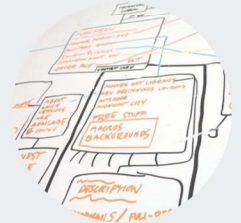
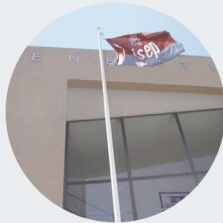




Estudo dos mecanismos de desgaste de ferramentas revestidas na maquinagem de aços pré-tratados para moldes

ANDRÉ FILIPE SILVA MESQUITA

outubro de 2024



Estudo dos mecanismos de desgaste de ferramentas revestidas na maquinagem de aços pré-tratados para moldes

ANDRÉ FILIPE SILVA MESQUITA

Outubro de 2024



Estudo dos mecanismos de desgaste de ferramentas revestidas na maquinagem de aços pré-tratados para moldes

André Filipe Silva Mesquita

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica, Área de Especialização em
Construções Mecânicas**

Orientador: Prof. Dr. Francisco J. G. Silva

Co-orientador: Profa. Dra. Rita de Cássia Mendonça Sales-Contini

Júri:

Presidente:

Professor Doutor Arnaldo Manuel Guedes Pinto, Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Vogais:

Professor Doutor Francisco José Gomes da Silva, Professor Coordenador com Agregação, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor Manuel António Peralta Evaristo, Investigador, Universidade de Coimbra

Porto, Outubro 2024

Agradecimentos

Esta dissertação de mestrado foi desenvolvida no âmbito do projeto DRIVOLUTION com o Nº de Candidatura C644913740-00000022, apoiado pelos Fundos Estruturais da União Europeia no âmbito do Programa “Portugal 2020”.

De seguida gostaria de agradecer a todas as pessoas que me auxiliaram na realização desta dissertação.

Agradeço ao Prof. Francisco J. G. Silva por toda a orientação recebida em termos de estruturação do trabalho e do documento, pelo fornecimento de meios para a realização de todos os procedimentos necessários, e pela revisão do presente documento.

À Prof. Rita Sales-Contini agradeço o permanente acompanhamento laboratorial e prático, tal como a sua ajuda na escrita e revisão da dissertação, e o facto de aceitar ser Coorientadora deste trabalho.

Ao Eng. Ricardo Alexandre, da INOVATOOLS, pela cedência de todas as ferramentas utilizadas neste trabalho.

Pela ajuda na realização de todos os testes de fresagem, desejo agradecer ao Eng. Victor Moreira.

Ao Prof. Hernâni Lopes, pelo apoio concedido na aquisição e tratamento de dados relativamente às vibrações.

Agradeço também ao Prof. Filipe Fernandes pela cedência do microscópio portátil para a análise do desgaste das ferramentas, e ao Prof. Jorge Dores de Castro pela cedência do equipamento utilizado na medição de rugosidade.

Ao Dr. Rui Rocha do CEMUP agradeço toda a colaboração na aquisição de imagens por Microscopia Eletrónica de Varrimento, assim como a análise crítica de alguns dos resultados obtidos.

À Eng. Fátima Andrade pela ajuda na preparação de certas amostras analisadas neste trabalho.

Finalmente, também gostaria de agradecer à minha família, que me apoiou sempre ao longo da realização desta dissertação.

Resumo

Aços pré-tratados para moldes são muito utilizados nos dias de hoje dada a possibilidade de serem utilizados sem a necessidade de serem aplicados tratamentos antes e depois do processo de fresagem, visto que eles já apresentam a dureza necessária. No entanto a sua elevada dureza dificulta bastante a sua maquinabilidade, algo que proporciona às ferramentas de corte elevados níveis de desgaste e reduzidos tempos de vida. A deposição de revestimentos nas ferramentas de corte é um modo muito comum de colmatar esta adversidade, levando a um processo de fresagem com um melhor desempenho em termos de desgaste da ferramenta de corte e da qualidade das superfícies maquinadas. A correta seleção dos parâmetros de corte também é um aspeto importante para o aumento da vida das ferramentas. O objetivo deste trabalho foi estudar o desempenho de ferramentas de corte compostas por carboneto de tungstênio e revestidas por TiAlN e AlCrN na fresagem de aço W 1.2711. Foram variados os valores de velocidade de corte, avanço por dente e profundidade de corte, enquanto a largura de corte foi mantida constante. Após cada ensaio de fresagem foram obtidos os valores de rugosidade superficial, desgaste acumulado e vibrações. Foi concluído que o aumento do avanço por dente apresenta uma influência negativa em todos os parâmetros estudados, enquanto o aumento da velocidade de corte mostra um impacto negativo para certos valores de avanço por dente e um impacto positivo para outros valores de avanço por dente. Em geral, os principais mecanismos de desgaste nas ferramentas de corte foram desgaste adesivo, com a formação de arestas postiças em certos ensaios, desgaste abrasivo e lascagem, principalmente nos ensaios com valores de avanço por dente superiores. Também foram observadas fraturas, particularmente nas ferramentas 592 e 233 nos ensaios com avanço por dente de 0,1 mm/dente. Foi observada uma boa correlação entre o desgaste das ferramentas e as vibrações observadas no processo de fresagem. A monitorização da condição da ferramenta através da análise da variação das vibrações ao longo do processo também mostrou ser um bom método de averiguar o fim de vida da ferramenta de corte. A ferramenta 591 mostrou o melhor desempenho em geral, enquanto a ferramenta 233 apresentou as piores características na fresagem do aço W 1.2711. O avanço por dente foi a condição de ensaio que mais influenciou o desempenho destas ferramentas no processo de fresagem.

Palavras-chave: Fresagem; Mecanismos de desgaste; Aço W 1.2711; Revestimentos PVD; Análise vibracional; Qualidade da superfície maquinada; Revestimentos TiAlN e AlCrN.

Abstract

Pre-hardened mould steels are commonly employed given the possibility of using them without the need to apply certain treatments before and after the milling process, since they already have the necessary hardness. However, this high hardness makes the milling process more difficult, generating high levels of tool wear and reduced tool life. The deposition of coatings on the cutting tools is a very common method of combating this adversity, giving the milling a better performance in terms of wear and quality of the machined surface. The correct selection of the cutting parameters is also an important aspect in regards to improving tool life. The objective of this work was to study the performance of carbide cutting tools coated with TiAlN and AlCrN in the milling of W 1.2711 steel. The values of cutting speed, feed per tooth and depth of cut were varied, while the width of cut was kept constant. After every milling test the values for surface roughness, wear and vibration amplitude were obtained. It was concluded that the increase in feed per tooth had a negative influence on the three parameters studied, while the increase in cutting speed showed a negative impact at certain values of feed per tooth and a positive effect at other feed per tooth values. In general, the main wear mechanisms observed were, adhesion wear, with the occurrence of BUE in some of the tests performed, abrasive wear and chipping, primarily in the tests with a high value of feed per tooth. Fractures were also observed in the 233 and 592 tools in the tests with a feed per tooth of 0,1 mm/tooth. A good correlation between the wear on the cutting tools and the vibrations registered in the milling process was also observed. The monitoring of the cutting tool condition by analyzing the vibration signals produced showed to be a good method of determining the end of life of the tool. The 591 cutting tool displayed the best performance, while the 233 tool showed the worst characteristics for milling W 1.2711 steel. Feed per tooth was the cutting parameter that had the highest influence on the performance of the milling process.

KEYWORDS: Milling; Wear mechanisms; W 1.2711 steel; PVD coatings; Vibrational analysis; Machined surface quality; TiAlN and AlCrN films.

Índice

Agradecimentos	ii
Resumo	iv
Abstract.....	vi
Índice	viii
Lista de Figuras.....	xii
Lista de Tabelas.....	xvi
Acrónimos e Símbolos.....	xviii
1. Introdução.....	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Motivação.....	1
1.3. Objetivos	2
1.4. Estrutura do trabalho	2
2. Revisão Bibliográfica	5
2.1. Fresagem	5
2.1.1. Conceito de maquinagem por arranque de apara.....	5
2.1.2. Conceito de fresagem	7
2.1.3. Tipos de fresagem.....	10
2.1.4. Ferramentas para fresagem: geometria	12
2.1.5. Normas relevantes para o desgaste em ferramentas de corte	14
2.2. Constituição e vida das ferramentas.....	15
2.2.1. Materiais para ferramentas de corte.....	15
2.2.2. Tipos de revestimentos utilizados em ferramentas de corte	18
2.2.3. Vantagens da utilização de revestimentos	21
2.2.4. Limitações na utilização de revestimentos	24
2.2.5. Critérios de fim de vida das ferramentas de corte	24
2.2.6. Mecanismos de desgaste em ferramentas de corte.....	26
2.3. Maquinagem de aços pré-tratados para moldes.....	30
2.3.1. Características usuais dos aços pré-tratados para moldes.....	30
2.3.2. Maquinabilidade dos aços pré-tratados para moldes	31
2.3.3. Recentes desenvolvimentos na maquinagem de aços pré-tratados para moldes	
31	
3. Materiais e Métodos.....	35

3.1. Materiais	35
3.1.1. Caracterização do material a maquinar.....	35
3.1.2. Caracterização das ferramentas (geometria e revestimentos)	36
3.2. Métodos	37
3.2.1. Metodologia de análise da espessura e composição do revestimento.....	37
3.2.2. Definição das trajetórias adotadas para a maquinagem/fresagem	39
3.2.3. Definição dos parâmetros utilizados na maquinagem/fresagem.....	40
3.2.4. Metodologia de análise da rugosidade das superfícies maquinadas	42
3.2.5. Metodologia de análise da vibração durante a maquinagem	42
3.2.6. Metodologia de análise do desgaste	43
4. Resultados.....	45
4.1. Análise da espessura e composição química dos revestimentos das ferramentas	45
4.2. Rugosidade superficial obtida	47
4.2.1. Ferramenta 233	47
4.2.2. Ferramenta 591	49
4.2.3. Ferramenta 592	51
4.3. Análise do desgaste das ferramentas	53
4.3.1. Ferramenta 233	53
4.3.2. Ferramenta 591	54
4.3.3. Ferramenta 592	56
4.4. Análise da vibração durante a maquinagem/fresagem	57
4.4.1. Ferramenta 233	57
4.4.2. Ferramenta 591	59
4.4.3. Ferramenta 592	61
5. Discussão dos resultados	65
5.1. Análise comparativa dos revestimentos	65
5.2. Análise comparativa da rugosidade produzida com cada revestimento e conjunto de parâmetros de corte	66
5.3. Análise dos mecanismos de desgaste das ferramentas para cada condição de corte ..	69
5.3.1. Ferramenta 233	69
5.3.2. Ferramenta 591	77
5.3.3. Ferramenta 592	83
5.4. Análise da evolução da vibração para cada ferramenta e condição de corte	88
5.4.1. Ferramenta 233	88
5.4.2. Ferramenta 591	93
5.4.3. Ferramenta 592	99
5.5. Análise crítica global e recomendação da melhor ferramenta e conjunto de parâmetros	104
6. Conclusão.....	107

6.1. Contributo científico	107
6.2. Sugestão de trabalhos futuros	110
Referências.....	111
Declaração de Integridade	121

Lista de Figuras

Figura 1 - Movimento discordante (a), movimento concordante (b) [6].....	8
Figura 2 - Fresagem periférica (a), fresagem de topo (b), adaptado de [8].....	10
Figura 3 - Diferentes geometrias das pastilhas de corte [28].....	12
Figura 4 - Ferramenta de corte com insertos [28].....	12
Figura 5 - Fresas integrais [24].....	13
Figura 6 - Nomenclatura em corte ortogonal [26].....	13
Figura 7 - Geometria de ferramentas de corte: vista inferior de uma ferramenta de corte de topo a), Ferramenta de corte com 18 dentes b), adaptado de [8].	14
Figura 8 - Esquema das duas principais técnicas de PVD: <i>sputtering</i> a), evaporação b), adaptado de [68].....	19
Figura 9 - Esquema de um processo de CVD [70].....	19
Figura 10 - Estruturas frequentes das camadas dos revestimentos [58].....	20
Figura 11 - Desgaste do flanco a diferentes velocidades de corte, adaptado de [35].....	25
Figura 12 - Desgaste de flanco [97].....	26
Figura 13 - Desgaste tipo cratera [97].....	27
Figura 14 - Desgaste por entalhe [99].....	27
Figura 15 – Bloco de aço W 1.2711 utilizado nos testes de maquinagem.....	35
Figura 16 – a) Equipamento de corte, Struers Minitom e b) Equipamento de montagem em resina, Struers Predopress.	38
Figura 17 – Equipamento de polimento Stuers Rotopol.....	39
Figura 18 – Centro de maquinagem HAAS VF-2.....	39
Figura 19 – Representação da trajetória da ferramenta de corte onde as setas verdes demonstram fresagem concordante e as setas vermelhas demonstram fresagem discordante.	40
Figura 20 - a) Pontos de rugosidade medidos nos ensaios de trajetória intermitente e b) pontos de rugosidade medidos nos ensaios de trajetória em espiral.	42
Figura 21 – Referência das imagens retiradas da análise MEV.....	43
Figura 22 - Microscópio digital Dino-Lite® Edge.	43
Figura 23 – Imagens SEM do revestimento da ferramenta de corte com referência 233: a) ilustração das medições efetuadas e b) zonas de EDS avaliadas.....	45
Figura 24 - Espectros EDS na zona Z1: a) ferramenta 233, b) ferramenta 591, c) ferramenta 592.	46
Figura 25 – Valores médios de rugosidade para a ferramenta 233: a) R_a , b) R_z e c) R_{max}	48
Figura 26 - Valores médios de rugosidade para a ferramenta 591: a) R_a , b) R_z e c) R_{max}	51
Figura 27 - Valores médios de rugosidade para a ferramenta 592: a) R_a , b) R_z e c) R_{max}	53
Figura 28 - Valores médios de desgaste de flanco de todos os ensaios da ferramenta 233.	54
Figura 29 - Valores médios de desgaste de flanco de todos os ensaios da ferramenta 591.	55
Figura 30 - Valores médios de desgaste de flanco de todos os ensaios da ferramenta 592.	56
Figura 31 – Valores de médios de RMS para a ferramenta 233: a) Eixo X, b) Eixo Y, c) Eixo Z. ...	58
Figura 32 - Valores de médios de RMS para a ferramenta 233: a) Eixo X, b) Eixo Y, c) Eixo Z... ..	60

Figura 33 - Valores de médios de <i>RMS</i> para a ferramenta 233: a) Eixo X, b) Eixo Y, c) Eixo Z...	62
Figura 34 – Valores médios de <i>Ra</i> , para as ferramentas de corte 233, 591 e 592: a) velocidade de corte 40 m/min; b) 80 m/min e c) 120 m/min.....	67
Figura 35 – Vista de topo dos testes com velocidade de corte de 40 m/min com uma ampliação de 120x para a ferramenta 233: a) V1F1A1, b) V1F2A1 e c) V1F3A1.	70
Figura 36 – Mecanismos de desgaste dos ensaios com 40 m/min de velocidade de corte para a ferramenta 233: a) V1F1A1 e b) V1F3A1.	71
Figura 37 – a) Zonas da ferramenta de corte analisadas por <i>EDS</i> , e b) espectro <i>EDS</i> para a zona Z2.....	71
Figura 38 – Fissuração presente no ensaio V1F2A1 da ferramenta 233: a) aresta da ferramenta e b) parte inferior da ferramenta.....	72
Figura 39 – Lascagem observada no teste V1F2A1 da ferramenta de corte 233.	72
Figura 40 - Vista de topo dos testes com velocidade de corte de 80 m/min com uma ampliação de 120x para a ferramenta 233: a) V2F1A1 e b) V2F2A1.	73
Figura 41 – Mecanismos de desgaste dos ensaios com 80 m/min de velocidade de corte para a ferramenta 233: a) V2F1A1, b) e c) V2F2A1.	74
Figura 42 - Vista de topo dos testes com velocidade de corte de 120 m/min com uma ampliação de 120x para a ferramenta 233: a) V3F1A2, b) V3F1A1, c) V3F3A1 e d) V3F3A1C.....	75
Figura 43 – Imagens do desgaste ocorrido a uma velocidade de corte de 120 m/min para a ferramenta 233: a) V3F1A1, b) material aderido no substrato de V3F3A1 e c) material aderido ao revestimento de V3F3A1.	76
Figura 44 - Vista de topo dos testes com velocidade de corte de 40 m/min com uma ampliação de 120x para a ferramenta 591: a) V1F1A1, b) V1F2A1 e c) V1F3A1.	77
Figura 45 – Desgaste abrasivo observado a velocidade de corte de 40 m/min para a ferramenta 591: a) V1F1A1 e b) V1F3A1.	78
Figura 46 – Desgaste adesivo nos testes com 40 m/min de velocidade de corte na ferramenta 591: a) V1F3A1 e b) V1F1A1.	79
Figura 47 - Vista de topo dos testes com velocidade de corte de 80 m/min com uma ampliação de 120x para a ferramenta 591: a) V2F1A1, b) V2F2A1 e c) V2F3A1.	80
Figura 48 - Desgaste adesivo nos testes com 80 m/min de velocidade de corte na ferramenta 591.	80
Figura 49 - Vista de topo dos testes com velocidade de corte de 80 m/min com uma ampliação de 120x para a ferramenta 591: a) V3F1A2, b) V3F1A1, c) V3F2A1, d) V3F3A1 e e) V3F3A1C.	82
Figura 50 – Desgaste adesivo e arestas postiças nos testes com 80 m/min para a ferramenta 591.	83
Figura 51 - Vista de topo dos testes com velocidade de corte de 40 m/min com uma ampliação de 120x para a ferramenta 592: a) V1F1A1, b) V1F3A1.	84
Figura 52 – Mecanismos de desgaste da ferramenta 592 para velocidade de corte de 40 m/min.	84
Figura 53 – Fissuração presente no teste V1F3A1 da ferramenta 592.....	85
Figura 54 - Vista de topo dos testes com velocidade de corte de 80 m/min com uma ampliação de 120x para a ferramenta 592: a) V2F1A1, b) V2F2A1 e c) V2F3A1.	86

Figura 55 – Desgaste na ferramenta 592 para o teste V2F2A1.	86
Figura 56 - Vista de topo dos testes com velocidade de corte de 80 m/min com uma ampliação de 120x para a ferramenta 592: a) V2F1A1, b) V2F2A1 e c) V2F3A1	87
Figura 57 – Principais mecanismos de desgaste para a ferramenta 592 com uma velocidade de corte de 120 m/min.	88
Figura 58 – Valores de vibração durante a operação de fresagem da ferramenta 233: a) V1F3A1, b) V1F2A1 e c) V1F1A1 (— Eixo X; — Eixo Y; — Eixo Z).....	90
Figura 59 - Valores de vibração durante a operação de fresagem da ferramenta 233: a) V2F2A1 e b) V2F1A1 (— Eixo X; — Eixo Y; — Eixo Z).	91
Figura 60 - Valores de vibração durante a operação de fresagem da ferramenta 233: a) V3F3A1, b) V3F2A1 e c) V3F1A1 (— Eixo X; — Eixo Y; — Eixo Z).....	93
Figura 61 – Imagens do desgaste da ferramenta 233 para o ensaio V3F1A1 adquiridas através de microscopia otica: a) após o 1º ensaio de fresagem e b) após o 2º ensaio de fresagem.	93
Figura 62 - Valores de vibração durante a operação de fresagem da ferramenta 591: a) V1F3A1, b) V1F2A1 e c) V1F1A1 (— Eixo X; — Eixo Y; — Eixo Z).....	95
Figura 63 – Imagens do desgaste da ferramenta 591 para o ensaio V1F3A1 após o primeiro processo de fresagem.	95
Figura 64 - Valores de vibração durante a operação de fresagem da ferramenta 591: a) V2F3A1, b) V2F2A1 e c) V2F1A1 (— Eixo X; — Eixo Y; — Eixo Z).....	97
Figura 65 - Imagens do desgaste da ferramenta 591 para o ensaio V3F3A1 após o primeiro processo de fresagem.	97
Figura 66 - Valores de vibração durante a operação de fresagem da ferramenta 591: a) V3F3A1, b) V3F2A1 e c) V3F1A1 (— Eixo X; — Eixo Y; — Eixo Z).....	98
Figura 67 - Valores de vibração durante a operação de fresagem da ferramenta 592: a) V1F3A1 e b) V1F1A1 (— Eixo X; — Eixo Y; — Eixo Z)	100
Figura 68 - Imagens do desgaste da ferramenta 592 para o ensaio V1F3A1 após o primeiro processo de fresagem.	100
Figura 69 - Valores de vibração durante a operação de fresagem da ferramenta 592: a) V2F3A1, b) V2F2A1 e c) V2F1A1 (— Eixo X; — Eixo Y; — Eixo Z).....	102
Figura 70 - Valores de vibração durante a operação de fresagem da ferramenta 592: a) V3F3A1, b) V3F2A1 e c) V3F1A1 (— Eixo X; — Eixo Y; — Eixo Z).....	103
Figura 71 - Imagens do desgaste da ferramenta 592 para o primeiro processo de fresagem: a) V3F3A1 e b) V3F2A1.....	104

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Vantagens gerais dos processos de maquinagem [8].	6
Tabela 2 - Diferentes métodos de fresagem de topo [6, 8, 9].	11
Tabela 3 - Tabela resumo de estudos pertinentes aos materiais utilizados em ferramentas de corte.	16
Tabela 4 - Resumo de estudos efetuados acerca das ferramentas de corte revestidas em processos de fresagem.	21
Tabela 5 - Resumo de estudos efetuados acerca dos mecanismos de desgaste em ferramentas de corte.	27
Tabela 6 - Estudos acerca da maquinagem de aços pré-tratados para moldes.	31
Tabela 7 – Propriedades mecânicas e físicas do aço W 1.2711 [117].	36
Tabela 8 – Composição química do aço W 1.2711 [117].	36
Tabela 9 – Características geométricas das ferramentas de corte utilizadas [118].	37
Tabela 10 – Parâmetros de corte para a trajetória de corte intermitente.	41
Tabela 11 – Espessura média de cada revestimento.	46
Tabela 12 – Valores médios de Ra , Rz e $Rmax$ para a ferramenta 233.	47
Tabela 13 - Valores médios de Ra , Rz e $Rmax$ para a ferramenta 591.	49
Tabela 14 - Valores médios de Ra , Rz e $Rmax$ para a ferramenta 592.	51
Tabela 15 – Valores médios de desgaste de flanco para a ferramenta 233.	53
Tabela 16 - Valores médios de desgaste de flanco para a ferramenta 591.	55
Tabela 17 - Valores médios de desgaste de flanco para a ferramenta 592.	56
Tabela 18 – Valores médios de RMS em cada eixo, para a ferramenta 233.	57
Tabela 19 - Valores médios de RMS em cada eixo, para a ferramenta 591.	59
Tabela 20 - Valores médios de RMS em cada eixo, para a ferramenta 592.	61

Acrónimos e Símbolos

Lista de Acrónimos

AlCrN	Nitreto de Alumínio e Crómio
Al ₂ O ₃	Oxido de Alumínio
AlTiN	Nitreto de Titânio e Alumínio
BUE	<i>Built-up Edge</i>
CNC	Controle Numérico Computadorizado
CrN	Nitreto de Crómio
CrTiAlN	Nitreto de Crómio, Alumínio e Titânio
CVD	<i>Chemical vapor deposition</i>
DLC	<i>Diamond like carbon</i>
EDS	<i>Energy-dispersive X-ray spectroscopy</i>
HSM	<i>High speed machining</i>
HSS	<i>High speed steel</i>
MEV	Microscópia eletrónica de varrimento
PCBN	Nitreto cúbico de boro policristalino
PVD	<i>Physical vapor deposition</i>
PVD HiPIMS	Pulverização catódica de magnetrão de alta potência
Si ₃ N ₄	Nitreto de Silício
TiAlSiN	Nitreto de Titânio, Alumínio e Silício
TiCN	Nitreto de Titânio e Carbono
TiN	Nitreto de Titânio
ZrCn	Carboneto de Zircónio

Lista de Símbolos

a_e	Largura de corte	mm
ap	Profundidade de corte	mm

D_{cap}	Diâmetro da fresa	mm
f_n	Avanço por rotação	mm/rot
f_z	Avanço por dente	mm
h_m	Espessura média de apra	mm
K_c	Força de corte específica	N/mm ²
L	Comprimento percorrido pela ferramenta de corte	mm
n	Velocidade de rotação da árvore	rpm
P_c	Potencia de corte	kW
Q	Taxa de remoção de material	mm ³ /min
R _a	Rugosidade média	μm
R _z	Altura média dos picos e vales	μm
R _{max}	Rugosidade máxima	μm
T _c	Tempo de maquinagem	min
V _c	Velocidade de corte	m/min
V _f	Velocidade de avanço	mm/min
Z _c	Número de dentes	-

Lista de Unidades

kW	Quilowatt
m/min	Metros por minuto
Min	Minuto
mm	Milímetro
mm/min	Milímetro por minuto
mm ³ /min	Milímetros cúbicos por minuto
mm/rot	Milímetros por rotação
N/mm ²	Newton por milímetro quadrado
rpm	Rotações por minuto
MPa	Megapascal
W/m. K	Watt por metro kelvin

J/Kg °C

Joule por quilograma graus celsius

1. Introdução

No capítulo presente será efetuada uma contextualização geral do assunto a ser abordado neste relatório, tal como serão expostos os objetivos globais a alcançar no desenvolvimento da dissertação e sua respetiva motivação. Por último, irá ser apresentada a estrutura do documento.

1.1. Contextualização

Nos últimos anos várias indústrias em crescimento, nomeadamente o setor da medicina, automóvel e aeroespacial, têm vindo a procurar produtos ou componente com elevada qualidade, algo que acelerou significativamente a evolução e desenvolvimento de técnicas de maquinagem [1]. O setor de maquinagem, com este crescimento em mente, está projetada para se tornar numa indústria de 100 mil milhões de dólares até 2025 [2]. O aumento da procura e do desenvolvimento de máquinas CNC (Controle Numérico Computadorizado), é uma das principais causas deste desenvolvimento, dado que permitem a fabricação de peças complexas em tempos reduzidos. Das técnicas de maquinagem que existem, a fresagem é uma das mais valorizadas, sendo também uma das mais implementados [3]

Em geral maquinagem é um processo de fabrico onde existe a remoção de seções de uma certa peça a partir de uma ferramenta de corte. Visto isto, e utilizando velocidade de corte elevadas irá haver uma rápida deterioração das ferramentas de corte utilizadas [4]. Para colmatar este aspeto certos revestimentos podem ser aplicados nas superfícies das ferramentas de corte, algo que aumenta a sua produtividade, longevidade e performance [5].

Em geral a maquinagem de aços é favorável, sendo que aspetos como a sua dureza, teor de carbono e elementos de liga, podem dificultar ou facilitar o processo [6]. No caso de aços pré-tratados para moldes, existem diferentes aços para satisfazer as propriedades necessárias para cada aplicação. Propriedades como, resistência ao desgaste, dureza, maquinabilidade, resistência à corrosão, capacidade de ser polido e capacidade de ser soldado, são bastante importantes para a sua escolha [7].

1.2. Motivação

A escolha do tema de tese advém do interesse desenvolvido ao longo do percurso académico sobre o tema de maquinagem e do desgaste envolvido nas mais diversas operações. A realização de estudos e teste práticos também foi uma das razões pela decisão de prosseguir com este tema, sendo a análise e discussão dos resultados provenientes destes testes algo

Introdução

bastante apelativo. O estudo de novos revestimentos pouco investigados na literatura, particularmente para aços pré-tratados para moldes, expandindo assim o seu conhecimento e entendimento também mostrou ser um aspeto bastante interessante. A análise das vibrações ao longo do tempo e a comparação entre as variações da sua amplitude e o desgaste observado na ferramenta de corte é também algo que é infrequentemente analisado na literatura e por isso foi outro aspeto interessante e pertinente na escolha deste tema. Outra razão pela escolha desta temática foi a inexperiência em termos práticos em torno do assunto, sendo que pelo desenvolvimento desta dissertação espera-se adquirir mais conhecimento e prática acerca deste tema.

1.3. Objetivos

O objetivo deste trabalho foi analisar o comportamento de certas ferramentas de corte revestidas e compostas por carboneto de tungsténio, na fresagem de uma liga de aço pré-tratada W 1.2711. Estas ligas de aço são bastante difíceis de maquinar e existe pouca literatura acerca do desempenho das ferramentas de corte na sua fresagem. Dito isto, os objetivos desta dissertação foram:

- Estudar os mecanismos de desgaste presentes nas diferentes ferramentas de corte e a influência dos parâmetros de corte na sua intensidade e ocorrência;
- Analisar a estabilidade do processo e estudar o impacto da acumulação de desgaste na variação da vibração;
- Avaliar a qualidade das superfícies maquinadas e correlacionar com o desgaste e vibrações obtidas;
- Estudar a influência do revestimento e geometria das ferramentas nos valores de desgaste, rugosidade e vibração obtidos;
- Estudar a influência das condições de ensaio utilizadas nos valores de desgaste, vibração e rugosidade observados.

1.4. Estrutura do trabalho

Esta dissertação está dividida em seis capítulos: 1. Introdução, 2. Revisão bibliográfica, 3. Materiais e métodos, 4. Resultados, 5. Discussão dos resultados e 6. Conclusão.

No primeiro capítulo é feita uma pequena contextualização ao trabalho que irá ser realizado, tal como são descritos os objetivos desta dissertação e a sua estrutura.

No segundo capítulo são apresentados alguns dos conceitos essenciais no que diz respeito à fresagem, abordando tópicos como os diferentes tipos de maquinagem que existem, as ferramentas utilizadas e a sua geometria, os materiais utilizados para as ferramentas de corte e os revestimentos, tal como os mecanismos de desgaste que podem manifestar-se nas ferramentas. Também são apresentados alguns aspetos acerca da maquinagem do material estudado nesta dissertação.

No terceiro capítulo são abordados os materiais ensaiados e os métodos utilizados para obter os resultados experimentais. Este capítulo está dividido em dois subcapítulos. O subcapítulo 3.1. foca-se na apresentação e caracterização do material a maquinar e das ferramentas de corte utilizadas. O subcapítulo 3.2. descreve os métodos experimentais implementados para obter os resultados de desgaste, rugosidade e vibrações requeridos.

No capítulo quatro são apresentados todos os resultados obtidos através dos métodos descritos no capítulo anterior. Este capítulo está dividido em quatro subcapítulos. O subcapítulo 4.1. demonstra os resultados obtidos tendo em conta a espessura e composição dos revestimentos utilizados. O subcapítulo 4.2. apresenta os valores de rugosidade obtidos para cada ferramenta de corte e condição de ensaio, nomeadamente os valores de R_a , R_z e R_{max} . O subcapítulo 4.3. apresenta os valores de desgaste de flanco obtidos para cada ferramenta de corte. O subcapítulo 4.4. apresenta os valores de vibração observados em cada eixo para cada ferramenta de corte.

No capítulo cinco são discutidos os resultados obtidos. Este capítulo encontra-se dividido em cinco subcapítulos. No subcapítulo 5.1. são discutidos e comparados os valores obtidos de espessura e composição química dos revestimentos. No subcapítulo 5.2. é realizada uma comparação dos valores de rugosidade de cada ferramenta de corte. No subcapítulo 5.3. são apresentados e discutidos os mecanismos de desgaste presentes em cada ferramenta de corte, sendo comparadas as três diferentes ferramentas. No subcapítulo 5.4. são apresentados os gráficos de vibração ao longo do processo, onde é feita a análise da influência do desgaste acumulado na estabilidade da fresagem. No subcapítulo 5.5. é feita uma análise global de cada ferramenta de corte, tendo em conta os resultados apresentados anteriormente.

No capítulo seis são apresentadas as conclusões extraídas relativamente a cada ferramenta de corte e sugestões para trabalhos futuros.

Introdução

2. Revisão Bibliográfica

No presente capítulo será apresentada toda a revisão bibliográfica pertinente ao tema a abordar. Este capítulo é composto por três subcapítulos. No subcapítulo 2.1 será tratado o processo de fresagem em geral. O subcapítulo 2.2 irá focar-se nas ferramentas de corte, revestimentos e mecanismos de desgaste. No subcapítulo 2.3 serão abordados os aços pré-tratados para moldes, mais em concreto, as suas características mecânicas, a sua maquinabilidade e recentes desenvolvimentos na sua maquinabilidade.

2.1. Fresagem

Dentro dos processos de remoção de material, o processo de fresagem enquadra-se no ramo da maquinagem convencional, onde um instrumento afiado é utilizado para desbastar outros materiais com o propósito de obter certas geometrias [8].

É um processo bastante universal, que tem vindo a ter bastantes desenvolvimentos nos últimos anos. É uma opção apelativa para o desbaste na criação de cavidades, furos e roscas [9]. É o processo de maquinagem mais flexível, embora a sua otimização possa ser um aspeto difícil de implementar dadas as diversas variáveis inerentes a este método [6].

2.1.1. Conceito de maquinagem por arranque de apara

Maquinagem é um termo que cobre uma larga gama de processos de remoção de material, geralmente com a formação de apara. A maior parte das peças produzidas atualmente na indústria apresentam elementos obtidos através de maquinagem, algo que torna estes processos nos mais importantes para a obtenção de um produto final com bastante valor. Dentro da maquinagem podemos ter processos como o torneamento, fresagem, perfuração, serragem e maquinagem abrasiva [6]. Na Tabela 1 pode-se observar algumas vantagens da utilização do processo de maquinagem.

Tabela 1 - Vantagens gerais dos processos de maquinagem [8].

Vantagens	Descrição
Variedade de materiais	Pode ser aplicado a uma variedade de materiais. Desde metais sólidos, a polímeros e materiais compósitos, sendo que a dureza e fragilidade dos materiais cerâmicos dificultam a utilização de técnicas convencionais de maquinagem.
Variedade de formas e geometrias	Pode ser utilizado para criar formas geométricas simples, mas também formas irregulares devido às diferentes configurações das ferramentas de corte. Vários processos de maquinagem podem ser aplicados consecutivamente, para obter peças com formas bastante complexas.
Tolerâncias Dimensionais	Conseguem atingir tolerâncias de ± 0.025 mm, um valor significativamente inferior a outros processos. Com a aplicação de um processo de retificação, é ainda possível obter superfícies com rugosidades inferiores a $0.1 \mu\text{m}$.
Bom acabamento superficial	Consegue obter valores de rugosidade superficial de $0.4 \mu\text{m}$, sendo que alguns processos abrasivos conseguem valores ainda inferiores.

