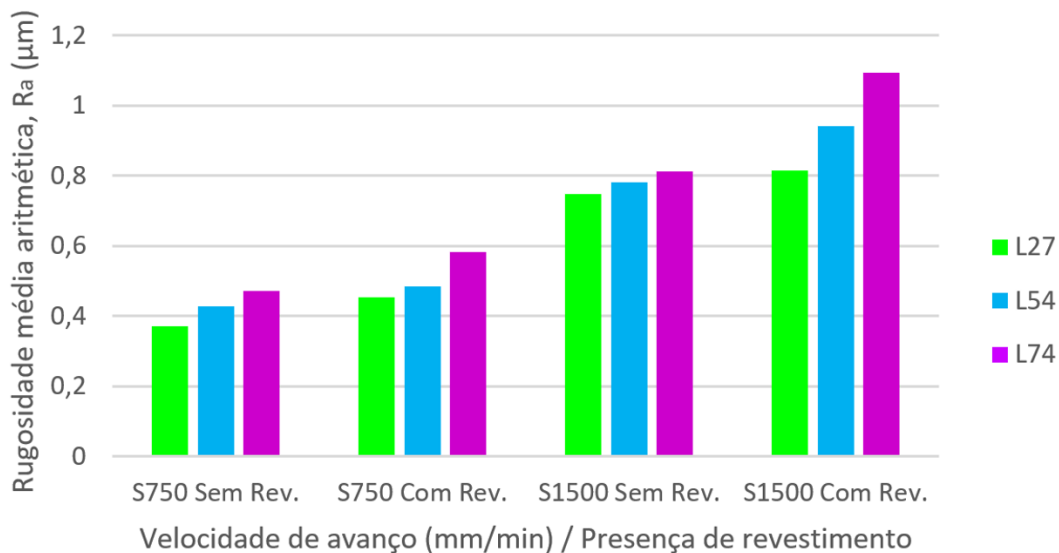


Figura 51 - Valores de rugosidade média aritmética na direção transversal mediante a velocidade de avanço e a presença de revestimento

Assim, é possível concluir que quanto maior a velocidade de avanço, maior será o desgaste apresentado pelas ferramentas de corte, sendo que as não revestidas constituem uma melhor opção, visto que apresentaram menores valores de rugosidade que as revestidas.

### 4.3.3. Mecanismos de Desgaste

Após a conclusão do plano de ensaios estipulado, as ferramentas foram submetidas a uma análise de microscopia eletrônica de varrimento a fim de analisar o desgaste das ferramentas e identificar os principais mecanismos de desgaste. Foram analisadas as diversas faces, nomeadamente a face de folga (*clearance face* – CF), a face de ataque (*rake face* – RF) e a face de topo (*top face* – TOP). Será quantificado o desgaste, tanto a nível quantitativo como qualitativo.

Foi ainda considerada a norma ISO 8688-2:1986 (anexo C), que visa analisar todos os fenómenos de desgaste e mediante essa análise, perceber qual o parâmetro de fresagem que tem maior influência no tipo de desgaste gerado. Essa discussão será feita no capítulo 5.

#### 4.3.3.1. Análise do desgaste das ferramentas de corte

Na presente secção é feita uma caracterização detalhada de todos os mecanismos de desgaste presentes em cada ferramenta de corte, para as respetivas condições de ensaio. Cada uma das ferramentas foi submetida a análise por microscopia eletrônica de varrimento, de forma a avaliar o desgaste.

Note-se que ao longo da análise das imagens, aparecerão algumas com umas “manchas” respeitantes à presença de material de base aderido à ferramenta. No entanto, em determinados casos, estas zonas representam apenas contaminação ou sujidade, e devem ser ignoradas. Quando as zonas contaminadas aparecem nas imagens, elas não são identificadas como qualquer mecanismo de desgaste.

Deverá considerar-se a numeração das lâminas apresentada na Figura 52, para toda a análise a fazer a partir aqui.

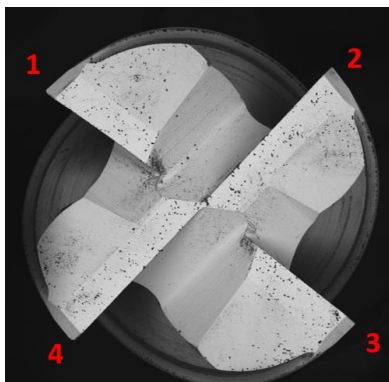


Figura 52 - Referência utilizada na análise das ferramentas

De referir ainda que para todas as ferramentas de corte foram tiradas imagens MEV de pelo menos dois dentes, para assegurar que os mecanismos de desgaste seriam os mesmos.

Para análise e abordagem dos mecanismos de desgaste, as ferramentas foram inicialmente agrupadas de forma a analisar ferramentas submetidas às mesmas condições de ensaios, diferindo apenas na presença ou não de revestimento. Por exemplo, as ferramentas T0L27S750V126 e T1L27S750V126 foram submetidas a uma velocidade de avanço de 750 mm/min e um comprimento de corte de 26,8 m, que será o primeiro par em análise. Todos os restantes pares serão analisados para os mesmos parâmetros de ensaios.

### **Ferramentas T0L27S750V126 / T1L27S750V126**

As ferramentas T0L27S750V126 e T1L27S750V126 foram ensaiadas para um comprimento de corte de 27 metros e 750 mm/min de velocidade de avanço, sendo a primeira sem revestimento e a segunda revestida.

#### **Sem revestimento**

No caso da T0L27S750V126, são visíveis vários tipos de desgaste, sendo o predominante a abrasão. No entanto, também se verifica adesão de material em diversas partes da ferramenta de corte (Figura 53 a) e c)), e pontualmente, destacamento do substrato e *microchipping* (Figura 53 b)).

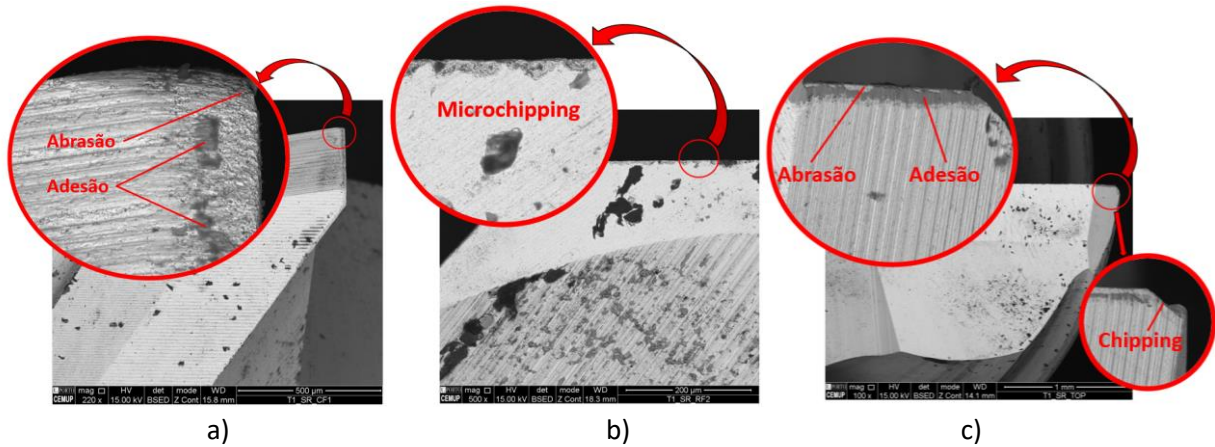


Figura 53 - Imagem SEM com ampliações 100x, 220x e 500x respectivamente da a) face de folga; b) face de ataque; c) face de topo da ferramenta sem revestimento

Foi realizada uma análise EDS na área da adesão identificada na Figura 53 c), para verificar se efetivamente as manchas identificadas se tratava deste mecanismo de desgaste (adesão), ou de algum defeito de imagem ou de superfície da ferramenta.

Como é possível observar pela Figura 54 a), há duas zonas distintas visíveis, sendo a Z1 correspondente a material maquinado, e a Z2 ao material de base da ferramenta. Esta conclusão é passível de poder ser tirada, uma vez que na Figura 54 b) o maior pico corresponde a cobre (Cu) e, por isso, corresponder ao AMPCOLOY®83 e na Figura 54 c) o maior pico corresponde a tungstênio (W) material de revestimento da ferramenta de corte.

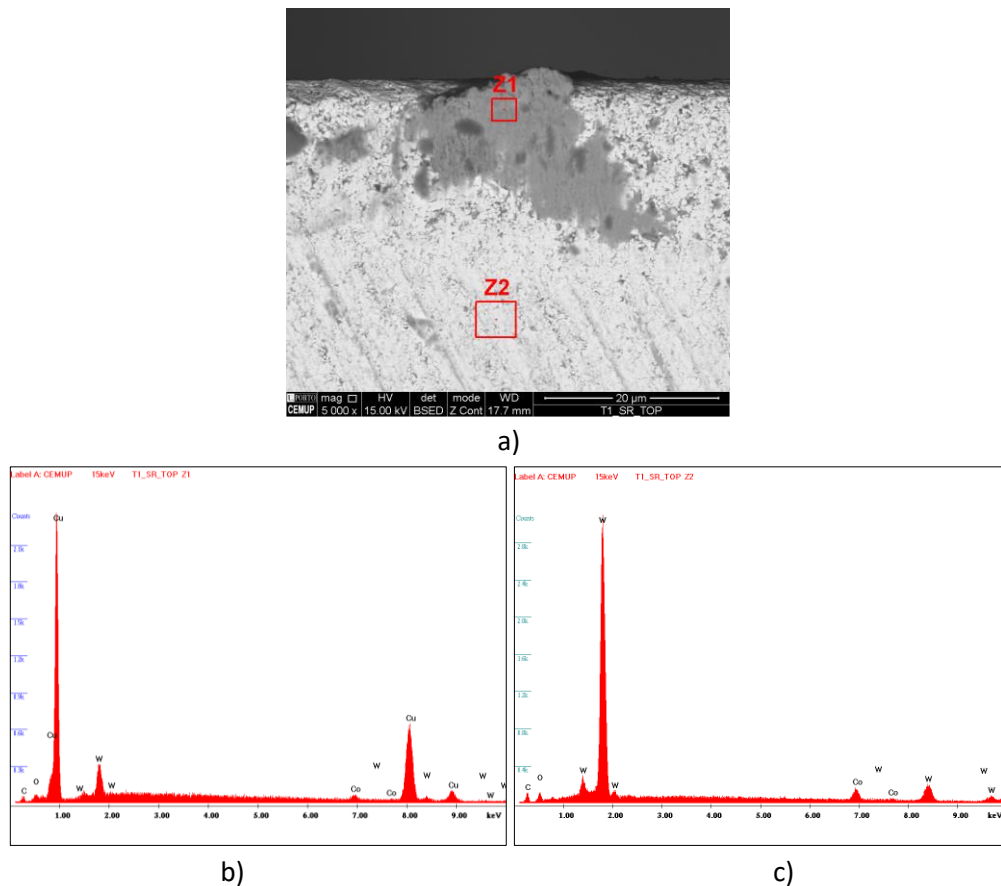


Figura 54 - Espetros EDS das zonas correspondentes à Figura 53: a) Imagem SEM da ferramenta T0L27S750V126; b) zona 1 de análise EDS; c) zona 2 de análise EDS

### Com revestimento

Relativamente à ferramenta T1L27S750V126, é possível referir que o principal mecanismo de desgaste é a delaminação, uma vez que este é facilmente visível em todas as faces da fresa. Muito provavelmente devido a este fator, há várias zonas de destacamento do substrato (assinalado como *chipping*), sendo de grandes porções (Figura 55 c) ou de pequenas quantidades de material (Figura 55 d) dente 4). Este *chipping* pode ter sido causado sobretudo pela adesão do material à superfície e má adesão do revestimento ao substrato. Também a abrasão se manifesta nas faces da ferramenta, principalmente visível na face de folga.

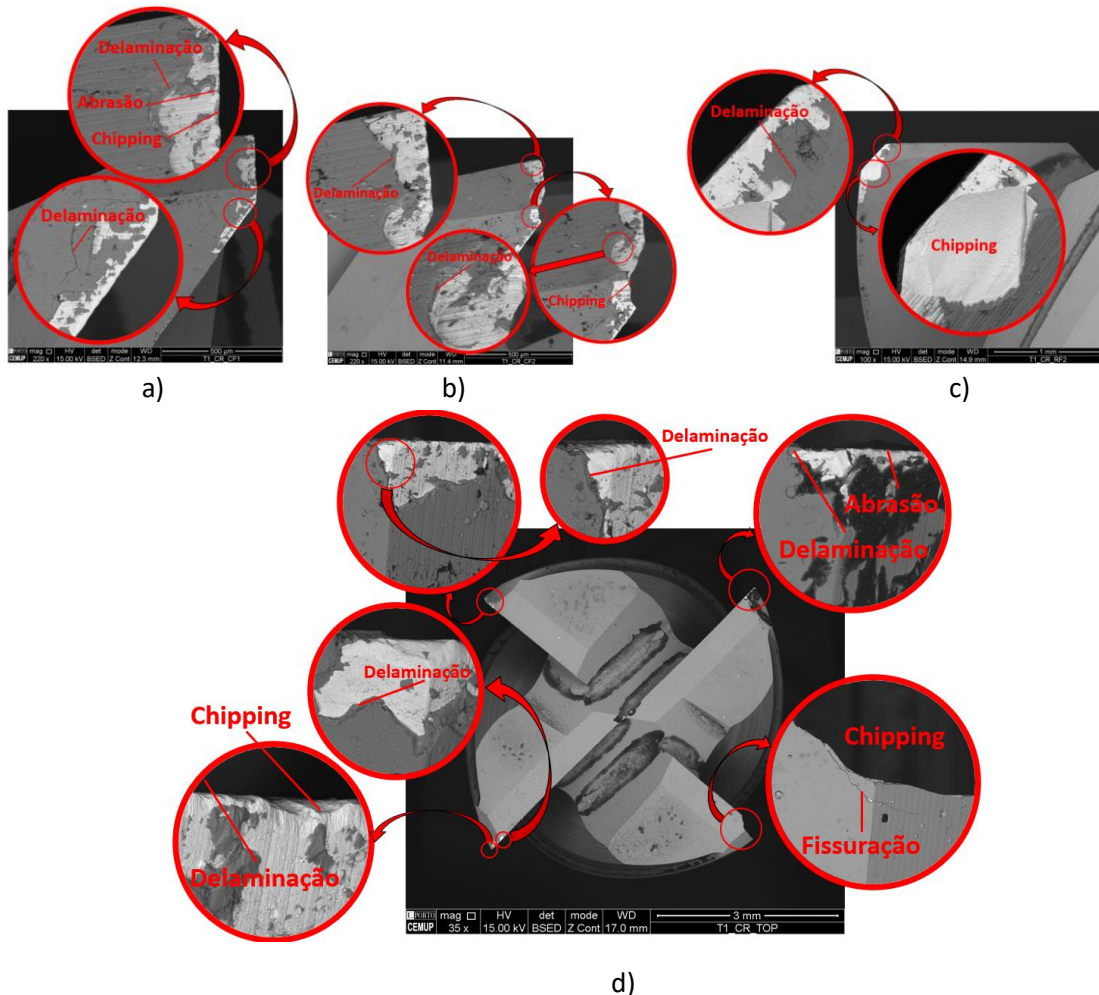


Figura 55 - Imagem SEM com ampliações 35x, 100x e 220x respetivamente da a) face de folga - dente 1; b) face de folga - dente 2; c) face de ataque - dente 2; d) face de topo da ferramenta com revestimento

Feita a primeira exposição relativamente às ferramentas nas condições de ensaio de 26,8 m de comprimento de corte e 750 mm/min de velocidade de avanço, sendo uma não revestida e outra revestida, reúnem-se agora condições para fazer um balanço final com base no anteriormente analisado, e na Figura 56.

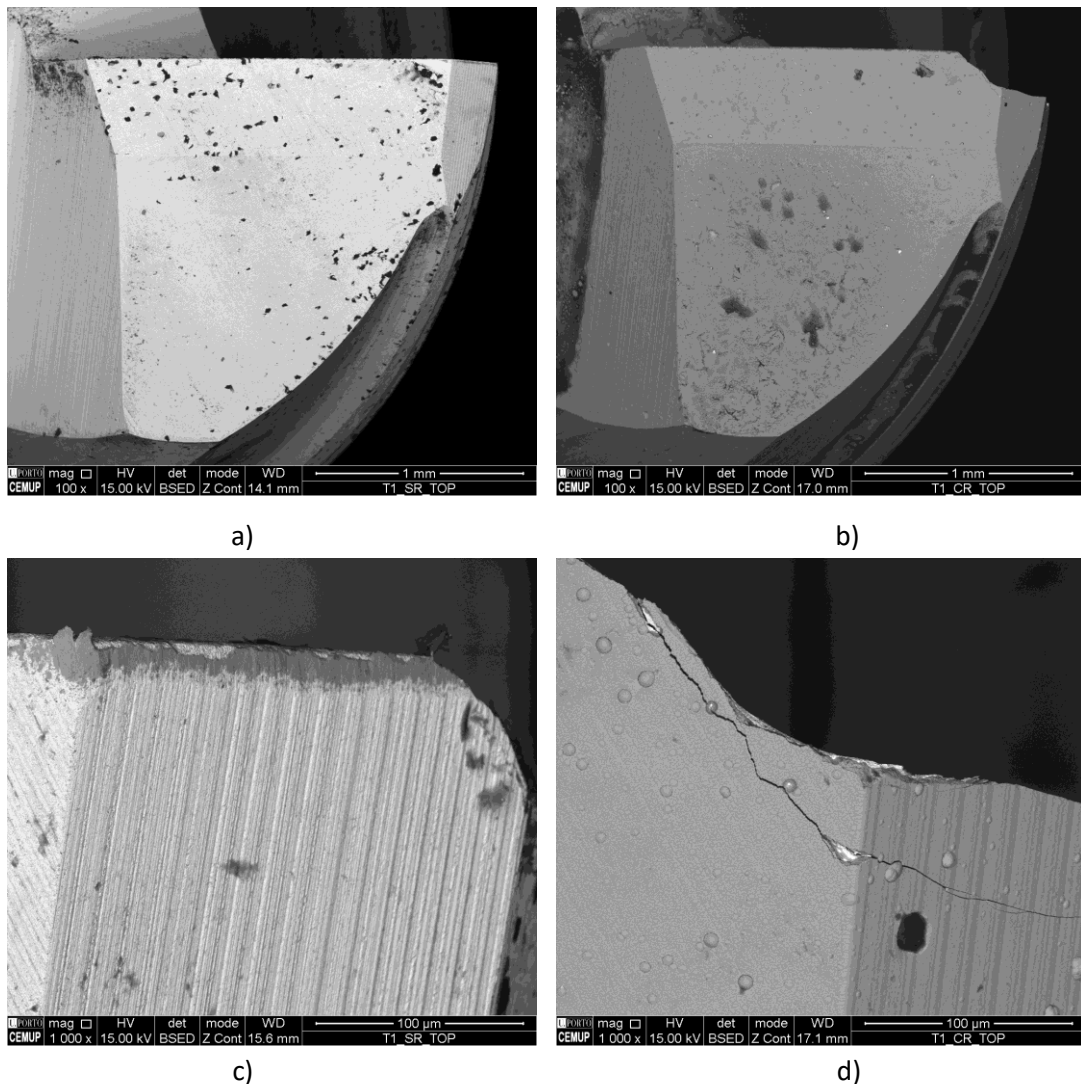


Figura 56 - Imagens SEM para 27 m de comprimento de corte e 750 mm/min de velocidade de avanço e a) ampliação de 100x e sem revestimento; b) ampliação de 100x e com revestimento; c) ampliação de 1000x e sem revestimento; d) ampliação de 1000x e com revestimento

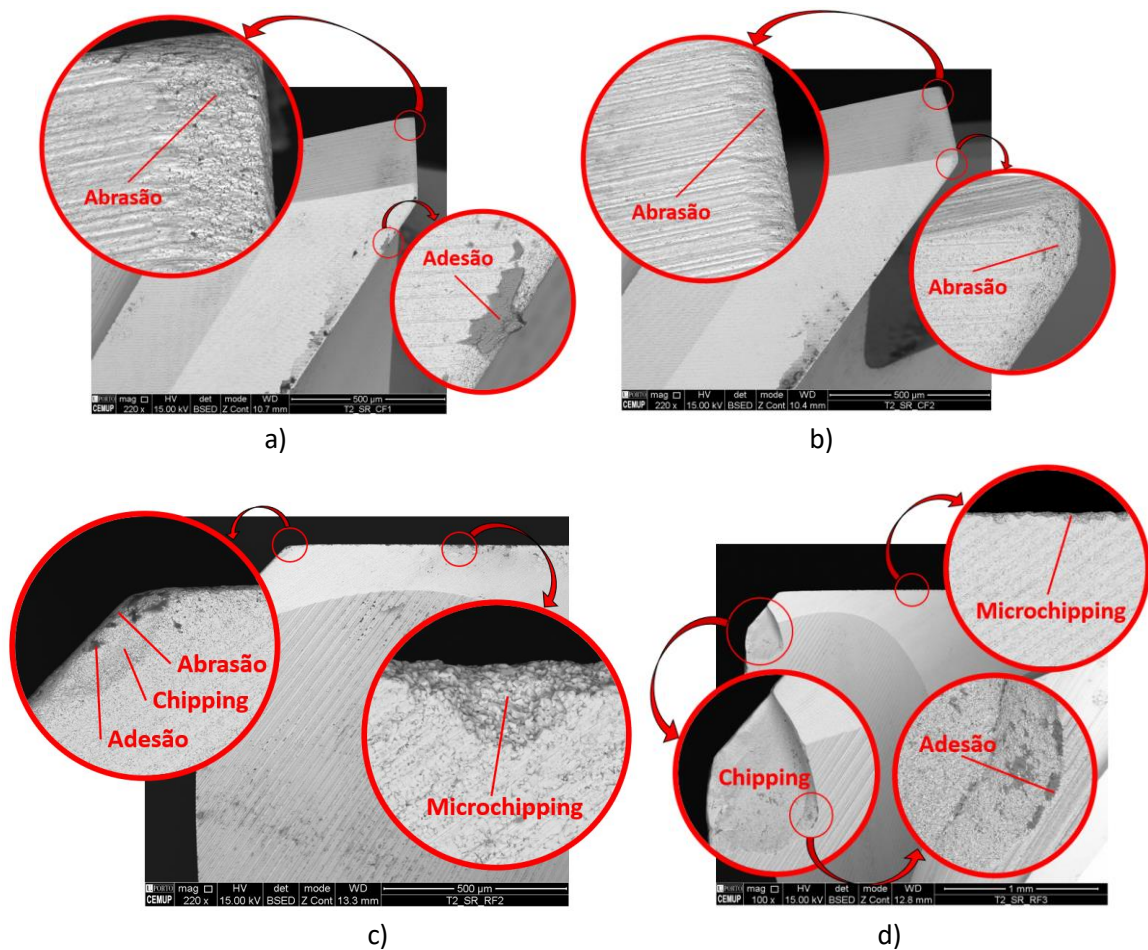
É notório pela Figura 56 que a fresa que foi mais severamente desgastada foi a fresa revestida. Apesar de, no caso da ferramenta não revestida haver uma grande quantidade de abrasão e material aderido, a ferramenta revestida apresenta um desgaste mais severo, incluindo neste o destacamento de uma grande porção de material no vértice da lâmina, tanto do revestimento como do substrato, impulsionado pela fissuração que é possível observar na Figura 56 d). Além disso, a delaminação do revestimento terá também influência na degradação das fresas. De facto, com o destacamento do revestimento, são libertadas partículas bastante duras que uma vez no contacto, levam à mais fácil abrasão da ferramenta e condução ao mecanismo de desgaste de lascagem (*chipping*) do substrato.

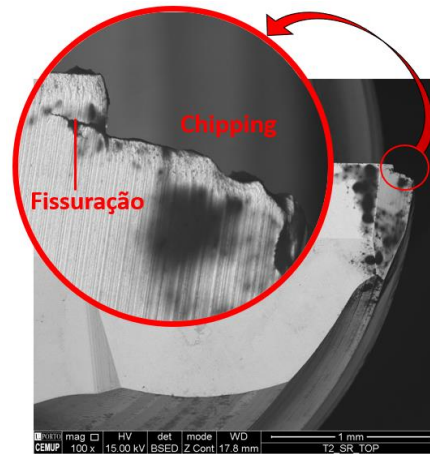
### Ferramentas T0L54S750V126 / T1L54S750V126

As ferramentas T0L54S750V126 e T1L54S750V126 foram ensaiadas para um comprimento de corte de 54 metros e 750 mm/min de velocidade de avanço, sendo a primeira sem revestimento e a segunda revestida.

#### Sem revestimento

No caso da ferramenta T0L54S750V126, mais uma vez se verificam os mesmos mecanismos de desgaste, sendo eles abrasão da face de folga e adesão do material maquinado. Foram analisados três dentes diferentes, como é possível ver na Figura 57. Para a face de folga, foram tiradas imagens das lâminas 1 e 2. Já na face de ataque, os dentes em análise foram o 2 e o 3 (Figura 57 c) e d)), verificando um leve destacamento do substrato (*chipping*) no dente 2, e um destacamento mais acentuado no dente 3. Foi possível encontrar ainda zonas com abrasão e material aderido.





e)

Figura 57 - Imagem SEM com ampliações 100x e 220x da a) face de folga - dente 1; b) face de folga - dente 2; c) face de ataque - dente 2; d) face de ataque - dente 3; e) face de topo da ferramenta sem revestimento

### Com revestimento

Comparativamente com a fresa T0L54S750V126, a T1L54S750V126 encontra-se mais severamente desgastada, estando presente sobretudo a delaminação do revestimento. Há bastantes zonas visíveis de adesão de material maquinado, o que se verifica nesta ferramenta com mais frequência do que na não revestida (Figura 58).

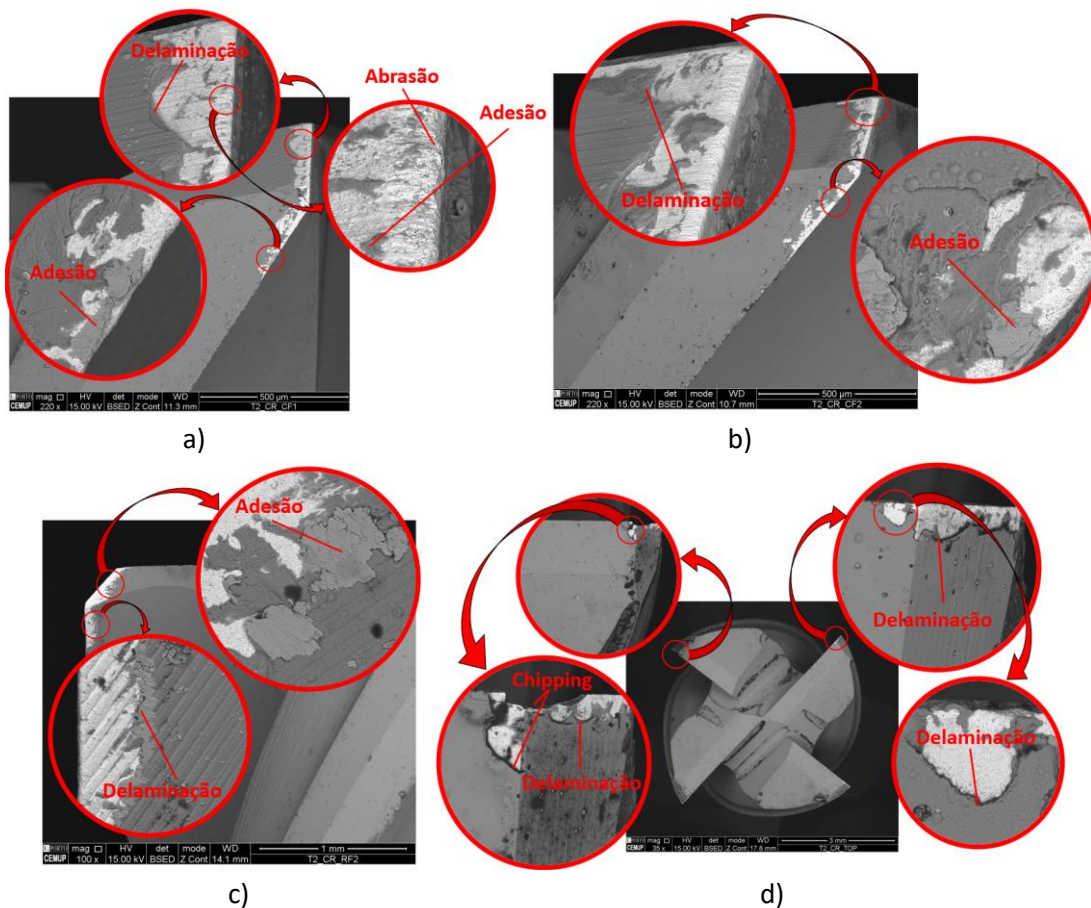


Figura 58 - Imagem SEM com ampliações 100x e 220x da a) face de folga - dente 1; b) face de folga - dente 2; c) face de ataque - dente 2; d) face de topo da ferramenta com revestimento

Fazendo uma análise mais geral do segundo par de ferramentas em análise, é possível inferir que neste caso a fresa sem revestimento desgastou mais do que com os parâmetros anteriores ( $L = 26,8$  m e  $v_f = 750$  mm/min), no entanto, mostrou ser ligeiramente melhor do que a fresa revestida para as mesmas condições.

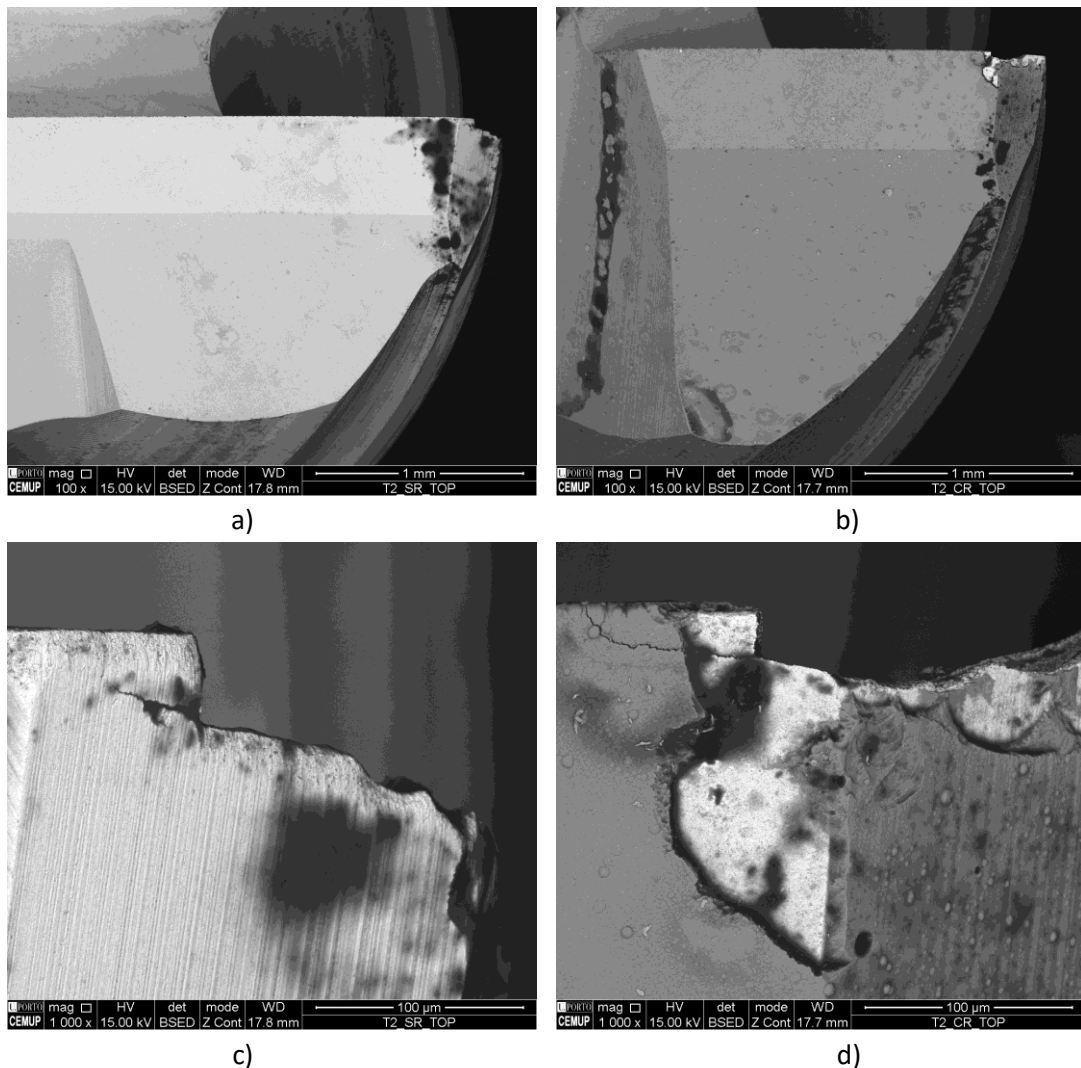


Figura 59 - Imagens SEM para 54 m de comprimento de corte e 750 mm/min de velocidade de avanço e a) ampliação de 100x e sem revestimento; b) ampliação de 100x e com revestimento; c) ampliação de 1000x e sem revestimento; d) ampliação de 1000x e com revestimento

Ainda que presente o desgaste abrasivo, sem dúvida que o predominante para estas condições de corte foi a delaminação e o *chipping*, para ambas as ferramentas, sendo que a porção de material destacado foi aproximadamente na mesma zona e com a mesma geometria. Note-se que são de descartar as manchas escuras visíveis nas imagens (nomeadamente na Figura 59), não sendo parte integrante de um mecanismo de desgaste, mas sim contaminação / sujidade.

### Ferramentas TOL74S750V126 / T1L74S750V126

As ferramentas TOL74S750V126 e T1L74S750V126 foram ensaiadas para um comprimento de corte de 74 metros e 750 mm/min de velocidade de avanço, sendo a primeira sem revestimento e a segunda revestida.

#### Sem revestimento

Como será posteriormente abordado na secção 4.3.3.2., a ferramenta TOL74S750V126 foi uma das que apresentou mais desgaste de flanco de entre todas as não revestidas, devido à grande porção de destacamento da superfície, que se pode verificar na Figura 60 a). No entanto, o desgaste abrasivo e o *chipping* também se observou serem mecanismos recorrentes.

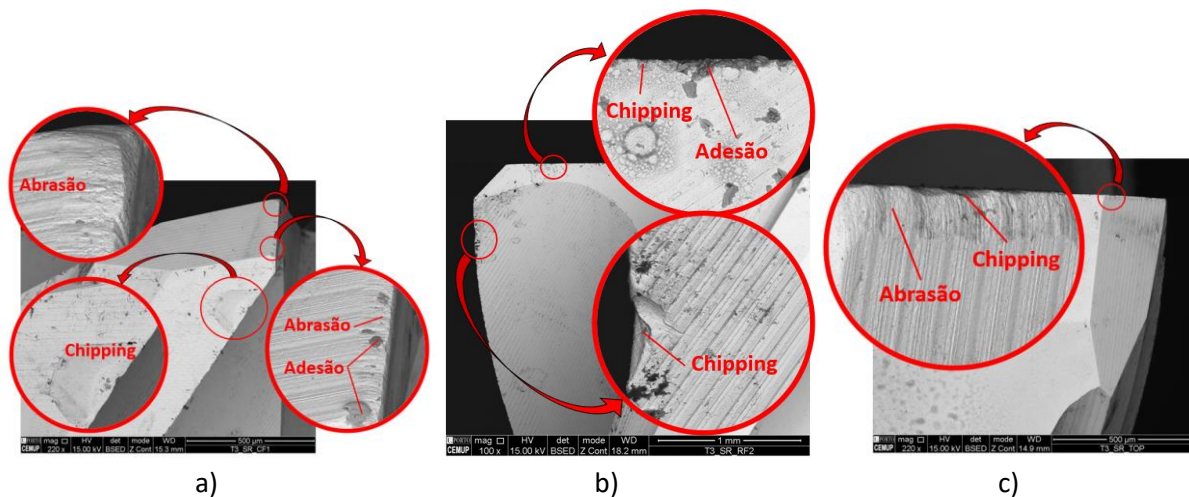
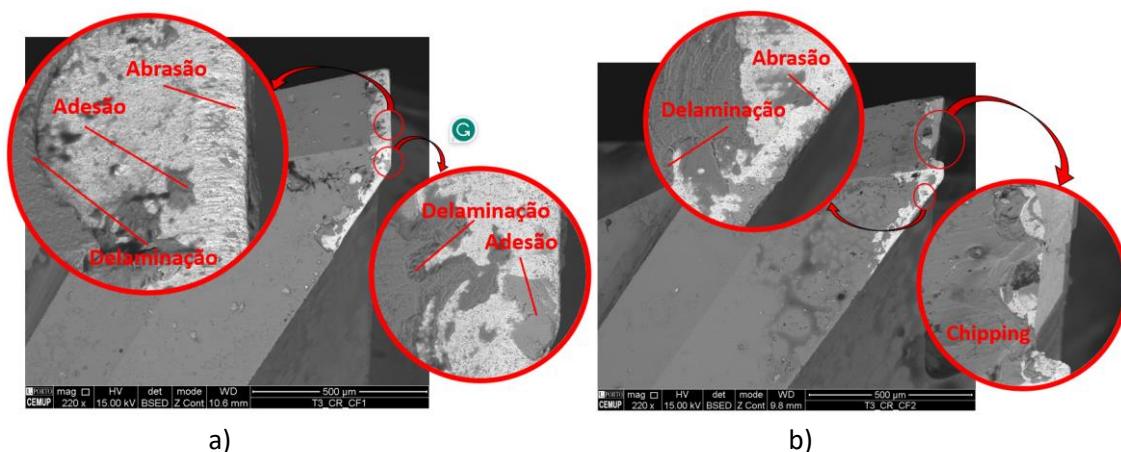


Figura 60 - Imagem SEM com ampliações 100x e 220x respetivamente da a) face de folga; b) face de ataque; c) face de topo da ferramenta sem revestimento

#### Com revestimento

À semelhança do ocorrido nas ferramentas anteriores, também a ferramenta revestida nestas condições de maquinagem se encontra mais desgastada. Na Figura 61 c) é possível verificar um grande destacamento de material possivelmente originado pela fissuração que é observada ainda na mesma imagem. A par com a delaminação, também o *chipping* foi o mecanismo mais usual nesta ferramenta.



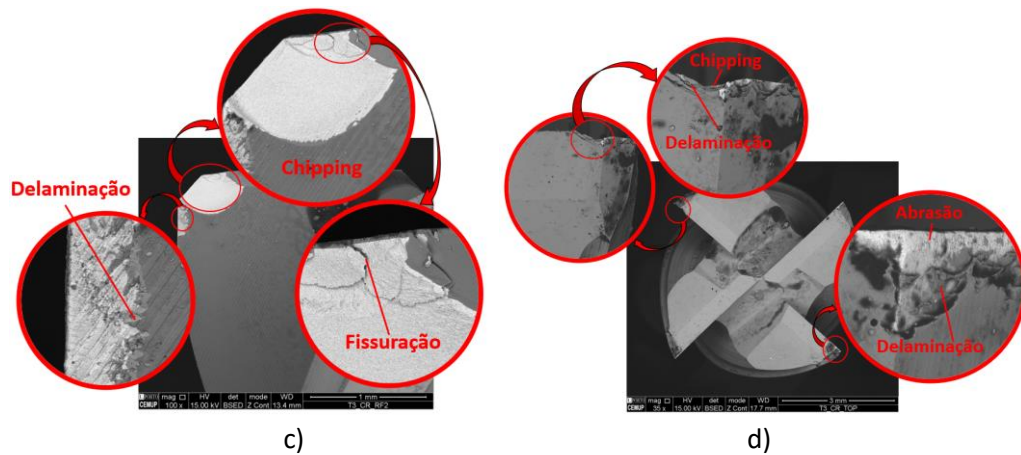


Figura 61 - Imagem SEM com ampliações 100x e 220x respectivamente da a) face de folga - dente 1; b) face de folga - dente 2; c) face de ataque - dente 2; d) face de topo da ferramenta com revestimento

Até ao momento, estão representadas na Figura 62, as fresas que menos desgaste revelaram. A revestida seguiu o mesmo padrão descrito anteriormente, mostrando maior grau de degradação do que a sem revestimento. Na ferramenta não revestida, é possível observar leves zonas de abrasão e material aderido, enquanto na ferramenta revestida predomina mais uma vez a delaminação e abrasão leve.

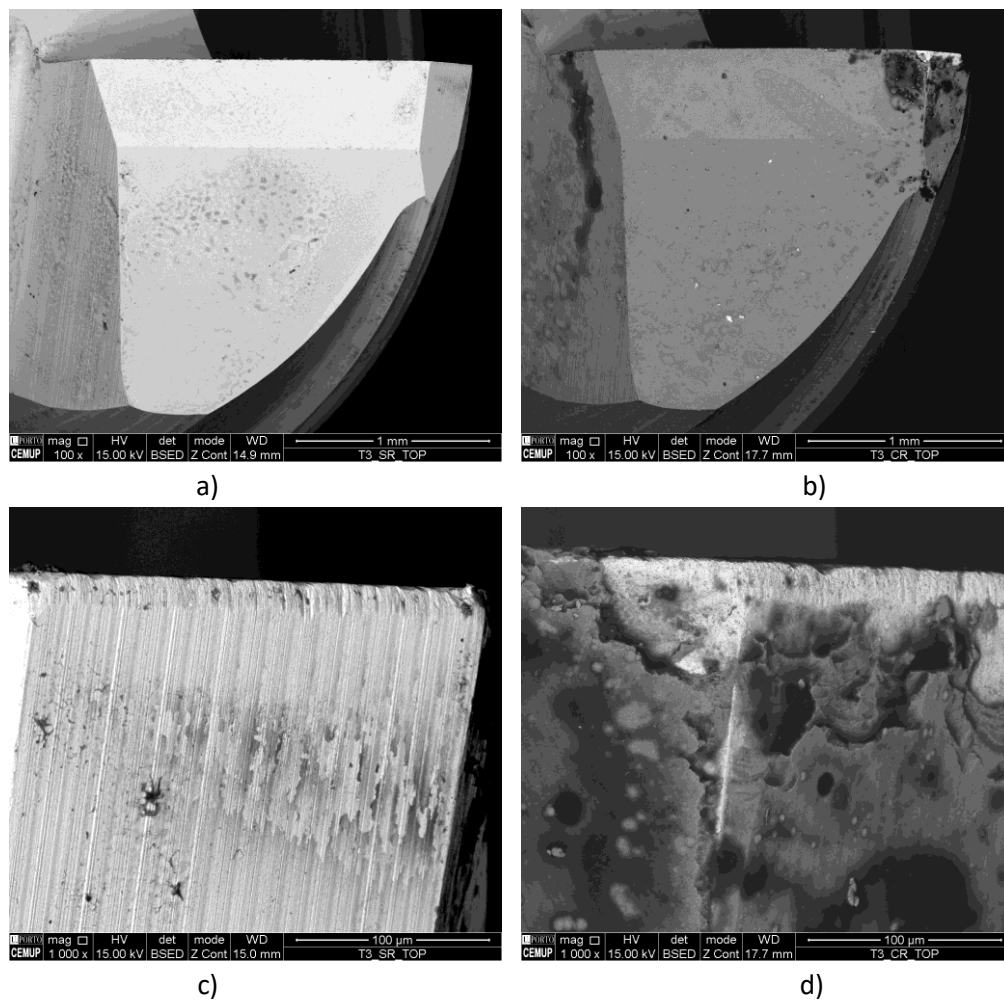


Figura 62 - Imagens SEM para 74m de comprimento de corte e 750mm/min de velocidade de avanço e a) ampliação de 100x e sem revestimento; b) ampliação de 100x e com revestimento; c) ampliação de 1000x e sem revestimento; d) ampliação de 1000x e com revestimento

### **Ferramentas TOL27S1500V126 / T1L27S1500V126**

As ferramentas TOL27S1500V126 e T1L27S1500V126 foram ensaiadas para um comprimento de corte de 27 metros e 1500 mm/min de velocidade de avanço, sendo a primeira sem revestimento e a segunda revestida.

#### **Sem revestimento**

Relativamente à ferramenta TOL27S1500V126, é possível visualizar pela Figura 63 que os principais mecanismos de desgaste são a abrasão da face de folga da ferramenta, e o *chipping*. Nesta ferramenta, verifica-se um destacamento de grande quantidade de material nos vértices de cada lâmina da ferramenta. A adesão de material maquinado também está presente nesta fresa.

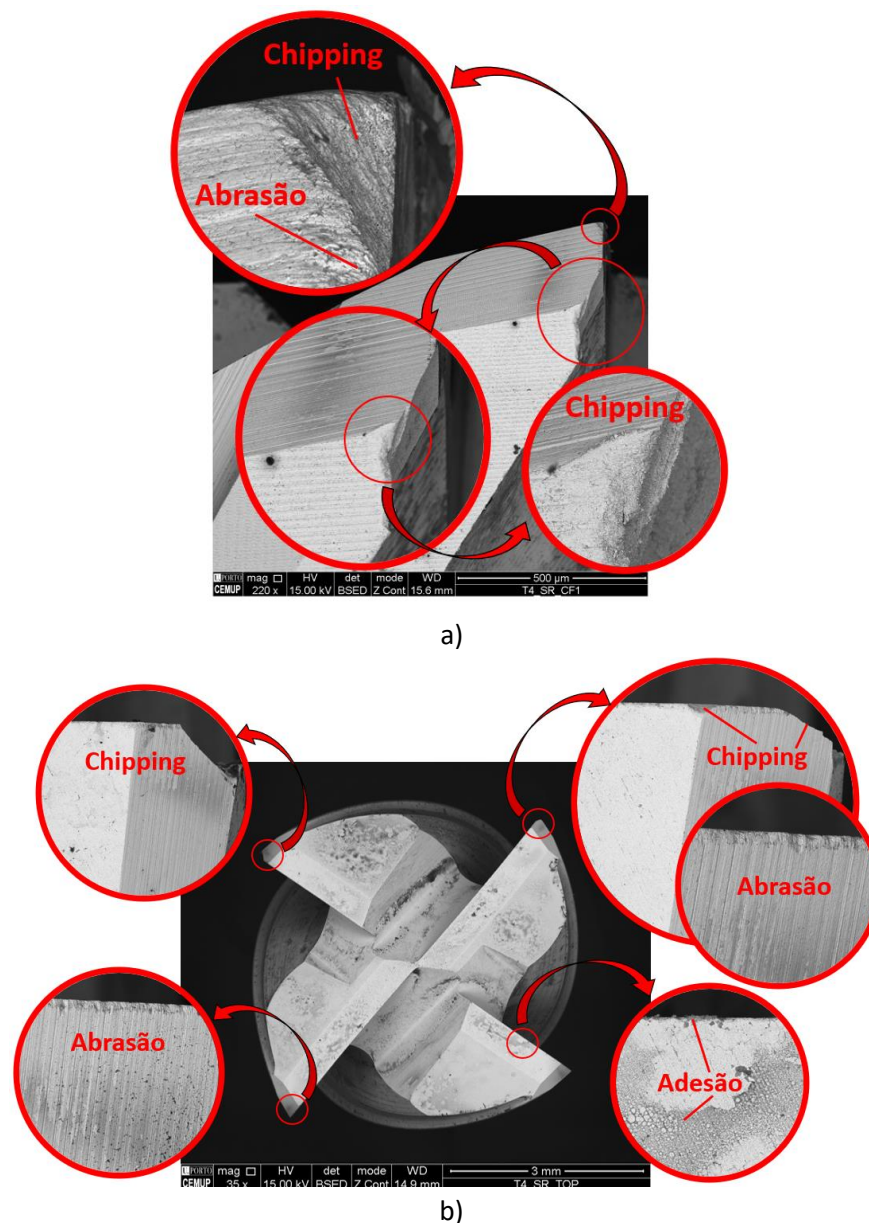


Figura 63 - Imagem SEM com ampliações 220x, 500x, 2500x e 5000x respectivamente da a) clearance face; b) face de topo da ferramenta sem revestimento

Para dissipar qualquer tipo de dúvida que pudesse ocorrer relativamente à Figura 63 b), foi efetuada uma análise EDS à superfície, para identificar o material da parte mais escura, e perceber se se tratava efetivamente de adesão do material ou se poderiam ser marcas de contaminação ou defeitos da superfície.

Como é possível perceber pela Figura 64 b), há uma elevada percentagem de cobre (Cu) na zona mais escura, confirmando assim que é material proveniente do bloco de AMPCOLOY®83.

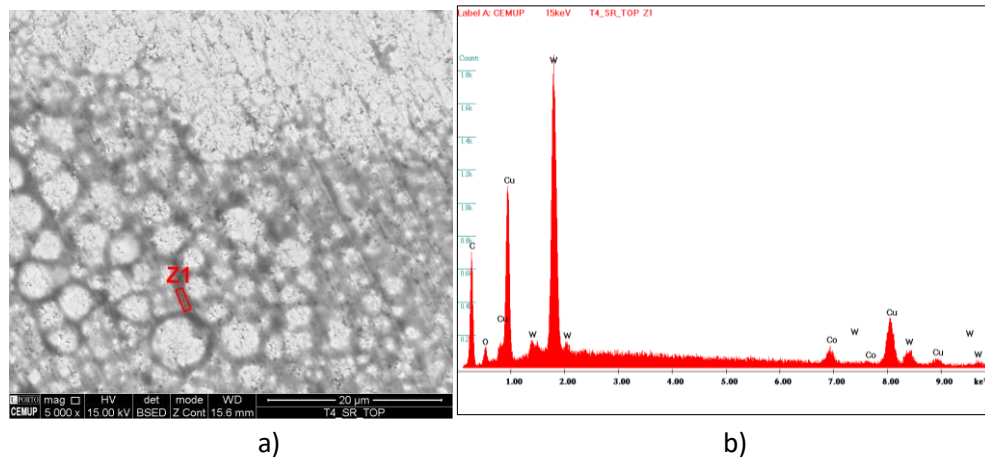
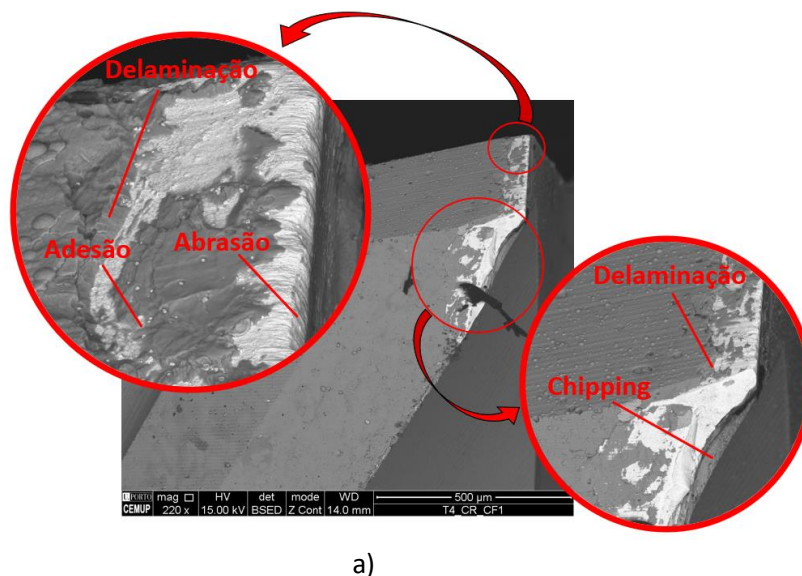


Figura 64 - Espectros EDS das zonas correspondentes à face de topo da Figura 63: a) Imagem SEM da ferramenta T0L27S750V126; b) zona 1 de análise EDS

### Com revestimento

Por análise da Figura 65, é possível observar vários mecanismos de desgaste da ferramenta T1L27S1500V126. Mais uma vez, à semelhança do verificado anteriormente. A delaminação é o mecanismo predominante desta ferramenta revestida, acrescentando ainda *chipping*, adesão e abrasão.



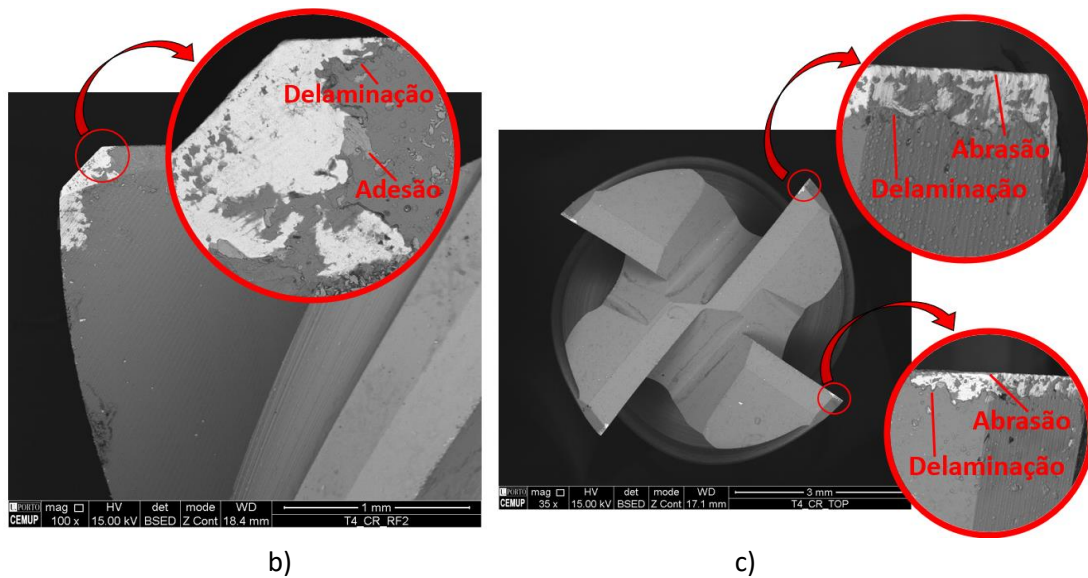


Figura 65 - Imagem SEM com ampliações 35x, 100x e 220x respetivamente da a) face de folga; b) face de ataque; c) face de topo da ferramenta com revestimento

Mais uma vez, para tirar as dúvidas relativamente ao significado das diferenças de cor da imagem SEM obtida (Figura 65 b)), fez-se uma análise de composição química à superfície. Como é possível observar pela Figura 66 a), há três zonas distintas, sendo uma mais clara (Z1), uma intermédia (Z2) e uma mais escura (Z3). A zona 1 corresponde ao substrato da ferramenta (WC-Co), a zona 2 ao material maquinado (AMPCO) e finalmente a zona 3 ao revestimento da fresa (TiAlTaN).

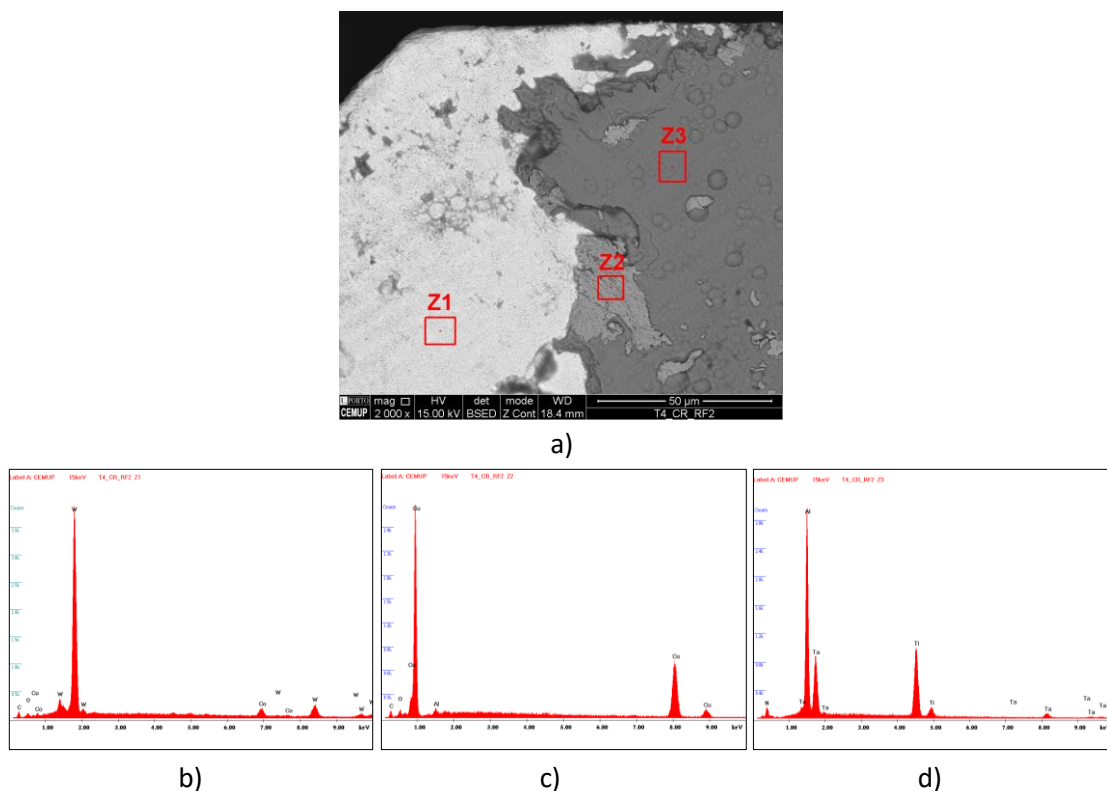


Figura 66 - Espectros EDS das zonas correspondentes à Figura 65: a) Imagem SEM da ferramenta TOL74S1500V126; b) zona 1 de análise EDS; c) zona 2 de análise EDS; d) zona 3 de análise EDS

Como é possível observar pela Figura 67 na ferramenta não revestida, há um grande destacamento do material de base, enquanto na ferramenta revestida houve inicialmente abrasão e posteriormente delaminação do revestimento, não havendo destaque de material da superfície da ferramenta, havendo apenas deterioração do revestimento.

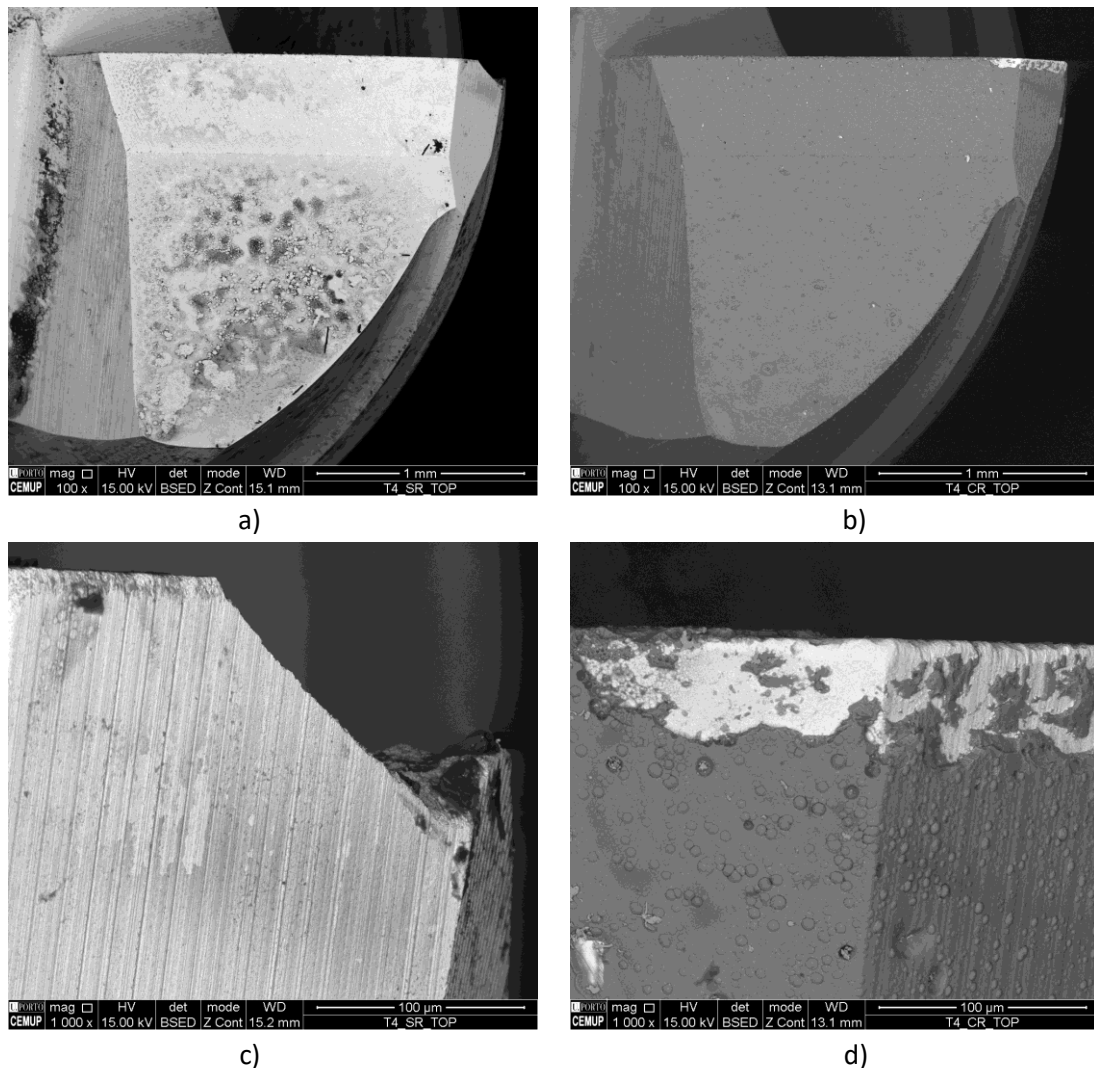


Figura 67 - Imagens SEM para 27 m de comprimento de corte e 1500 mm/min de velocidade de avanço e a) ampliação de 100x e sem revestimento; b) ampliação de 100x e com revestimento; c) ampliação de 1000x e sem revestimento; d) ampliação de 1000x e com revestimento

Contrariamente às fresas testadas com velocidade de avanço de 750 mm/min, no presente caso a ferramenta que se encontra em pior estado é a não revestida, sendo possível verificar uma grande zona de *chipping*, onde foi destacado grande parte de substrato da fresa, sem se ter verificado fissuração prévia. Isto pode dever-se a algum defeito tanto na fresa como no material maquinado, que ao ter maquinado um sulco ou uma concavidade, provocou uma vibração maior no vértice da fresa, provocando o seu destacamento. Este facto pode também estar associado ao revestimento, que tem influência na parte inicial do ensaio, e que só depois do destacamento ou desgaste deixa que o substrato sofra lascagem (*chipping*). Isto pode levar a acreditar que a duração do efeito do revestimento peca por ser demasiado rápida, e deixar de produzir efeitos ao fim de um comprimento de corte relativamente reduzido. Ainda na fresa revestida, mais uma vez, é possível notar delaminação em toda a aresta da face de folga da fresa.