Estes processos também apresentam algumas desvantagens, tal como o desperdício de material, já que acarretam a formação de aparas e o elevado tempo consumido, comparativamente a processos de conformação [8]. Existem diversas variáveis que englobam o processo de maquinagem, sendo estas divididas em dependentes ou independentes. O operador tem controlo direto nas variáveis independentes e por isso pode especificá-las antes de começar o processo [10]. Algumas destas variáveis são:

- Material a maquinar;
- Geometria inicial;
- Processo de maquinagem;
- Material da ferramenta de corte;
- Parâmetros de corte;
- Geometria da ferramenta de corte;
- Instrumentos de fixação;
- Fluidos de corte;

- Revestimentos da ferramenta.

As variáveis dependentes são determinadas a partir da seleção das variáveis independentes anteriormente especificadas. Parâmetros como, forças de corte, forma e propriedades do produto final, acabamento superficial, desgaste e rutura da ferramenta de corte, podem ser considerados variáveis dependentes [10].

Nestes processos a formação da apara é um ponto fulcral no conhecimento de fatores como desgaste da ferramenta, forças de corte e qualidade das faces maquinadas [11]. O estudo da apara também ajuda na compreensão das características de maquinagem de um material [12]. O formato final da apara está associado a várias vertentes, como a mecânica dos meios contínuos, transferência de calor e aspetos metalúrgicos de ambos os componentes envolvidos [9].

Em geral materiais com elevadas propriedades mecânicas tendem a dificultar o processo de maquinagem. Outros aspetos como baixa condutividade térmica, elevadas propriedades mecânicas a altas temperaturas e o encruamento, levam a uma maior resistência ao corte da peça a maquinar, à redução do tempo de vida da ferramenta e à degradação da qualidade superficial da peça [13, 14]. Alguns materiais mais dúcteis e macios tendem a ser difíceis de maquinar, visto que a sua apara tem dificuldade de se separar completamente do material base [15]. Esta característica, presente em materiais como o cobre, pode levar à rutura da ferramenta. A propensão de um material aderir à superfície da ferramenta de corte, também pode dificultar a maquinagem, acumulando material na aresta de corte [16].

Vários estudos têm vindo a ser desenvolvidos relativamente à influência de certos parâmetros dos processos de maquinagem. Estes estudos tendem a focar-se em determinar os parâmetros ideais na obtenção de produtos finais com boa qualidade superficial e um desgaste da ferramenta de corte baixo [14]. Velocidade de corte, avanço, profundidade do corte, são algumas dos parâmetros que podem influenciar as características de maquinagem de um material, sendo que o rácio de remoção de material pode ser calculado multiplicando estas três propriedades [8].

Outro fator importante no processo de maquinagem são as forças de corte geradas, que podem fornecer informação valiosa em termos de estabilidade do processo, desgaste da ferramenta e qualidade da superfície maquinada. A monitorização destas forças fornece ao operador informação pertinente para melhorar a geometria e escolha das ferramentas. A determinação das forças de corte pode ser efetuada utilizando métodos empíricos, ou aplicando o método de elementos finitos [17].

2.1.2. Conceito de fresagem

Neste processo a peça a maquinar mantém-se fixa, enquanto a ferramenta de corte encontra-se em rotação. Esta ferramenta é posicionada na peça a maquinar, e é movimentada lentamente ao longo da mesma, de modo a gerar a superfície requerida. O movimento da ferramenta é perpendicular ao eixo de rotação da mesma, podendo ser concordante ou discordante [18]. No movimento discordante a direção do avanço é na direção oposta ao

movimento de rotação da ferramenta de corte [8]. Este movimento apresenta como vantagem a diminuição do atrito entre os dois componentes, embora cause vibrações que podem baixar a qualidade da superfície maquinada. No movimento concordante onde a direção do avanço é na mesma direção do movimento de rotação da ferramenta de corte, o atrito gerado é superior, algo que fornece ao processo elevadas forças de corte, aumentando assim a temperatura do sistema e diminuindo o tempo de vida das ferramentas de corte [19]. Na Figura 1 pode-se ver uma ilustração dos dois movimentos relativos entre a peça e a ferramenta de corte.

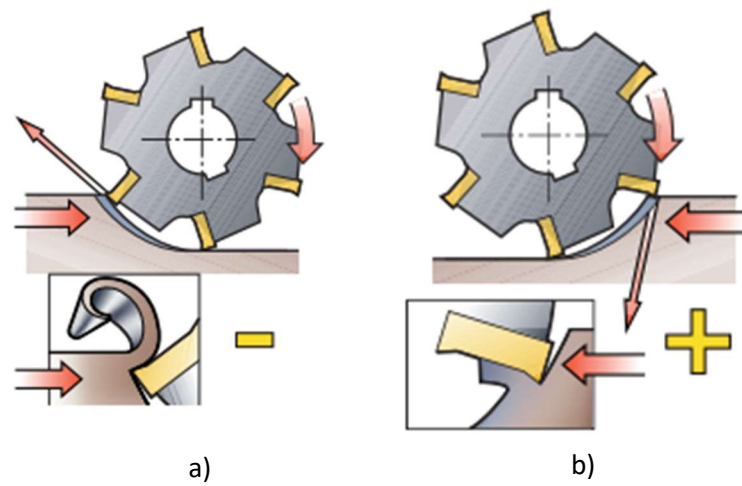


Figura 1 - Movimento discordante (a), movimento concordante (b) [6].

A ferramenta de corte possui várias arestas de corte, cada uma responsável por remover parte do material. Este aspeto pode diminuir o problema de saída da apar. É um processo bastante utilizado no facejamento de peças, sendo que a sua implementação na obtenção de formas mais complexas tem vindo a aumentar, com a criação de diversos espaços possuindo maquinagem de 5 eixos [9].

Ultimamente têm vindo a ser desenvolvidas máquinas CNC com seis eixos, algo que possibilita a maquinagem de produtos com maior qualidade e rigor dimensional das superfícies. Estas máquinas são bastante utilizadas nos processos de fresagem, pois facilitam a obtenção de peças com elevada complexidade, sem a necessidade de paragens, diminuindo assim o seu tempo de fabrico [3]. Uma desvantagem no uso de máquinas CNC de bastantes eixos é a sua fraca estabilidade. Dito isto, ainda é importante referir que o método de fresagem a utilizar pode afetar a escolha da máquina [20]. Por exemplo, o processo de facejamento ou de abertura de canais pode ser executado em máquinas de 3 eixos, no entanto a fresagem de perfis necessita a utilização de máquinas com mais eixos [6]. O aumento da rigidez das estruturas das máquinas de corte, o desenvolvimento de novos materiais de corte e a maior precisão dos sistemas de controlo, levaram ao aumento do uso de HSM (*High speed machining*) para a maquinagem de diversos materiais. A utilização de ferramentas de corte com material cerâmico é bastante adequado para o uso em HSM, devido à sua boa resistência ao desgaste a altas temperaturas [21].

Os parâmetros do processo são bastante importantes, visto que a sua correta seleção pode afetar positivamente a performance da ferramenta de corte, a estabilidade de todos os componentes e a qualidade do produto final [2, 3]. Certos parâmetros também desempenham um papel crucial no desgaste acumulado das ferramentas de corte, sendo que a sua influência nesta característica tem vindo a ser bastante estudada [22]. De seguida serão apresentados alguns dos parâmetros mais importantes envolvidos no processo de fresagem.

A velocidade de corte (V_c , m/min), expressa a velocidade de contacto entre a aresta de corte e o componente a ser maquinado. Ela pode ser calculada a partir da equação 1, onde n é a velocidade de rotação da árvore e D_{cap} o diâmetro da fresa. Velocidade de rotação da árvore (n , rpm), expressa o número de rotações que a ferramenta de corte efetua por minuto. Para obter este valor é necessário resolver a equação 1, em função da variável n .

$$V_C = \frac{\pi \times n \times D_{cap}}{1000} \quad (1)$$

Velocidade de avanço (V_f , mm/min), expressa a distância percorrida pela ferramenta de corte, em relação à peça a maquinar, por unidade de tempo. Pode ser calculada a partir da equação 2, onde f_z é o avanço da ferramenta de corte por dente e z_c o número de dentes da ferramenta de corte.

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

Avanço por dente (f_z , mm/dente), expressa a distância percorrida por uma aresta de corte durante uma rotação na maquinagem de uma peça. Pode ser calculado a partir da equação 3.

$$f_z = \frac{V_f}{n \times z_c} \quad (3)$$

Avanço por rotação (f_n , mm/rotação), expressa a distância percorrida pela ferramenta de corte durante uma rotação completa. Pode ser calculado a partir da equação 4.

$$f_n = \frac{V_f}{n} \quad (4)$$

Espessura média de apra (h_m , mm), é um parâmetro importante para o cálculo da força de corte e é utilizada no cálculo da potência líquida [6].

Taxa de remoção de material (Q , mm^3/min), expressa o volume de material removido da peça a maquinar. Pode ser calculada a partir da equação 5, onde a_p (mm) é a profundidade de corte e a_e (mm) a largura de corte.

$$Q = a_p \times a_e \times V_f \quad (5)$$

Tempo de maquinagem (T_c , min), expressa o tempo necessário para a realização da operação. Este parâmetro depende do comprimento percorrido pela ferramenta de corte (L , mm) e da V_f . Pode ser obtido a partir da equação 6.

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

Potencia de corte (P_c , kW), expressa a potência que os componentes envolvidos no processo de maquinagem necessitam. Pode ser calculado a partir da equação 7, onde a_p é a profundidade de corte, a_e a largura de corte, V_f a velocidade de avanço e K_c (N/mm^2) a força de corte específica.

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

2.1.3. Tipos de fresagem

O processo de fresagem pode ser executado por fresagem periférica ou por fresagem de topo. Na fresagem periférica geralmente o eixo de rotação da ferramenta encontra-se paralelo ao plano da superfície a maquinar. Neste caso as arestas de corte encontram-se na periférica exterior da ferramenta. Na fresagem de topo o eixo de rotação da ferramenta é perpendicular ao plano de maquinagem [23]. Na Figura 2 pode-se observar os dois tipos de fresagem mais comuns.

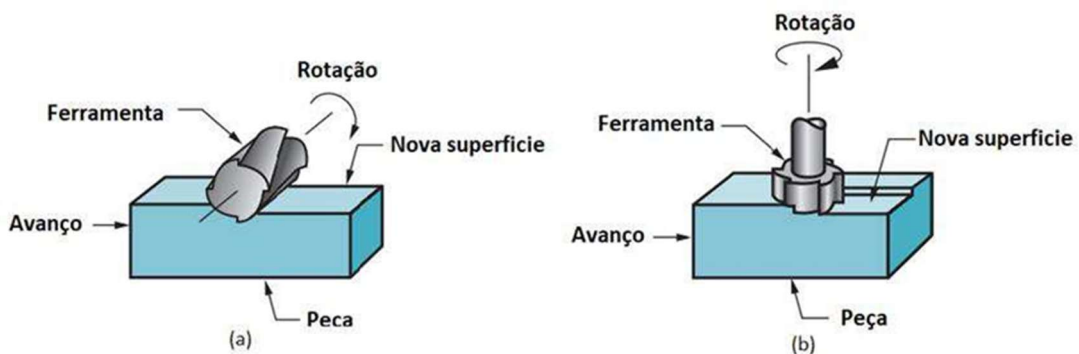


Figura 2 - Fresagem periférica (a), fresagem de topo (b), adaptado de [8].

Dentro da fresagem de topo existem diferentes métodos de maquinagem [8], podendo estes ser observados na Tabela 2.

Tabela 2 - Diferentes métodos de fresagem de topo [6, 8, 9].

Método	Ilustração	Descrição
Fresagem de contorno		Gera duas faces em simultâneo, sendo para isso utilizadas operações de fresagem periférica e de topo. Muito utilizada para a obtenção de cantos a 90°.
Facejamento		É o método de fresagem mais comum e pode ser efetuado utilizando uma variedade de ferramentas de corte. É utilizada para obter faces planas. Neste caso grandes áreas podem ser maquinadas.
Fresagem de superfície		É normalmente utilizada uma fresa com ponta esférica de modo a obter formas tridimensionais. Neste caso a ferramenta de corte é movimentada ao longo da peça seguindo direções curvilíneas.
Fresagem de caixas		Método utilizado para a obtenção de caixas com uma certa profundidade. Neste caso a ferramenta de corte penetra a peça e remove material no seu interior.

2.1.4. Ferramentas para fresagem: geometria

Em termos de geometria das ferramentas de corte, estas podem ter uma variedade de geometrias para as diversas máquinas de fresagem disponíveis, algo que fornece ao processo uma elevada versatilidade [24]. A geometria da ferramenta é um dos fatores mais importantes no processo de fresagem, sendo a otimização do local onde a aresta de corte entra em contacto com a peça a maquinar bastante crucial para obter resultados satisfatórios [25]. A geometria da fresa pode influenciar diretamente a peça produzida no processo, a produtividade da fresagem, a vida da ferramenta, a direção e magnitude das forças de corte, a qualidade das faces maquinadas e o consumo de energia [26, 27]. Em geral as ferramentas de corte podem ser divididas em dois diferentes tipos. As fresas integrais e fresas de insertos.

As fresas de insertos como o nome indica, possuem insertos de diferentes materiais nas arestas de corte da fresa. Estes insertos são bastante económicos e podem ser aplicados a uma grande variedade de processos. Normalmente são produzidos a partir de material mais frágil, como cermets, diamante e materiais cerâmicos. Devido a este facto as suas arestas de corte não podem ser perfeitamente afiadas, já que levaria à fratura do componente [8].

Diferentes tipos de insertos e uma ferramenta de corte com insertos podem ser observados na Figura 3 e Figura 4, respetivamente.



Figura 3 - Diferentes geometrias das pastilhas de corte [28].



Figura 4 - Ferramenta de corte com insertos [28].

As fresas integrais possuem lâminas de corte na sua extremidade e na sua periferia. São normalmente produzidas em HSS (High speed steel) [24]. Este tipo de fresas podem ser observadas na Figura 5.

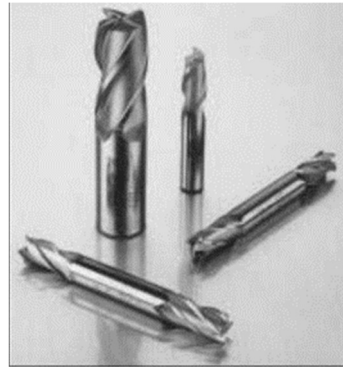


Figura 5 - Fresas integrais [24].

As ferramentas de corte possuem uma aresta afiada, de modo a separar a avara do material base. A aresta possui duas superfícies, estando uma encarregue de direcionar a avara removida e outra de proteger a superfície gerada de fenômenos como a abrasão [8]. Possuem bastantes ângulos que são medidas a partir de um conjunto de diferentes planos [26]. Alguns destes ângulos podem ser observados na Figura 6.

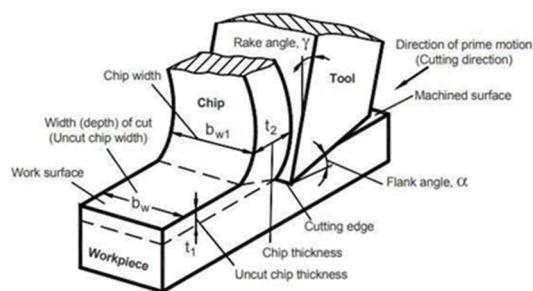


Figura 6 - Nomenclatura em corte ortogonal [26].

O ângulo de corte da ferramenta é um parâmetro bastante importante na vida da ferramenta, visto que este afeta diretamente a espessura de avara e largura de corte. Quando o ângulo de corte diminui, a largura de avara aumenta, levando a uma área afetada maior e assim a um menor aquecimento da ferramenta. A diminuição deste ângulo aumenta a magnitude da componente radial da força de corte, o que pode reduzir a estabilidade do processo [26].

Em casos onde é necessária uma melhor qualidade de maquinagem e de obter produtos com elevadas tolerâncias dimensionais, o uso de ferramentas de corte de vários dentes com geometrias específicas torna-se crucial [29]. Na Figura 7 pode-se observar a geometria de uma ferramenta de corte utilizada em fresagem de topo com insertos (a) e a geometria de uma ferramenta de corte com 18 dentes (b).

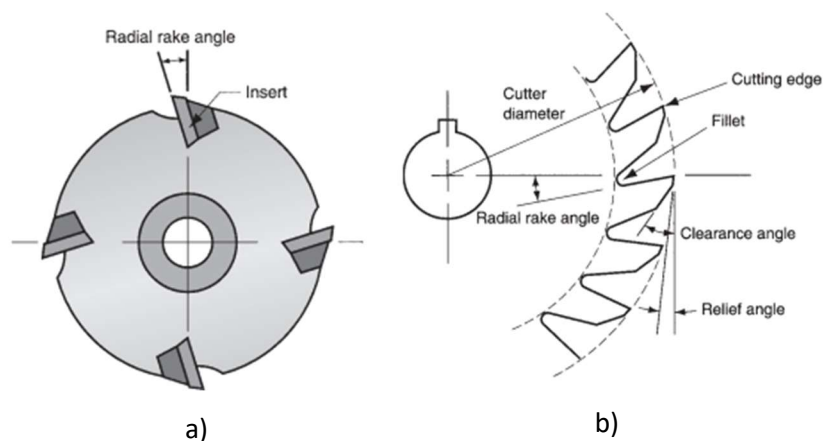


Figura 7 - Geometria de ferramentas de corte: vista inferior de uma ferramenta de corte de topo a), Ferramenta de corte com 18 dentes b), adaptado de [8].

2.1.5. Normas relevantes para o desgaste em ferramentas de corte

No estudo do desgaste das ferramentas de corte no processo de fresagem, existem diversas normas que são necessárias seguir para obter resultados aceitáveis. Certas normas são cruciais em termos de homogeneizar a nomenclatura dos diferentes conceitos presentes no estudo. Outras normas têm o intuito de unificar o processo de obtenção de diversos resultados, de modo a simplificar e melhorar a sua viabilidade e possibilitar a comparação com outros resultados similares.

Em termos de geometria das ferramentas de corte, a norma ISO 3002/1:1982 define a nomenclatura de conceitos importantes, como as superfícies da ferramenta de corte, certos elementos da ferramenta, a superfície da peça a maquinar, o movimento relativo entre as duas variáveis, os ângulos da ferramenta de corte e os planos que são necessários para os obter [30]. A norma ISO 3002/2:1982 formula o processo necessário para a conversão dos ângulos da ferramenta obtidos na norma ISO 3002/1:1982, em ângulos de trabalho [31].

Em termos de determinação da rugosidade da superfície a norma DIN EN ISO 4288/ASME b461, especifica as regras de comparação entre os dados medidas na peça e os limites de tolerâncias presente noutras normas. Também define regras de seleção do comprimento do *cut-off* [32].

Em termos do estudo do desgaste das ferramentas de corte, a norma ISO 8688-2:1989 especifica o processo e as condições de ensaio a utilizar em testes do tempo de vida de uma ferramenta. Esta norma foca-se apenas nas ferramentas de corte constituídas por aços rápidos [33].

Em termo de parâmetros no processo de fresagem, a norma ISO 3002/4:1982 foca-se nas forças aplicadas na peça a maquinar pela ferramenta de corte, nas forças presentes na ferramenta de corte e no consumo de energia e potência para certas operações. Também define uma nomenclatura para estes diferentes aspetos [34].

2.2. Constituição e vida das ferramentas

O tempo de vida de uma ferramenta é o tempo até o qual o corte produzido por esta cessa de apresentar características aceitáveis. Após este tempo a ferramenta deverá ser substituída ou afiada novamente. A vida da ferramenta é uma das características mais utilizadas na avaliação da maquinabilidade de certos materiais [35]. Este parâmetro pode ser influenciado por vários fatores, sendo estes a dureza do material, características das ferramentas, parâmetros de maquinagem e trajetória da ferramenta [36, 37]. A utilização de revestimentos pode ser um ponto crucial no melhoramento de alguns dos aspetos anteriormente referidos, já que ajuda a ferramenta de corte a obter boas propriedades mecânicas, resistência ao desgaste, melhor desempenho e maior produtividade [5, 38].

2.2.1. Materiais para ferramentas de corte

Os processos de fresagem impõem condições extremas de tensão, temperatura e corrosão à ferramenta de corte a ser utilizada. Estas condições limitam bastante o tempo de vida das ferramentas de corte, sendo que para colmatar este efeito as ferramentas de corte usualmente utilizadas devem possuir certas características [39]. Propriedades como, alta dureza, geralmente três ou quatro vezes superior ao material da peça a maquinar, alta dureza em condições de elevada temperatura, elevada resistência ao desgaste a elevadas temperaturas, tenacidade, elevada estabilidade dimensional, resistência à corrosão, resistência ao choque, boa condutividade térmica e elevada resistência à fadiga, são essenciais para a escolha do material a utilizar [28, 39, 40].

Os materiais cerâmicos fornecem à ferramenta de corte valores elevados de dureza e boa resistência ao desgaste, sendo por isso bastante utilizados na maquinagem de certas superligas difíceis de maquinar. Este material possui valores de resistência ao calor e ao desgaste bastante mais elevados do que os aços rápidos e outras ligas duras, algo que pode reduzir o tempo de processamento da peça a maquinar. Uma das maiores vantagens deste tipo de ferramentas é a possibilidade de serem utilizados no corte de materiais a altas velocidades [41]. A fragilidade e baixa resistência a choques mecânicos e térmicas, são características que podem limitar o uso destas ferramentas, sendo que o seu uso em maquinagem intermitente pode causar bastantes problemas. Dentro dos materiais cerâmicos os mais importantes são à base de óxidos de alumínio, nomeadamente a alumina e cerâmicos contendo nitreto de silício [42]. No caso de ferramentas de corte compostas por nitreto de silício, condições de corte elevadas podem impor ao processo elevadas temperaturas e por isso causar desgaste mecânico e químico na zona de corte. A utilização de revestimentos constituídos por materiais inertes pode reduzir este desgaste [4].

Nas ferramentas de corte de diamante um dos maiores problemas é o facto de ele ser quimicamente inerte a vários metais, já que este facto dificulta a união dos segmentos de diamantes à base da ferramenta [43, 44]. Geralmente o diamante compõem apenas uma ponta da ferramenta de corte, enquanto o suporte desse componente é constituído por outro tipo de material [45]. Esta ligação entre o diamante e o suporte de metal, deve ser tal que não cause a

grafitização do diamante, pois este aspeto pode reduzir o desempenho da ferramenta. A elevada dureza e excelente resistência à abrasão são as principais características deste material, no que diz respeito à maquinagem [46]. Comparativamente a ferramentas que não possuem diamante, estas proporcionam ao processo taxas de remoção de material elevadas e superiores tempos de vida das ferramentas [47]. As ferramentas de diamante possibilitam a utilização de arestas de corte bastante afiadas e superfícies lisas, algo que gera aparas de reduzida espessura. A maquinagem com alta precisão é bastante adequada para este tipo de ferramentas [48].

Os aços rápidos são ligas à base de ferro compostas por elementos como o crómio, tungsténio, cobalto, vanádio e molibdéneo. Este material é bastante utilizado em ferramentas de corte devido ao facto de ele reter uma elevada dureza a altas temperaturas, possuir boa resistência ao desgaste e à rutura por fadiga [40, 49]. Em casos onde a operação necessita de ferramentas de corte com elevada tenacidade este tipo de material é o mais adequado [50]. A sua aplicação em ferramentas de corte com geometrias complexas é geralmente fácil e de custo moderado. Estas ferramentas podem também ser tratadas termicamente, de modo a obter arestas de corte bastante duras [8].

Carbonetos cementados (metal duro) fazem parte de uma família de materiais compósitos, constituídos por partículas de carbonetos cerâmicos e um ligante metálico. Os mais importantes carbonetos cementados são os carbonetos de tungsténio com um ligante de cobalto, carbonetos de titânio com ligante de níquel e carbonetos de crómio com ligantes de níquel [8]. Estes materiais apresentam elevada estabilidade a altas temperaturas, elevada dureza e resistência ao desgaste, o que permite a utilização de velocidades de corte bastante elevadas [51]. Para aumentar o tempo de vida destes componentes, podem ser utilizados revestimentos com uma ou mais camadas, constituídos por carboneto de titânio, nitretos, carbonitretos ou óxido de alumínio [40]. Na Tabela 3 são apresentados alguns estudos realizados com incidência nos materiais das ferramentas de corte anteriormente referidos.

Tabela 3 - Tabela resumo de estudos pertinentes aos materiais utilizados em ferramentas de corte.

Autores	Resumo
Ma <i>et al.</i> [52]	Ma et al. estudou o desempenho e o desgaste de duas diferentes ferramentas de corte de material cerâmico, no processo de fresagem de Inconel 718. Foram comparados parâmetros como forças de corte, temperatura, estado da superfície, desgaste da ferramenta e mecanismo de desgaste. Foram utilizadas ferramentas compostas por SIALON e Si ₃ N ₄ reforçado por TiC. Foi concluído que as ferramentas compostas por SiALON possuem melhor resistência ao desgaste, mas acarretam à peça maquinada um pior acabamento superficial, enquanto a ferramenta de Si ₃ N ₄ reforçado por TiC, proporciona uma superfície com melhor qualidade superficial e menores forças de corte, mas com desgastes da ferramenta bastante severos. Em termos de desgaste, em ambos os casos ocorreram problemas de adesão da apara na superfície maquinada, sendo que a apara se mostrou concentrada, no caso da

ferramenta de Si_3N_4 reforçado por TiC e dispersa na ferramenta de SiAlON. Fratura frágil foi a principal causa de desgaste em ambas as ferramentas. A ferramenta de SiAlON apresenta crateras que comprometeram a integridade da lâmina, enquanto na ferramenta de Si_3N_4 reforçado por TiC o dano não afetou a integridade da lâmina de corte.

Tian *et al.* [53] Neste estudo foi testada a influência da velocidade de corte, nas forças de corte geradas e mecanismos de desgaste na fresagem concordante e discordante de Inconel 718, utilizando ferramentas de corte de SiAlON. A máquina utilizada foi uma CNC vertical com velocidade de rotação entre 80 e 10000 rpm. Os valores de avanço por dente, profundidade de corte e largura de corte, mantiveram-se fixos, sendo estes 0.09 mm por dente, 1 mm e 15 mm, respectivamente. Foram utilizadas sete diferentes velocidades de corte. Neste caso conclui-se que as forças de corte tendem a diminuir inicialmente e a aumentar com o aumento da velocidade de corte. As forças de corte geradas por fresagem concordante tenderam a ser maiores em velocidade de corte entre 600 e 1400 m/min, enquanto em velocidade de corte entre 1800 e 3000 m/min, as forças de corte em fresagem discordante tenderam a ser maiores. Os desgastes mais predominantes foram adesão, abrasão, desgaste tipo entalhe e lascagem. Foi também concluído que a velocidades baixas o desgaste predominante foi o desgaste tipo entalhe e a maiores velocidades de corte foi a adesão. Por fim foi concluído que com velocidades de corte abaixo de 1000 m/min o desgaste por lascagem é muito severo.

Rao *et al.* [54] Este estudo focou-se na determinação das forças de corte, formação da apra e integridade superficial da peça maquinada, na fresagem a altas velocidades de uma liga de alumínio 7075-T6, utilizando ferramentas de corte com insertos de carboneto e diamante. Em termos de parâmetros do processo para a análise das forças de corte, foi utilizado um avanço por dente de 0.2 mm, cinco diferentes velocidades de corte, desde 518 a 1585 m/min e três diferentes profundidade de corte com valores entre 0.51 e 2.54 mm. Concluiu-se que a rugosidade superficial da peça melhora até velocidades de corte de 1524 m/min, piorando para velocidades de corte superiores. Em termos de profundidade de corte, o seu aumento incrementou a deterioração da rugosidade superficial. Conclui também que com velocidades de corte entre 610 e 1524 m/min observou-se um alto ângulo de saída das aparas. Por fim observou que as tensões de corte e temperaturas nos planos de corte, mantiveram-se constantes em regimes de elevadas velocidades.

Khatai *et al.* [55] Khatai et al focou-se no estudo do desgaste de flanco observado e morfologia da apara na fresagem de um aço EN 31. Foram utilizadas ferramentas de corte compostas por carboneto de tungsténio revestidas por AlTiN e depositadas por PVD. Foi estudado também a influência de três parâmetros de corte, nomeadamente, a velocidade de corte, velocidade de avanço e profundidade de corte, no desgaste de flanco obtido. Foi concluído que as ferramentas de corte apresentaram um bom desempenho a velocidades de corte elevados com valores bastante reduzidos de desgaste de flanco. Os três parâmetros influenciaram o desgaste acumulado na ferramenta de corte, embora a profundidade de corte tenha mostrado um impacto mais significativo, comparativamente à velocidade de corte e velocidade de avanço. Os mecanismos de desgaste principais foram desgaste abrasivo e lascagem. A apara apresentou uma morfologia maioritariamente helicoidal, com cor azul a velocidades de corte elevadas.

2.2.2. Tipos de revestimentos utilizados em ferramentas de corte

Revestimentos são geralmente descritos como finas camadas depositadas na superfície de uma peça com o intuito de a proteger e estender a sua vida útil [56]. Estes revestimentos naturalmente são bastante importantes na maioria dos processos de fresagem, sendo a sua aplicação crucial na maquinagem de materiais com baixa maquinabilidade [57]. Com o aumento da procura de maquinagem na obtenção dos mais diversos componentes, houve um incremento na investigação em torno das ferramentas e os seus revestimentos, com vista a melhorar a sua performance em termos de fresagem. Neste contexto com a necessidade de aumentar a velocidade e desempenho de corte, fatores como a temperatura e desgaste das ferramentas aumentaram drasticamente. Neste caso a implementação de revestimentos nas ferramentas de corte induz desempenhos de corte bastante mais elevados, como também menores índices de desgaste [58].

Geralmente estes revestimentos são depositados nas ferramentas de corte considerando dois métodos distintos, sendo estes CVD (*Chemical Vapor Deposition*) e PVD (*Physical Vapor Deposition*) [2]. Dentro destes métodos existem diferentes técnicas que podem ser utilizadas. Para PVD as técnicas de Pulverização catódica (*Sputtering*) e evaporação são bastante utilizadas [57]. No caso de CVD podemos ter variantes como o CVD ativado termicamente, CVD assistido por plasma, CVD metalorgânico e Deposição eletroquímica de vapor [59, 60].

No processo de PVD o revestimento é conseguido a partir da transformação de um certo material, normalmente denominado de alvo, através de um processo térmico e físico [61, 62]. As partículas geradas são movimentadas para a superfície a ser revestida, em condições de plasma, num ambiente de vácuo. A acumulação ou condensação dos átomos na superfície da peça gera o revestimento [63]. Este processo possibilita a utilização de uma gama de materiais mais ampla, tal como um melhor controlo na composição dos revestimentos [64]. Esta técnica

apenas consegue aplicar o revestimento nas zonas da peça que estão expostas ao material alvo [65, 66]. As técnicas de *sputtering* e evaporação distinguem-se na forma como transformam o material alvo, no estado sólido, num estado de vapor. Os revestimentos por PVD geralmente acarretam características como pequeno tamanho de grão, alguns defeitos e tensões de compressão [57]. No processo de *sputtering* um gás ionizado é introduzido numa câmara de vácuo, de modo que este atinja o material alvo. Este contacto liberta partículas que posteriormente são direcionadas para a peça a ser revestida, devido a uma diferença de potencial aplicada entre o alvo e as peças a revestir. Neste processo um magnetron terá de ser introduzido perto do alvo. No processo de evaporação o revestimento é criado através da interação entre as partículas criadas por evaporação e as moléculas de gás que são aceleradas dentro da câmara de vácuo. A adesão à peça neste caso é bastante boa, formando várias camadas de revestimento comprimidas [67]. Na Figura 8, pode-se observar um esquema de cada técnica de deposição por PVD.

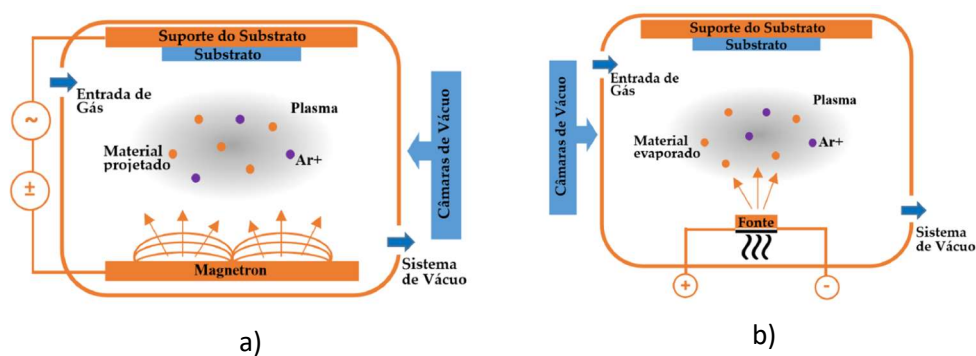


Figura 8 - Esquema das duas principais técnicas de PVD: *sputtering* a), evaporação b), adaptado de [68].

O processo de CVD consiste na criação de um revestimento sólido através da reação química entre um reator gasoso e um certo ambiente [69]. A deposição de revestimentos envolve as reações de fase de gases homogêneos ou até reações químicas heterogêneas [59]. Estas reações são normalmente obtidas por processos térmicos [57]. Na Figura 9 está representado um esquema do processo CVD.

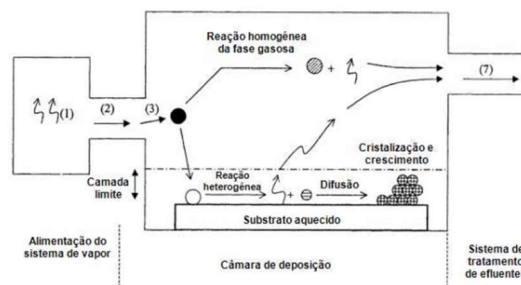


Figura 9 - Esquema de um processo de CVD [70].

Em geral o processo de PVD utiliza temperaturas abaixo dos 500°C e é melhor para o ambiente, comparativamente ao processo de CVD, dado os elementos envolvidos no processo. Esta baixa temperatura possibilita a sua utilização em revestimentos de ferramentas de aço [71]. Já o

processo de CVD é mais indicado para o revestimento de ferramentas de corte composta por carbonetos, já que estas retêm boas propriedades a elevadas temperaturas [3]. Algumas desvantagens dos revestimentos CVD é a elevada rugosidade que impõem à superfície da peça e as tensões residuais que geram [57]. O processo PVD é mais apelativo em aplicações de acabamentos, sendo também mais adequado na maquinagem em corte intermitente [72].

Na Figura 10 estão apresentadas algumas das estruturas possíveis das camadas dos revestimentos.

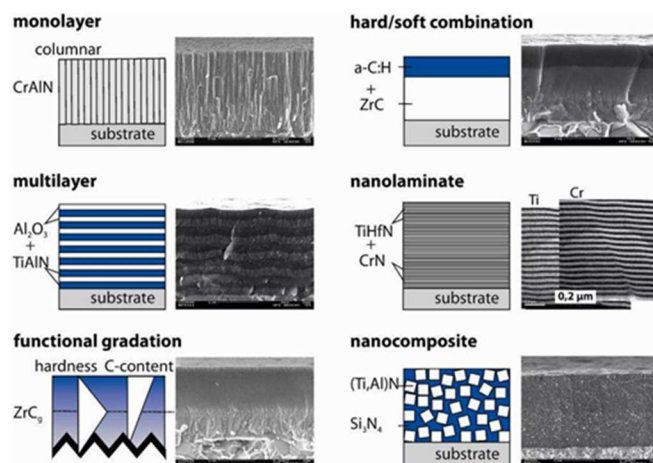


Figura 10 - Estruturas frequentes das camadas dos revestimentos [58].

O uso de revestimentos de multicamadas possibilita a obtenção de propriedades difíceis de alcançar utilizando abordagens com apenas uma camada [73]. Os revestimentos de multicamadas são os que apresentam uma maior quantidade de aplicações na indústria, já que o seu maior número de camadas pode contribuir para uma maior dureza e melhor resistência à propagação de fissuras [74].

A composição química dos revestimentos também tem uma grande importância na sua caracterização e devem ser escolhidos em função da aplicação [3]. Revestimentos de elementos como nitreto, óxidos, carbonetos são bastante utilizados. TiAlN (*Titanium Aluminum Nitride*) é considerado um dos materiais mais importantes no que diz respeito a revestimentos [75]. Este elemento é normalmente depositado por PVD e demonstra elevadas propriedades mecânicas, resistência à oxidação e boa estabilidade dimensional [76]. O uso de multicamadas de TiAlN, em alternativa a apenas uma camada, melhora várias propriedades mecânicas do revestimento [77]. Este revestimento é bastante aplicável em situações de elevadas velocidades de maquinagem, já que nestas condições ele forma um filme protetor com elevada resistência à oxidação [78].

Revestimentos de DLC (*Diamond Like Carbon*) possuem camadas com espessura bastante reduzidas, normalmente na escala dos micrómetros ou nanómetros [79]. Estes revestimentos são bastante apelativos na maquinagem de materiais não ferrosos, como ligas de alumínio e silício, compósitos e materiais não metálicos. Apresentam características como, elevada dureza, sendo o diamante a substância mais dura no planeta, baixo coeficiente de atrito e estabilidade

térmica entre os 400 e 700°C [80]. Em certos casos o uso de revestimentos de diamante pode aumentar dez vezes a vida da ferramenta, comparativamente a casos sem revestimentos [35].

2.2.3. Vantagens da utilização de revestimentos

Como já foi referido anteriormente os revestimentos são utilizados com o intuito de minimizar o desgaste causado na ferramenta de corte, diminuir as forças de corte aplicadas à peça e de, por consequência, aumentar o tempo de vida das ferramentas de corte [81, 82]. Este aspeto pode aumentar a produtividade dos processos de maquinagem e reduzir o seu custo. Em geral a utilização de revestimentos acarreta à ferramenta de corte vantagens como, a redução das forças inerentes ao processo, o aumento da resistência à fratura, o aumento da resistência à temperatura, a prevenção da adesão entre a ferramenta de corte e a peça a maquinar, mantém a integridade da lâmina de corte, reduz a fricção entre os dois componentes e garante uma rugosidade superficial aceitável [80].

Na Tabela 4 podem-se observar vários estudos conduzidos assentes nas ferramentas de corte revestidas no processo de maquinagem.

Tabela 4 - Resumo de estudos efetuados acerca das ferramentas de corte revestidas em processos de fresagem.

Autores	Resumo
Varghese <i>et al.</i> [83]	Este estudo focou-se na investigação do desempenho de ferramentas de carboneto de tungsténio revestidas por AlCrN e AlTiN na fresagem de um aço MDN 250. Foi reportado um aumento da vida das ferramentas revestidas por PVD, comparativamente a ferramentas não revestidas, produzindo também superfícies com melhor qualidade e menores forças de corte. O revestimento AlCrN obteve um melhor desempenho na maquinagem, onde apresentou menor desgaste de flanco devido à formação de óxidos de alumínio e cromo na sua superfície. Utilizando as ferramentas revestidas também foi possível observar uma redução de certos mecanismos de desgaste, tal como lascagem, desgaste tipo cratera e arestas postiças. A qualidade da superfície maquinada apresentou uma correlação bastante boa com o desgaste de flanco, onde foi observada uma redução da rugosidade superficial com a diminuição do desgaste e temperatura de corte.
Martinho <i>et al.</i> [4]	Neste estudo foram comparados os mecanismos de desgaste de duas ferramentas de corte com e sem revestimento, na fresagem de ferro fundido cinzento. Nitreto de silício foi o material utilizado para a ferramenta de corte. Foi utilizado como revestimentos um filme grosso de diamante. Foi concluído que as forças de corte na ferramenta revestida são maiores para todas as velocidades de corte. Este aspeto pode ser explicado pelo facto de este revestimento

impor à superfície da ferramenta uma maior rugosidade. Foi também observado que o avanço possui uma influência mais pronunciada nas forças de corte, comparativamente à velocidade de corte. A possível ocorrência de grafitização e as elevadas temperaturas, levaram à remoção do revestimento na face da ferramenta de corte perto da lâmina. Em todas as condições os mecanismos de desgaste observados, foram adesão, abrasão e difusão. Por fim Martinho et al. conclui que o tempo de vida das ferramentas revestidas é superior à das não-revestidas.

Silva *et al.* [84] Silva et al. estudou o comportamento de um aço inoxidável superduplex GX2CrNiMoN26-7-4 em processos de fresagem. Foram utilizadas duas ferramentas de corte de carboneto de tungstênio com revestimentos depositados por PVD e CVD. Em PVD foi utilizado uma monocamada de AlTiN, enquanto em CVD foi utilizada um revestimento de várias camadas de TiN/TiCN/Al₂O₃. As ferramentas de CVD apresentaram maior degradação. Não foram encontradas diferenças significativas nos parâmetros de rugosidade de ambos os revestimentos. Neste caso foi possível observar que após a deterioração dos revestimentos, o carboneto de tungstênio apresenta desintegração. Visto isto é possível notar que a menor deterioramento dos revestimentos, leva a um menor desgaste da ferramenta de corte e uma melhor qualidade da superfície maquinada. Na ferramenta de PVD a área afetada foi menor. Foi concluído que para estas condições de ensaio a utilização do revestimento depositado por PVD é mais vantajoso.

Masooth *et al.* [85] Este estudo focou-se na determinação da rugosidade superficial, na fresagem de uma liga de alumínio Al6061 – T6, utilizando ferramentas de carboneto de tungstênio com e sem revestimentos. Como revestimento foi utilizado TiAlN. O parâmetro mais importante no que diz respeito à qualidade das superfícies maquinadas, foi a velocidade de corte, em ambas as ferramentas. Em termos da influência da profundidade de corte na rugosidade obtida, este tem uma grande influência nas ferramentas não revestidas, enquanto nas ferramentas revestidas ela possui pouca importância. Foi concluído que as ferramentas de corte revestidas proporcionavam à superfície valores de rugosidade inferiores, comparativamente às ferramentas não revestidas.

Ucun *et al.* [86] Neste estudo Ucun et al. investigou a influência das condições de lubrificação do processo de fresagem no desgaste de uma ferramenta de corte, tal como a influência do revestimento utilizado. Neste caso foi maquinado Inconel 718, com ferramentas de corte

compostas por carboneto de tungstênio. Foram utilizados para o revestimento AlTiN, DLC, AlCrN e multicamadas de TiAlN com AlCrN. Desgaste por abrasão foi o mecanismo de desgaste mais abundante. Foram também observadas fraturas nas lâminas de corte. O desgaste nas ferramentas revestidas foi menor, comparativamente à ferramenta não revestida, sendo a redução de diâmetro das arestas de corte mais pronunciada nesta última. Os revestimentos de DLC apresentaram uma menor acumulação de apra nas arestas de corte. Esta acumulação de apra foi mais aparente nas formulações de AlCrN, TiAlN com AlCrN e na ferramenta sem revestimento. Foi também observado um desgaste elevado em condições de pequenos avanços e profundidade de corte. Na ferramenta sem revestimento ocorreram fenômenos de lascagem.

Aramcharoen *et al.* [87] Aramcharoen et al. estudou certos revestimentos PVD em termos do desgaste e acabamento superficial, na fresagem de um aço pré endurecido H13. Foram utilizadas ferramentas de carboneto de tungstênio e revestimentos de TiN, CrN, TiCN, TiAlN e CrTiAlN. As condições de ensaio mantiveram-se constantes. As ferramentas de corte com revestimentos apresentaram reduzidos fenômenos de lascagem na aresta de corte, comparativamente a ferramentas não revestidas. O desgaste do raio da aresta de corte também foi menor nos casos de ferramentas revestidas. O revestimento TiN apresenta as melhores características de desgaste, sendo este o revestimento que impõe à ferramenta o menor desgaste de flanco, menor lascagem da aresta de corte e melhor acabamento superficial. Este revestimento também exibe a menor dureza e maior adesão à ferramenta de corte. Delaminação foi encontrada nos revestimentos de CrN e TiCN, enquanto no caso de TiAlN ocorreram fenômenos de desgaste de flanco localizados.

Beake *et al.* [88] Beake et al. Investigou o desempenho em termos de desgaste acumulado em ferramentas de corte revestidas por apenas uma camada de AlTiN e revestidas por bicamada de AlCrN-TiAlN na fresagem de aço H13. Foi observado um aumento substancial da vida da ferramenta na aplicação do revestimento bicamada, em comparação com o revestimento de apenas uma camada. Os principais mecanismos de desgaste foram lascagem e desgaste tipo cratera, estando estes mecanismos presentes em todas as ferramentas testadas. Foi também concluído que as propriedades micromecânicas do revestimento apresentam uma correlação elevada à performance da ferramenta. A formação de filmes devido

à camada de AlCrN também melhorou a estabilidade do processo e o seu desempenho em termos de desgaste.

2.2.4. Limitações na utilização de revestimentos

Como já foi referido anteriormente a utilização de revestimentos nas ferramentas de corte pode trazer diversas vantagens ao processo de fresagem. No entanto a escolha do revestimento a utilizar para a maquinagem de diferentes materiais é um aspeto crucial, pois a utilização de revestimentos em certas situações pode piorar o desempenho do processo e reduzir a qualidade da superfície maquinada. Alguns estudos foram realizados onde este fenómeno é aparente [89].

Bushlya et al. [90] comparou a rugosidade superficial obtida na fresagem de Inconel 718, com ferramentas de corte constituídas por PCBN (Nitreto cúbico de boro policristalino), sem revestimento e com revestimento TiN. Neste estudo foi possível observar que a rugosidade obtida a partir das ferramentas de corte revestidas foi significativamente superior, comparativamente à obtida pela ferramenta não revestida. Este aspeto foi mais evidente a baixas velocidades de corte. A maior rugosidade apresentada pode ser atribuída ao maior ângulo da aresta de corte das ferramentas revestidas. Thakur *et al.* [91] verificou também que com velocidades de corte baixas a rugosidade superficial obtida na fresagem de Inconel 825, utilizando ferramentas de corte revestidas por multicamadas (TiN/TiCN/Al₂O₃/ZrCN), foi relativamente superior à rugosidade superficial obtida utilizando ferramentas não revestidas.

Em certos casos uma excessiva espessura das camadas de revestimentos pode levar à fratura e separação do revestimento da ferramenta de corte. Este aspeto pode resultar da maior fragilidade que a elevada espessura proporciona. A utilização de revestimento em situações onde o choque térmico e as forças dinâmicas são bastante rigorosas, pode levar à lascagem do revestimento e eventual falha da ferramenta. Geralmente as ferramentas de carboneto revestidas apresentam esta limitação, sendo a utilização de ferramentas não revestidas mais apropriado em fresagem intermitente [8].

2.2.5. Critérios de fim de vida das ferramentas de corte

Como já foi referido anteriormente, a vida de uma ferramenta pode ser definida como o período no qual a ferramenta retém as capacidades de corte [92]. Quantidade de material removido e número de peças produzidas são alguns aspetos que também expressam o tempo de vida de uma ferramenta [35]. Normalmente o fim de vida das ferramentas de corte é alcançado quando ocorre a falha da mesma, por condições de fratura, temperatura ou desgaste progressivo [8].

Visto que a rutura total da ferramenta é um aspeto a evitar, a adoção de diversos critérios de determinação do seu tempo de vida é uma solução bastante implementada [8]. Em termos de calculo do tempo de vida da ferramenta, Taylor propôs a utilização da equação 8 [35].

$$V_c \times T^n = C \quad (8)$$

onde, V_c é a velocidade de corte, T o tempo que é necessário para gerar um certo VB (Desgaste de flanco) da ferramenta, n simboliza a exponente de Taylor e C a constante de Taylor.

O valor de n é tabelado e possui um certo intervalo para os diferentes materiais utilizados nas ferramentas de corte [35]. Dentro dos fenómenos de desgaste, o desgaste do flanco é pensado como um dos mais predominantes. Visto isto a determinação deste parâmetro é um dos aspetos mais importantes para avaliar a vida de uma ferramenta [93]. Na Figura 11 pode-se ver a influência da velocidade de corte no desgaste do flanco e na vida da ferramenta.

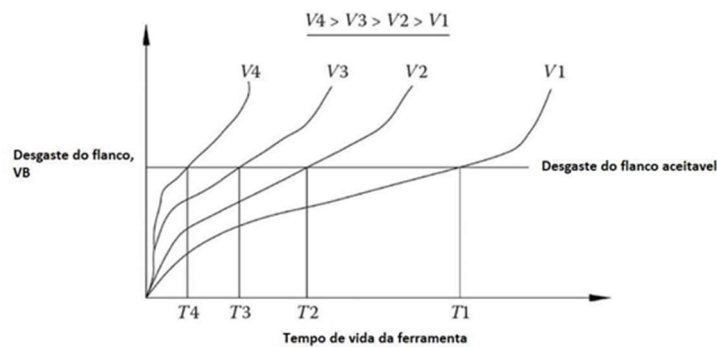


Figura 11 - Desgaste do flanco a diferentes velocidades de corte, adaptado de [35].

De modo a aferir o tempo de vida de uma ferramenta devem ser seguidos os seguintes critérios [8, 35, 92, 94]:

- Desgaste acelerado: A rápida deterioração é geralmente causada pela relação entre o desgaste e a temperatura. Neste caso o aumento do desgaste induz aumentos na temperatura do processo, que por sua vez aumenta o desgaste da ferramenta. Nestas condições a taxa de desgaste aumenta exponencialmente, conduzindo à deterioração da ferramenta e à sua falha. Neste contexto considera-se que uma ferramenta entra em falha, quando esta não possuir a habilidade de cortar a peça, ou possuir mecanismos de corte anormais;
- Suavização da ferramenta: Caracterizado pela rápida perda da geometria na zona de corte. Este aspeto é bastante prevalente na maquinagem de HSS em condições de elevadas velocidades de corte;
- Desgaste de flanco: Como foi referido anteriormente a medição do desgaste de flanco pode ser importante na determinação do fim de vida da ferramenta;
- Tolerância dimensional: Se as peças produzidas não apresentam as tolerâncias dimensionais requeridas, a ferramenta de corte deve ser retirada de serviço ou afiada novamente, mesmo que o corte produzido seja aceitável;
- Degradação da superfície: O facto de o corte produzir superfícies com rugosidade superior ao requerido, marca o fim de vida da ferramenta;
- Forças radiais: Ocorre o fim de vida da ferramenta quando as forças radiais aumentam repentinamente e com valores superiores a 10%, em relação ao seu valor original;

- Ruído: Mudanças nos sons emitidos pela máquina no processo, pode indicar a necessidade de alteração dos componentes utilizados;
- Formato da apara: A formação de aparas com estruturas irregulares, também pode marcar o fim de vida de uma ferramenta.

2.2.6. Mecanismos de desgaste em ferramentas de corte

Os mecanismos de desgaste aparentes nas ferramentas de corte variam de ferramenta para ferramenta, sendo aspetos como as condições de corte utilizadas, as tolerâncias dimensionais requeridas, peça a maquinar, geometria da ferramenta e rigidez da máquina de corte, importantes no desgaste produzido [95]. A parte da ferramenta que apresenta mais desgaste e as suas consequências também são características influenciadas pelas variáveis acima expostas. O estudo acerca dos mecanismos de desgaste de vários materiais é um aspeto bastante prominente na literatura, embora a experiência mostre que diversos aspetos não são replicáveis em diferentes configurações físicas. Este aspeto é mais predominante em certos tipos de mecanismos de desgaste [94].

Os mecanismos de desgaste podem ser divididos em cinco diferentes tipos: Desgaste adesivo, abrasivo, mecânico, térmico e químico [28].

O desgaste abrasivo é normalmente causado quando partículas duras, da parte inferior da apara, entram em contacto com a superfície da ferramenta de corte e removem parte do seu material. Dentro deste mecanismo, o desgaste de flanco é o mais predominante. As partículas formadas advêm da acumulação de apara na aresta de corte ou de fragmentos da ferramenta de corte removidos por adesão. A dureza da ferramenta de corte, as temperaturas geradas e o endurecimento da apara, são os fatores com maior influência na criação deste desgaste [35]. Este tipo de desgaste é um dos mais comuns. Indícios deste tipo de desgaste na ferramenta levam a maiores forças de corte necessárias, menores precisões de corte e maiores valores de rugosidade [96]. Na Figura 12 está representado um exemplo deste tipo de desgaste.

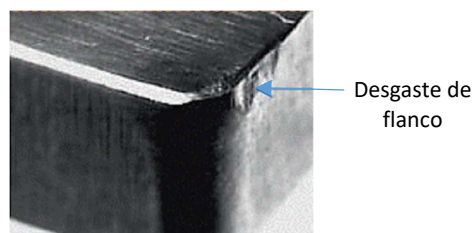


Figura 12 - Desgaste de flanco [97].

O desgaste químico é caracterizado pela formação de crateras na superfície da ferramenta de corte junto à aresta de corte, geralmente em condições de elevadas tensões e temperatura [94]. Reações químicas entre a ferramenta de corte e a superfície a ser maquinada, são as principais causas deste desgaste [6]. Ocorre bastante na maquinagem de materiais dúcteis. A criação de crateras reduz a resistência das ferramentas de corte e aumenta a fricção criada entre a apara e a sua superfície [35]. Na Figura 13 pode-se observar este desgaste na superfície de uma ferramenta de corte.

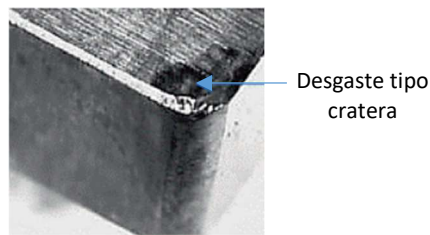


Figura 13 - Desgaste tipo cratera [97].

O desgaste térmico pode ser dividido em duas grandes variantes. Num caso pode ocorrer fratura térmica causada por variações bruscas na temperatura, habitualmente em fresagem intermitente. Este desgaste é caracterizado por pequenas fendas perpendiculares ao longo da lâmina de corte [35]. A perda de rigidez perante condições extremas de temperatura, pode originar a deformação plástica da ferramenta.

Desgaste por adesão ocorre devido à fricção entre a ferramenta de corte e a peça a maquinar. Em condições de elevada pressão e temperatura as faces dos dois componentes tendem a ligar-se e a aderir um ao outro. As partículas que são retiradas do material são normalmente direcionadas para a parte inferior da apana ou para a superfície maquinada [35]. Em desgaste por entalhe a superfície maquinada acarreta uma dureza mais elevada do que o material interno. Normalmente caracteriza-se pela formação de microfissuras nas faces e arestas de corte da ferramenta [8]. O desgaste por entalhe é bastante prevalente em ferramentas de materiais cerâmicos, no corte de materiais difíceis de maquinar [98]. Na Figura 14 pode-se observar um fenómeno de desgaste por entalhe.

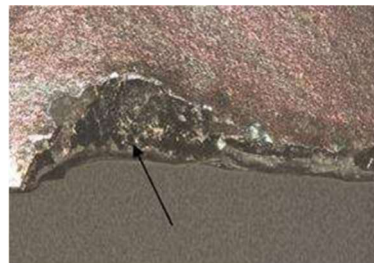


Figura 14 - Desgaste por entalhe [99].

Por último, no desgaste mecânico, a lascagem ocorre em condições de sobrecarga. É normalmente causada por fatores como, profundidades de corte e avanços altos, fenómenos de acumulação de apana na aresta de corte e desgaste dos insertos [6].

Na Tabela 5 estão apresentados alguns estudos sobre os mecanismos de desgaste de diversas ferramentas de corte no processo de fresagem.

Tabela 5 - Resumo de estudos efetuados acerca dos mecanismos de desgaste em ferramentas de corte.

Autores	Resumo
Zhang <i>et al.</i> [100]	Zhang et al. estudou os modos e mecanismos de rutura de compósitos de SiCf/SiC utilizando fresagem de altas velocidades, tal como os seus

mecanismos de desgaste e qualidade da superfície maquinada. Ferramentas de corte PCD (diamante policristalino) e ferramenta de diamante CVD (Chemical vapor deposition) foram utilizadas. Foi observado que no caso da ferramenta de corte CVD, estas apresentam grandes pedaços de lascagem, enquanto nas ferramentas de PCD ocorreu pouca lascagem. Em geral a ferramenta de CVD apresentou maior desgaste e pior desempenho, comparativamente ao PCD. Por fim foi concluído que para a fresagem de compósitos SiCf/SiC é aconselhável utilizar ferramentas de PCD em vez de ferramentas de diamante CVD.

Sousa *et al.* [101] Neste estudo Sousa *et al.* aferiu os mecanismos de desgaste de um aço duplex inoxidável UNS S32101. As ferramentas utilizadas possuíam diferentes geometrias e eram revestidas por TiAlN, TiAlSiN e AlCrN. As ferramentas com AlCrN e TiAlN apresentaram valores elevados de desgaste em altas velocidades de avanço. No caso destes revestimentos o aumento do comprimento de corte teve uma influência negativa no desgaste de flanco. Os mecanismos de desgaste observados foram maioritariamente adesivos e abrasivos para todas as ferramentas, sendo a sua severidade diferente. As ferramentas de corte com duas lâminas de corte apresentaram menos desgaste adesivo, embora tenha ocorrido desgaste abrasivo e delaminação das camadas. As ferramentas de TiAlSiN e AlCrN com quatro lâminas de corte produziram superfícies com boa qualidade. A ferramenta TiAlSiN, devido às suas boas propriedades mecânicas, reportou o menor desgaste de flanco.

Sousa *et al.* [14] Este estudo focou-se na determinação dos mecanismos de desgaste de ferramentas de corte revestidas por multicamadas de TiN/TiAlN, depositadas por PVD HiPIMS (Pulverização catódica de magnetron de alta potência), na fresagem de Inconel 718. O avanço por dente é o parâmetro com mais influência na qualidade das superfícies maquinadas, sendo o comprimento maquinado o parâmetro mais importante para o desgaste da ferramenta. Neste caso o desgaste das ferramentas teve um impacto negativo na qualidade das superfícies. A menor rugosidade da superfície foi obtida usando os menores valores de velocidade de corte e avanço por dente. Neste caso o mecanismo de desgaste predominante foi a abrasão e lascagem. Foi concluído que para o corte extensivo de material o uso destes revestimentos não é aconselhável, já que o desgaste acumulado neste caso é bastante significativo, embora a rugosidade obtida possa ser considerada adequada.

Martinho *et al.* [102] Este estudo focou-se na avaliação do desempenho de revestimentos CVD (AlTiN) e PVD (TiN/TiCN/Al₂O₃), na fresagem de um aço inoxidável

Duplex X2CrNiMoCu25-6-3-3. Foi utilizado carboneto de tungstênio como material das ferramentas de corte. Os revestimentos PVD demonstraram características mais frágeis. O revestimento CVD mostrou ser mais apelativo em operações de desbaste de maiores áreas, enquanto em operações de acabamento superficial a utilização do PVD é mais adequado. Para operações de corte de grandes áreas o revestimento PVD perde a sua camada rapidamente, algo que induz à ferramenta de corte maiores forças. O revestimento CVD acarretou mais desgaste. Os mecanismos de desgaste foram idênticos em ambos os casos, embora a adesão em CVD tivesse sido mais severa. Por fim, foi concluído que a presença de fragmentos do revestimento na apanha demonstra uma fraca resistência do revestimento.

Sousa *et al.* [5] Neste estudo foram analisados os mecanismos de desgaste de ferramentas com diferentes geometrias e revestimentos, na maquinagem de um aço pré-endurecido W 1.2711. Foram apenas alterados os parâmetros de avanço e profundidade de corte. As ferramentas apresentavam pontas redondas e pontas quadradas, com dois diferentes revestimentos PVD, TiAlN e TiAlSiN. No revestimento de TiAlN foram observados mecanismos de desgaste por adesão, abrasão e delaminação das camadas. O desgaste foi menos intenso com velocidades de corte intermédias (80 m/min). No revestimento de TiAlSiN os mesmos mecanismos de desgaste estiveram presentes, sendo que neste caso ocorreu menos desgaste na superfície da ferramenta de corte. Este aspeto foi bastante mais pronunciado nas ferramentas de pontas redondas. As superfícies maquinadas por TiAlSiN apresentaram uma melhor qualidade, sendo as ferramentas de corte com pontas redondas as mais indicadas para o acabamento superficial. Velocidades de corte a 80 m/min apresentaram valores de rugosidade superficial mais apelativos.

Liu *et al.* [103] Liu *et al.* estudou o desempenho de corte e os mecanismos de desgaste na fresagem de um ferro fundido HT250, utilizando uma ferramenta de corte de Si_3N_4 (Nitreto de silício), revestidas por CrAlN e TiAlN. O tempo de vida das ferramentas de corte revestidas e não revestidas diminui com o aumento das velocidades de corte, embora em condições de elevadas velocidades a vida das ferramentas de corte foi superior. Não ocorreram fenómenos de remoção dos revestimentos da face da ferramenta de corte. Adesão foi o mecanismo de desgaste mais predominante nas ferramentas não revestidas. Nas ferramentas de CrAlN ocorreu desgaste abrasivo. Em fases mais prolongadas da fresagem estas ferramentas apresentaram também desgaste por adesão. Novamente em condições de elevadas velocidades de corte o desgaste adesivo diminui em todas as ferramentas de corte. Foi

concluído que as ferramentas de CrAlN possuem as melhores características para a fresagem de HT250, enquanto as ferramentas sem revestimento demonstram ser as menos apelativas.

2.3. Maquinagem de aços pré-tratados para moldes

Atualmente 80% dos aços utilizados no fabrico de moldes apresentam condições de pré-tratamento [104]. Este aspeto advém do facto de estes aços poderem ser utilizados sem a necessidade de tratamentos de calor adicionais antes e depois do processo de maquinagem, visto que eles já possuem os valores de dureza necessário tendo em conta as especificações requeridas [105]. O desenvolvimento de partes plásticas com cada vez maiores dimensões, também foi um dos aspetos fulcrais no desenvolvimento destes aços, já que exigem um melhor tratamento de calor dos moldes. Neste caso a utilização de aços pré-endurecidos pode reduzir as alterações dimensionais e fraturas geradas no processo [106].

2.3.1. Características usuais dos aços pré-tratados para moldes

Os aços pré-tratados para moldes podem ser fabricados no âmbito de possuir uma variedade de propriedades, com o intuito de ser aplicável numa ampla gama de aplicações. Estes aços geralmente apresentam boas propriedades em termos de resistência ao desgaste, tenacidade, dureza, soldabilidade, maquinabilidade, resistência à corrosão, apetência de ser polida e propriedades da superfície [7, 107]. Estes aços também apresentam reduzidas distorções no processo de moldação [7].

Em termos de dureza geralmente possuem valores entre 38 e 40 HRC, sendo que esta característica pode ser mais elevada em situações onde é necessária uma maior resistência a esforços e ao desgaste [104]. Entre estes valores de dureza o aço retém uma boa maquinabilidade [106]. Esta dureza é especialmente importante na produção de peças com acabamento superficial espelhado, visto que os defeitos da superfície do molde são visíveis na superfície do produto a obter [108].

Na moldação a resistência ao desgaste é um aspeto bastante pertinente, pois o molde de aço encontra-se em contacto com um fluido a elevadas temperaturas, algo que pode induzir defeitos na sua superfície. O processo de desmoldagem também pode causar estes defeitos. Visto que certos plásticos tem a propensão de libertar gases corrosivos, a resistência à corrosão também é uma característica importante [109].

Geralmente estes aços apresentam valores de resistência mecânica entre os 1500 e 2000 MPa, algo que permite ao molde suportar os esforços térmicos e mecânicos impostos durante a moldação [108].

A maquinabilidade é um dos aspetos mais importante destes aços, já que o fabrico do molde engloba quase metade do preço do processo na sua totalidade [7]. A elevada quantidade de material a ser removido é um aspeto que pode explicar este fenómeno [104]. Aço P20 é um dos

mais utilizados na indústria visto que possui boas propriedades mecânicas, maquinabilidade e boa capacidade de ser endurecido [105].

2.3.2. Maquinabilidade dos aços pré-tratados para moldes

A maquinabilidade de um material pode ser aferida tendo em conta fatores como a vida da ferramenta, forças de corte e potência requerida e a qualidade da superfície maquinada [110]. Em geral é possível afirmar-se que o aumento da dureza de um material influencia negativamente as propriedades de maquinabilidade de um material. Outras características como uma maior resistência, maior ductilidade e menor condutividade térmica, podem diminuir a maquinabilidade do aço. Comparativamente a outros aços usados em moldes, os aço pré-tratados possuem uma maior dureza no processo de desbaste, algo que lhes fornece uma maquinabilidade mais reduzida [111].

A microestrutura do aço desempenha um papel fulcral na maquinabilidade deste material, sendo que alterações na sua composição podem alterar a dureza do material, tendo um impacto na sua maquinabilidade. Processos de esferoidização de carbonetos em aços têm mostrado uma tendência para aumentar a sua maquinabilidade. Este tratamento tende a reduzir a dureza do material até níveis abaixo do requerido para os aço pré-tratados para moldes [104]. A influência da microestrutura do aço, mais concretamente o seu tamanho de grão, na maquinabilidade destes aços têm vindo a ser um aspeto bastante investigado [112]. Em aços com uma microestrutura de austenite foi reportado que maiores tamanhos de grãos propulsionaram ao material uma maior maquinabilidade a taxas de remoção de material altas, sendo que a baixas taxas de remoção grãos mais finos tenderam a melhorar a maquinabilidade. Outro estudo assente no mesmo fenómeno observou que o aumento do tamanho dos grãos do aço reduziu o desgaste observado na ferramenta de corte [113].

Hoseiny *et al.* [113] estudou a maquinabilidade de um Aço AISI P20 com diferentes teores de austenite residual e de martensite. Neste caso observou-se que o aumento do tamanho dos agregados de martensite agravou as forças de corte geradas, sendo este aspeto explicado pelo aumento da dureza do material devido às tensões induzidas. Os agregados com menor dimensão proporcionaram uma vida mais prolongada às ferramentas de corte.

2.3.3. Recentes desenvolvimentos na maquinagem de aços pré-tratados para moldes

Na Tabela 6 podem ser observados alguns estudos relativos à maquinagem de aços pré-tratados, sendo estes assentes em diversos aspetos do processo.

Tabela 6 - Estudos acerca da maquinagem de aços pré-tratados para moldes.

Autores	Resumo
Zahoor <i>et al.</i> [114]	Zahoor et al. estudou a influência das vibrações da máquina de corte na rugosidade superficial da peça maquinada, tolerâncias dimensionais e desgaste da ferramenta na fresagem de aço P20.

Para além da vibração, foi estudado a influência da profundidade de corte e velocidade de avanço nas propriedades descritas. A ferramenta de corte era constituída por carboneto com um revestimento de TiAlN. Verificou-se que a vibração da ferramenta de corte foi o parâmetro com mais influência na qualidade da superfície maquinada, sendo a velocidade de avanço a menos importante. Em termos de tolerâncias dimensionais, os três parâmetros estudados não apresentarem influência significativa. Em situações de altos níveis de vibração e profundidades de corte ocorreu a formação de crateras e a acumulação de apra na aresta de corte.