### Ferramentas T0L54S1500V126 / T1L54S1500V126

As ferramentas T0L54S1500V126 e T1L54S1500V126 foram ensaiadas para um comprimento de corte de 54 m e 1500 mm/min de velocidade de avanço, sendo a primeira sem revestimento e a segunda revestida.

#### Sem revestimento

À semelhança do verificado na ferramenta de corte anterior, não revestida para o mesmo comprimento de corte (T0L54S750V126), na ferramenta T0L54S1500V126 verifica-se um grande destacamento de material do vértice de um dos dentes (Figura 68 a)). Assim, e por este motivo, o mecanismo de desgaste predominante é o *chipping*.

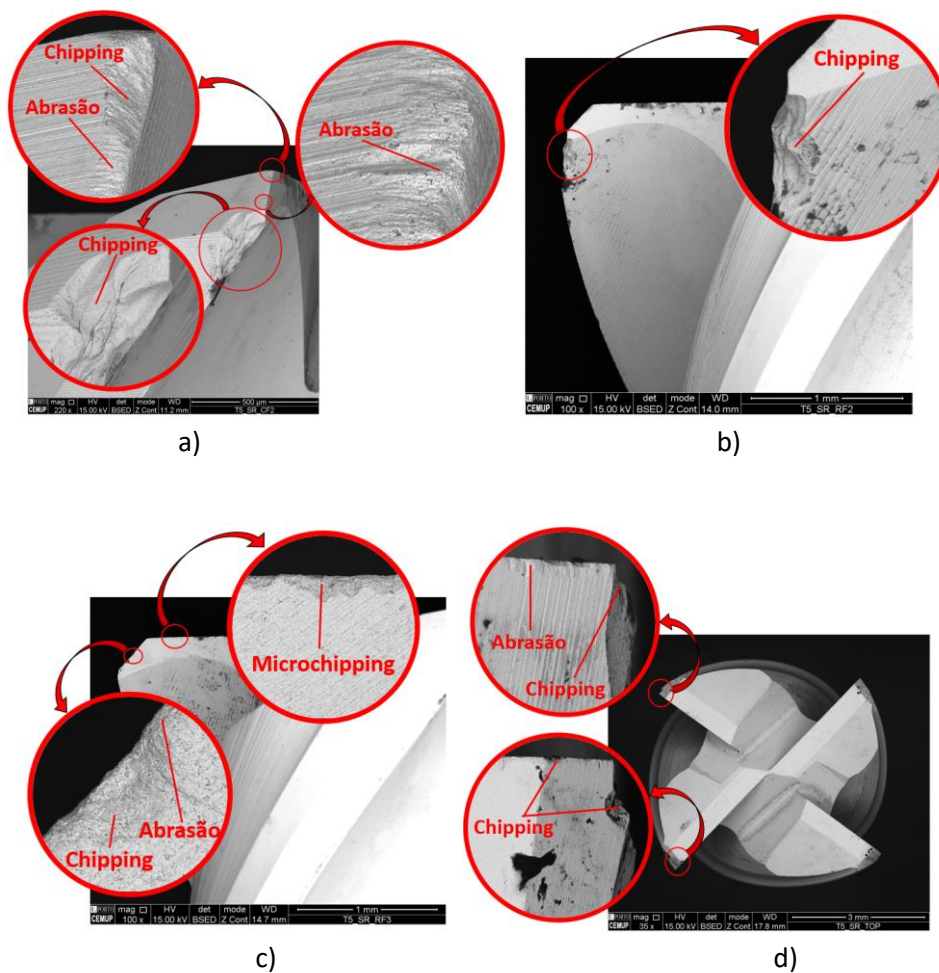


Figura 68 - Imagem SEM com ampliações 100x e 220x da a) face de folga - dente 2; b) face de ataque - dente 2; c) face de ataque - dente 3; d) face de topo da ferramenta sem revestimento

### Com revestimento

No que diz respeito à ferramenta T1L54S1500V126, como é possível observar pela Figura 69, é visível a delaminação do revestimento. É possível observar ainda, na Figura 69 c), que ocorreu fissuração em diversas zonas, podendo esta ter sido um forte causador do *chipping*. Verifica-se ainda a presença de adesão e abrasão.

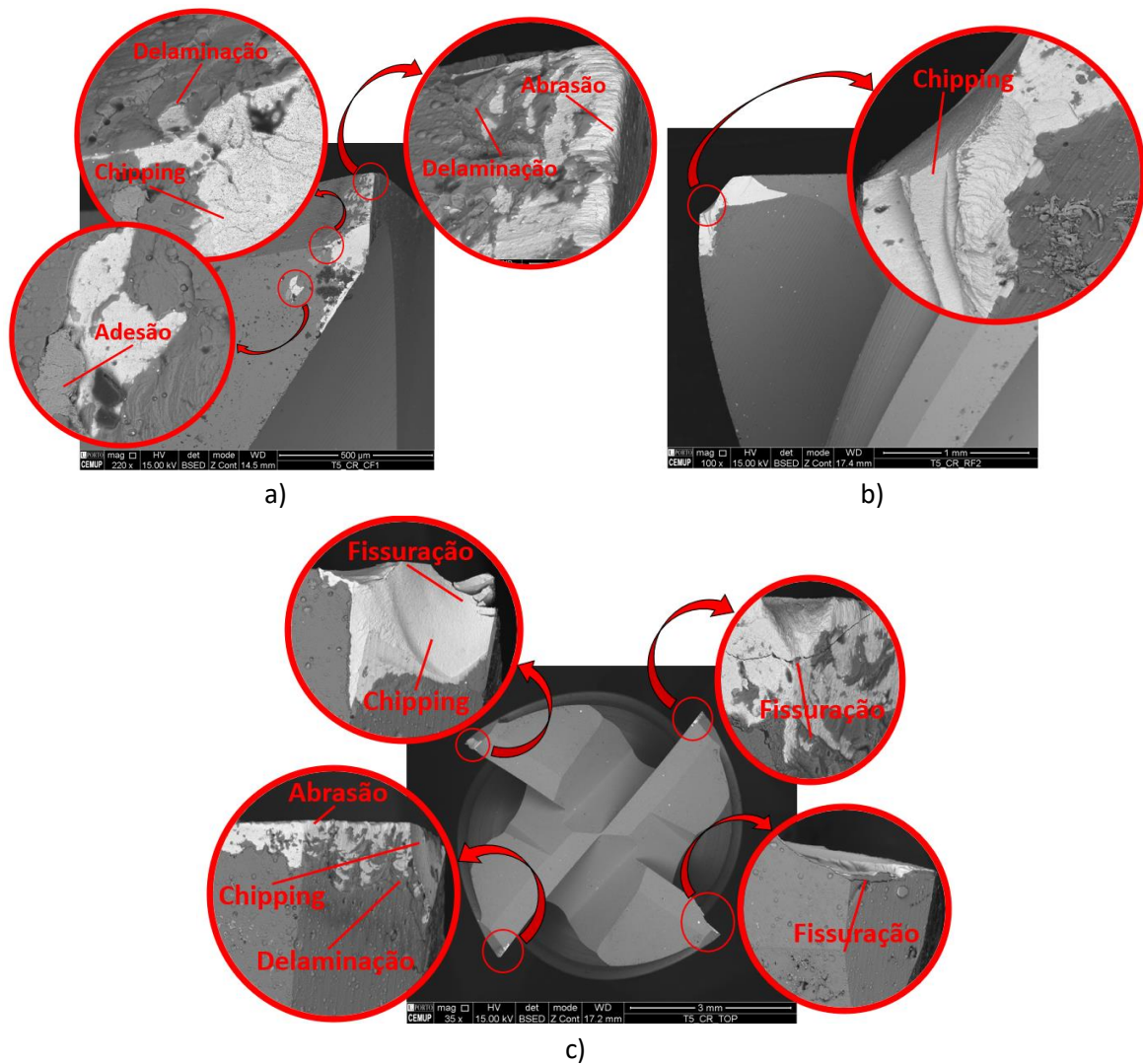


Figura 69 - Imagem SEM com ampliações 35x, 100x e 220x, da a) face de folga; b) face de ataque; c) face de topo da ferramenta com revestimento

Foram duas as fresas que se comportaram relativamente mal ao desgaste, sendo a revestida uma das piores, e sem dúvida a que apresenta um nível de fissuração mais agressivo. Na Figura 70 d) é possível verificar que, efetivamente, a fissuração foi a provocadora do destacamento de substrato da fresa. A fresa não revestida apresenta leves zonas de desgaste abrasivo, e uma zona de *chipping*, no entanto, muito mais reduzido quando em comparação com a fresa revestida.

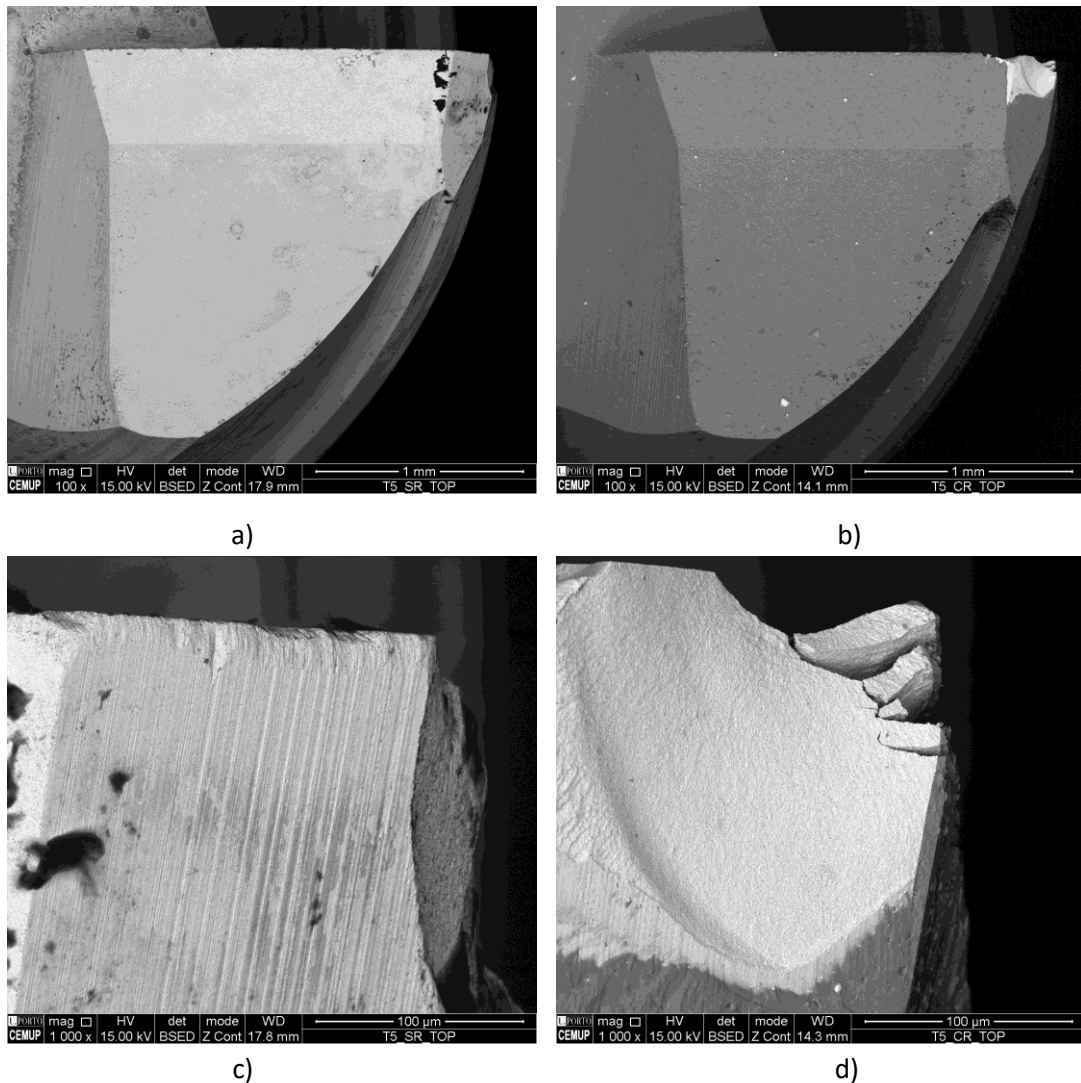


Figura 70 - Imagens SEM para 54 m de comprimento de corte e 1500 mm/min de velocidade de avanço e a) ampliação de 100x e sem revestimento; b) ampliação de 100x e com revestimento; c) ampliação de 1000x e sem revestimento; d) ampliação de 1000x e com revestimento

### **Ferramentas TOL74S1500V126 / T1L74S1500V126**

As ferramentas TOL74S1500V126 e T1L74S1500V126 foram ensaiadas para um comprimento de corte de 74 m e 1500 mm/min de velocidade de avanço, sendo a primeira sem revestimento e a segunda revestida.

#### **Sem revestimento**

A ferramenta sem revestimento foi sujeita principalmente a abrasão e adesão na face de folga, como é possível observar pela Figura 71. No entanto, o desgaste adesivo e a fissuração também se podem observar em menor quantidade, sendo o último o provável causador do destaque de material.

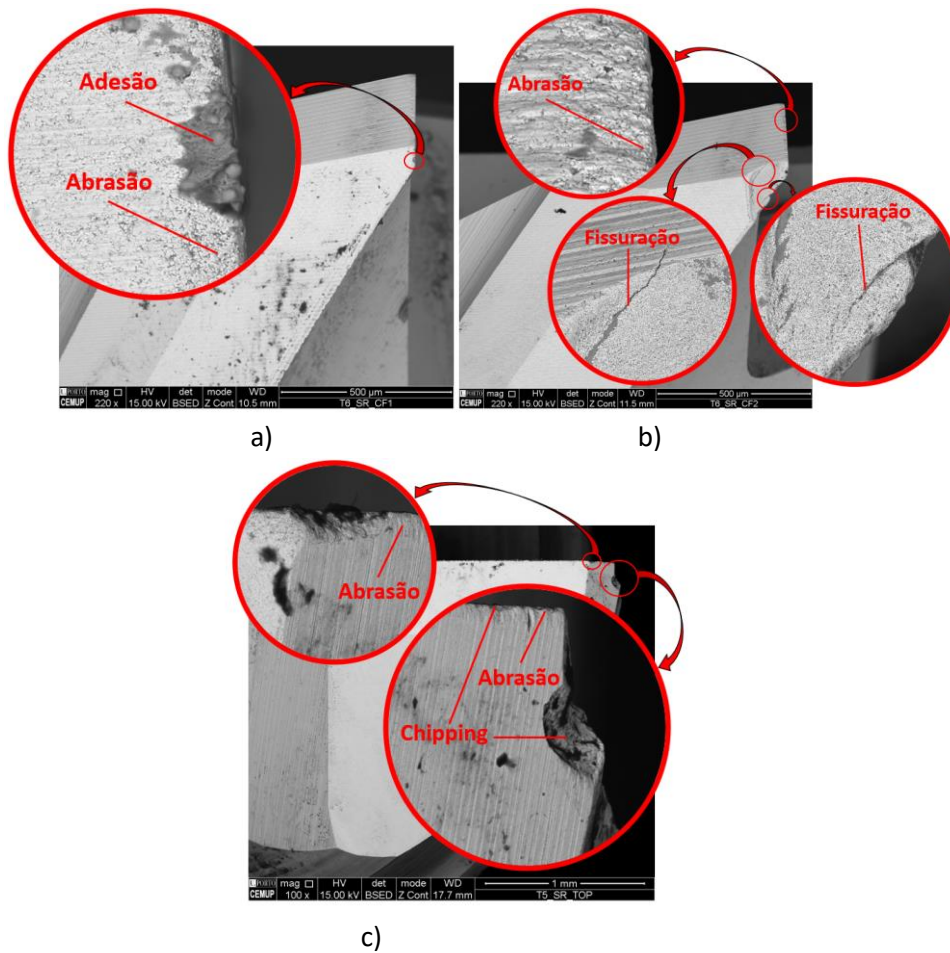
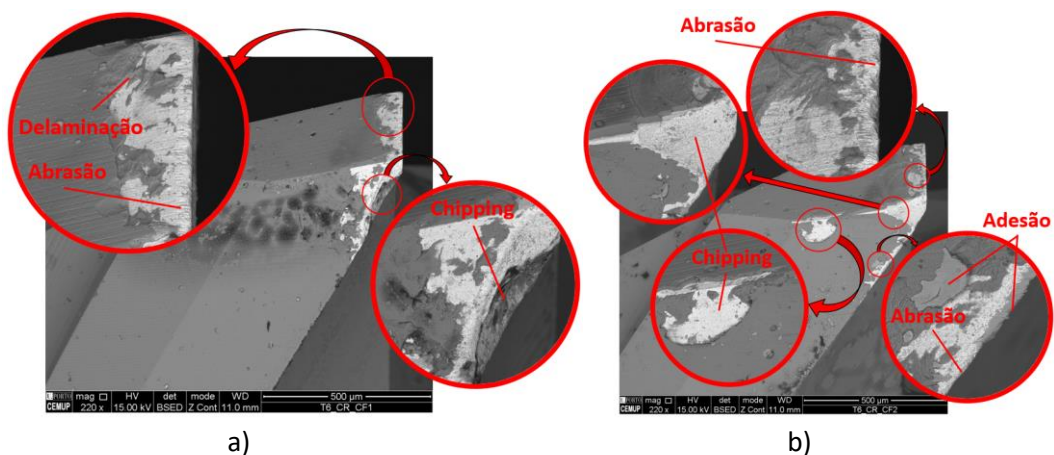


Figura 71 - Imagem SEM com ampliações 220x, 220x e 100x respectivamente da a) face de folga - dente 1; b) face de folga - dente 2; c) face de topo da ferramenta sem revestimento

### Com revestimento

A ferramenta T1L74S1500V126 foi uma das que apresenta pior comportamento a nível de desgaste. Para além de reunir quase todos os tipos de desgaste, tem uma grande quantidade de cada um. Na Figura 72, tanto na face de folga como na face de ataque, são visíveis os diferentes mecanismos de desgaste (desgastes abrasivo, adesivo, *chipping*, delaminação e fissuração).



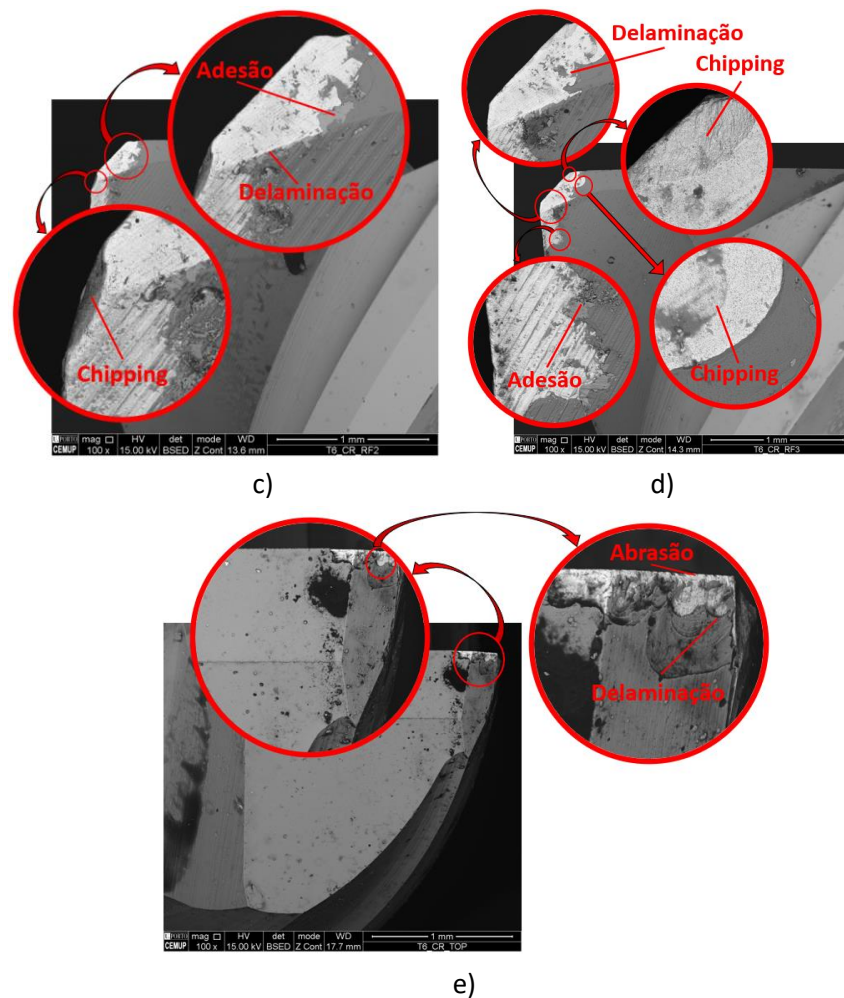


Figura 72 - Imagem SEM com ampliações 100x da a) face de folga - dente 1; b) face de folga - dente 2; c) face de ataque - dente 2; d) face de ataque - dente 3; e) face de topo da ferramenta com revestimento

Finalmente, no último par de ferramentas (Figura 73), encontra-se a ferramenta não revestida, que provavelmente sofreu menos desgaste aparente, perante as que teoricamente seriam as piores condições de maquinagem. Os mecanismos de desgaste presentes são abrasão, adesão e leves zonas de fissuração e *chipping*. Isto pode dever-se ao facto de, por ter efetuado um grande número de passagens e ter percorrido uma longa distância, a uma dada altura a ferramenta pode ter aumentado muito a área de contacto, estabilizando a geometria devido à baixa pressão de contacto. Já no caso da ferramenta revestida, apesar de não ser muita a discrepância, apresenta-se mais desgastada, havendo forte delaminação do revestimento por toda a aresta, e ainda abrasão do substrato.

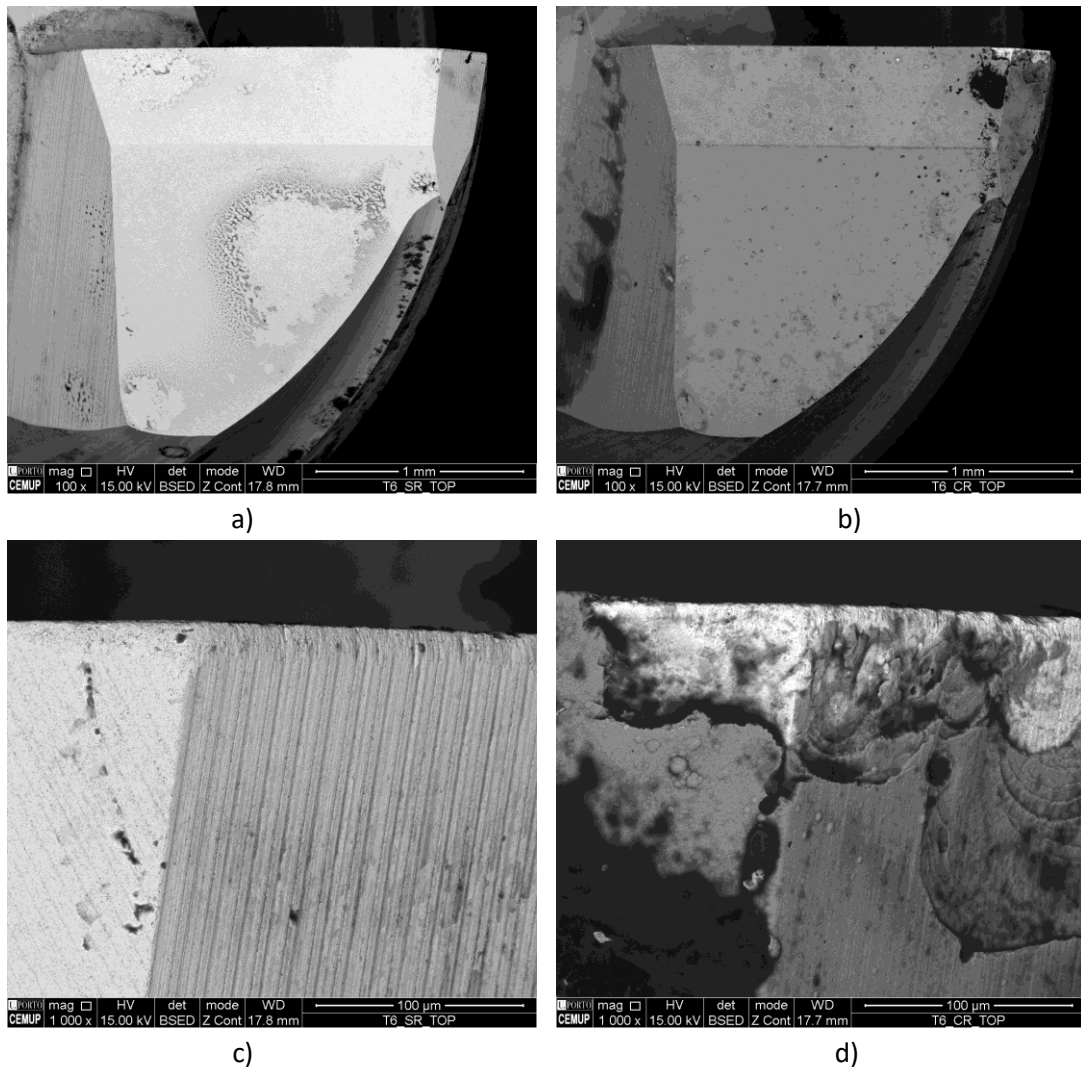


Figura 73 - Imagens SEM para 74 m de comprimento de corte e 1500 mm/min de velocidade de avanço e a) ampliação de 100x e sem revestimento; b) ampliação de 100x e com revestimento; c) ampliação de 1000x e sem revestimento; d) ampliação de 1000x e com revestimento

#### 4.3.3.2. Análise do desgaste de flanco

Na presente secção serão apresentados e analisados os valores médios do desgaste de flanco (VB) para todas as ferramentas, revestidas e não revestidas, medidas na face de folga (*Clearance Face – CF*) respetiva, cumprindo com o imposto pela norma ISO 8688-2:1986.

As medidas foram conseguidas com recurso ao *software ImageJ*. Como é possível observar na Figura 74, é traçada uma linha coincidente com a aresta da face de folga da fresa, e outra linha paralela a esta, onde é visível o término do desgaste, ou seja, a zona máxima desgastada. Posteriormente, depois de estabelecida a escala concordante com a escala implementada pelo sistema MEV, é feita a média das cinco medições efetuadas entre estas duas linhas, para descartar possíveis erros de medição e imprecisões, traçada perpendicularmente a estas (linha amarela).

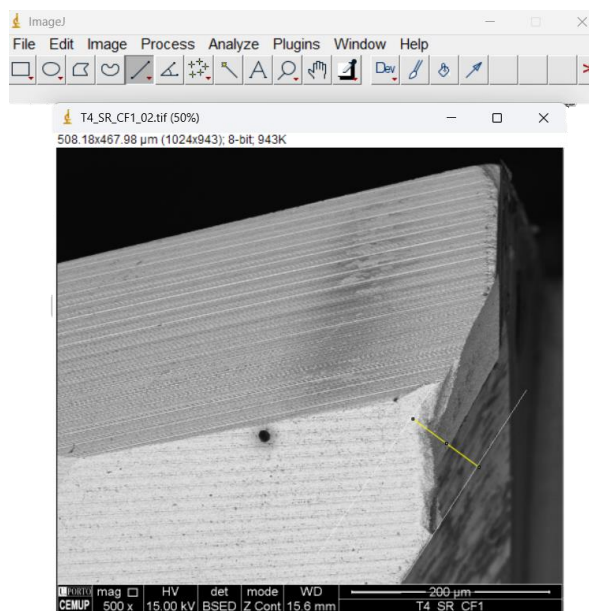


Figura 74 - Demonstração da medição de VB pelo ImageJ

Como já referido anteriormente, foi criada uma nomenclatura para que fosse mais fácil a identificação das faces. Sendo assim, CF corresponde à face de folga (*clearance face*), face esta onde será medido o desgaste de flanco (VB). RF corresponde à face de ataque (*rake face*) e, finalmente, TOP representa a face de topo (*top face*).

### Velocidade de avanço de 750 mm/min

Os valores de VB medidos, são apresentados na Tabela 21, correspondendo à média de cinco medições seguidas, e tendo associado o respetivo desvio padrão.

Tabela 21 - Média dos valores obtidos para o desgaste de flanco nas diferentes ferramentas, para uma velocidade de avanço de 750 mm/min

Referência	Revestimento	Desgaste de flanco [ $\mu\text{m}$ ]
T0L27S750V126	Não	$10,6740 \pm 0,985$
T0L54S750V126	Não	$14,2440 \pm 0,085$
T0L74S750V126	Não	$122,536 \pm 0,974$
T1L27S750V126	Sim	$68,6120 \pm 1,820$
T1L54S750V126	Sim	$98,8760 \pm 1,295$
T1L74S750V126	Sim	$132,812 \pm 1,685$

A Figura 75 mostra a evolução da dimensão VB para as fresas testadas com 750 mm/min de velocidade de avanço, em função do comprimento de corte para cada condição de ensaio. Como é notório pelas figuras, a ferramenta revestida apresentou um valor de desgaste (VB) muito superior à ferramenta não revestida, verificando-se uma elevada discrepância nos valores das duas primeiras ferramentas não revestidas (que correspondem à T0L27S750V126 e T0L54S750V126, primeira e terceira barras, respetivamente).

Assim, é possível concluir que para os comprimentos de corte de 26,8 m e 53,6 m, o valor de desgaste de flanco é muito reduzido, podendo justificar-se pelo facto de estarmos perante os

parâmetros de maquinagem menos exigentes (tanto a velocidade de avanço como o comprimento de corte).

No que diz respeito às ferramentas com revestimento, quando o comprimento de corte aumenta tanto de 26,8 m para 53,6 m, como de 53,6 m para 73,7 m, a mesma tendência que seria de esperar é observada, verificando-se então um aumento aproximadamente igual do desgaste de flanco entre comprimentos de corte.

Para condições de 750 mm/min de velocidade de avanço e 73,7m de comprimento de corte, para ambas as revestida e não revestida, o desgaste de flanco é máximo. No entanto, este desgaste é ligeiramente superior na ferramenta revestida.

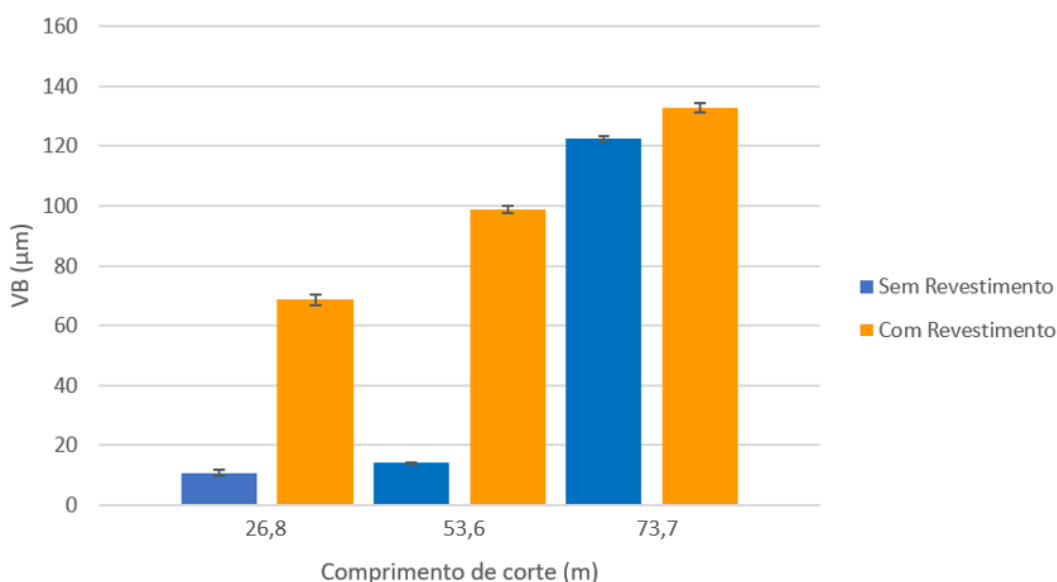


Figura 75 - Valores do desgaste de flanco (VB) para uma velocidade de avanço de 750 mm/min

Assim, conclui-se que das condições S750L27 para S750L54 não houve um aumento significativo do desgaste no caso das ferramentas sem revestimento, verificando-se, porém, um aumento abrupto para a condição S750L74. Este aumento pode justificar-se pelo facto de, após a fresa percorrer um grande comprimento de corte, vai ficando cada vez mais desgastada, até atingir um momento de falha total. Das três condições em análise, a fresa não revestida com o comprimento de corte de 73,7 m é a que tem um tempo de maquinagem superior, acabando por ter sido destacado um grande pedaço de substrato, daí a justificação do grande valor de VB.

Já no caso das ferramentas revestidas, houve um aumento ligeiramente maior da condição S750L27 para a condição S750L54, comparativamente às ferramentas sem revestimento.

### **Velocidade de avanço de 1500 mm/min**

Os valores de VB para a velocidade de avanço de 1500 mm/min são apresentados na Tabela 22, através da média de leituras e média e do correspondente desvio padrão.

Tabela 22 - Média dos valores obtidos para o desgaste de flanco nas diferentes ferramentas, para uma velocidade de avanço de 1500 mm/min

Referência	Revestimento	Desgaste de flanco [ $\mu\text{m}$ ]
TOL27S1500V126	Não	59,7920 $\pm$ 1,830
TOL54S1500V126	Não	103,784 $\pm$ 3,474
TOL74S1500V126	Não	141,958 $\pm$ 2,779
T1L27S1500V126	Sim	82,8020 $\pm$ 2,297
T1L54S1500V126	Sim	121,252 $\pm$ 0,965
T1L74S1500V126	Sim	145,814 $\pm$ 0,914

Tal como se observa na Figura 76, o aumento do comprimento de corte induz um aumento do desgaste de flanco, verificando-se sempre valores mais altos para as ferramentas com revestimento. Isto sugere, mais uma vez, o melhor rendimento das ferramentas de corte não revestidas.

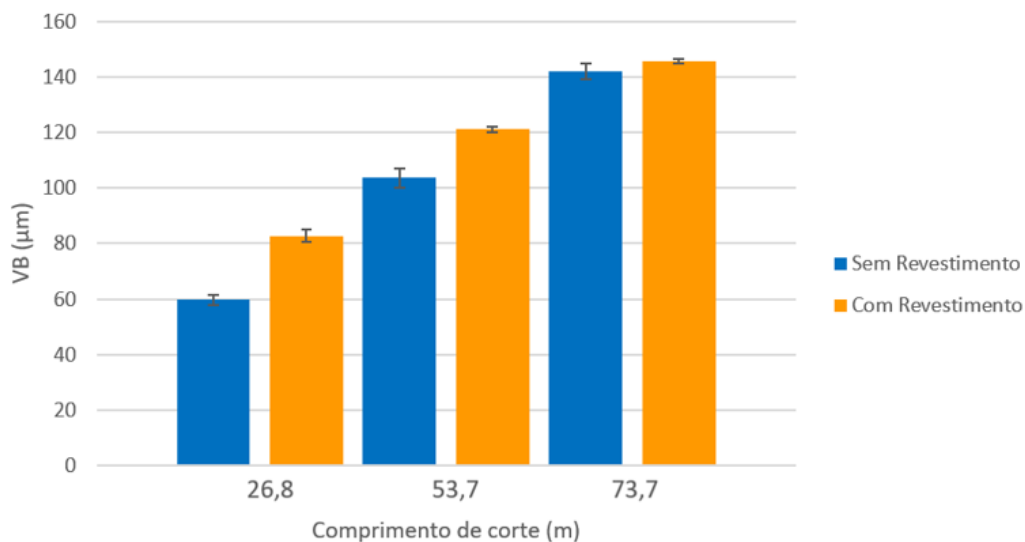


Figura 76 - Valores do desgaste de flanco (VB) para uma velocidade de avanço de 1500mm/min

Assim, é padronizada a tendência do aumento do desgaste de flanco à medida que o comprimento de corte também aumenta.

É observável que o *chipping* e a delaminação são os mecanismos de desgaste que apresentam maior destacamento de revestimento do substrato, por isso seria de esperar que as ferramentas com maior presença destes mecanismos de desgaste apresentassem valores de desgaste de flanco maiores. Como é possível observar pela secção 4.3.3.1., as ferramentas T1L54S750V126, T1L54S1500V126, TOL74S750V126, T1L74S750V126, TOL74S1500V126, T1L74S1500V126 foram as que verificaram maior área de revestimento destacado e/ou substrato danificado, e coincidindo com o previamente estabelecido (teórico), coincide então com os maiores valores de desgaste de flanco, como é possível confirmar pelas Figura 75 e Figura 76.

página propositadamente em branco

## 5. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Ao longo deste capítulo, vão ser descritas as conclusões de cada subcapítulo anterior, e assim apresentada a discussão de resultados. Este capítulo foi dividido em três subcapítulos principais: 5.1. Comparação do estado superficial da peça maquinada onde serão discutidos os valores de rugosidade obtidos em função da velocidade de avanço e do comprimento de corte, respetivamente; É possível observar que, como foi concluído ao longo da dissertação e da presente discussão, à medida que aumenta o comprimento de corte, aumenta o valor da rugosidade média aritmética, e que os valores registados para as ferramentas revestidas são superiores aos das ferramentas sem revestimento. É possível observar que, como foi concluído ao longo da dissertação e da presente discussão, à medida que aumenta o comprimento de corte, aumenta o valor da rugosidade média aritmética, e que os valores registados para as ferramentas revestidas são superiores aos das ferramentas sem revestimento.

5.2. Comparação com o desgaste apresentado, no qual serão abordados e discutidos os valores obtidos de desgaste de flanco e serão discutidos todos os mecanismos de desgaste que se verificaram para cada ferramenta; Por fim, na secção 5.3. Comparação com outros revestimentos usados, será descrita a influência e comportamento do revestimento usado. Todos estes resultados serão analisados com base em todas as condições de ensaio para os quais foram testados.

Assim, chegar-se-á à conclusão de quais foram as ferramentas que apresentaram menos desgaste, mais desgaste, que fatores influenciaram em cada um destes e, conseqüentemente, as que produziram melhor qualidade superficial da peça maquinada.

### 5.1. Comparação do estado superficial da peça maquinada

Na presente subsecção serão discutidos os resultados de rugosidade média aritmética em função da velocidade de avanço e do comprimento de corte, parâmetros estes que mais significativamente influenciam a qualidade final da superfície maquinada [115]. Para uma mais fácil descrição dos valores, o que virá seguido à letra “L” corresponderá ao comprimento de corte, “T” à presença de revestimento (1) ou ausência do mesmo (0) e “S” a velocidade de avanço.

#### 5.1.1. Velocidade de avanço

Como é possível verificar a partir das Figura 77 e Figura 78, para melhor observação dos resultados finais da rugosidade média aritmética, todos os valores foram apresentados num único gráfico, agrupados segundo a velocidade de avanço. É possível verificar ainda na respetiva legenda que estes estão ordenados mediante a presença de revestimento, ou não, e neste, ordenados por ordem crescente de comprimento de corte.

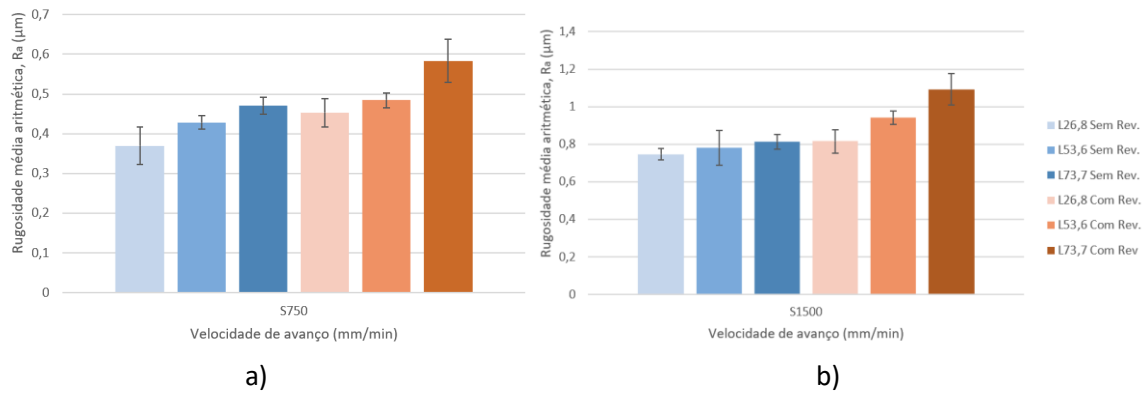


Figura 77 - Valores finais de rugosidade média aritmética na direção transversal para a velocidade de avanço de a) 750 mm/min; b) 1500 mm/min

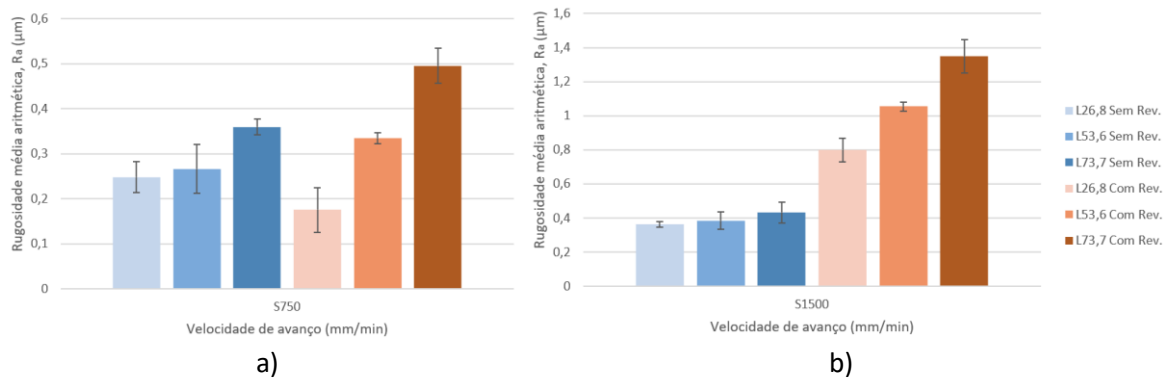


Figura 78 - Valores finais de rugosidade média aritmética na direção longitudinal para a velocidade de avanço de a) 750 mm/min; b) 1500 mm/min

É possível inferir que para cada um dos subgrupos de ferramentas revestidas (três barras finais de cada conjunto) e não revestidas (três barras iniciais de cada conjunto), a rugosidade aumentou à medida que aumentou a velocidade de avanço. Esta tendência verifica-se tanto na transversal como na longitudinal, para todas as condições. Assim, conclui-se que este parâmetro desempenha uma elevada influência na qualidade da superfície maquinada [32, 114, 115], observando que, a maiores valores de velocidade de avanço correspondem maiores valores de rugosidade superficial [118]. Este acontecimento pode ter sido influenciado pelo facto de se verificar um elevado desgaste abrasivo nas ferramentas não revestidas, e delaminação e *chipping* nas revestidas. Isto faz com que a geometria da fresa se altere, e por isso influencie a qualidade da superfície maquinada. Foi possível verificar também, pela subsecção 4.3.3.1., que as ferramentas não revestidas apresentaram muito menos desgaste do que as revestidas, sendo o mecanismo de desgaste predominante a abrasão. Pelo facto de as ferramentas revestidas terem sofrido mais alterações de geometria, devido ao destacamento de substrato e delaminação, é natural que assumam valores de rugosidade ligeiramente mais altos, para velocidades de avanço superiores. De facto, verificou-se que a adesão do revestimento não é a mais adequada, provavelmente devido aos parâmetros de deposição utilizados, o que comprometeu o seu funcionamento. Depois de haver delaminação, as partículas destacadas atuam como terceiros corpos, incrementando fortemente a adesão. Para além disso, existe ainda o facto de, ao destacar-se o revestimento, “fragilizar” o substrato nessa zona, através de micro modificações, as quais contribuem para uma mais rápida deterioração do substrato.

Verifica-se ainda que tanto para a rugosidade longitudinal como para a transversal, para uma velocidade de avanço de 1500 mm/min, foram atingidos valores de rugosidade muito superiores aos obtidos para uma velocidade de avanço de 750 mm/min [95].

De uma forma geral, pode dizer-se que a qualidade da superfície maquinada foi satisfatória, com resultados razoáveis no que diz respeito à rugosidade média aritmética.

Como é possível observar pelas Tabela 23, Tabela 24 e Tabela 25, estão sintetizados os valores das rugosidades médias aritméticas obtidas, em função do comprimento de corte.

*Tabela 23 - Tabela resumo dos valores das rugosidades médias aritméticas, na direção transversal, obtidas em função do comprimento de corte, para um comprimento de corte de 26,8 m*

Rugosidade média aritmética [ $\mu\text{m}$ ]		
Velocidade de avanço	750 mm/min	1500 mm/min
Não revestida	0,370	0,747
Revestida	0,453	0,816

*Tabela 24 - Tabela resumo dos valores das rugosidades médias aritméticas, na direção transversal, obtidas em função do comprimento de corte, para um comprimento de corte de 53,6 m*

Rugosidade média aritmética [ $\mu\text{m}$ ]		
Velocidade de avanço	750 mm/min	1500 mm/min
Não revestida	0,428	0,780
Revestida	0,484	0,949

*Tabela 25 - Tabela resumo dos valores das rugosidades médias aritméticas, na direção transversal, obtidas em função do comprimento de corte, para um comprimento de corte de 73,7 m*

Rugosidade média aritmética [ $\mu\text{m}$ ]		
Velocidade de avanço	750 mm/min	1500 mm/min
Não revestida	0,470	0,812
Revestida	0,584	1,092

É possível observar que, como foi concluído ao longo da dissertação e da presente conclusão, à medida que duplica o valor velocidade de avanço, aumenta o valor da rugosidade média aritmética quase para o dobro também, e que os valores registados para as ferramentas revestidas são superiores aos das ferramentas sem revestimento.

### 5.1.2. Comprimento de corte

Relativamente ao comprimento de corte, a tendência seguida na velocidade de avanço mantém-se também para este parâmetro, ainda que não sejam intervalos tão distantes.

É perceptível pelas Figura 79 e Figura 80 que à medida que o comprimento de corte aumenta, tanto na direção transversal como na direção longitudinal, a rugosidade média aritmética aumenta também [119]. No entanto, esta diferença não é tão significativa como verificado anteriormente na velocidade de avanço, podendo-se assim inferir que a velocidade de avanço é um fator mais preponderante e que afeta mais a qualidade da superfície maquinada, no caso deste procedimento experimental.

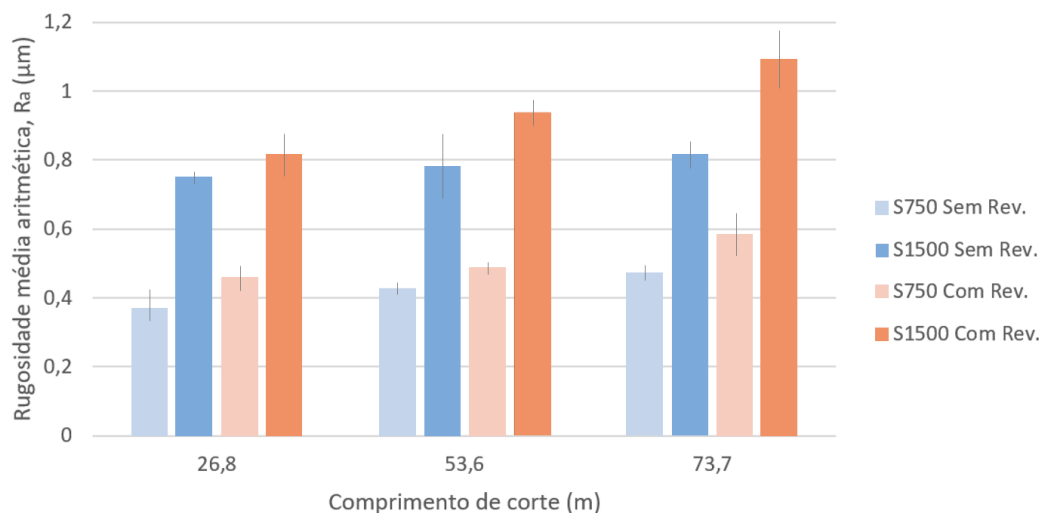


Figura 79 - Valores finais de rugosidade média aritmética na direção transversal em função do comprimento de corte

Para o mesmo comprimento de corte, no caso da direção longitudinal, para a condição S1500, é possível analisar que há uma discrepância muito maior entre diferentes ferramentas revestidas e não revestidas, do que propriamente entre comprimentos de corte. Assim, é possível concluir que no caso deste procedimento prático, a existência de revestimento é um fator que influencia muito mais a qualidade da superfície maquinada do que propriamente o comprimento de corte.

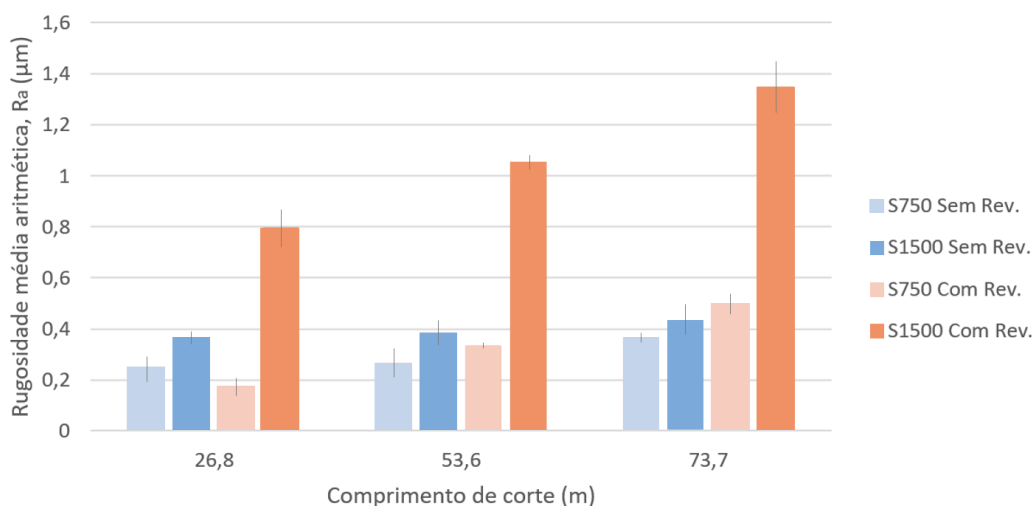


Figura 80 - Valores finais de rugosidade média aritmética na direção longitudinal em função do comprimento de corte

Segundo um estudo desenvolvido por *Mehfuz et. al* [120], foi analisada a rugosidade superficial de uma liga de CuBe maquinada, no qual foi concluído também que a rugosidade média aritmética aumentou com o aumento da velocidade de avanço. Este estudo mostrou-se em concordância com o estudo desenvolvido por Wang et al. [121], e com o procedimento em estudo, mostrando um padrão tendencial relativamente a este parâmetro.

Verifica-se ainda que, na generalidade, os valores na direção transversal são muito superiores à direção longitudinal. Isto justifica-se facilmente pelo facto de, aquando da medição transversal, o rugosímetro poder ter sido colocado entre concavidades ou saliências, estando perpendicular a estas irregularidades, e naturalmente medir uma maior rugosidade nesta direção (estrias).

Como é possível observar pelas Tabela 26 e Tabela 27, estão sintetizados os valores das rugosidades médias aritméticas obtidas, em função do comprimento de corte.

*Tabela 26 - Tabela resumo dos valores das rugosidades médias aritméticas, na direção transversal, obtidas em função do comprimento de corte, para a velocidade de avanço de 750 mm/min*

Rugosidade média aritmética [ $\mu\text{m}$ ]			
Comprimento de corte	26,8 m	53,6 m	73,7 m
Não revestida	0,370	0,428	0,470
Revestida	0,453	0,484	0,584

*Tabela 27 - Tabela resumo dos valores das rugosidades médias aritméticas, na direção transversal, obtidas em função do comprimento de corte, para a velocidade de avanço de 1500 mm/min*

Rugosidade média aritmética [ $\mu\text{m}$ ]			
Comprimento de corte	26,8 m	53,6 m	73,7 m
Não revestida	0,767	0,780	0,812
Revestida	0,816	0,940	1,092

É possível observar que, como foi concluído ao longo da dissertação e da presente discussão, à medida que aumenta o comprimento de corte, aumenta o valor da rugosidade média aritmética, e que os valores registados para as ferramentas revestidas são superiores aos das ferramentas sem revestimento.

## 5.2. Comparação com o desgaste apresentado

### 5.2.1. Mecanismos de desgaste

O principal mecanismo de desgaste observado na maioria das ferramentas de corte foi a abrasão.

Foi elaborada uma tabela (Tabela 28) para visualizar mais facilmente que mecanismos de desgaste se verificaram principalmente em cada uma das condições de teste utilizadas, estando legendados de 1 a 5, sendo 1 – Nulo; 2 – Raro; 3 – Pouco; 4 – Médio; 5 – Intenso, referindo sempre à quantidade do respetivo desgaste que apresenta. As primeiras seis linhas correspondem a ferramentas não revestidas, e as seis linhas finais correspondem às revestidas.

*Tabela 28 - Tabela resumo dos mecanismos de desgaste*

Referência	Abrasão	Adesão	Chipping	Microchipping	Delaminação	Fissuração
TOL27S750V126	5	4	3	4	1	1
TOL54S750V126	5	4	3	3	1	3
TOL74S750V126	5	3	3	1	1	1
TOL27S1500V126	4	3	3	1	1	1
TOL54S1500V126	5	2	4	3	1	1
TOL74S1500V126	5	2	3	1	1	3
T1L27S750V126	3	3	5	1	5	4
T1L54S750V126	3	3	4	1	5	1
T1L74S750V126	4	3	5	1	5	4
T1L27S1500V126	4	3	3	1	5	1
T1L54S1500V126	3	3	5	1	5	5
T1L74S1500V126	4	3	3	1	5	1

No caso das ferramentas não revestidas, e sendo estas as menos desgastadas, o principal mecanismo visível foi a abrasão do substrato, mecanismo esse já predominante entre as ferramentas de corte [30], enquanto nas revestidas foi sem dúvida a delaminação, seguida de *chipping*. É importante referir ainda que, apesar de não ter sido um dos mecanismos de desgaste predominantes nas ferramentas revestidas, a adesão nestas foi superior à verificada nas ferramentas sem revestimento. É lógico que, quanto maior for o desgaste das ferramentas, pior será a qualidade de superfície maquinada [122]. Por exemplo, as ferramentas revestidas sujeitas a velocidade de avanço de 1500 mm/min, foram as mais desgastadas.

Quase todas as ferramentas apresentam todos os mecanismos de desgaste existentes ao longo deste procedimento, ainda que em pequena quantidade. Relativamente à delaminação, as ferramentas não revestidas obviamente não apresentam este mecanismo de desgaste, visto que este consiste no destacamento de revestimento. Fissuração é o mecanismo de desgaste menos verificado, não estando presente nas ferramentas TOL27S750V126, TOL74S750V126, TOL27S1500V126, TOL54S1500V126, T1L54S750V126, T1L27S1500V126, T1L74S1500V126, ou seja, em mais de metade das condições utilizadas. No entanto, geralmente quando está presente, é fortemente representado, como no caso das ferramentas T1L54S1500V126 e T1L74S750V126. O *chipping* e a adesão estão presentes em todas as ferramentas, uma vez que a adesão é a possível responsável pelo destacamento do revestimento, já que a presença de material aderido tende a gerar desgaste severo, prejudicando o desempenho do processo de maquinagem, e diminuindo a sua qualidade superficial [121, 122]. Já a abrasão é o mecanismo de desgaste predominante. Estes mecanismos de desgaste já são comuns em operações de maquinagem como esta.

Nas Figura 81 e Figura 82 é possível visualizar uma figura com ampliação de 500 × de algumas ferramentas, e da sua face de folga, para que se consiga ter uma visão geral daquele que foi o desgaste em cada uma delas.

### Sem revestimento

Nas ferramentas não revestidas, como já foi referido anteriormente, verifica-se abrasão na face de folga das lâminas, em grande quantidade, em todas as ferramentas.

A ferramenta mais desgastada é, sem dúvida, a que foi sujeita à velocidade de avanço de 1500 mm/min e 26,8 m, Figura 81 (d), provavelmente devido à mudança de velocidade de avanço para o dobro. As ferramentas TOL27S750V126 e TOL54S750V126 apresentaram um desgaste muito mais leve, praticamente apenas abrasão na face de folga. Ou seja, para ensaios cujas condições de ensaio são um comprimento de corte de 26,8 m e velocidade de avanço de 750 mm/min, o desgaste é muito menor. Também para um comprimento de corte de 73,7 m e velocidade de avanço de 1500 mm/min, o desgaste não foi significativo. Isto pode prender-se com o facto de, após um determinado tempo de maquinagem, o desgaste tender a estabilizar devido a uma maior área de contacto, o que provocará uma tendência semelhante na superfície maquinada, daí admitir uma face de folga tão pouco desgastada.