Marcon *et al.* [115]

Este estudo avaliou o desgaste de ferramentas na maquinagem de um aço VP100, tendo em conta diferentes parâmetros de maquinagem e diferentes insertos. Foram utilizados insertos do tipo R300-1032E-PL e R300-1032M-PH, com revestimentos de TiAlN e multicamadas de Ti, Al₂O₃ e TiN. As menores velocidades de corte juntamente com as maiores velocidades de avanço, proporcionaram as melhores condições de ensaio. Ocorreu desgaste abrasivo, visto que foram encontradas partículas duras na microestrutura do aço maquinado. Notou-se que o maior desgaste de flanco das ferramentas originou um maior consumo de potência. Nas ferramentas onde o contacto entre estas e a ferramenta de corte é menor, o consumo de energia foi reduzido.

Hoseiny *et al.* [104]

Hoseiny *et al.* estudou o efeito de processos de tratamento térmico na microestrutura de aço P20 e na sua maquinabilidade. Foram utilizados diferentes processos térmicos que proporcionaram ao aço microestruturas de martensite temperada, bainite e carbonetos esferoidizados numa matriz de martensite temperada. Carbonetos com revestimento de multicamadas de TiAlN foram utilizados como ferramenta de corte. Notou-se que a estrutura de carbonetos esferoidizados obteve o melhor desempenho no que diz respeito a forças de corte e vida da ferramenta, retendo valores de dureza idênticos às outras microestruturas. Esta microestrutura acarretou perdas em propriedades como tenacidade à fratura e resistência à tração. A microestrutura de martensite temperada proporcionou uma maior vida à ferramenta, comparativamente à de bainite. O encruamento foi a característica que mais influenciou a maquinabilidade dos aços estudados. Este aspeto foi mais visível no aço composto por bainite. O mecanismo de desgaste predominante em bainite foi a adesão. A lascagem foi o mecanismo predominante para os aços com carbonetos esferoidizados e martensite temperada.

-
- Zahoor *et al.* [116] Neste estudo Zahoor *et al.* avaliou novamente a influência de vibrações induzidas pela velocidade de avanço e velocidades avanço na qualidade da superfície do aço P20 maquinado. Neste estudo foram utilizadas ferramentas de HSS. As vibrações mostraram ter mais influência na rugosidade, microestrutura e microdureza da superfície, comparativamente à velocidade de avanço. Foi constatado que a velocidade de avanço possui uma relação linear com a rugosidade da peça maquinada, sendo este parâmetro também influente na microestrutura gerada. Com valores elevados de velocidade de corte, o desgaste por fratura térmica foi o principal mecanismo observado.
-
- Medvedeva *et al.* [111] Este estudo focou-se na determinação da influência do conteúdo de níquel presente num aço pré-endurecido, na sua capacidade de ser maquinado. Foram avaliadas as forças de corte, vida da ferramenta e temperatura entre a ferramenta e a avara gerada. Foram utilizadas ferramentas de corte de carboneto de tungstênio com revestimento TiAlN. Foi observado que o aço com maiores percentagens de níquel, apresentaram as melhores características de maquinabilidade, sendo a vida das ferramentas maior e o desgaste de flanco menor. A maquinagem de aço com menores quantidades de níquel levou a uma maior acumulação de avara na aresta de corte, tal como desgaste por adesão. Este facto pode ser explicado pelas maiores forças de corte e temperaturas geradas neste processo. Lascagem nestes casos também foi observada com maior frequência.
-

Revisão Bibliográfica

3. Materiais e Métodos

Neste capítulo, os materiais e os métodos utilizados para obter os resultados esperados são apresentados. O capítulo é dividido em dois subcapítulos. No subcapítulo 3.1. serão abordados os materiais da peça a maquinar e do substrato. No subcapítulo 3.2. todos os métodos utilizados ao longo da investigação para alcançar os resultados pretendidos serão descritos de forma extensiva.

3.1. Materiais

Neste subcapítulo, serão focados os materiais utilizados no processo de maquinagem aplicado, especificamente o material das ferramentas de corte utilizadas, dando também ênfase ao revestimento utilizado, método de deposição e sua geometria, como também o material maquinado, as suas dimensões principais e propriedades mecânicas mais importantes.

3.1.1. Caracterização do material a maquinar

Para os testes de maquinagem foi utilizado um aço pré-tratado para moldes, denominado de W 1.2711. O material foi fornecido pela empresa ArcelorMittal, sobre a forma de um bloco com dimensões de 200x150 [mm], como se pode observar na Figura 15.

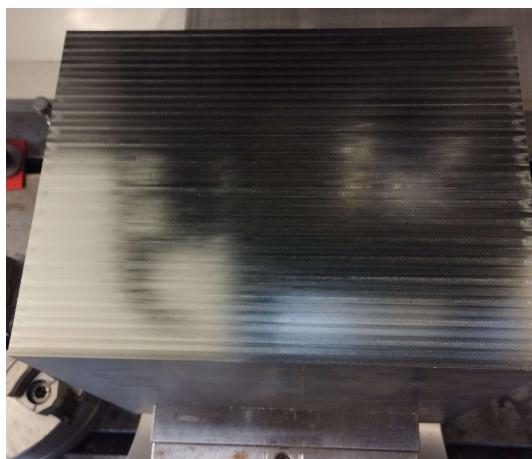


Figura 15 – Bloco de aço W 1.2711 utilizado nos testes de maquinagem.

Segundo o fornecedor, este aço é bastante resistente ao desgaste, possui elevada tenacidade e boa capacidade de ser polido devido aos baixos níveis de inclusões não metálicas. As suas boas propriedades mecânicas a uma grande variedade de temperaturas, torna-o excelente em

aplicações como moldes de injeção plástica para termoplásticos, moldes para compressão, matrizes de extrusão para termoplásticos e matrizes para martelos de forja. O aço foi fornecido num estado pré-endurecido possuindo uma ligeira variação de dureza entre 380 HV₅ e 460 HV₅. Na Tabela 7 estão presentes algumas das propriedades mecânicas e físicas do material em questão, enquanto a sua composição química pode ser observada na Tabela 8.

Tabela 7 – Propriedades mecânicas e físicas do aço W 1.2711 [117].

Propriedade	Valor
Tensão de cedência [MPa]	1045
Tensão de Rutura [MPa]	1270
Alongamento [%]	10
Condutividade térmica [W/m K]	29
Calor específico [J/Kg °C]	460

Tabela 8 – Composição química do aço W 1.2711 [117].

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V
Percentagem (wt%)	0.55	0.30	0.70	0.02	0.007	0.70	0.30	1.70	0.07

3.1.2. Caracterização das ferramentas (geometria e revestimentos)

As ferramentas de corte utilizadas no procedimento experimental são constituídas por carboneto de tungsténio, sendo todas integrais e revestidas. As ferramentas foram fornecidas pela empresa InovaTools.

Foram testadas três diferentes ferramentas de corte, sendo que duas das ferramentas apresentam uma geometria semelhante. A outra ferramenta de corte apresenta algumas variações na sua geometria e dimensões, quando comparado às outras duas ferramentas, tal como um revestimento diferente. Estas diferenças geométricas permitiram estudar a influência da geometria da ferramenta de corte no desempenho e eficácia do processo de maquinagem. Como revestimento foi utilizado Varacon (TiAlN) e o revestimento Varacon Plus® (TiAlN dopado com Cr). Este tipo de revestimentos é caracterizado pela sua elevada resistência à oxidação e elevada dureza intrínseca, sendo bastante aplicado na maquinagem de aço ligado. Em todos os casos o revestimento foi depositado por PVD. A geometria e dimensões de cada ferramenta de corte, podem ser observados na Tabela 9.

Tabela 9 – Características geométricas das ferramentas de corte utilizadas [118].

Referência	233	591	592
Nº de lâminas	4	5	5
Diâmetro	6 mm	6 mm	6 mm
Comprimento de corte	13	18	18
Comprimento total	57	62	62
Haste	Tipo HA (<i>flat straight</i>)	Tipo HA (<i>flat straight</i>)	Tipo HA (<i>flat straight</i>)
Chanfro	Frontal	Frontal	Frontal
Divisão das lâminas	Desigual	Desigual	Desigual
Ângulo de ataque	35°/38°	40°	40°
Chip breaker	-	HF	NF
Revestimento	Varacon Plus	Varacon	Varacon
Espessura do revestimento	1.35 µm	2.80 µm	1.80 µm

É também referido pelo fornecedor que estas ferramentas são preferencialmente utilizadas em aços e ferros fundidos, sendo as ferramentas com referência 233 e 591 as mais apropriadas na maquinagem de aços com dureza semelhante ao material utilizado.

3.2. Métodos

Neste subcapítulo serão abordados todos os métodos utilizados para obter os resultados experimentais apresentados posteriormente, sendo focada a preparação das amostras para análise MEV, necessário para analisar a espessura e constituição do revestimento, a técnica de maquinagem utilizada, os parâmetros escolhidos e ainda o procedimento e equipamentos utilizados para obter os dados de desgaste, rugosidade superficial e vibração.

3.2.1. Metodologia de análise da espessura e composição do revestimento

Para ser possível avaliar a espessura dos revestimentos aplicados nas ferramentas de corte e a sua constituição, foi necessário preparar uma amostra de cada ferramenta de corte utilizada nos ensaios. Todos os procedimentos descritos neste capítulo foram executados no laboratório de metalografia do departamento de engenharia mecânica do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP). Para este efeito cada ferramenta foi cortada na sua zona revestida de modo a

criar uma secção transversal. O corte foi executado com a ajuda de uma serra de disco diamantada, denominada de Minitom (Struers, Inc., Cleveland, OH, USA). Na Figura 16 a) encontra-se presente o equipamento de corte utilizado.

De seguida as secções transversais cortadas foram montadas numa amostra de resina termoendurecível. Este passo é necessário para facilitar o procedimento de lixagem e polimento. Para esta montagem foi utilizada uma prensa com montagens a quente, denominada de Prodopress (Struers, Inc., Cleveland, OH, USA). Este equipamento pode ser observado na Figura 16 b).

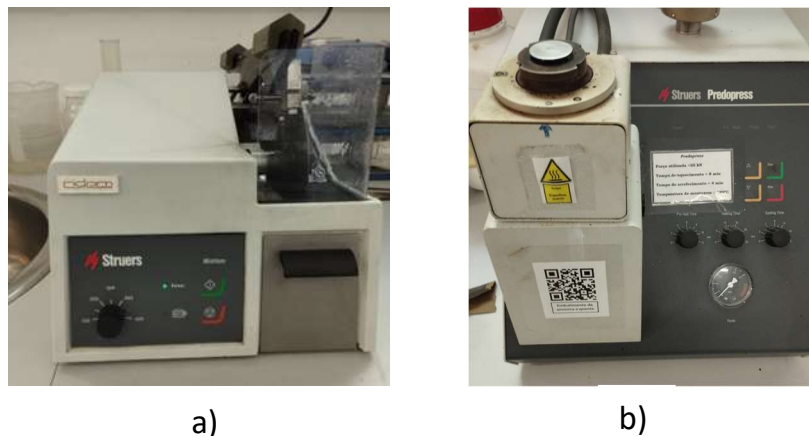


Figura 16 – a) Equipamento de corte, Struers Minitom e b) Equipamento de montagem em resina, Struers Prodopress.

Após este passo foi necessário proceder ao lixamento da amostra, de modo a retirar a camada de resina termoendurecível que se encontra no topo da amostra. Visto que o material da ferramenta de corte, neste caso carboneto de tungsténio, possui uma dureza bastante superior à resina termoendurecível utilizada, este processo gerou uma superfície com um desnível um pouco acentuado, algo que não é desejado, o que dificultou o polimento da amostra e, portanto, a análise da espessura do revestimento. Por este motivo, em certas partes das secções transversais das ferramentas, não foi possível remover este excesso, embora nas três secções foi possível remover o suficiente de modo que o contorno externo da secção transversal fosse visível. Para o lixamento foram utilizadas três lixas de granulometria diferente, sendo estas de 220, 500 e 1000 (grão/in²).

De seguida procedeu-se ao polimento da amostra. Este polimento é necessário pois permite remover as riscas criadas pelo passo anterior, sendo este passo essencial para melhor visualizar os contornos da secção transversal da ferramenta. Neste passo foram utilizados panos de polimento onde foram colocados abrasivos de diamante com diferentes granulometrias, neste caso de 3 e 1,5 μm . Para facilitar o polimento foi utilizado um equipamento próprio para a tarefa, denominado de Struers Rotopol (Struers, Inc., Cleveland, OH, USA). Este está presente na Figura 17.

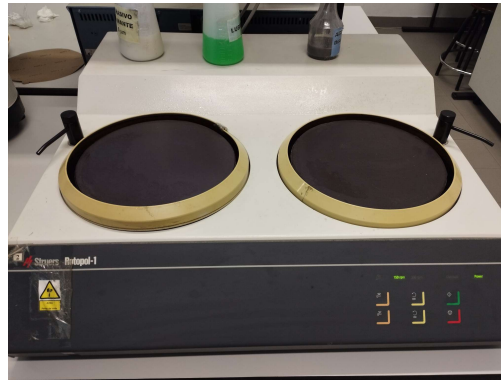


Figura 17 – Equipamento de polimento Stuers Rotopol.

Finalmente as amostras foram submetidas a uma análise por microscopia eletrônica de varrimento (MEV), sendo assim possível captar imagens amplificadas do revestimento e analisar a sua espessura. Para esta análise foi utilizado um microscópio eletrônico de varrimento FEI QUANTA 400 FEG (FEI, Hillsboro, OR, USA). Este microscópio também é equipado com um *EDAX Genesys Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*, o que possibilitou analisar a constituição química dos revestimentos presentes nas amostras. Para avaliar a espessura do revestimento de cada ferramenta, foram executadas cinco medições por amostra.

3.2.2. Definição das trajetórias adotadas para a maquinagem/fresagem

Para os ensaios de maquinagem foi utilizada um centro de maquinagem HAAS VF-2 (HAAS Automation, Onxard, CA, USA). Este equipamento possui uma velocidade de rotação máxima de 10000 RPM com uma potência máxima de 20 kW e tem a capacidade de maquinar em três eixos, estando este equipamento localizado no laboratório de tecnologia mecânica do departamento de engenharia mecânica do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP). Na Figura 18 encontra-se representado este equipamento.

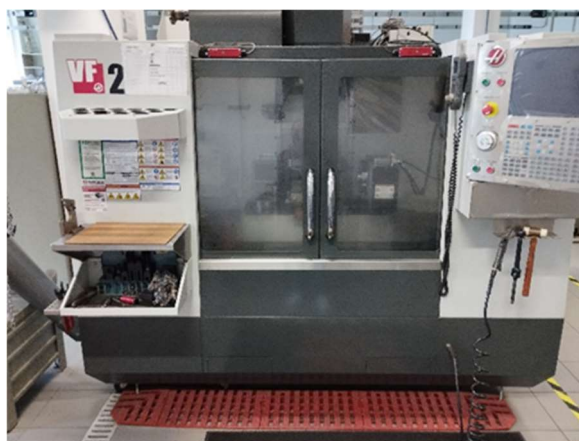


Figura 18 – Centro de maquinagem HAAS VF-2.

Em respeito à trajetória implementada nos testes de maquinagem, optou-se por duas distintas abordagens. A primeira abordagem consistiu em fresagem de topo seguindo um padrão intermitente de fresagem discordante e concordante. De modo a simplificar a compreensão da

trajetória é possível observar uma simplificação na Figura 19. Cada ferramenta de corte foi também submetida a fresagem em duas ocasiões distintas, sendo apenas fresado metade da largura do material em cada passo. Este aspeto possibilitou analisar a progressão do desgaste ao longo do tempo, sendo o desgaste registado antes do início da fresagem e depois de cada operação. Foi também implementada outra trajetória distinta de modo a estudar o efeito da constante entrada e saída da ferramenta de corte no material a maquirar, tal como a influência da fresagem concordante e discordante no desgaste, na rugosidade e vibrações observadas. Para este efeito, foi escolhida uma fresagem em espiral com movimento do centro do material para a sua periferia.

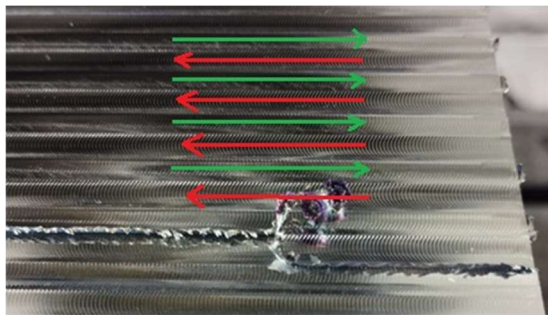


Figura 19 – Representação da trajetória da ferramenta de corte onde as setas verdes demonstram fresagem concordante e as setas vermelhas demonstram fresagem discordante.

3.2.3. Definição dos parâmetros utilizados na maquiragem/fresagem

Os parâmetros de maquiragem utilizados foram escolhidos tendo em conta os utilizados por outros autores na fresagem do mesmo material utilizado neste documento, particularmente por Sousa *et al.* [5]. Foram utilizadas três diferentes velocidades de corte, nomeadamente 40 m/min, 80 m/min e 120 m/min, três distintos avanços por dente, nomeadamente 0,05 mm/dente, 0,07 mm/dente e 0,1 mm/dente, enquanto a largura de corte foi mantida constante. Deste modo foi possível avaliar a influência da velocidade de corte e avanço por dente no desgaste da ferramenta, tal como na rugosidade e nas vibrações observadas. Em termos da profundidade de corte, inicialmente foi escolhido um valor de 0,05 mm, mas visto que nos testes efetuados inicialmente o desgaste na ferramenta de corte foi mínimo, optou-se por utilizar uma profundidade de corte de 0,5 mm. Na Tabela 10 estão presentes as diferentes combinações utilizadas para cada ferramenta de corte para a trajetória de fresagem intermitente. Em termos da trajetória em espiral, cada ferramenta de corte foi testada apenas uma vez, onde foram utilizados parâmetros de corte iguais aos apresentados na Tabela 10 com referência V3F3A1. Em termos da referência dos parâmetros presentes na Tabela 10, *V* refere-se à velocidade de corte, com *V1* igual a 40 m/min, *V2* igual a 80 m/min e *V3* igual a 120 m/min. *F* refere-se ao avanço por dente, com *F1* igual a 0,05 mm/dente, *F2* igual a 0,07 mm/dente e *F3* igual a 0,1 mm/dente. Por fim *A* refere-se à profundidade de corte, com *A1* igual a 0,5 mm e *A2* igual a 0,05 mm.

Tabela 10 – Parâmetros de corte para a trajetória de corte intermitente.

Referência	V_c [m/min]	f_z [mm/dente]	V_f [mm/min]	Comprimento de corte [mm]	a_e [mm]	a_p [mm]
233V1F1A1	40	0.05	420	7500	4	0.5
233V1F2A1	40	0.07	588	7500	4	0.5
233V1F3A1	40	0.1	840	7500	4	0.5
233V2F1A1	80	0.05	840	7500	4	0.5
233V2F2A1	80	0.07	1176	7500	4	0.5
233V3F1A1	120	0.05	1280	7500	4	0.5
233V3F1A2	120	0.05	1280	7500	4	0.05
233V3F2A1	120	0.07	1792	7500	4	0.5
233V3F3A1	120	0.1	2560	7500	4	0.5
591V1F1A1	40	0.05	525	7500	4	0.5
591V1F2A1	40	0.07	735	7500	4	0.5
591V1F3A1	40	0.1	1050	7500	4	0.5
591V2F1A1	80	0.05	1050	7500	4	0.5
591V2F2A1	80	0.07	1470	7500	4	0.5
591V2F3A1	80	0.1	2100	7500	4	0.5
591V3F1A1	120	0.05	1600	7500	4	0.5
591V3F2A1	120	0.07	2240	7500	4	0.5
591V3F3A1	120	0.1	3200	7500	4	0.5
592V1F1A1	40	0.05	525	7500	4	0.5
592V1F3A1	40	0.1	1050	7500	4	0.5
592V2F1A1	80	0.05	1050	7500	4	0.5
592V2F2A1	80	0.07	1470	7500	4	0.5
592V2F3A1	80	0.1	2100	7500	4	0.5
592V3F1A1	120	0.05	1600	7500	4	0.5
592V3F2A1	120	0.07	2240	7500	4	0.5
592V3F3A1	120	0.1	3200	7500	4	0.5

3.2.4. Metodologia de análise da rugosidade das superfícies maquinadas

Para obter os valores de rugosidade superficial pretendidos foi utilizado um rugosímetro Mahr Perthometer M1 profilometer (Mahr, Gottingen, Germany) seguindo a norma ISO 4288:1996. Para cada ensaio foram retirados os valores de rugosidade média (R_a), rugosidade máxima (R_{max}) e altura média dos picos (R_z). O parâmetro de R_a embora seja um dos parâmetros mais comum e simples de se utilizar, não fornece uma visão verdadeira da superfície maquinada, visto que não distingue os diferentes tipos de superfície (picos e vales). Neste caso, para uma melhor compreensão da morfologia da superfície foram adquiridos os valores de R_{max} e R_z . Esta análise mais detalhada irá fornecer informação valiosa, no que diz respeito à condição da superfície maquinada, tal como a sua correlação com a instabilidade da ferramenta e o desgaste acarretado. Estes valores foram medidos em 15 diferentes zonas do material maquinado, como se pode observar na Figura 20 a), de modo a ter uma melhor ideia do verdadeiro estado da superfície. Esta abordagem também ajudará a perceber qual a influência da trajetória escolhida na rugosidade obtida, em particular o impacto da constante entrada e saída da ferramenta de corte do material a maquinar. Na Figura 20 b), encontram-se os pontos onde foi medida a rugosidade no caso dos testes com a trajetória em espiral. Para comparação entre os diferentes ensaios foi usada a média de cada um destes valores. Como *cut-off* foi utilizado um valor de 0.8 mm. Também é importante referir que a rugosidade foi medida na direção de movimento da ferramenta de corte em todas as situações.

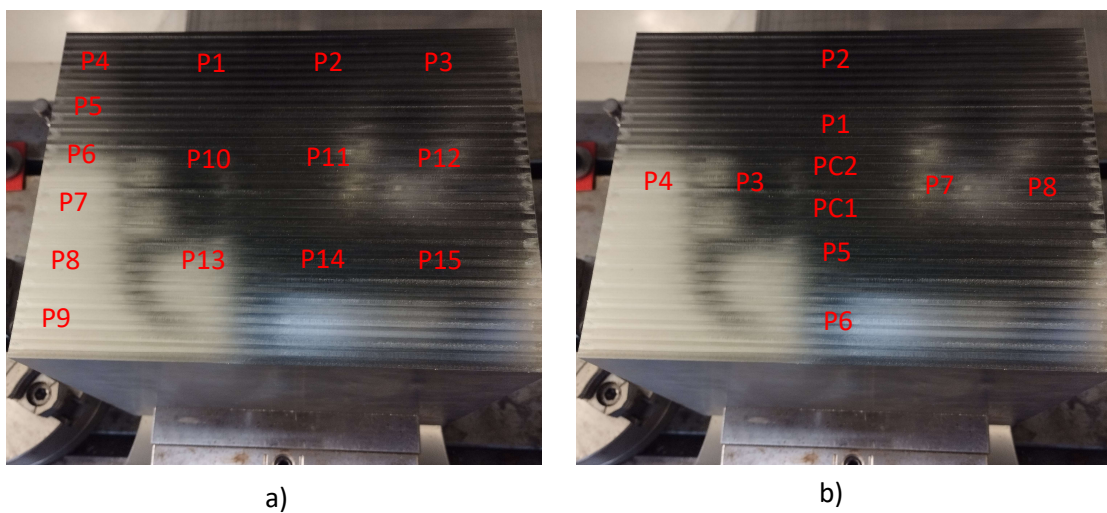


Figura 20 - a) Pontos de rugosidade medidos nos ensaios de trajetória intermitente e b) pontos de rugosidade medidos nos ensaios de trajetória em espiral.

3.2.5. Metodologia de análise da vibração durante a maquinagem

Para a aquisição dos dados acerca da instabilidade da ferramenta de corte foi utilizado um acelerómetro triaxial PCB-PIEZOTRONICS modelo 356A15 e uma placa de aquisição de dados modelo USB-4431 da empresa *National Instruments*. Esta configuração permitiu capturar as

vibrações geradas nos eixos X, Y e Z do centro de maquinagem. Neste caso, apenas foram captadas as vibrações no domínio do tempo, onde foram retirados os valores de raiz média quadrada (*RMS*) e os valores de pico a pico, ou seja, os valores máximos de amplitude a cada segundo do teste. Para calcular o valor de raiz média quadrada, foram utilizados cinco distintos valores a cada segundo. Estes valores foram obtidos para todos os ensaios de maquinagem realizados.

3.2.6. Metodologia de análise do desgaste

Todas as ferramentas de corte submetidas a ensaios de maquinagem foram posteriormente analisadas por microscopia eletrónica de varrimento, de modo a avaliar a sua condição e determinar os principais seus principais mecanismos de desgaste. O equipamento utilizado para este efeito encontrou-se localizado no departamento CEMUP da Universidade do Porto. Para auxiliar esta análise, foi também medido o desgaste de flanco de cada ferramenta, seguindo a norma ISO 8688-2:1986. Para cada ferramenta de corte foram retiradas imagens de cada lâmina de corte, utilizando um zoom de 500x e seguindo a composição da Figura 21. Quando pertinente, as lâminas de corte foram analisadas com um zoom superior, de modo a facilitar a compreensão do seu estado físico e dos mecanismos de desgaste presentes.

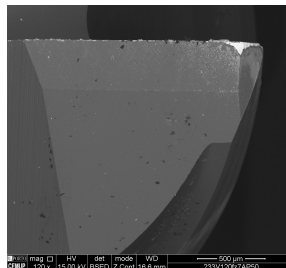


Figura 21 – Referência das imagens retiradas da análise MEV.

Para complementar esta análise e melhorar o entendimento da progressão do desgaste ao longo do teste de maquinagem, cada ferramenta foi submetida a uma análise microscópica após cada ensaio. Para esse efeito foi utilizado o microscópio digital Dino-Lite[®] Edge - modelo WF4915ZT, que se encontra na Figura 22.



Figura 22 - Microscópio digital Dino-Lite[®] Edge.

4. Resultados

Neste capítulo, todos os resultados obtidos seguindo os métodos descritos no capítulo anterior serão apresentados. Este capítulo encontra-se dividido em quatro subcapítulos, sendo estes, 4.1. Análise da espessura e composição química dos revestimentos das ferramentas, 4.2. Rugosidade superficial obtida, 4.3. Análise do desgaste das ferramentas e 4.4. Análise da vibração durante a maquinagem/fresagem. Em cada subcapítulo os resultados obtidos para cada ferramenta irão ser apresentados separadamente, com exceção do subcapítulo 4.1. Quando pertinente, serão feitos comentários acerca dos resultados obtidos.

4.1. Análise da espessura e composição química dos revestimentos das ferramentas

O revestimento de cada ferramenta de corte foi analisado perante o método descrito no subcapítulo 3.2.1. Perante este método foram obtidos os valores de espessura média do revestimento de cada ferramenta de corte, sendo esta medição ilustrada na Figura 23 a), como também a composição química das ferramentas e dos seus respetivos revestimentos nas zonas apresentadas na Figura 23 b).

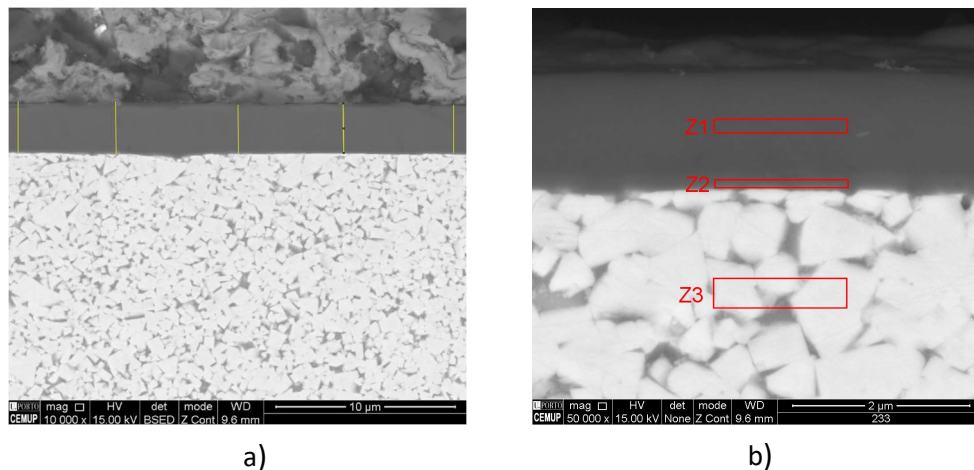


Figura 23 – Imagens SEM do revestimento da ferramenta de corte com referência 233: a) ilustração das medições efetuadas e b) zonas de EDS avaliadas.

Resultados e Discussão

Os espectros EDS obtidos na zona Z1 ilustrada pela Figura 23 b), estão presentes na Figura 24.

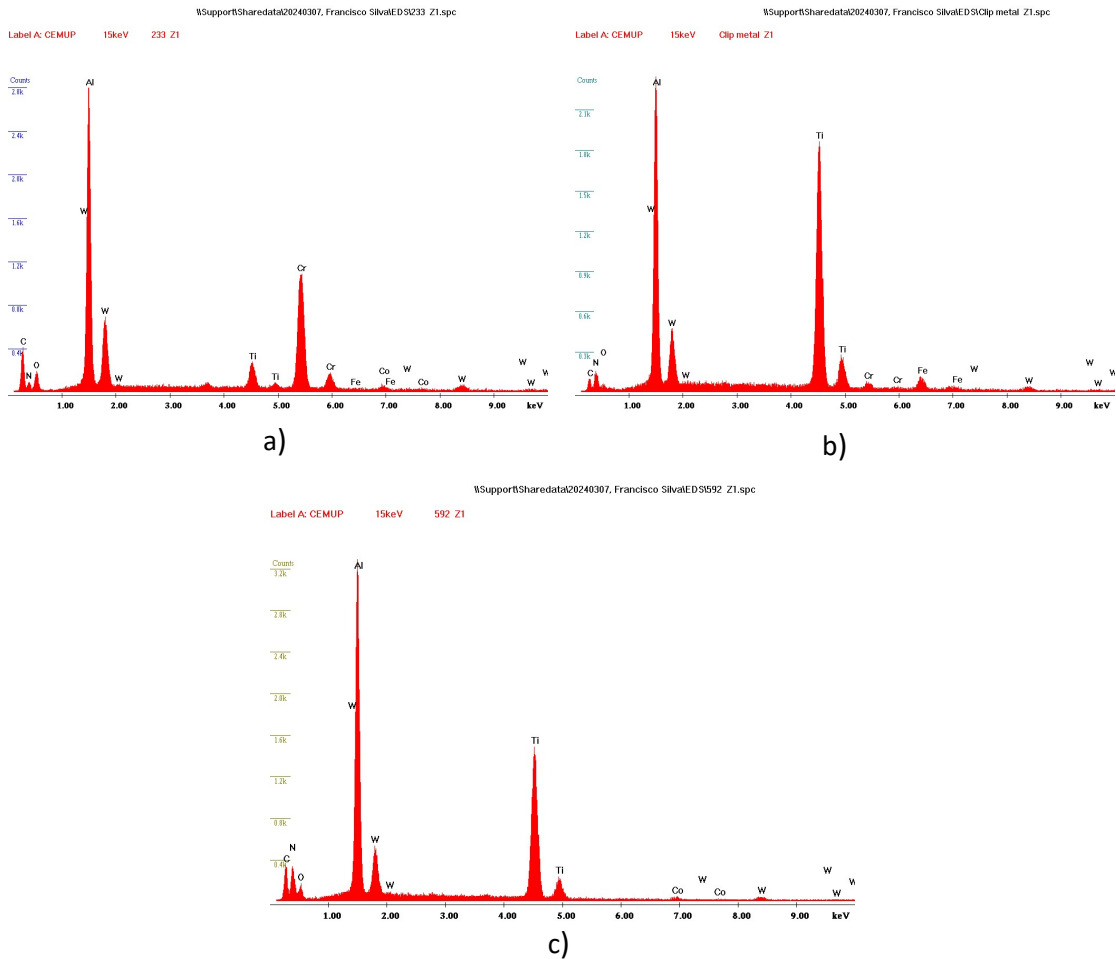


Figura 24 - Espectros EDS na zona Z1: a) ferramenta 233, b) ferramenta 591, c) ferramenta 592.

Os valores de espessura média de cada revestimento encontram-se na Tabela 11. Estes valores foram obtidos realizando a média das cinco medições executadas. Foi apenas analisado o revestimento de uma ferramenta de corte de cada referência, sendo estes testes realizados após os ensaios de maquinagem descritos nos subcapítulos 3.2.2 e 3.2.3.

Tabela 11 – Espessura média de cada revestimento.

Referência (Revestimento)	Espessura média [μm]
233 (TiAlN dopado com Cr)	1.35 ± 0.040
591 (TiAlN)	2.81 ± 0.076
592 (TiAlN)	1.80 ± 0.071

No subcapítulo 5.1. será realizada uma análise mais aprofundada dos resultados expostos neste subcapítulo, tal como uma comparação entre os três diferentes revestimentos utilizados.

4.2. Rugosidade superficial obtida

Neste subcapítulo irão ser apresentados os valores de rugosidade obtidos, nomeadamente os valores de rugosidade média, rugosidade máxima e altura média dos picos e vales, seguindo o método descrito no subcapítulo 3.2.4. Para facilitar a análise destes valores irão ser apresentadas as médias de todas as medições efetuadas. Os dados obtidos para cada ferramenta de corte irão ser apresentados separadamente, sendo os três valores apresentados e analisados em simultâneo. Quando for pertinente irão ser também analisados os quinze diferentes pontos medidos, de modo a estudar o impacto da trajetória escolhida na rugosidade superficial obtida.

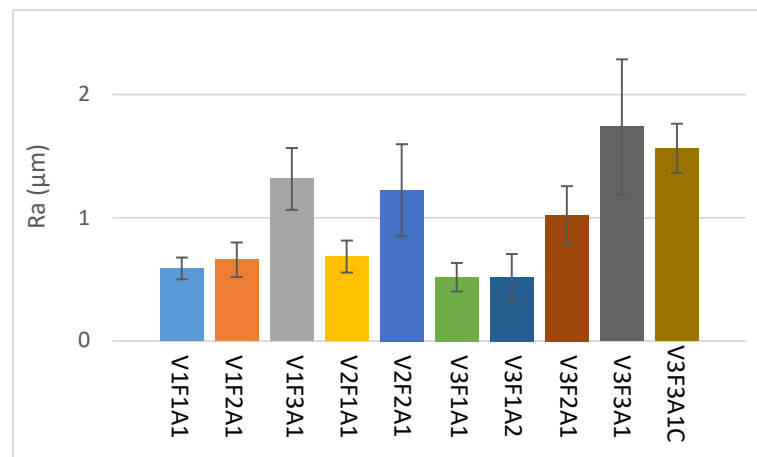
4.2.1. Ferramenta 233

Na Tabela 12 encontram-se os resultados dos testes efetuados para a ferramenta de referência 233. De modo a facilitar a sua análise e comparação entre dados, os resultados encontram-se também apresentados sobre a forma de gráficos de barras na Figura 25, na mesma ordem apresentada na Tabela 12.

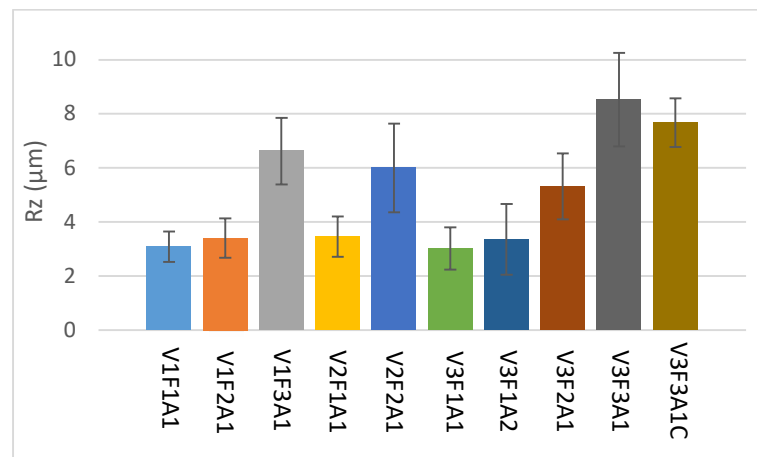
Tabela 12 – Valores médios de R_a , R_z e R_{max} para a ferramenta 233.

Referência	R_a [μm]	R_z [μm]	R_{max} [μm]
233V1F1A1	0.59 ± 0.09	3.08 ± 0.57	4.63 ± 1.70
233V1F2A1	0.66 ± 0.15	3.40 ± 0.73	5.51 ± 2.12
233V1F3A1	1.32 ± 0.25	6.62 ± 1.23	10.5 ± 3.50
233V2F1A1	0.69 ± 0.13	3.46 ± 0.74	5.10 ± 1.70
233V2F2A1	1.22 ± 0.37	6.00 ± 1.64	8.30 ± 1.87
233V3F1A1	0.52 ± 0.12	3.00 ± 0.78	5.39 ± 2.12
233V3F1A2	0.52 ± 0.19	3.36 ± 1.31	4.30 ± 1.45
233V3F2A1	1.02 ± 0.23	5.32 ± 1.23	8.87 ± 3.67
233V3F3A1	1.74 ± 0.55	8.53 ± 1.73	12.4 ± 3.44
233V3F3A1C	1.56 ± 0.21	7.67 ± 0.90	16.5 ± 3.54

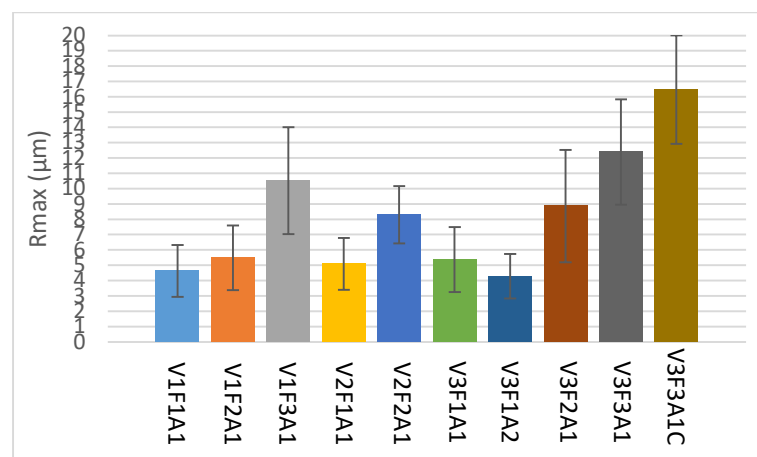
Resultados e Discussão



a)



b)



c)

Figura 25 – Valores médios de rugosidade para a ferramenta 233: a) R_a , b) R_z e c) R_{max} .

Analisando a Figura 25, é possível observar que os três parâmetros estudados se comportam de uma maneira semelhante, no que diz respeito à influência dos parâmetros de corte utilizados nos valores de rugosidade obtidos. O aumento do avanço por dente leva a um aumento da

rugosidade obtida em todas os testes executados. Esta variação é mais acentuada a maiores velocidades de corte, particularmente no caso do aumento de 0.05 mm/dente para 0.07 mm/dente, já que entre os testes V1F1A1 e V1F2A1 apenas houve um aumento de 11.70 % no valor de R_a obtido, enquanto entre os testes V2F1A1 e V2F2A1 o aumento foi de 78,45 % e entre os testes V3F1A1 e V3F2A1 observou-se um aumento de 102,5 %.

O aumento da velocidade de corte de 40 m/min para 80 m/min teve uma influência negativa na rugosidade obtida para ambos os valores de avanço por dente testados, mas o aumento da velocidade de corte de 80 m/min para 120 m/min teve uma influência positiva na rugosidade para todos os valores de avanço por dente utilizados. Já o aumento de 40 m/min para 120 m/min levou sempre a um aumento da rugosidade superficial.

O avanço por dente possui um maior impacto na qualidade da superfície maquinada, comparativamente à velocidade de corte, visto que os teste com avanço por dente de 0,1 mm/dente obtiveram os maiores valores de rugosidade e os testes com avanço por dente de 0.05 mm/dente obtiveram os menores valores. O teste V3F1A1, com o maior valor de velocidade de corte testado e o menor valor de avanço por dente, possui a superfície com as melhores condições, no entanto todos os testes com baixos valores de avanços por dente obtiveram valores semelhantes a este. O teste V3F3A1 possui a superfície com as piores condições, sendo este o teste com os valores máximos de velocidade de corte e avanço por dente. O aumento da profundidade de corte não mostrou um impacto significativo na rugosidade superficial obtida, havendo apenas um aumento médio de 11,3 % entre os três parâmetros. A utilização da trajetória em espiral demonstrou uma influência positiva nos parâmetros R_a e R_z e uma influência bastante negativa no parâmetro de R_{max} .

4.2.2. Ferramenta 591

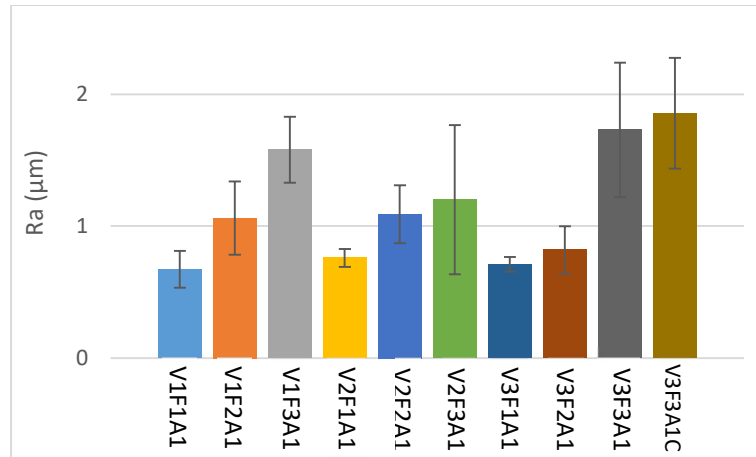
Na Tabela 13 encontram-se os resultados dos testes efetuados para a ferramenta de referência 591. Na Figura 26 estão representados os mesmos dados sobre a forma de gráficos de barras.

Tabela 13 - Valores médios de R_a , R_z e R_{max} para a ferramenta 591.

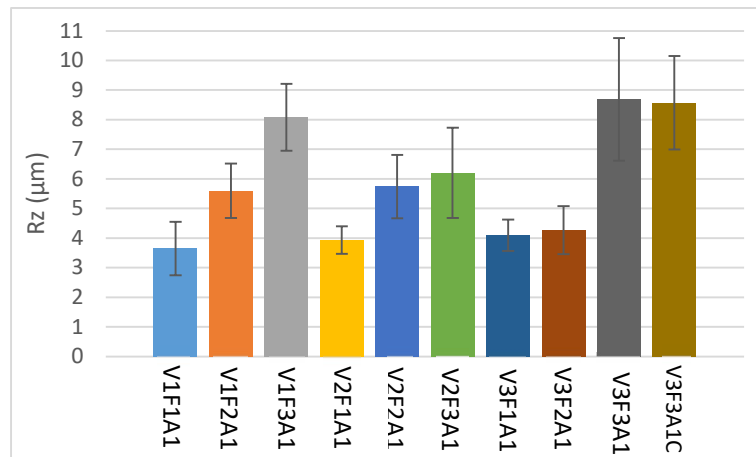
Referência	R_a [μm]	R_z [μm]	R_{max} [μm]
591V1F1A1	0.67 ± 0.14	3.65 ± 0.90	4.77 ± 1.64
591V1F2A1	1.07 ± 0.28	5.60 ± 0.92	7.85 ± 2.34
591V1F3A1	1.58 ± 0.25	8.08 ± 1.13	11.5 ± 2.31
591V2F1A1	0.76 ± 0.07	3.94 ± 0.46	5.35 ± 1.08
591V2F2A1	1.09 ± 0.22	5.75 ± 1.07	8.19 ± 2.10
591V2F3A1	1.21 ± 0.27	6.21 ± 1.53	8.26 ± 2.00
591V3F1A1	0.72 ± 0.06	4.11 ± 0.53	6.24 ± 1.76
591V3F2A1	0.82 ± 0.19	4.27 ± 0.81	6.29 ± 1.76

Resultados e Discussão

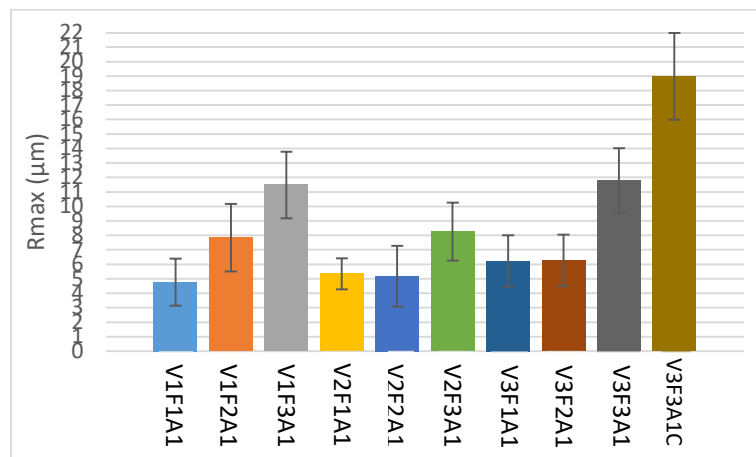
591V3F3A1	1.73 ± 0.51	8.69 ± 2.07	11.8 ± 2.25
591V3F3A1C	1.85 ± 0.42	8.58 ± 1.58	19.1 ± 5.88



a)



b)



c)

Figura 26 - Valores médios de rugosidade para a ferramenta 591: a) R_a , b) R_z e c) R_{max} .

Analisando a Figura 26, pode-se observar, que tal como na ferramenta 233, o aumento do avanço por dente tem uma influência negativa na superfície maquinada. Este especto é mais predominante nas velocidades de corte de 40 m/min e 120 m/min, onde a diferença entre a rugosidade obtida nos ensaios V3F1A1 e V3F3A1 é superior, comparativamente à diferença encontrada entre os ensaios V2F1A1 e V2F3A1 com velocidade de corte de 80 m/min.

No que diz respeito ao aumento da velocidade de corte, esta tem uma influência diferente para cada valor de avanço por dente utilizado. Para os dois menores valores de avanço por dente, e comparando os testes V1F1A1 e V2F1A1, como também os testes V1F2A1 e V2F2A1, o aumento da velocidade de corte de 40 m/min para 80 m/min leva a um aumento ligeiro da rugosidade obtida, enquanto o aumento da velocidade de corte de 80 m/min para 120 m/min reduz a rugosidade da superfície maquinada, sendo esta redução mais acentuada entre os testes V2F2A1 e V3F2A1, comparativamente à diferença observada nos testes V2F1A1 e V3F1A1. Já para o caso de um avanço por dente de 0.1 mm/dente, o aumento da velocidade de corte entre os testes V1F3A1 e V2F3A1 melhora a condição da superfície, e o aumento da velocidade de corte de 80 m/min para 120 m/min piora a sua qualidade, como se pode observar comparando os testes V2F3A1 e V3F3A1.

O teste que levou a uma pior qualidade superficial, foi o teste realizado com a trajetória em espiral, neste caso o ensaio V3F3A1C, visto que obteve um aumento de 61 % na sua R_{max} relativamente ao teste V3F3A1, embora tenha demonstrado valores semelhantes nos dois outros parâmetros estudados. Os testes com um avanço por dente de 0.05 mm/dente foram os que se comportaram melhor, levando a superfícies com melhor qualidade, enquanto os testes de 0.1 mm/dente obtiveram os maiores valores de rugosidade.

4.2.3. Ferramenta 592

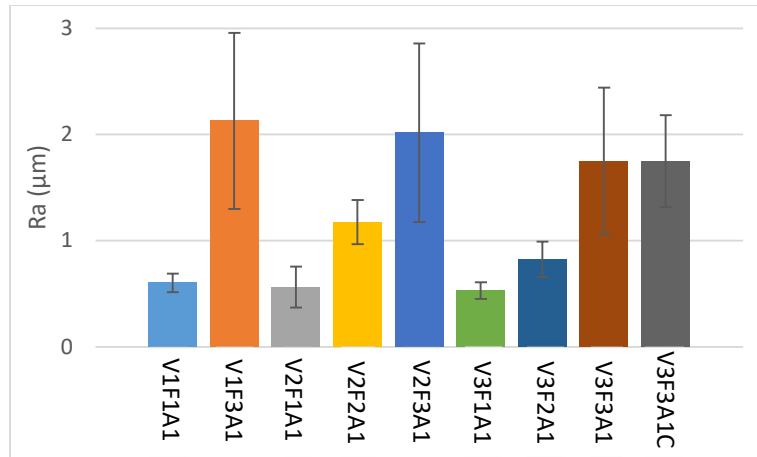
Na Tabela 14 encontram-se os resultados dos testes efetuados para a ferramenta de referência 592. Na Figura 27 estão representados os mesmos dados sobre a forma de gráficos de barras.

Tabela 14 - Valores médios de R_a , R_z e R_{max} para a ferramenta 592.

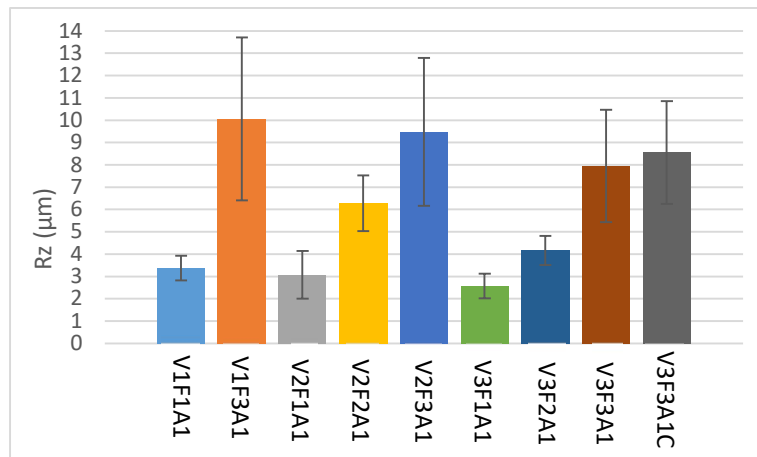
Referência	R_a [μm]	R_z [μm]	R_{max} [μm]
592V1F1A1	0.60 ± 0.09	3.38 ± 0.56	5.00 ± 1.52
592V1F3A1	2.13 ± 0.83	10.1 ± 3.65	12.7 ± 3.06
592V2F1A1	0.56 ± 0.19	3.08 ± 1.07	4.87 ± 2.08
592V2F2A1	1.17 ± 0.21	6.29 ± 1.24	8.82 ± 2.88
592V2F3A1	2.02 ± 0.84	9.48 ± 3.32	10.8 ± 2.62
592V3F1A1	0.54 ± 0.08	2.85 ± 0.55	4.21 ± 1.41
592V3F2A1	0.82 ± 0.17	4.17 ± 0.65	6.10 ± 1.66

Resultados e Discussão

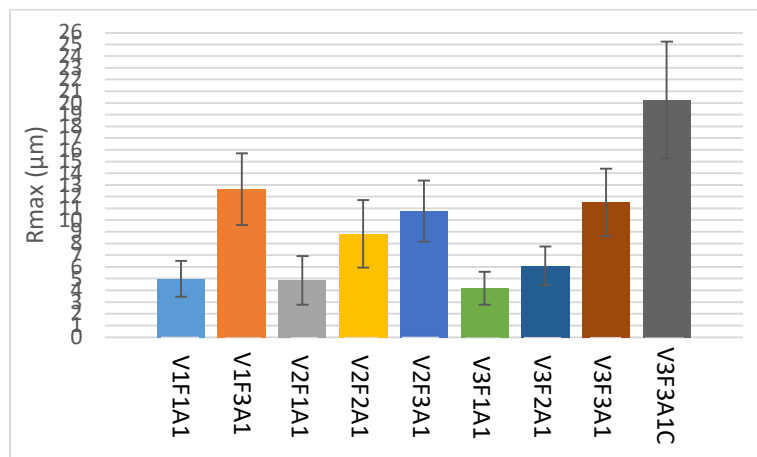
592V3F3A1	1.75 ± 0.70	7.96 ± 2.52	11.5 ± 2.88
592V3F3A1C	1.75 ± 0.43	8.56 ± 2.30	20.3 ± 6.96



a)



b)



c)

Figura 27 - Valores médios de rugosidade para a ferramenta 592: a) R_a , b) R_z e c) R_{max} .

Analisando a Figura 27, tal como nas outras duas ferramentas, o aumento do avanço por dente leva a valores superiores de rugosidade nos três parâmetros estudados.

No caso da ferramenta 592, o aumento da velocidade de corte leva a valores de rugosidade inferiores, sendo este o caso para todos os ensaios estudados. Esta influência é semelhante para todas os valores de avanço por dente, visto que no caso do parâmetro R_a , a diminuição de velocidade de corte nos ensaios com 0.05 mm/dente leva a uma variação média da rugosidade de apenas 6.12 %, enquanto a diminuição da velocidade de corte nos ensaios com 0.1 mm/dente leva a uma variação média da rugosidade de 10 %. Neste caso, a variação dos valores de avanço por dente apresenta uma maior influência na rugosidade obtida, comparativamente à velocidade de corte.

Novamente, o teste com a trajetória em espiral obteve valores de R_{max} bastante superiores a todos os outros testes.

4.3. Análise do desgaste das ferramentas

Neste subcapítulo serão apresentados os resultados correspondentes ao desgaste de flanco de cada ferramenta de corte e condições de ensaio, tal como é descrito no subcapítulo 3.2.6. Serão apresentados os valores médios para cada situação, sendo cada ferramenta de corte analisada separadamente.

4.3.1. Ferramenta 233

Os resultados de desgaste de flanco para a ferramenta 233 podem ser observados na Tabela 15. Na Figura 28, os mesmos dados encontram-se apresentados sobre a forma de um gráfico de barras, de modo a facilitar a sua análise e comparação.

Tabela 15 – Valores médios de desgaste de flanco para a ferramenta 233.

Referência	Desgaste de flanco [mm]
233V1F1A1	0.42 ± 0.04
233V1F2A1	0.62 ± 0.25
233V1F3A1	1.16 ± 0.78
233V2F1A1	0.44 ± 0.05
233V2F2A1	1.59 ± 0.8
233V3F1A1	0.57 ± 0.13
233V3F1A2	0.41 ± 0.03
233V3F2A1	0.95 ± 0.54

233V3F3A1	1.07 ± 0.4
233V3F3A1C	0.46 ± 0.21

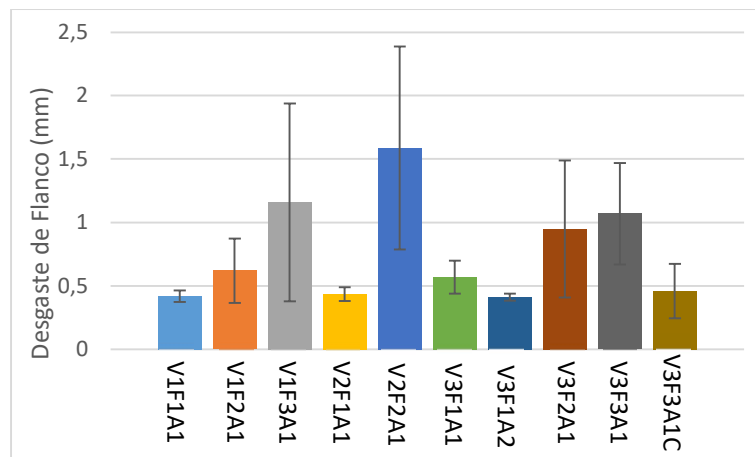


Figura 28 - Valores médios de desgaste de flanco de todos os ensaios da ferramenta 233.

Analisando a Figura 28, e tal como foi observado para a rugosidade superficial, o aumento do avanço por dente leva sempre ao aumento do desgaste de flanco gerado na ferramenta de corte. Este aumento é mais acentuado para valores intermédios de velocidade de corte, neste caso 80 m/min, sendo os ensaios com 120 m/min os menos afetados.

Para valores de avanço por dente inferiores, o desgaste de flanco aumenta com o aumento da velocidade de corte utilizada, sendo esta diferença bastante reduzida entre os testes V1F1A1 e V3F1A1, com apenas uma variação de 0.15 mm. Para um avanço por dente de 0.07, o aumento da velocidade de corte entre os testes V1F2A1 e V2F2A1, apresenta um impacto negativo bastante pronunciado no desgaste de flanco, enquanto o aumento da velocidade de corte entre os testes V2F2A1 e V3F2A1 levou a uma redução do desgaste de flanco. A condição com o pior comportamento em relação ao desgaste acumulado foi o teste V2F2A1, com os valores intermédios de avanço por dente e velocidade de corte, enquanto o teste que se comportou melhor utilizou os valores mais baixos de avanço por dente e velocidade de corte, neste caso o teste V1F1A1.

O teste V3F3A1C apresentou uma redução de desgaste de 0.61 mm, comparativamente com o teste V3F3A1 com uma trajetória intermitente, sendo esta diferença substancialmente superior à registada na rugosidade superficial.

4.3.2. Ferramenta 591

Os resultados de desgaste de flanco para a ferramenta 233 podem ser observados na Tabela 16. Na Figura 29, os mesmos dados encontram-se apresentados sobre a forma de um gráfico de barras.

Tabela 16 - Valores médios de desgaste de flanco para a ferramenta 591.

Referência	Desgaste de flanco [mm]
591V1F1A1	0.32 ± 0.25
591V1F2A1	0.14 ± 0.02
591V1F3A1	0.24 ± 0.06
591V2F1A1	0.18 ± 0.03
591V2F2A1	0.17 ± 0.03
591V2F3A1	0.21 ± 0.08
591V3F1A1	0.17 ± 0.03
591V3F2A1	0.28 ± 0.34
591V3F3A1	1.03 ± 0.45
591V3F3A1C	0.23 ± 0.14

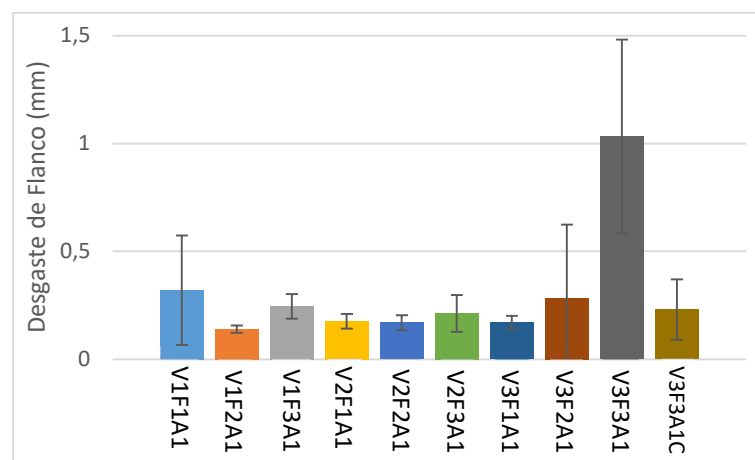


Figura 29 - Valores médios de desgaste de flanco de todos os ensaios da ferramenta 591.

Analisando a Figura 29, é possível observar que houve pouca variação de desgaste de flanco entre os testes realizados, sendo a única exceção o teste V3F3A1, com os valores máximos de velocidade de corte e avanço por dente, sendo este o teste com o pior desempenho em termos de desgaste gerado. Neste caso, todos os outros testes apresentaram valores bastante reduzidos de desgaste de flanco, sendo o teste V1F2A1, com a menor velocidade de corte e o valor intermedio de avanço por dente o que produziu melhores resultados.

Pode-se também observar que o aumento do valor de avanço por dente, em geral afeta negativamente o desgaste da ferramenta de corte, sendo o impacto observado bastante reduzido. O aumento da velocidade de corte, também apresenta uma influência bastante diminuta, tendo um impacto positivo a valores de avanço por dente inferiores, e um impacto

negativo a valores de avanço por dente superiores. Novamente, e como foi observado na ferramenta 233, o desgaste de flanco do teste V3F3A1C com trajetória em espiral é bastante reduzido, tendo uma diminuição de 0.8 mm, comparativamente ao teste com condições iguais, mas com uma trajetória intermitente.

4.3.3. Ferramenta 592

Os resultados de desgaste de flanco para a ferramenta 233 podem ser observados na Tabela 17. Na Figura 30, os dados encontram-se apresentados sobre forma de um gráfico de barras.

Tabela 17 - Valores médios de desgaste de flanco para a ferramenta 592.

Referência	Desgaste de flanco [mm]
592V1F1A1	0.22 ± 0.04
592V1F3A1	2.43 ± 1.07
592V2F1A1	0.22 ± 0.04
592V2F2A1	0.80 ± 0.34
592V2F3A1	1.45 ± 0.33
592V3F1A1	0.22 ± 0.05
592V3F2A1	0.37 ± 0.1
592V3F3A1	0.89 ± 0.33
592V3F3A1C	0.29 ± 0.27

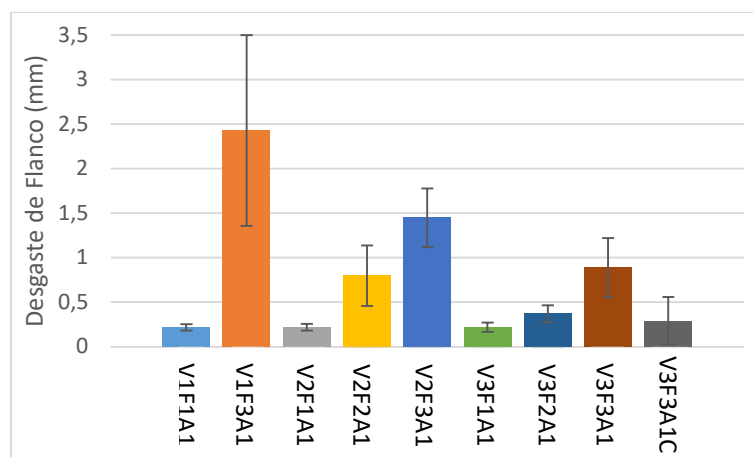


Figura 30 - Valores médios de desgaste de flanco de todos os ensaios da ferramenta 592.

Analisando a Figura 30, pode-se observar que o desgaste gerado nesta ferramenta de corte possui uma correlação bastante boa com a rugosidade da superfície maquinada, onde maiores

níveis de desgaste da ferramenta levaram a superfícies com qualidade inferior. A influência dos dois parâmetros de corte, também é semelhante nos dois casos, já que o aumento do valor de avanço por dente leva sempre a valores de desgaste de flanco mais elevados, tal como leva a valores de rugosidade superiores. Este aspeto também é verdadeiro para a velocidade de corte, com o aumento deste parâmetro a diminuir ligeiramente o desgaste a valores de avanço por dente de 0.05 mm/dente, como se pode observar comparando os testes V1F1A1, V2F1A1 e V3F1A1. Para valores de avanço por dente superiores, o aumento da velocidade de corte apresenta um impacto negativo na quantidade de desgaste observada. O teste V1F3A1 mostrou o maior desgaste, sendo este o teste que possui o maior valor de avanço por dente e menor valor de velocidade de corte. Os três testes com um avanço de 0.1 mm/dente foram os que demonstraram pior desempenho.

4.4. Análise da vibração durante a maquinagem/fresagem

Neste subcapítulo serão apresentados os valores médios de *RMS* obtidos para cada ferramenta de corte, seguindo o método apresentado no subcapítulo 3.2.5. Novamente os valores irão ser divididos tendo em conta cada ferramenta de corte, sendo os três eixos em todas as condições de ensaio analisados simultaneamente.

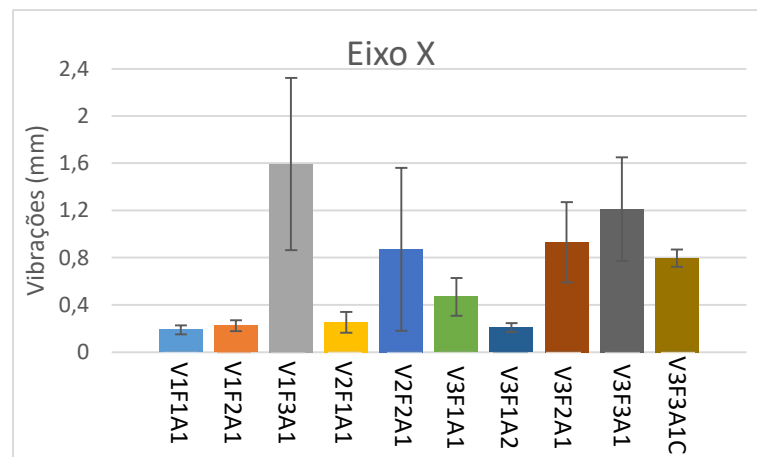
4.4.1. Ferramenta 233

Os resultados de *RMS* para todas as condições de maquinagem da ferramenta 233 podem ser observados na Tabela 18. Na Figura 31 encontram-se apresentados os mesmos dados sobre a forma de gráficos de barras.

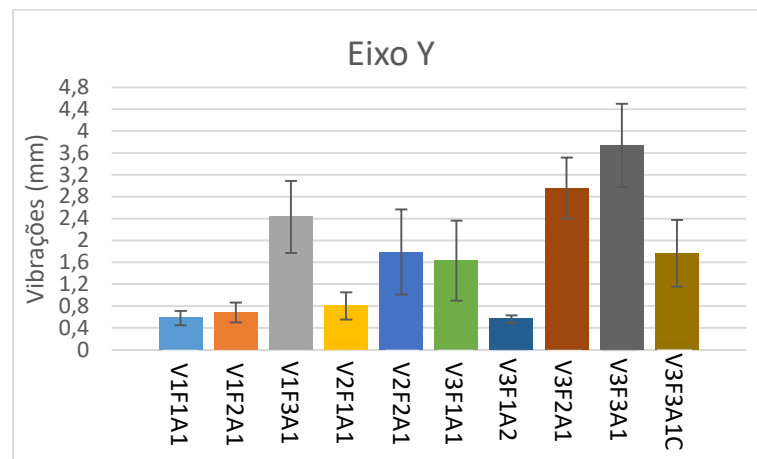
Tabela 18 – Valores médios de *RMS* em cada eixo, para a ferramenta 233.

Referência	Eixo X [mm/s]	Eixo Y [mm/s]	Eixo Z [mm/s]
233V1F1A1	0.19 ± 0.04	0.58 ± 0.13	0.20 ± 0.04
233V1F2A1	0.22 ± 0.05	0.68 ± 0.18	0.25 ± 0.06
233V1F3A1	1.6 ± 0.73	2.4 ± 0.66	0.64 ± 0.24
233V2F1A1	0.25 ± 0.09	0.81 ± 0.25	0.29 ± 0.11
233V2F2A1	0.87 ± 0.9	1.8 ± 0.78	0.58 ± 0.25
233V3F1A1	0.47 ± 0.16	1.6 ± 0.73	0.41 ± 0.15
233V3F1A2	0.21 ± 0.04	0.56 ± 0.07	0.15 ± 0.08
233V3F2A1	0.93 ± 0.34	3 ± 0.56	0.77 ± 0.20
233V3F3A1	1.2 ± 0.44	3.7 ± 0.76	0.94 ± 0.21
233V3F3A1C	0.80 ± 0.07	1.8 ± 0.61	0.49 ± 0.07

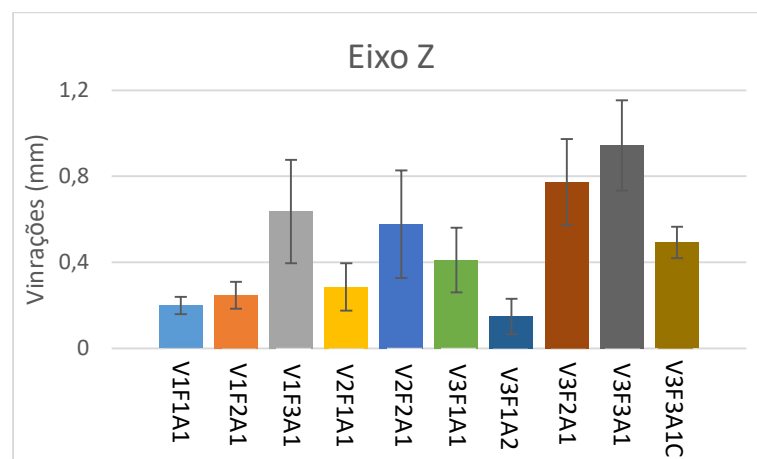
Resultados e Discussão



a)



b)



c)

Figura 31 – Valores de médios de *RMS* para a ferramenta 233: a) Eixo X, b) Eixo Y, c) Eixo Z.