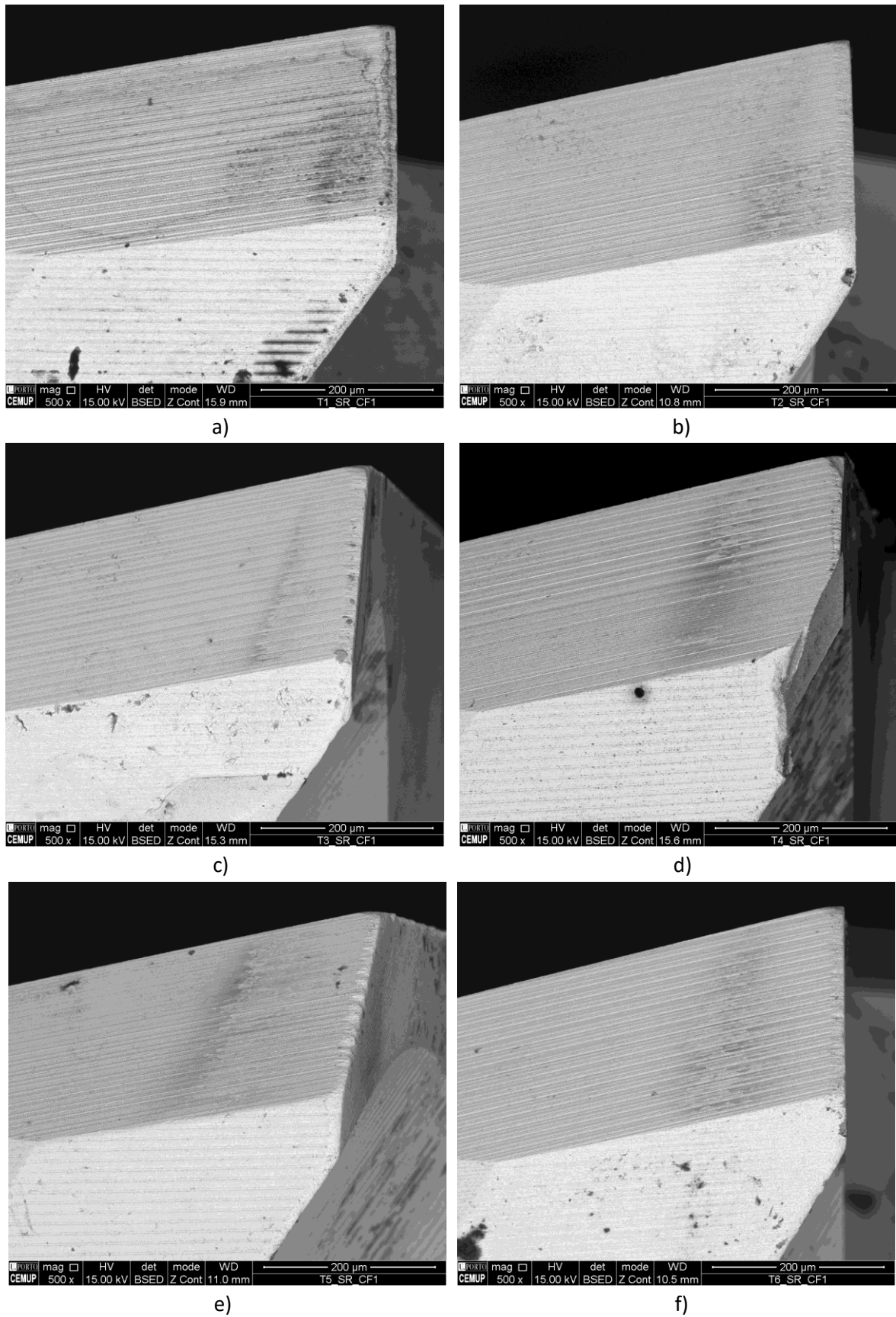
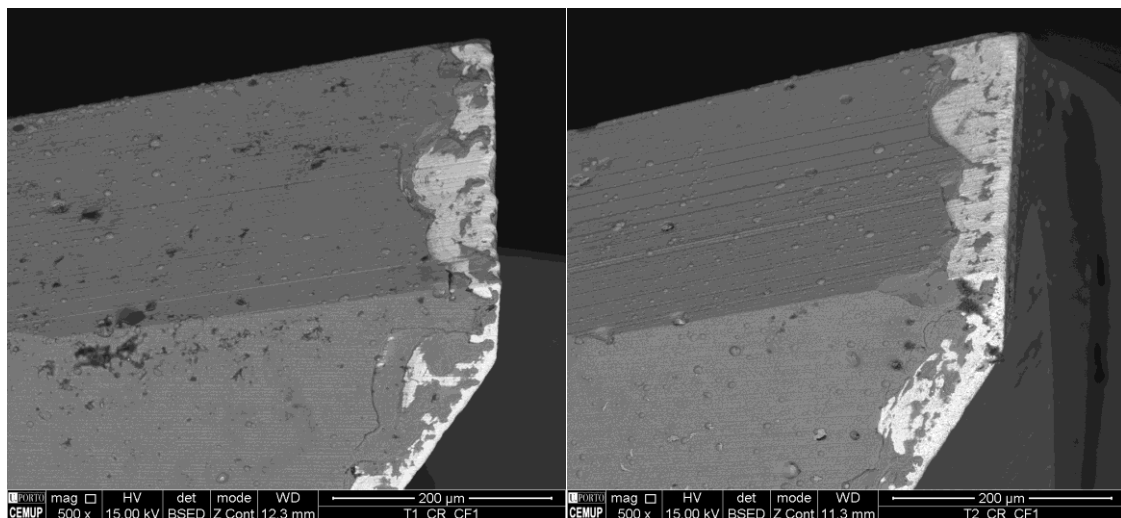


Figura 81 - Imagens SEM da face de folga, com ampliação 500x, das ferramentas a) TOL27S750V126; b) TOL54S750V126; c) TOL74S750V126; d) TOL27S1500V126; e) TOL54S1500V126; f) TOL74S1500V126

### Com revestimento

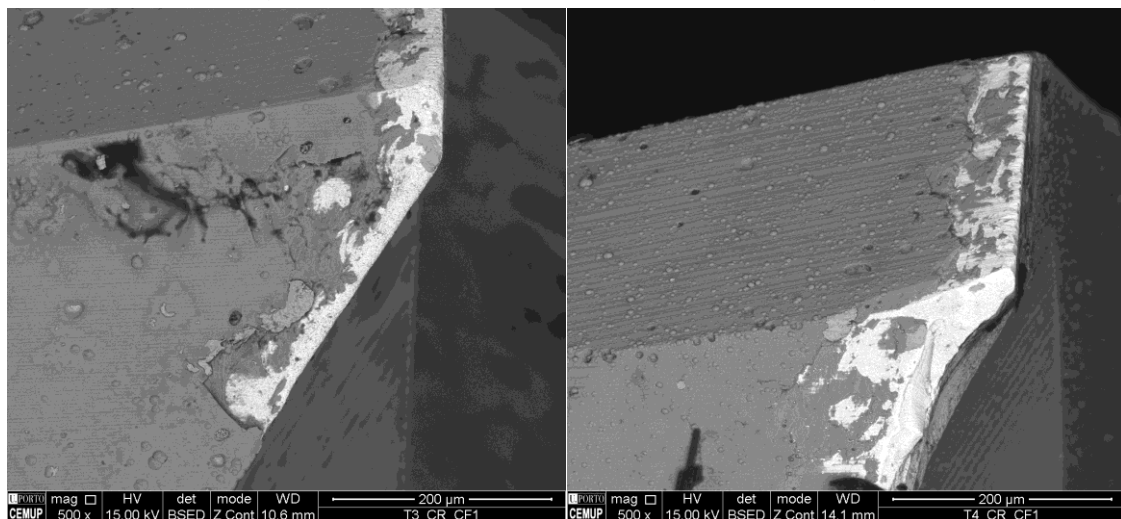
No que diz respeito às ferramentas revestidas, o principal mecanismo de desgaste é a delaminação. Como é possível reparar, as faces de saída não estão tão desgastadas a nível de abrasão como as não revestidas, uma vez que parte do tempo de maquinagem o processo predominante é a delaminação e, por isso, estas não têm tanto tempo de maquinagem para desgastar o substrato por abrasão.

A adesão de material à superfície provoca delaminação do revestimento. O facto do substrato se encontrar exposto, induz tendência para que o material maquinado que adere ao substrato seja maior, promovendo delaminação [43]. Isto significa que, tanto a adesão promove delaminação, como o contrário se verifica também. O mesmo se verifica com a abrasão. Possivelmente, antes de delaminar, o revestimento é sujeito a desgaste abrasivo que promove exatamente essa delaminação. De referir ainda que, o facto de ocorrer delaminação do revestimento e adesão de material maquinado, o substrato vai ficar exposto. Assim, é suscetível que ocorra mais abrasão do substrato pelo facto de estar exposto. Caso não houvesse delaminação e adesão, era mais difícil ocorrer abrasão na zona de fronteira de delaminação do revestimento/substrato [43].



a)

b)



c)

d)

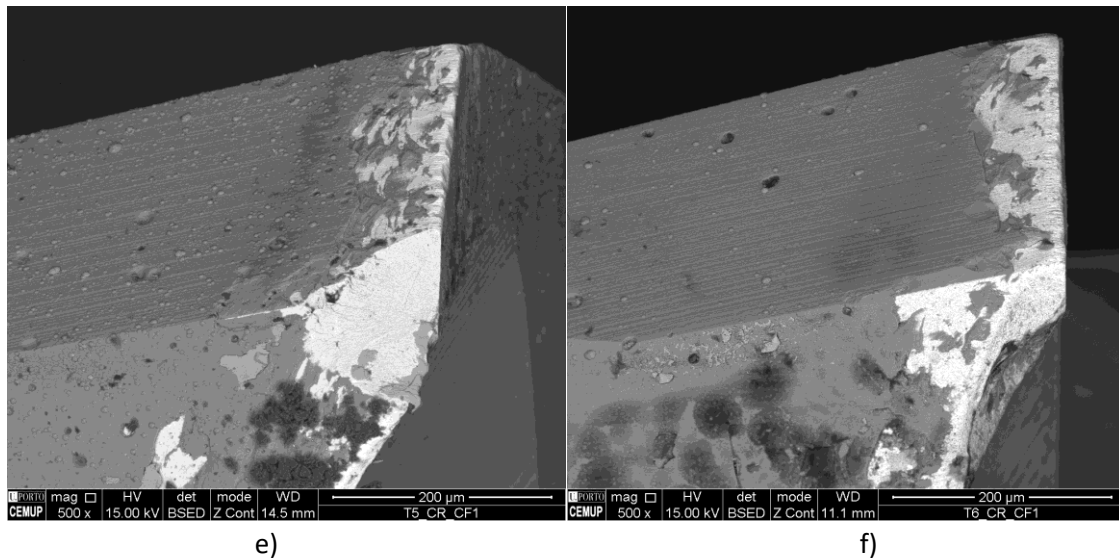


Figura 82 - Imagens SEM da face de folga, com ampliação 500x, das ferramentas a) T1L27S750V126; b) T1L54S750V126; c) T1L74S750V126; d) T1L27S1500V126; e) T1L54S1500V126; f) T1L74S1500V126

Comparando diversas ferramentas, quer revestidas, quer não revestidas, para o mesmo comprimento de corte, mas para velocidades diferentes (como por exemplo Figura 81 a) e d) ou por exemplo a Figura 82 a) e d)) é possível verificar que a velocidade de avanço tem influência no desgaste da ferramenta, proporcionando assim um maior desgaste quanto maior é essa velocidade. Já o comprimento de corte mostrou não ser um fator tão preponderante.

É possível reparar que a zona de *chipping* onde geralmente se verifica esse mesmo destacamento de revestimento e lascagem do substrato (Figura 81 d) e Figura 82 d), e) e f)) é muito comum. Isto deve-se ao facto da aresta da lâmina cortante ser uma zona mais exposta e mais frágil, suscetível a mais tensões residuais e com uma geometria não constante, por se dever a uma junção de várias arestas, e por isso, mais suscetível a quebrar. Já as ferramentas não revestidas apresentam performances muito superiores, verificando-se muito raramente ou nem existindo em algumas situações presença de *chipping*.

O destacamento de revestimento e quebra do substrato (delaminação e *chipping*) possivelmente prejudica o desempenho no processo de maquinagem, por induzir uma geometria menos uniforme que o normal. Esta mesma conclusão é possível inferir pelos valores da rugosidade média aritmética obtidos na secção 4.3.1., uma vez que se verificam os maiores valores (e, conseqüentemente, pior qualidade da superfície maquinada) para as ferramentas que apresentam *chipping* mais agressivo, confirmando então a suposição inicial. De referir ainda que nas ferramentas revestidas se verificou uma maior adesão de material do que nas ferramentas não revestidas, uma vez que o facto de surgirem fronteiras de delaminação e destacamento do substrato é favorável a que haja a adesão do material. É possível observar em determinadas imagens de microscopia eletrónica (Figura 83 por exemplo) partes de material aderido que parecem ser o início da formação de aresta postiça (BUE). Estes casos ocorreram principalmente para velocidades de avanço e comprimentos de corte igualmente baixos. Isto leva a especular que a formação de BUE é mais propícia para condições de maquinagem mais suaves, principalmente para velocidades de corte mais baixas.

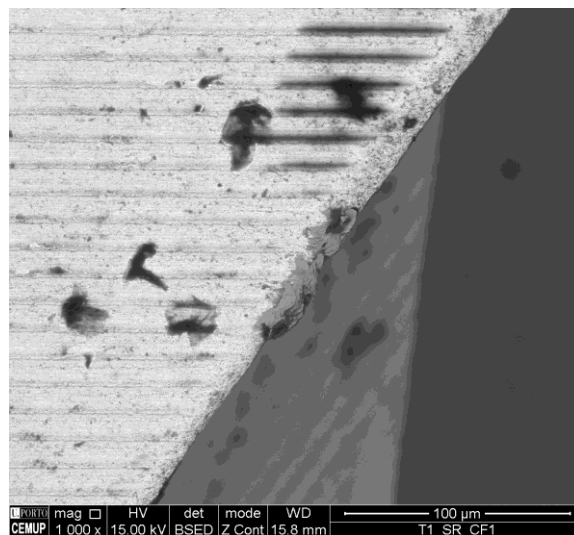


Figura 83 - Clearance face da ferramenta TOL27S750V126

Conclui-se então que as ferramentas não revestidas apresentam uma performance muito superior às revestidas. É possível visualizar nas imagens supra que existem crateras no revestimento da ferramenta, como é exemplo a ferramenta TOL27S1500V126. Estas são indicações de defeitos do revestimento, e que não foi perfeitamente realizado. Isto faz com que a probabilidade de desgastar mais seja muito maior, podendo nomeadamente destacar material da cratera, e consequentemente, pela existência dessa cavidade deixada, promover o destacamento de substrato. Todos estes fatores provavelmente prendem-se com o facto das ferramentas revestidas por HiPIMS não terem sido bem revestidas, e o processo não ter sido perfeitamente bem executado. Esta conclusão podia ter sido tirada por observação das imagens SEM visto que se nota claramente a existência de crateras no revestimento, no entanto, confirmemos com base científica. É sabido que esta técnica produz valores de tensão residual compressiva considerável. Este facto faz com que não seja tão provável a existência de falha coesiva [125], nomeadamente delaminação, destacamento do revestimento, fadiga, fissuras, ou seja, exatamente os mecanismos de desgaste verificados nas ferramentas revestidas, o que nos leva a concluir que como suspeitado inicialmente, a técnica foi efetivamente mal conseguida.

Note-se que todas estes acontecimentos podem ser vistos com mais pormenor no Apêndice A.

### 5.2.2. Desgaste de flanco

Na Figura 84 estão representados os valores do desgaste de flanco (VB) em função das condições de ensaio, sendo “T0” representativo da ferramenta não revestida e “T1” da revestida. Como já foi dito anteriormente, o número seguido ao “L” indica o comprimento de corte. Assim, o gráfico foi organizado por ferramentas não revestidas, seguida das ferramentas revestidas, por ordem crescente de comprimento de corte.

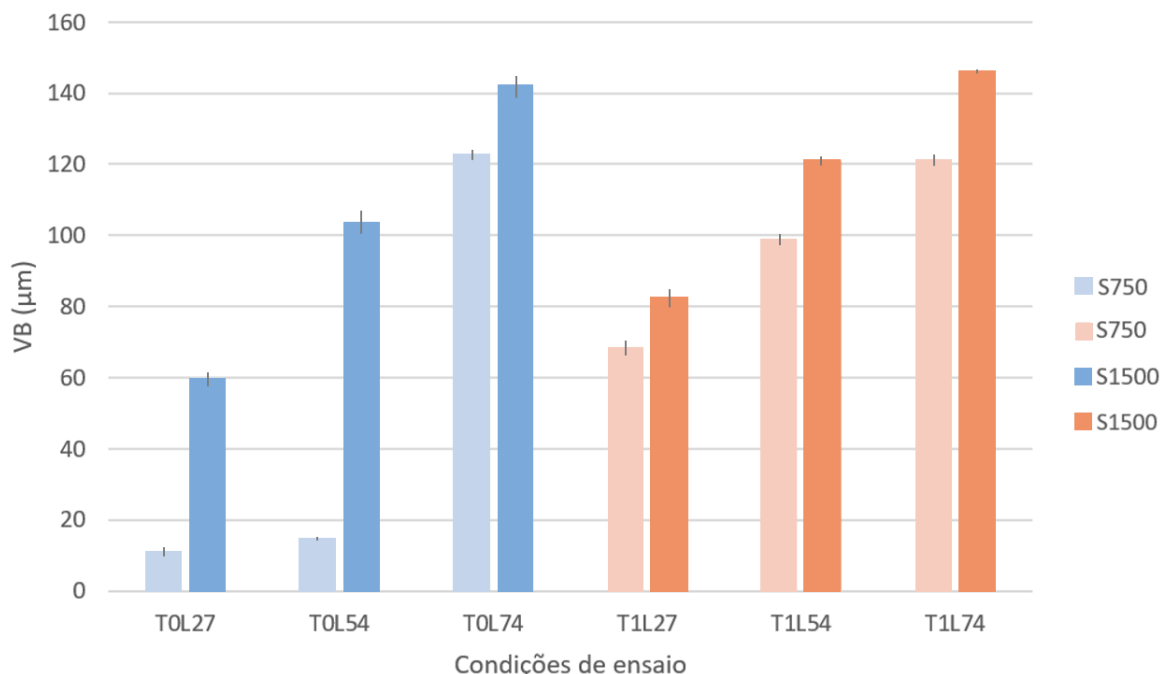


Figura 84 - Valores do desgaste de flanco (VB) em função das condições de ensaio

É claro pela Figura 84, que para a mesma velocidade de avanço, com o aumento do comprimento de corte, aumenta também o desgaste de flanco, de maneira aproximadamente proporcional nas ferramentas revestidas. Isto mostra a clara influência que o comprimento de corte tem no desgaste de flanco. Já no que diz respeito às não revestidas, nota-se um pequeno aumento de TOL27 para TOL54, sendo ambos os desgastes muito pouco significativos, predominantemente abrasão apenas. No entanto, o mesmo não se verifica de TOL54 para TOL74, verificando-se um aumento muito mais significativo. Assim, e como é normalmente concluído, quanto maior é o desgaste da ferramenta, menor é a qualidade da superfície gerada pela maquinagem [120, 124].

Já no que diz respeito à velocidade de avanço, tendencialmente quando esta aumenta, aumenta também o desgaste de flanco.

Claramente, as ferramentas mais afetadas relativamente ao desgaste de flanco foram as ferramentas sujeitas a uma maior velocidade de avanço e maior comprimento de corte, nomeadamente TOL74S1500V126 e T1L74S1500V126. Já as ferramentas TOL27S750V126 e TOL54S750V126 apresentaram um desgaste muito baixo, cerca de 6 a 7 vezes inferior, na ordem dos 11-14  $\mu\text{m}$ , quando comparadas com as revestidas. No entanto, é sabido também que a abrasão do flanco faz com que haja falha do revestimento, e posteriormente maior desgaste nesse mesmo revestimento [123].

É possível inferir ainda que na sua generalidade, o desempenho relativamente ao desgaste de flanco para ferramentas não revestidas foi ligeiramente superior ao apresentado pelas ferramentas revestidas, concluindo então que no caso deste procedimento, o revestimento aplicado ou o modo como foi conseguido, não constituiu uma vantagem no que se refere ao desgaste de flanco.

No entanto, as tendências são aproximadamente transversais. Tendo em conta uma amostra de ferramentas sem revestimento, o desgaste é tanto maior quanto maior for a velocidade de avanço e o comprimento de corte. O mesmo se verifica para as revestidas. Além disto, é possível inferir

também que para além dos parâmetros velocidade de avanço e comprimento de corte, o desgaste de flanco é maior para as revestidas, tendo em conta que se estão a analisar duas ferramentas sob as mesmas condições de maquinagem. Exemplo: Quando analisando a ferramenta de corte T0L27S750 em comparação com a T1S27S750, a ferramenta revestida (T1S27S750) é a que apresenta maior desgaste de flanco.

Finalmente, e como é possível ver pela Figura 85, há, ainda, a presença de aparas provenientes do processo de maquinagem na superfície da ferramenta. A velocidade de avanço é um parâmetro que influencia na formação de apara [127], no entanto, sabe-se que esta é uma das causas mais comuns do mau desempenho de um processo de maquinagem. A presença destas faz com que haja mais abrasão e assim, mais desgaste.

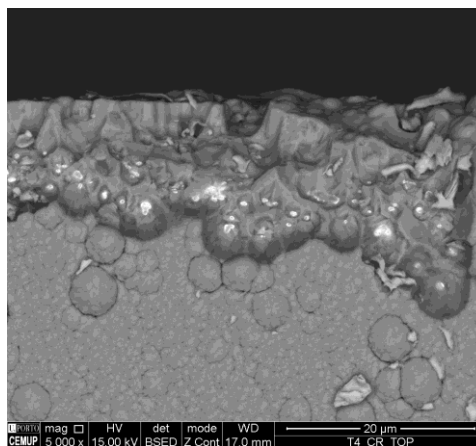


Figura 85 - Presença da aparas no seu revestimento na ferramenta T1L27S1500V126

### 5.3. Comparação com outros revestimentos usados

Como já foi referido anteriormente, o AMPCOLOY®83 é um material com um comportamento bastante dúctil, principalmente induzido pelo Cobre, que tem bastante tendência a que haja adesão de material.

Com base na análise de todos os resultados obtidos por este procedimento experimental, é possível concluir que o revestimento não desempenhou um papel positivo na qualidade da superfície maquinada. Os resultados das ferramentas revestidas foram bastante piores do que os apresentados pelas ferramentas sem revestimento, tanto a nível de valores de rugosidade média aritmética como de desgaste de flanco. Castanheira et al. [128] estudou também a maquinagem de uma liga de CuBe, mas com ferramentas revestidas com DLC, tendo chegado também à conclusão que o revestimento não foi um fator positivo para a qualidade da superfície maquinada. No entanto, o autor Mindivan [129] com o revestimento WC/C concluiu que a resistência mecânica e a resistência à corrosão são maiores nas ferramentas revestidas do que nas não revestidas. É possível efetuar um paralelismo do trabalho de Mindivan com o procedimento experimental em análise. No estudo referido, o revestimento dos moldes é semelhante ao substrato das ferramentas em análise no presente procedimento (WC/Co), ferramentas essas (não revestidas) que apresentaram melhor desempenho que as não revestidas. Assim, é fácil fazer uma ponte de conceitos, inferindo que WC/Co, dadas a sua mais elevada resistência mecânica e resistência à corrosão, é mais positivo do que o revestimento usado.

O revestimento em estudo é TiAlTaN, ou seja, a presença de TiN teoricamente melhoraria a resistência à fissuração dos revestimentos [123]. No entanto, o mesmo não se verificou, uma vez que nas ferramentas revestidas houve uma tendência à fissuração muito maior do que nas não revestidas. Isto pode dever-se possivelmente à presença de tântalo, visto que para revestimentos com a presença de alumínio, os resultados também costumam ser mais favoráveis [130]. No entanto, não é uma certeza que se tenha verificado ao longo do procedimento, e pode ser um trabalho futuro, que será explicado posteriormente no capítulo 6.

Para além disso, como já foi referido anteriormente, um dos fatores dos quais a qualidade da superfície maquinada depende, é o nível de tensões residuais compressivas às quais esta foi sujeita. Se o processo de deposição por HiPIMS for bem realizado, estas tensões são benéficas para a baixa rugosidade da superfície maquinada, promovendo uma ótima coesão do revestimento e uma aresta de corte mais tenaz [129, 130]. O que foi verificado ao longo deste procedimento foi exatamente o contrário: uma baixa coesão do revestimento, tendo este sofrido delaminação em grande quantidade, abrasão da aresta de corte e fissuração, que em muitos casos levou ao *chipping*. Quando esta técnica é bem conseguida, são alcançadas melhores propriedades mecânicas, que contribuem para o melhor desempenho por parte do revestimento [131, 132]. Assim, é possível concluir que o revestimento realizado por PVD HiPIMS não contribuiu para o bom desempenho da superfície maquinada.

página propositadamente em branco

## 6. CONCLUSÃO

Na presente dissertação foi realizado um estudo do desempenho de ferramentas não revestidas, comparativamente com ferramentas revestidas por TiAlTaN, com iguais geometrias, para a maquinação de um bloco de AMPCOLOY® 83 (liga de cobre-berílio).

O desenvolver deste projeto, tanto parte teórica como procedimento experimental, permitiram alcançar conclusões científicas sobre o mesmo (secção 6.1.). No entanto, este teve ainda contributos pessoais e profissionais que serão abordados na secção 6.2.

### 6.1. Conclusões científicas

Ao longo da elaboração desta dissertação, foi avaliada a influência da velocidade de corte e do comprimento de corte de ferramentas não revestidas e revestidas com TiAlTaN, na rugosidade das superfícies maquinadas e no desgaste das ferramentas. No decorrer dos trabalhos, foram tiradas algumas conclusões condizentes com o que está a ser reportado na literatura, no que diz respeito à influência destes parâmetros. As principais conclusões da tese podem ser resumidas aos seguintes pontos:

- Ferramentas não revestidas: Existe uma clara influência dos parâmetros velocidade de avanço e comprimento de corte nos valores de  $R_a$ . Relativamente aos valores de  $R_a$ , os valores mais baixos foram para as condições de ensaio de 750 mm/min e 26,8 m (ferramenta T0L27S750V126) e a mais alta para 1500 mm/min e 73,7 m (ferramenta T0L74S1500V126), tanto para a direção longitudinal como transversal. Isto significa que os melhores valores de rugosidade média aritmética foram conseguidos para os valores mais baixos de velocidade de avanço e comprimento de corte. Assim, é possível concluir que as superfícies maquinadas com pior qualidade foram obtidas para os maiores valores de velocidade de avanço e comprimento de corte. Já no que diz respeito ao desgaste de flanco, as ferramentas mais e menos desgastadas a nível de flanco (VB) foram verificadas para as mesmas condições de maquinação, para as quais se verificou a maior e menor rugosidade ( $R_a$ ), respetivamente. Os principais mecanismos de desgaste verificados foram a abrasão e adesão de material maquinado.
- Ferramentas revestidas: o resultado obtido para a rugosidade média aritmética verifica-se ser sempre superior aos constatados nas ferramentas sem revestimento. Isto deveu-se muito provavelmente aos defeitos do revestimento, isto é, à sua rápida degradação em serviço. As tendências a nível de desgaste de flanco e rugosidade média aritmética verificaram-se iguais às ferramentas não revestidas, ainda que com valores muito superiores, sendo os valores de rugosidade e desgaste mais baixos para os parâmetros mais baixos. Assim, a ferramenta com os melhores valores de rugosidades e desgaste de flanco foi ferramenta T1L27S750V126 (parâmetros mínimos) e a menos bem conseguida foi a ferramenta T1L27S1500V126 (parâmetros máximos). Os principais mecanismos de desgaste verificados foram a delaminação, o *chipping* e a abrasão.

- Os valores de rugosidade máxima são tanto maiores para velocidades de avanço superiores e comprimentos de corte superiores. Também nas ferramentas revestidas este valor é maior que nas sem revestimento.
- Quanto maior for a velocidade de avanço, maior será a rugosidade média aritmética e o desgaste de flanco.
- Quanto maior o comprimento de corte, maior a rugosidade média aritmética desgaste de flanco.
- Os valores de desgaste de flanco para uma velocidade de avanço de 750 mm/min e para comprimentos de corte de 26,8 m e 53,6 m, para as ferramentas não revestidas (ferramentas TOL27S750V126, TOL54S750V126), foram bastante satisfatórios. Enquanto nas outras condições se verificaram valores entre 60  $\mu\text{m}$  e 150  $\mu\text{m}$ , aproximadamente, estas ferramentas não atingiram os 15  $\mu\text{m}$  de VB, valores esses muito aceitáveis para desgaste de flanco.
- O revestimento não constituiu um papel benéfico para a qualidade da superfície maquinada, pois foram obtidos valores de  $R_a$  muito elevados, e existência de fissuras em várias ferramentas, mecanismo de desgaste esse que o revestimento deveria prevenir. A falha do revestimento está associada à má adesão do revestimento ao substrato e às condições de deposição usadas para produzir o revestimento, que não foram adequadamente otimizadas.
- A adesão do material mostrou acelerar a delaminação do revestimento. Por sua vez, ainda existe também delaminação provocada pela adesão de material maquinado ao substrato e à zona de fronteira de delaminação. Este comportamento foi verificado nas ferramentas revestidas que foram as que apresentaram delaminação, e origina um ciclo de desgaste na ferramenta, que muito possivelmente terá levado à falha da mesma.
- A técnica de deposição PVD por HiPIMS constituiu uma grande vantagem, mas apenas quando elaborada corretamente e sem defeitos.
- Nas ferramentas revestidas, a delaminação induz a promoção do desgaste abrasivo na aresta de corte e faces adjacentes, ainda que pouco significativo.

Da análise de todas as ferramentas, notou-se que as ferramentas sem revestimento apresentaram um melhor rendimento de corte que as amostras revestidas. De forma geral, as ferramentas sem revestimento apresentaram resultados relativamente satisfatórios, não apresentando valores de desgaste tão acentuados, quer a nível de VB como  $R_a$ .

## 6.2. Contributos pessoais e profissionais

A elaboração da presente dissertação e integração no projeto DRIVOLUTION resultou em:

- Elaboração de artigo de revisão sobre os processos convencionais e não convencionais de maquinagem, para o AMPCOLOY®, INVAR-36 e ligas termicamente tratadas: “*A review of injection-mold materials and their conventional and non-conventional machining processes*” ainda em fase de publicação (*Materials*) – submetido à espera de aprovação
- Elaboração de artigo de revisão para a FAIM’23 sobre processos híbridos de maquinagem: “*A brief review of injection-mould materials hybrid manufacturing processes*” – Publicado em “Lecture Notes – Mechanical Engineering”
- Participação no *Doctoral Congress in Engineering 23* (FEUP) para apresentação de dois artigos de revisão
- Participação na FAIM’23 como membro integrante da organização
- Participação na FAIM’23 como membro oradora para apresentação do artigo de revisão previamente elaborado
- Elaboração de um artigo científico com base nos resultados experimentais obtidos (submetido – em análise)

## 6.3. Limitações e trabalhos futuros

### 6.3.1. Limitações

No seguimento da primeira fase do projeto DRIVOLUTION, como limitações ao trabalho pode referir-se constrangimentos relacionados com instituições responsáveis pelas entregas de material, bem como limitações mais gerias, nomeadamente:

- Dependência de parceiros, como INEGI, consórcio do projeto DRIVOLUTION, TEandM e AMPCOLOY®
- Atraso da chegada do material da AMPCOLOY®, resultando numa chegada apenas dia 18 de maio
- Avaria de equipamento técnico da empresa TEandM, o que fez com que a data de chegada das mesmas fosse apenas a 29 de maio
- Devido aos constrangimentos suprarreferidos, só após a chegada de ambos os materiais foi possível marcar as sessões de maquinagem nos laboratórios do ISEP, que constituiu uma limitação também dada a avaria da máquina HAAS sem previsão de arranjo.
- Em consequência do ponto anterior mencionado, foi necessária a dependência de disponibilidade da máquina do ISEP, o que fez com que só fosse possível iniciar os ensaios (e toda a parte experimental) a 11 de julho
- Indisponibilidade de um dos parceiros do projeto em não divulgar o método exato de deposição por PVD

- Informação muito reduzida sobre todas as ligas de CuBe, constituindo assim uma limitação no que diz respeito tanto a enriquecimento de revisão bibliográfica sobre a liga, como comparação e discussão de resultados direta com procedimentos semelhantes, quer a nível de liga, quer a nível de processos de maquinagem
- Revestimento das fresas pelo processo de deposição PVD com defeitos, sendo que não foi bem conseguido e fez com que não fossem atingidos os resultados e a performance não fossem os esperados

### 6.3.2. Trabalhos futuros

Ao longo da elaboração do presente trabalho foram tiradas conclusões que mostraram que ainda há trabalho a ser na área da maquinagem da liga de AMPCOLOY. Assim, algumas das sugestões para trabalhos futuros baseiam-se em:

- Analisar o comportamento de desgaste para as mesmas ferramentas sem revestimento, para outras geometrias
- Analisar o comportamento das ferramentas revestidas com um revestimento com boa adesão ao substrato e sem defeitos
- Analisar o comportamento das ferramentas revestidas com o revestimento sem a presença do tântalo para ver quais as diferenças resultantes da sua ausência
- Realizar outros ensaios de maquinagem, nomeadamente torneamento, furação em operações de desbaste e acabamento, para perceber qual o comportamento do material e quais as conclusões tiradas, para também expandir a informação científica sobre a maquinagem de ligas como AMPCOLOY®
- Analise e medição de forças de corte durante a maquinagem
- Elaborar um modelo de previsão de desgaste de 3 pontos através da lei de Taylor para tornar mais fácil estabelecer tendências
- Realizar análise pelo método de Taguchi tendo como principal objetivo a otimização dos parâmetros de maquinagem
- Estudar o efeito do tipo da apra produzido no desgaste e tempo de vida das ferramentas

página propositadamente em branco

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] V. F. C. Sousa, F. J. G. Silva, R. Alexandre, J. S. Fecheira, G. Pinto, and A. Baptista, "Experimental study on the wear evolution of different PVD coated tools under milling operations of LDX2101 duplex stainless steel," *Adv Manuf*, 2022, doi: 10.1007/s40436-022-00401-5.
- [2] W. Qiu, D. Pan, J. Li, P. Guo, Y. Qiao, and X. Wang, "Chip formation mechanism in cryogenic machining of high temperature alloy-Inconel 718 and Ti-47.5Al-2.5V-1.0Cr," *J Manuf Process*, vol. 97, pp. 35–47, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.jmapro.2023.04.060.
- [3] S. Chatti, L. Laperrière, G. Reinhart, and T. Tolio, Eds., *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019. doi: 10.1007/978-3-662-53120-4.
- [4] B. Wang, Z. Liu, G. Su, Q. Song, and X. Ai, "Investigations of critical cutting speed and ductile-to-brittle transition mechanism for workpiece material in ultra-high speed machining," *Int J Mech Sci*, vol. 104, pp. 44–59, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2015.10.004.
- [5] A. G. Magalhães, "Generalidades sobre diversos processos de fabrico - Unidade Curricular de Seleção de Materiais e Processos de Fabrico," 2022.
- [6] B. Denkena, J. Brüning, D. Niederwestberg, and R. Grabowski, "Influence of Machining Parameters on Heat Generation during Milling of Aluminum Alloys," in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2016, pp. 39–42. doi: 10.1016/j.procir.2016.03.192.
- [7] H. Zhou, Y. Yang, C. Han, Y. Wei, Z. Liu, and Z. Tai, "Laser directed energy deposition/milling hybrid additive manufacturing of thin-walled GH4169 alloy: Effect of processing strategy on its microstructure and mechanical properties," *Materials Science and Engineering: A*, p. 145480, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.msea.2023.145480.
- [8] F. R. Nogueira, A. F. V. Pedroso, V. F. C. Sousa, N. P. V. Sebbe, R.C.M. Sales-Contini, and M. L. S. Barbosa, "A review of injection-mold materials and their conventional and non-conventional machining processes," *Materials - submetido (em análise)*, 2023.
- [9] W. Mersni, M. Boujelbene, S. Ben Salem, and H. P. Singh, "Machining time and quadratic mean roughness optimization in ball end milling of titanium alloy Ti-6Al-4V - Aeronautic field," in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2019, pp. 2619–2624. doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.553.
- [10] H. B. Kulkarni, M. M. Nadakatti, S. C. Kulkarni, and R. M. Kulkarni, "Investigations on effect of nanofluid based minimum quantity lubrication technique for surface milling of Al7075-T6 aerospace alloy," in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, Jan. 2020, pp. 251–256. doi: 10.1016/j.matpr.2019.10.127.
- [11] M. P. Groover, *Fundamentals of modern manufacturing materials, processes and systems*, 7th ed. New jersey - EUA: John Wiley & Sons, 2019.
- [12] F. G. Biondani and G. Bissacco, "Effect of cutting edge micro geometry on surface generation in ball end milling," *CIRP Annals*, vol. 68, no. 1, pp. 571–574, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.cirp.2019.04.017.
- [13] SANDVIK COROMANT, "Manual técnico de usinagem, torneamento, fresamento, furação, mandrilamento e sistemas de fixação - Fresamento, pp. D5-D186," São Paulo - Suécia: Sandvik Coromant, 2006.
- [14] O. Bologa, R. E. Breaz, S. G. Racz, and M. Crenganiş, "Decision-making Tool for Moving from 3-axes to 5-axes CNC Machine-tool," in *Procedia Computer Science*, Elsevier B.V., 2016, pp. 184–192. doi: 10.1016/j.procs.2016.07.056.

- [15] SANDVICK COROMANT, “Manual técnico de usinagem, torneamento, fresamento, furação, mandrilamento e sistemas de fixação - Tailor made, pp. I2 - I18,” Suécia, 2006.
- [16] Departamento de Engenharia Mecânica ISEP and ISEP, “Textos de apoio da Unidade Curricular de Processos de Fabrico 2,” 2020.
- [17] A. Completo, A. Festas, and J. P. Davim, *Tecnologia de Fabrico*. 2009.
- [18] K. Grote and E. K. Antonsson, *Handbook of Mechanical Engineering*. New York: Springer, 2009.
- [19] V. F. C. Sousa, F. J. G. Silva, J. S. Fecheira, H. M. Lopes, R. P. Martinho, and R. B. Casais, “Cutting forces assessment in cnc machining processes: A critical review,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 16, pp. 1–26, Aug. 2020, doi: 10.3390/s20164536.
- [20] “ISO, ‘ISO 3002-1:1982 “Basic quantities in cutting and grinding — Part 1: Geometry of the active part of cutting tools — General terms, reference systems, tool and working angles, chip breakers.”’ ISO.”
- [21] “ANSI, ‘ANSI/ASME B94.50-1975 “Basic Nomenclature and Definitions for Single-Point Cutting Tools.”’ ANSI Stand, 1975.”
- [22] H. McLinden and A. M. Mezey, *Basic Nomenclature and Definitions for Single-Point Cutting Tools*. 1976.
- [23] R. Grabowski, B. Denkena, and J. Köhler, “Prediction of process forces and stability of end mills with complex geometries,” in *Procedia CIRP*, Elsevier, 2014, pp. 119–124. doi: 10.1016/j.procir.2014.03.101.
- [24] SANDVICK COROMANT, *Manual técnico de usinagem, torneamento, fresamento, furação, mandrilamento e sistemas de fixação - Tailor made, pp. I2 - I18*. São Paulo – Brasil: Sandvik Coromant, 2009. [Online]. Available: [www.sandvik.coromant.com/br](http://www.sandvik.coromant.com/br)
- [25] W. B. Lee, C. F. Cheung, and S. To, “Friction-induced fluctuation of cutting forces in the diamond turning of aluminium single crystals,” *Proc Inst Mech Eng B J Eng Manuf*, vol. 217, no. 5, pp. 615–631, May 2003, doi: 10.1243/095440503322011344.
- [26] W. B. Lee, “Prediction of microcutting force variation in ultra-precision machining,” *Precis Eng*, vol. 12, no. 1, pp. 25–28, 1990, doi: [https://doi.org/10.1016/0141-6359\(90\)90005-J](https://doi.org/10.1016/0141-6359(90)90005-J).
- [27] E. Demir, “A Taylor-based plasticity model for orthogonal machining of single-crystal FCC materials including frictional effects,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 40, no. 9–10, pp. 847–856, Feb. 2009, doi: 10.1007/s00170-008-1409-5.
- [28] E. Demir, “Taylor-based model for micro-machining of single crystal fcc materials including frictional effects-Application to micro-milling process,” *Int J Mach Tools Manuf*, vol. 48, no. 14, pp. 1592–1598, Nov. 2008, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2008.07.002.
- [29] X. Zhang, Z. Peng, L. Liu, and X. Zhang, “A Tool Life Prediction Model Based on Taylor’s Equation for High-Speed Ultrasonic Vibration Cutting Ti and Ni Alloys,” *Coatings*, vol. 12, no. 10, Oct. 2022, doi: 10.3390/coatings12101553.
- [30] Wit Grzesik, “Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling and applications,” Elsevier Science, 2008. doi: 10.1016/B978-0-444-63711-6.00012-0.
- [31] S. Wojciechowski, R. W. Maruda, S. Barrans, P. Nieslony, and G. M. Krolczyk, “Optimisation of machining parameters during ball end milling of hardened steel with various surface inclinations,” *Measurement (Lond)*, vol. 111, pp. 18–28, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.measurement.2017.07.020.

- [32] R. P. Martinho, F. J. G. Silva, and A. P. M. Baptista, "Cutting forces and wear analysis of Si3N4 diamond coated tools in high speed machining," *Vacuum*, vol. 82, no. 12, pp. 1415–1420, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2008.03.065>.
- [33] J. Y. Zuo, Y. X. Lin, J. C. Zheng, P. Zhong, and M. He, "An investigation of thermal-mechanical interaction effect on PVD coated tool wear for milling Be/Cu alloy," *Vacuum*, vol. 167, pp. 271–279, Sep. 2019, doi: [10.1016/j.vacuum.2019.06.017](https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.06.017).
- [34] S. Dehen, E. Segebade, M. Gerstenmeyer, F. Zanger, and V. Schulze, "Milling parameter and tool wear dependent surface quality in micro-milling of brass," in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2020, pp. 95–100. doi: [10.1016/j.procir.2020.02.024](https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.024).
- [35] S. Mehta, G. Singh, A. Saini, and H. Singh, "Finite element analysis of face milling of Ti-6Al-4 V alloy considering cutting forces and cutting temperatures," in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2021, pp. 2315–2320. doi: [10.1016/j.matpr.2021.10.061](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.061).
- [36] SEL, "Technical Handbook." [Online]. Available: [www.setpipes.com](http://www.setpipes.com).
- [37] B. Bergmann, B. Denkena, and F. Schaper, "Thermomechanical tool loading and chip formation in oxygen-free titanium cutting," *CIRP J Manuf Sci Technol*, vol. 45, pp. 253–259, Oct. 2023, doi: [10.1016/j.cirpj.2023.06.016](https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2023.06.016).
- [38] J.P. Davim, *Princípios da Maquinagem*. Publindustria, 2008.
- [39] Y. Wang, B. Zou, J. Wang, Y. Wu, and C. Huang, "Effect of the progressive tool wear on surface topography and chip formation in micro-milling of Ti-6Al-4V using Ti(C7N3)-based cermet micro-mill," *Tribol Int*, vol. 141, Jan. 2020, doi: [10.1016/j.triboint.2019.105900](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.105900).
- [40] C. H. Jacobs, M. H. Pope, J. T. Berry, and F. Hoaglund, "A study of the bone machining process—Orthogonal cutting," *J Biomech*, vol. 7, no. 2, pp. 131–136, 1974, doi: [https://doi.org/10.1016/0021-9290\(74\)90051-7](https://doi.org/10.1016/0021-9290(74)90051-7).
- [41] V. F. C. Sousa, F. J. G. Da Silva, G. F. Pinto, A. Baptista, and R. Alexandre, "Characteristics and wear mechanisms of tialn-based coatings for machining applications: A comprehensive review," *Metals*, vol. 11, no. 2. MDPI AG, pp. 1–49, 2021. doi: [10.3390/met11020260](https://doi.org/10.3390/met11020260).
- [42] M. Kumar Gupta, V. Panwar, and R. Prasad Mahapatra, "Effect of temperature and strain rate on mechanical properties and potential energy of nanocrystalline tantalum," *Mater Today Proc*, 2022, doi: [10.1016/j.matpr.2022.10.158](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.10.158).
- [43] V. F. C. Sousa, F. J. G. Silva, R. Alexandre, J. S. Fecheira, and F. P. N. Silva, "Study of the wear behaviour of TiAlSiN and TiAlN PVD coated tools on milling operations of pre-hardened tool steel," *Wear*, vol. 476, Jul. 2021, doi: [10.1016/j.wear.2021.203695](https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203695).
- [44] V. F. C. Sousa, F. J. G. Silva, H. Lopes, R. C. B. Casais, A. Baptista, and G. Pinto, "Wear behavior and machining performance of tialsin-coated tools obtained by dc ms and hipims: A comparative study," *Materials*, vol. 14, no. 18, Sep. 2021, doi: [10.3390/ma14185122](https://doi.org/10.3390/ma14185122).
- [45] A. Baptista, F. Silva, J. Porteiro, J. Míguez, and G. Pinto, "Sputtering physical vapour deposition (PVD) coatings: A critical review on process improvement and market trend demands," *Coatings*, vol. 8, no. 11. MDPI AG, 2018. doi: [10.3390/COATINGS8110402](https://doi.org/10.3390/COATINGS8110402).
- [46] G. T. Smith, *Cutting Tool Technology - Industrial Handbook*. London: Springer, 2008.
- [47] A. Moarrefzadeh, "Simulation and Modeling Of Physical Vapor Deposition (PVD) Process," vol. 2, 2012.
- [48] R. Pedro Cardoso da Silva Martinho, P. António Paulo Monteiro Baptista, and D. Francisco José Gomes da Silva, "Revestimentos PVD mono e multicamada para moldes utilizados na injeção de plásticos reforçados."
- [49] A. Baptista, F. J. G. Silva, J. Porteiro, J. L. Míguez, G. Pinto, and L. Fernandes, "On the Physical Vapour Deposition (PVD): Evolution of Magnetron Sputtering Processes for

- Industrial Applications,” in *Procedia Manufacturing*, Elsevier B.V., 2018, pp. 746–757. doi: 10.1016/j.promfg.2018.10.125.
- [50] SANDVIK COROMANT, “Manual técnico de usinagem, torneamento, fresamento, furação, mandrilamento e sistemas de fixação - Materiais, pp. H2 - H37,” Suécia: Sandvik Coromant, 2006.
- [51] A. Baptista, F. J. G. Silva, J. Porteiro, J. L. Míguez, G. Pinto, and L. Fernandes, “On the Physical Vapour Deposition (PVD): Evolution of Magnetron Sputtering Processes for Industrial Applications,” in *Procedia Manufacturing*, Elsevier B.V., 2018, pp. 746–757. doi: 10.1016/j.promfg.2018.10.125.
- [52] George Chryssolouris and F. F. Ling, *Manufacturing Systems*, 2th ed. Springer, 2005.
- [53] Holmberg K. and Matthews A., *COATINGS TRIBOLOGY: Properties, Techniques and Applications in Surface Engineering*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 1998.
- [54] B. Subramonian, “Ion Plating,” in *Encyclopedia of Tribology*, Q. J. Wang and Y.-W. Chung, Eds., Boston, MA: Springer US, 2013, p. 1859. doi: 10.1007/978-0-387-92897-5\_725.
- [55] M. Fitzsimmons and V. K. Sarin, “Development of CVD WCCo coatings,” 2001.
- [56] B. Podgornik, B. Zajec, N. Bay, and J. Vižintin, “Application of hard coatings for blanking and piercing tools,” *Wear*, vol. 270, no. 11–12, pp. 850–856, May 2011, doi: 10.1016/j.wear.2011.02.013.
- [57] L. Fernandes, F. J. G. Silva, M. F. Andrade, R. Alexandre, A. P. M. Baptista, and C. Rodrigues, “Increasing the stamping tools lifespan by using Mo and B4C PVD coatings,” *Surf Coat Technol*, vol. 325, pp. 107–119, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.surfcoat.2017.06.043.
- [58] H. Holleck and V. Schier, “Multilayer PVD coatings for wear protection SURIICE &G//III’iIS IFGHNOJDGY,” 1995.
- [59] M. Ali and E. Hamzah, “High Temperature Oxidation View project We work on ferrites View project.” [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/277789950>
- [60] E. Contreras Romero, A. Hurtado Macías, J. Méndez Nonell, O. Solís Canto, and M. Gómez Botero, “Mechanical and tribological properties of nanostructured TiAlN/TaN coatings deposited by DC magnetron sputtering,” *Surf Coat Technol*, vol. 378, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.surfcoat.2019.124941.
- [61] F. J. G. Silva *et al.*, “Microwave plasma chemical vapour deposition diamond nucleation on ferrous substrates with Ti and Cr interlayers,” *Diam Relat Mater*, vol. 11, pp. 1617–1622, 2002.
- [62] F. J. G. Silva, A. J. S. Fernandes, F. M. Costa, A. P. M. Baptista, and E. Pereira, “A new interlayer approach for CVD diamond coating of steel substrates,” *Diam Relat Mater*, vol. 13, no. 4–8, pp. 828–833, Apr. 2004, doi: 10.1016/j.diamond.2003.10.081.
- [63] M. Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing Materials Processes and Systems 4th Edition*. New Jersey - EUA: John Wiley & Sons, 2001.
- [64] E. Oberg and C. J. McCauley, *Machinery’s handbook : a reference book for the mechanical engineer, designer, manufacturing engineer, draftsman, toolmaker, and machinist*.
- [65] F. Klocke, *Manufacturing Processes 1*. Springer, 2011.
- [66] M. Ohring, *The Materials Science of Thin Films*. New Jersey - EUA: Academic Press, 2002.
- [67] J. L. Endrino, G. S. Fox-Rabinovich, and C. Gey, “Hard AlTiN, AlCrN PVD coatings for machining of austenitic stainless steel,” *Surf Coat Technol*, vol. 200, no. 24, pp. 6840–6845, Aug. 2006, doi: 10.1016/j.surfcoat.2005.10.030.

- [68] C. Geng, Z. Ma, P. Zhao, M. Zeng, and X. Zhang, "Effect of adding an upper-substrate holder in the quartz-tube MPCVD on plasma parameters," *Vacuum*, vol. 197, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.vacuum.2021.110846.
- [69] B. Wang, J. Weng, Z. T. Wang, J. H. Wang, F. Liu, and L. W. Xiong, "Investigation on the influence of the gas flow mode around substrate on the deposition of diamond films in an overmoded MPCVD reactor chamber," *Vacuum*, vol. 182, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.vacuum.2020.109659.
- [70] A. K. Mallik, K. S. Pal, N. Dandapat, B. K. Guha, S. Datta, and D. Basu, "Influence of the microwave plasma CVD reactor parameters on substrate thermal management for growing large area diamond coatings inside a 915MHz and moderately low power unit," *Diam Relat Mater*, vol. 30, pp. 53–61, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2012.10.001>.
- [71] F. Silva, X. Bonnin, J. Scharpf, and A. Pasquarelli, "Microwave analysis of PACVD diamond deposition reactor based on electromagnetic modelling," *Diam Relat Mater*, vol. 19, no. 5, pp. 397–403, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2009.10.032>.
- [72] C. W. Song, R. Jin, N.-M. Hwang, and K. H. Kim, "Deposition Behavior of Boron-Doped Diamond with Varying Amount of Acetone by Hot Filament Chemical Vapor Deposition," *Electronic Materials Letters*, vol. 15, no. 5, pp. 630–638, 2019, doi: 10.1007/s13391-019-00152-9.
- [73] D. Das and M. S. Ramachandra Rao, "Effects of air annealing on microstructure and optical properties of HFCVD grown microcrystalline diamond thin films," *Mater Today Proc*, vol. 35, pp. 352–355, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.094>.
- [74] T. B. Huang, W. Z. Tang, F. X. Lu, J. Gracio, and N. Ali, "Argon-to-hydrogen ratio in plasma jet diamond chemical vapour deposition," *Surf Coat Technol*, vol. 190, no. 1, pp. 48–53, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.04.072>.
- [75] Q. Zhu *et al.*, "Ablation properties and mechanisms of BN-coated Cf-reinforced SiBCNzr ceramic composites under an oxyacetylene combustion torch," *Ceram Int*, vol. 47, no. 11, pp. 15533–15541, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.02.121>.
- [76] A. Ginting and M. Nouari, "Surface integrity of dry machined titanium alloys," *Int J Mach Tools Manuf*, vol. 49, no. 3–4, pp. 325–332, Mar. 2009, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2008.10.011.
- [77] M. Nouari and A. Ginting, "Wear characteristics and performance of multi-layer CVD-coated alloyed carbide tool in dry end milling of titanium alloy," *Surf Coat Technol*, vol. 200, no. 18–19, pp. 5663–5676, May 2006, doi: 10.1016/j.surfcoat.2005.07.063.
- [78] A. Jawaid, S. Sharif, and S. Koksai, "Evaluation of wear mechanisms of coated carbide tools when face milling titanium alloy."
- [79] A. M. Jetpurwala and M. Dikshit, "Chemical vapor deposition diamond dental burs for high speed air turbine handpieces," *Surf Coat Technol*, vol. 418, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.surfcoat.2021.127244.
- [80] F. J. G. Silva, A. J. S. Fernandes, F. M. Costa, V. Teixeira, A. P. M. Baptista, and E. Pereira, "Tribological behaviour of CVD diamond films on steel substrates," *Wear*, vol. 255, no. 7–12, pp. 846–853, 2003, doi: 10.1016/S0043-1648(03)00145-5.
- [81] V. F. C. Sousa and F. J. G. Silva, "Recent advances in turning processes using coated tools—A comprehensive review," *Metals*, vol. 10, no. 2. MDPI AG, Feb. 01, 2020. doi: 10.3390/met10020170.
- [82] Q. An, J. Chen, Z. Tao, W. Ming, and M. Chen, "Experimental investigation on tool wear characteristics of PVD and CVD coatings during face milling of Ti[ $\text{AlTaN}$ ]," *J. Manuf. Processes*, vol. 62, pp. 1–12, 2022, doi: 10.1016/j.jmapro.2022.100712.

- and Ti-555 titanium alloys,” *Int J Refract Metals Hard Mater*, vol. 86, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.ijrmhm.2019.105091.
- [83] J. Yi *et al.*, “Effects of Ni content on microstructure, mechanical properties and Inconel 718 cutting performance of AlTiN-Ni nanocomposite coatings,” *Ceram Int*, vol. 45, no. 1, pp. 474–480, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.ceramint.2018.09.192.
- [84] T. Kivak, G. Samtaş, and A. Çiçek, “Taguchi method based optimisation of drilling parameters in drilling of AISI 316 steel with PVD monolayer and multilayer coated HSS drills,” *Measurement*, vol. 45, no. 6, pp. 1547–1557, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.02.022>.
- [85] X. Tan *et al.*, “Double layer HVOF-sprayed WC-CoCr coatings for optimal properties,” *Ceram Int*, vol. 48, no. 22, pp. 33992–33998, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.ceramint.2022.07.349.
- [86] Z. Ding, Q. Yuan, H. Wang, Y. Tang, Y. Tan, and Q. He, “Microstructure and properties of Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/Mg gradient coating on AZ31 magnesium alloy by magnetron sputtering,” *Ceram Int*, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.ceramint.2022.08.324.
- [87] F. J. G. Silva, R. C. B. Casais, A. P. M. Baptista, M. J. Marques, V. M. C. Sousa, and R. Alexandre, “Comparative Study of the Wear Behavior of B<sub>4</sub>C Monolayered and CrN/CrCN/DLC Multilayered Physical Vapor Deposition Coatings Under High Contact Loads: An Experimental Analysis,” *J Tribol*, vol. 144, no. 3, Jun. 2021, doi: 10.1115/1.4051226.
- [88] A. Biksa *et al.*, “Wear behavior of adaptive nano-multilayered AlTiN/MexN PVD coatings during machining of aerospace alloys,” *Tribol Int*, vol. 43, no. 8, pp. 1491–1499, Aug. 2010, doi: 10.1016/j.triboint.2010.02.008.
- [89] A. V Pshyk *et al.*, “Microstructure, phase composition and mechanical properties of novel nanocomposite (TiAlSiY)N and nano-scale (TiAlSiY)N/MoN multifunctional heterostructures,” *Surf Coat Technol*, vol. 350, pp. 376–390, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.07.010>.
- [90] W. Tillmann *et al.*, “Residual stresses and tribomechanical behaviour of TiAlN and TiAlCN monolayer and multilayer coatings by DCMS and HiPIMS,” *Surf Coat Technol*, vol. 406, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.surfcoat.2020.126664.
- [91] G. Stachowiak W., *WEAR MATERIALS, MECHANISMS AND PRACTICE*. England: John Wiley & Sons, 2005.
- [92] Hassan El-Hofy, *Fundamentals of Machining Processes*. CRC Press, 2019.
- [93] A. Pedroso, V. Sousa, N. Sebbe, R. Campilho, R. D. C. Sales - Contini, and A. Jesus, “A Comprehensive Review on the Conventional and Non-Conventional Machining and Tool-Wear Mechanisms of INCONEL®,” *Metals (Basel)*, vol. 13, p. 585, Sep. 2023, doi: 10.3390/met13030585.
- [94] R. Wang, D. Yang, W. Wang, F. Wei, Y. Lu, and Y. Li, “Tool Wear in Nickel-Based Superalloy Machining: An Overview,” *Processes*, vol. 10, no. 11. MDPI, Nov. 01, 2022. doi: 10.3390/pr10112380.
- [95] V. F. C. Sousa, J. Castanheira, F. J. G. Silva, J. S. Fecheira, G. Pinto, and A. Baptista, “Wear behavior of uncoated and coated tools in milling operations of ampco (Cu-be) alloy,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 16, Aug. 2021, doi: 10.3390/app11167762.
- [96] K. Zhou, G. Xiao, J. Xu, and Y. Huang, “Wear evolution of electroplated diamond abrasive belt and corresponding surface integrity of Inconel 718 during grinding,” *Tribol Int*, vol. 177, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.triboint.2022.107972.
- [97] F. J. G. Silva, R. P. Martinho, C. Martins, H. Lopes, and R. M. Gouveia, “Machining GX2CrNiMoN26-7-4 DSS alloy: Wear analysis of TiAlN and TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN coated carbide tools behavior in rough end milling operations,” *Coatings*, vol. 9, no. 6, Jun. 2019, doi: 10.3390/COATINGS9060392.
- [98] T. H. Childs, *Metal machining: theory and applications*. Springer, 2000.

- [99] M. Zawada-Michalowska, P. Pieśko, and J. Józwik, "Tribological aspects of cutting tool wear during the turning of stainless steels," *Materials*, vol. 13, no. 1, Jan. 2020, doi: 10.3390/ma13010123.
- [100] T. Sugihara and T. Enomoto, "Crater and flank wear resistance of cutting tools having micro textured surfaces," *Precis Eng*, vol. 37, no. 4, pp. 888–896, Oct. 2013, doi: 10.1016/j.precisioneng.2013.05.007.
- [101] H. Zeng and D. Yang, "An investigation of notch wear on the bull-nose tool during laser-assisted milling AerMet100 steel," *Opt Laser Technol*, vol. 156, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.optlastec.2022.108487.
- [102] V. F. C. Sousa and F. J. G. Silva, "Recent advances on coated milling tool technology—a comprehensive review," *Coatings*, vol. 10, no. 3, Mar. 2020, doi: 10.3390/coatings10030235.
- [103] V. F. C. Sousa and F. J. G. Silva, "Recent advances in turning processes using coated tools—A comprehensive review," *Metals*, vol. 10, no. 2. MDPI AG, Feb. 01, 2020. doi: 10.3390/met10020170.
- [104] W. Bouzid, S. Saiä, N. Ben Salah, and J. L. Lebrun, "Influence of machining by finishing milling on surface characteristics," 2001.
- [105] H. Çalişkan, C. Kurbanoglu, P. Panjan, M. Čekada, and D. Kramar, "Wear behavior and cutting performance of nanostructured hard coatings on cemented carbide cutting tools in hard milling," *Tribol Int*, vol. 62, pp. 215–222, 2013, doi: 10.1016/j.triboint.2013.02.035.
- [106] F. Clarysse, W. Lauwerens, and M. Vermeulen, "Tribological properties of PVD tool coatings in forming operations of steel sheet," *Wear*, vol. 264, no. 5–6, pp. 400–404, Mar. 2008, doi: 10.1016/j.wear.2006.08.031.
- [107] C. Bandapalli, B. M. Sutaria, D. V. Prasad Bhatt, and K. K. Singh, "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," in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2018, pp. 626–629. doi: 10.1016/j.procir.2018.08.191.
- [108] "ISO 3002-1:1982, Basic quantities in cutting and grinding — Part 1: Geometry of the active part of cutting tools — General terms, reference systems, tool and working angles, chip breakers".
- [109] J. O'Hara and F. Fang, "Advances in micro cutting tool design and fabrication," *International Journal of Extreme Manufacturing*, vol. 1, Sep. 2019, doi: 10.1088/2631-7990/ab3e7f.
- [110] S. Z. Liao *et al.*, "Effect of nitrogen content on the mechanical and biological properties of tantalum nitride coatings," *Surf Coat Technol*, vol. 464, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.surfcoat.2023.129544.
- [111] M. Kumar Gupta, V. Panwar, and R. Prasad Mahapatra, "Effect of temperature and strain rate on mechanical properties and potential energy of nanocrystalline tantalum," *Mater Today Proc*, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.10.158.
- [112] Y. Guo *et al.*, "The role of pore structures on the fatigue properties of additively manufactured porous tantalum scaffolds produced by electron beam powder bed fusion," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 19, pp. 3461–3473, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.06.096.
- [113] W. Knabl, G. Leichtfried, and R. Stickler, "Refractory Metals and Refractory Metal Alloys," in *Springer Handbook of Materials Data*, H. Warlimont and W. Martienssen, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 307–337. doi: 10.1007/978-3-319-69743-7\_13.
- [114] "CEMUP - FEI QUANTA 400 FEG ESEM," <https://www.cemup.up.pt/Fei.html>.
- [115] N. P. Hung, Z. W. Zhong, K. K. Lee, and C. F. Chai, "Precision grinding and facing of copper-beryllium alloys," 1999.

- [116] J. Airao, B. Chaudhary, V. Bajpai, and N. Khanna, "An Experimental Study of Surface Roughness Variation in End Milling of Super Duplex 2507 Stainless Steel," 2018. [Online]. Available: [www.sciencedirect.com/www.materialstoday.com/proceedings](http://www.sciencedirect.com/www.materialstoday.com/proceedings)
- [117] M. R. Policena, C. Devitte, G. Fronza, R. F. Garcia, and A. J. Souza, "Surface roughness analysis in finishing end-milling of duplex stainless steel UNS S32205," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 98, no. 5, pp. 1617–1625, 2018, doi: 10.1007/s00170-018-2356-4.
- [118] R. Čep *et al.*, "Surface Roughness after Machining and Influence of Feed Rate on Process," *Key Eng Mater*, vol. 581, pp. 341–347, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.581.341.
- [119] I. Buj-Corral, J. Vivancos-Calvet, and A. Domínguez-Fernández, "Surface topography in ball-end milling processes as a function of feed per tooth and radial depth of cut," *Int J Mach Tools Manuf*, vol. 53, no. 1, pp. 151–159, Feb. 2012, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2011.10.006.
- [120] R. Mehfuz and M.Y. Ali, "Surface roughness analysis of beryllium-copper alloy in micro end milling," 2007.
- [121] W. Wang, S. H. Kweon, and S. H. Yang, "A study on roughness of the micro-end-milled surface produced by a miniaturized machine tool," in *Journal of Materials Processing Technology*, May 2005, pp. 702–708. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.141.
- [122] M. Dhananchezian and K. Rajkumar, "Comparative Study of Cutting Insert Wear and Roughness Parameter (R a ) while turning Nimonic 90 and Hastelloy C-276 by Coated Carbide Inserts," 2020. [Online]. Available: [www.sciencedirect.com/www.materialstoday.com/proceedings2214-7853](http://www.sciencedirect.com/www.materialstoday.com/proceedings2214-7853)
- [123] V. F. C. Sousa, F. J. G. Da Silva, G. F. Pinto, A. Baptista, and R. Alexandre, "Characteristics and wear mechanisms of tialn-based coatings for machining applications: A comprehensive review," *Metals*, vol. 11, no. 2. MDPI AG, pp. 1–49, 2021. doi: 10.3390/met11020260.
- [124] N. Narutaki, Y. Yamane, K. Hayashi, T. Kitagawa, and K. Uehara, "High-speed Machining of Inconel 718 with Ceramic Tools," *CIRP Annals*, vol. 42, no. 1, pp. 103–106, 1993, doi: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62402-0](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62402-0).
- [125] B. Breidenstein and B. Denkena, "Significance of residual stress in PVD-coated carbide cutting tools," *CIRP Ann Manuf Technol*, vol. 62, no. 1, pp. 67–70, 2013, doi: 10.1016/j.cirp.2013.03.101.
- [126] A. Sharma, S. S. Joshi, and R. Malasubramaniam, "Modeling and analysis of tool wear mechanisms in diamond turning of copper beryllium alloy," 2019.
- [127] M. Azizur Rahman *et al.*, "Influence of feed rate response (FRR) on chip formation in micro and macro machining of al alloy," *Metals (Basel)*, vol. 11, no. 1, pp. 1–21, Jan. 2021, doi: 10.3390/met11010159.
- [128] V. F. C. Sousa, J. Castanheira, F. J. G. Silva, J. S. Fecheira, G. Pinto, and A. Baptista, "Wear behavior of uncoated and coated tools in milling operations of ampc (Cu-be) alloy," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 16, Aug. 2021, doi: 10.3390/app11167762.
- [129] H. Mindivan, "Corrosion and tribocorrosion behaviour of WC/C coating on beryllium-copper mould alloy," in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2020, pp. 3114–3118. doi: 10.1016/j.matpr.2020.03.726.
- [130] N. A. Krishnan and J. Mathew, "Studies on wear behavior of AlTiN-coated WC tool and machined surface quality in micro endmilling of Inconel 718", doi: 10.1007/s00170-020-05875-w/Published.
- [131] L. Zauner *et al.*, "Reactive HiPIMS deposition of Ti-Al-N: Influence of the deposition parameters on the cubic to hexagonal phase transition," *Surf Coat Technol*, vol. 382, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.surfcoat.2019.125007.

- [132] F. Klocke *et al.*, “Coated Tools for Metal Cutting-Features and Applications.”
- [133] Q. Ma, L. Li, Y. Xu, J. Gu, L. Wang, and Y. Xu, “Effect of bias voltage on TiAlSiN nanocomposite coatings deposited by HiPIMS,” *Appl Surf Sci*, vol. 392, pp. 826–833, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.apsusc.2016.09.028.
- [134] B. Zhao, X. Zhao, L. Lin, and L. Zou, “Effect of bias voltage on mechanical properties, milling performance and thermal crack propagation of cathodic arc ion-plated TiAlN coatings,” *Thin Solid Films*, vol. 708, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.tsf.2020.138116.



## APÊNDICE A

## APÊNDICE A

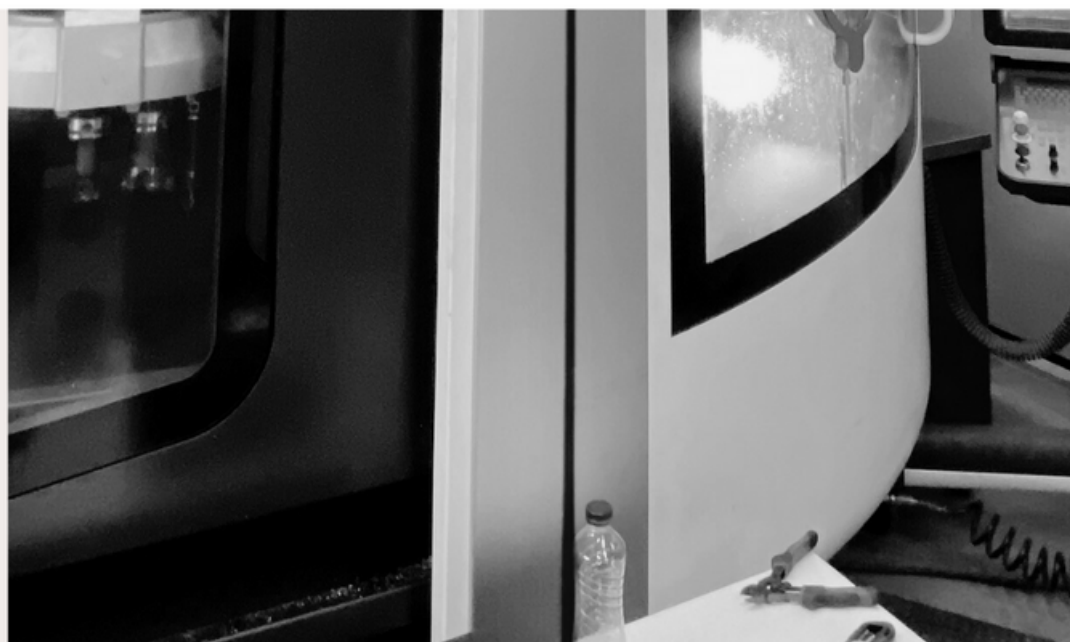
# MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARRIMENTO





## RESUMO

O presente catálogo foi elaborado tendo em vista a abrangência do maior número possível e necessário de imagens das ferramentas de corte, visto que a sua colocação no corpo de texto da dissertação seria muito massivo. Assim, o leitor tem a oportunidade de, a partir deste documento, de visualizar e analisar, e até de forma comparativa, cada uma das ferramentas de corte.



## INFORMAÇÕES

Todas as imagens foram obtidas a partir das ferramentas de corte do procedimento experimental em análise para a presente dissertação, por auxílio do \_\_\_ Rui Pinto.



Para que fosse conseguido um procedimento com o mínimo de erros e imprecisões possíveis, todas as ferramentas foram sujeitas aos processos de corte, montagem, lixagem, polimento, limpeza. Esta limpeza foi feita através de banho por ultrassons, com duração de 5 minutos, sendo o primeiro com álcool etílico e o segundo com álcool isopropílico.



As análises por microscopia eletrónica de varrimento foram todas realizadas no CEMUP, Centro de Materiais da Universidade do Porto



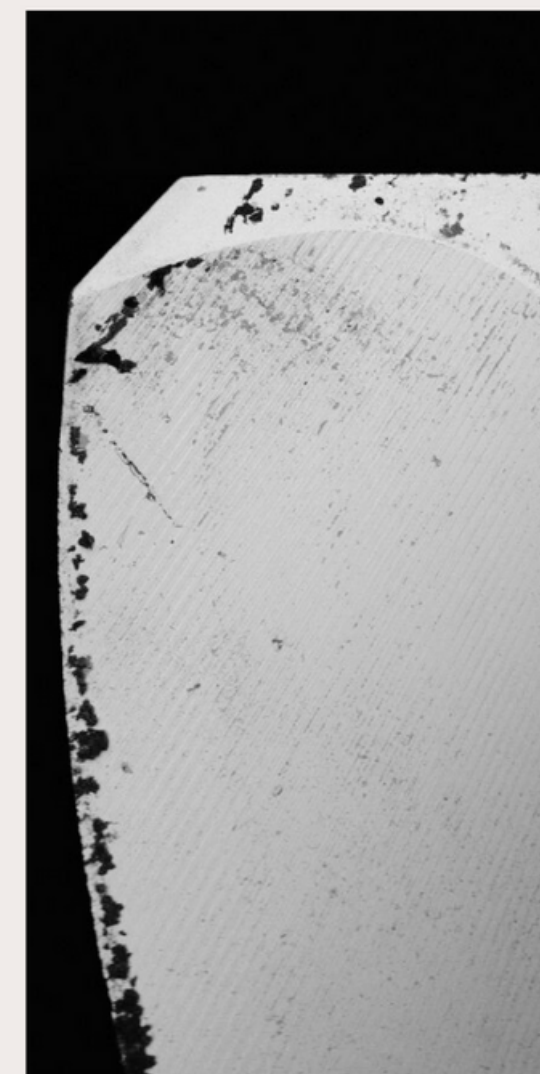
Microscópio eletrónico de varrimento FEI Quanta 400 FEG



As ampliações usadas ao longo de todas as observações presenciaram o mínimo de 35x, e o máximo de , variando entre os valores 35x, 100x, 220x, 500x, 1000x 2500x, 5000x



Ao todo foram tiradas capturas 471 imagens de todas as ferramentas de corte para posterior análise.



PORTO mag □ HV det mode  
EMUP 100 x 15.00 kV BSED Z Cont



### **SEM REVESTIMENTO**

Comprimentos de corte  
26,8m, 53,6m e 73,7m

Velocidades de avanço  
750 mm/min e 1500mm/min

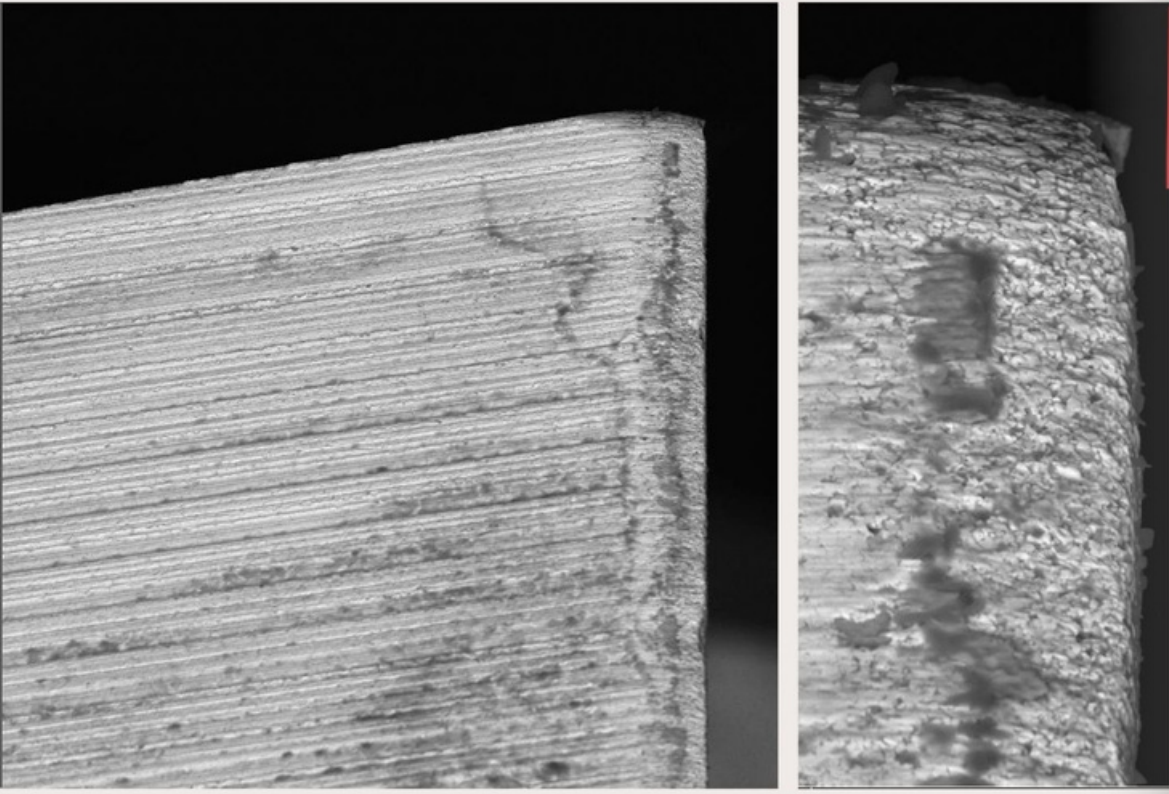
### **COM REVESTIMENTO**

Comprimentos de corte  
26,8m, 53,6m e 73,7m

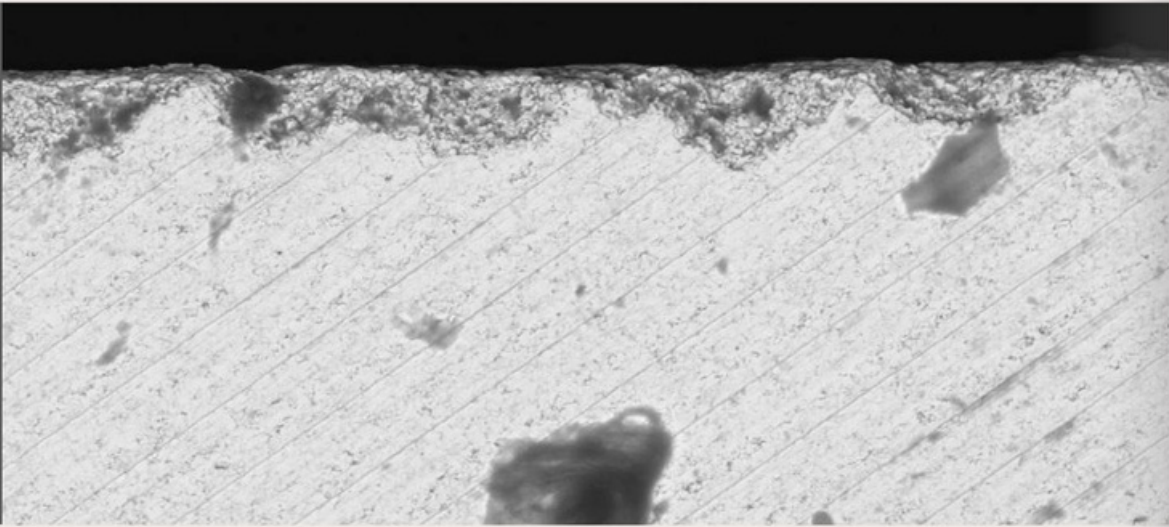
Velocidades de avanço  
750 mm/min e 1500mm/min

# T1 - TOL27F750V126

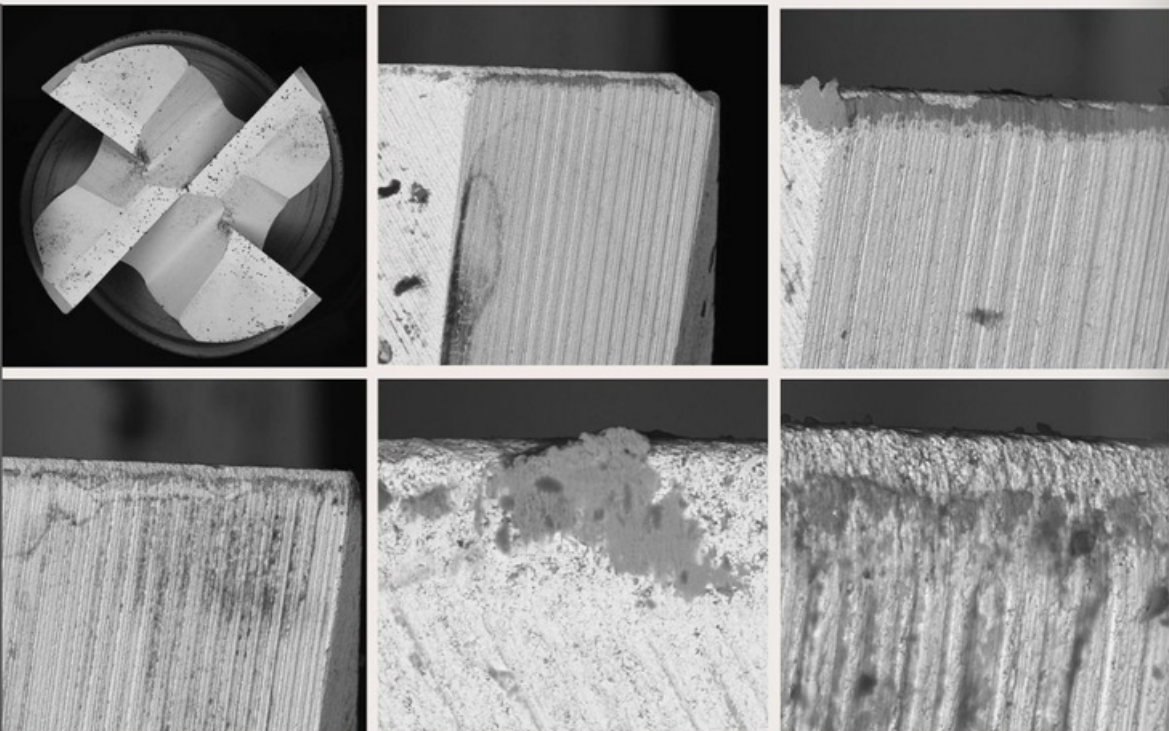
CLEARANCE FACE



RAKE FACE



TOP FACE



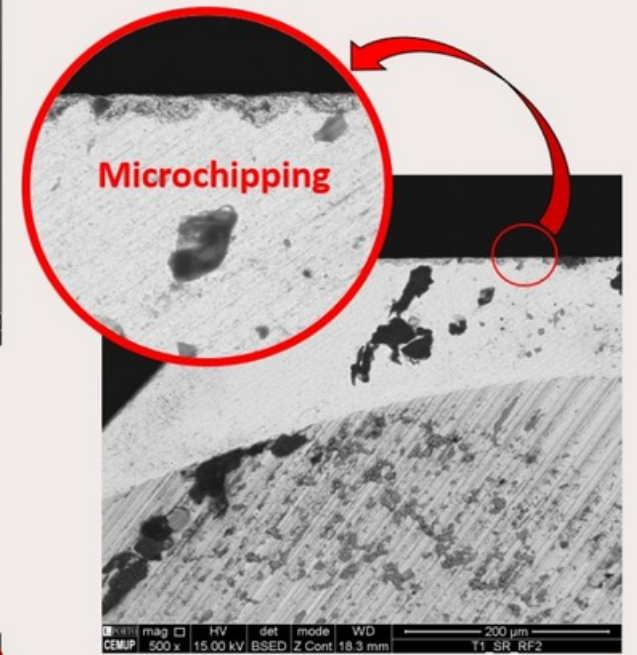
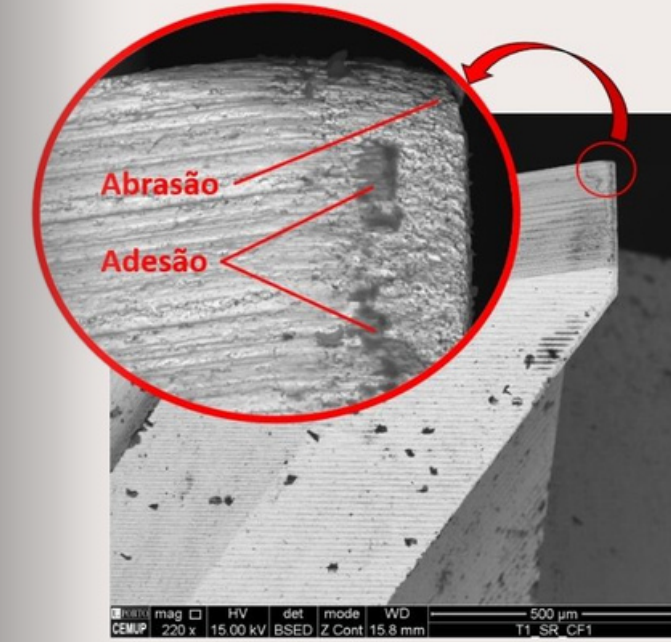
**Comprimento de corte**  
26,8 m



**Velocidade de avanço**  
750 mm/min



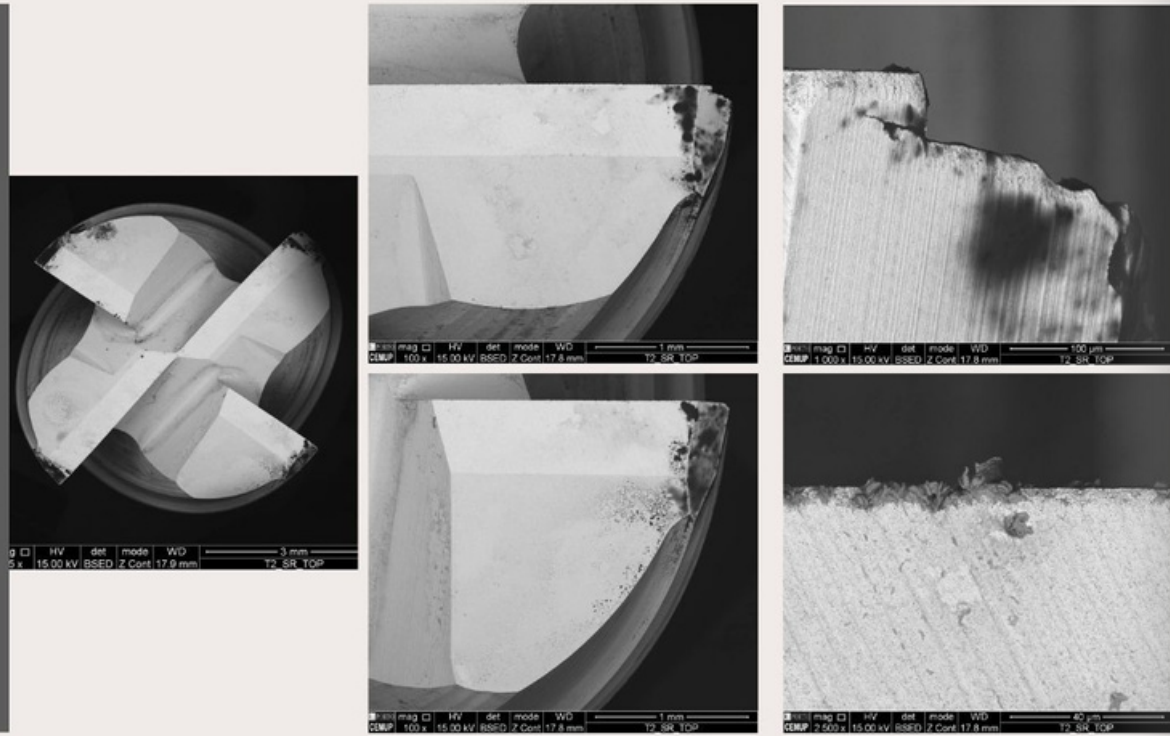
**Mecanismos de desgaste**  
Abrasão, adesão, microchipping



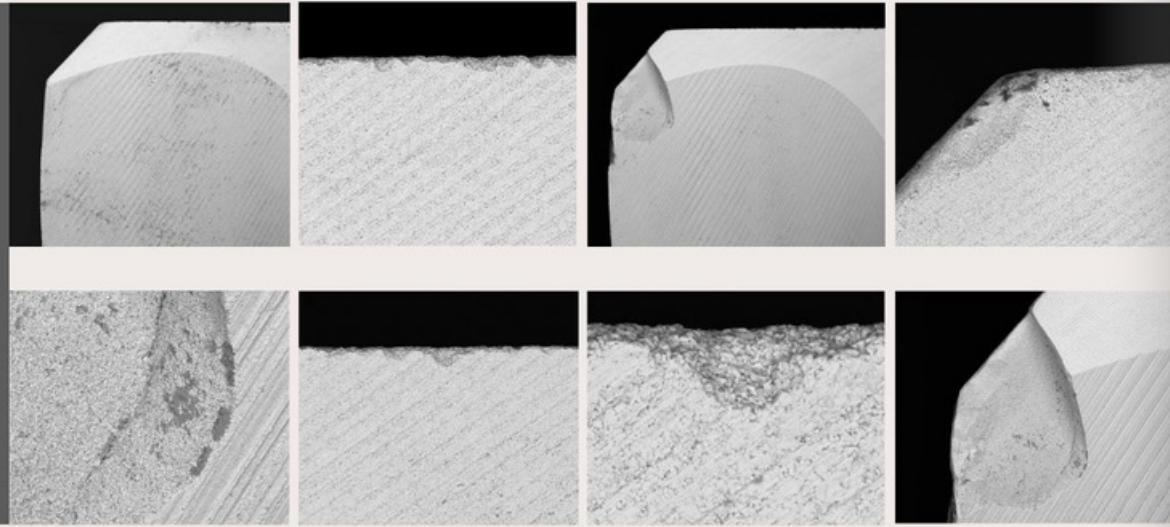
# SEM REVESTIMENTO

# T2 - TOOL 54F750V126

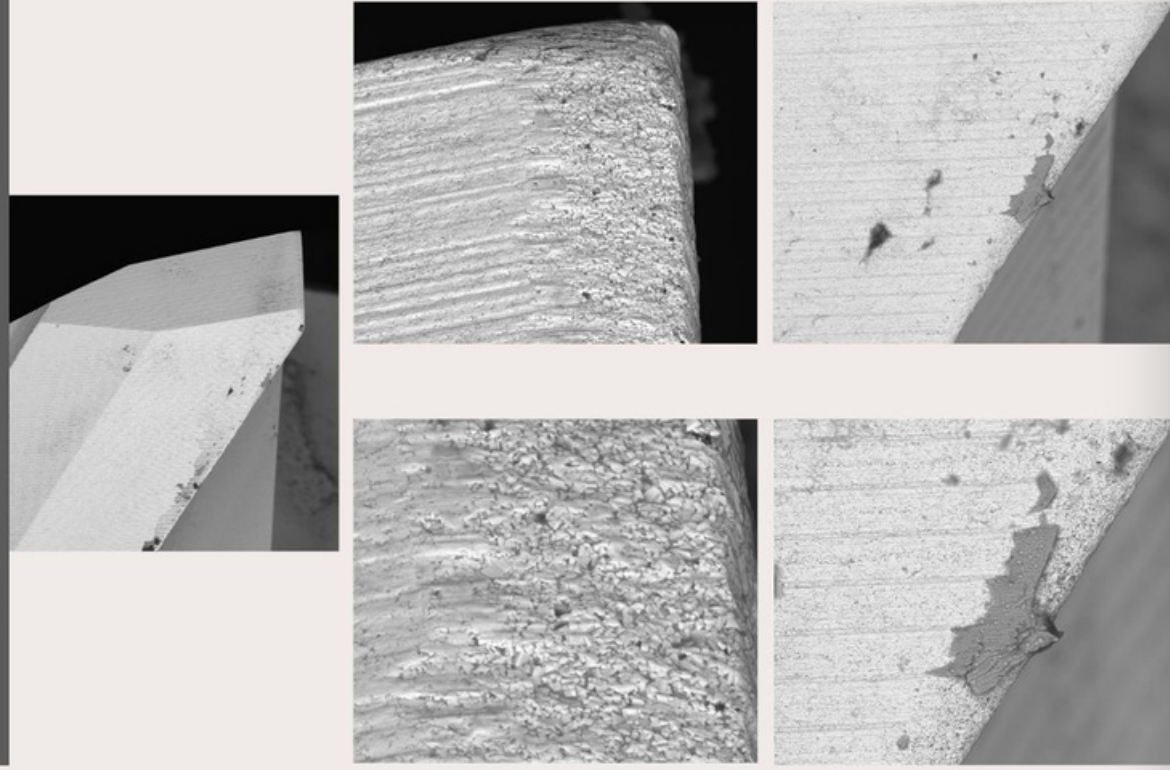
TOP FACE



RAKE FACE



CLEARANCE FACE



**Comprimento de corte**  
53,6 m



**Velocidade de avanço**  
750 mm/min



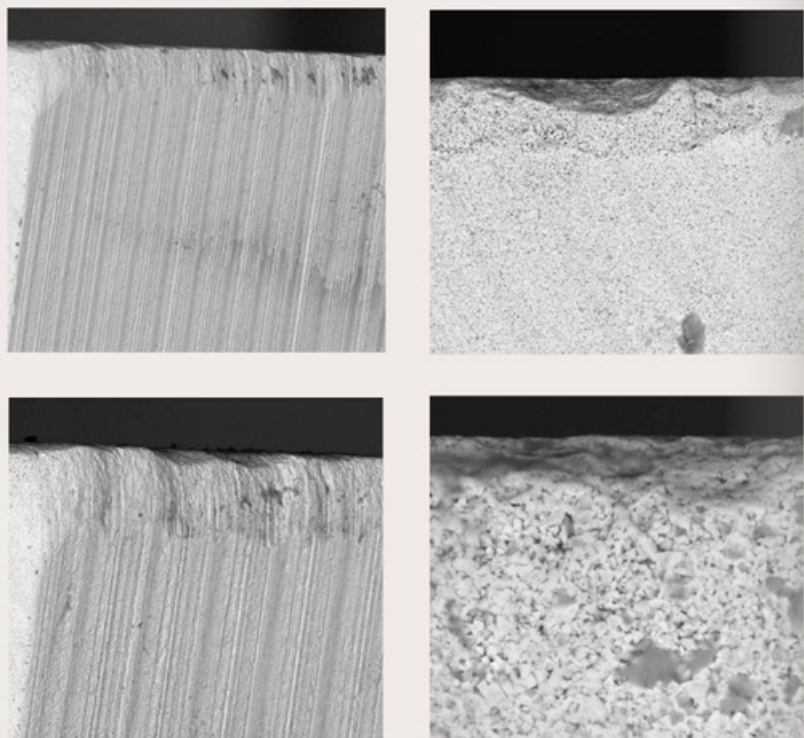
**Mecanismos de desgaste**  
Abrasão, adesão, chipping, microchipping, fissuração



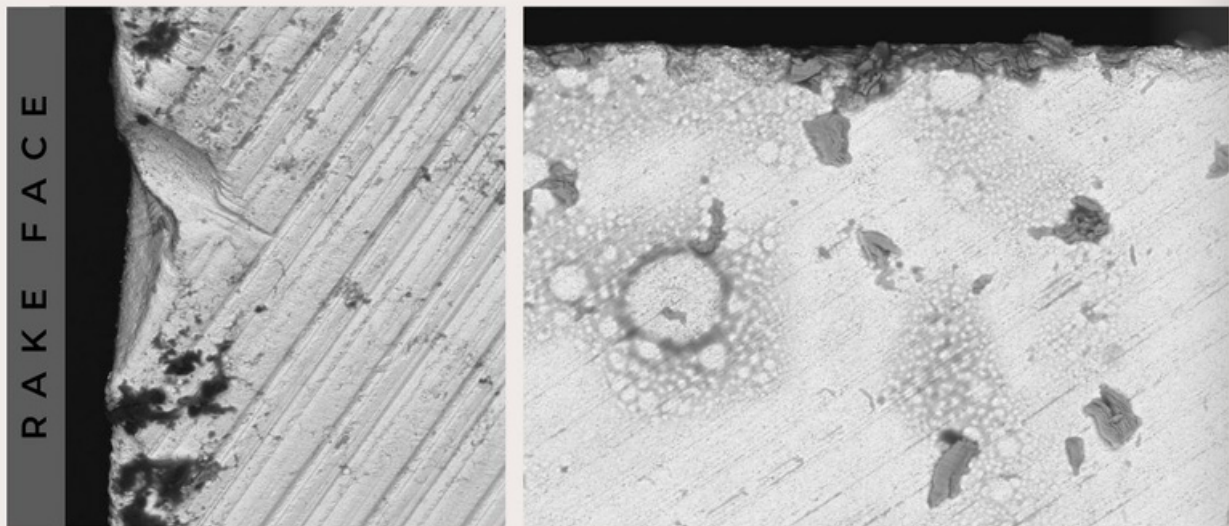
S E M R E V E S T I M E N T O

# T3 - TOOL 74F750V126

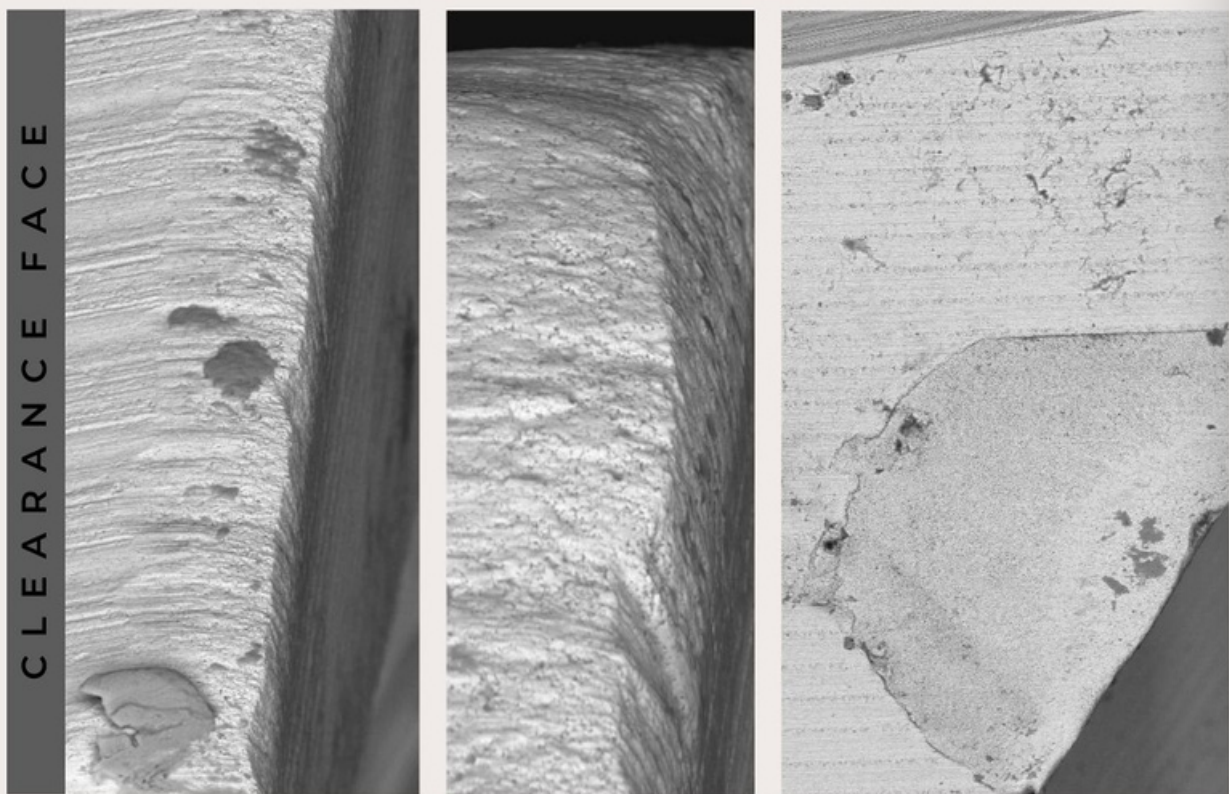
TOP FACE



RAKE FACE



CLEARANCE FACE



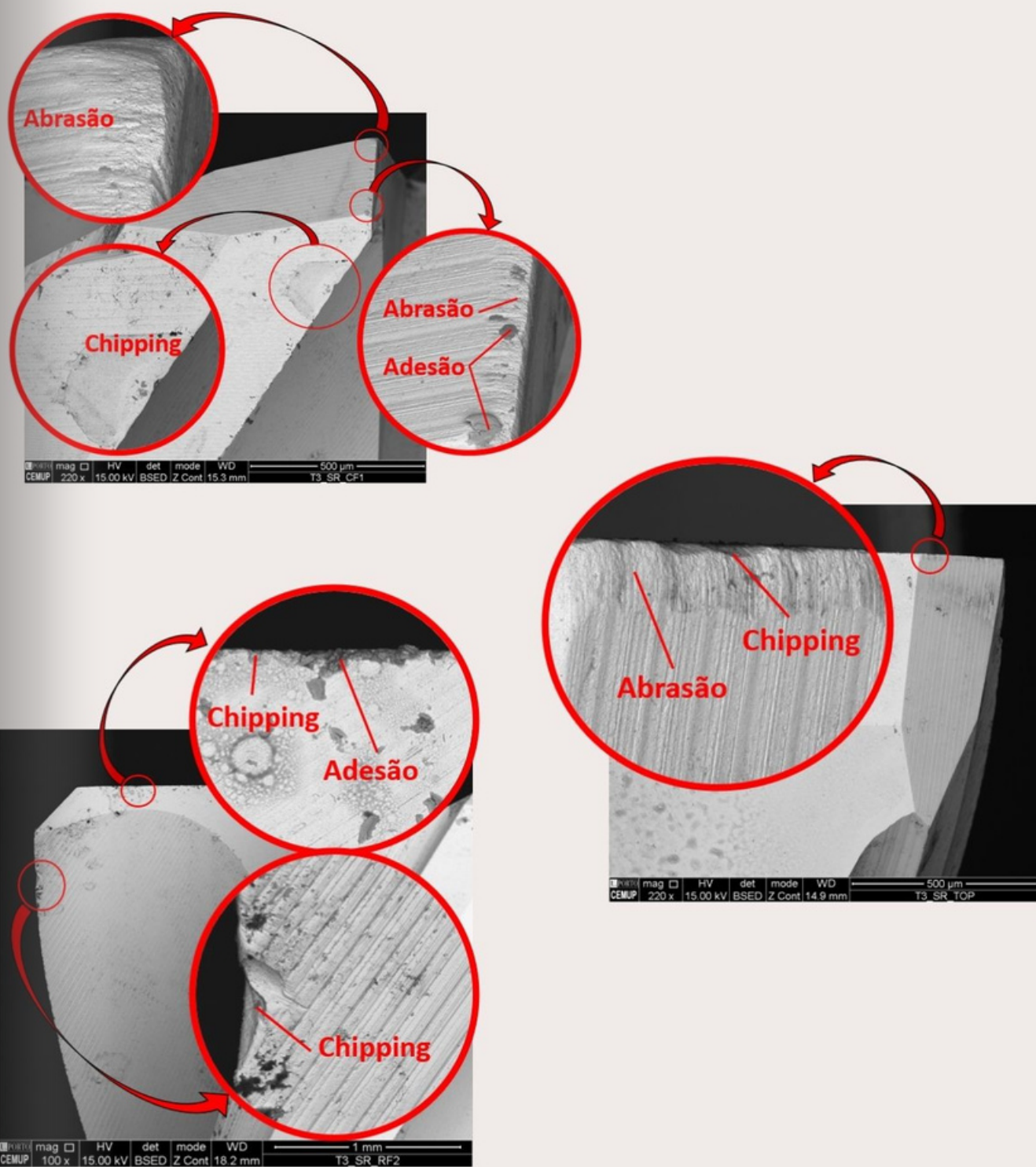
**Comprimento de corte**  
73,7 m



**Velocidade de avanço**  
750 mm/min



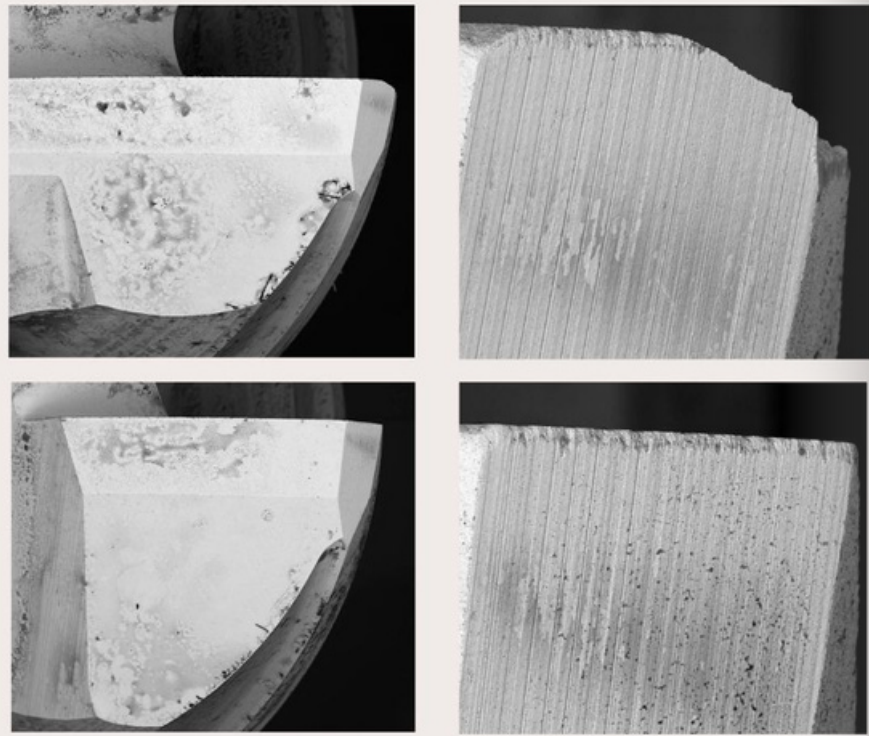
**Mecanismos de desgaste**  
Abrasão, adesão, chipping



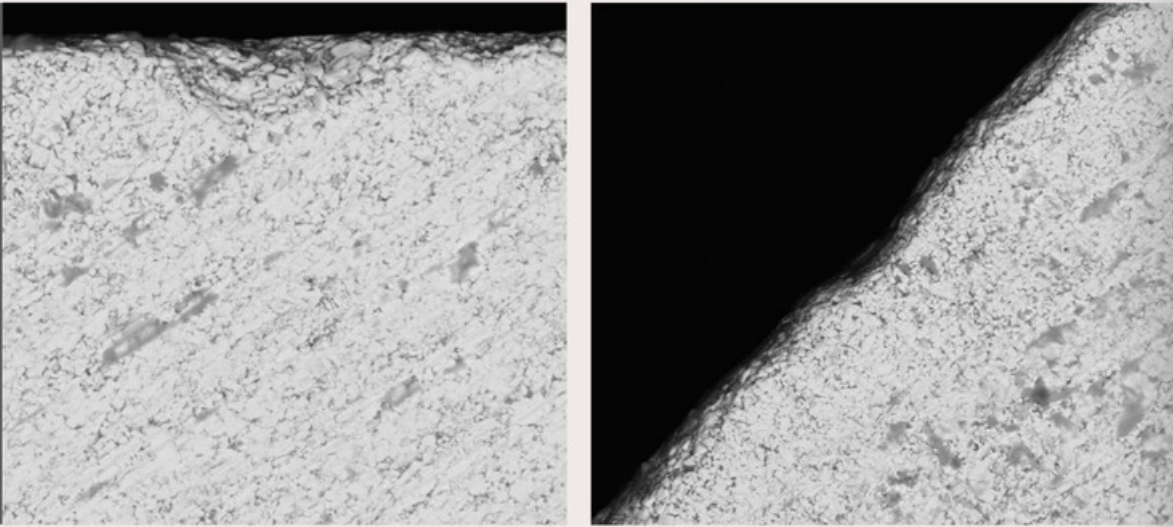
# SEM REVESTIMENTO

# T 4 - T O L 2 7 F 1 5 0 0 V 1 2 6

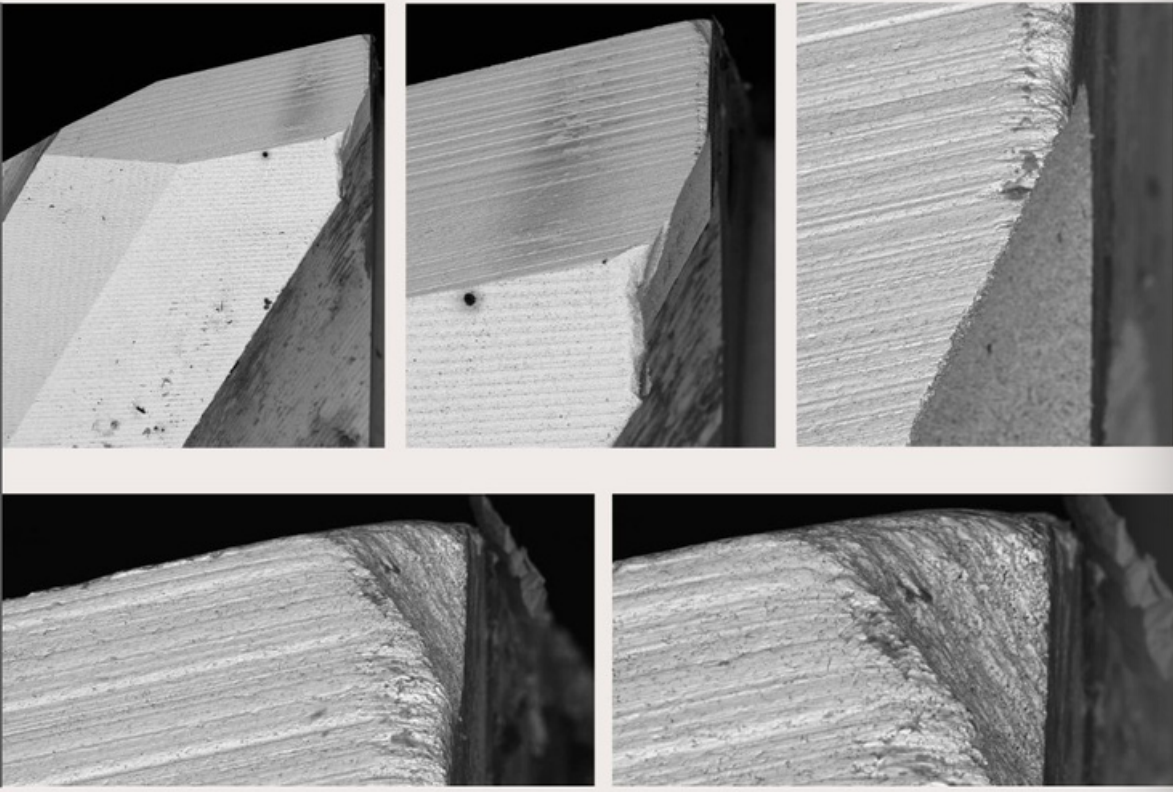
TOP FACE



RAKE FACE



CLEARANCE FACE



# S E M R E V E S T I M E N T O



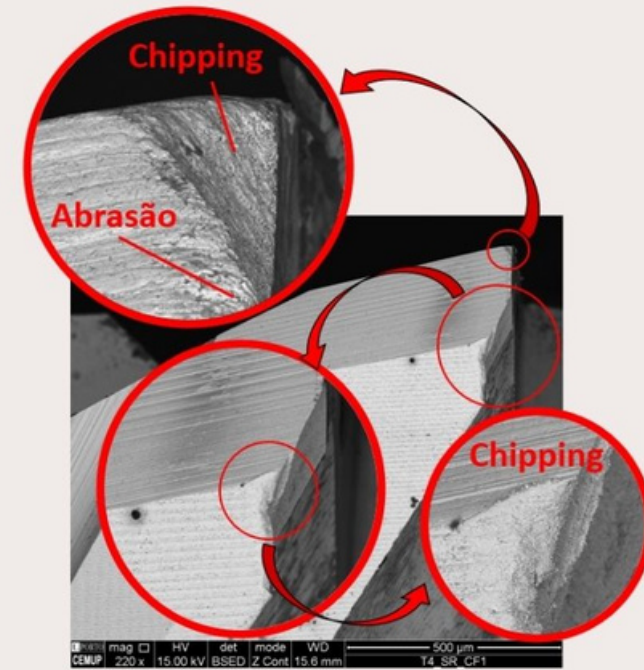
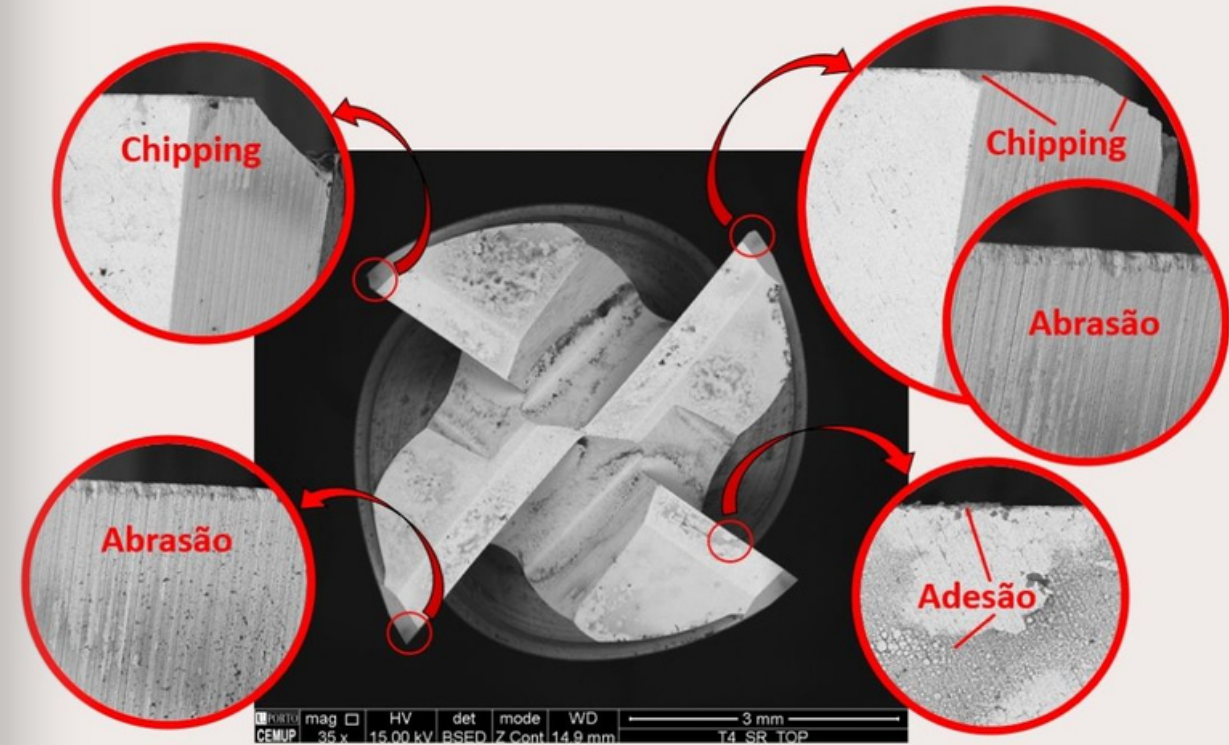
**Comprimento de corte**  
26,8 m



**Velocidade de avanço**  
1500 mm/min

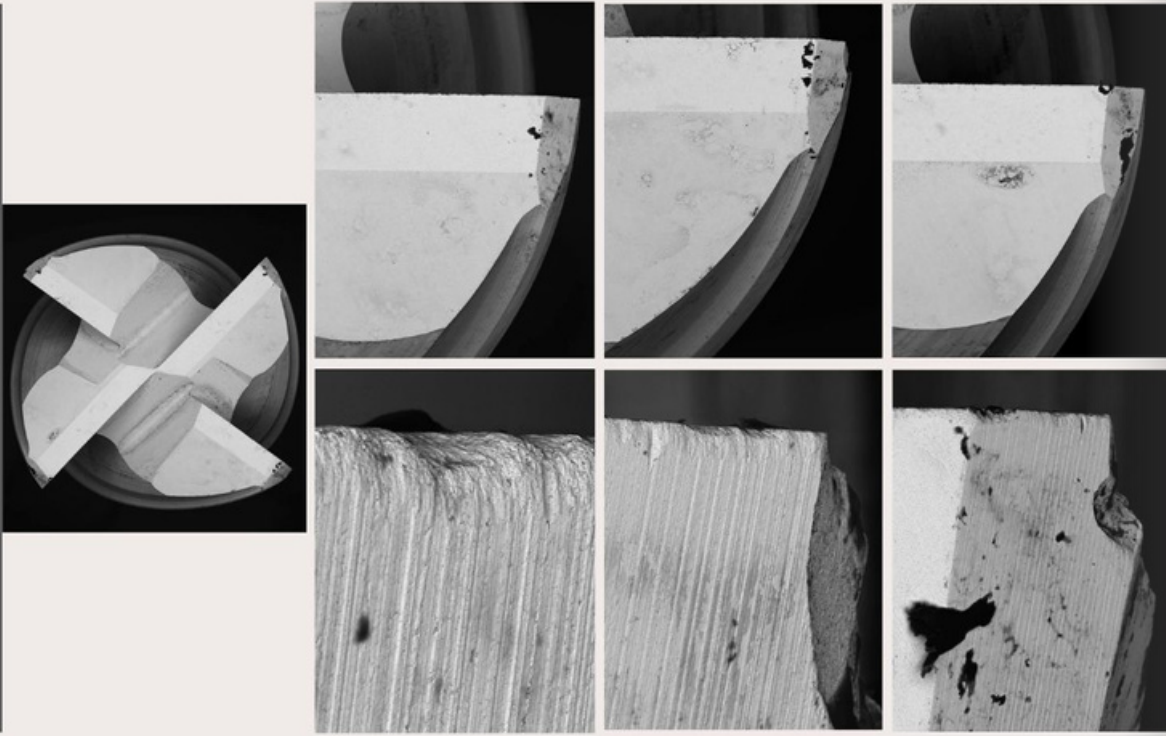


**Mecanismos de desgaste**  
Abrasão, adesão, chipping

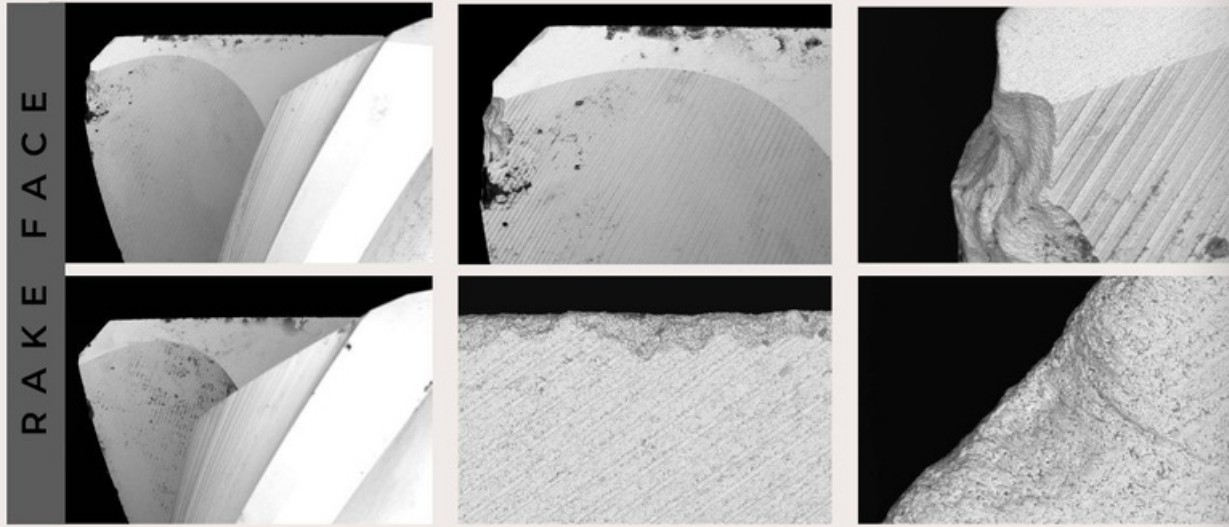


# T5 - T0 L54F1500V126

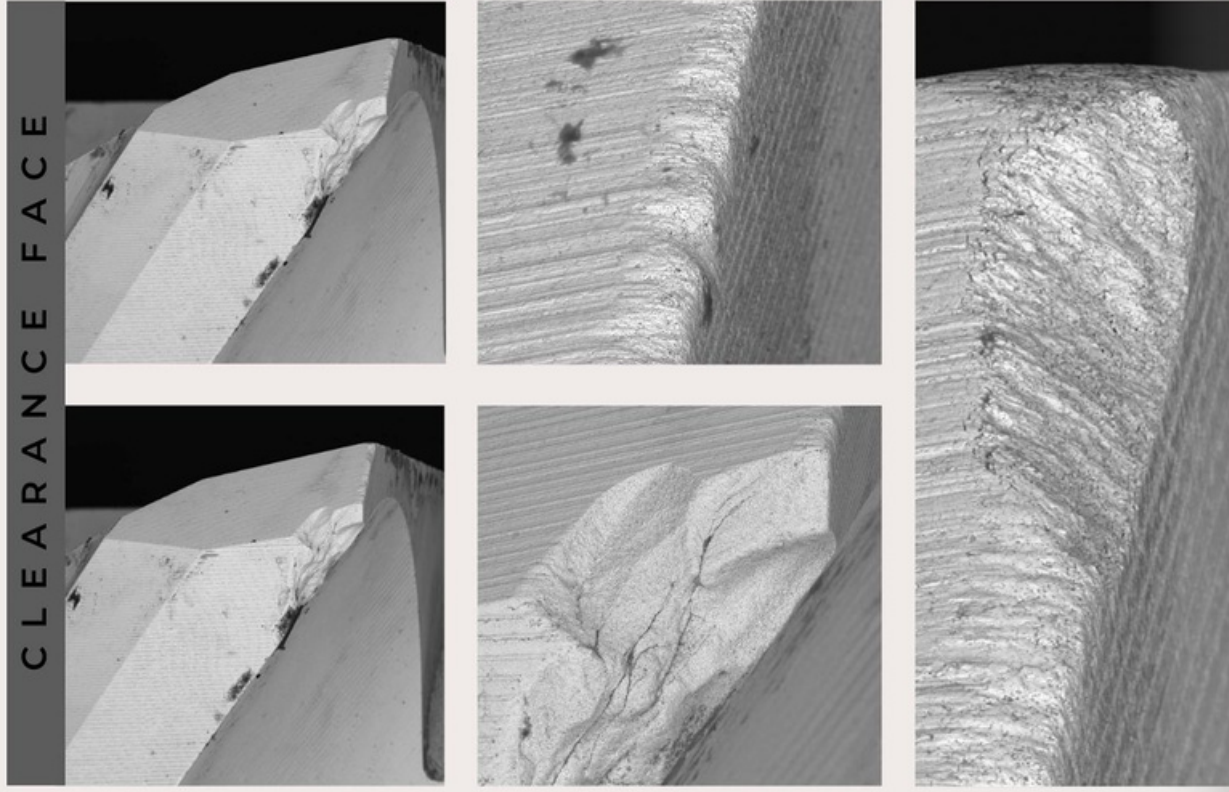
TOP FACE



RAKE FACE



CLEARANCE FACE



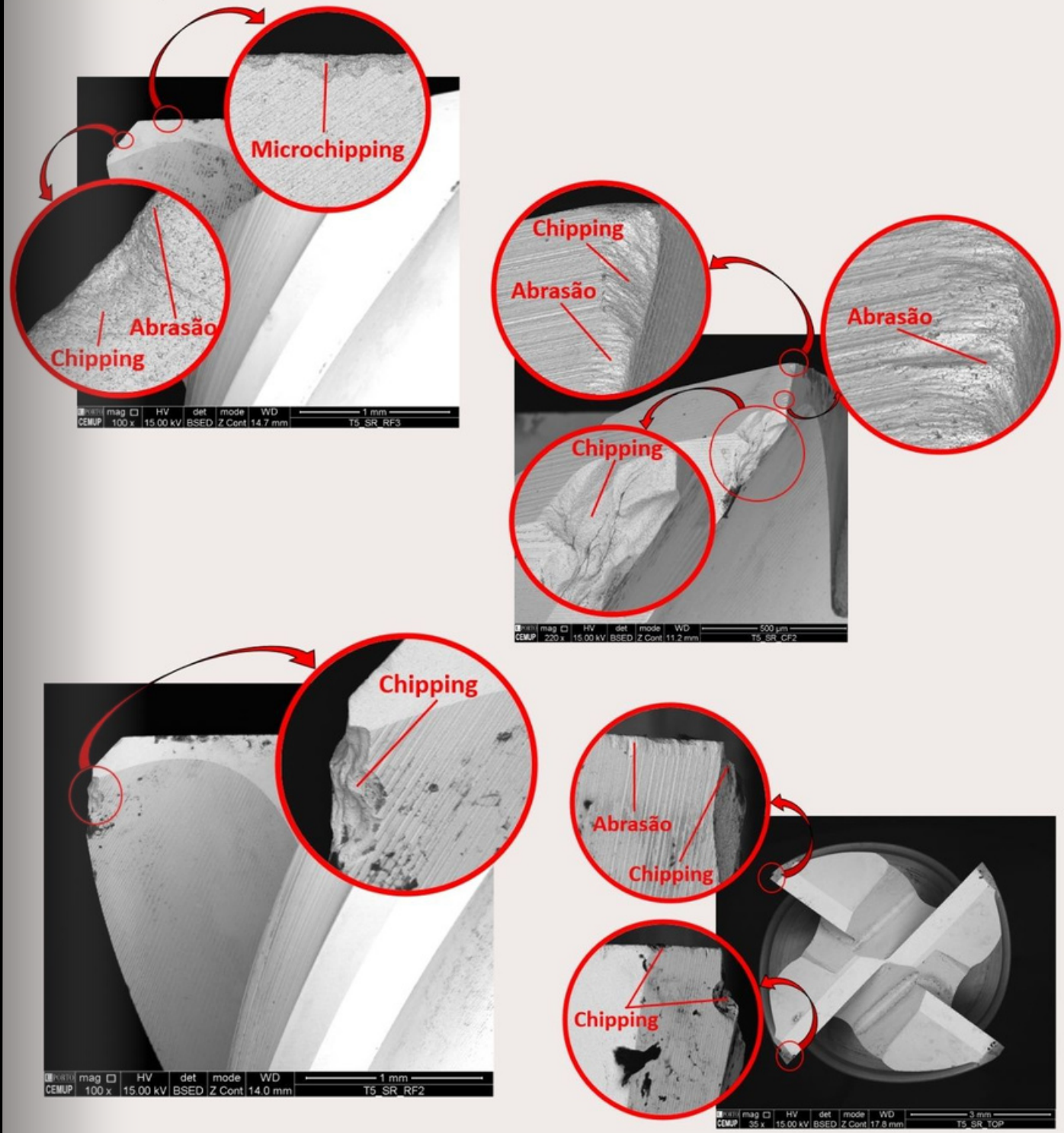
**Comprimento de corte**  
53,6 m



**Velocidade de avanço**  
1500 mm/min



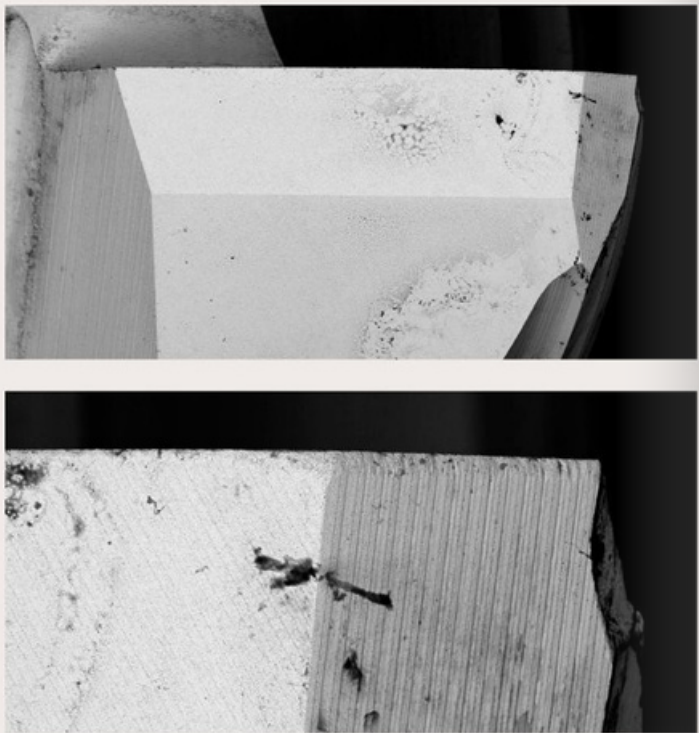
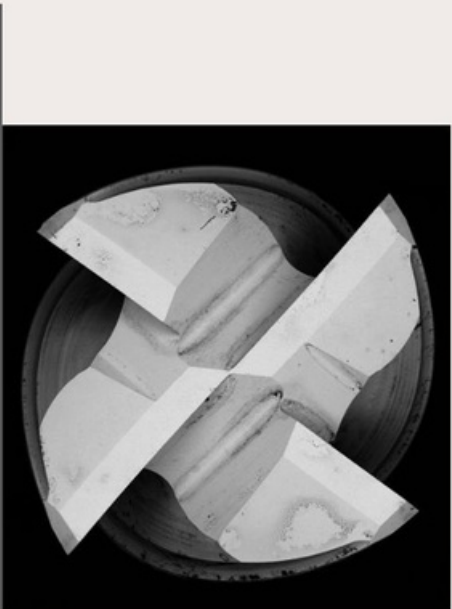
**Mecanismos de desgaste**  
Abrasão, chipping, microchipping