Analisando a Figura 31, pode-se observar que todos os eixos se comportaram de uma maneira similar no que diz respeito à amplitude de vibração, já que os testes com os menores valores de avanço por dente e velocidade de corte foram os que geraram menor instabilidade ao

processo, enquanto os testes que utilizaram maiores valores de velocidade de corte e avanço por dente, geraram valores de vibração significativamente superiores. O aumento do avanço por dente e da velocidade de corte levou sempre a maiores valores de amplitude de vibração. O aumento do avanço por dente de 0.05 mm/dente para 0.1 mm/dente, particularmente entre os testes V1F1A1 e V1F3A1 e os testes V3F1A1 e V3F3A1, mostrou um maior impacto nos valores de vibração observados, comparativamente ao aumento da velocidade de corte de 40 m/min para 120 m/min, entre os testes V1F1A1 e V3F1A1, tal como entre os testes V1F3A1 e V3F3A1. Os testes com a combinação dos menores valores de velocidade de corte e os maiores valores de avanço por dente, também obtiveram valores de vibração significativamente superiores, quando comparados à combinação dos maiores valores de velocidade de corte e menores valores de avanço por dente, algo que demonstra novamente a diferença entre o impacto destes dois parâmetros, na instabilidade do processo de fresagem. A diminuição da profundidade de corte também teve um impacto substancial na amplitude de vibração observada, com uma redução média de 61% nos três eixos, como é possível observar comparando os testes V3F1A2 e V3F1A1.

O eixo Y (perpendicular ao movimento da ferramenta) obteve valores superiores de vibração em todos os testes realizados, enquanto o eixo X (paralelo à ferramenta de corte) e o eixo Z (paralelo ao movimento da ferramenta) obtiveram valores similares nos testes menos severos, com o eixo X demonstrando maior instabilidade nos testes com parâmetros de velocidade de corte e avanço por dente superiores.

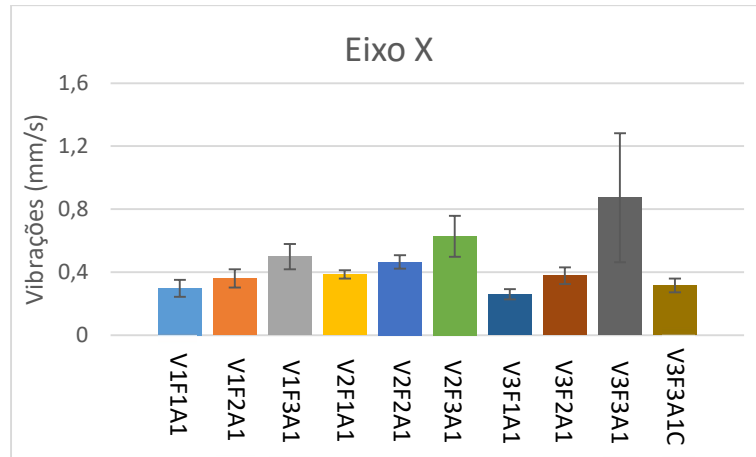
4.4.2. Ferramenta 591

Os resultados de *RMS* para todas as condições de maquinagem da ferramenta 233, podem ser observadas na Tabela 19. Na Figura 32 encontram-se apresentados os mesmos dados sobre a forma de gráficos de barras.

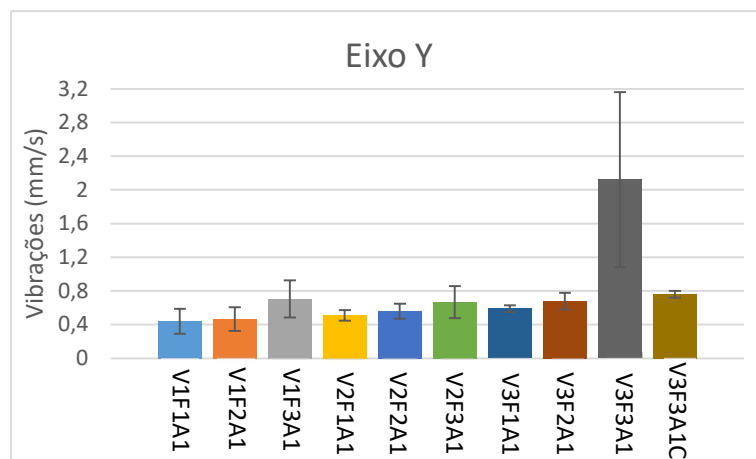
Tabela 19 - Valores médios de *RMS* em cada eixo, para a ferramenta 591.

Referência	Eixo X [mm/s]	Eixo Y [mm/s]	Eixo Z [mm/s]
591V1F1A1	0.30 ± 0.05	0.44 ± 0.15	0.33 ± 0.07
591V1F2A1	0.36 ± 0.06	0.47 ± 0.14	0.40 ± 0.07
591V1F3A1	0.50 ± 0.08	0.71 ± 0.22	0.50 ± 0.08
591V2F1A1	0.39 ± 0.03	0.51 ± 0.06	0.46 ± 0.04
591V2F2A1	0.47 ± 0.04	0.56 ± 0.09	0.54 ± 0.04
591V2F3A1	0.63 ± 0.13	0.67 ± 0.19	0.71 ± 0.13
591V3F1A1	0.26 ± 0.03	0.59 ± 0.04	0.29 ± 0.05
591V3F2A1	0.38 ± 0.05	0.68 ± 0.10	0.45 ± 0.09
591V3F3A1	0.87 ± 0.41	2.12 ± 1.03	0.84 ± 0.28

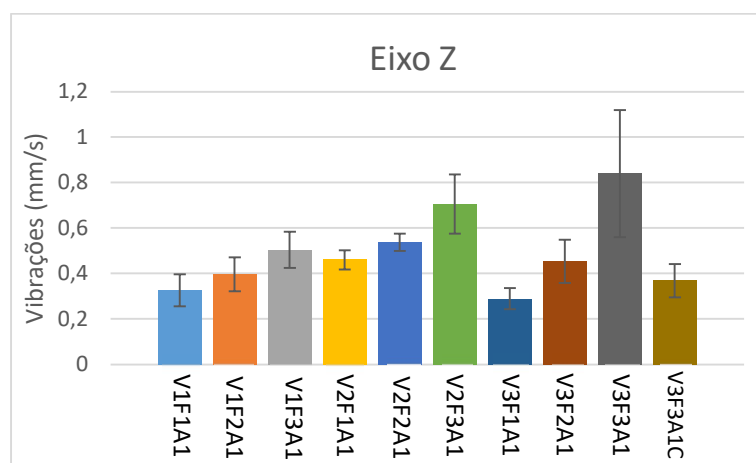
591V3F3A1C	0.32 ± 0.04	0.76 ± 0.04	0.37 ± 0.07
-------------------	-----------------	-----------------	-----------------



a)



b)



c)

Figura 32 - Valores de médios de *RMS* para a ferramenta 233: a) Eixo X, b) Eixo Y, c) Eixo Z.

Analisando a Figura 32, os eixos X e Z apresentam comportamentos e valores bastante semelhantes para cada ensaio realizado. Em ambos os casos o aumento do valor de avanço por dente leva a um aumento da amplitude de vibração gerada, sendo este aumento mais acentuado para maiores valores da velocidade de corte. Quanto à influência da velocidade de corte na instabilidade do processo, o aumento da velocidade de corte de 40 m/min para 80 m/min, resulta num aumento da vibração da ferramenta para todos os valores de avanço por dente, enquanto o aumento da velocidade de corte entre os testes V2F1A1 e V3F1A1 apresenta um impacto positivo na estabilidade do processo para baixos valores de avanço por dente e o aumento da velocidade de corte demonstrou um impacto negativo para altos valores de avanço por dente, como é o caso para os testes V2F3A1 e V3F3A1.

O eixo Y apresenta um comportamento bastante semelhante ao desgaste observado nesta ferramenta de corte, em relação à influência dos parâmetros de corte, onde todos os ensaios apresentam valores de vibração baixos e similares entre si, com a exceção do teste com os maiores valores de avanço por dente e velocidade de corte. O aumento do avanço por dente e velocidade de corte aumentam sempre a amplitude de vibrações observadas, sendo esta variação bastante reduzida. A implementação da trajetória em espiral, como foi observado na ferramenta anterior, reduz a amplitude de vibração em todos os eixos.

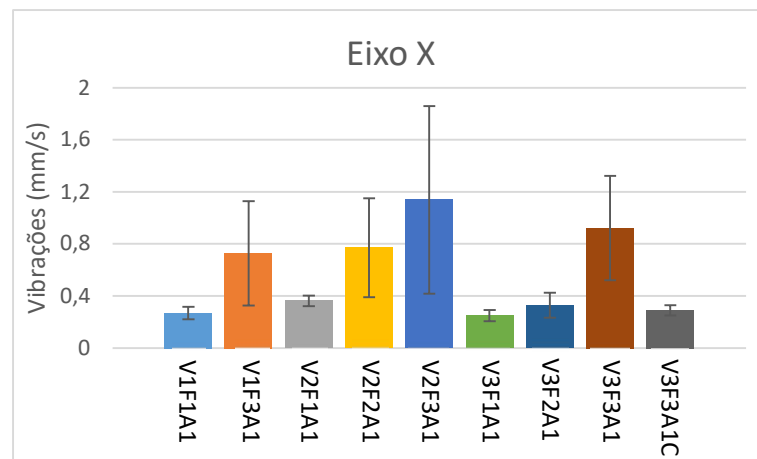
4.4.3. Ferramenta 592

Os resultados de *RMS* para todas as condições de maquinagem da ferramenta 233, podem ser observadas na Tabela 20. Na Figura 33 encontram-se apresentados os mesmos dados sobre a forma de gráficos de barras.

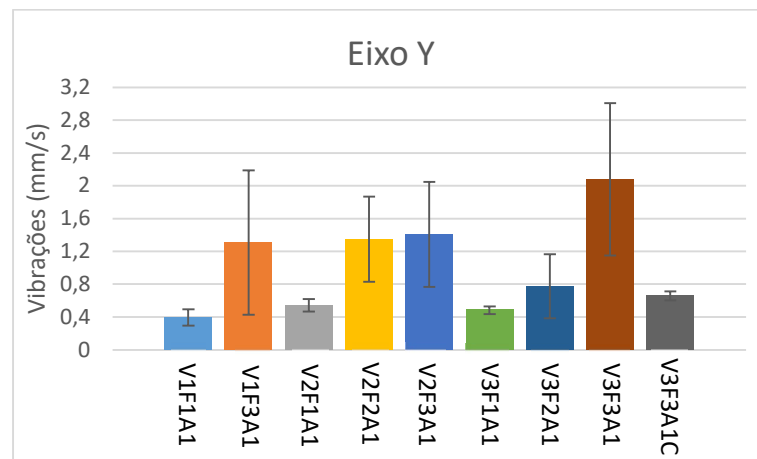
Tabela 20 - Valores médios de *RMS* em cada eixo, para a ferramenta 592.

Referência	Eixo X [mm/s]	Eixo Y [mm/s]	Eixo Z [mm/s]
592V1F1A1	0.27 ± 0.05	0.40 ± 0.10	0.31 ± 0.06
592V1F3A1	0.73 ± 0.40	1.31 ± 0.88	0.51 ± 0.20
592V2F1A1	0.36 ± 0.04	0.54 ± 0.08	0.45 ± 0.06
592V2F2A1	0.77 ± 0.38	1.35 ± 0.52	0.62 ± 0.19
592V2F3A1	1.14 ± 0.72	1.41 ± 0.64	0.77 ± 0.33
592V3F1A1	0.25 ± 0.04	0.48 ± 0.05	0.28 ± 0.05
592V3F2A1	0.33 ± 0.1	0.78 ± 0.39	0.35 ± 0.09
592V3F3A1	0.92 ± 0.40	2.08 ± 0.93	0.97 ± 0.34
592V3F3A1C	0.29 ± 0.04	0.66 ± 0.06	0.37 ± 0.07

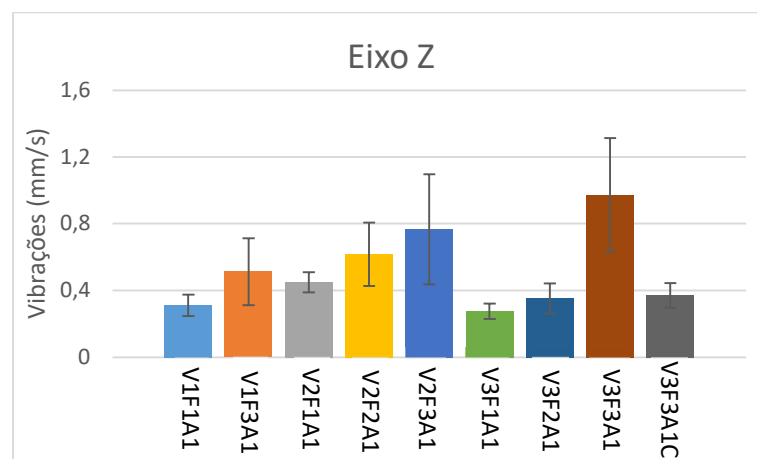
Resultados e Discussão



a)



b)



c)

Figura 33 - Valores de médios de *RMS* para a ferramenta 233: a) Eixo X, b) Eixo Y, c) Eixo Z.

Analisando a Figura 33, pode-se observar que, como nos dois casos acima expostos, o aumento do avanço por dente aumenta a instabilidade do processo de fresagem, sendo este o caso para os três eixos estudados.

A variação da velocidade de corte influencia as vibrações da ferramenta de forma semelhante nos três eixos, onde o aumento da velocidade de corte de 40 m/min para 80 m/min aumenta a instabilidade do processo a valores baixos e altos de avanço por dente, como é possível observar pela comparação entre os testes V1F1A1 e V2F1A1, e também entre os testes V1F3A1 e V2F3A1. Já o aumento da velocidade de corte de 80 m/min para 120 m/min aumenta a estabilidade do processo entre os testes V2F1A1 e V3F1A1, com valores baixos de avanço por dente, e piora a estabilidade da fresagem para valores de avanço por dente superiores, tal como se pode observar entre os testes V2F3A1 e V3F3A1. Novamente, os testes com avanço por dente de 0.1 mm/dente foram os que demonstraram valores de amplitude mais elevados, sendo o teste V3F3A1 com avanço por dente de 0.1 mm/dente e velocidade de corte de 120 m/min o que apresentou piores resultados.

O aumento do avanço por dente também demonstrou ter uma maior influência nos valores de vibração obtidos, em comparação com a variação da velocidade de corte. Este aspeto foi também observado nas outras ferramentas de corte.

Os valores de amplitude registados no eixo Y foram superiores aos registados nos outros dois eixos, para todos os ensaios realizados. Os eixos X e Z apresentaram valores de vibração bastante semelhantes.

Resultados e Discussão

5. Discussão dos resultados

Neste capítulo serão discutidos os resultados obtidos através dos métodos expostos no capítulo 3. Este capítulo encontra-se subdividido em cinco subcapítulos, sendo estes: 5.1. Análise comparativa dos revestimentos; 5.2. Análise comparativa da rugosidade produzida com cada revestimento e conjunto de parâmetros de corte; 5.3. Análise dos mecanismos de desgaste das ferramentas para cada condição de corte; 5.4. Análise da evolução da vibração para cada ferramenta e condição de corte e 5.5. Análise global e recomendação da melhor ferramenta e conjunto de parâmetros.

5.1. Análise comparativa dos revestimentos

Os resultados discutidos neste subcapítulo podem ser observados no subcapítulo 4.1. Neste caso, foram discutidos os valores de rugosidade média do revestimento de cada ferramenta de corte, estando os valores expostos na Tabela 11, como também as diferenças na composição química de cada revestimento, estando estes valores apresentados na Figura 24.

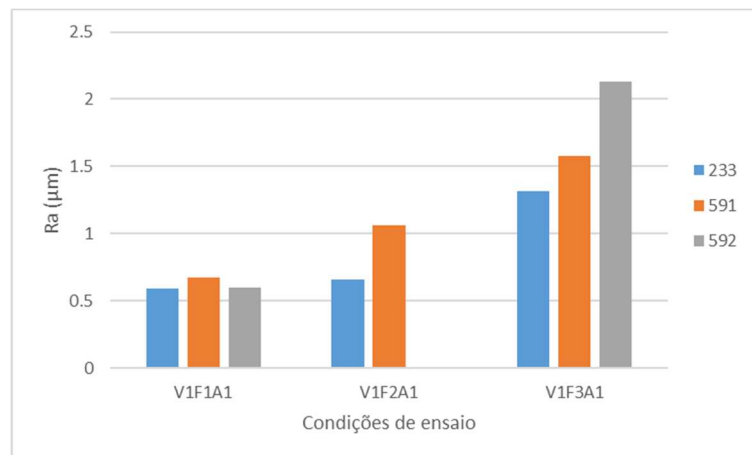
No que diz respeito à espessura dos revestimentos utilizados, pode-se observar que os três revestimentos possuem diferentes espessuras, sendo a ferramenta 591 a que apresenta o revestimento mais espesso e a ferramenta 233 a que apresenta o revestimento mais fino. Esta diferença na sua espessura pode alterar o seu comportamento no que diz respeito ao desgaste gerado no processo de fresagem, visto que geralmente para ferramentas compostas por carboneto de tungsténio o aumento da espessura do revestimento utilizado tende a melhorar a sua performance, no entanto tende a aumentar a ocorrência de adesão [119]. Este aspeto pode ser atribuído ao maior raio da aresta de corte que o revestimento mais espesso proporciona, aumentando a área de contacto entre a peça a maquinar e a ferramenta de corte, diminuindo assim a concentração de tensões impostas na ferramenta de corte, e por sua vez o desgaste incorrido [120]. Este aspeto é especialmente pertinente na fresagem deste tipo de aço, sendo que as características típicas deste material impõem ao processo áreas de contacto pequenas entre a peça a maquinar e a ferramenta de corte [121]. Esta influência da espessura do revestimento no desgaste da ferramenta, também foi possível observar nos testes realizados, onde a ferramenta com o revestimento mais espesso, neste caso a ferramenta 591, obteve os valores de desgaste de flanco mais reduzidos, enquanto a ferramenta 233, obteve em geral, os valores de desgaste mais elevados.

Em termos da composição química dos revestimentos, as ferramentas 591 e 592 apresentam revestimentos com uma composição química semelhante, com quantidades altas de alumínio e titânio, enquanto a ferramenta 233 apresentou altas quantidades de alumínio e cromo, com uma pequena quantidade de titânio. Visto que o coeficiente de atrito dos revestimentos compostos por TiAlN limita a sua aplicação em certas áreas de engenharia, a adição de Cr em certos casos é desejada, dado que tem a possibilidade de melhorar certas características destes revestimentos, tal como a sua dureza, resistência ao desgaste e corrosão [122]. Varghese *et al.* [83] reportou um melhor desempenho das ferramentas revestidas com AlCrN,

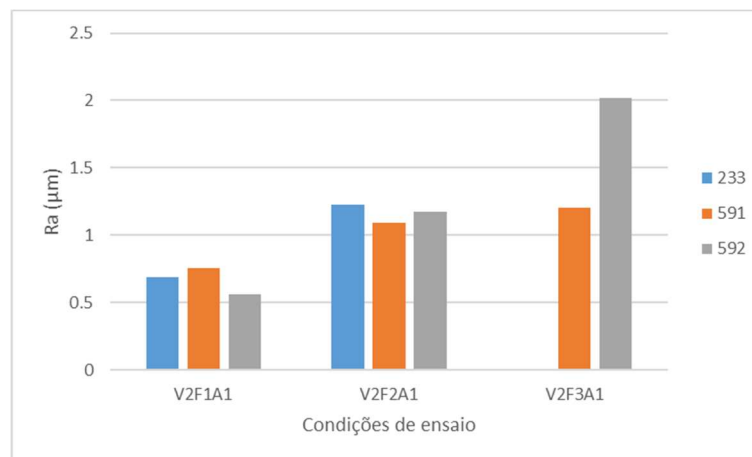
comparativamente a TiAlN, onde foi observado menor desgaste na ferramenta com AlCrN, devido à formação de filmes de alumínio e cromo causados por oxidação, algo que conferiu à ferramenta melhor resistência ao desgaste. No caso estudado neste documento, a ferramenta de corte que possui o revestimento dopado com Cr, neste caso a ferramenta 233, foi a que mostrou o maior desgaste de flanco. No entanto, visto que a ferramenta 233 e as outras duas ferramentas estudadas possuem uma geometria ligeiramente diferente, este facto pode não estar totalmente associado ao revestimento utilizado.

5.2. Análise comparativa da rugosidade produzida com cada revestimento e conjunto de parâmetros de corte

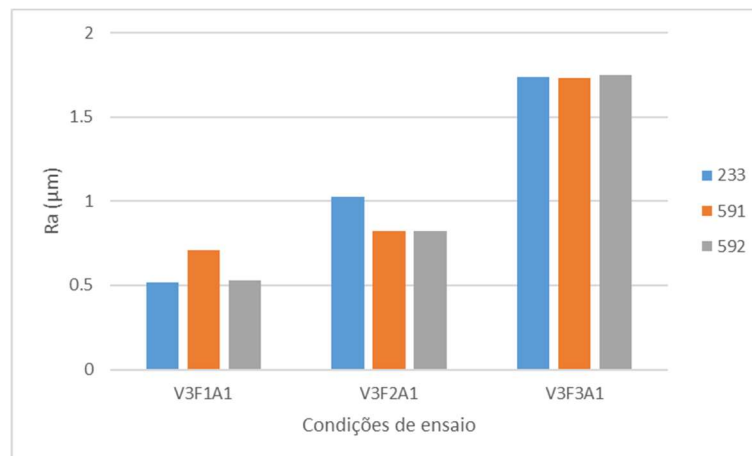
Nesta subsecção, será apresentada a comparação dos resultados de rugosidade superficial obtida para as três ferramentas de corte estudadas e todas as condições de testes utilizados, tal como serão discutidos os resultados obtidos. Apenas serão apresentados os valores de R_a , visto que o comportamento dos outros dois parâmetros são bastante semelhantes a este, sendo as conclusões retiradas desta análise idênticas às obtidos estudando os valores de R_z e R_{max} . Na Figura 34 estão apresentados os valores de rugosidade superficial obtida para cada ferramenta de corte, onde os dados estão divididos por velocidade de corte, com a Figura 34 a) apresentando os valores de rugosidade para os ensaios com velocidade de corte de 40 m/min, a Figura 34 b) apresentando os valores com 80 m/min e a Figura 34 c) apresentando os valores com 120 m/min.



a)



b)



c)

Figura 34 – Valores médios de R_a , para as ferramentas de corte 233, 591 e 592: a) velocidade de corte 40 m/min; b) 80 m/min e c) 120 m/min.

Analisando a Figura 34, é possível observar que o aumento do avanço por dente apresenta sempre um impacto negativo nos valores de R_a obtidos, sendo este aspecto verdadeiro para todas as ferramentas de corte utilizadas. Em geral, o aumento do avanço por dente apresenta um impacto negativo na qualidade da superfície maquinada [123, 124]. Este é o caso, visto que o aumento do avanço por dente, pode levar a um aumento na fricção entre a ferramenta de corte e a peça maquinada, gerando assim uma maior temperatura de corte e desgaste, tal como um aumento do fenómeno de *chatter*, algo que afeta negativamente a rugosidade superficial da peça maquinada [123, 125]. A variação do avanço por dente teve um impacto bastante semelhante entre as três ferramentas de corte a valores de velocidade de corte superiores. O aumento do valor de avanço por dente tende a aumentar a área de apra cortada, algo que gera um maior esforço para a ferramenta e para a máquina [126]. Já a menores velocidades de corte, a ferramenta 592 foi a mais afetada pelo aumento do avanço por dente, com um aumento de rugosidade de 1.52 µm entre valores de avanço por dente de 0.05 mm/dente e 0.1 mm/dente, enquanto as outras duas ferramentas apenas apresentaram variações de 0.72 e 0.9 µm. Para valores de avanço por dente inferiores, a ferramenta de corte 591 apresentou os

Resultados e Discussão

valores de rugosidade mais elevados para todas as velocidades de corte, enquanto a valores de avanço por dente superiores, a ferramenta 592 mostrou o pior desempenho.

No que diz respeito à variação da velocidade de corte, as três ferramentas obtiveram diferenças pequenas a valores de avanço por dente baixos, com a maior variação observada de apenas $0.17 \mu\text{m}$ na ferramenta 233. Para valores inferiores de avanço por dente, não houve um aumento constante da rugosidade com o aumento da velocidade de corte. A rugosidade em geral aumentou com o aumento da velocidade de corte de 40 m/min para 80 m/min , e diminuiu com o aumento de 80 m/min para 120 m/min , sendo esta variação bastante reduzida.

Já para valores de avanço por dente superiores, a variação da velocidade de corte apresenta um impacto mais pronunciado para as três ferramentas de corte. A ferramenta 233 apresentou a maior variação de rugosidade para valores de avanço por dente de 0.07 mm/dente , particularmente no aumento da velocidade de corte de 40 m/min para 80 m/min , enquanto relativamente ao avanço por dente de 0.1 mm/dente , todas as ferramentas obtiveram variações substanciais.

Tal como para valores de avanço por dente inferiores, o aumento da velocidade de corte em condições de avanço por dente superiores não influencia a rugosidade superficial sempre da mesma forma, aumentando em certos casos e diminuindo em outros. Pela literatura, em geral o aumento da velocidade de corte apresenta uma influência positiva na qualidade da superfície maquinada [127, 128]. Este facto pode estar relacionado com o efeito de amaciamento induzido pela temperatura que o acréscimo do calor proporciona ao material maquinado, diminuindo assim as forças de corte necessárias para o processo. A maior adesão do material à ponta da aresta de corte que o aumento da velocidade de corte fornece, também pode suavizar a aresta de corte, algo que ajuda na obtenção de superfícies maquinadas de melhor qualidade [125]. Neste caso em concreto, o aumento do desgaste gerado na ferramenta de corte, pode ter contribuído para a deterioração das superfícies maquinadas com o aumento da velocidade de corte para certas condições de maquinagem.

É também possível observar que o avanço por dente apresenta um impacto mais elevado na rugosidade superficial obtida, comparativamente à velocidade de corte, visto que os testes com avanço por dente de 0.1 mm/dente obtiveram sempre os valores de rugosidade mais elevados, independentemente da velocidade de corte utilizada, enquanto os testes com velocidade de corte de 120 m/min , apenas apresentaram valores elevados quando combinados com valores elevados de avanço por dente. De acordo com a literatura, o parâmetro de avanço por dente apresenta um impacto bastante elevado na qualidade da superfície maquinada, quando comparado com a velocidade de corte e profundidade de corte [129, 130, 131].

Em geral, as três ferramentas obtiveram valores de rugosidade semelhantes, com um melhor desempenho para certos parâmetros e pior para outros. Dito isto, a ferramenta 233 apresentou os menores valores de rugosidade em geral, particularmente para velocidades de corte inferiores, onde obteve a melhor qualidade superficial nos três valores de avanço por dente testados. No que diz respeito às ferramentas 591 e 592, elas obtiveram valores bastante semelhantes, particularmente a valores de velocidade de corte superiores, embora a ferramenta 591 demonstrou um pior desempenho a valores de avanço por dente inferiores

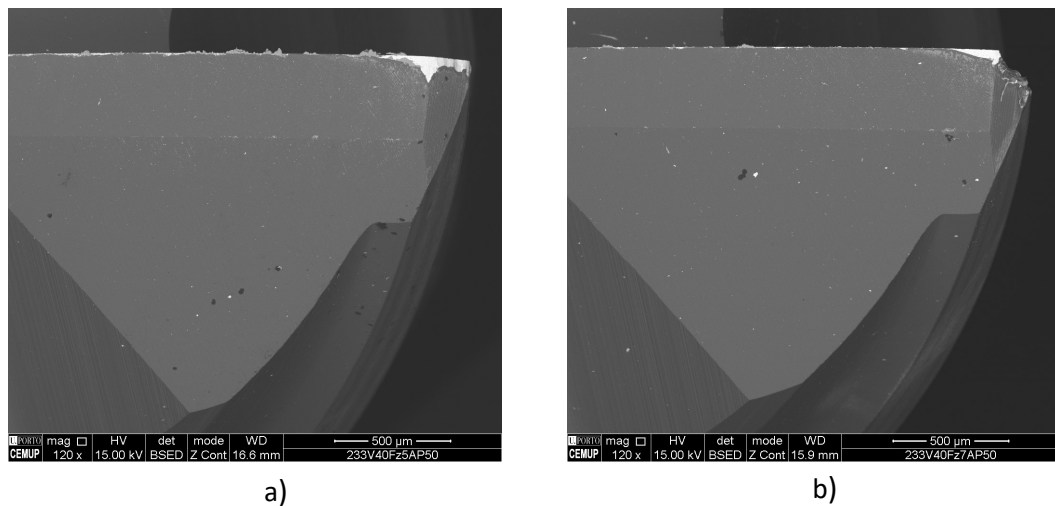
para todas as velocidades de corte, e a ferramenta 592 obteve um pior desempenho a valores de avanço por dente superiores para todas as velocidades de corte testadas.

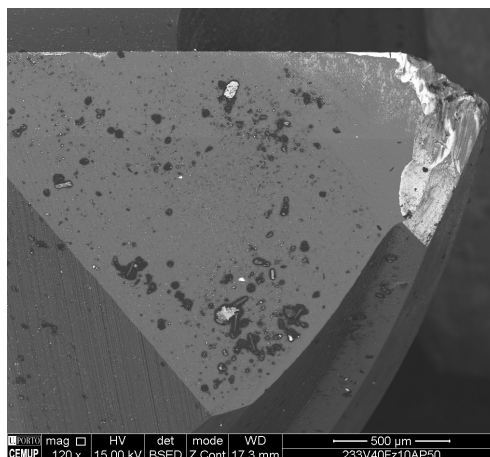
5.3. Análise dos mecanismos de desgaste das ferramentas para cada condição de corte

Neste capítulo irão ser apresentados e analisados os mecanismos de desgaste presentes em todas as ferramentas de corte ensaiadas e todos os parâmetros de ensaio testados. Os resultados encontram-se divididos por ferramenta de corte, de modo semelhante aos capítulos anteriores. Os dados aqui apresentados foram obtidos seguindo os métodos descritos no subcapítulo 3.2.6.

5.3.1. Ferramenta 233

Na Figura 35 estão apresentadas as imagens MEV dos testes realizados com uma velocidade de corte de 40 m/min, sendo assim possível analisar o desgaste gerado na ferramenta de corte e a influência do avanço por dente neste parâmetro. Como é possível observar, o aumento do avanço por dente apresenta um impacto negativo no desgaste desta ferramenta de corte a velocidades de corte baixas, sendo o aumento de avanço por dente entre 0.07 mm/dente e 0.1 mm/dente mais prejudicial para a ferramenta de corte. Este aumento do desgaste foi também observado no subcapítulo 4.3.1.





c)

Figura 35 – Vista de topo dos testes com velocidade de corte de 40 m/min com uma ampliação de 120x para a ferramenta 233: a) V1F1A1, b) V1F2A1 e c) V1F3A1.

Quanto aos mecanismos de desgaste presentes nestes testes, foi possível observar desgaste abrasivo, desgaste adesivo, com a formação de arestas postiças em certos casos, fissuração e lascagem. Desgaste adesivo esteve presente em todos os ensaios efetuados a velocidades de corte inferiores, estando presente tanto na superfície do revestimento, como na superfície do substrato. Na Figura 36 estão apresentados alguns dos mecanismos de desgaste presentes nestes testes. No caso do teste com o menor valor de avanço por dente, o desgaste adesivo observado foi menor, tanto no revestimento como no substrato, embora tenha ocorrido a formação de arestas postiças, como se pode observar na Figura 36 a). Quando a remoção de avara é difícil, é normal observar a formação de arestas postiças no material, sendo esta formação prejudicial para o desgaste da ferramenta de corte, acelerando a deterioração da aresta de corte [132]. O desgaste adesivo no substrato para os testes com valores de avanço por dente superiores foi substancialmente superior, particularmente nas zonas de maior desgaste abrasivo, tal como se pode observar na Figura 36 b). Neste caso, a excessiva adesão do material maquinado à face da ferramenta de corte, pode ter acelerado a ocorrência do desgaste abrasivo. É também possível concluir que a aumento do avanço por dente a valores baixos de velocidade de corte, promove a adesão do material maquinado à superfície da ferramenta de corte, tanto no revestimento como no substrato. Em geral, o facto desta ferramenta de corte possuir apenas quatro arestas de corte, em contraste às outras duas, pode ter ajudado na obtendo de menores quantidades de desgaste adesivo, visto que esta configuração promove a mais fácil extração da avara, diminuindo assim a adesão e colisão da avara com a ferramenta de corte [132]. Este menor desgaste adesivo observado pode ter contribuído para os valores de rugosidade observados, visto que excessiva aderência da avara à ferramenta de corte pode impor um pior desempenho em termos de qualidade da superfície maquinada.

Tal como para o desgaste adesivo, o aumento do avanço por dente proporcionou um aumento no desgaste abrasivo observado nas ferramentas de corte, com este aumento sendo bastante acentuado entre os ensaios com 0.07 mm/dente e 0.1 mm/dente.