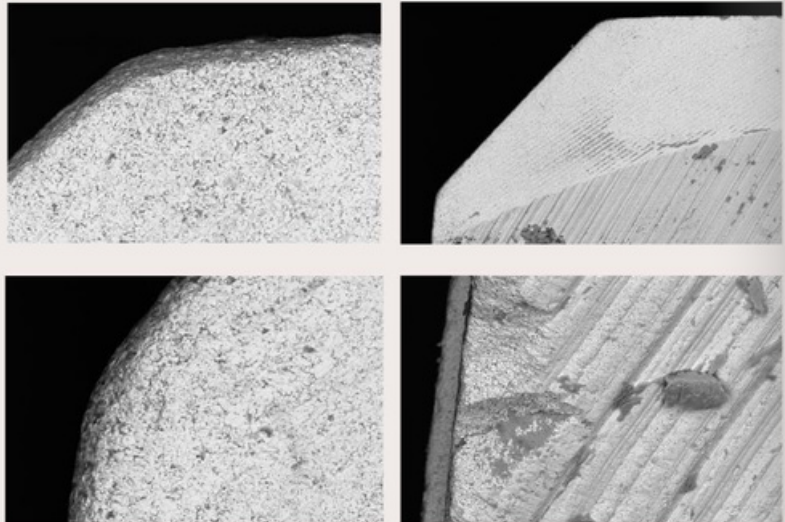
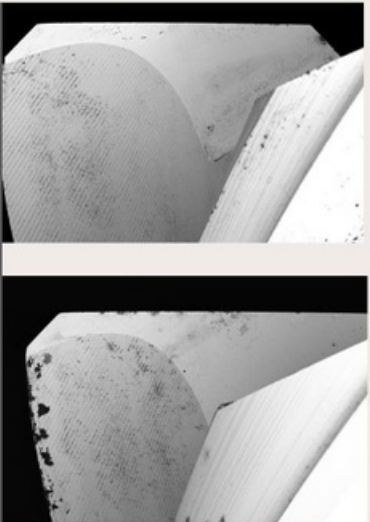
# SEM REVESTIMENTO

# T6 - TOL74F1500V126

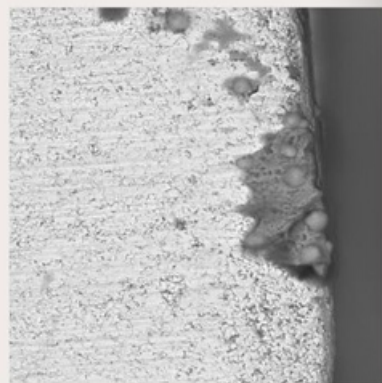
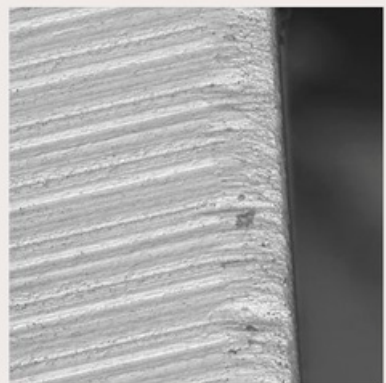
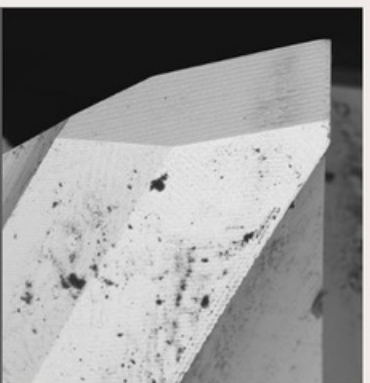
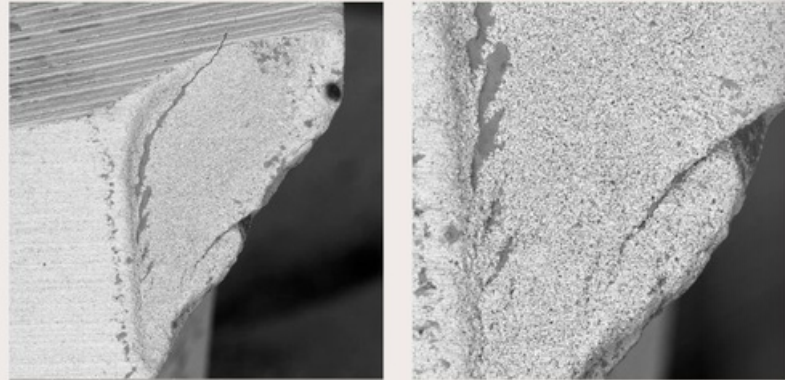
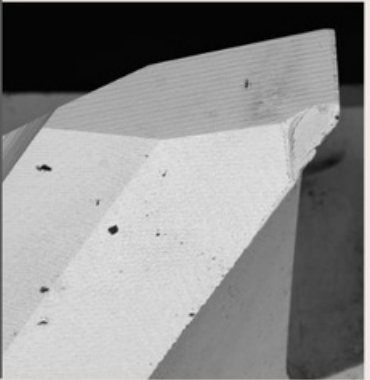
TOP FACE



RAKE FACE



CLEARANCE FACE



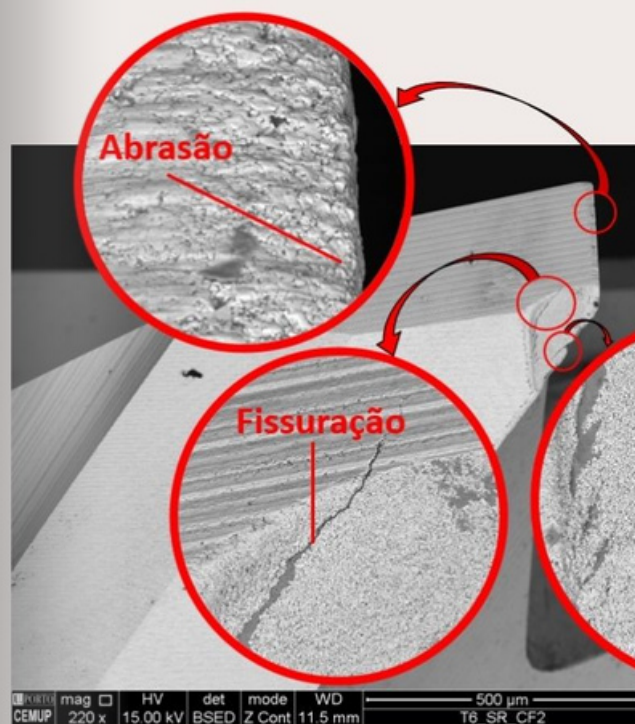
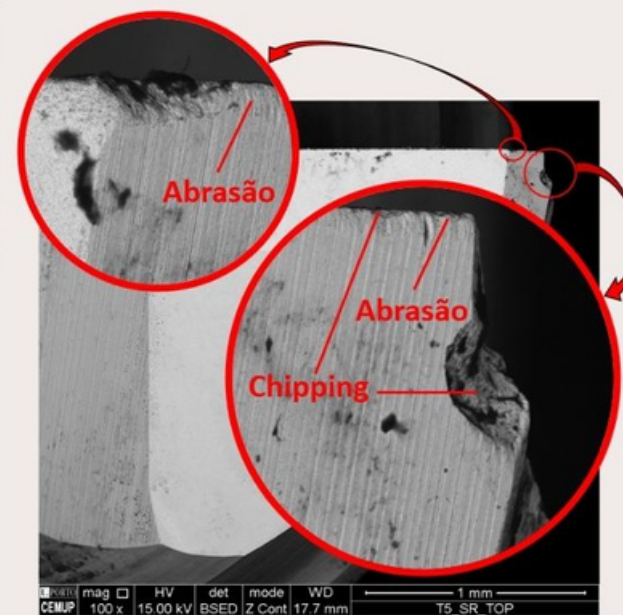
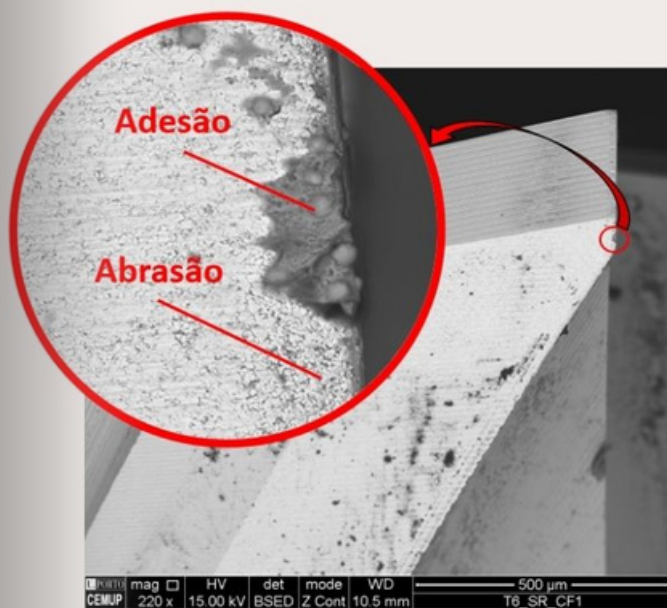
**Comprimento de corte**  
73,7 m



**Velocidade de avanço**  
1500 mm/min



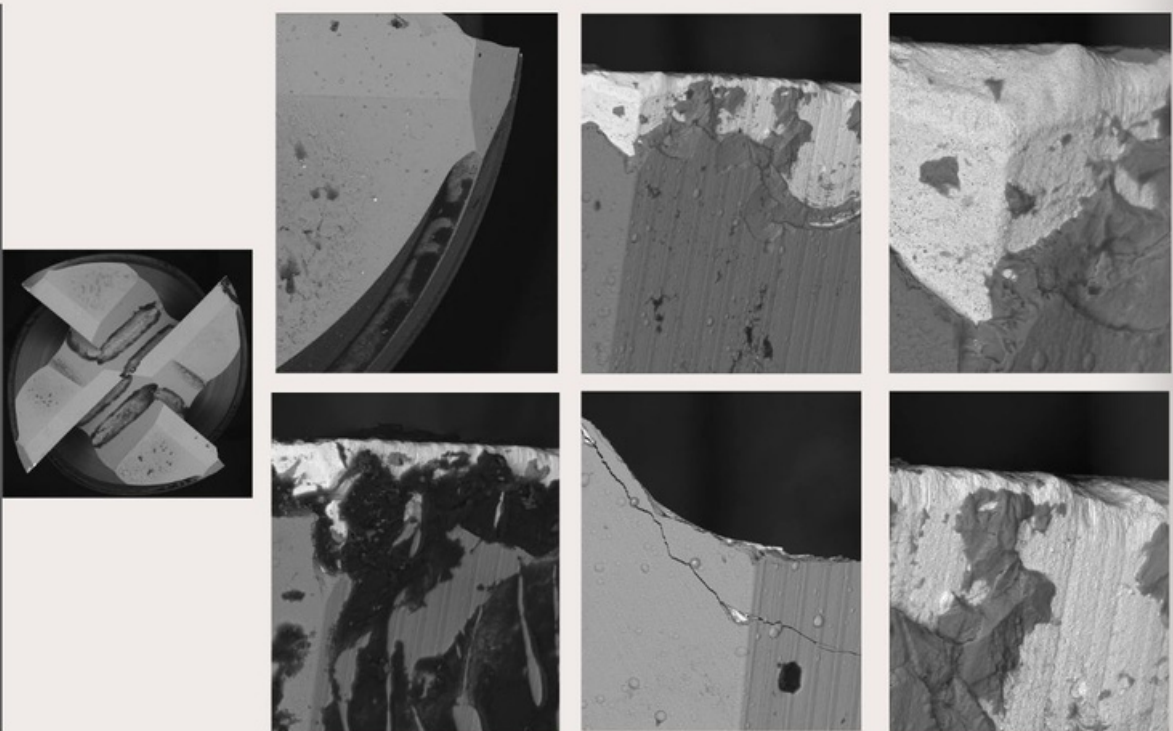
**Mecanismos de desgaste**  
Abrasão, adesão, chipping, fissuração



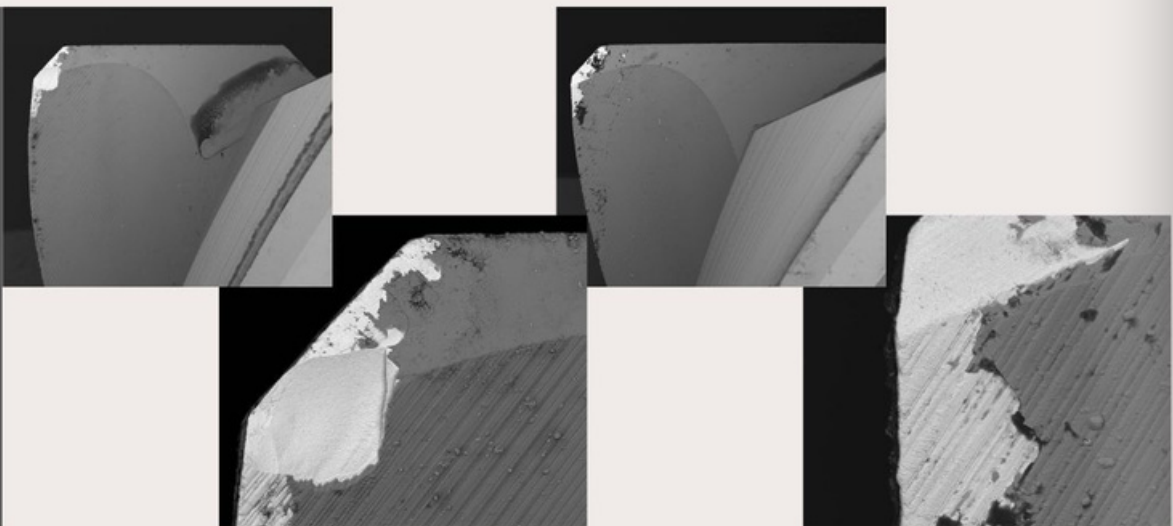
# SEM REVESTIMENTO

T1 - T1L27F750V126

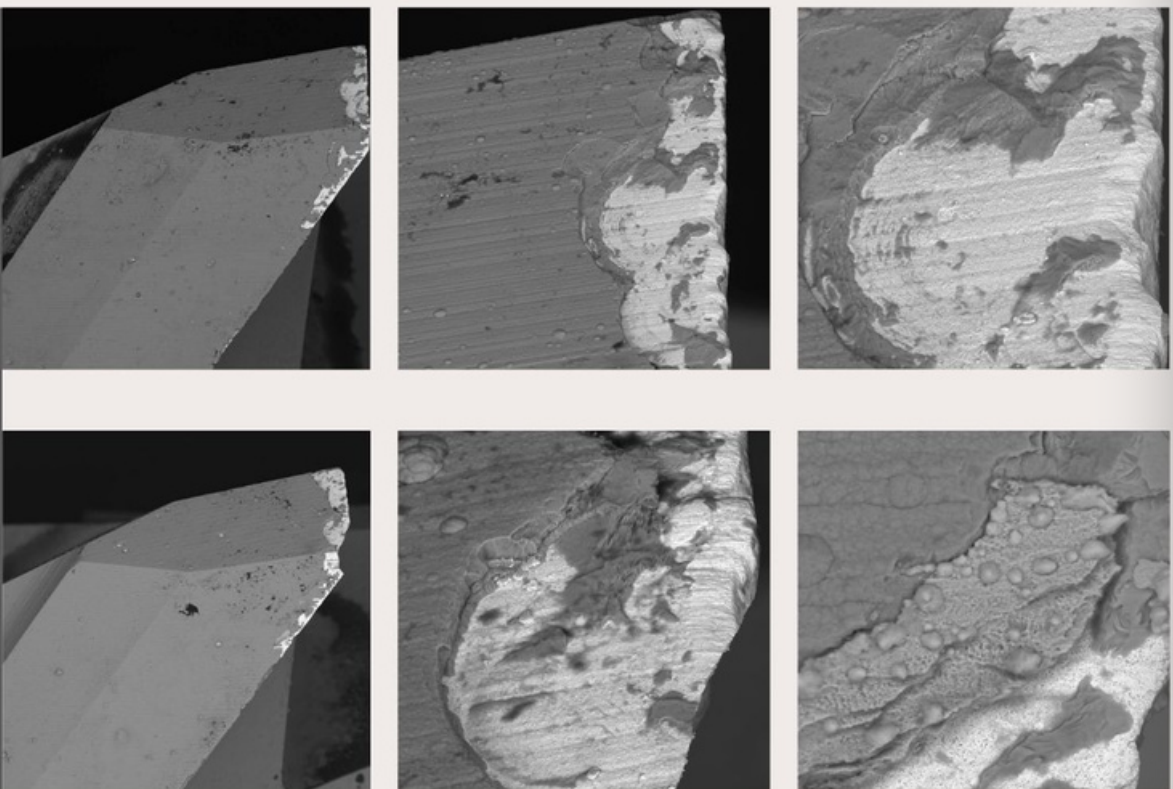
TOP FACE



RAKE FACE



CLEARANCE FACE



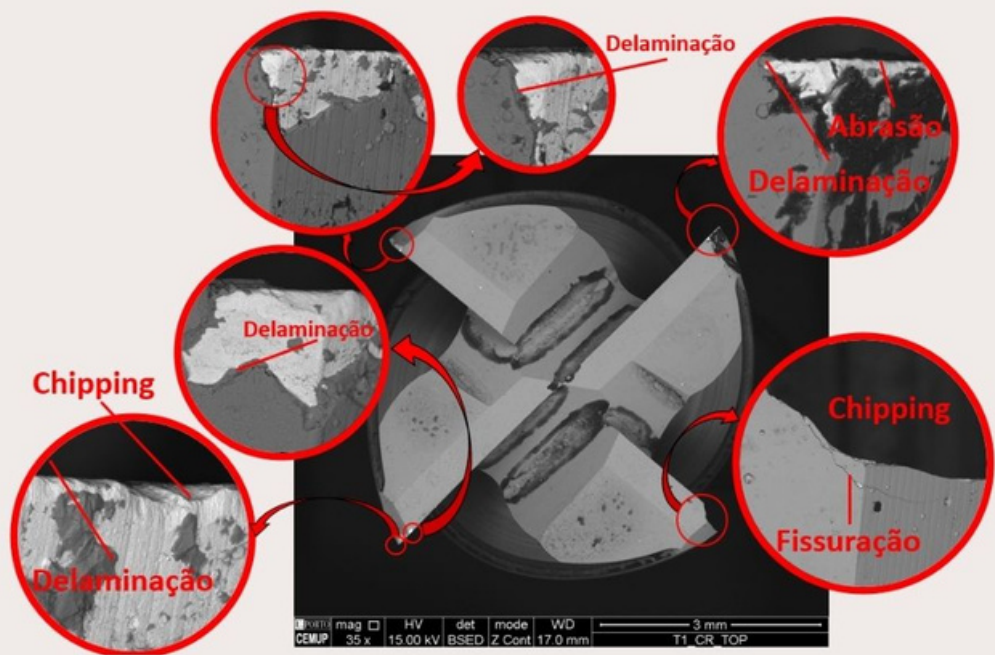
Comprimento de corte  
26,8 m



Velocidade de avanço  
750 mm/min

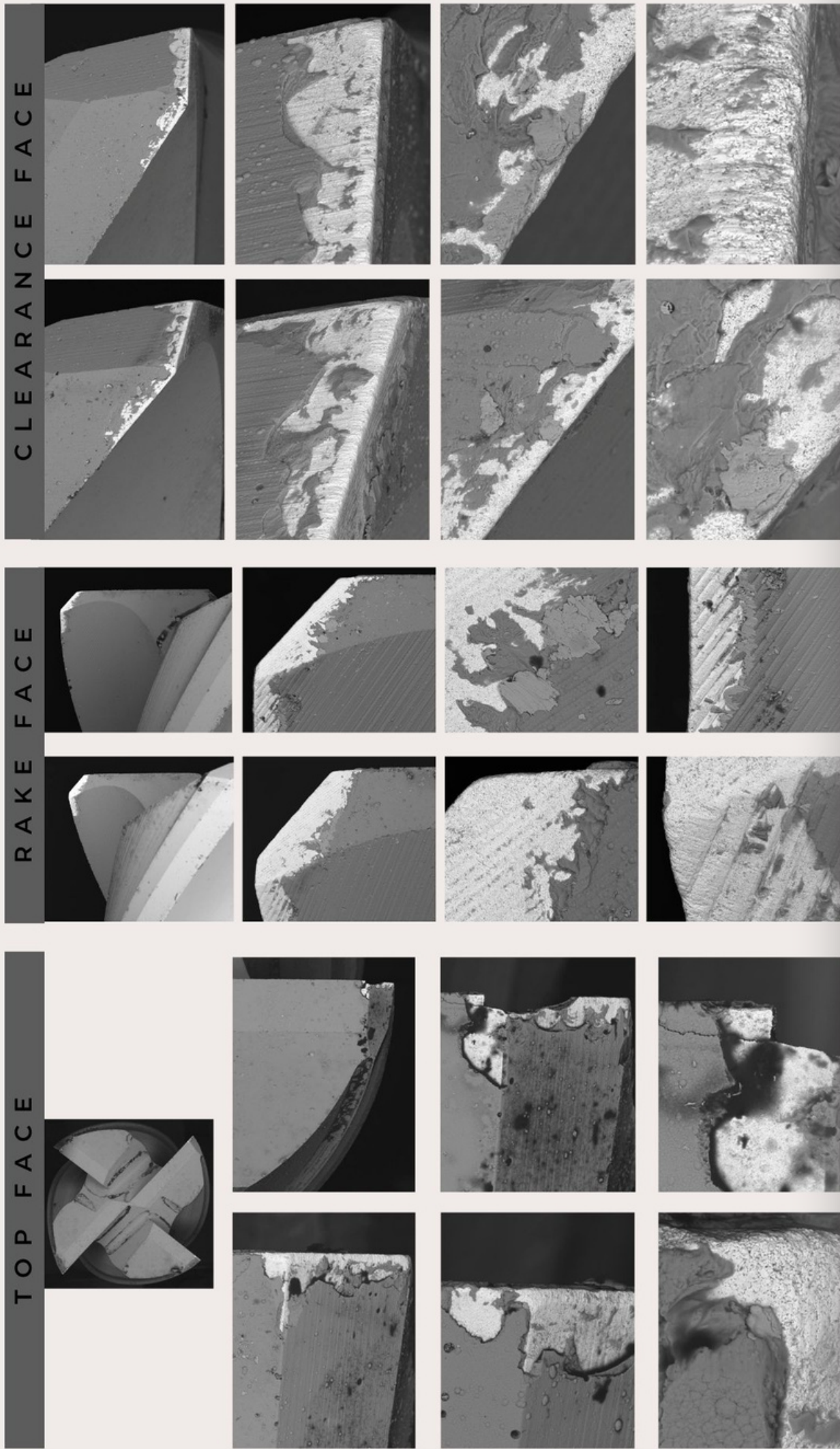


Mecanismos de desgaste  
Abrasão, chipping, delaminação, fissuração



COMPRESTIMENTO

T 2 - T 1 L 5 4 F 7 5 0 V 1 2 6



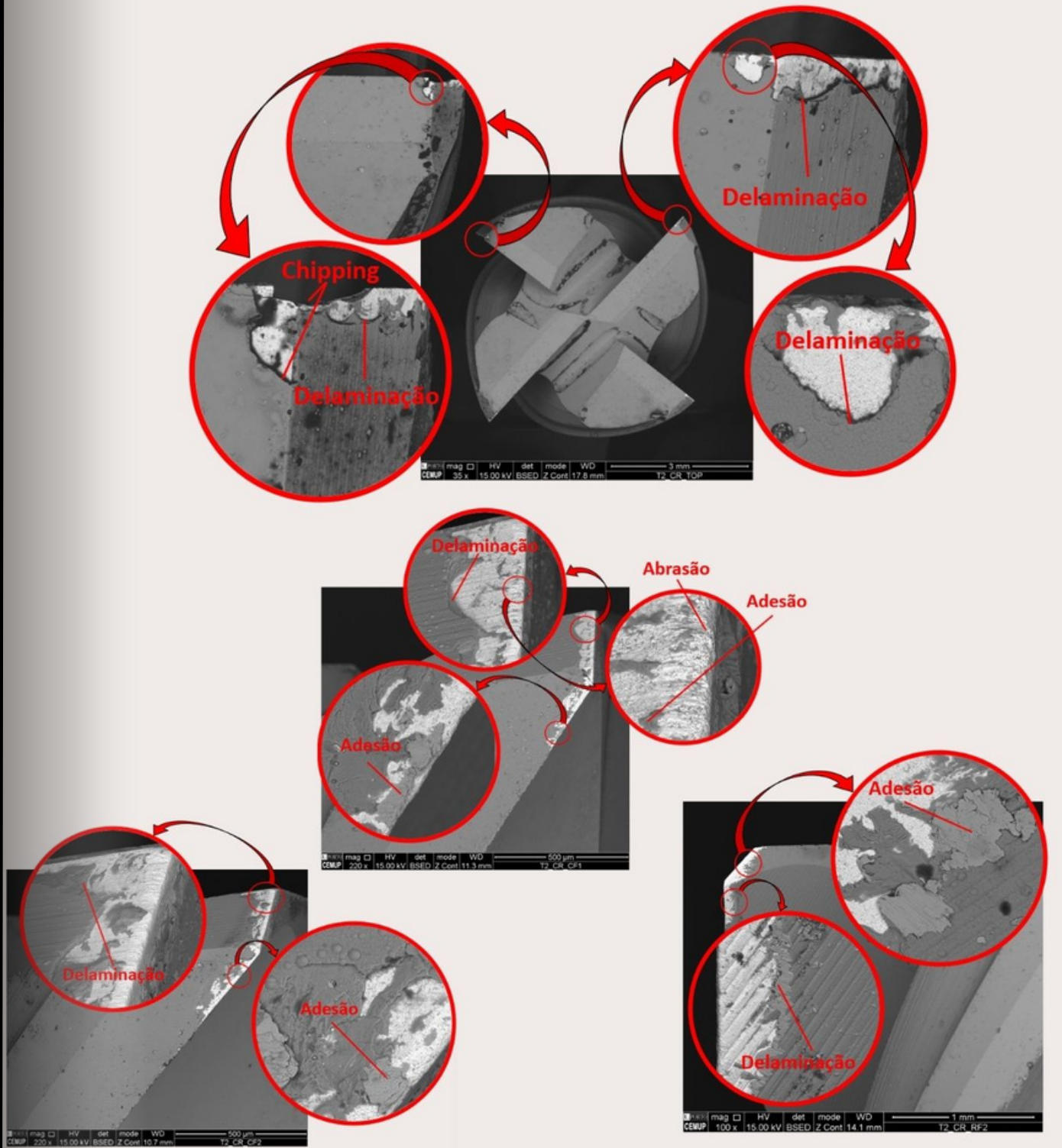
Comprimento de corte  
53,6 m



Velocidade de avanço  
750 mm/min

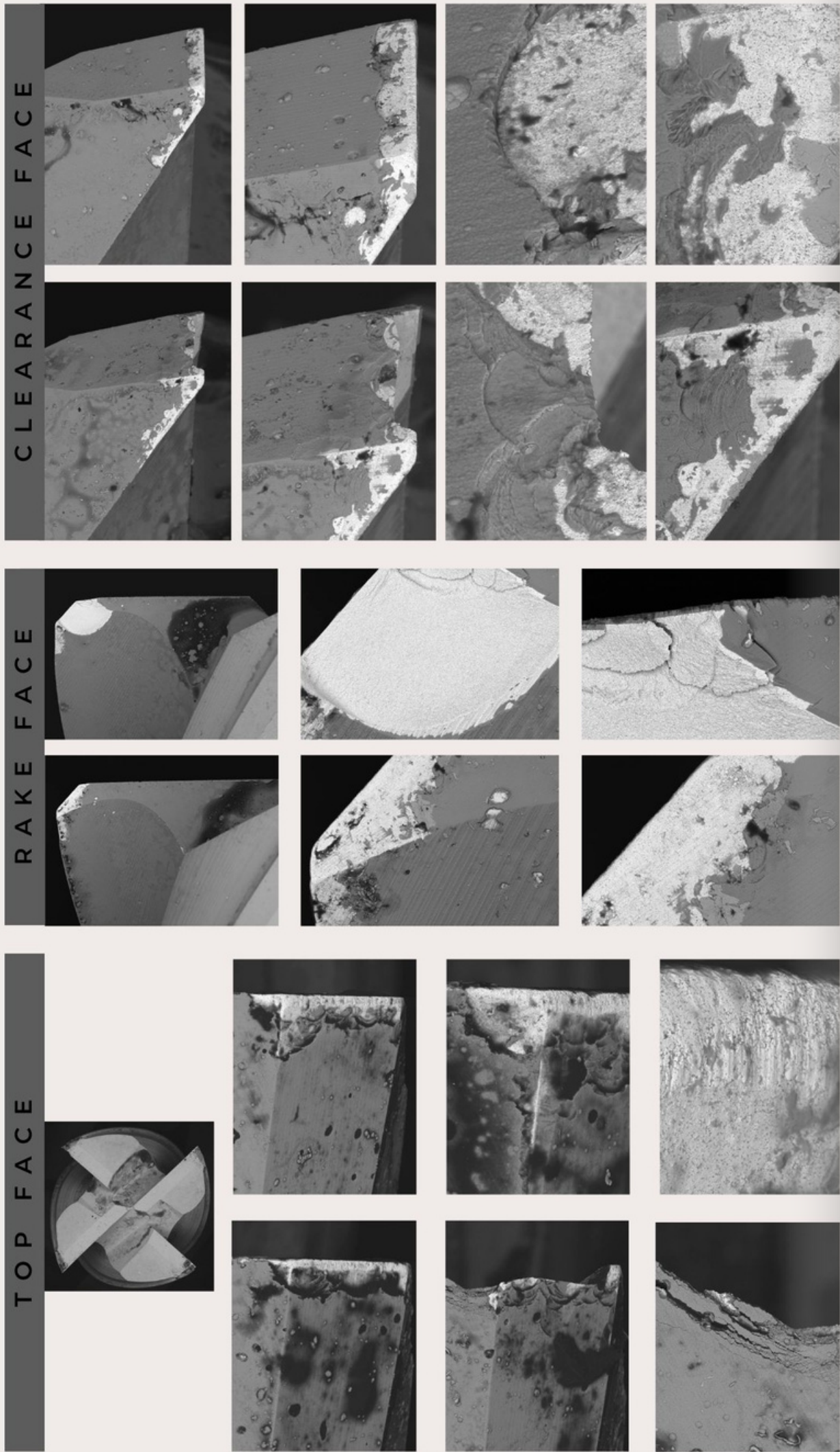


Mecanismos de desgaste  
Abrasão, adesão, chipping, delaminação



COMPREVESTIMENTO

T 3 - T 1 L 7 4 F 7 5 0 V 1 2 6



**Comprimento de corte**  
73,7 m



**Velocidade de avanço**  
750 mm/min

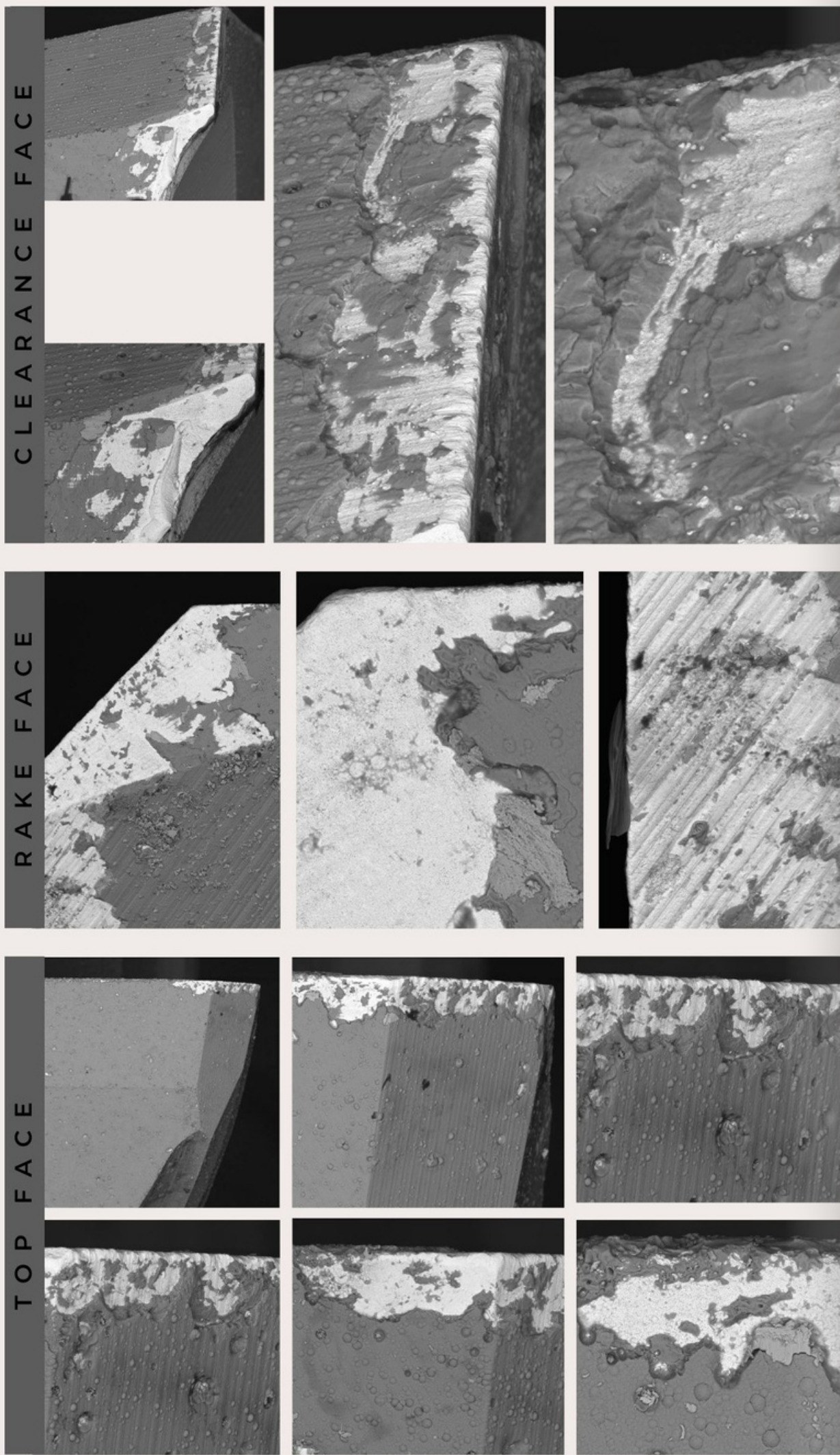


**Mecanismos de desgaste**  
Abrasão, adesão, chipping, delaminação, fissuração



COMPREVESTIMENTO

T 4 - T 1 L 2 7 F 1 5 0 0 V 1 2 6



**Comprimento de corte**  
26,8 m



**Velocidade de avanço**  
1500 mm/min

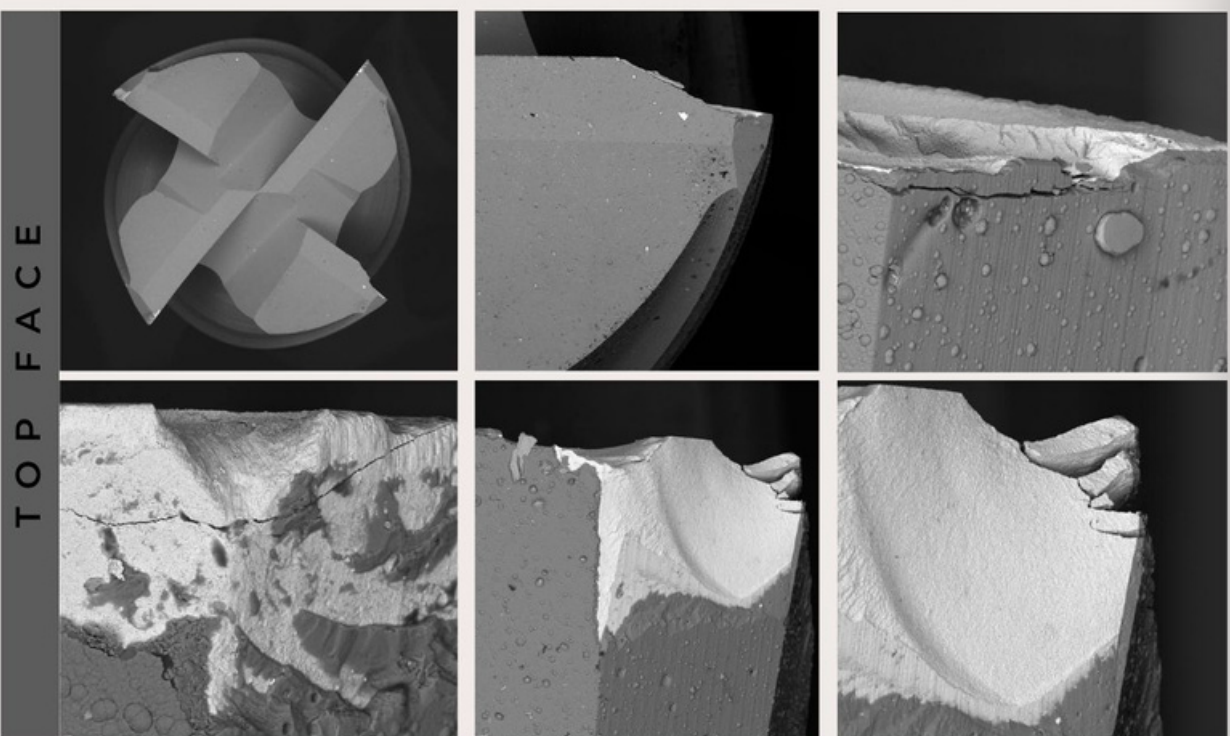
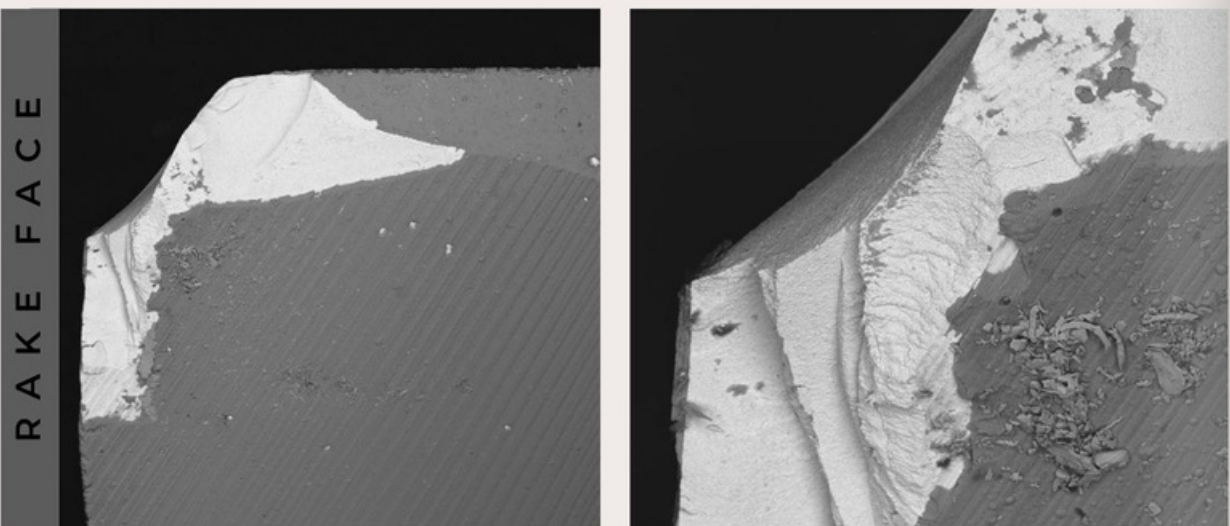
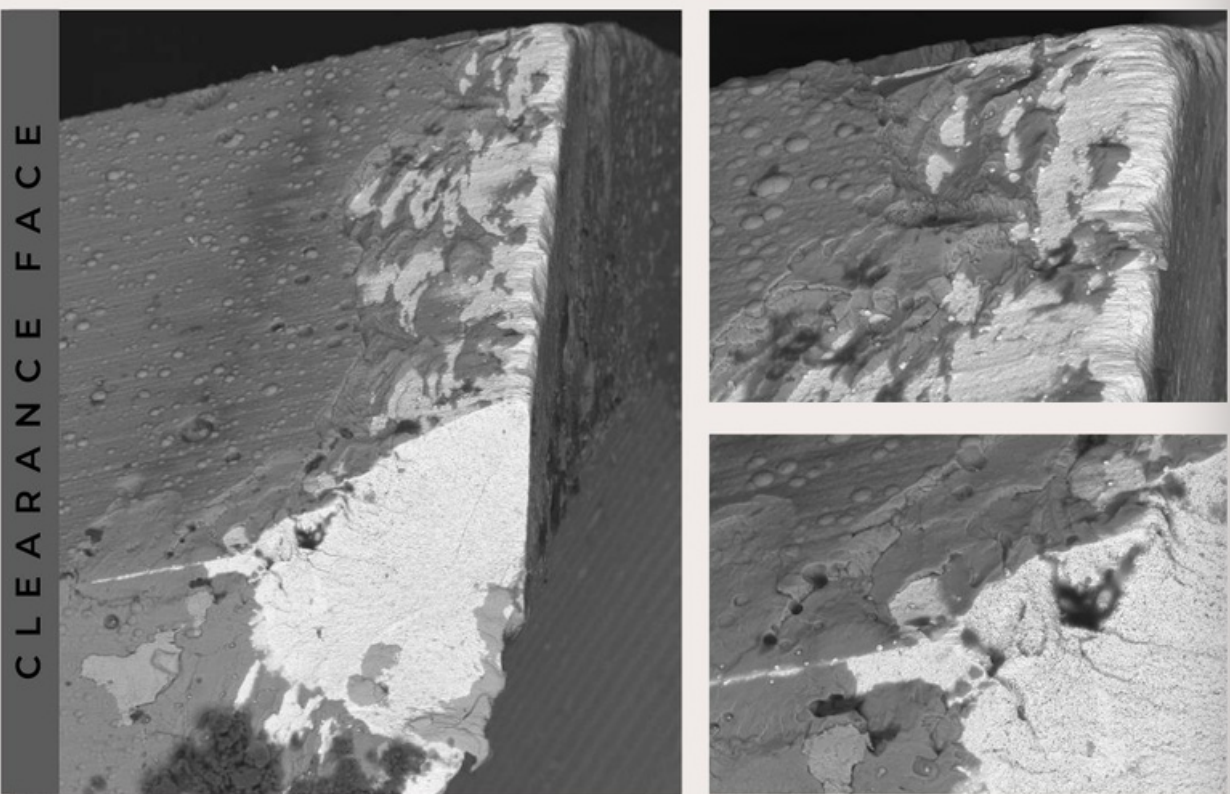


**Mecanismos de desgaste**  
Abrasão, adesão, chipping, delaminação



COMPREVESTIMENTO

T5 - T1 L54F1500V126



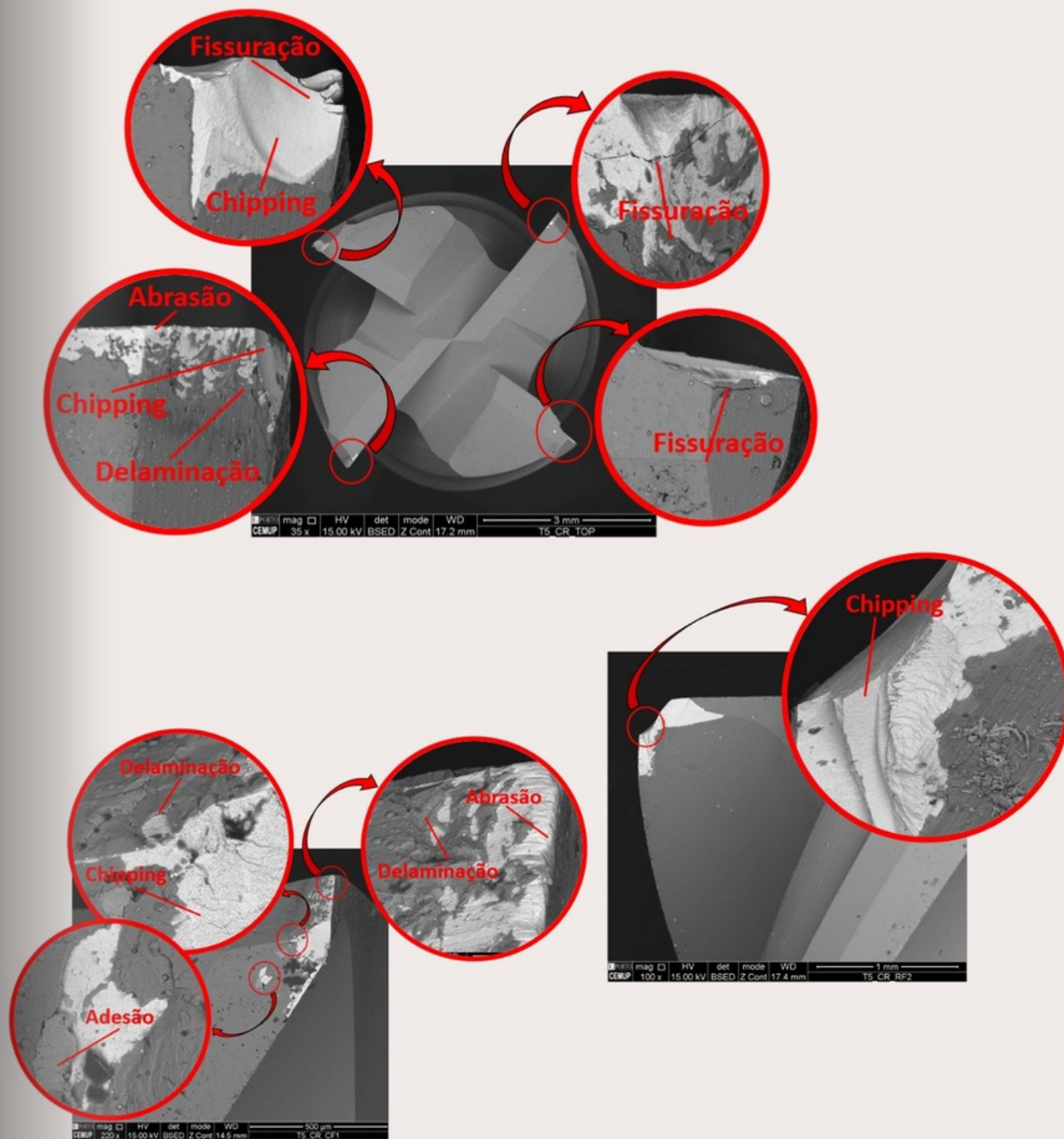
**Comprimento de corte**  
53,6 m



**Velocidade de avanço**  
1500 mm/min



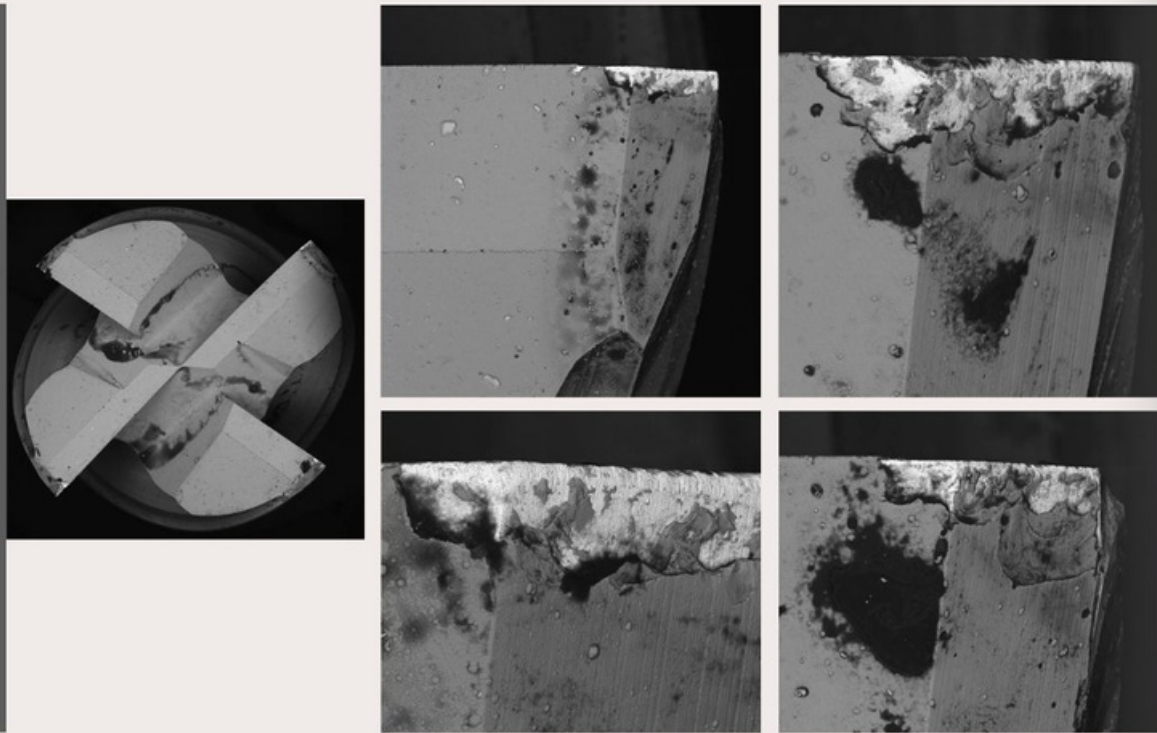
**Mecanismos de desgaste**  
Abrasão, adesão, chipping, delaminação, fissuração



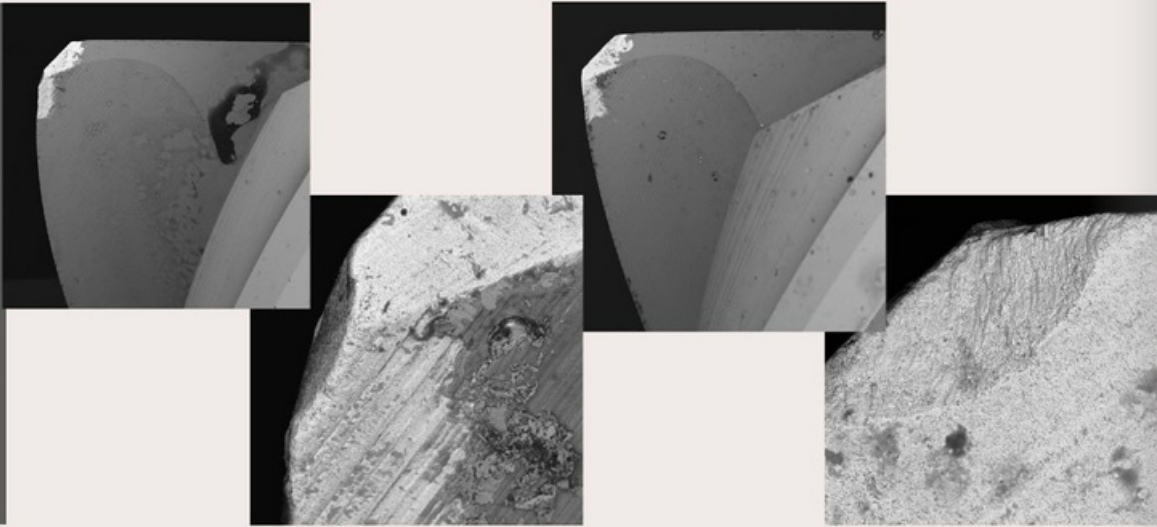
COMPRESTIMENTO

T6 - T1L74F1500V126

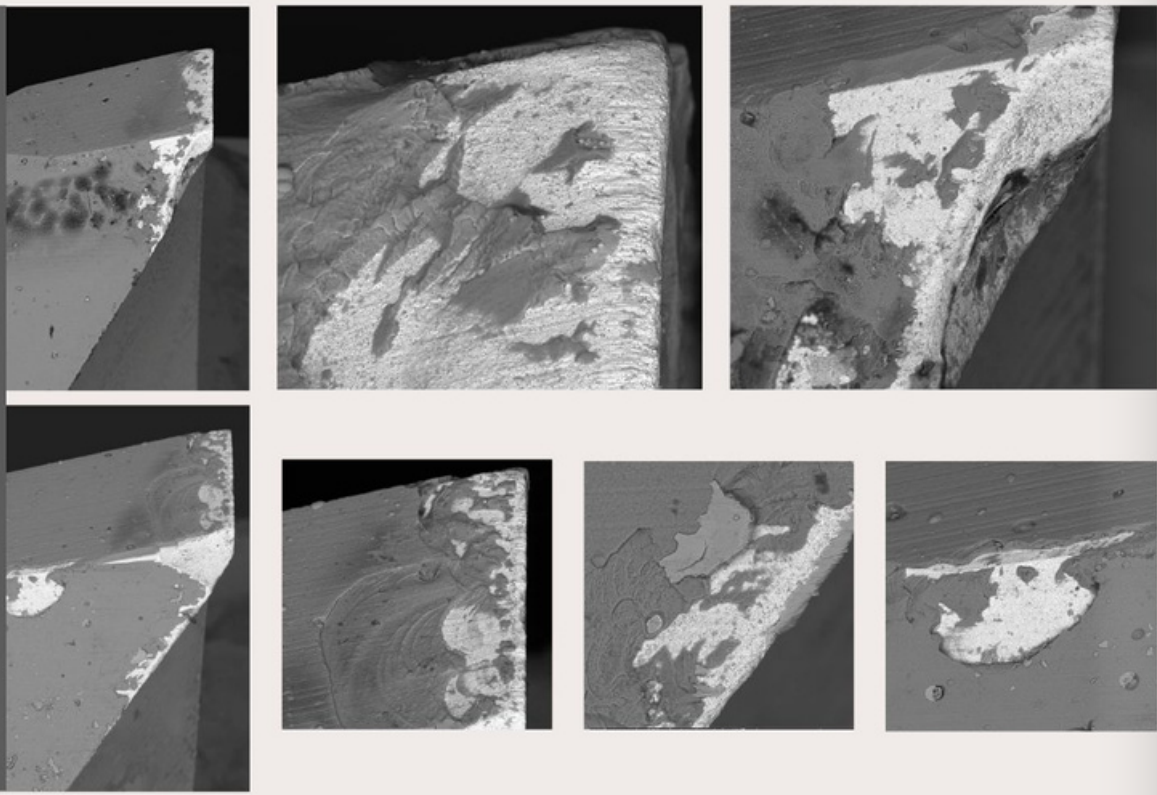
TOP FACE



RAKE FACE



CLEARANCE FACE



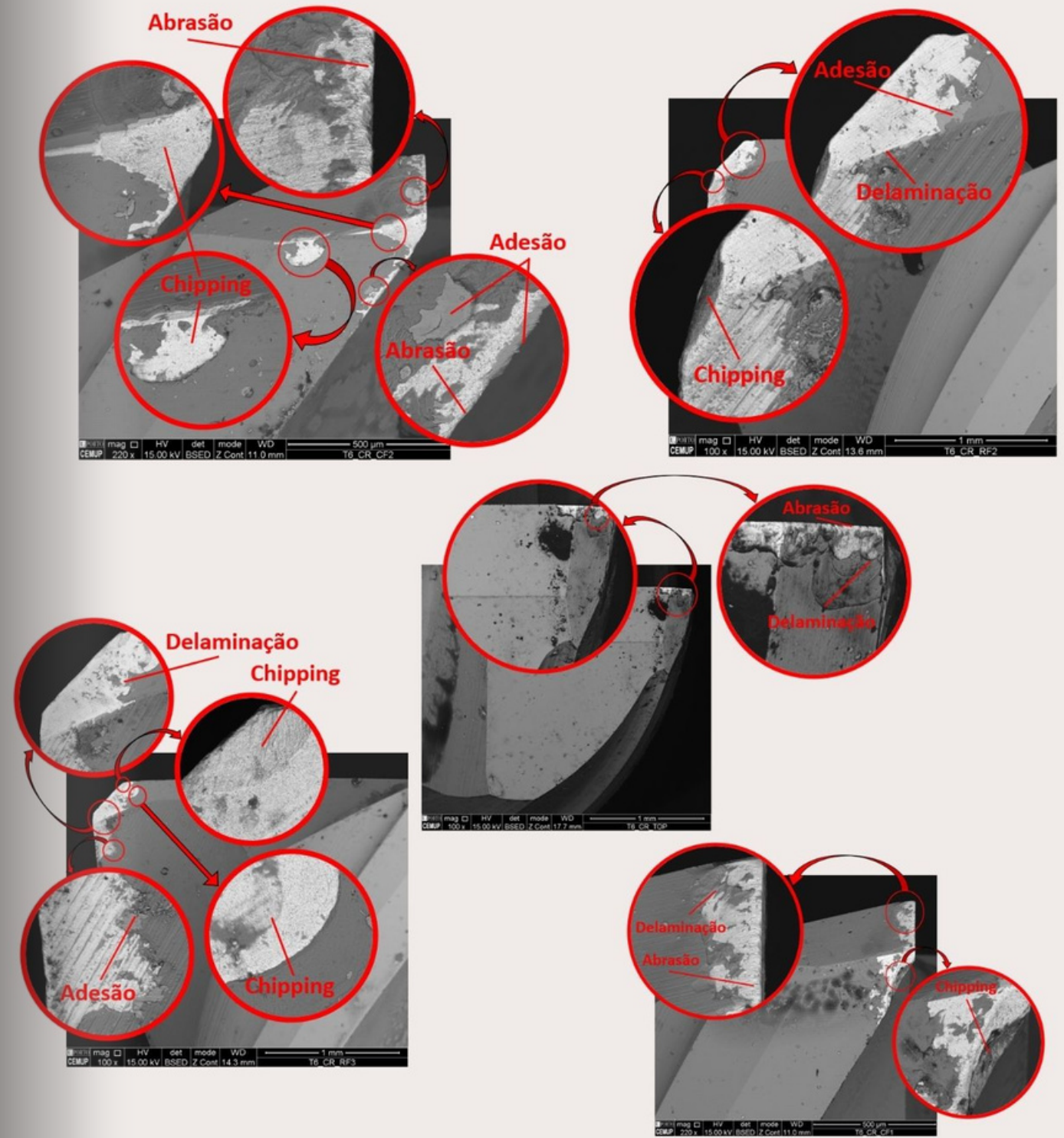
Comprimento de corte  
73,7 m



Velocidade de avanço  
1500 mm/min

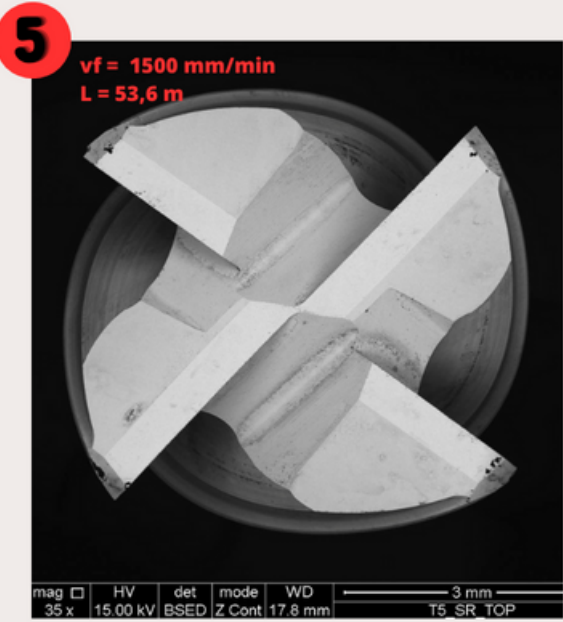
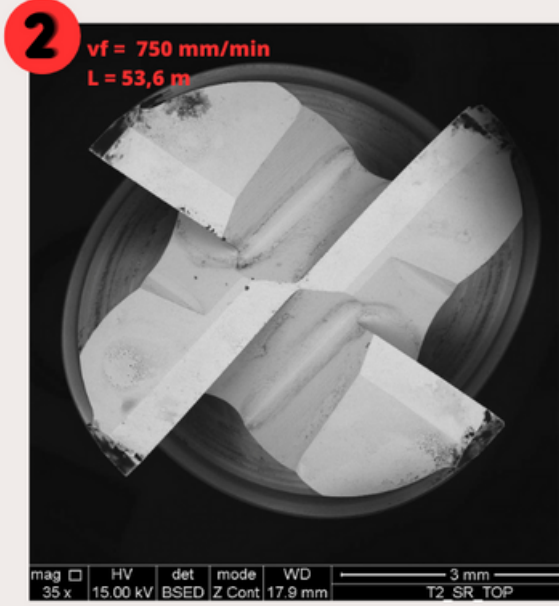


Mecanismos de desgaste  
Abrasão, adesão, chipping, delaminação



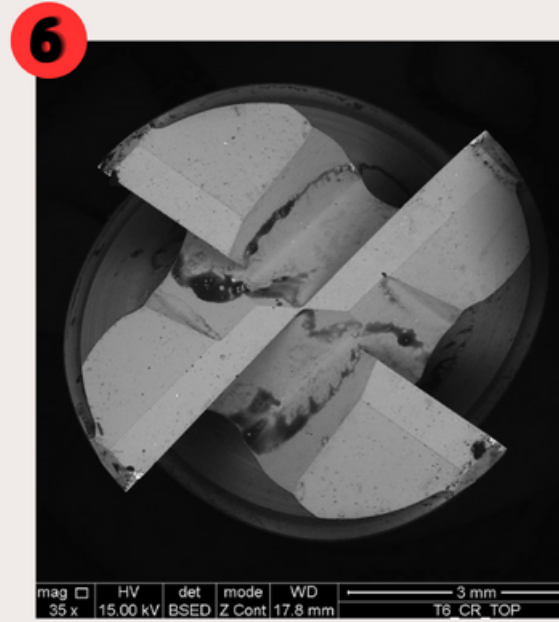
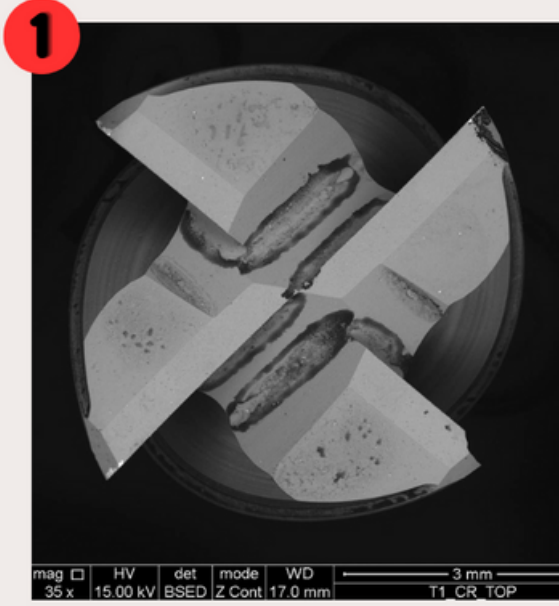
COMPRIMENTO DE AVANÇO

TOP FACE - AMPLIAÇÃO 35X



SEM REVESTIMENTO

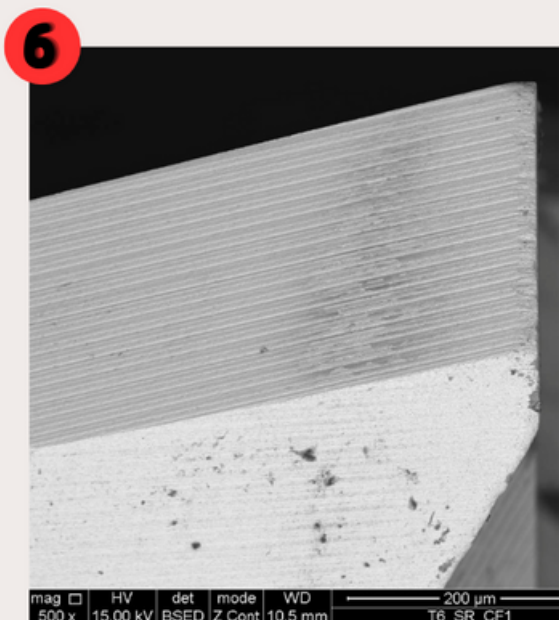
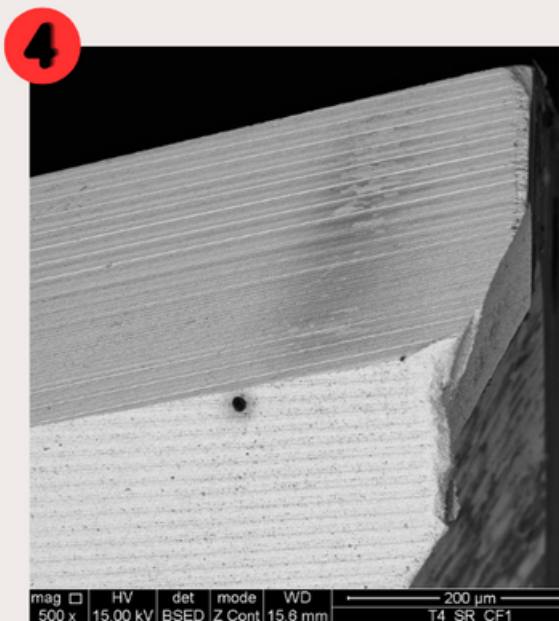
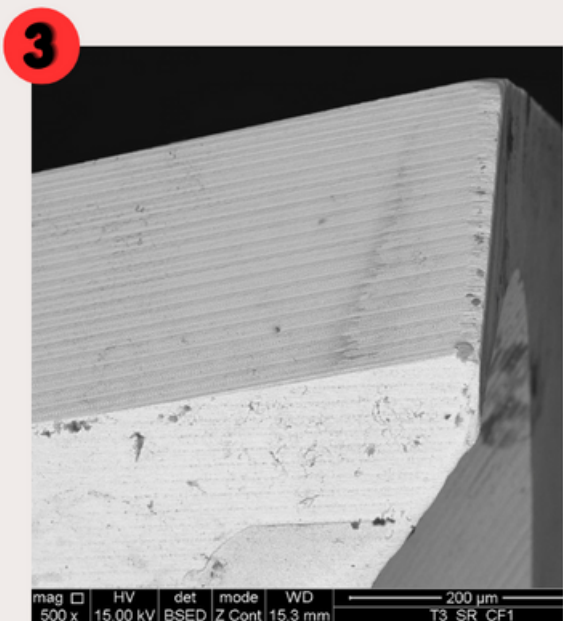
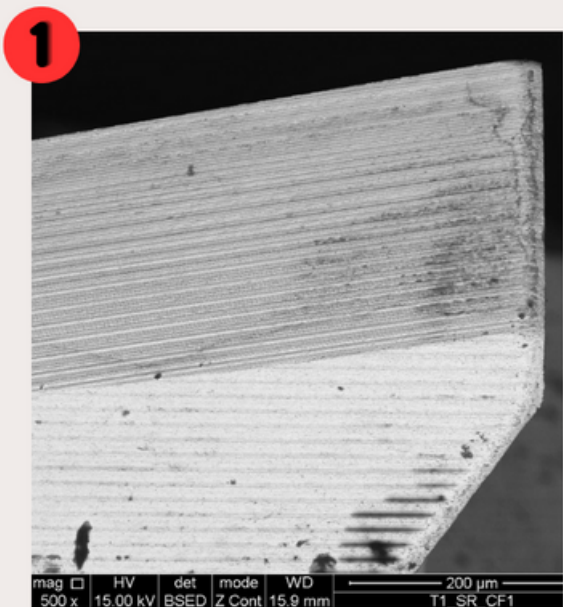
COM REVESTIMENTO



TOP FACE - AMPLIAÇÃO 35X

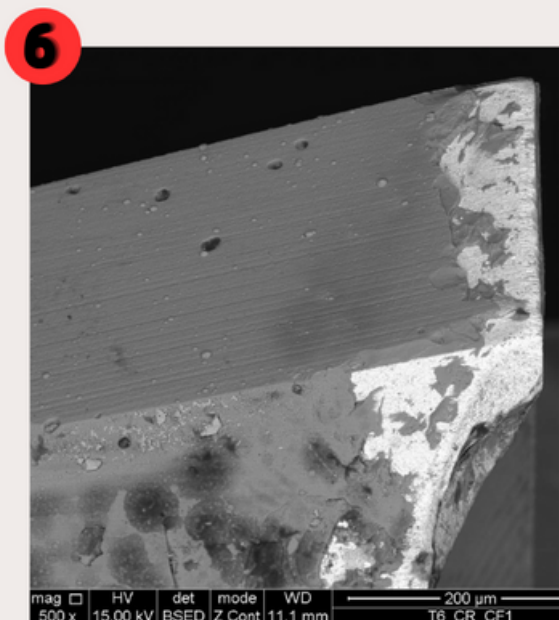
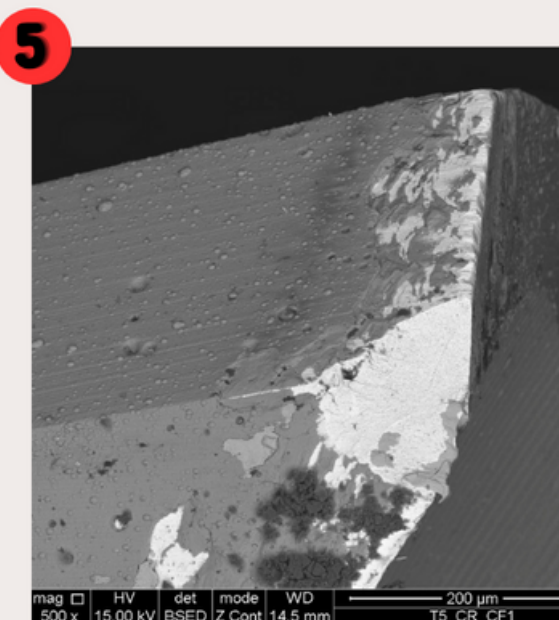
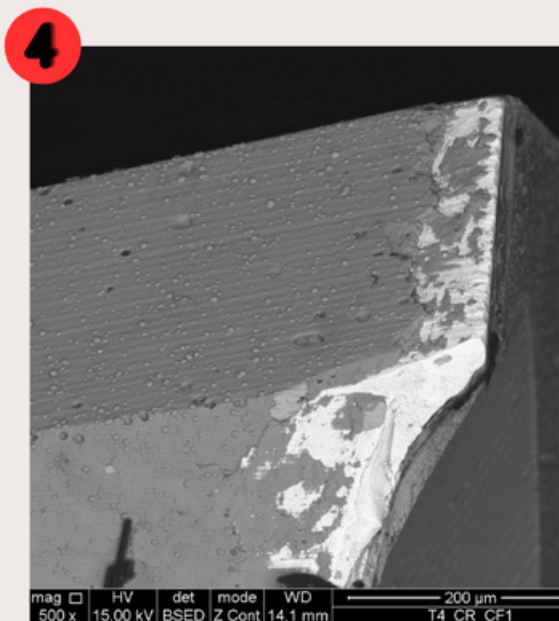
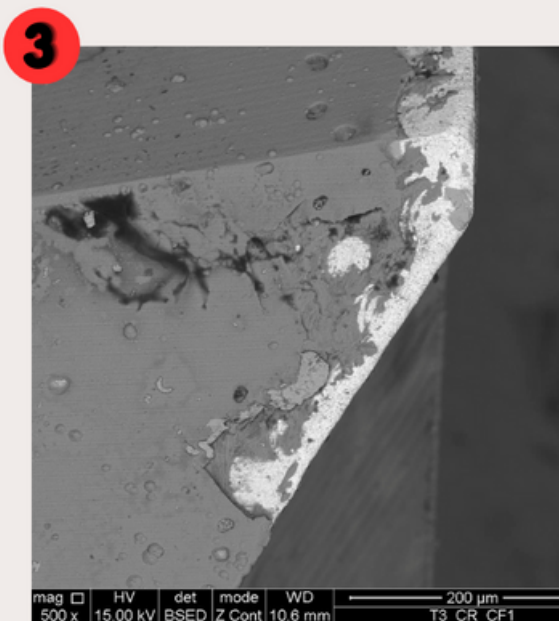
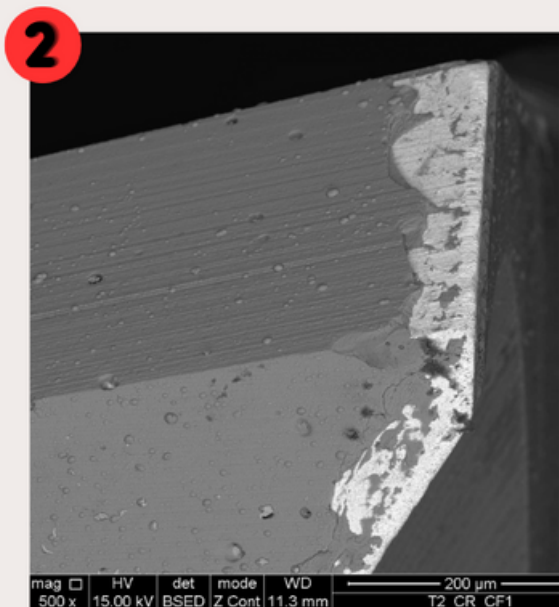
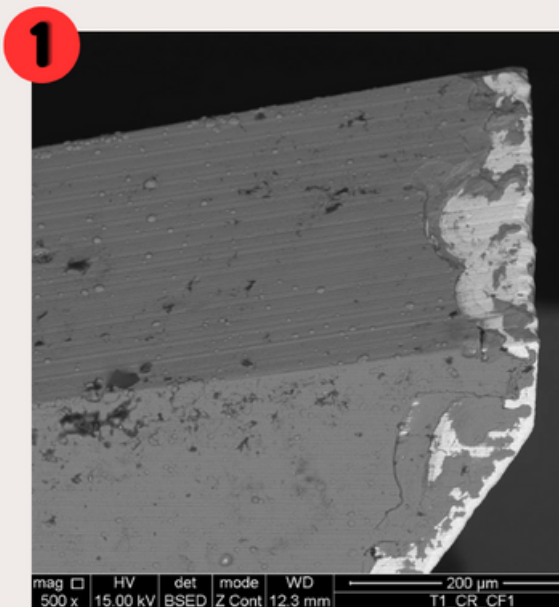
Considere-se os mesmos parâmetros para as seguintes imagens, com a numeração correspondente.

CLEARANCE FACE - AMPLIAÇÃO 500X



SEM REVESTIMENTO

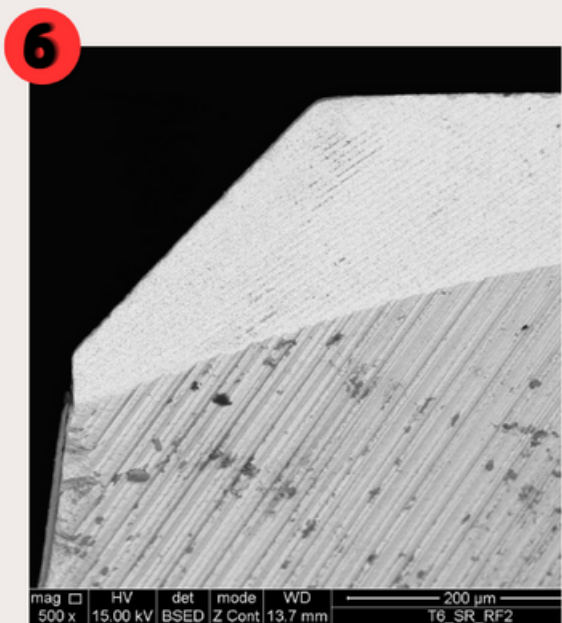
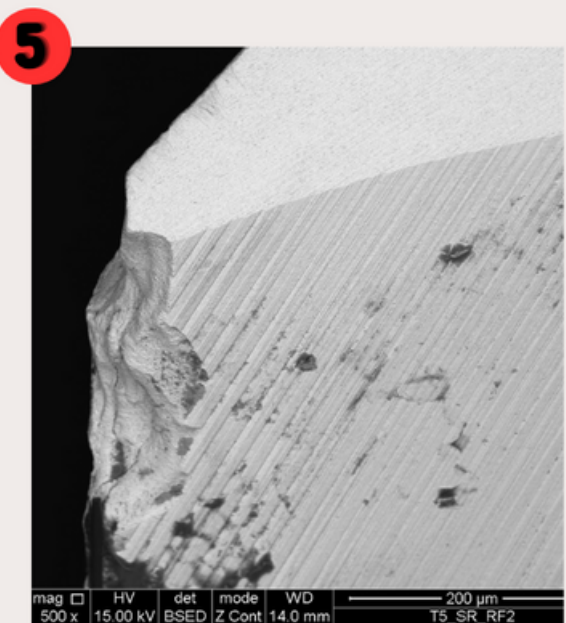
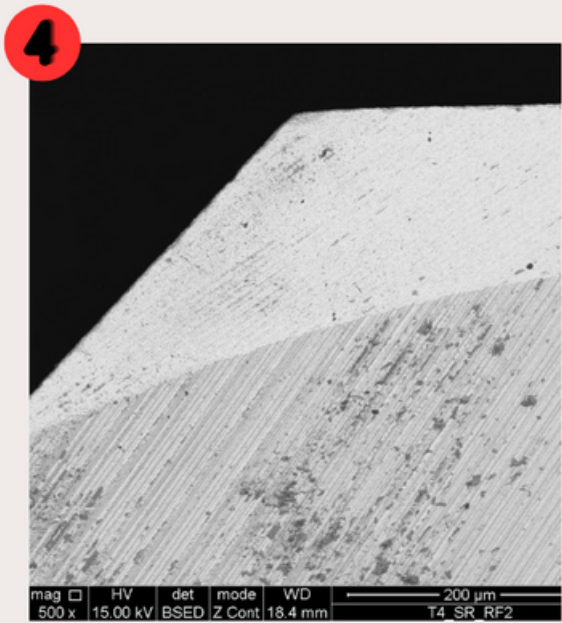
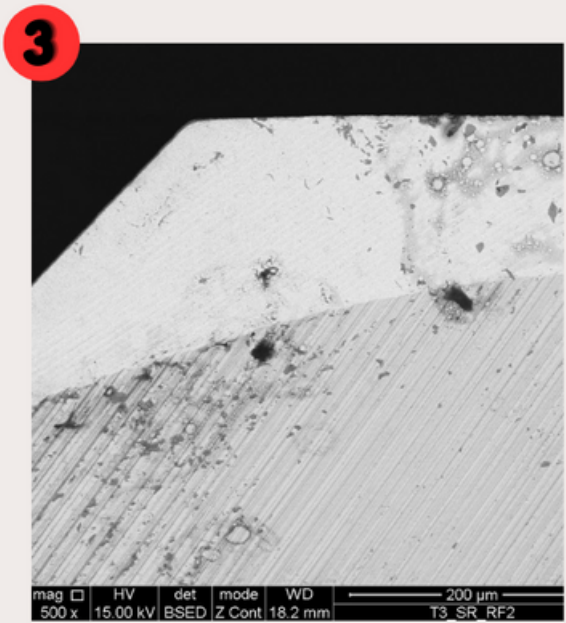
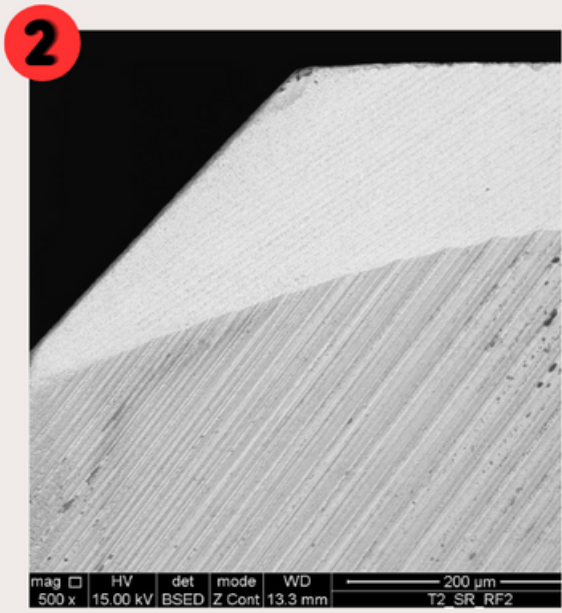
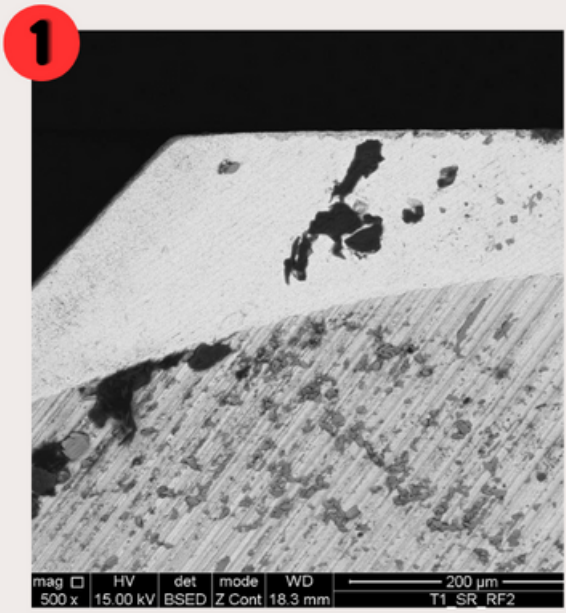
COM REVESTIMENTO



CLEARANCE FACE - AMPLIAÇÃO 500X

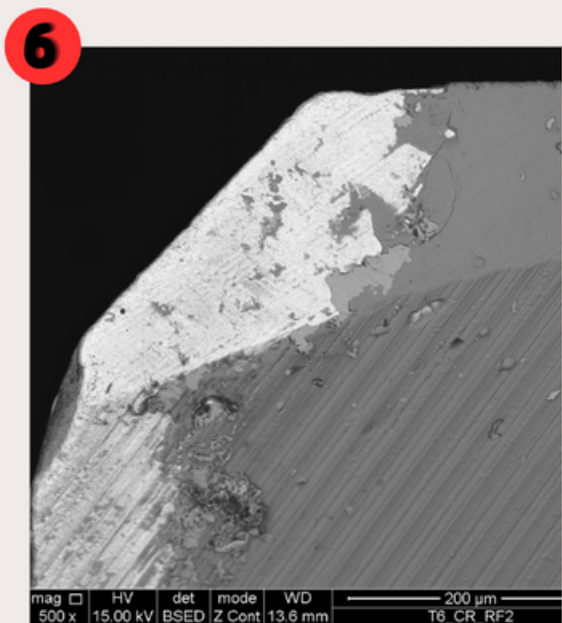
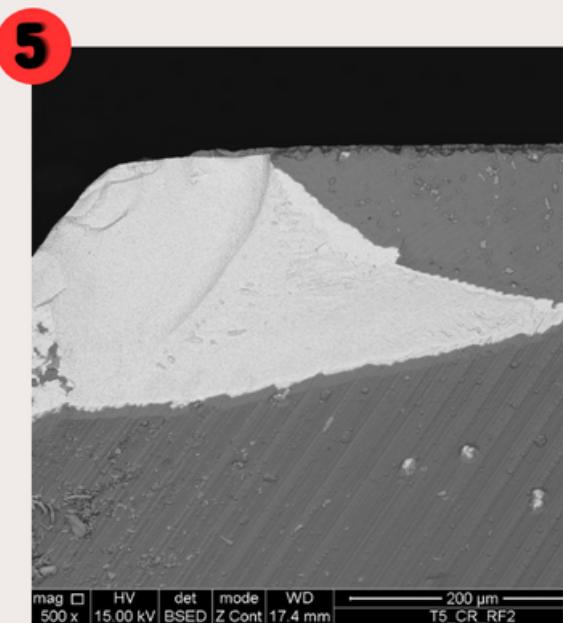
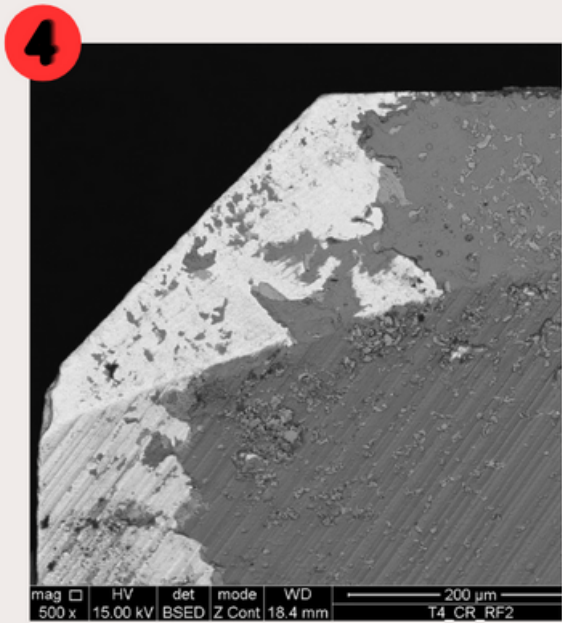
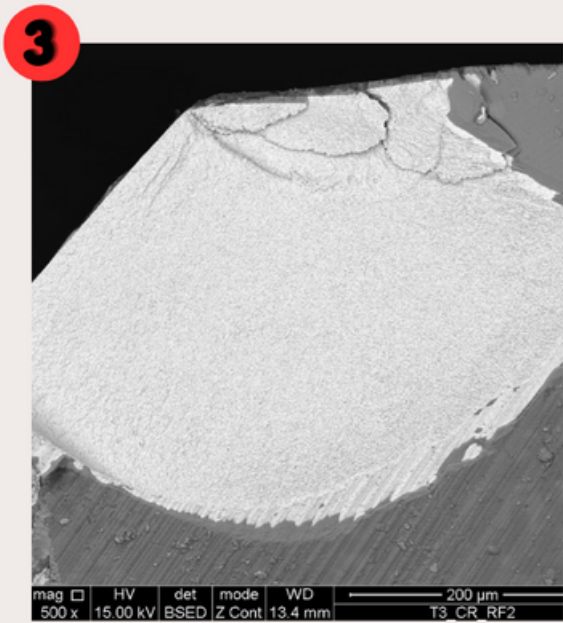
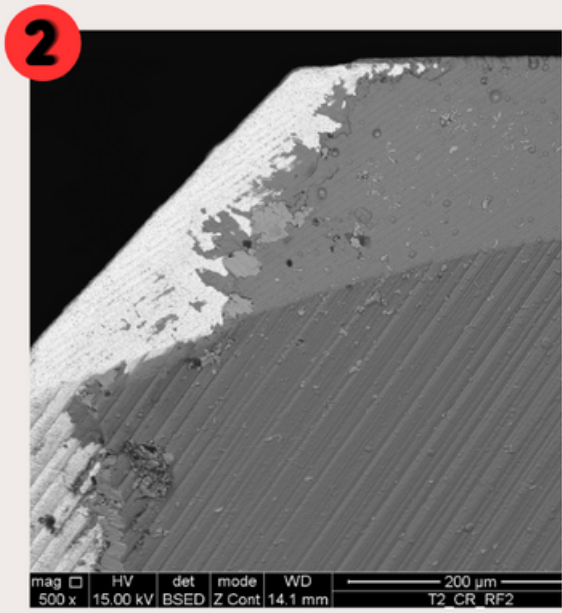
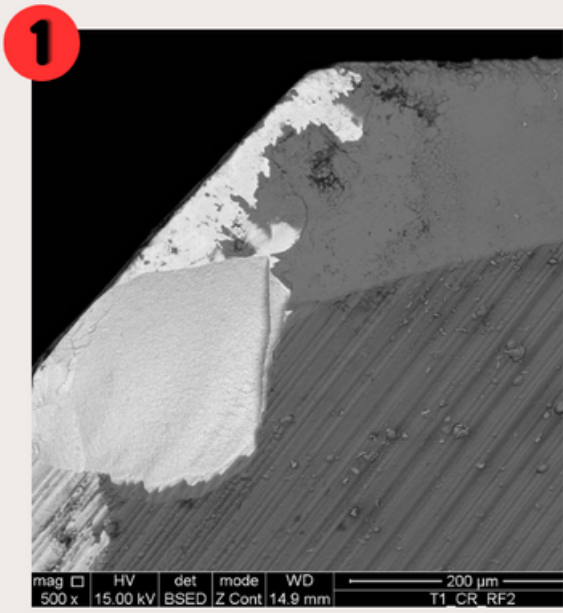
Considere-se os mesmos parâmetros para as seguintes imagens, com a numeração correspondente.

RAKE FACE - AMPLIAÇÃO 500X



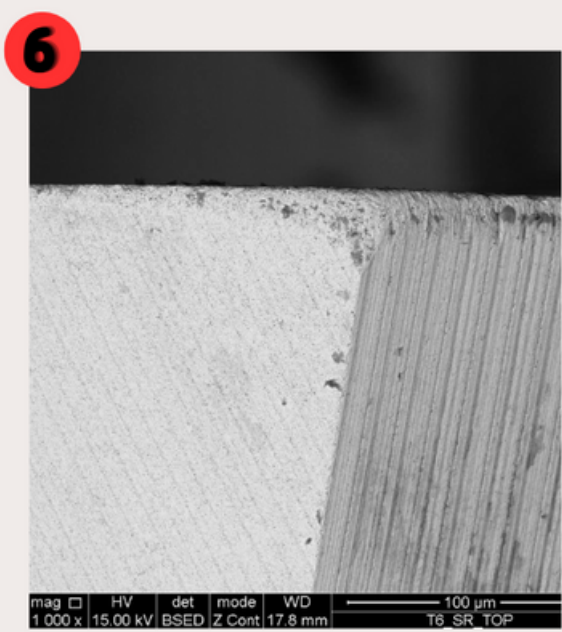
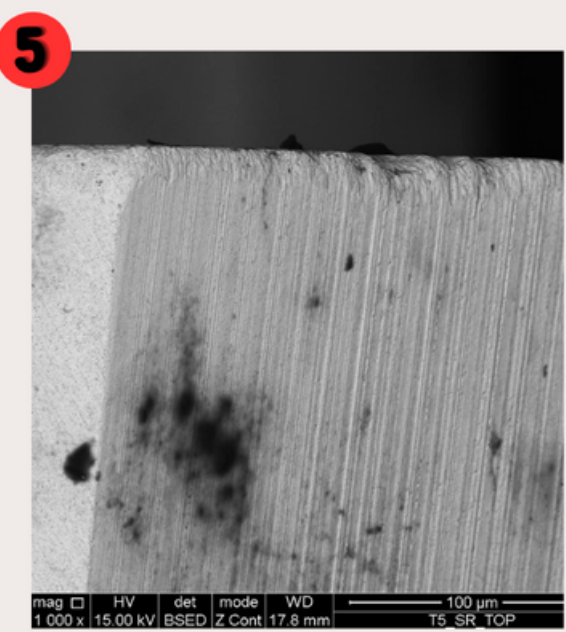
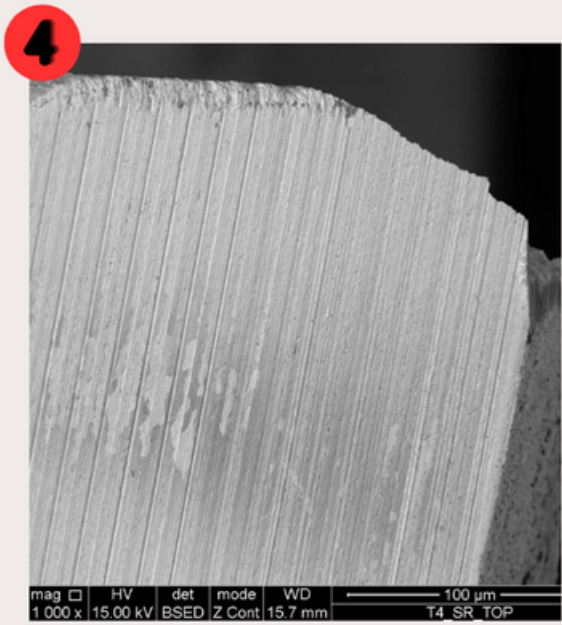
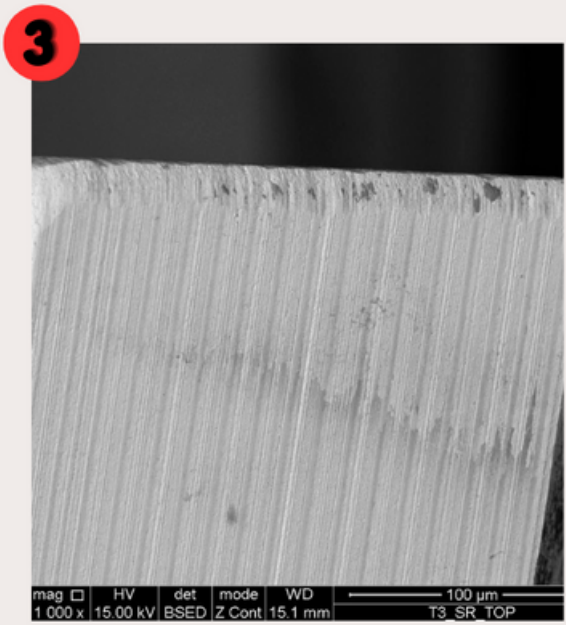
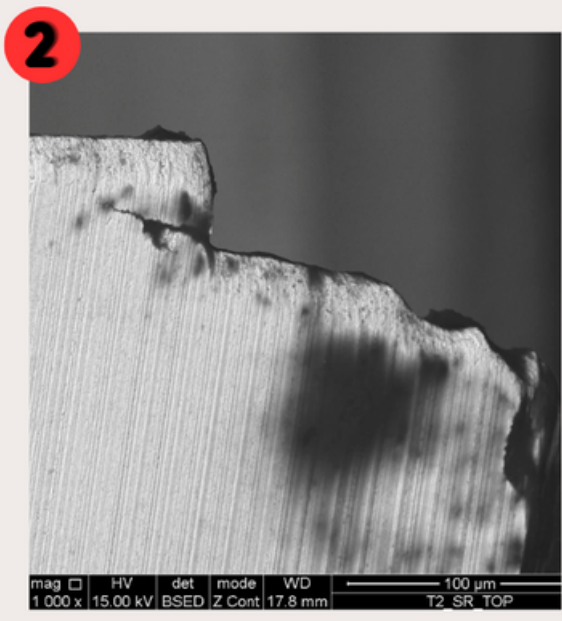
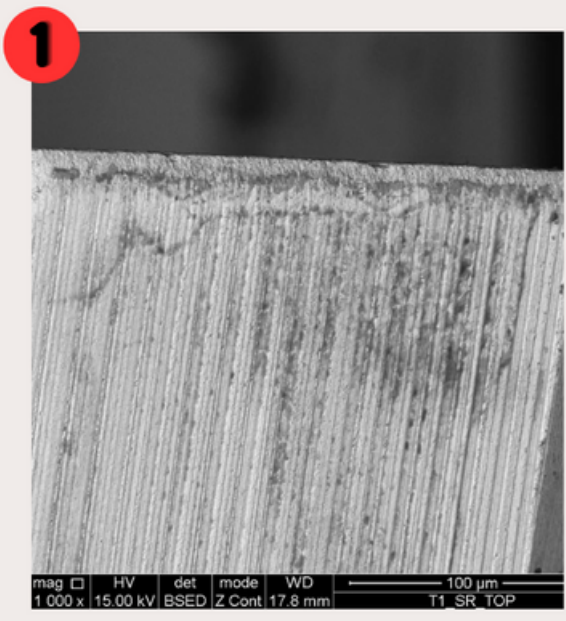
SEM REVESTIMENTO

COM REVESTIMENTO



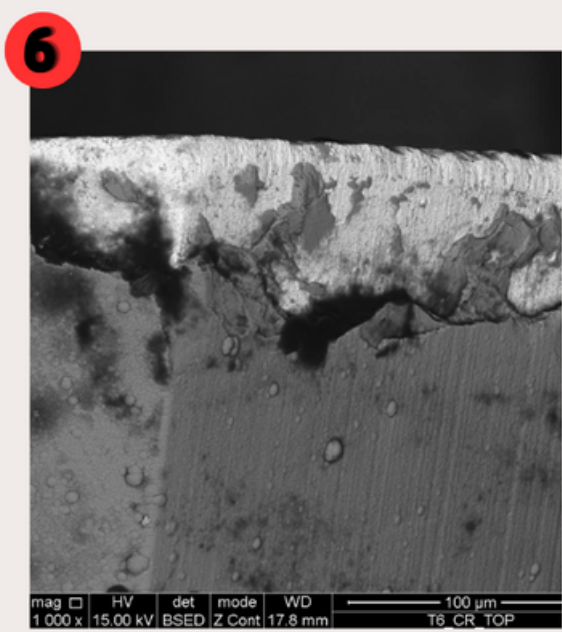
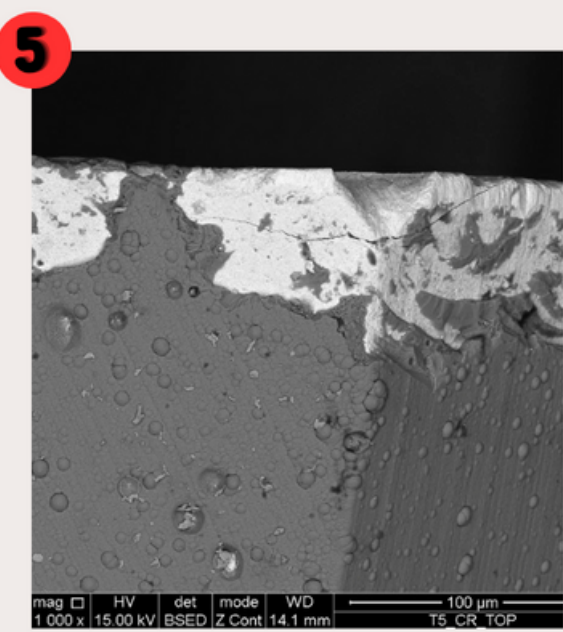
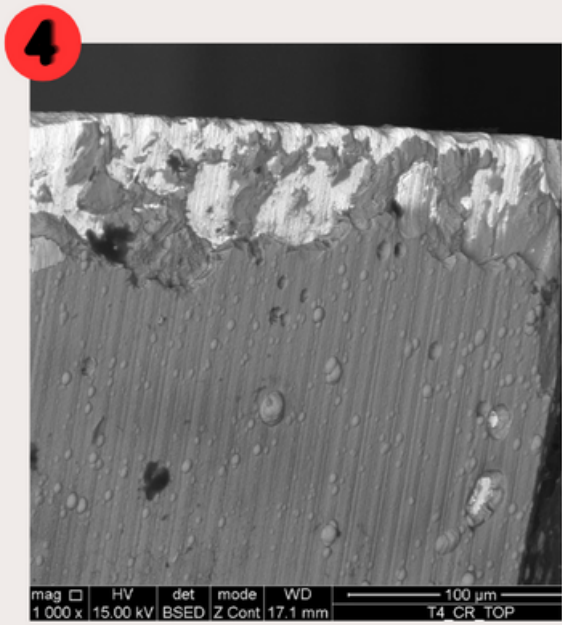
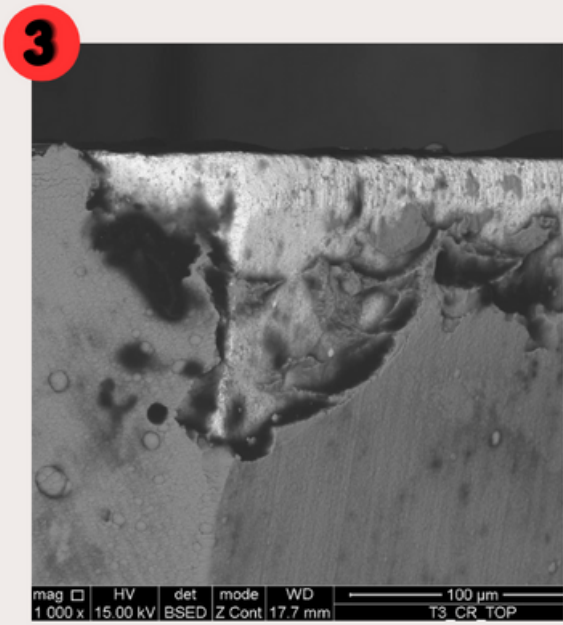
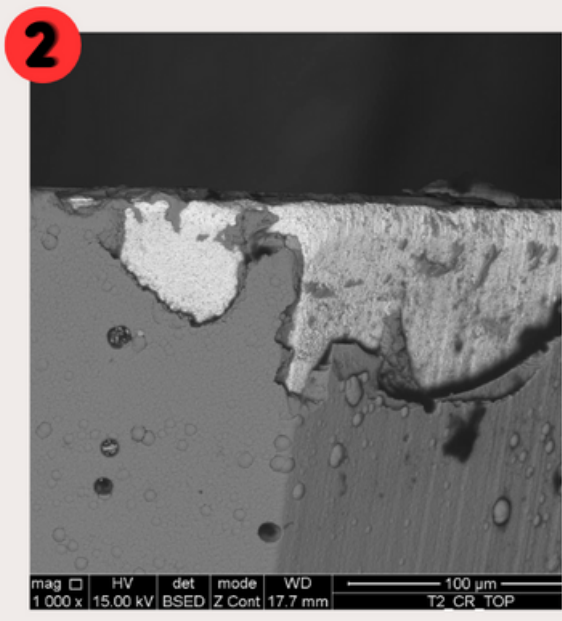
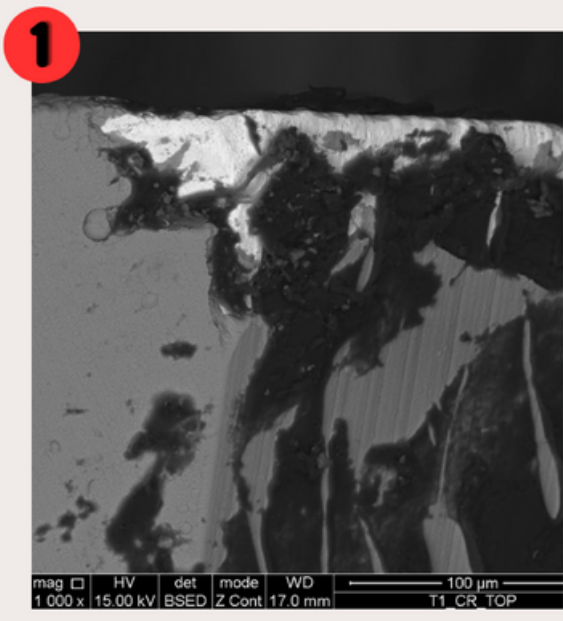
RAKE FACE - AMPLIAÇÃO 500X

TOP FACE - AMPLIAÇÃO 1000X



SEM REVESTIMENTO

COM REVESTIMENTO

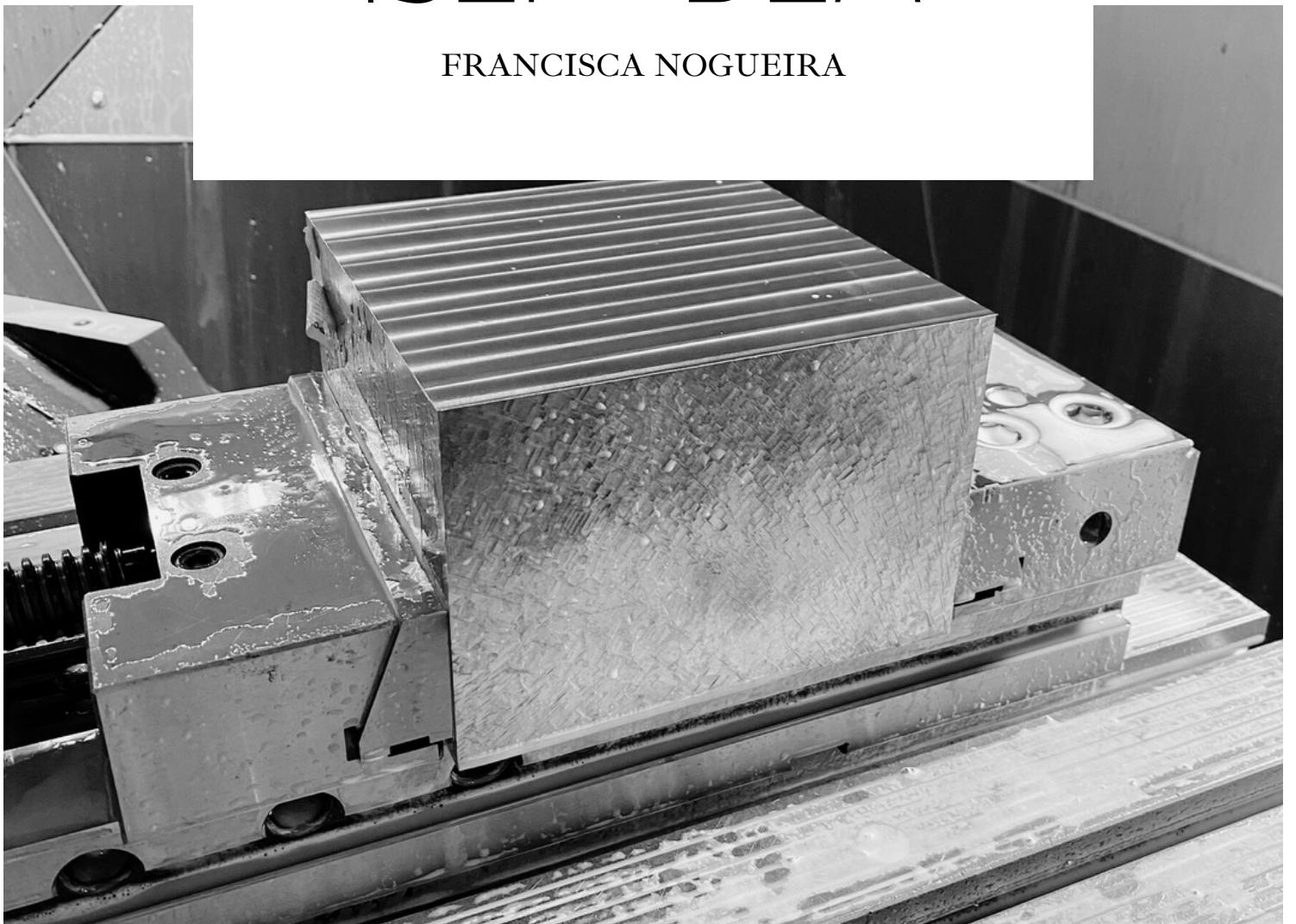


TOP FACE - AMPLIAÇÃO 1000X



# ISEP - DEM

FRANCISCA NOGUEIRA



## **ANEXO A - FICHA TÉCNICA AMPCOLOY®83**

# Technical Data Sheet

## AMPCOLOY<sup>®</sup> 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 <sup>3</sup>	8.26
Coefficient of expansion α	10 <sup>-6</sup> / K	17.5
Thermal conductivity λ	W / m ·K	106
Electrical conductivity γ	m / Ω · mm <sup>2</sup>	12.8
Electrical conductivity	% I.A.C.S.	22
Specific heat Cp	J / g ·K	0.38

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

AMPCOLOY<sup>®</sup> 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<sup>®</sup> 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 B - FICHA TÉCNICA RUGOSÍMETRO

MARSURF | MOBILE ROUGHNESS MEASUREMENT DEVICES



|  
- 0 +

**Mahr**  
**FEDERAL**

EXACTLY

## PRODUCTION-RELATED ROUGHNESS MEASURING. MOBILE WITH MARSURF

▶ | Wherever surface structures influence the function, processing or appearance of components or products, careful testing is essential. But how can surfaces be tested? At the start of the 20th Century, experts still had to test by eye and touch. A practiced eye can detect features in the  $\mu\text{m}$  range, and even the much maligned thumbnail test delivered perfectly acceptable results. Now however, we live in an age of exchangeable parts, fits and internationalization, where subjective tests like this are no longer adequate. Today, computer-aided measuring instruments provide objective data. Measurement and evaluation have become considerably easier. For decades, Mahr has been a worldwide pioneer in this area, as demonstrated by the company's numerous innovations and patented solutions in the field of roughness metrology. The interplay between the stylus, drive and measuring setup plays a key role in influencing the quality of surface measurement tasks. This is where Mahr's core expertise comes in, as demonstrated by the company's numerous innovations and patented solutions. Over this time, we have succeeded in perfecting the stylus method which is now widespread throughout the world. We can meet even the most demanding requirements for non-contact measurement, e.g. where extremely soft materials or ultra-short measuring times are involved, thanks to the range of optical sensors offered by MarSurf. Developed with Mahr quality, expertise and know-how, MarSurf is the solution for all your surface metrology needs.

## ▶ | MarSurf. Surface Measurement

<b>Important Definitions and Surface Parameters</b>	<b>4</b>
<b>Pocket Surf</b>	<b>5</b>
<b>Technical Data for Pocket Surf</b>	<b>5</b>
<b>Pocket Surf Probes</b>	<b>7</b>
<b>Application and Accessories</b>	<b>8</b>
<b>Perthometer</b>	<b>10</b>
<b>MarSurf Workstation</b>	<b>13</b>
<b>Application Aids</b>	<b>14</b>
<b>MarSurf</b>	<b>15</b>
<b>Pick-ups for Mobile Roughness Measuring Instruments</b>	<b>17</b>
<b>Drive Units for Mobile Roughness Measuring Instruments</b>	<b>19</b>
<b>Applications with PFM Drive Units</b>	<b>20</b>
<b>Accessories</b>	<b>21</b>
<b>Perthometer Sets for Mobile Operation</b>	<b>23</b>

## Important Definitions and Surface Parameters

**Real surface** separates a body from the surrounding medium. (DIN EN ISO 4287)

**Stylus instrument** enables two-dimensional tracing of a surface. The stylus is traversed normal to the surface at constant speed. (DIN EN ISO 3274)

**Traced Profile** is the enveloping profile of the real surface acquired by means of a stylus instrument.

**Parameters** usually are defined over the sampling length. An average parameter estimate is calculated by taking the arithmetic mean of the parameter estimates from all the individual sampling lengths. For roughness profile parameters the standard number of sampling lengths is five.

### $R_a$ Mean roughness DIN EN ISO 4287, ASME B46.1

**Roughness average  $R_a$**  is the arithmetic average of the absolute values of the roughness profile ordinates

$$R_a = \frac{1}{L_0} \int_0^{L_0} |Z(x)| dx$$

$Z(x)$  = profile ordinates of the roughness profile.  
 $R_a$  is also called AA and CLA,

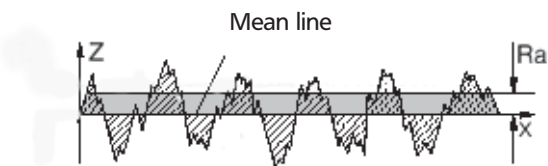
**Traversing length  $l_t$**  is the overall length traveled by the stylus when acquiring the traced profile. It is the sum of the pre-travel, evaluation length  $l_n$  and post-travel.

**Cutoff  $\lambda_c$**  of a profile filter determines which wavelengths belong to roughness and which ones to waviness.

**Sampling length  $l_r$**  is the reference for roughness evaluation. Its length is equal to the cutoff wavelength  $\lambda_c$ .

**Evaluation length  $l_n$**  is that part of the traversing length  $l_t$  over which the values of surface parameters are determined. The standard roughness evaluation length comprises five consecutive sampling lengths.

**Pre-travel** is the first part of the traversing length  $l_t$ .  
**Post-travel** is the last part of the traversing length  $l_t$ .



### $R_z$ , $R_{z\max}$ Roughness depth DIN ISO 4287, ASME B46.1

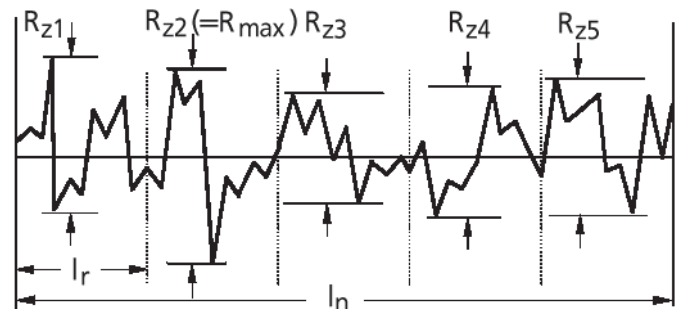
**Single roughness depth  $R_{z1}$**  is the vertical distance between the highest peak and the deepest valley within a sampling length

**Mean roughness depth  $R_z$**  is the arithmetic mean value of the single roughness depths  $R_{z1}$  of consecutive sampling lengths:

$$R_z = \frac{1}{5} (R_{z1} + R_{z2} + \dots + R_{z5})$$

The  $R_z$  definition is identical to the definition in DIN4768: 1990. The ten point height  $R_z$  as well as the parameter symbol  $R_y$  of ISO 4287:1984 has been canceled

**Maximum roughness depth  $R_{z\max}$**  is the the largest single roughness depth with the evaluation length. (DIN EN ISO 4288;  $R_{z\max}$  is also called  $R_{z1\max}$ ).



### Selection of cutoff according to DIN EN ISO 4287, ASME B46.1

Periodic profile	Non-periodic profile	Cutoff	Sample/Evaluation length
$R_{sm}$ (mm/in)	$R_z$ ( $\mu\text{m}/\mu\text{in}$ )	$R_\lambda$ (mm/in)	$l_r / l_n$ (mm/in)
> 0.13 to 0.4/.005 to .016	> 0.5 to 10/20 to 400	> 0.1 to 2/4 to 80	0.8/.030

## Pocket Surf®\* the portable surface roughness gage



\* US-patent no. 4.776.212

Optional Accessory:  
Statistics Printer MSP 2.  
**Order No. 4102040**

Requires connection cable  
**Order No. 4102046**



### Features

- Pocket-sized economically priced, completely portable instrument which performs traceable surface roughness measurements on a wide variety of surfaces; can be used confidently in production, on the shop floor and in the laboratory
- Solidly built, with a durable cast aluminum housing, to provide years of accurate, reliable surface finish gaging.
- Can be used to measure any one of four, switch-selectable, parameters:  $R_a$ ,  $R_{max}/R_y$ ,  $R_z$ .
- Selectable traverse length 1, 3 or 5 cut-offs of 0.8 mm/.030"
- Operates in any position – horizontal, vertical, and upside down
- four switchable probe positions – axial (folded) or at 90°, 180° or 270°
- Even difficult-to-reach surfaces such as inside and outside diameters are accessible.
- Integrated data output for SPC-processing units that is compatible with the most common data processing systems.
- easy-to-read LCD readout presents the measured roughness value, in microinches or micrometers, within half a second after the surface is traversed.
- Out-of-range (high or low) and "battery low" signals are also displayed.

### Technical Data

Dimensions	140 mm x 76 mm x 25 mm/ <b>5.5" x 3" x 1"</b>
Weight	435 g / 14 oz
Measuring Ranges	$R_a$ 0.03 $\mu\text{m}$ to 6.35 $\mu\text{m}$ / <b>1 <math>\mu\text{inch}</math> to 250 <math>\mu\text{inch}</math></b> $R_y$ 0.2 $\mu\text{m}$ to 25.3 $\mu\text{m}$ / <b>8 <math>\mu\text{inch}</math> to 999 <math>\mu\text{inch}</math></b> $R_{max}$ 0.2 $\mu\text{m}$ to 25.3 $\mu\text{m}$ / <b>8 <math>\mu\text{inch}</math> to 999 <math>\mu\text{inch}</math></b> $R_z$ 0.2 $\mu\text{m}$ to 25.3 $\mu\text{m}$ / <b>8 <math>\mu\text{inch}</math> to 999 <math>\mu\text{inch}</math></b>
Display Resolution	0.01 $\mu\text{m}$ / <b>1 <math>\mu\text{in}</math></b>
Measurement Accuracy	Meets ASME-B46.1, ISO, DIN standards and MIL specifications
Digital Readout	LCD; with; „Battery low" signal; „H" and „L" (measured values out-of-range)

## Pocket Surf

### Technical Data

#### Probing and Traverse Lengths

Parameters	Traverse Length (Nominal)	Evaluation Length	Number of Cutoffs/ Switch Position
$R_a/R_y$	2.0 mm/ <b>.075"</b>	0.8 mm/ <b>.030"</b>	1
	3.5 mm/ <b>.135"</b>	2.4 mm/ <b>.090"</b>	3
$R_a/R_z/R_{max}$	5.0 mm/ <b>.195"</b>	4.0 mm/ <b>.150"</b>	5
Traverse Speed	5.08 mm/ <b>.2"</b> per second		
Cutoff	0.8 mm/ <b>.030"</b> ASME 2 RC-filter		
Probe Type	Piezoelectric		
Maximum Stylus Force	15.0 mN / 1500 mfg		
Power	consumer-type alkaline battery, 9 Volt		
Battery Capacity	Approx. 2500 measurements, depending on frequency of use and output option		
Operating Temperature	10° to 45°C / 50° to 113° F		
Storage Temperature	-20° to 65°C / -4° to 149° F		

#### Pocket Surf Sets

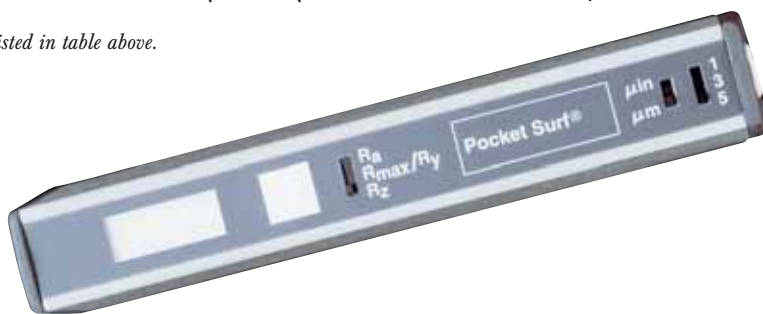
##### Order no.