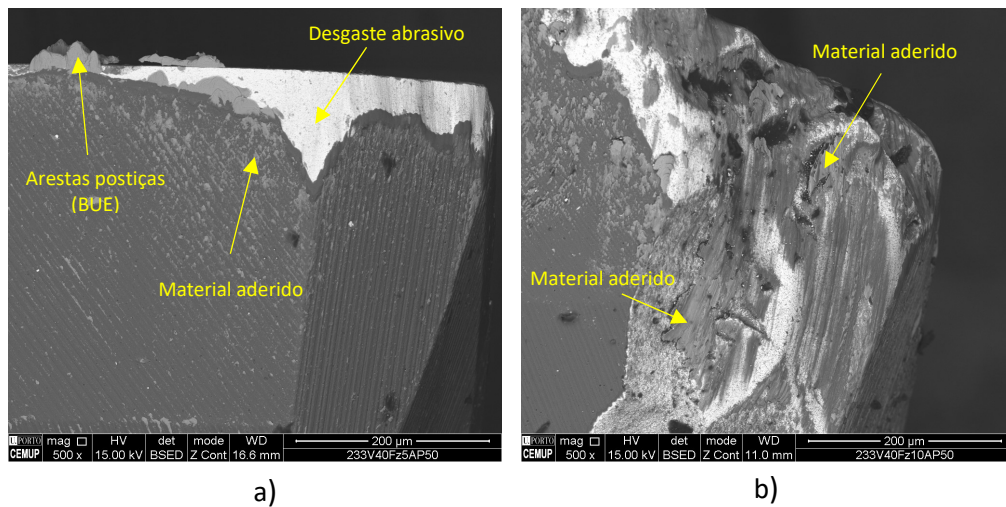


Figura 36 – Mecanismos de desgaste dos ensaios com 40 m/min de velocidade de corte para a ferramenta 233: a) V1F1A1 e b) V1F3A1.

De modo a confirmar a existência de desgaste adesivo nas ferramentas de corte, foi realizada uma análise *EDS* à superfície de uma das ferramentas de corte utilizadas. A Figura 37 ilustra as zonas analisadas por *EDS*, tal como o espectro produzido mostrando a composição química do material aderido. Como é possível observar, o material aderido é composto maioritariamente por ferro, o que nos indica que o material aderido é de facto o aço pré-tratado maquinado.

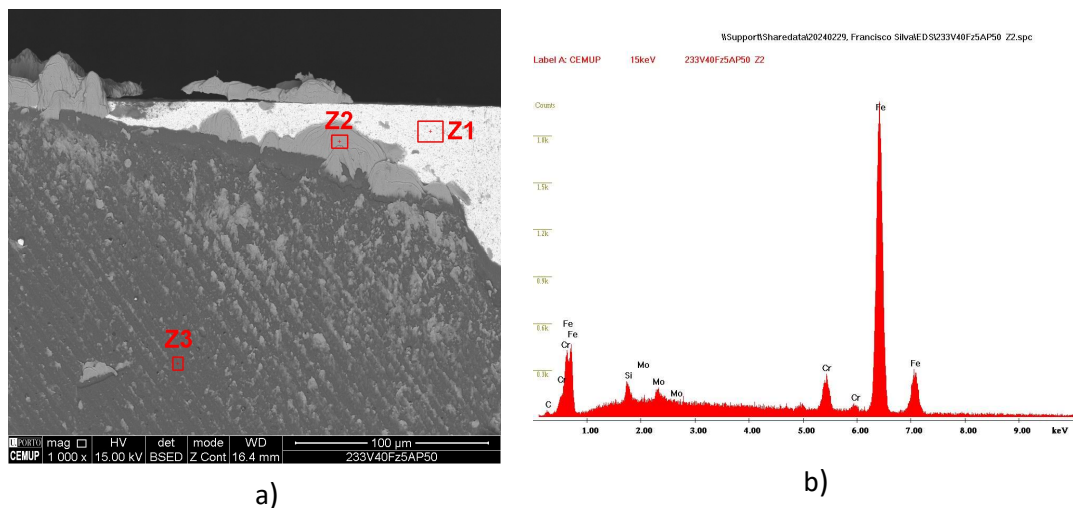


Figura 37 – a) Zonas da ferramenta de corte analisadas por *EDS*, e b) espectro *EDS* para a zona Z2.

Também foi observada fissuração no teste com um avanço por dente de 0.07 mm/dente, estando este mecanismo presente em diversas zonas da ferramenta de corte, como se pode observar na Figura 38. Este mecanismo de desgaste não foi encontrado nos outros testes realizados com a mesma velocidade de corte.

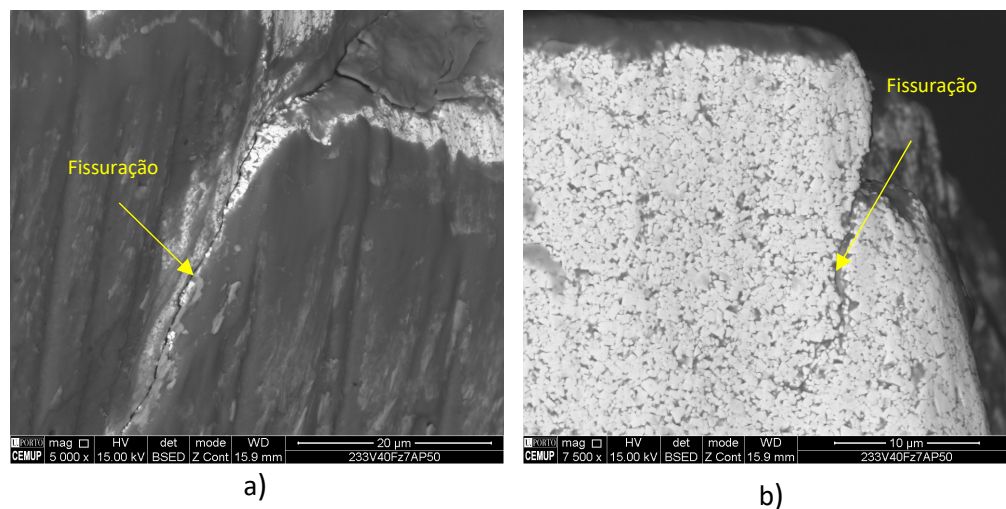


Figura 38 – Fissuração presente no ensaio V1F2A1 da ferramenta 233: a) aresta da ferramenta e b) parte inferior da ferramenta.

No que diz respeito aos testes V1F2A1 e V1F3A1, que possuem valores de avanço por dente de 0.07 mm/dente e 0.1 mm/dente, respetivamente, observou-se a ocorrência de lascagem localizada na ponta da aresta de corte. Neste caso, este mecanismo foi bastante mais pronunciado no teste com maior avanço por dente, sendo que o teste com o menor valor de avanço por dente não apresentou indícios deste mecanismo. Na Figura 39 está presente a lascagem observada no teste V1F2A1.

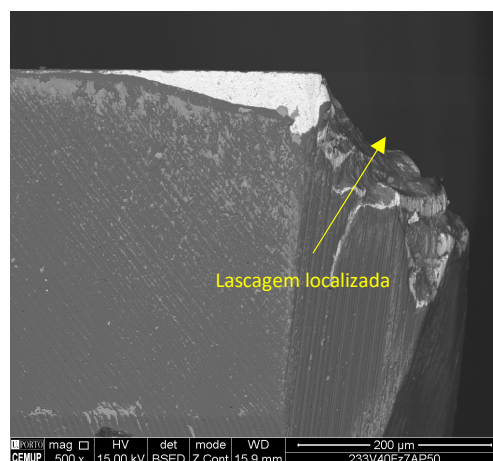


Figura 39 – Lascagem observada no teste V1F2A1 da ferramenta de corte 233.

Resumidamente, para os testes com uma velocidade de corte de 40 m/min os mecanismos de desgaste presentes são, desgaste abrasivo, desgaste adesivo, fissuração e lascagem. O aumento do avanço por dente apresenta sempre um impacto negativo no desgaste de flanco observado, sendo este aspecto também verdadeiro para o desgaste adesivo, desgaste abrasivo e lascagem. A fissuração foi apenas visível no teste com valor intermédio de avanço por dente. O teste com o menor valor de avanço por dente, foi o único que apresentou a criação de arestas postiças.

Na Figura 40, estão apresentadas as imagens MEV dos testes realizados com uma velocidade de corte de 80 m/min. Tal como foi acima observado, o aumento do avanço por dente tem uma

influência negativa no desgaste gerado na ferramenta de corte, sendo este impacto mais elevado para a velocidade de corte de 80 m/min, comparativamente à velocidade de corte de 40 m/min. O avanço por dente geralmente apresenta uma influência negativa no desgaste de flanco observado [133]. Neste caso, a combinação de avanço por dente de 0.07 mm/dente e 80 m/min, levou à falha catastrófica de todas as aresta de corte da ferramenta, sofrendo severas fraturas. Devido a este facto, estes parâmetros de maquinagem mostraram ser claramente demasiado severos para a ferramenta de corte utilizada, devendo ser evitados. O aumento da velocidade de corte influenciou pouco o desgaste observado no caso do avanço por dente de 0.05 mm/dente, enquanto para um avanço por dente de 0.07 mm/dente, o aumento da velocidade de corte foi bastante severo.

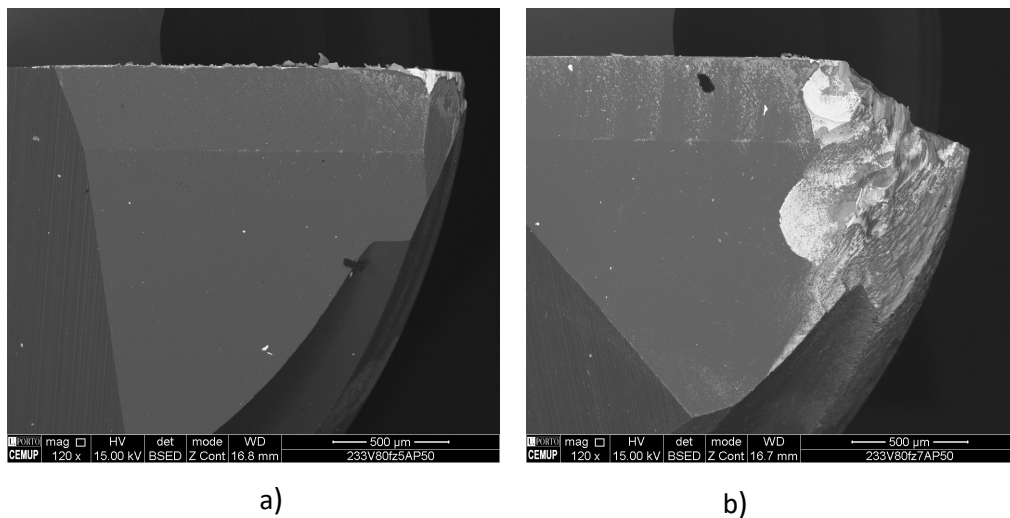


Figura 40 - Vista de topo dos testes com velocidade de corte de 80 m/min com uma ampliação de 120x para a ferramenta 233: a) V2F1A1 e b) V2F2A1.

Relativamente aos mecanismos de desgaste para estas velocidades de corte, observou-se desgaste abrasivo, desgaste adesivo e lascagem. Na Figura 41 encontram-se os mecanismos de desgaste presentes nas ferramentas com velocidade de corte de 80 m/min. Ambos os casos apresentam quantidades superiores de material aderido ao revestimento, comparativamente aos testes com velocidades de corte inferiores, sendo a diferença mais acentuada no caso de avanço por dente de 0.07 mm/dente. O teste com avanço por dente de 0.05 mm/dente apresentou lascagem em todas as suas arestas de corte, algo que não aconteceu no caso do teste com igual avanço por dente, mas inferior velocidade de corte. No teste com avanço por dente de 0.07 mm/dente ocorreu também a formação de arestas postiças bastante grandes, em contraste ao teste com velocidade de corte inferior. Aqui foram observadas maiores quantidades de material aderido ao substrato, comparativamente ao material aderido ao revestimento. Aihua *et al.* [134] reportou uma maior resistência ao desgaste adesivo para ferramentas revestidas com CrAlN, comparativamente ao TiAlN, mostrando melhores propriedades de anti-adesão. Neste caso, a ferramenta 233 mostrou uma menor quantidade de material aderido ao seu revestimento, comparativamente às ferramentas 591 e 592.

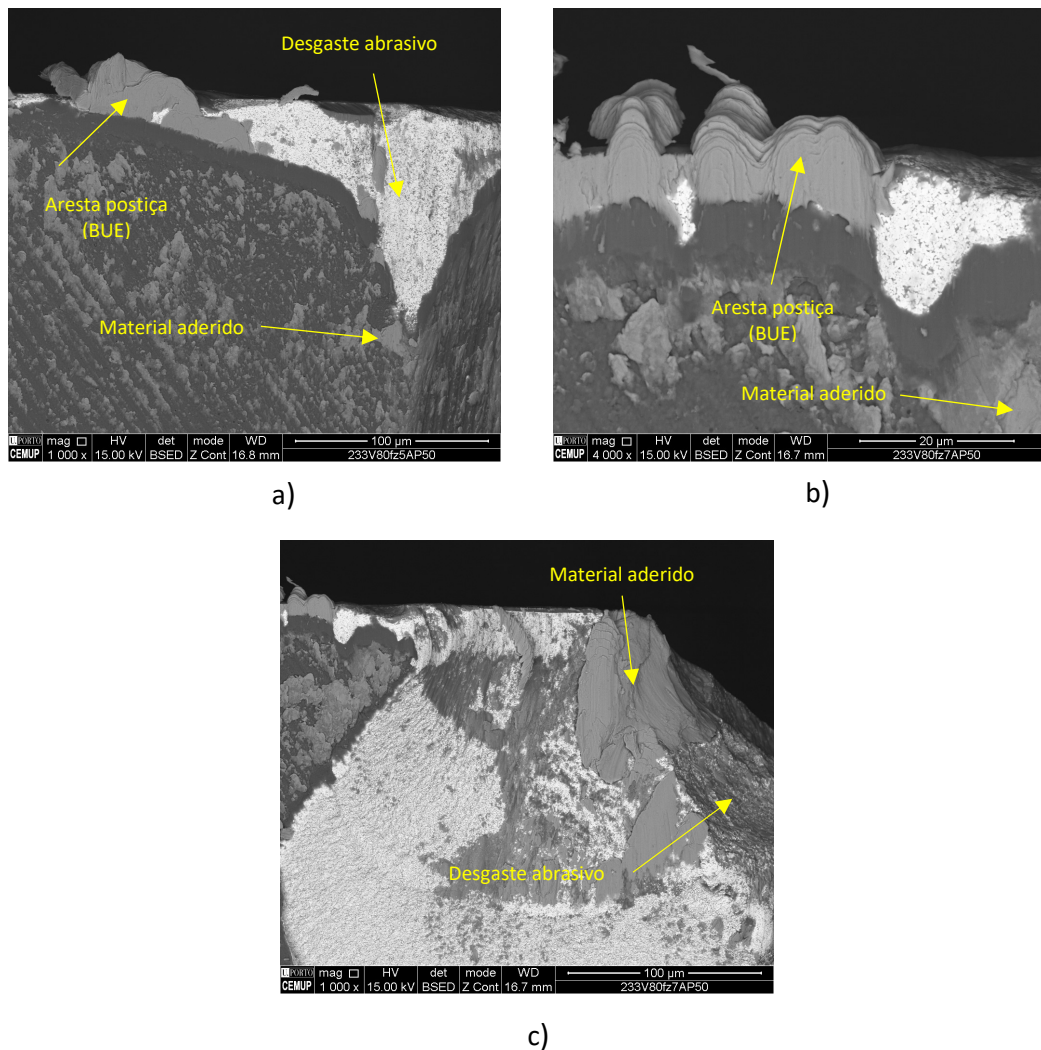


Figura 41 – Mecanismos de desgaste dos ensaios com 80 m/min de velocidade de corte para a ferramenta 233: a) V2F1A1, b) e c) V2F2A1.

Na Figura 42, estão apresentadas as imagens MEV dos testes realizados com uma velocidade de corte de 120 m/min. Aqui observou-se novamente que para valores de avanço por dente superiores, o desgaste da ferramenta é bastante superior, como se pode ver nas Figura 42 b) e c). No caso de valores de avanço por dente inferior, o aumento da velocidade de corte mostrou um impacto negativo no desgaste observado, embora esta diferença tenha sido mínima. Para um avanço por dente de 0.1 mm/dente, o aumento da velocidade de corte de 80 m/min para 120 m/min, diminui substancialmente o desgaste da ferramenta, no entanto esta ferramenta ainda sofreu bastante desgaste. O teste com uma menor profundidade de corte, cujo desgaste se encontra presente na Figura 42 a), obteve muito menor desgaste, quando comparado ao teste com igual avanço por dente e velocidade de corte. O teste com a trajetória em espiral também mostrou uma redução drástica no desgaste observado, como se pode observar na Figura 42 d).

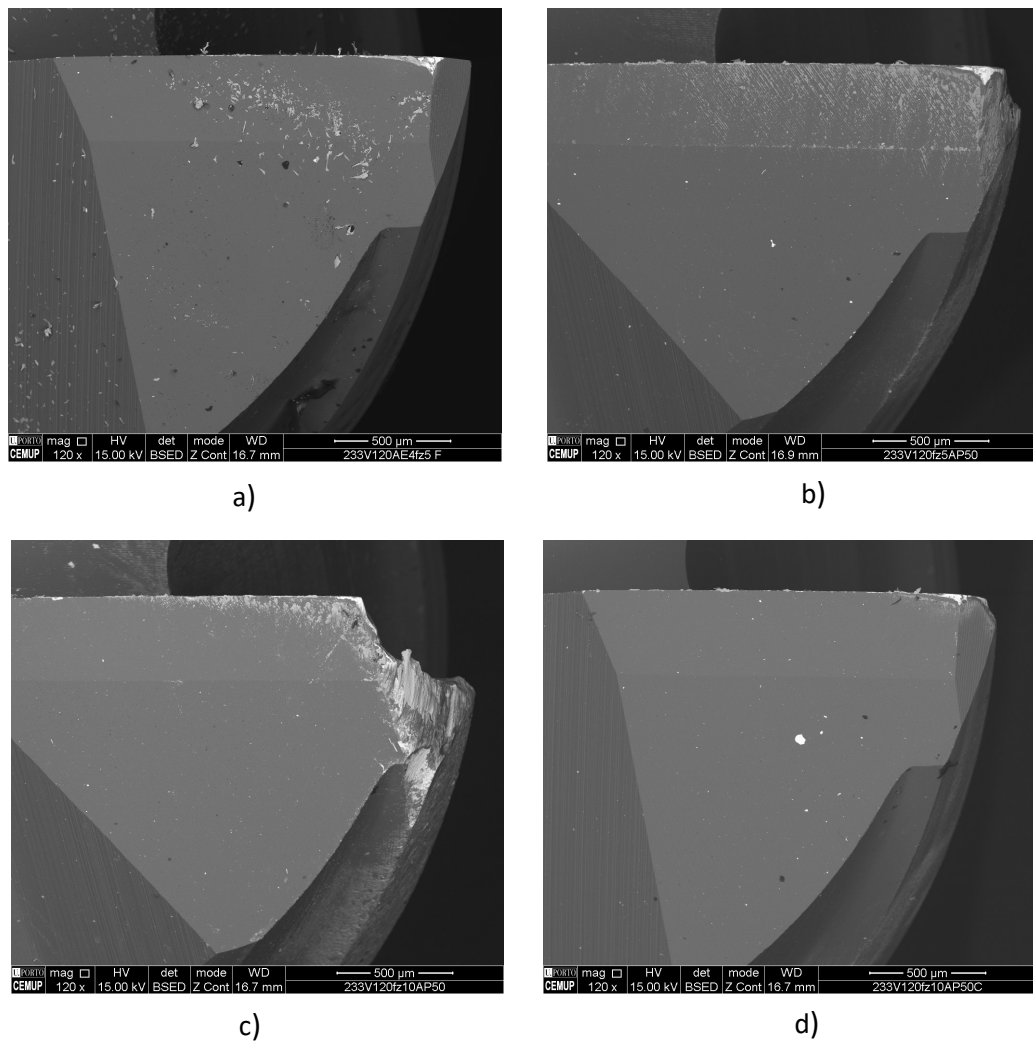


Figura 42 - Vista de topo dos testes com velocidade de corte de 120 m/min com uma ampliação de 120x para a ferramenta 233: a) V3F1A2, b) V3F1A1, c) V3F3A1 e d) V3F3A1C.

Tal como para as outras velocidades de corte, os mecanismos de desgaste observados foram, desgaste adesivo, desgaste abrasivo e lascagem. Neste caso, houve elevadas quantidades de material aderido ao revestimento, tanto no teste V3F1A1, como também no teste V3F3A1, sendo estas quantidades bastante superiores às registadas a menores velocidades de corte. Este aspeto pode ser observado na Figura 43. Quanto ao material aderido ao substrato, o aumento da velocidade de corte de 80 m/min para 120 m/min não apresentou um aumento significativo para todos valores de avanço por dente testados. O teste V3F1A1 mostrou ligeiramente menor desgaste abrasivo, comparativamente ao teste com igual avanço por dente e menor velocidade de corte, embora tenha mostrado um maior desgaste por lascagem. Este desgaste por lascagem pode ser observado na Figura 43 a). Tal como no caso das outras velocidades de corte, no teste com um valor de avanço por dente de 0.05 mm/dente foi observada a criação de arestas postiças, particularmente ao longo da aresta de corte.

Resultados e Discussão

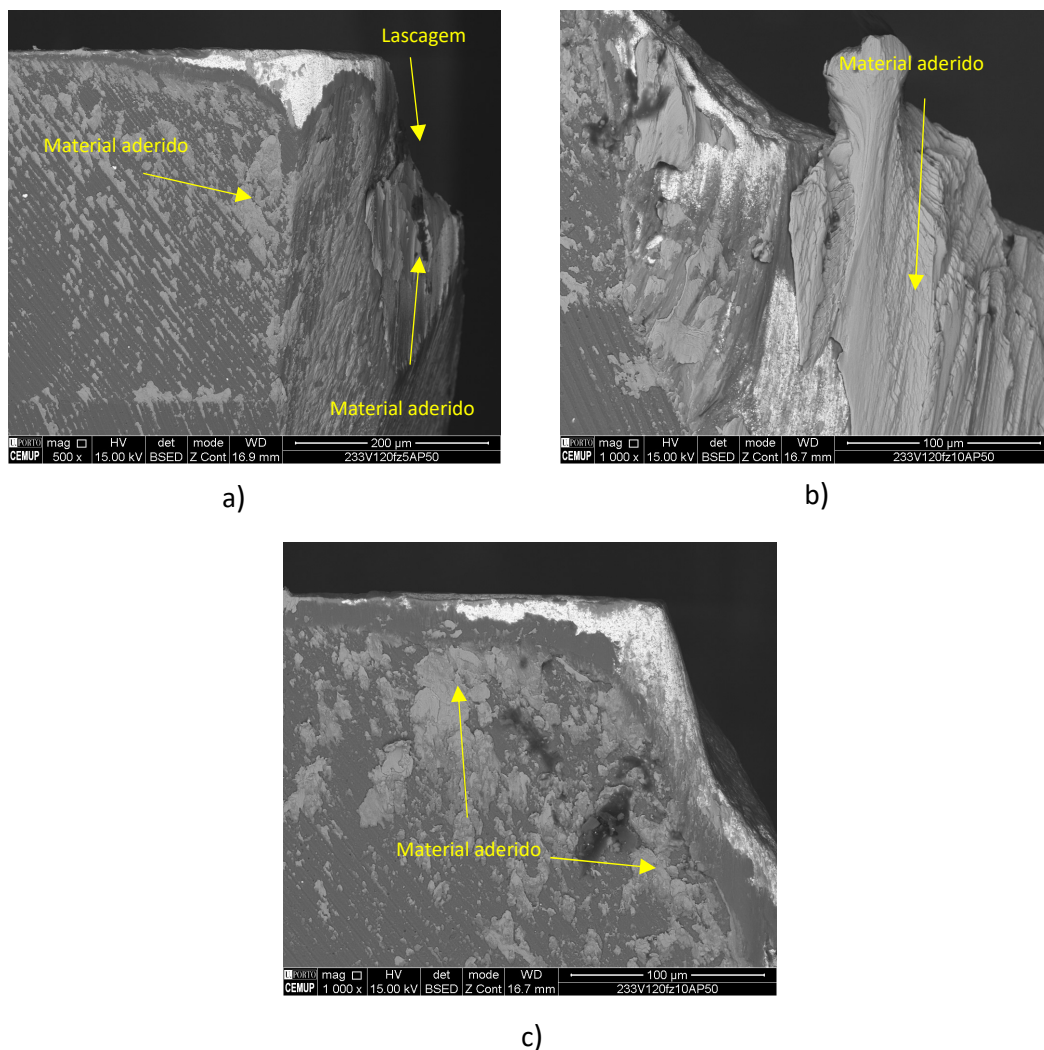


Figura 43 – Imagens do desgaste ocorrido a uma velocidade de corte de 120 m/min para a ferramenta 233: a) V3F1A1, b) material aderido no substrato de V3F3A1 e c) material aderido ao revestimento de V3F3A1.

Resumidamente, os principais mecanismos de desgaste encontrados para a ferramenta de corte de 233 foram, desgaste adesivo, com a criação de arestas postiças em certos casos, desgaste abrasivo e lascagem. Para a ferramenta 233, o aumento do avanço por dente e velocidade de corte, aumentou o desgaste observado nestes três diferentes mecanismos, sendo a influência do avanço por dente bastante superior à velocidade de corte. É sempre possível observar material aderido no substrato e no revestimento, sendo que a sua magnitude varia dependendo das condições de ensaio utilizadas. Foi também observada fissuração num dos testes a velocidade de corte de 40 m/min, não sendo encontrados indícios deste mecanismo nos outros teste efetuados. Nos testes com menor valor de avanço por dente foi sempre possível observar arestas postiças na lâmina de corte, enquanto os testes com maior avanço por dente não apresentam este mecanismo de desgaste. Em geral, o revestimento obteve um bom comportamento, aderindo bem à ferramenta de corte, mostrando apenas ligeiros sinais de abrasão em certos casos. É também importante referir que a utilização de

avanço por dente de 0.1 mm/dente conduz sempre a desgaste excessivo desta ferramenta de corte, e por isso, não é um parâmetro aconselhável na fresagem do aço pré-tratado W 1.2711.

5.3.2. Ferramenta 591

Na Figura 44 estão apresentadas as imagens MEV dos testes realizados com uma velocidade de corte de 40 m/min para a ferramenta 591. A esta velocidade de corte todas os ensaios apresentaram um bom desempenho, com pequenas quantidades de desgaste de flanco em todos os testes realizados. O desgaste de flanco não apresentou uma variação substancial com o aumento do avanço por dente, com uma redução bastante diminuta entre os valores de 0.05 mm/dente e 0.07 mm/dente e um aumento pequeno entre 0.07 mm/dente e 0.01 mm/dente. Comparativamente ao desgaste encontrado na ferramenta 233 a estes valores de velocidade de corte e avanço por dente, o desgaste da ferramenta 591 é substancialmente inferior, particularmente no caso de avanço por dente de 0.1 mm/dente.

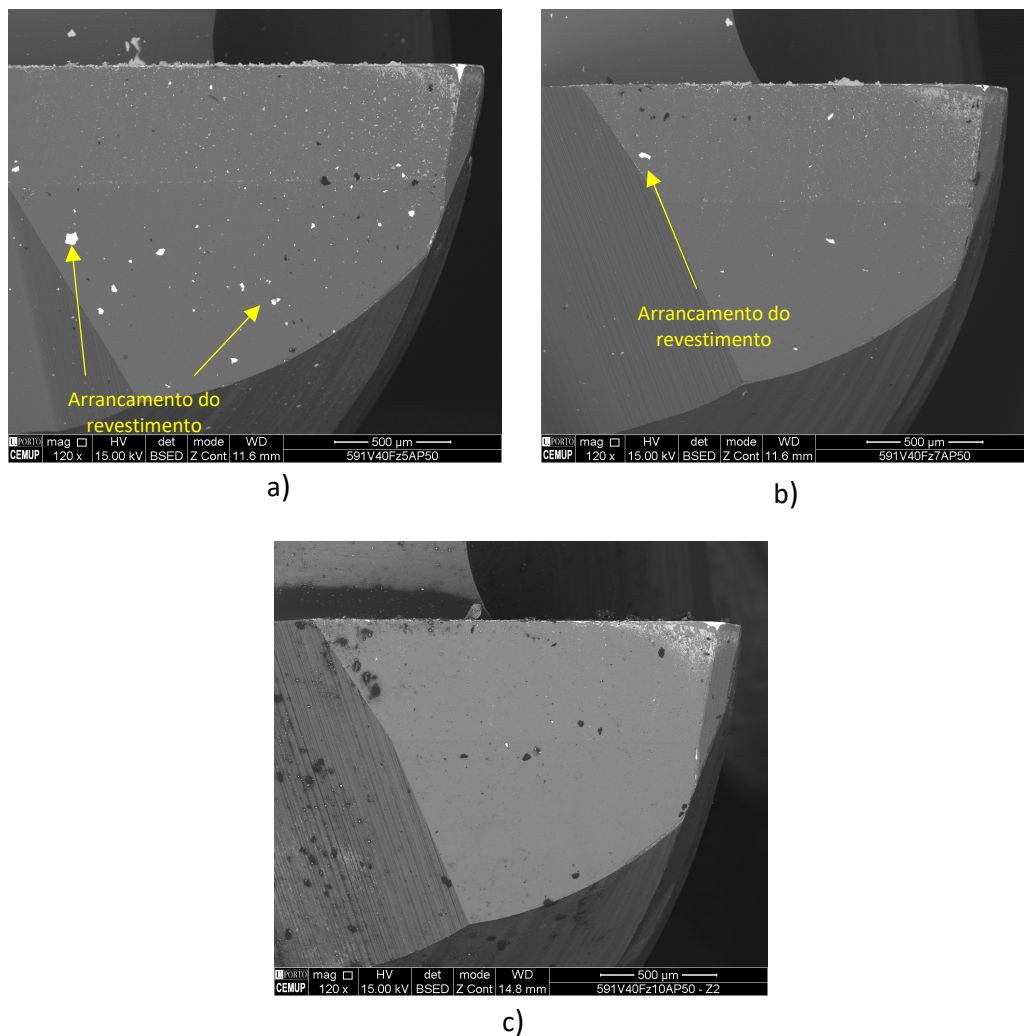


Figura 44 - Vista de topo dos testes com velocidade de corte de 40 m/min com uma ampliação de 120x para a ferramenta 591: a) V1F1A1, b) V1F2A1 e c) V1F3A1.

Tal como no caso da ferramenta 233, os mecanismos de desgaste principais presentes na ferramenta 591 são, desgaste adesivo e desgaste abrasivo, com pequenas quantidades de lascagem. Estes são os mecanismos de desgaste típicos para este tipo de material [121]. O desgaste abrasivo, neste caso, possui uma intensidade bastante reduzida, comparativamente à ferramenta anterior. Este desgaste pode ser observado na Figura 45. Neste caso, o teste com o menor valor de avanço por dente obteve a maior quantidade de desgaste abrasivo, com um desgaste mais comprido e profundo, como se pode observar na Figura 45 a), enquanto o teste com avanço por dente de 0.07 mm/dente obteve o menor desgaste abrasivo.

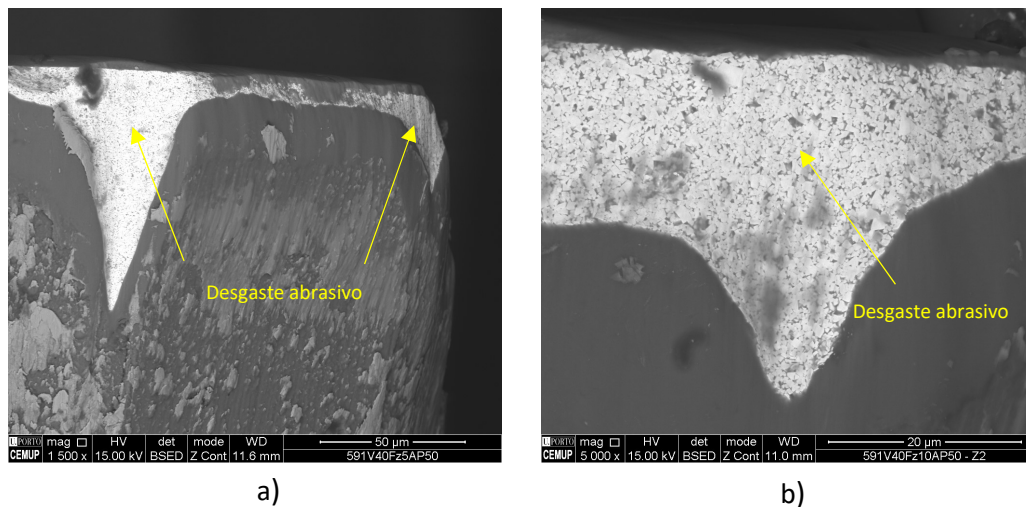


Figura 45 – Desgaste abrasivo observado a velocidade de corte de 40 m/min para a ferramenta 591: a) V1F1A1 e b) V1F3A1.

Todas as ferramentas de corte apresentaram desgaste adesivo, com elevadas quantidades de material aderido ao revestimento da ferramenta, sendo a sua intensidade mais elevada em relação à ferramenta 233, particularmente para um avanço por dente inferior. O facto de esta ferramenta de corte possuir cinco arestas de corte, pode dificultar o mecanismo de remoção da avara, promovendo colisões entre a ferramenta e as arestas postíças formadas, levando à aparição de impurezas na sua superfície [132]. Este aspeto pode ser observado na Figura 44. Neste caso, houve pouca quantidade de material aderido ao substrato em si. O aumento do valor de avanço por dente não apresentou um impacto substancial na intensidade deste mecanismo, com os testes V1F1A1 e V1F3A1, mostrando níveis semelhantes de material aderido. Este desgaste adesivo pode ser observado na Figura 46.