<b>EMD-1500-311</b>	EGH-1019	Probe, 90°, 10 $\mu\text{m}$ radius, PMD-90101 Certified Specimen, incl. Test Certificate
<b>EMD-1500-312</b>	EGH-1019	Probe, 90°, 10 $\mu\text{m}$ radius, EMD-90010 Precision Specimen
<b>EMD-1500-321</b>	EGH-1026	Probe, 90°, 5 $\mu\text{m}$ radius, PMD-90101, Certified Specimen, incl. Test Certificate
<b>EMD-1500-322</b>	EGH-1026	Probe, 90°, 5 $\mu\text{m}$ radius, EMD-90010 Precision Specimen



A **Pocket Surf** kit is furnished complete in a fitted case, and includes a Pocket Surf unit with a General Purpose Probe\*\* and a 3.2  $\mu\text{m}$ /**125  $\mu\text{inch}$**  (nominal) Reference Specimen\*\*.

\*\* Part Numbers listed in table above.



### Accessories

##### Order no.

<b>EBY-1014</b>	9 Volt Alkaline Battery
<b>EPL-1681</b>	Riser Plate, for calibrating the gage with the Reference Specimen
	Statistic Printer MSP 2 and Data cable see chapter 11

## Probes

### General Purpose Probes

#### EGH-1019/EGH-1026

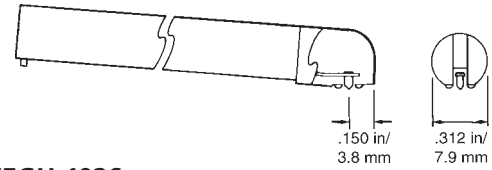
For most surface roughness applications.

#### EGH-1026

With a 90° conical diamond stylus, 5 μm/ .0002" radius\*.

#### EGH-1019

With a 90° conical diamond stylus, 10 μm/ .0004" radius.

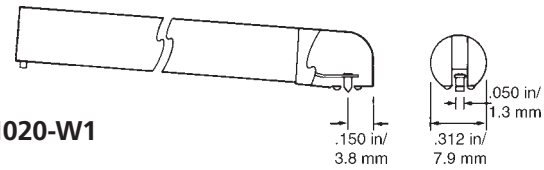


EGH-1019/EGH-1026

### Transverse Chisel Probe

#### EGH-1020-W1

For gaging sharp edges or small O.D.'s where probe is aligned with (in 180° or closed position) to axis of traverse. 90° sapphire chisel, 10 μm/ .0004" radius.

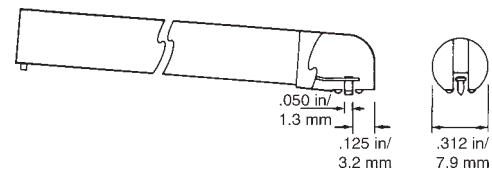


EGH-1020-W1

### Parallel Chisel Probe

#### EGH-1020-W2

For gaging sharp edges or small O.D.'s where probe is perpendicular (in 90°- oder 270° position). to axis of traverse Also for O.D.'s smaller than 6,35 mm/ .25" staged on EAS-2421 (Order no. 2008023). Vee fixture 90° sapphire chisel, 10 μm/ .0004" radius.



EGH-1020-W2

### Small Bore Probe

#### EGH-1021/EGH-1027

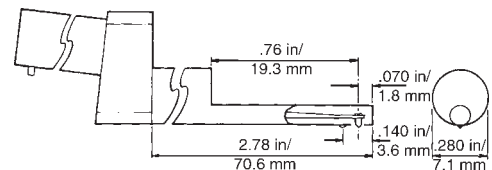
For gaging small bores (3,2 mm/ .125" minimum I.D.) up to a depth of 19 mm/ .75".

#### EGH-1027

With a 90° conical diamond stylus, 5 μm/ .0002" radius\*.

#### EGH-1021

With a 90° conical diamond stylus, 10 μm/ .0004" radius.



EGH-1021/EGH-1027

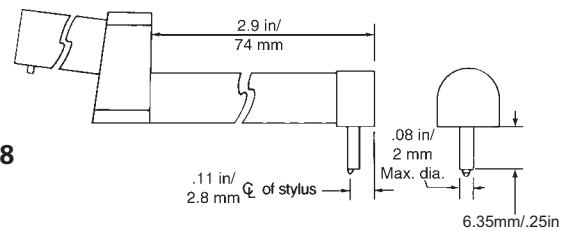
### Groove Bottom Probe

#### EGH-1028

For measuring the bottom of grooves, recesses and small holes to depths of 6.35 mm/ .25".

Also used for short lands and shoulders.

With 90° conical diamond stylus, 10 μm/ .0004" radius.



EGH-1028

**NOTE:** Small Bore and Groove Bottom Probes can only be used in 180° position with the Pocket Surf unit supported in a height stand or other fixture

\* Yellow dot at connector end signifies 5 μm/ .0002" radius.

Using the Groove Bottom Probe to check an "O" ring groove.

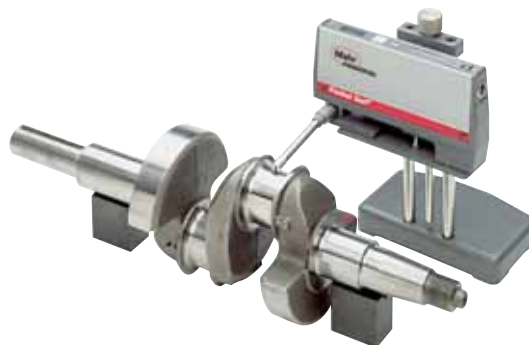


## Applications and Accessories

### Height Stand EAS-2496

a compact, convenient fixture with a bracket to hold the Pocket Surf gage. Designed for making measurements on a granite surface plate or on any suitable, flat working surface.

Order no.      EAS-2496



### Bore Adapter Kit EAS-2839

for time saving hand-held measurement of bores without having to fix the workpiece. Accommodates all inside diameters from 25 mm/ 1" to 150 mm/ 6"; depths from 25 mm/ 1" to 60 mm/ 2.4".

Order no.      EAS-2839



### Vee-Adapter Kit EAS-2739

attaches to bottom of Pocket Surf unit, permitting convenient, hand-held measurements of hard-to-reach cylindrical surfaces, such as crankshaft journals without having to fix the workpiece. Suitable for parts with diameters from 5.0 mm/ .19" to 125 mm/ 5".

Order no.      EAS-2739



### Universal Stand EAS-2426

a heavy duty stand equipped with an adjustable bracket to hold the Pocket Surf for measuring of workpieces, up to 213 mm / 8.375 in tall.

Order no.      EAS-2426



## Applications and Accessories

### Portable vee fixture EAS-2421

for measuring small parts with outside diameters from 3.1 mm/ .125" to 25 mm/ 1" for lengths of 25 mm/ 1" minimum - includes PS-145 setting pin.

Order no.           EAS-2421



### Bottom Plate EAS-2584

for measuring cylindrical workpieces too short (less than 89 mm/3.5" long) for the "closed" probe position; for workpieces with short O.D.'s from 6.35 mm/ .25" (minimum 38 mm/ 1.5" long).

Order no.           EAS-2584



### EAS-3048 Mounting Bracket for use with height gages

for mounting the Pocket Surf to most standard height gages. The bracket includes a rectangular bar that is 11.5 mm x 6.35 mm ( 0.45" x 0.25") to fit the holder of the height gage. A swivel feature is included to permit the Pocket Surf to be set anywhere within a 360° rotation.

Order no.           EAS-3048



### Height Stand with Swivel

... a compact, convenient fixture with an adjustable bracket to hold the Pocket Surf, anywhere within a 360° rotation, for making measurements on a surface plate or on any suitable, flat working surface.

Order no.           2236687



## Perthometer M1. The Basic Model for Roughness Measurements

Entry-level roughness measurement



### Description

This instrument serves for determining and documenting the most common parameters as per DIN EN ISO/AMSE/prEN 10049 (Ra, Rz, Rmax, and R<sub>Pc</sub>) and according to the JIS Japanese standard (Rz, Ra).

With a minimum of keys, the Perthometer M1 is characterized by a multitude of functions. An automatic function enables periodic and aperiodic profiles to be identified and the cutoff to be set according to standards without any previous test measurement, such that unintentional non-standard measurements are excluded.

In mobile use, the measuring record can be output on the built-in thermal printer automatically or simply by pressing a key. Stationary operation offers the possibility of connecting the Perthometer directly to a PC via the serial interface.

Delivery as a set in a handy carrying case,  
Perthometer M1 set **Order No. 6910134**

Perthometer M1 set with 2008143 Roughness Master  
**Order No. 2190827**

- Measuring range of up to 150  $\mu\text{m}$  (6,000  $\mu\text{in}$ )
- Units  $\mu\text{m}/\mu\text{in}$  selectable
- Standards: DIN/ISO/JIS
- Traversing lengths 1.75 mm, 5.6 mm, 17.5 mm (.7 in, .22 in, 0.7 in)
- Cutoff 0.25 mm/0.80 mm/2.5 mm (.010 in/.032 in/.100 in)
- Short cutoff selectable
- Number of sampling lengths selectable from 1 to 5
- Automatic selection of filter and traversing length conforming to standards
- Phase-correct profile filter as per DIN EN ISO 11562
- Parameters as per DIN/ISO/SEP: Ra, Rz, Rmax, R<sub>Pc</sub> and JIS: Ra, Rz
- Automatic scaling according to the profile amplitude
- Printing of roughness profile and measuring record
- Dynamic pick-up calibration
- Blocking of instrument settings for preventing unintentional modifications

## Perthometer M2. The Universal Standard Instrument ...

Highly mobile, high-performance unit



### Description

The operation of this instrument is based on the well-proved catalog of functions which enables instrument settings such as measuring conditions, language and record contents to be selected very easily. The **Perthometer M2** thus offers a maximum of comfort and flexibility.

Compared with the **Perthometer M1**, this instrument not only meets the requirements for determination and documentation of selected parameters, but also makes most of the parameters and characteristic curves stipulated in DIN/ISO/JIS available for the evaluation of the profile assessed.

Moreover, the **Perthometer M2** offers an integrated memory for the results of up to 200 measurements and enables, among other things, tolerance monitoring, vertical scale selection and the setting of unsymmetric intersection lines for peak count calculation.

Delivery as a set in a handy carrying case,  
Perthometer M2 set

**Order No. 6910135**

Perthometer M2 set with 2008143 Roughness Master

**Order No. 2190828**

### Features

- Measuring range of up to 150  $\mu\text{m}$  (6000  $\mu\text{in}$ )
- Units  $\mu\text{m}/\mu\text{in}$  selectable
- Standards: DIN/ISO/JIS and CNOMO (Motif) selectable
- Traversing lengths as per DIN EN ISO 4288/ASME B461: 1.75 mm, 5.6 mm, 17.5 mm (.07 in, .22 in, .7 in); as per EN ISO 12085: 1 mm, 2 mm, 4 mm, 8 mm, 12 mm, 16 mm
- Number of sampling lengths selectable from 1 to 5
- Automatic selection of filter and traversing length conforming to standards
- Phase-correct profile filter as per DIN EN ISO 11562
- Cutoff 0.25 mm/0.80 mm/2.50 mm (.010 in/.032 in/.100 in)
- Short cutoff selectable
- Parameters as per DIN/ISO/SEP: Ra, Rz, Rmax, Rp, Rq, Rt, R3z, Rk, Rvk, Rpk, Mr1, Mr2, Mr, Sm, RPC; as per JIS: Ra, Rz, Ry, Sm, S, tp; Motif parameters: R, Rx, Ar, W, CR, CF, CL (three-zone measurement)
- Tolerance monitoring in display and measuring record
- Automatic or adjustable scaling
- Printing of R-profile (ISO/JIS), P-profile (MOTIF), material ratio curve, measuring record
- Output of date and/or time of the measurements
- Integrated memory for the results of up to 200 measurements
- Dynamic pick-up calibration
- Blocking of instrument settings for preventing unintentional modifications plus possibility of password protection

## Mobile Roughness Measurements. Technical Data

	M1	M2
Measuring principle	stylus method	•
Traversing speed	0.5 mm/s	•
Measuring ranges	100 µm (4,000 µin) 150 µm (6,000 µin)	• •
Profile resolution	12 nm	•
Filter	Gaussian	•
Cutoffs	0.25/0.8/2.5 mm (0.010/0.032/0.100 in)	0.25/0.8/2.5 mm (0.010/0.032/0.100 in)
Short cutoff	•	•
Traversing lengths as per DIN/ISO	1.75/5.6/17.5* mm (0.07/0.22/0.70* in)	1.75/5.6/17.5* mm (0.07/0.22/0.70* in)
as per EN ISO 12085	1/2/4/8*/12*/16* mm	1/2/4/8*/12*/16* mm
Evaluation lengths	1.25/4/12.5* mm (0.05/0.16/0.5* in)	1.25/4/12.5* mm (0.05/0.16/0.5* in)
Number of sampling lengths	selectable from 1 to 5	•
Standards	DIN/ISO/JIS/ASME	DIN/ISO/JIS/ASME
Parameters	DIN/ISO/ASME: Ra, Rz, Rmax, R <sub>Pc</sub> JIS: Ra, Rz	DIN/ISO/ASME: Ra, Rz, Rmax, R <sub>p</sub> , R <sub>q</sub> , R <sub>t</sub> , R <sub>3z</sub> , R <sub>k</sub> , R <sub>vk</sub> , R <sub>pk</sub> , Mr1, Mr2, R <sub>Pc</sub> , Mr, R <sub>Sm</sub> . JIS: Ra, Rz, Ry, S <sub>m</sub> , S, t <sub>p</sub> MOTIF: R, Ar, Rx, W, CR, CL, CF
Vertical scale	automatic	automatic/selectable
Horizontal scale	dep. on cutoff	dep. on cutoff
Record contents	R-profile, results	R-profile, MRC, P-profile (MOTIF), results
Printing	automatic/manual	automatic/manual record with time
Calibration function	dynamic (Rz value)	•
Memory	–	integrated memory for results of up to 200 measurements
Units µm/µinch	selectable	selectable
Languages	selectable: English, German, French, Italian, Spanish, Portuguese., Dutch, Swedish, Czech, Polish, Russian, Japanese, Chinese, Korean	•
Russ., Pol., Czech., Jap.,	•	•
Blocking for instrum. settings	–	•
Password protection	•	•
Membrane keypad	•	•
LCD	purposefully designed with graphics area	•
Printer	thermal printer, 384 points/horizontal line, 20 characters/line	•
Printing speed	approx. 6 lines/second corresponds to approx. 25 mm/s (1 in/s)	•
Thermal paper	dia. 40.0 mm - 1.0 mm (1.575 in - .0394 in), width 57.5 mm ± 0.5 mm (2.263 in ± .0197 in), externally coated	•
Interface	RS 232 C	•
Power supply	NiMH battery, capacity: approx. 1,000 measurements (dep. on number and length of record printouts), plug-in power pack with three mains plugs, for input voltages from 90 V to 264 V	•
Power management	•	•
Connections	drive unit, RS 232 C, power pack	•
System of protection	IP 50	•
Temperature range for		
– storage	–15 °C to +55 °C (5 °F to 131 °F)	•
– operation	+5 °C to +40 °C (41 °F to 104 °F)	•
Relative humidity	30% to 85%	•
Dimensions (L x W x H)	190 mm x 170 mm x 75 mm (7.48 in x 6.69 in x 2.95 in)	• •
Mass	approx. 900 g (1.984 lb)	•

\* only with PFM drive unit

## Workstation MarSurf XR 20 for M-units

Archiving and documenting made easy



### Description

The **MarSurf XR 20** workstation is based on the PC measuring system software.

The software enables the measuring result to be archived and documented very easily. Here, the **M**-unit is controlled by a PC, i.e. the measuring conditions are set on the PC or laptop.

Clear icons and a comprehensive online help make using this powerful software very easy. Decades of surface metrology experience in are combined with state-of-the-art and future-focused technologies.

The workstation supports WINDOWS 2000 and WINDOWS XP. Data transmission is performed via an RS 232 cable between M-unit and PC. For accessing the software, a USB dongle and a license file are required.

### Features

- Over 65 parameters may be selected for R, P and W profiles as per ISO / JIS or MOTIF
- Tolerance monitoring and statistics for all parameters
- Fast creation of Quick & Easy measuring programs using Teach-In mode
- Comprehensive logging
- Simulation mode to help users familiarize themselves with the system quickly
- Numerous measuring station configurations for customized applications
- Different user levels can be set up
- Printout of an A4 form via a PC printer
- Archiving of the measured profiles on PC or laptop

### Accessories

- Software MarSurf XR 20
- USB dongle
- Floppy disk 3,5" with license file
- RS 232 cable (2 m)

**Order no. 6299009**

## Application Aids

Efficient application aids for manufacturing

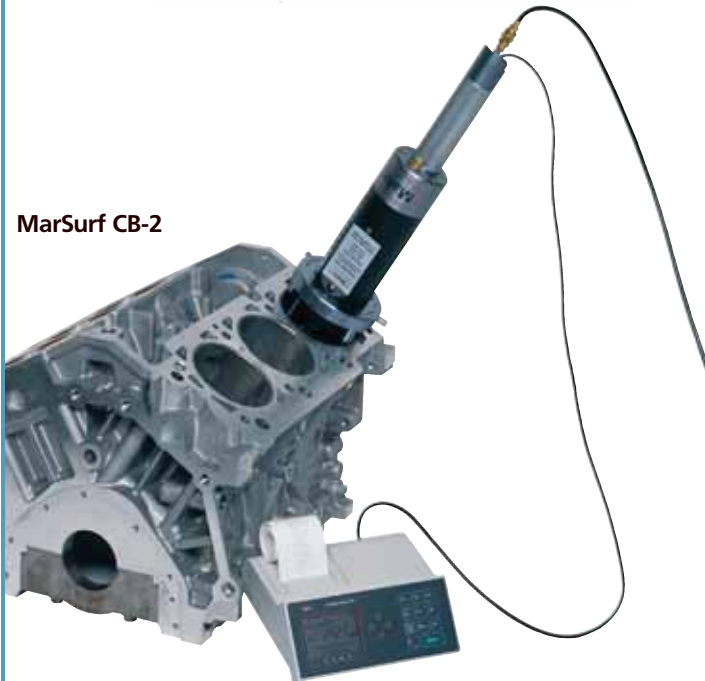
### MarSurf BF-1



### MarSurf TF-1



### MarSurf CB-2



### MarSurf DR-1



## Description

Tough manufacturing environments require quick and easy roughness measurement. The shop floor is particularly demanding on measuring instruments. **Application aids** from **Mahr** are the perfect solution.

## Features

Our application aids work with evaluation instruments in the **M1** or **M2 series**.

A calibration or storage station is included in the scope of delivery. Calibration standards are available, with a Calibration Certificate if required.

- Special design allows precise, easy positioning of measuring instrument
- Easy to use even without specialist metrological knowledge
- Device for protecting drive unit from environmental influences that might disrupt the measurement
- Pick-up protection, i.e. pick-up is only extended during measurement
- Surface protection material ensures measurement leaves no marks on the workpiece

## Other Applications for use with the M1/M2 Surface Finish Measurement Systems

### MarSurf CS 1

2190922

Measurement system for main and pin journals, oil seal and rod end surfaces on crankshafts. Designed to accommodate journals of 25mm through 125mm with a minimum width of .82" (20.8mm). Features include pneumatic clamping on the journal to be measured for stable measurements prior to data acquisition.

### MarSurf DW 1

2190974

Waviness Fixture: Designed to protect and mount the GD-25/PGK-20 drive unit for surface roughness/waviness measurements. Features include probe protection, carrying handle, cable strain relief, stable base for use on areas with small surface area and calibration stand.

### MarSurf CR 1

Camshaft/Crankshaft bore surface finish measurement system. Designed to measure all crankshaft/camshaft bores in an engine block. Designed to order and dedicated in size to a minimum bore size of 47mm. Features include pneumatic clamping within the bore for stable measurements and prior to data acquisition.

### MarSurf VG 1

Valve Guide surface finish measurement system. Designed to measure surface finish of valve guides from the spring side of cylinder heads. Provides stable measurement without operator setup in harsh environments for in process inspection. 6mm minimum valve bore insert.

*Applications not limited to those described. Please call your local Mahr representative for your surface finish measurement challenges.*

## MarSurf BF-1

Miscellaneous bore fixtures for the shop floor



### Description

The **MarSurf BF 1** is designed for the measurement of bores on the shop floor. The fixture utilizes bore specific tooling which automatically positions the measurement probe relative to the surface to be measured. No operator setup is required.

### Features

- Tooling can be designed to measure openings from 14.00mm to 150.00mm.
- Adjustable measuring depth of 10 mm through 75 mm.
- Automatic pick-up protection means the pick-up is only exposed during the measuring cycle.
- Calibration stand included in the scope of delivery.
- Used with M1 or M2 units.

### Accessories

- The tooling is design-specific for the measuring task.
- Optional: The **MarSurf BF-1** can also be supplied without adjustable measuring depth, i.e. it is designed for just one measuring task.

## MarSurf TF-1

Crankshaft thrust face measurement fixture



### Description

The MarSurf TF 1 measurement system is designed to perform surface finish measurements of thrust wall surfaces on crankshafts. The tooling is applied to the thrust wall area and the measurement probe is automatically positioned over the surface to be measured. There is no need for operator setup.

### Features

- Tooling can be designed to measure crankshaft journal widths of 17.5mm to 44.5mm
- Non-marring material leaves no traces on the workpiece
- Automatic pick-up protection means the pick-up is only exposed during the measuring cycle
- Calibration stand included in the scope of delivery
- Used with M1 or M2 units

## MarSurf CB-2

Cylinder bore surface finish fixture



### Description

#### MarSurf CB 2

**Order No. 2190856**

The **MarSurf CB 2** is designed for the measurement of cylinder walls, sleeves or any bores requiring surface roughness measurements. High clamping force supported by air pressure for stable measurements inside bores from 77mm through 105mm.

### Features

- Auto sizing feature for bores from 77mm through 105 mm
- Mechanical stop with depth indicator
- Automatic probe protection means the pick-up is only exposed during the measurement cycle
- MarSurf CB-2 utilizes a pneumatically activated clamping mechanism
- Measurement depth capability of 25mm through 225mm
- Used with M1 or M2 units

### Accessories and Options

**The following Accessories/Options are available:**

Expansion pads for bores available for 105mm through 133mm

#### Options:

#### MarSurf CB 3

**Order No. 2190910**

for bores ranging from **74mm** through 105mm

#### MarSurf CB 4

**Order No. 2191022**

for bores ranging from 77mm through 105mm (for skid type measurements with model S2/PZK surface finish evaluation system).

## MarSurf DR-1

Deck face measurement fixture



### Description

#### MarSurf DR 1 Fixture

**Order No. 2190873**

The **MarSurf DR 1** is designed for stable surface finish measurement on flat surfaces without the need for positional adjustment of the pick-up. Equipped with a magnetic base, the Marsurf DR 1 is ideal when measuring overhead or non-horizontal surfaces.

### Features

- Wide range of applications
- Magnetic base provides for non-level mounting on ferrous surfaces
- Used with M1 or M2 units

## Pick-ups for Mobile Roughness Measuring Instruments

### Pick-ups for multiple measuring tasks for the use with PFM/PFM 2

The pick-ups of type N are characterized by special construction features:

- Stylus tip geometry as per EN ISO 3274, standard  $2\ \mu\text{m}/90^\circ$  ( $80\ \mu\text{in}/90^\circ$ )
- Measuring force of approx. 0.7 mN (1.95 mN) (as per EN ISO 3274)
- Reliable inductive converter
- Rugged, rigid housing
- Self-aligning, elastic bearings
- Reliable plug and socket connections

### The standard NHT 6 pick-up

for example, adapts to various surfaces to be traced due to the special design of its tracing arm and skid. Further pick-ups such as the NHT 11 are suited for recessed measuring points and grooves.

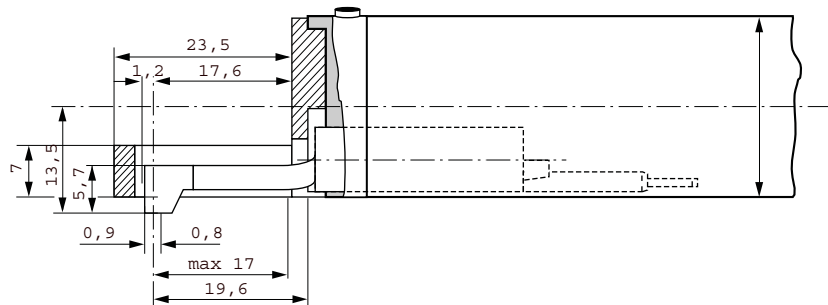


### NHT 6-100 pick-up

Type  
Skid radius  
Contact point  
Measuring range  
Specification

### Order No. 6111501

single-skid pick-up with spherical skid  
25 mm (.984 in) in traversing direction,  
2.9 mm (.114 in) at right angles  
0.8 mm (.0315 in) in front of the stylus  
100  $\mu\text{m}$  (.00394 in)  
for plane surfaces, bores with a dia. larger than 6 mm,  
(.236 in) and a max. depth of 17 mm (.669 in), grooves with  
a width larger than 3 mm (.118 in);  
min. workpiece length = traversing length + 1 mm (.0394 in)

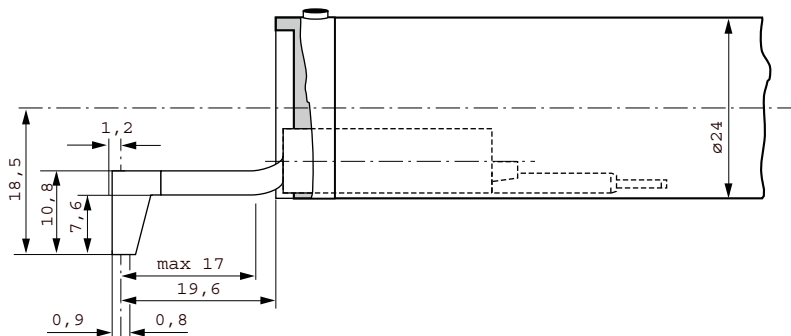


### NHT 6-150 pick-up

Type  
Skid radius  
Contact point  
Measuring range  
Specification

### Order No. 6111504

single-skid pick-up with spherical skid  
25 mm (.984 in) in traversing direction,  
2.9 mm (.114 in) at right angles  
0.8 mm (.0315 in) in front of the stylus  
150  $\mu\text{m}$  (.00591 in)  
for plane surfaces, bores with a dia. larger than 6 mm (.236 in)  
and a max. depth of 17 mm (.669 in), grooves with a width  
larger than 3 mm (.118 in);  
min. workpiece length = traversing length + 1 mm (.0394 in)



### NHT 11-100 pick-up

Type  
Skid radius  
Contact point  
Measuring range  
Specification

### Order No. 6111505

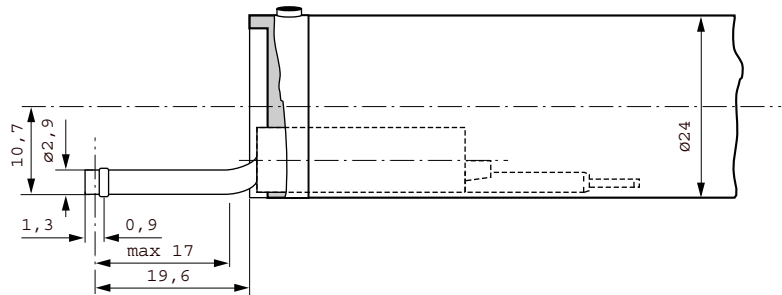
single-skid pick-up with spherical skid  
25 mm (.984 in) in traversing direction,  
2.9 mm (.114 in) at right angles  
0.8 mm (.0315 in) in front of the stylus  
100  $\mu\text{m}$  (.00394 in)  
for plane surfaces, bores with a dia. larger than 11 mm  
(.433 in) and a max. depth of 14 mm (.551 in), grooves with  
a width larger than 2.5 mm (.0984 in) and  
a max. depth of 7.5 mm (.295 in)

**NHT pick-up extension (80 mm/3.15 in), Order No. 6850530** (for pick-ups of the "N-series")

## Pick-ups for Mobile Roughness Measuring Instruments

### NHTR-100 pick-up Order No. 6111508

Single-skid pick-up with lateral, spherical skid, radius 0.3 mm in traversing direction, stylus radius 5 µm (200 µin), 90° suitable to measure inner radii in circumferential direction with a diameter larger than 12 mm (.472 in) (without figure).



### NHT 3-100 pick-up

Type  
Skid radius

Contact point  
Measuring range  
Specification

### Order No. 6111502

single-skid pick-up with spherical skid  
25 mm (.984 in) in traversing direction,  
1.45 mm (.0571 in) at right angles  
0.9 mm (.0354 in) in front of the stylus  
100 µm (.00394 in)  
for bores with a dia. larger than 3 mm (.118 in) and a max.  
depth of 17 mm (.669 in);  
min. workpiece length = traversing length + 1 mm (.0394 in)



### The NHTF 0.5 for gear tooth flanks

enables roughness measurements even at  
hardly accessible points.

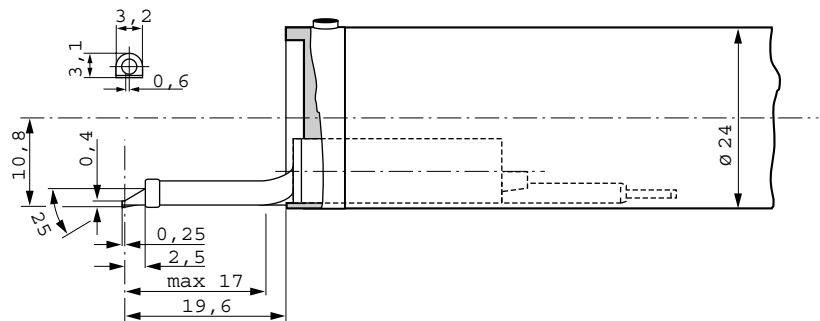
### NHTF 0.5-100 pick-up

Type  
Skid radius

Contact point  
Measuring range  
Specification

### Order No. 6111503

single-skid pick-up with spherical skid  
25 mm (.984 in) in traversing direction,  
1.45 mm (.0571 in) at right angles  
0.6 mm (.0236 in) beside the stylus  
100 µm (.00394 in)  
e.g. for gear tooth flanks with a modulus larger than 0.8



## Drive Units for Mobile Roughness Measuring Instruments

PFM drive unit



PFM 2 drive unit



### Description

The **PFM** drive unit can be connected to the Perthometers M1 and M2. It forms part of the Perthometer sets.

The drive unit can be used with the well-proved NHT skidded pick-ups.

For special measuring tasks, e.g. on crankshafts, the **PFM 2** drive unit with transverse tracing is available. This is connected as the standard **PFM** drive unit. If both drive units are used, the range of applications of the mobile Perthometers M1 and M2 is considerably raised.

For the scope of delivery of the Perthometer sets, practical exam-

### Technical Data

#### PFM drive unit

Traversing direction	longitudinal
Traversing lengths as per DIN/ISO	set on the Perthometer 1.75 mm, 5.6 mm, 17.5 mm (.07 in, .22 in, .7 in)
as per EN ISO	1 mm, 2 mm, 4 mm, 8 mm, 12 mm, 16 mm (.0394 in, .0787 in, .157 in, .315 in, .472 in, .63 in)
Traversing speed	0.5 mm/s (.0197 in/s)
Dimensions (w/o pick-up protection)	dia. 24 mm (.945 in), L = 112 mm (4.41 in)

#### Order No. 6720907

### Technical Data

#### PFM 2 drive unit

Traversing direction	transverse
Traversing lengths as per DIN/ISO	set on the Perthometer 1.75 mm, 5.6 mm (.07 in, .22 in)
as per EN ISO 12085	1 mm, 2 mm, 4 mm (.0394 in, .0787 in, .157 in)
Traversing speed	0.5 mm/s (.0197 in/s)
Dimensions (w/o pick-up protection)	dia. 24 mm (.945 in), L = 112 mm (4.41 in)

#### PFM 2 set

consisting of:

**Order No. 6720909**

**PFM 2 drive unit**  
**Vee pick-up protection**  
**Pick-up protection**  
**Screwdriver**

## Applications with PFM Drive Units

Drive unit for shop floor applications



### Description

The robust **PFM drive unit** with its slim, cylindrical form is suited for measuring even complex workpieces. It is easily attached to mounting devices for stationary operation, while for manual operation, the hand-held support with its multiple contact surfaces offers various application possibilities. The optionally available **PFM 2** drive unit is suited for transverse tracing, e.g. between lateral shoulders on crankshafts.

Exchangeable front-mounting devices protect the pick-up and enable correct positioning on the workpiece. The vee pick-up protection, which is used when working without the hand-held support, is used for cylindrical workpieces. Prismatic contact surfaces at the bottom and the end faces of the hand-held support also support the drive unit on cylindrical workpieces. For large workpieces, the drive unit is placed onto the surface to be traced.

For small workpieces, the hand-held support is placed upside down, thus serving as workholding device. The multiple contact surfaces, the vertical adjusters and the possibility of shifting and turning the drive unit within the hand-held support, make the PFM a simple, but complete measuring station of so far unequalled flexibility.

Roughness measurements on workpieces which are still being manufactured require particular devices for solving the measuring task (e.g. transverse tracing on crankshafts or camshafts). With the Perthometer **M1** or **M2**, the **PFM 2** drive unit for transverse tracing, a shaft whipper and the vee pick-up protection, it is possible to perform such measurements on site and with high precision.

## Accessories



**PP vee-block** Order No. 6710401  
with four different prisms for mounting axis-symmetrical workpieces with diameters from 1 mm to 160 mm (.0394 in to 6.30 in). Dimensions (L x W x H) 100 mm x 80 mm x 40 mm (3.91 in x 3.15 in x 1.58 in). Weight 1.5 kg (3.31 lb). Including clamping springs for holding light workpieces in the prism.



**XY table CT 120** Order No. 6710529  
for mounting and aligning workpieces. Can be adjusted in two coordinates by 15 mm (.591 in). Table surface 120 mm x 120 mm (4.728 in x 4.728 in) with two brackets.



**PRN 10 roughness standard**  
Order No. 6820420

with DKD calibration certificate. Roughness standard with turned profile, chromed. Profile depth approx. 10  $\mu\text{m}$  (.394  $\mu\text{in}$ ). For checking the roughness measuring station.



**PPS parallel vice** Order No. 6710604

for mounting rectangular and cylindrical workpieces. Jaw width 70 mm (2.76 in), jaw height 25 mm (.984 in), span 40 mm (1.58 in), total height 58 mm (2.28 in). Weight 2 kg (4.41 lb).



**Shaft whippers for PFM 2 for diameters from 5 mm to 80 mm (100 mm)**  
(.197 in to 3.15 in/3.94 in)  
Order No. 6850738

Roughness measurements on workpieces which are still being manufactured require particular devices for solving the measuring task (e.g. transverse tracing on crankshafts or camshafts).

**PGN 3 geometric standard**  
Order No. 6820601

(not shown) Surface roughness standard with a sinusoidal groove profile. Profile depth approx. 3  $\mu\text{m}$  (120  $\mu\text{in}$ ), groove spacing approx. 0.12 mm (.00472 in). For checking the roughness measuring station.

*NIST or DKD calibration certificates are available on request.*

**Single Roughness Master**  
Order No. 2008143

(not shown) Surface roughness standard with a sinusoidal waveform. Made of electroformed nickel with hardened surface layer. Certified for  $R_z=9.75 \mu\text{m}/384 \mu\text{in}$ ;  $R_a=3.0 \mu\text{m}/118 \mu\text{in}$  and  $R_{max}=9.8 \mu\text{m}/386 \mu\text{in}$ , traceable to NIST.

**Dual Roughness Master**  
Order No. 2238983

(not shown) Surface roughness standard with two areas: sinusoidal for calibration, similar to order No. 2008143, and triangular for stylus check for  $R_a=0.4 \mu\text{m}/16 \mu\text{in}$ .

## Accessories



### Measuring Stands

- Measuring stand ST-D**      **Order No. 6710803**  
 Height adjustment      0 mm to 300 mm  
 of PFM mounting device      (0 in to 11.81 in),  
 Triangular foot      by means of a handwheel  
 Dimensions      175 mm x 190 mm x 385 mm  
 (L x W x H)      (6.89 in x 7.48 in x 15.16 in)  
 Weight      approx. 3 kg (6.61 lb)
- Measuring stand ST-F**      **Order No. 2190832**  
 Height adjustment      0 mm to 300 mm (0 in to 11.81 in),  
 of PFM mounting device      by means of a handwheel  
 Table surface      400 mm x 250 mm  
 (15.75 in x 9.84 in), granite  
 Dimensions (L x W x H)      400 mm x 250 mm x 422 mm  
 (15.75 in x 9.84 in x 16.61 in)  
 Weight      approx. 24 kg (52.91 lb)
- Measuring stand ST-G**      **Order No. 6710807**  
 Granite plate with an 10 mm (.39 in) T-slot for mounting work-  
 holding devices. Handwheel height adjustment for simply and  
 exactly adjusting the drive unit to the required measuring height.
- Height adjustment      0 mm to 300 mm (0 in to 11.81 in),  
 of PFM mounting device      by means of a handwheel  
 Dimensions (L x W x H)      500 mm x 300 mm x 415 mm  
 (19.69 in x 11.81 in x 16.34 in)  
 Weight      approx. 35 kg (77.16 lb)

### Measuring Stand Accessories

- Measuring stand accessories** (not included in the scope of  
 delivery of the measuring stands):
- PFM/PFM 2 mounting device**      **Order No. 6851304**  
 The drive unit can be swiveled and aligned in a range of  $\pm 15^\circ$  by  
 means of this mounting device.
- M1/M2 support plate**      **Order No. 6851332**  
 with shoulder strap, for mobile use and for fixing the Perthometer  
 to an ST-F, ST-D or ST-G measuring stand by means of the moun-  
 ting device (Order No. 6851333).
- M1/M2 mounting device**      **Order No. 6851333**  
 for fixing the Perthometer to an ST-F, ST-D or ST-G measuring stand  
 by means of the support plate (Order No. 6851332).

### Software

- MarSurf XR 20 evaluation software**      **Order No. 6299009**  
 Control of the M-unit via the RS 232 COM port  
 Software access via a USB dongle, usable with Windows 2000  
 and Windows XP

## The Perthometer Sets for Mobile Operation

### Perthometer M1 set

Order No. 6910134

### Perthometer M1 set with 2008143 Roughness Master

Order No. 2190827

### Perthometer M2 set

Order No. 6910135

### Perthometer M2 set with 2008143 Patch Roughness Master

Order No. 2190828

The Perthometers of the M series are delivered as a set in a handy carrying case. The instrument is thus safely packed for transport. The components included in the set can easily and quickly be assembled to form a complete measuring station.

### Scope of delivery

The illustrated accessories form part of the Perthometer sets.



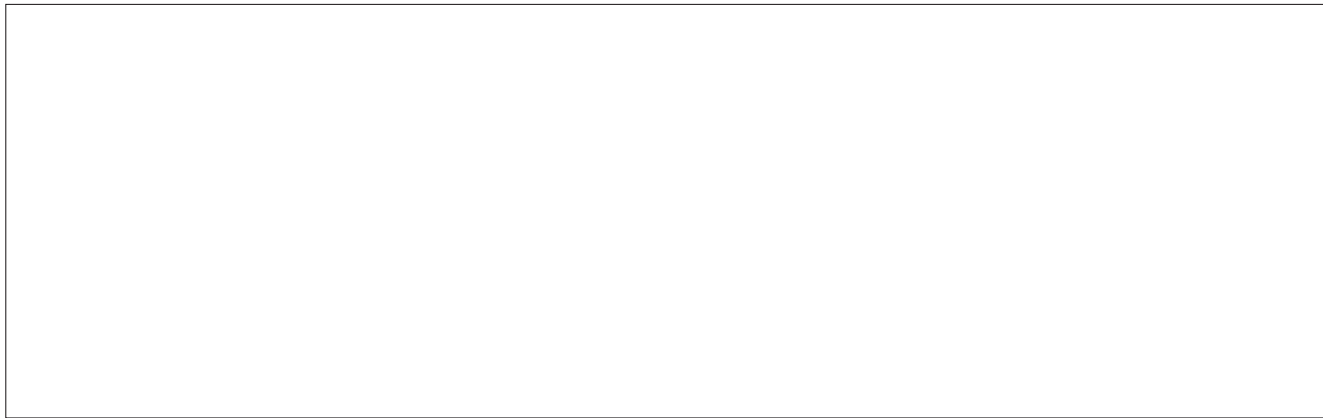


WWW.MAHR.COM

|  
- 0 +



E X A C T L Y



**Mahr Federal, Inc.**  
1144 Eddy Street  
Providence, RI 02905  
Phone: 1-800-343-2050, Fax: 1-401-784-3246  
E-Mail: [information@mahr.com](mailto:information@mahr.com)

© 2005 Mahr Federal, Inc.  
We reserve the right to make changes to our products, especially due to technical improvements and further developments. All illustrations and technical data are therefore without guarantee.

A-299 1105 10M

## **ANEXO C - NORMA ISO 8688-2:1986**

# INTERNATIONAL STANDARD

**ISO**  
**8688-2**

First edition  
1989-05-01

---

---

## **Tool life testing in milling —**

### **Part 2 : End milling**

*Essai de durée de vie des outils de fraisage —  
Partie 2 : Fraisage combiné*



Reference number  
ISO 8688-2 : 1989 (E)

## ISO 8688-2 : 1989 (E)

### Foreword

ISO (the International Organization for Standardization) is a worldwide federation of national standards bodies (ISO member bodies). The work of preparing International Standards is normally carried out through ISO technical committees. Each member body interested in a subject for which a technical committee has been established has the right to be represented on that committee. International organizations, governmental and non-governmental, in liaison with ISO, also take part in the work. ISO collaborates closely with the International Electrotechnical Commission (IEC) on all matters of electrotechnical standardization.

Draft International Standards adopted by the technical committees are circulated to the member bodies for approval before their acceptance as International Standards by the ISO Council. They are approved in accordance with ISO procedures requiring at least 75 % approval by the member bodies voting.

International Standard ISO 8668-2 was prepared by Technical Committee ISO/TC 29, *Small tools*.

Users should note that all International Standards undergo revision from time to time and that any reference made herein to any other International Standard implies its latest edition, unless otherwise stated.

© ISO 1989

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from the publisher.

International Organization for Standardization  
Case postale 56 • CH-1211 Genève 20 • Switzerland

Printed in Switzerland

## Contents

	Page
<b>0</b> Introduction .....	1
<b>1</b> Scope and field of application .....	1
<b>2</b> References .....	3
<b>3</b> Workpiece .....	3
<b>3.1</b> Work material .....	3
<b>3.2</b> Dimensions .....	4
<b>4</b> Tool : Cutter .....	4
<b>4.1</b> Dimensions and tolerances .....	4
<b>4.2</b> Tool geometry .....	4
<b>4.3</b> Tool conditions .....	5
<b>4.4</b> Tool material .....	5
<b>4.5</b> Mounting of the tool .....	5
<b>5</b> Cutting fluid .....	7
<b>6</b> Cutting conditions .....	7
<b>6.1</b> Recommended cutting conditions .....	7
<b>6.2</b> Other cutting conditions .....	7
<b>6.3</b> Cutting speed .....	7
<b>7</b> Tool deterioration and tool-life criteria .....	7
<b>7.1</b> Introduction .....	7
<b>7.2</b> Definitions .....	8
<b>7.3</b> Tool deterioration phenomena .....	9
<b>7.4</b> Tool deterioration phenomena used as tool-life criteria .....	14
<b>7.5</b> Assessment of tool deterioration .....	14

**ISO 8688-2 : 1989 (E)**

<b>8</b>	Equipment .....	15	
8.1	Machine tool .....	15	
8.2	Other equipment .....	15	
<b>9</b>	Procedure .....	16	
9.1	Purpose .....	16	
9.2	Planning .....	16	
9.3	Preparation of material, tools and equipment .....	17	
9.4	Test techniques .....	17	
9.5	Measurements and recording of tool deterioration .....	17	
<b>10</b>	Evaluation of results .....	18	
10.1	General considerations .....	18	
10.2	Treatment of test values/observations .....	18	
10.3	Number of test runs .....	18	
10.4	Diagrams .....	20	
10.5	Statistical interpretation .....	20	
<b>Annexes</b>			
<b>A</b>	Reference work materials .....	22	
<b>B</b>	Example data sheet .....	23	
<b>C</b>	Statistical calculations .....	24	
<b>Bibliography</b> .....			26

# Tool life testing in milling —

## Part 2 : End milling

### 0 Introduction

Procedures and conditions for tool-life testing with single-point turning tools are the subject of ISO 3685. Successful application of ISO 3685 resulted in requests for similar documents relating to other commonly used cutting methods.

This part of ISO 8688 has been developed on the initiative of the International Institution for Production Engineering Research (CIRP) and applies to end milling operations with high-speed steel tools, as illustrated in figures 1, 2 and 3, which represent a major manufacturing activity.

The recommendations contained in this part of ISO 8688 are applicable in both laboratories and factories. They are intended to unify procedures in order to increase the reliability and comparability of test results when making comparison of cutting tools, work materials, cutting parameters or cutting fluids. In order to achieve as far as possible these aims, recommended reference materials and conditions are included and should be used as far as is practical.

In addition, the recommendations can be used to assist in establishing recommendable cutting data, or to determine limiting factors and machining characteristics such as cutting forces, machined surface characteristics, chip form, etc. For these purposes in particular, certain parameters, which have been given recommended values, may have to be used as variables.

The test conditions recommended in this part of ISO 8688 have been designed for end milling tests using steel and cast iron workpieces of normal microstructure. However, with suitable modifications, this part of ISO 8688 can be applied to end milling tests on, for example, other work materials or with cutting tools developed for specific applications.

The specified accuracy given in these recommendations should be considered as a minimum requirement. Any deviation from the recommendations should be reported in detail in the test report.

NOTE — This part of ISO 8688 does not constitute acceptance tests and should not be used as such.

### 1 Scope and field of application

This part of ISO 8688 specifies recommended procedures for tool-life testing with high-speed steel tools used for end milling of steel and cast iron workpieces. It can be applied to laboratory as well as to production practice.

This part of ISO 8688 establishes specifications for three types of end milling tests as follows :

- a) slot milling (see figure 1);
- b) end milling in which the tool periphery is used predominantly (see figure 2);
- c) end milling in which the end teeth of the tool are used predominantly (see figure 3).

The cutting conditions in end milling may be considered under two categories as follows :

- a) conditions as a result of which tool deterioration is due predominantly to wear;
- b) conditions under which tool deterioration is due mainly to other phenomena such as edge fracture or plastic deformation.

This part of ISO 8688 considers only those recommendations concerned with testing which results predominantly in tool wear.

Testing for the second group of conditions given above is currently under study.

For each of these test types, recommendations are made concerning the following : workpiece, tool, cutting fluid, cutting conditions, equipment, assessment of tool deterioration and tool life, test procedures, recording, evaluation and presentation of results.

ISO 8688-2 : 1989 (E)

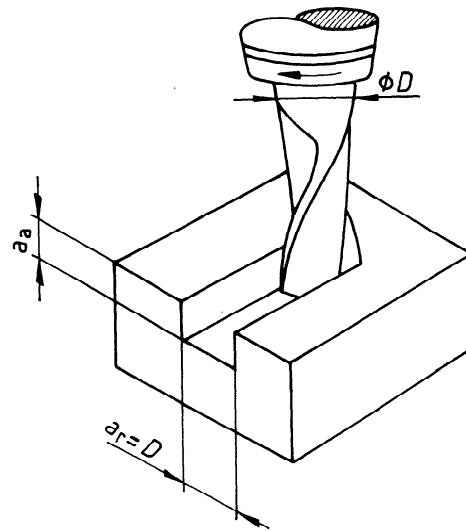


Figure 1 – Slot milling

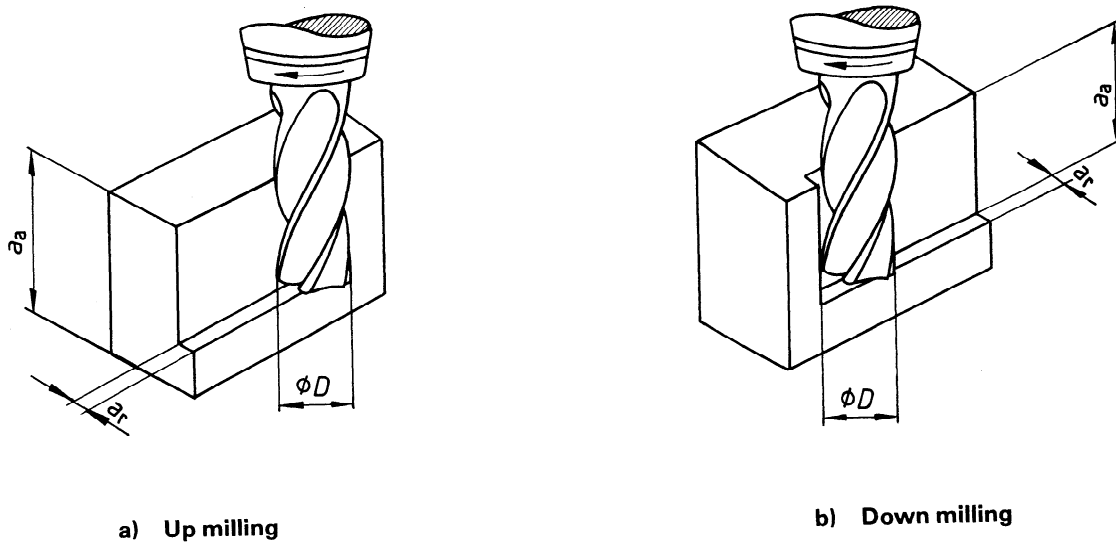


Figure 2 – End milling ( $a_a > a_r$ )

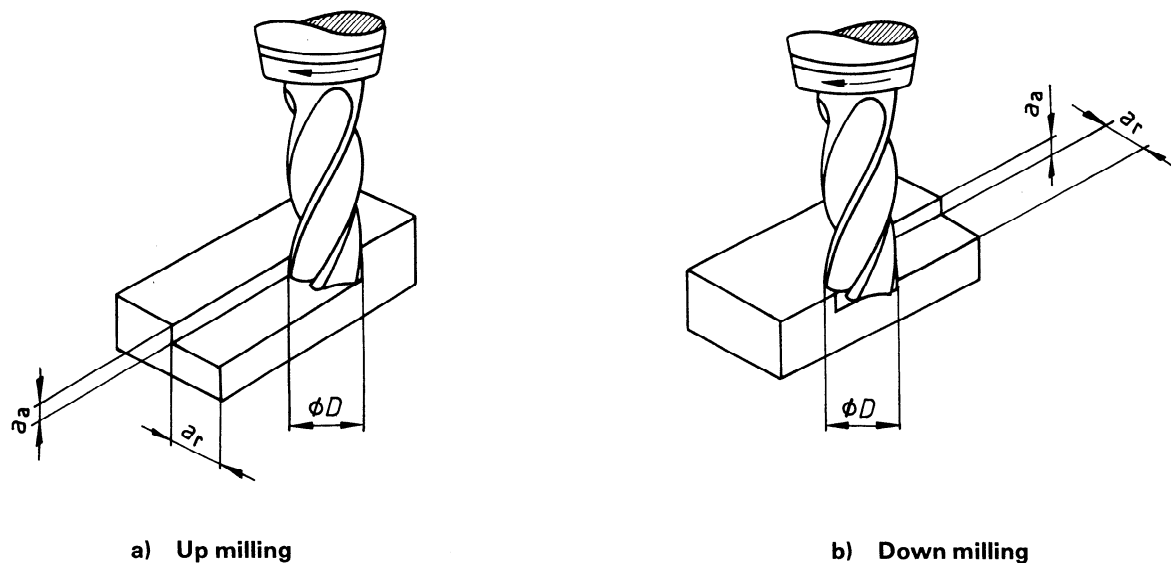


Figure 3 — End milling ( $a_a < a_r$ )

## 2 References

ISO/R 185, *Classification of grey cast iron.*

ISO 468, *Surface roughness — Parameters, their values and general rules for specifying requirements.*

ISO/R 683-3, *Heat-treated steels, alloy steels and free-cutting steels — Part 3 : Wrought quenched and tempered unalloyed steels with controlled sulphur content.*

ISO 1641-1, *End mills and slot drills — Part 1 : Milling cutters with parallel shanks.*

ISO 1701, *Test conditions for milling machines with table of variable height, with horizontal or vertical spindle — Testing of the accuracy.*

ISO 2854, *Statistical interpretation of data — Techniques of estimation and tests relating to means and variances.*

ISO 3002-1, *Basic quantities in cutting and grinding — Part 1 : Geometry of the active part of cutting tools — General terms, reference systems, tool and working angles, chip breakers.*

ISO 3685, *Tool-life testing with single-point turning tools.*

ISO 4957, *Tool steels.*

ISO 5414-1, *Tool chucks (end mill holders) with clamp screws for flatted parallel shank tools — Part 1 : Dimensions of the driving system of tool shanks.*

ISO 5414-2, *Tool chucks (end mill holders) with clamp screws for flatted parallel shank tools — Part 2 : Connecting dimensions of chucks.*

## 3 Workpiece

### 3.1 Work material

In principle, testing bodies are free to select the work materials according to their own interest. However, in order to increase the comparability of results between testing bodies, the use of one of the reference materials, steel C45 according to ISO/R 683-3 or cast iron grade 25 according to ISO/R 185, is recommended. More detailed specifications of these materials are given in annex A.

Within the specification, materials may vary with a resulting affect on machinability. To minimize such problems, the provision of a work material in compliance with stricter specifications shall be discussed with the supplier.

Information concerning the work material such as grade, chemical composition, physical properties, microstructure, complete details of the processing route of the work material (e.g. hot rolled, forged, cast or cold drawn) and any heat treatment should be reported in the test report (see 9.3.1 and annex A).

The hardness of the prepared workpiece shall be determined on one end of each test piece over the testing zone on the cross-section (see 9.3.1). For the recommended workpiece sections, the hardness indentations shall be placed along the centre-line of the zone parallel to the longest edge. The minimum number of test points shall be five; one on the centre, one near each edge and one on either side of the centre point between the centre and the edge points (see figure 4).

## ISO 8688-2 : 1989 (E)

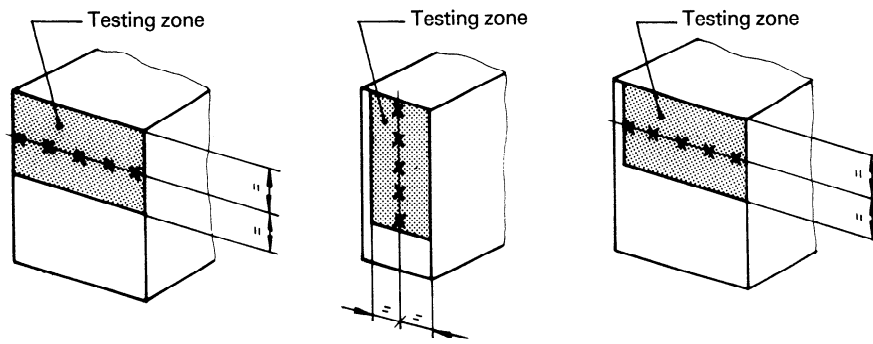


Figure 4 – Hardness testing

For workpieces which are cut from larger billets or for which hardness variation might be expected to be significant, additional hardness measurements should be taken to ascertain that the hardness values fall within the prescribed limits. The location of such measurement points and the method of measuring should be reported in the test report.

The deviation in hardness within one batch of material should be as small as possible. A realistic value for the reference materials given in annex A and similar materials is  $\pm 5\%$  of the arithmetic mean value.

In order to be able to compare results over reasonably long periods of time, it is recommended that testing bodies procure sufficiently large quantities of reference work materials to cover their needs.

### 3.2 Dimensions

**3.2.1** The recommended workpiece for end milling (see 9.3.1) shall be a bar or billet of rectangular cross-section with a minimum width of 2 times the cutter diameter (50 mm min. for  $D = 25$  mm) and a minimum length of 10 times the cutter diameter (250 mm min. for  $D = 25$  mm) but preferably with a recommended length of 20 times the cutter diameter. The actual length should be reported.

The maximum and minimum values of height and width may be determined according to the number of tests to be made and the need for uniform material properties. These dimensions should be restricted to ensure adequate stability during machining. The actual dimensions shall be reported.

**3.2.2** For cast material, the dimensions of the parallelepiped shall be chosen to obtain the required metallographic structure.

## 4 Tool : Cutter

In principle, testing bodies are free to select the cutter according to their own interests. However, in order to increase the comparability of results between testing bodies, the use of a

slot drill 25 mm in diameter is recommended for slot cutting tests (see figure 1) and a four-fluted end mill 25 mm in diameter is recommended for end milling tests (see figures 2 and 3).

Any deviation from the recommended cutter should be reported.

### 4.1 Dimensions and tolerances

The dimensions of the recommended cutter shall be in accordance with ISO 1641-1. The main dimensions of the recommended cutter are given in figures 5 and 6.

The deviation between individual tools used in the same testing sequence should be kept to a minimum (see 4.2 and 9.3).

### 4.2 Tool geometry

**4.2.1** It is recommended that all cutting tests in which the tool geometry is not the test variable be conducted using the cutting tool geometry given in table 1.

The cutting tool angular geometry designations are in accordance with ISO 3002-1 (see figure 7).

The deviation between individual tools used in the same testing sequence should be kept to a minimum. This means that smaller tolerances than those given in table 1 are recommended. This applies especially to the primary clearance angle  $\alpha_{01}$ .

The provision of tools with closer geometrical tolerances should be discussed with the supplier.

**4.2.2** In cutting tests, in which the tool geometry is the test variable, all the tools shall be manufactured together in the same batch of steel from the same charge (heat) and using the same heat treatment.

The deviation between individual tools used in the same test sequence should be kept to a minimum.

The provision of tools fulfilling this demand should be discussed with the supplier.

### 4.3 Tool conditions

In order to avoid regrinding problems it is recommended to use new tools only. However, if the effects of regrinding are being investigated, the diameter of the tool should not be reduced below 90 % of the original tool diameter, and for such tests the actual diameter should be reported in the test report.

The surface roughness  $R_a$  of the face of the tool shall not exceed 1,25  $\mu\text{m}$ . For the flank this limit is 0,8  $\mu\text{m}$ . The surface roughness  $R_a$  is measured in accordance with ISO 468.

### 4.4 Tool material

In all cutting tests, in which the tool material is not itself the test variable, the investigation shall be conducted with an appropriate reference tool material to be defined by the testing body.

In principle, testing bodies are free to select the tool materials according to their own interests. However, in order to increase the comparability of results between testing bodies, the use of one of the following reference tool materials is recommended : uncoated high-speed steel, non-cobalt alloyed (S2 and S4) or cobalt alloyed (S8 and S11), in accordance with ISO 4957. Whenever possible, supplies of tools from the same batch should be requested.

The provision of a reference tool material of stricter specifications for machining tests should be discussed with the supplier

in order to guarantee as much uniformity of the tool as is practical (see 4.2.2). These reference tool materials should not have any coating or surface treatment.

If the tool material is the test variable, the material classification and as many characteristics as possible shall be reported.

The presence of any coating or surface treatment shall be reported in detail.

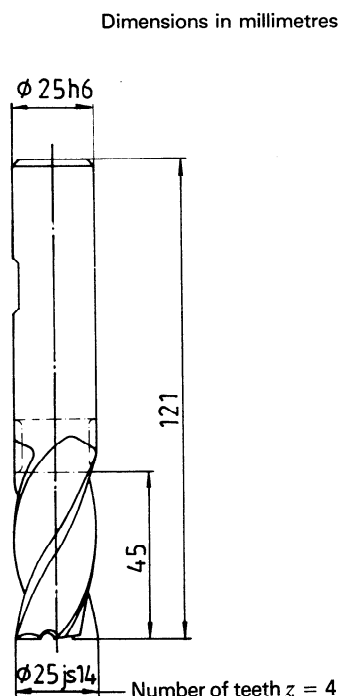
### 4.5 Mounting of the tool

The end mill or slot drill shall be mounted in a chuck with dimensions in accordance with ISO 5414-1 and ISO 5414-2. The cutter shall be securely fastened in the chuck and the runout of the cutter shall be carefully checked at the cutting edges (on the mounted tool). The maximum value of the runout at any point at the cutting edges shall not exceed the following values :

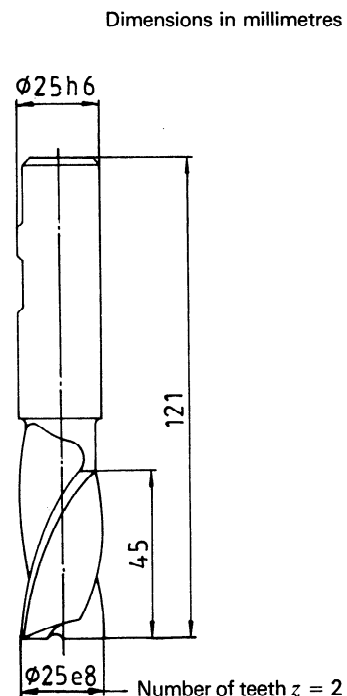
- radial runout : 50  $\mu\text{m}$
- axial runout : 30  $\mu\text{m}$

The values of runout specified above can be achieved using standard tools and chucks mounted on conventional machines.

For testing conditions, using the lower value of feed per tooth (see tables 2 and 3), efforts should be made to select tools and chucks to minimize the actual values of runout. The actual runout shall be measured and recorded.



**Figure 5 — End mill**  
(see ISO 1641-1)



**Figure 6 — Slot drill**  
(see ISO 1641-1)

ISO 8688-2 : 1989 (E)

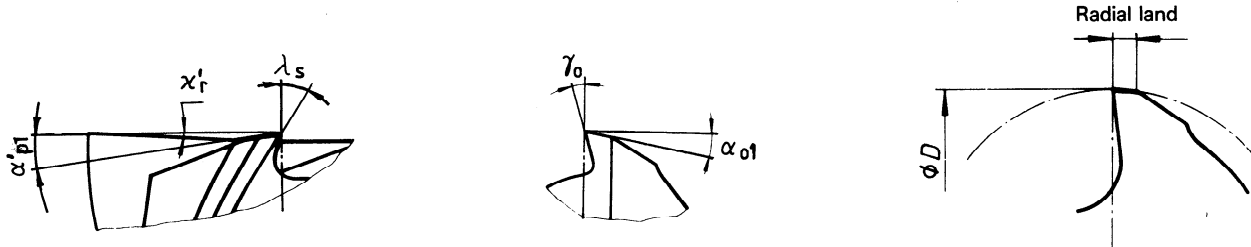


Figure 7 – Tool geometry

Table 1 – Tool geometry and tolerances for end mills and slot drills

Symbol	Terminology according to ISO 3002-1	Terminology in common use	Geometry and tolerances	
			End mills	Slot drills
$\lambda_s$	Tool cutting edge inclination	Helix angle	$30^\circ \pm 2^\circ$	$30^\circ \pm 2^\circ$
$x'_r$	Tool minor cutting edge angle	Minor cutting edge angle	$1^\circ \pm 0,5^\circ$	$1^\circ \pm 0,5^\circ$
$\gamma_o$	Tool orthogonal rake	Radial rake angle	$12^\circ \pm 3^\circ$	$12^\circ \pm 3^\circ$
$\alpha_{o1}$	Tool orthogonal clearance, first flank	Primary clearance angle, face cutting edge	$8^\circ \pm 2^\circ$	$8^\circ \pm 2^\circ$
$\alpha'_{p1}$	Tool minor cutting edge back clearance, first minor flank	Primary clearance angle, end cutting edge	$7^\circ \pm 1^\circ$	$7^\circ \pm 1^\circ$
		Radial land, mm	—	0,2 max.
		Radial runout, $\mu\text{m}$	18	8
		Axial runout, $\mu\text{m}$	18	18
		Corner chamfer ( $45^\circ$ ) or radius, mm	$0,3 \pm 0,1$	$0,12 \pm 0,03$

## 5 Cutting fluid

Cutting fluid shall be used when cutting steel. When cutting cast iron, the use of cutting fluid is not recommended. The cutting fluid shall be clearly specified. This specification should include, for example, the trade-mark or composition of the active elements, the actual concentration, the hardness of the water (when used as a diluent), or the pH value of the solution or emulsion.

When using cutting fluid the flow should "flood" the active part of the tool. The flow-rate should not be less than 3 l/min or 0,1 l/min for each cubic centimetre per minute of metal removal rate, whichever is the larger. The orifice diameter, the flow-rate and the reservoir temperature should be reported.

## 6 Cutting conditions

The recommended cutting data (see tables 2 and 3) have been chosen and combined in order to correspond to and to emphasize the milling principles dealt with in this part of ISO 8688 (see figures 1, 2 and 3). Up milling (feed motion opposite to the peripheral movement of the tool) as well as down milling (feed motion in the same direction as the peripheral movement of the tool) are considered.

### 6.1 Recommended cutting conditions

The cutting conditions for all tests in which the feed per tooth  $f_z$ , the axial depth of cut  $a_a$  or the radial depth of cut  $a_r$  are not the prime test variables, shall be selected from tables 2 and 3.

**Table 2 — Recommended cutting conditions for slot milling**

Cutting condition		I	II
Axial depth of cut $a_a$	mm	12,5	20
Radial depth of cut $a_r$	mm	25 <sup>1)</sup>	25 <sup>1)</sup>
Feed $f_z$	mm/tooth	0,08	0,125

1) Diameter of the slot drill.

**Table 3 — Recommended cutting conditions for end milling**

Cutting condition		I	II	III	IV
		$a_a > a_r$ (see figure 2)		$a_a < a_r$ (see figure 3)	
Axial depth of cut $a_a$	mm	20	20	12,5	12,5
Radial depth of cut $a_r$	mm	2,5	2,5	20	20
Feed $f_z$	mm/tooth	0,08	0,125	0,08	0,125

The tolerance on the axial depth of cut and the radial depth of cut shall be  $\pm 5\%$ .

1)  $D$  is the diameter of the cutter (equal to 25 mm for a standard cutter, i.e.  $a_r$  max. = 20 mm).

### 6.2 Other cutting conditions

In cases where the feed, the axial depth of cut or the radial depth of cut are the test variables, all data shall be clearly specified. It should be noted, however, that the cutting conditions shall be chosen to be compatible with the cutting tool, the machine tool, the clamping device, etc., in order to obtain reliable test data.

In cases where the cutting conditions indicated in tables 2 or 3 cannot be achieved, other values as close as possible to those indicated may be used. Other cutting conditions should be limited to the minimum values given in table 4.

The maximum radial depths of cut  $a_r$  for end milling should be limited to  $0,8D$ <sup>1)</sup>.

**Table 4 — Minimum limits of cutting conditions**

Cutting condition		Slot milling	End milling
Minimum feed per tooth $f_z$	mm	0,05	0,05
Minimum axial depth of cut $a_a$	mm	2	2*
Minimum radial depth of cut $a_r$	mm	—	2**

\* For  $a_a < 0,25D$  the value of  $a_r$  should be at least  $0,25D$ .

\*\* For  $a_r < 0,25D$  the value of  $a_a$  should be at least  $0,25D$ .

### 6.3 Cutting speed

The cutting speed is the peripheral speed of the cutting tool determined at the nominal diameter (see figures 5 and 6). The average cutting speed should be measured with the tool under load at cutting conditions representative of the test conditions to take account of any losses resulting from the cutting action.

It is suggested that the desired cutting speed be established from a preliminary test (see 9.2). An appropriate cutting speed can be found in machining data handbooks. For the reference workpiece materials and the reference cutting tool this speed will be approximately 30 m/min for high-speed steel S2 and S4, and approximately 35 m/min for S8 and S11.

A relatively small change in cutting speed will significantly affect tool life, e.g. a change of  $\pm 5\%$  may result in an approximate doubling or halving of tool life.

## 7 Tool deterioration and tool-life criteria

### 7.1 Introduction

In practical workshop situations the time at which a tool ceases to produce workpieces of the desired size or surface quality usually determines the end of useful tool life. The period up to the instant when the tool is incapable of further cutting may also be considered as the useful tool life. However, the reasons for which tools may be considered to have reached the end of their useful tool life will be different in each case depending on the cutting conditions, etc.

## ISO 8688-2 : 1989 (E)

To increase reliability and comparability of test results it is essential that tool life be defined as the total cutting time of the tool to reach a specified value of tool-life criterion.

In order to produce test values which are reliable and comparable with test values produced from a variety of sources, it is necessary to identify and classify tool deterioration phenomena in accordance with 7.3 and to recommend those, together with their limiting values, which should be used to determine the end of useful tool life in accordance with 7.4.

Depending on where the deterioration occurs at the cutting edges, different values can be accepted.

This part of ISO 8688 recommends that tool deterioration in the form of wear be used for determining tool life. Since other modes of tool deterioration may determine the end of useful tool life, the definitions given in 7.2 take into account cracks, chipping and deformation.

Each type of deterioration will progress or occur in a variety of ways depending on the cutting conditions. Where more than one form of deterioration becomes measurable, each should be recorded, and when any one of the deterioration phenomena limits has been attained, the end of tool life has then been reached.

The numerical value of tool deterioration used to determine tool life governs the quantity of testing material required and the costs of testing.

If the limiting value is too high, the cost of establishing results may exceed the worth of these results. If the limiting value is too low, the established result may be unreliable since it may be determined during the initial stages of deterioration development under the test conditions.

Many types of tool deterioration phenomena are listed in this clause. Some of them may occur only occasionally under the testing conditions recommended in this part of ISO 8688.

## 7.2 Definitions

For the purposes of this part of ISO 8688, the following definitions apply.

**7.2.1 tool deterioration** : All changes in a cutting part of a tool caused by the cutting process.

Two major classes of tool deterioration are distinguished, i.e. tool wear and chipping.

**7.2.1.1 tool wear** : Change in shape of the cutting part of a tool from its original shape, resulting from the progressive loss of tool material during cutting.

**7.2.1.2 brittle fracture (chipping)** : Occurrence of cracks in the cutting part of a tool followed by the loss of small fragments of tool material, resulting from crack initiation during cutting.

**7.2.2 tool deterioration measure** : Quantity used to express the magnitude of a certain aspect of tool deterioration by a numerical value.

*Example :*

- The width of a flank wear land  $VB_1$  (see 7.3.1.1).

**7.2.3 tool-life criterion** : Predetermined value of a specified tool deterioration measure or the occurrence of a specified phenomenon.

*Example :*

- The width of a flank wear land  $VB_1 = 0,3$  mm (see 7.4.1).

**7.2.4 tool life  $T_c$**  : Total cutting time of the cutting part required to reach a specified tool-life criterion (see 7.5).

### 7.3 Tool deterioration phenomena

Wear on end milling cutters and slot drills is illustrated in figure 8.

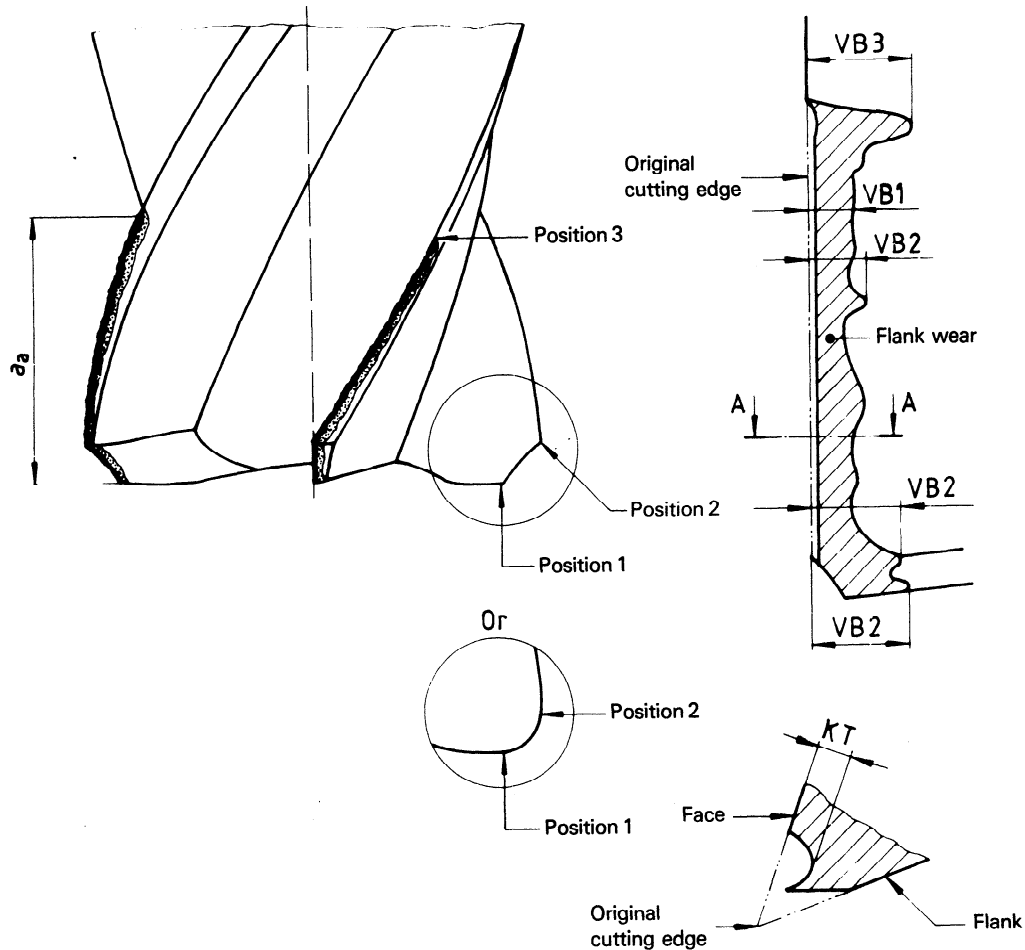
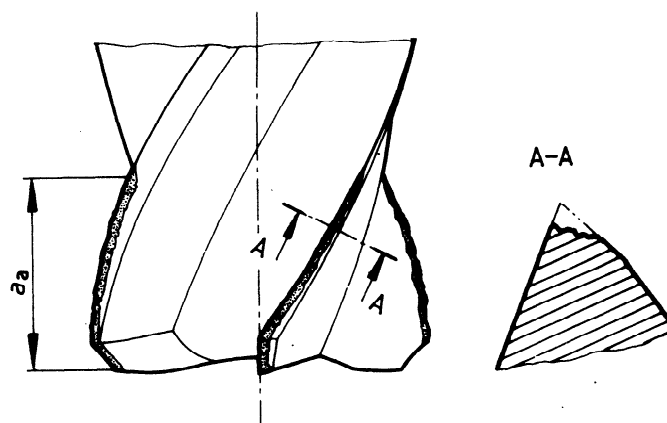


Figure 8 – Wear on end milling cutters and slot drills

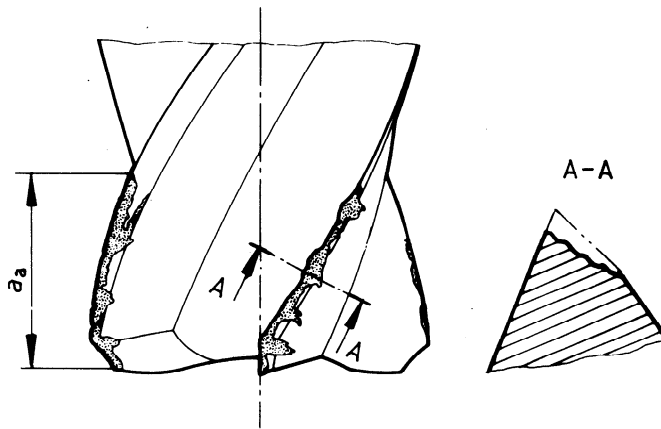
**7.3.1 flank wear (VB) :** Loss of tool material from the tool flanks during cutting which results in the progressive development of a flank wear land.

**7.3.1.1 uniform flank wear (VB 1) :** Wear land which is normally of constant width and extends over those portions of the tool flanks adjoining the entire length of the active cutting edge.

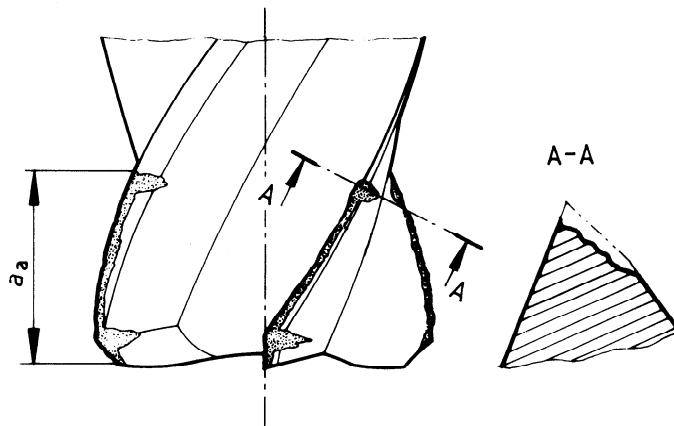


**ISO 8688-2 : 1989 (E)**

**7.3.1.2 non-uniform flank wear (VB 2) :** Wear land which has an irregular width and for which the profile generated by the intersection of the wear land and the original flank varies at each position of measurement.

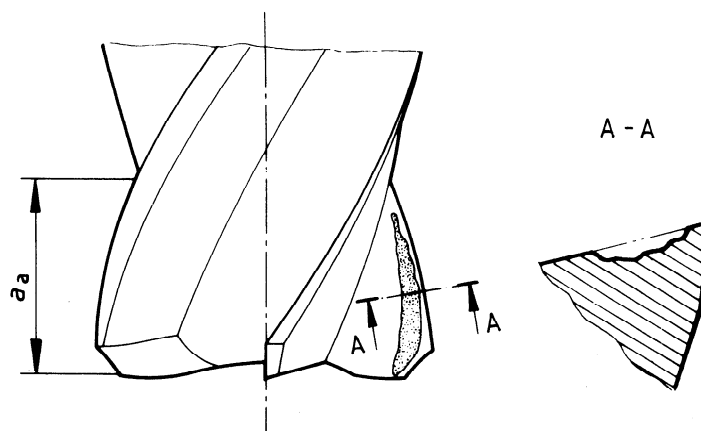


**7.3.1.3 localized flank wear (VB 3) :** Exaggerated and localized form of flank wear which develops at a specific part of the flank. (see figure 8, positions 1, 2 or 3).

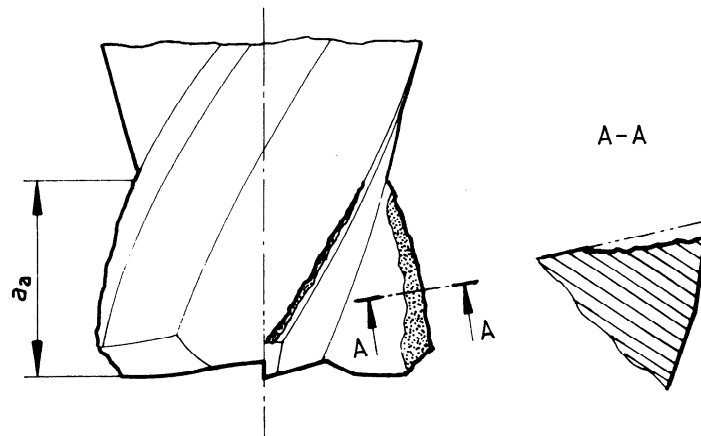


**7.3.2 face wear (KT) :** Gradual loss of tool material from the tool face during cutting.

**7.3.2.1 crater wear (KT 1) :** Progressive development of a crater oriented approximately parallel to the major cutting edge and with a maximum depth some distance away from the major cutting edge.

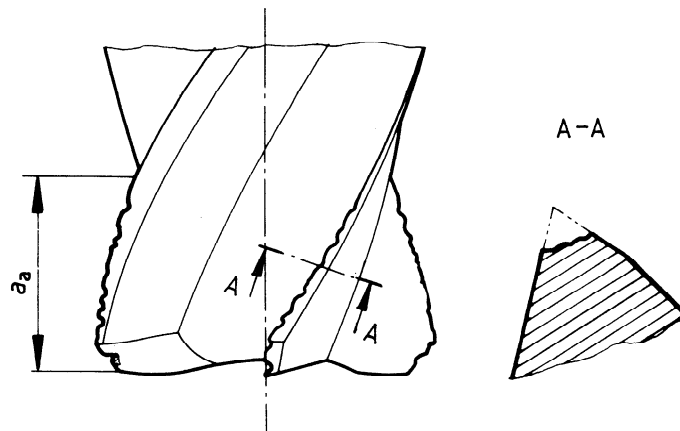


**7.3.2.2 stair-formed face wear (KT 2) :** Form of face wear in which the maximum depth of the wear scar, measured perpendicular to the tool face, occurs at the intersection of the wear scar with the tool major flank.

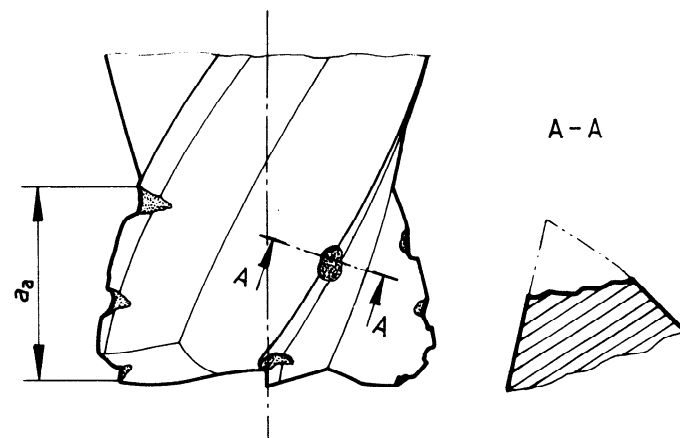


**7.3.3 chipping (CH) :** Edge deterioration where parts of the edge break away.

**7.3.3.1 uniform chipping (CH 1) :** Loss of tool fragments of approximately equal size along the cutting edges, which significantly influences the uniformity of the width of the flank wear land.

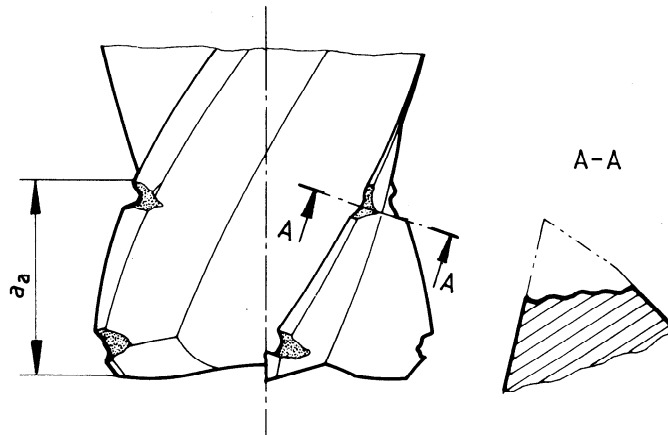


**7.3.3.2 non-uniform chipping (CH 2) :** Chipping which occurs mostly in connection with cracks at a small number of positions along the active cutting edges but with no consistency from one cutting edge to another.

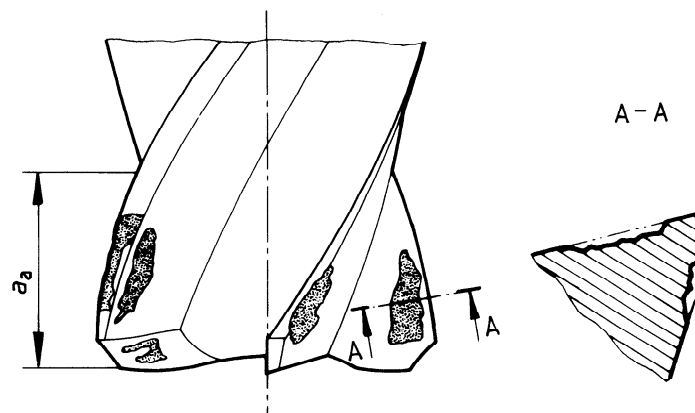


**ISO 8688-2 : 1989 (E)**

**7.3.3.3 localized chipping (CH 3) :** Chipping which occurs consistently at certain positions along the active cutting edge.

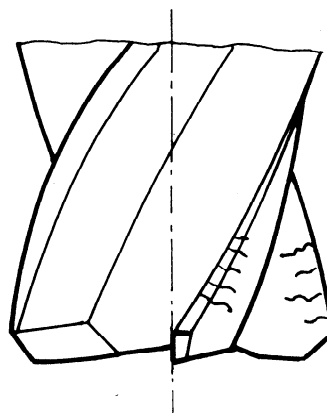


**7.3.4 flaking (FL) :** Loss of tool fragments in the form of flakes from the tool surfaces. This phenomenon is most frequently observed when coated tools are used but may also be observed with other tool materials.

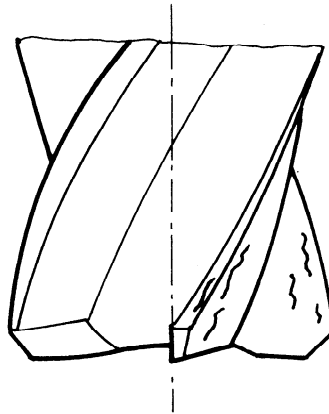


**7.3.5 cracks (CR) :** Fracture of the cutting tool material which does not immediately cause loss of tool material.

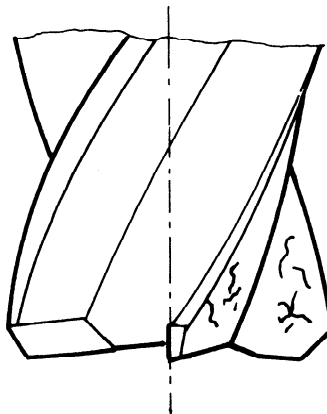
**7.3.5.1 comb cracks (CR 1) :** Cracks which appear on both the tool face and the tool flank and are oriented approximately perpendicular to the major cutting edge.



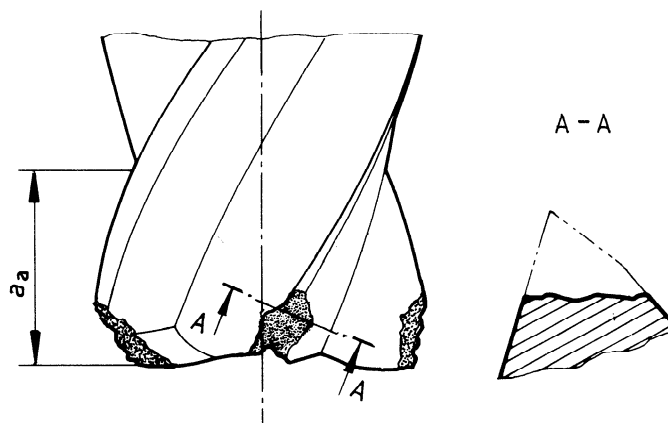
**7.3.5.2 parallel cracks (CR 2) :** Cracks which appear on the tool face or the tool flank and which are oriented approximately parallel to the major cutting edge.



**7.3.5.3 irregular cracks (CR 3) :** Cracks which sometimes appear on the tool face and on the tool flank and which are irregularly oriented.



**7.3.6 catastrophic failure (CF) :** Rapid deterioration to complete failure of the cutting part.



## ISO 8688-2 : 1989 (E)

### 7.4 Tool deterioration phenomena used as tool-life criteria

In order to be able to determine tool life and to compare the influence of different test parameters it is necessary to select one defined type of deterioration of the cutting part as a criterion.

The tool-life criterion can be a predetermined numerical value of any type of tool deterioration which can be measured. Where more than one form of deterioration becomes measurable, each should be recorded and when any one of the deterioration phenomena limits has been attained, the end of tool life has been reached.

The type of deterioration that is believed to contribute most to the end of useful tool life in a specific series of tests shall be used as a guide to the selection of one of the tool-life criteria specified. The type and value of the criterion used shall be reported.

#### 7.4.1 Recommended tool-life criteria

Tool-life criteria which can be defined as a predetermined numerical value of specific types of tool wear are recommended.

A certain width of the flank wear land (VB) is the most commonly used criterion.

The following tool life end points are recommended :

- Uniform wear : 0,3 mm averaged over all teeth.
- Localized wear : 0,5 mm max. on any individual tooth.

#### NOTES

- 1 Often the maximum localized wear occurs at a position on the flanks adjacent to the work surface during cutting.
- 2 Variations in the primary clearance angle  $\alpha_{o1}$ , within the limits specified in table 1, may affect the width of the flank wear land significantly and should therefore be minimized.

#### 7.4.2 Other tool-life criteria

In cases where none of the recommended criteria applies, it may be possible to obtain meaningful data by using one of the following criteria.

- A certain depth of the face wear (KT) is sometimes used as a criterion.
- Chipping (CH) is a criterion which may be used.
- When chipping occurs it is to be treated as localized wear using a VB 3 value equal to 0,5 mm (see figure 8) as a tool-life end point.
- Chipping (CH) in a very heavy form and flaking (FL) are forms which exceptionally could be used as criteria.

Catastrophic failure (CF) can occur inadvertently and should not be used as a primary criterion for the tool-life end point.

Cutters with small diameters (usually less than 12 mm) sometimes break owing to clogging or increasing wear of various types before wear measurements can be recorded. This type of deterioration is not recommended as a tool-life criterion.

### 7.5 Assessment of tool deterioration

Measurement of tool wear and brittle deterioration using appropriate equipment (see 8.2 and 9.3.5) at intervals determined by the test plan (see 9.2) should be recorded on the data sheets and plotted on diagrams (see 10.4 and annex B).

When there is evidence of built-up-edge (BUE), built-up-layer (BUL), or other debris of work material on the surface of the cutting tool, such observations should be reported since accurate measurement of the deterioration phenomena may be impeded by such deposits. Although mechanical techniques for the removal of deposits from tool surfaces are not recommended, it may be permitted to remove BUE or BUL using a soft material such as a "thumb nail", piece of plastic or wood, with a minimal risk of damaging the tool. Chemical etching may be used only when the cutting tool material is very different from the work material. If deposit removal is undertaken, the method used shall be reported in detail.

#### 7.5.1 Measurement of flank wear (VB)

Flank wear measurement is carried out parallel to the surface of the wear land and in a direction perpendicular to the original cutting edge, e.g. the distance from the original cutting edge to that limit of the wear land which intersects the original flank. Although the flank wear land on a significant portion of the flank may be of uniform size, there will be variations in its value at other portions of the flanks depending on the tool profile and edge chipping (see 7.3). Values of flank wear measurements shall therefore be related to the area or position (see figure 8) along the cutting edges at which the measurement is made (see 7.2 and 7.3).

#### 7.5.2 Measurement of face wear (KT)

Face wear KT 1 is evaluated by the crater depth which is measured from the original face of the tool in a direction perpendicular to the original face. Since the depth of the crater will vary along its length, the position of the depth measurement in relation to the original cutting edge should be recorded together with the position of the section considered for measurement in relation to some reference point on the tool faces (see 7.2 and 7.3.2.1).

Face wear KT 2 is measured as the distance between the worn edge and the original cutting edge in a direction perpendicular to the original face (see 7.2 and 7.3.2.2).

#### 7.5.3 Assessment of chipping (CH)

Chipping should be measured both on the flank and on the face parallel and perpendicular to the original cutting edge. The position along the cutting edge where chipping occurs should be indicated.

#### 7.5.4 Assessment of cracks (CR)

Cracking is evaluated by counting the cracks (observed at a magnification of 8X) and by measuring the minimum distance between two consecutive cracks. The position of the cracks should be reported.

### 8 Equipment

#### 8.1 Machine tool

The milling machine on which the tests are to be conducted shall have sufficient power and physical capacity, be of stable design and be in such condition that abnormal vibrations or deflections are not observed during the test. Cutting conditions which cause chatter should not be used. However, if chatter does occur it may be reduced significantly or eliminated by a

small change in cutting speed without varying other cutting parameters.

The spindle axis orientation, vertical or horizontal, shall be recorded.

The accuracy of the milling machine shall be in accordance with ISO 1701.

The feed speed under load shall be constant.

The traverse required for a test should not exceed 0,75 times the limit of motion of the axis.

#### 8.2 Other equipment

Table 5 lists equipment which is necessary and recommended for carrying out the tests specified in this part of ISO 8688.

Table 5 — Equipment necessary for measurements in the end milling tests

Clause	Minimum equipment	Recommended equipment
<b>3 Workpiece</b>		
Dimensions	Graduated rule	Sliding calliper
Hardness	Hardness tester	Hardness tester
<b>4 Cutter</b>		
Dimensions	Sliding calliper	Micrometer, 0-25
Roughness	Roughness standard	Surface tester
Defects	Magnifier, having a minimum magnification of 8X	Toolmakers' microscope
Runout	Dial indicator	Dial indicator, graduated to 0,001 mm
Hardness		Hardness tester
<b>5 Cutting fluid</b>		
Concentration		Refractometer
Flow	Graduated vessel and stop-watch	Graduated vessel and stop-watch
(pH value)	1)	pH meter
(Temperature)		Thermometer
<b>6 Cutting conditions</b>		
Feed speed	Stop-watch	Stop-watch
Spindle speed	Tachometer	Tachometer
Depth and width of cut	Sliding calliper	Sliding calliper
<b>7 Tool deterioration</b>		
Flank wear, face wear, chipping and flaking	Toolmakers' microscope, dial indicator with a contact point 0,2 mm in diameter	Toolmakers' microscope, profile recorder and special device for mounting the tools under the microscope
<b>10 Evaluation of results</b>		Programmable calculator

1) Use freshly diluted cutting fluid.

## ISO 8688-2 : 1989 (E)

### 9 Procedure

#### 9.1 Purpose

The main purpose of the test may be the comparison (or ranking) or work materials, tool materials, tool geometries or cutting fluids. Other purposes may include the establishment of data useful for making cutting condition recommendations, the study of machining characteristics such as forces exerted on the tool, machined surface characteristics or chip form. However, for these purposes certain recommendations given in this part of ISO 8688 may have to be modified to suit the specific requirements or aims of the test. Such modifications shall be reported.

#### 9.2 Planning

Planning of the test programme should take into consideration which of the following types of tests should be used to achieve the purpose of the test.

- Type A : One single test point for a particular combination of test variables.

This type of test is intended for the determination of, for example, differences between two or more batches of work materials, groups of tools, etc. (see 10.3.1).

- Type B : One  $vT$  curve, with the cutting speed as a variable for a particular combination of other cutting variables (see 10.3.2).

- Type C : Tool life as a function of cutting speed and feed (see 10.3.3).

- Type D : Tool life as a function of cutting speed, feed, and axial and radial depths of cut (see 10.3.3).

- Type E : Machining characteristics such as cutting forces, machined surface and chip formation.

When planning the tests outlined above, the likely scatter in test results and the need for a minimum number of tests, which may be determined from previous experience or from statistical considerations (see clause 10), should be considered.

Care should be exercised when assessing the material quantity requirements for completing the entire test programme (see tables 6 and 7). Guidance in the selection of the cutting speed range, the feed values and the desirable time intervals between successive assessments of the amount of tool deterioration, taking into account the expected progression of tool deterioration, may be obtained from preliminary tests.

**Table 6 — Approximate mass of material removed for each single test run using the recommended criteria under the recommended test conditions for slot milling**

Cutting condition		I	II
Axial depth of cut $a_a$	mm	12,5	25
Radial depth of cut $a_r$	mm	25	25
Feed $f_z$	mm/tooth	0,08	0,125
Approximate mass of material removed (to achieve recommended tool-life criterion)	speed, 30 m/min	kg/test run	7
	speed, 35 m/min		15
			3
			6

**Table 7 — Approximate mass of material removed for each single test run using the recommended criteria under the recommended test conditions for end milling**

Cutting condition		I	II	III	IV
Axial depth of cut $a_a$	mm	25	25	12,5	12,5
Radial depth of cut $a_r$	mm	2,5	2,5	20	20
Feed $f_z$	mm/tooth	0,08	0,125	0,08	0,125
Approximate mass of material removed (to achieve recommended tool-life criterion)	speed, 30 m/min	kg/test run	3	4	11
	speed, 35 m/min		2	2	4
				6	

### 9.3 Preparation of material, tools and equipment

Prior to the commencement of any single experiment constituting part of a test programme the following preparatory steps should be taken.

#### 9.3.1 Workpiece

All types of surface scale should be machined away. Individual specimens of appropriate size should be cut from the bars or billets and clearly stamped to identify the parent bar or billet, and the position and orientation within that bar or billet originally occupied by the specimen.

Visual inspection and hardness tests should be carried out on each test piece and details recorded before commencing the cutting test (see 3.1). Where a specimen has been used previously, the machined surface generated under the test conditions may have to be considered as "scale" and removed by clean-up cuts with a fresh tool before a new experiment is started.

#### 9.3.2 Tool geometry and cutting edges

Tool geometry should be inspected and recorded (see 4.2, 4.3 and 7.4.1). The cutting edges should be marked, inspected and compared with recommended cutting edge conditions at a minimum magnification of 8X and checked for cutting defects such as burn marks, chipping and cracking. The cutting edges shall have neither burrs nor feather edges. The defects shall be corrected, if possible; otherwise the tool shall not be used.

#### 9.3.3 Tools and tool holders

The chuck should be checked for damage. The machine spindle and chuck should be cleaned immediately prior to mounting the chuck. The axial and radial runout of the tool should be measured, after it has been mounted in the chuck, using an indicator, graduated to 0,001 mm and having a flat anvil, and the values recorded for each edge. Recommended limiting values of runout are given in 4.5.

#### 9.3.4 Machine tool

Since spindle speeds and feed speeds quoted on machine tools may be nominal values, the actual spindle speeds and feed speeds should be measured and recorded under load conditions which are representative of the test conditions. Before any testing is commenced, the machine tool should be warmed up by running the spindle for a minimum period of 30 min at a speed of 0,7 times the maximum available spindle speed or at the speed to be used in the test. At 5 min intervals during this period the feed motion should be engaged to cause an axis movement at least equal to that required for the test, in the region to be used for testing, and the axis then returned at rapid traverse.

Clamping devices should be checked to ensure the best possible workpiece stability.

#### 9.3.5 Equipment for assessment of tool deterioration

The availability and quality of suitable equipment for measuring tool deterioration phenomena should be ensured (see 8.2). This information should be recorded on suitable data sheets (see annex B).

#### 9.3.6 Personnel

Machine operators and other persons involved in the test programme should be adequately instructed as to the purposes of the tests and the test procedure.

### 9.4 Test techniques

Complete information concerning the tests should be recorded on suitable test data sheets (see annex B).

Before starting the actual tests, a check should be made to ensure that the cutting conditions have been chosen to be compatible with the cutting tools, the tool holder, the machine tool, the clamping device, etc., and that the estimated tool life will be obtained.

Tool or spindle overhang should be kept to a minimum.

Successive passes should always be made in the same feed direction and the tool should be returned to the starting point for a pass, ensuring that there is no possible contact between the cutting edges and the workpiece during the return motion.

Successive cuts in the same slot, in the axial direction of the tool, should not be allowed and for slotting tests (see figure 1) the slot should not be allowed to break out from the workpiece.

The walls between slots shall have a thickness equal to a quarter of the depth of cut and shall be not less than 3 mm.

The length of the pass is considered to be equal to the length of the workpiece or, if this is not relevant, the cut length corresponding to the feeding distance with the tool in full engagement with the workpiece.

Prior to commencing a new test run, the workpiece shall be "cleaned up" using a fresh tool (see 9.3.1).

### 9.5 Measurements and recording of tool deterioration

At time intervals determined by the test plan all edges should be examined. Measurements of tool deterioration should be carried out and the observations recorded on the data sheets together with details of any deterioration (see annex B).

These measurements should be made with the tool mounted in the machine (see 7.1 and 7.2). The measurements should be made on the most deteriorated edge. It may be acceptable to measure the cutter after removal from the machine tool spindle, provided that the cutter can be reinserted in the spindle and realigned in the same position after measurement.

The tool deterioration measurement values should be treated in accordance with clause 10.

## ISO 8688-2 : 1989 (E)

### 10 Evaluation of results

#### 10.1 General considerations

The evaluation of deterioration test results from end milling with multitoothed tools should be undertaken using the following guidelines.

- The aim of the test shall be established in accordance with clause 0 or 9.1.
- The test results should be obtained from a properly planned test programme (see 9.2).
- The principles for test techniques should be applied (see 9.4).

#### 10.2 Treatment of test values/observations

The individual edges of the same tool used in a given test run are not independent of each other. Consequently, the test values from measurements or other observations of tool deterioration on individual edges shall be regarded together as the result of a specified test run with one tool.

In tests where a specific type of deterioration is expected and measured or studied (see 7.3 to 7.5) any early or sudden occurrence of an unexpected deterioration phenomenon shall be carefully observed and recorded. If this unexpected deterioration is likely to have an influence on the test results, the test run shall be disregarded in the calculations of the total result.

Unexpected and very serious deteriorations should normally cause a rejection of the test run. The reasons shall be investigated. In the case of repeated failure, a change of the test conditions shall be considered.

#### 10.3 Number of test runs

Regardless of the purpose of the test or the type of test undertaken (see 9.1 and 9.2) the accuracy of the results which can be achieved or might be desired is always a function of the number of test runs.

The desired accuracy of the test results shall be balanced against the limitations given by the consumption of material, tools, time and money (see 7.5).

For the study of machining characteristics such as chip formation, surface characteristics, etc. (test type E, see 9.2), one test run of limited size for each test condition will normally be sufficient.

When comparing cutting tool materials, cutting fluids, etc. (see 9.1), experienced personnel may be able to establish with sufficient accuracy the significance of differences in the test results from a very small number of test runs.

For test procedures the purpose of which is to determine the tool life, edge deterioration phenomena are measured directly (see 7.4.1 and 7.5) or indirectly by observations of surface finish, dimensions of the workpiece or other machining results.

In these cases a number of test runs for each cutting condition is recommended to give an acceptable accuracy from a practical point of view and from the basis of experience and statistical considerations.

##### 10.3.1 Test type A

For test type A (see 9.2) a minimum of three repeated test runs is needed. However, if the differences between batches of materials, groups of tools, etc. are small, the use of the statistical methods given in annex C will show that more test runs may be needed in order to determine whether the results are significant.

##### 10.3.2 Test type B

To plot the tool life (see clause 7) as a function of the cutting speed ( $vT$  diagram) it is necessary to have at least five data points corresponding to five cutting speed values (see figure 9).

Starting with a cutting speed giving a tool life of not less than 5 min, the cutting speed should be decreased for each data point, if possible using a constant ratio such that the maximum tool life during testing is not less than 25 min.

A tool life of less than 5 min will be unreliable. However, a tool life in excess of 25 min may be costly in terms of material and time.

The actual cutting speeds used depend on the speeds available on the machine tool and the requirement for stable cutting, and they should be reported.

Two or more types of deterioration may occur in the same test. If it is not clear which type of deterioration will dominate, it is possible to use two (or even more) criteria (I and II in figure 10). This can be carried out in two different ways as follows.

- a) Determination of the tool life for criterion I for all tests in a specific series and subsequent determination of the tool life for criterion II, also for all tests in the series.

When tool life is plotted for both criteria as a function of a variable (e.g. the cutting speed) then two different curves will be obtained (see the example given in figure 10).

- b) Combined criteria are adopted and, in this case, the tool life will be considered to be ended when either criterion I or criterion II is reached. When tool life is plotted as a function of a variable (e.g. the cutting speed) this will usually result in a "broken" curve (see the example given in figure 10).

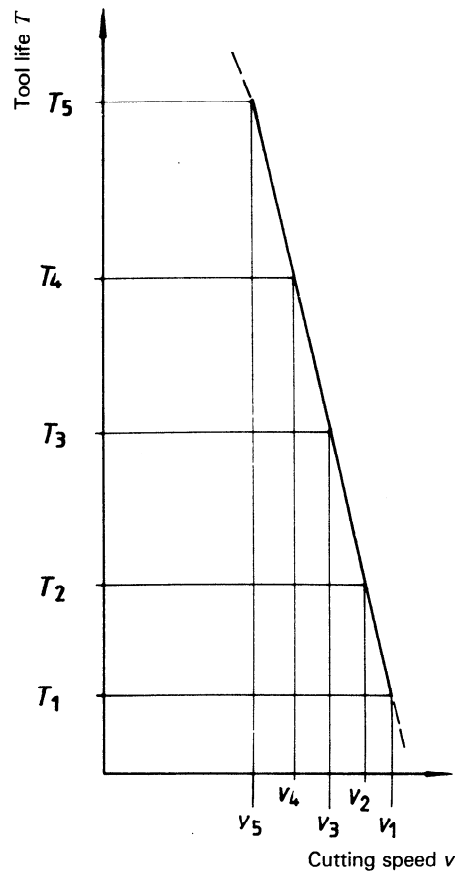


Figure 9 — Example of a  $vT$  curve (logarithmic scales)

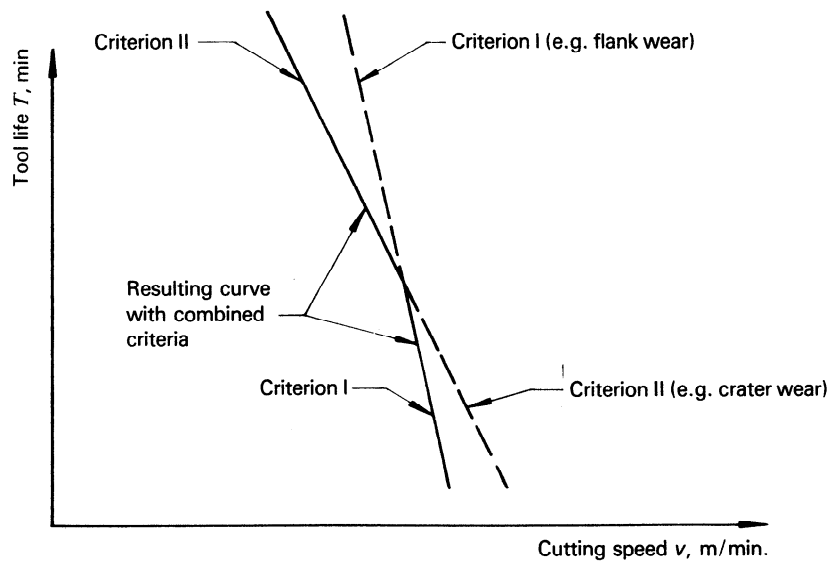


Figure 10 — Set of two  $vT$  curves resulting from the use of two different criteria and a “broken”  $vT$  curve resulting from the use of combined criteria (logarithmic scales)

**ISO 8688-2 : 1989 (E)**

**10.3.3 Test types C and D**

For test type C (see 9.2) the minimum number of data points is seven, obtained in seven test runs. For test type D (see 9.2) the minimum number of data points is nine, obtained in nine test runs.

**10.4 Diagrams**

Tool deterioration values of any type (see 7.3) obtained in a test run and treated as a group of dependent values from all the edges on the same cutter can be plotted over the effective cutting time (see 9.5). The data points on the curve may be the individual measurement values (see figure 11), the arithmetic mean values (see figure 12) or the maximum and minimum values (see figure 13). The arithmetic mean values and the maximum and minimum values are calculated statistically as described in annex C.

The tool life is obtained from the point or the field of intersection of the curves mentioned above and the horizontal line representing the limiting deterioration value determined as the "tool-life criterion" (see 7.4.). For repeated test runs, the tool life values can be treated statistically to calculate the arithmetic mean value, the standard deviation, the maximum and minimum values and the confidence interval.

Figures 11, 12 and 13 show a variety of curves which intersect the tool-life criterion level. It is essential, when plotting tool life against any cutting parameter or when reporting tool-life values, that it is made clear whether tool life is based on the values from one single test run, from the arithmetic mean value of a number of test runs or from the statistically determined maximum or minimum value.

Tool-life values obtained as described above can be plotted against any independent factor, e.g. cutting speed (see 9.2, types B, C or D), in order to give a  $vT$  diagram (see figure 9). It is common to plot  $vT$  diagrams with logarithmic scales. The

$vT$  curve thus obtained will, under normal conditions, be represented by a straight line. This line should be fitted to the data points in such a manner that the sum of the squares of the vertical distances between the line and the actual points is as small as possible. Experienced personnel may well be capable of constructing a line through the test points "by eye" with sufficient accuracy. Guidance on statistical calculations for this purpose are found in ISO 3685, and other references are given in clause 2.

It should be noted that the deterioration may change in character when cutting properties are changed, e.g. an increase in cutting speed. Consequently any diagram representing tool life as a function of changing cutting data shall be based on one specified deterioration phenomenon and one tool-life criterion. If this is not possible, the actual conditions shall be specially recorded.

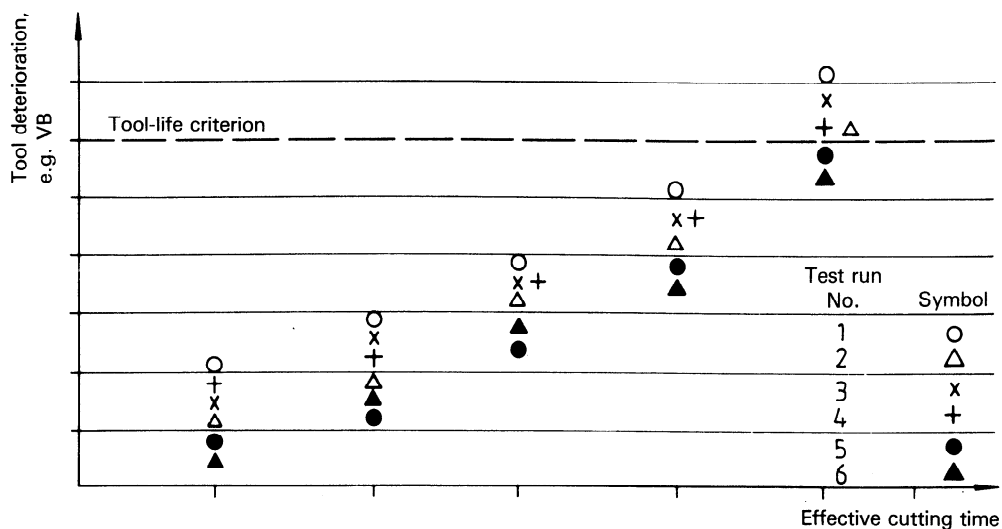
**10.5 Statistical interpretation**

The use of statistical methods in the evaluation of test results from cutting operations needs great care with regard to the number of test values and the quality of the test results. If these demands cannot be met, statistical methods should not be used.

Guidelines for statistical calculations of arithmetical mean values, standard deviations, maximum and minimum values and confidence intervals are given in annex C.

The determination of significant differences between results from two or more cutting conditions is also described as an example in the same annex. The recommended calculation method is based on Student's  $t$  distribution.

Guidelines for the statistical calculations which can be used for determining tool-life diagrams of type B, C or D (see 9.2) are found in ISO 3685 and other references given in clause 2 and in the bibliography.



**Figure 11 — Tool deterioration values for a number of test runs plotted against cutting time**

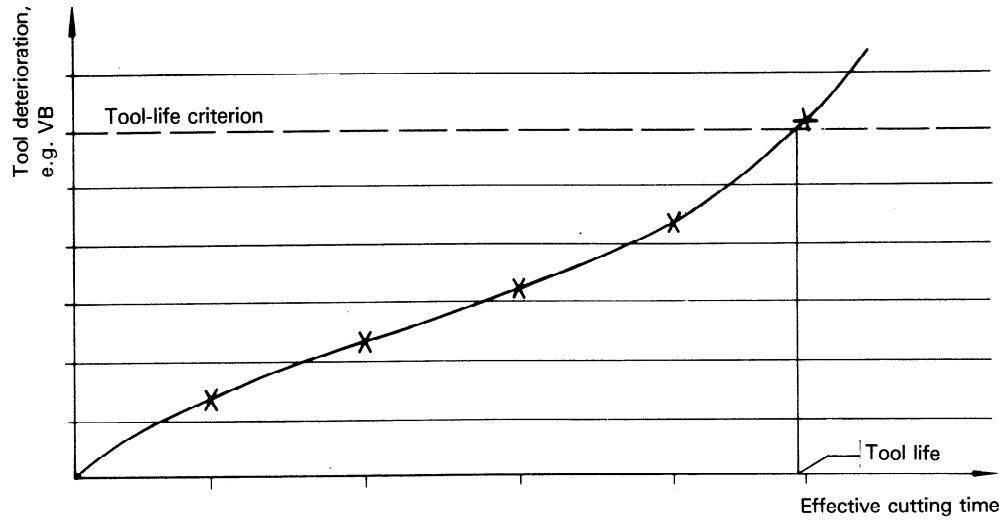


Figure 12 — Arithmetical mean values of tool deterioration for a number of test runs plotted against cutting time

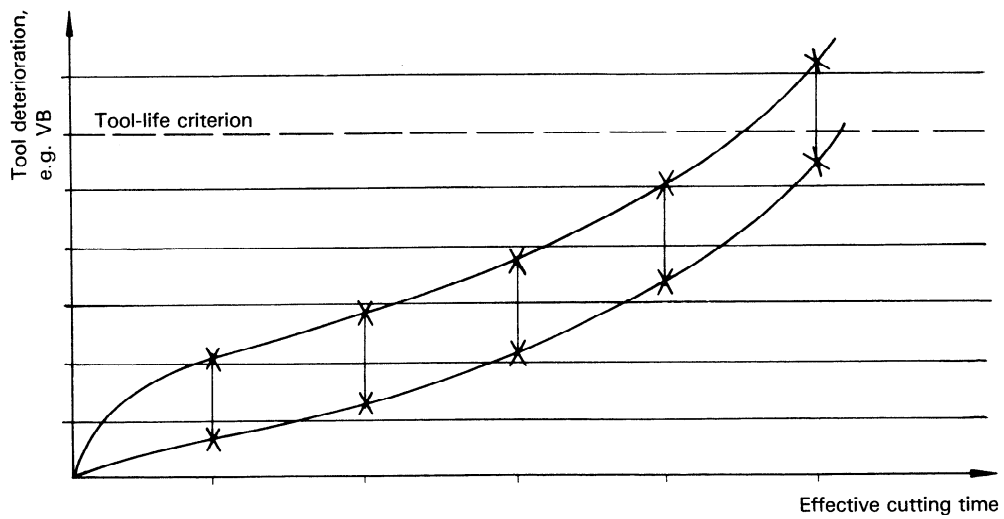


Figure 13 — Maximum and minimum tool deterioration values observed for the 95 % confidence level from a number of test runs plotted against cutting time

## Annex A

### Reference work materials

(This annex forms an integral part of the standard.)

#### A.1 Steel

The steel reference material shall be a hot-rolled medium-carbon steel of the following composition corresponding to steel C 45, in conformity with ISO/R 683-3.

C %	Si %	Mn %	S %	P %
0,42 to 0,50	0,15 to 0,40	0,50 to 0,80	0,02 to 0,035	0,035 max.

It is recommended that a steel of average composition be used if possible.

The presence of the following elements in excess of the maximum values given below shall disqualify the steel as a reference test material :

Ni = 0,20 %

Cr = 0,15 %

Mo = 0,05 %

V = 0,02 %

Cu = 0,20 %

The steel shall be deoxidized with aluminium. The minimum aluminium content shall be 0,01 % and the maximum aluminium content shall be 0,03 %. Special deoxidants shall not be used.

The nitrogen content, which is dependent to some extent on the steel-making process, should be as shown below.

Process	Nitrogen content %
Open hearth or oxygen convertors	0,003 to 0,006
Arc and single slag	0,004 to 0,008

The steel shall satisfy ISO/R 683-3 delivery condition 1 (chemical analysis only). The limits of the elements and the

deoxidation procedure shall be discussed with the steelmaker and analyses of C, Si, Mn, Ni, Cr, Mo, P, S, V, Cu, Al and N requested at the time or order.

In order to reduce dispersion of the test results, attempts should be made to obtain materials in which the actual composition is within stricter limits than indicated above.

The microstructure shall be specified and recorded.

The test bars, after being cut to size, shall be normalized to a hardness within the range specified in ISO/R 683-3.

For testing purposes where the work material is not the test variable, it is recommended that the hardness should fall within stricter tolerances than those indicated in ISO/R 683-3. The actual hardness values and points of measurement should be recorded and reported (see 3.1).

#### A.2 Cast iron

The cast iron reference material shall be supplied in accordance with ISO/R 185, grade 25.

The microstructure throughout the entire volume of each iron test bar shall consist essentially of a matrix of 100 % perlite with flake graphite within the following specifications :

- free iron carbide : 0 %
- free ferrite : 5 % max.
- steadite (iron-iron phosphide eutectic) : 5 % max.
- graphite : flake graphite only
- perlite : balance

For testing purposes where the work material is not the test variable, it is recommended that the hardness values fall within stricter tolerances than those indicated in ISO/R 185. The actual hardness values and points of measurement should be recorded and reported (see 3.1).



## Annex C

### Statistical calculations

(This annex forms an integral part of the standard.)

In order to compare the test results from two or more cutting conditions the first step is to determine the arithmetic mean values of the repeated test runs at each test condition. In this annex the symbol  $x$  is used to denote the test results. It could represent the tool life  $T$ , the number of parts produced  $U$  or any other test result.

The arithmetic mean value  $\bar{x}$  is obtained by dividing the sum of

the results from each test run  $\sum_{i=1}^n x_i$  by the number  $n$  of test runs :

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

The standard deviation  $s$  is then calculated as the root-sum-square of all the differences between the individual values  $x_i$  from each test run and the mean value  $\bar{x}$ , divided by the number of test runs  $n$  minus 1.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

The confidence interval, defined as the interval within which further test run results will be located with an assumed probability, is calculated as the arithmetic mean value  $\bar{x}$  plus and minus its variation :

$$\bar{x}_{\max} = \bar{x} + t \frac{s}{\sqrt{n - 1}}$$

and

$$\bar{x}_{\min} = \bar{x} - t \frac{s}{\sqrt{n - 1}}$$

where  $t$  is a constant obtained from table 7 for the 95 %, 99 % and 99,9 % confidence levels. The  $t$  values are dependent on the number of test runs, expressed by the number of degrees of freedom in table 7.

By using the following formula, it can be determined whether there is a significant difference between the results of two test series with different cutting conditions :

$$|t_{\alpha}| = (\bar{x}_A - \bar{x}_B) / \sqrt{\frac{n_A \times s_A^2 + n_B \times s_B^2}{n_A + n_B - 2} \times \left( \frac{1}{n_A} + \frac{1}{n_B} \right)}$$

The value  $|t_{\alpha}|$  obtained is then compared with the corresponding  $t$  value for the actual number of degrees of freedom and the conclusion may be made as to whether a significant difference exists at the confidence level chosen.

The letters A and B indicate the two test series.

The numerical examples illustrate the calculation methods.

Experience has shown that tool life in many cases does not follow the laws of the well-known normal distribution. It is therefore recommended to use the logarithmic values of the test results which in most cases give a normal distribution. This can be checked by the methods described in ISO 2854.

The statistical calculations described are only valid if

- the observations are statistically independent;
- the tests have been carried out in such a way that no systematic errors are present.

**Table 7 – Student's  $t$  values for different confidence levels**

Number of degrees of freedom ( $n - 1$ ) or ( $n_A + n_B - 2$ )	Student's $t$ value		
	Confidence level		
	95 %	99 %	99,9 %
1	12,706	63,657	636,5
2	4,302 7	9,925	31,60
3	3,182 5	5,841	12,94
4	2,776 4	4,604	8,610
5	2,570 6	4,032	6,859
6	2,446 9	3,707	5,959
7	2,364 6	3,499	5,405
8	2,306 0	3,355	5,041
9	2,262 2	3,250	4,781
10	2,228 1	3,169	4,587
11	2,201 0	3,106	4,437
12	2,178 8	3,055	4,318
13	2,160 4	3,012	4,221
14	2,144 8	2,977	4,140
15	2,131 5	2,947	4,073
16	2,119 9	2,921	4,015
17	2,109 8	2,898	3,965
18	2,100 9	2,878	3,922
19	2,093 0	2,861	3,883
20	2,086 0		
30	2,042 3		
40	2,021 1		
60	2,000 3		
120	1,979 9		
$\infty$	1,960 0		
Degree of significance	*	**	***
	Significant	Well significant	Strongly significant

*Example*

	Test run number	Test conditions and results	
	<i>n</i>	A	B
	1	7,0	10,0
	2	7,5	9,5
	3	8,5	10,5
	4	8,9	11,5
	5	9,5	11,0
	6	9,0	11,5
Arithmetic mean value $\frac{\sum x_i}{n} = \bar{x}$		8,25	10,66
Standard deviation <i>s</i>		0,935	0,816
Student's <i>t</i> value $t_{95}$		2,571	2,571
Confidence interval $\pm t \frac{s}{\sqrt{n-1}}$		$\pm 1,076$	$\pm 0,939$
$\bar{x}_{\max} = \bar{x} + t_{95} \frac{s}{\sqrt{n-1}}$		9,326	11,605
$\bar{x}_{\min} = \bar{x} - t_{95} \frac{s}{\sqrt{n-1}}$		7,174	9,728
$ t_{\alpha} $		4,768	

Conclusion : The  $t_{\alpha}$  value is greater than *t* for ( $n_A + n_B - 2$ ) at the 99 % confidence level. A strongly significant difference exists.

## ISO 8688-2 : 1989 (E)

### Bibliography

ISO 3, *Preferred numbers — Series of preferred numbers.*

ISO 643, *Steels — Micrographic determination of the ferritic or austenitic grain size.*

ISO 3338-2, *Parallel shanks for milling cutters — Part 2 : Dimensional characteristics of flatted parallel shanks.*

ISO 3534, *Statistics — Vocabulary and symbols.*

ISO 6506, *Metallic materials — Hardness test — Brinell test.*

ISO 6507-1, *Metallic materials — Hardness test — Vickers test — Part 1 : HV 5 to HV 100.*

ISO 6508, *Metallic materials — Hardness test — Rockwell test (scales A — B — C — D — E — F — G — H — K).*

ISO 8688-1, *Tool-life testing of milling tools — Part 1 : Face milling.*

---

**This page intentionally left blank**

**ISO 8688-2 : 1989 (E)**

---

---

**UDC 621.914.22.02 : 620.169.1**

**Descriptors :** tools, cutting tools, milling cutters, end mills, tests, determination, life (durability).

Price based on 26 pages

---

---