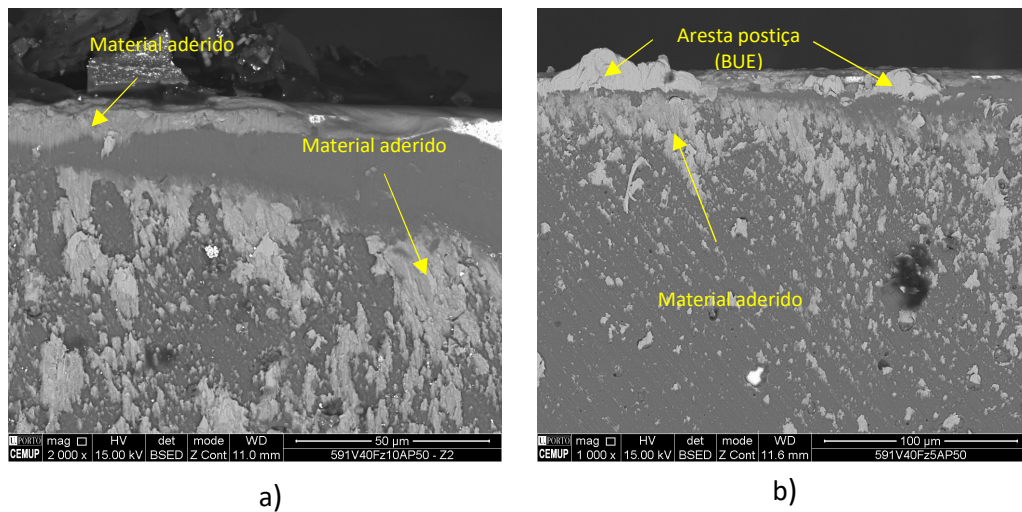
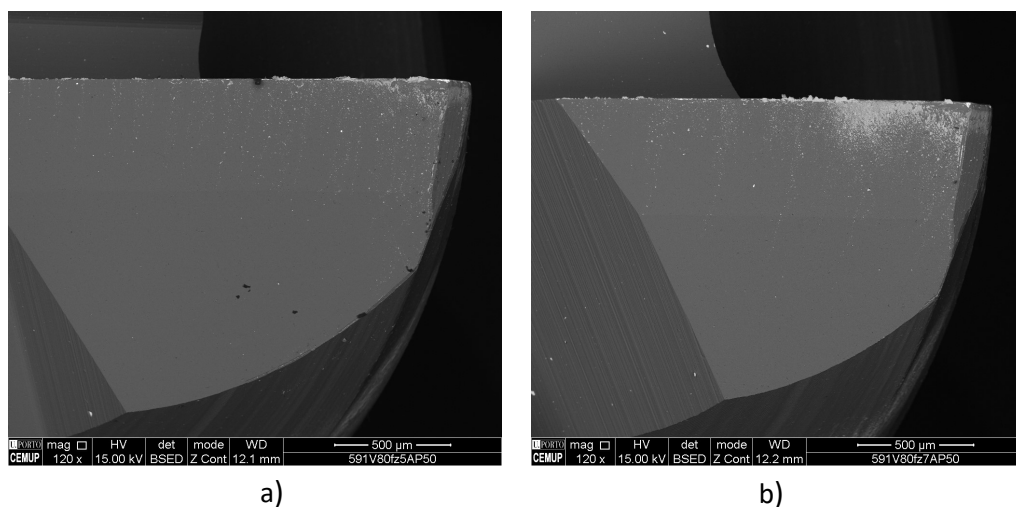
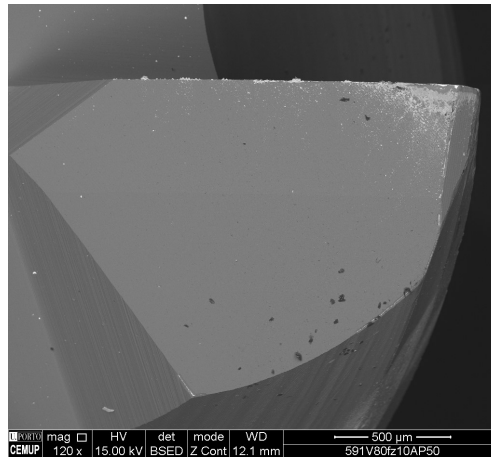


Figura 46 – Desgaste adesivo nos testes com 40 m/min de velocidade de corte na ferramenta 591: a) V1F3A1 e b) V1F1A1.

No teste com o menor valor de avanço por dente, também se detetou a remoção de pequenas secções do revestimento na face da ferramenta de corte, como se pode observar nas Figura 44 a) e b). Esta delaminação do revestimento pode ter sido causado por uma deposição inadequada do revestimento, diminuindo a adesão do revestimento ao substrato. A colisão da apara do material maquinado com a ferramenta de corte também pode causar este fenómeno [132]. O avanço por dente parece ter uma influência neste mecanismo de desgaste, com o aumento do avanço por dente a diminuir a sua ocorrência e intensidade. Na Figura 47 estão apresentadas as imagens MEV dos testes realizados com uma velocidade de corte de 80 m/min para a ferramenta 591. Em termos de desgaste de flanco, todas as ferramentas obtiveram valores bastante reduzidos e inferiores aos registados a uma velocidade de corte inferior. Neste caso, o aumento do avanço por dente não afetou o desgaste de flanco observado. Comparativamente à ferramenta 233 com iguais condições de ensaio, o desgaste gerado é substancialmente inferior em todos os casos estudados.





c)

Figura 47 - Vista de topo dos testes com velocidade de corte de 80 m/min com uma ampliação de 120x para a ferramenta 591: a) V2F1A1, b) V2F2A1 e c) V2F3A1.

Em termos de mecanismos de desgaste para esta velocidade de corte, apenas é observado grandes quantidades de desgaste adesivo no revestimento da ferramenta de corte, com ocorrência mínima de desgaste abrasivo. Este desgaste adesivo foi bastante mais intenso no teste com um avanço por dente de 0.01 mm/dente, comparativamente aos outros valores de avanço por dente testados. Um exemplo do desgaste adesivo pode ser observado na Figura 48. O aumento da velocidade de corte também afetou a criação deste mecanismo, com maiores velocidades de corte, gerando maior desgaste adesivo.

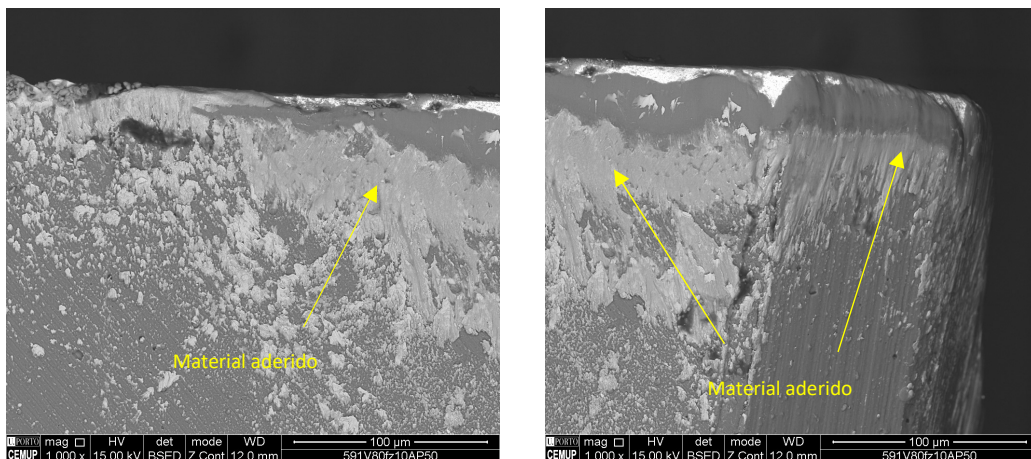
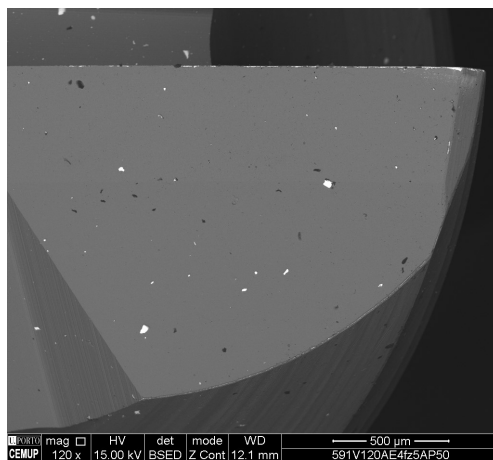


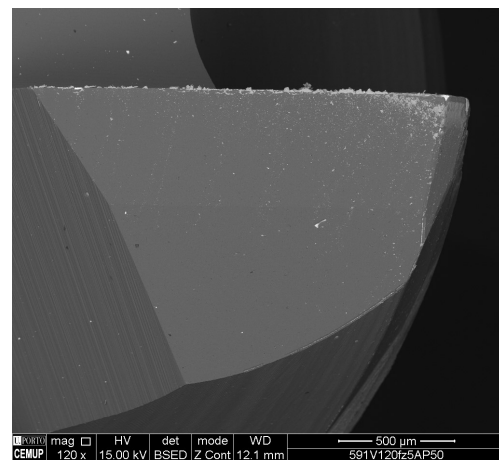
Figura 48 - Desgaste adesivo nos testes com 80 m/min de velocidade de corte na ferramenta 591.

Na Figura 49 estão apresentadas as imagens MEV dos testes realizados com uma velocidade de corte de 120 m/min para a ferramenta 591. De modo semelhante ao constatado para a velocidade de corte de 80 m/min, o aumento do valor de avanço por dente de 0.05 para 0.07 mm/dente não influenciou significativamente o desgaste de flanco gerado, sendo a sua

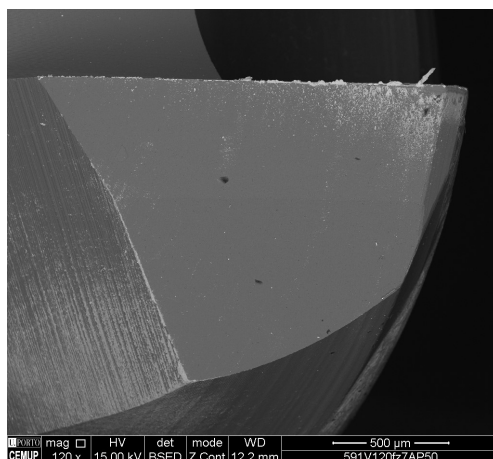
intensidade também bastante similar ao desgaste apresentado anteriormente. Já a combinação do maior valor de velocidade de corte e avanço por dente levou à falha catastrófica de todas as arestas de corte da ferramenta, como foi observado para a ferramenta 233. No entanto, o ensaio executado com as mesmas condições de ensaio, mas com a trajetória em espiral, produziu valores de desgaste de flanco bastante reduzidos. A constante entrada e saída da ferramenta de corte na trajetória de fresagem intermitente pode ter causado este aumento de desgaste entre ensaios. O facto da trajetória em espiral apenas utilizar fresagem discordante pode também explicar este facto, visto que a fresagem concordante na trajetória intermitente impõem uma maior instabilidade, comparativamente à fresagem discordante na mesma trajetória, algo que pode afetar o desgaste acumulado na ferramenta de corte.



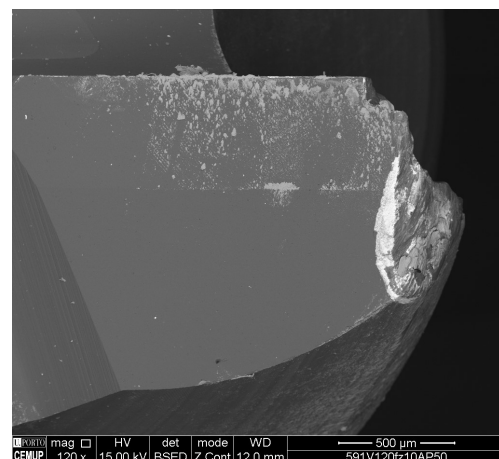
a)



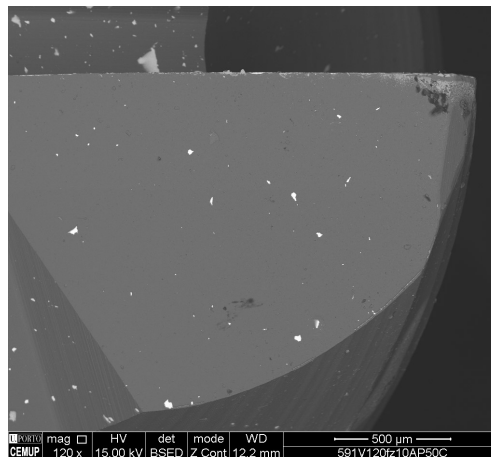
b)



c)



d)



e)

Figura 49 - Vista de topo dos testes com velocidade de corte de 80 m/min com uma ampliação de 120x para a ferramenta 591: a) V3F1A2, b) V3F1A1, c) V3F2A1, d) V3F3A1 e e) V3F3A1C.

No que diz respeito aos mecanismos de desgaste, tal como para velocidades de corte de 80 m/min, adesão foi o mecanismo principal de desgaste observado. Estes ensaios apresentam também indícios de desgaste abrasivo, sendo estes bastante reduzidos, com exceção do teste V3F3A1. A maior espessura do revestimento desta ferramenta pode ter contribuído para a diminuição do desgaste abrasivo observado na aresta de corte, onde também atrasou a exposição do substrato [135]. O desgaste adesivo foi observado maioritariamente no revestimento da ferramenta, com o aumento do avanço por dente a influenciar negativamente a sua intensidade. Tal como para velocidades de corte menores, houve a formação de arestas postiças, como se pode observar na Figura 50. A formação de arestas postiças e o excessivo desgaste adesivo encontrado na ferramenta de corte pode contribuir para a obtenção de superfícies maquinadas com valores de rugosidade mais elevados, com o aumento do avanço por dente a agravar o desempenho da fresagem em relação a este aspeto [136]. A profundidade de corte também apresentou uma influência no desgaste adesivo observado, com o teste V3F1A2 mostrando a menor intensidade de desgaste adesivo de todos os ensaios realizados com esta velocidade de corte.

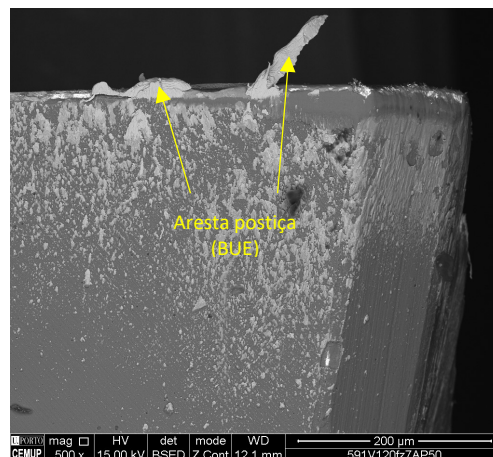


Figura 50 – Desgaste adesivo e arestas postiças nos testes com 80 m/min para a ferramenta 591.

Resumindo, o principal mecanismo de desgaste para esta ferramenta de corte é desgaste adesivo, havendo também desgaste abrasivo nos testes com velocidades de corte inferiores. O aumento do avanço por dente tendeu a aumentar a quantidade e intensidade do desgaste adesivo observado, com o aumento da velocidade de corte a ter um impacto semelhante, mas menos acentuado. Houve também a criação de arestas postiças na maior parte dos ensaios. A diminuição da profundidade de corte também mostrou um impacto positivo no desgaste de flanco e desgaste adesivo presente na ferramenta. Comparativamente ao desgaste observado na ferramenta 233, a ferramenta 591 demonstrou um desempenho consideravelmente melhor para todos os parâmetros de ensaio utilizados, com exceção do ensaio com o maior valor de velocidade de corte e avanço por dente.

5.3.3. Ferramenta 592

Na Figura 51 estão apresentadas as imagens MEV dos testes realizados com uma velocidade de corte de 40 m/min para a ferramenta 592. Como se pode observar na Figura 51 b), o teste V1F3A1 apresentou elevadas fraturas nas suas arestas de corte, algo que levou à quebra da ferramenta de corte, não sendo possível terminar o processo de fresagem. Este modo de falha é geralmente causado por fissuração da ferramenta de corte [137]. A ferramenta com avanço por dente de 0.05 mm/dente obteve uma razoável quantidade de desgaste de flanco, em quantidades ligeiramente inferiores ao observado a uma velocidade de corte de 40 m/min para a ferramenta 233. Neste caso, o avanço por dente teve um grande impacto no desgaste obtido.

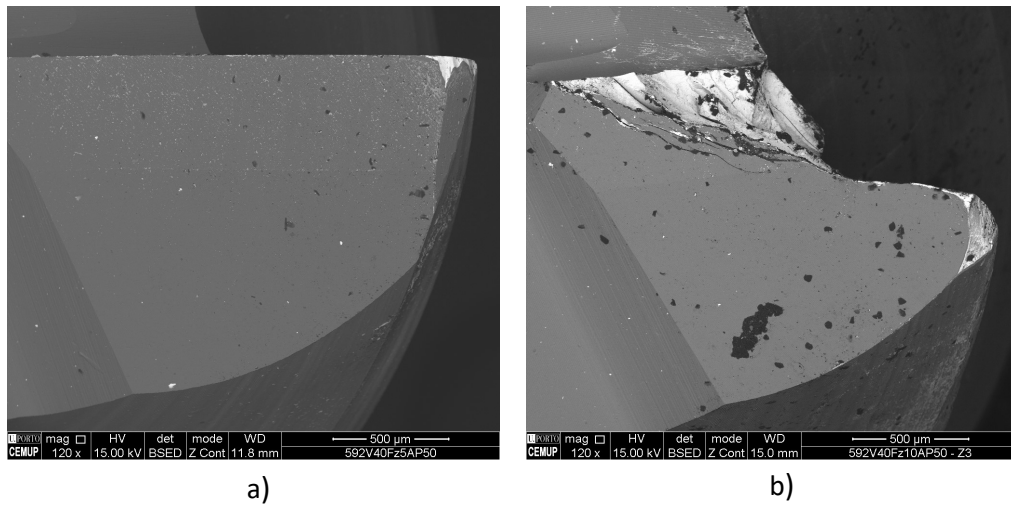


Figura 51 - Vista de topo dos testes com velocidade de corte de 40 m/min com uma ampliação de 120x para a ferramenta 592: a) V1F1A1, b) V1F3A1.

Para estas condições de ensaio, a ferramenta 592 apresentou como principais mecanismos de desgaste, desgaste adesivo e desgaste abrasivo, tal como foi observado nas outras ferramentas de corte. Quanto ao desgaste abrasivo observado, este apresentou uma maior profundidade e menor comprimento ao longo da aresta de corte, comparativamente ao encontrado na ferramenta 233. No caso do desgaste adesivo, houve a deposição de material tanto no revestimento como no substrato em quantidades semelhantes ao observado na ferramenta 233, com o material a aderir com maior intensidade à superfície do revestimento. Comparativamente à ferramenta 591, para condições de ensaio iguais, a ferramenta 592 apresentou menores quantidades de desgaste adesivo e desgaste abrasivo ligeiramente mais intenso. Este desgaste pode ser observado na Figura 52.

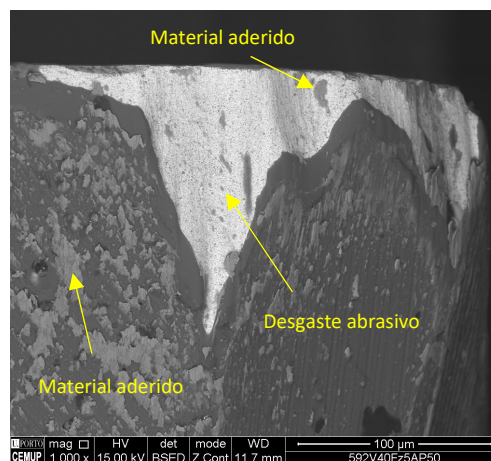


Figura 52 – Mecanismos de desgaste da ferramenta 592 para velocidade de corte de 40 m/min.

O elevado valor de avanço por dente no teste V1F3A1, conduziu à fissuração da ferramenta de corte em diversas zonas, algo que criou fraturas nas arestas de corte, levando à quebra da ferramenta. Esta fissuração encontra-se apresentada na Figura 53.

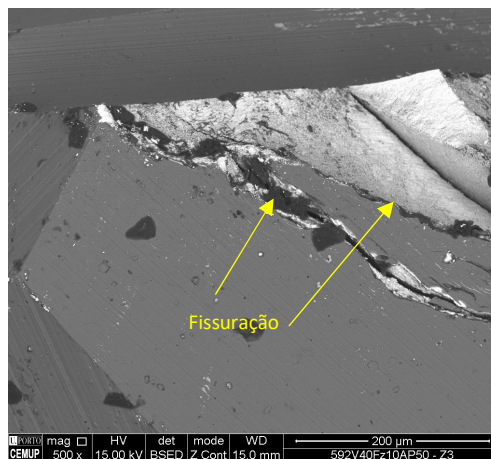
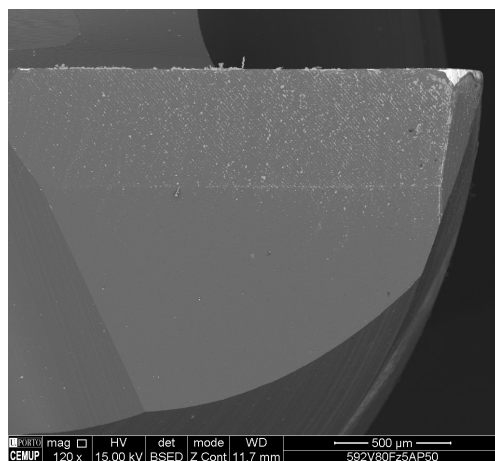
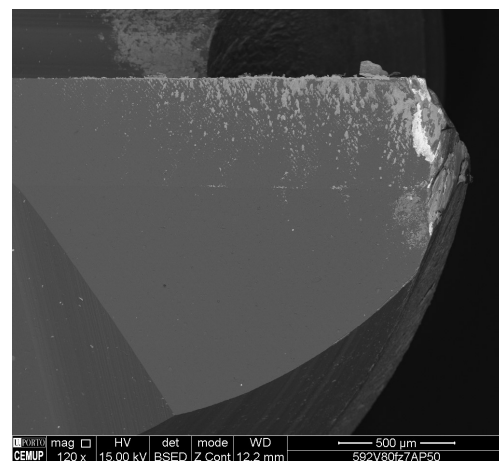


Figura 53 – Fissuração presente no teste V1F3A1 da ferramenta 592.

Na Figura 54 estão apresentadas as imagens MEV dos testes realizados com uma velocidade de corte de 80 m/min para a ferramenta 592. Novamente, o aumento do avanço por dente apresentou um impacto negativo no desgaste observado, com a ferramenta do teste V2F3A1 a quebrar de forma similar ao teste V1F3A1. Este aspeto demonstra que a utilização de valores de avanço por dente de 0.1 mm/dente não é aconselhável, particularmente a velocidades de corte inferiores. Esta quebra, tal como concluído anteriormente, foi causado pela formação de fissuras nas arestas de corte. A variação da velocidade de corte não apresentou um impacto considerável no desgaste de flanco, com o seu aumento a diminuir ligeiramente a profundidade do desgaste observado para valores de avanço por dente de 0.05 mm/dente.



a)



b)

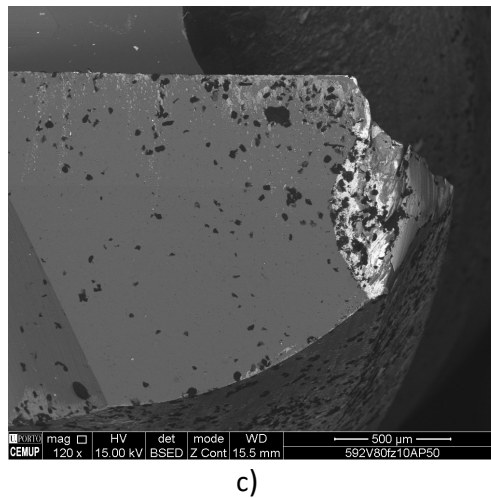


Figura 54 - Vista de topo dos testes com velocidade de corte de 80 m/min com uma ampliação de 120x para a ferramenta 592: a) V2F1A1, b) V2F2A1 e c) V2F3A1.

Para os ensaios com velocidade de corte de 80 m/min, os mecanismos principais de desgaste foram, desgaste adesivo, desgaste abrasivo, lascagem e fissuração. Todos os ensaios efetuados tiveram a presença de desgaste adesivo e abrasivo, com o aumento do avanço por dente a influenciar negativamente a sua intensidade, particularmente entre os valores de avanço por dente de 0.05 e 0.07 mm/dente. Neste caso, houve a formação de arestas postiças apenas no teste V2F2A1, como se pode observar na Figura 55, algo que não aconteceu para valores inferiores de velocidade de corte. Ainda para este teste, houve a lascagem de elevada magnitude de todas as arestas de corte da ferramenta. Ocorreu também um aumento no desgaste adesivo observado com o aumento da velocidade de corte de 40 m/min para 80 m/min.

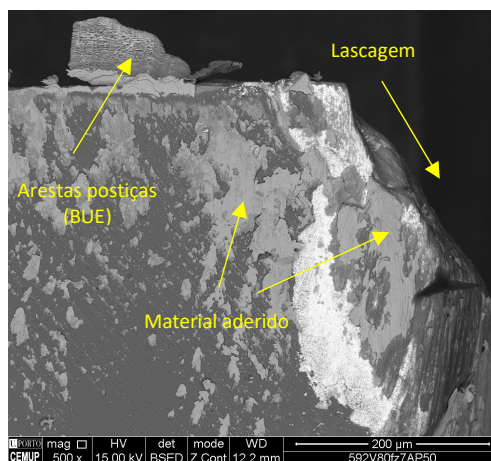


Figura 55 – Desgaste na ferramenta 592 para o teste V2F2A1.

Na Figura 56 estão apresentadas as imagens MEV dos testes realizados com uma velocidade de corte de 120 m/min para a ferramenta 592. Como foi observado para todas as ferramentas de corte e condições de ensaio, o aumento de avanço por dente levou a um aumento do desgaste observado, particularmente para a passagem de 0.07 mm/dente para 0.1 mm/dente. No entanto, o aumento da velocidade de corte não mostrou alterações significativas no desgaste

para valores de avanço por dente de 0.05 e 0.1 mm/dente, contudo para um avanço por dente de 0.07 mm/dente o aumento da velocidade de corte reduziu o desgaste observado.

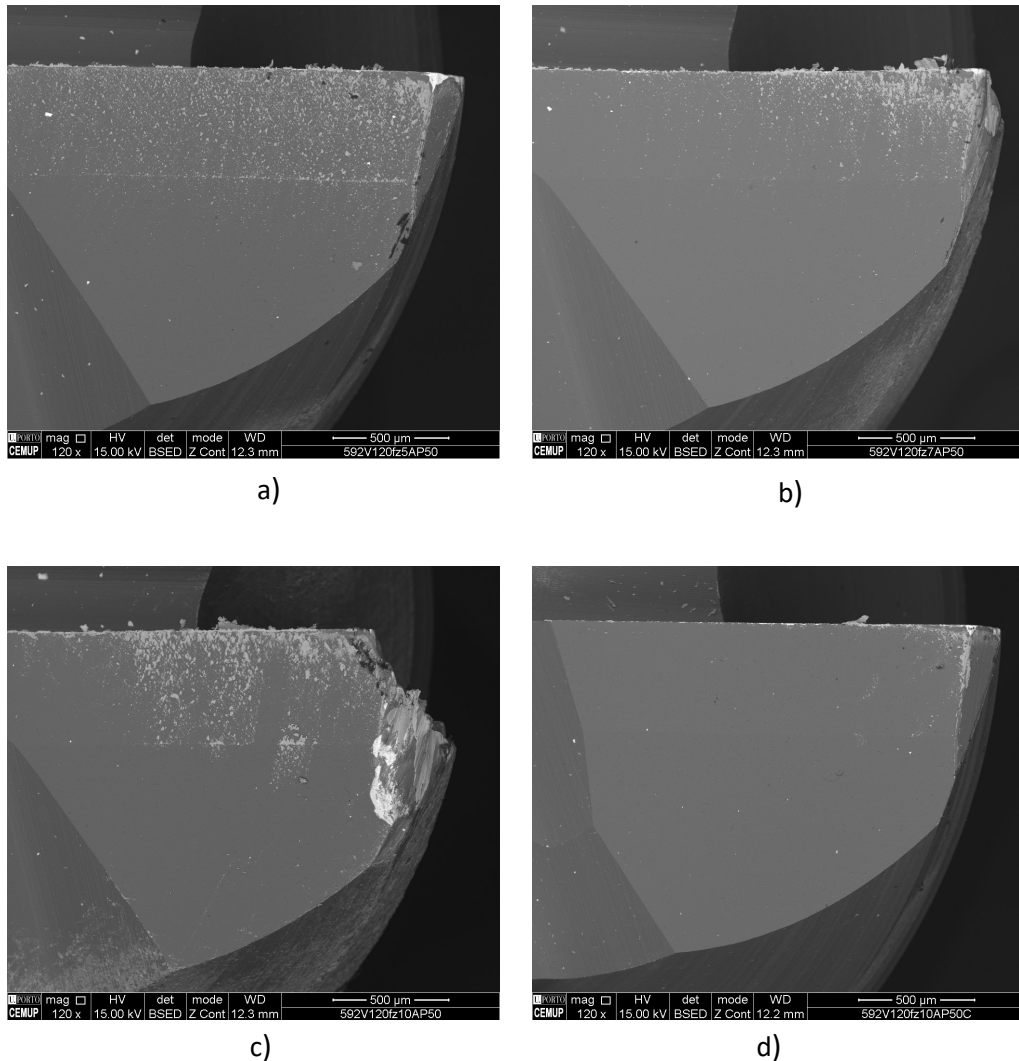


Figura 56 - Vista de topo dos testes com velocidade de corte de 80 m/min com uma ampliação de 120x para a ferramenta 592: a) V2F1A1, b) V2F2A1 e c) V2F3A1

Para valores de velocidade de corte de 120 m/min, a ferramenta 592 apresentou, desgaste adesivo, desgaste abrasivo e lascagem. Aqui a quantidade de material aderido à ferramenta é bastante similar ao observado para uma velocidade de corte de 80 m/min, com a exceção dos testes com avanço por dente de 0.05 mm/dente, que demonstraram ligeiramente mais material aderido ao revestimento. O teste V3F2A1 apresentou desgaste por lascagem, como se pode observar na Figura 57, no entanto com uma intensidade bastante mais baixa, comparativamente à registada a uma velocidade de corte inferior. Nas zonas onde a ferramenta sofreu lascagem, houve também uma elevada quantidade de material aderido, sendo este o caso para todas as arestas de corte da ferramenta. Para menores valores de avanço por dente não foi registada lascagem das arestas de corte, tal como se observou para as outras velocidades de corte.

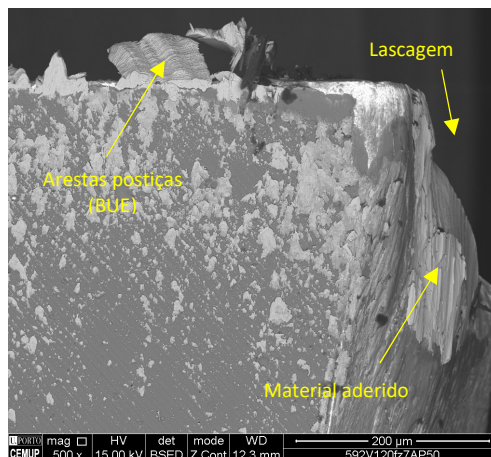


Figura 57 – Principais mecanismos de desgaste para a ferramenta 592 com uma velocidade de corte de 120 m/min.

Resumidamente, os principais mecanismos de desgaste presentes nesta ferramenta de corte são, desgaste adesivo, desgaste abrasivo e lascagem. Desgaste adesivo e abrasivo encontram-se presentes em todos os ensaios realizados, com o aumento do avanço por dente a aumentar a sua intensidade na maior parte dos casos. O aumento da velocidade de corte apresenta uma influência neutra numa grande quantidade de casos, particularmente para avanços por dente inferiores. Já lascagem apenas apareceu nos testes com valor de avanço por dente de 0.07 mm/dente e 0.1 mm/dente, enquanto fissuração ocorreu nos testes com o valor máximo de avanço por dente testado. Em termos de comparação com as outras ferramentas de corte, a ferramenta 592 apresentou sempre maior desgaste comparativamente à ferramenta 591, com uma elevada diferença na intensidade do desgaste abrasivo e lascagem. No entanto, esta ferramenta mostrou um melhor desempenho a valores de avanço por dente baixos, comparativamente à ferramenta 233.

5.4. Análise da evolução da vibração para cada ferramenta e condição de corte

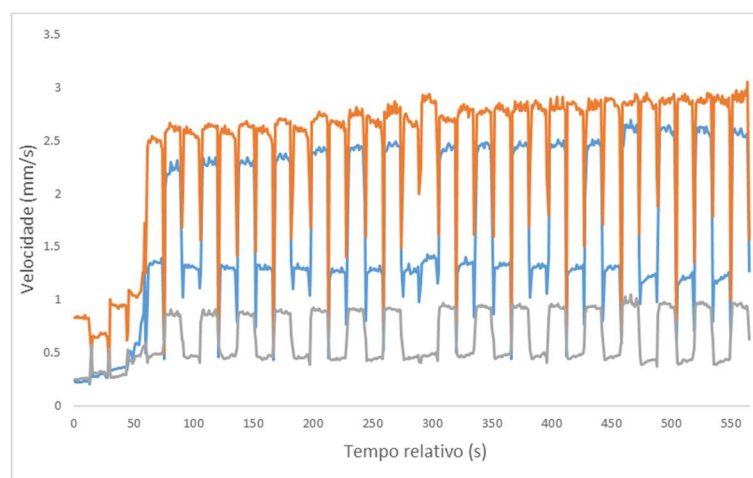
Neste capítulo serão apresentados os dados pertinentes aos valores de vibração obtidos a cada segundo dos testes realizados. Deste modo, será possível analisar a influência do desgaste das ferramentas de corte na estabilidade do processo de maquinagem. Os dados apresentados encontram-se separados por ferramenta de corte, sendo os ensaios para cada velocidade de corte analisados individualmente. Os valores apresentados foram obtidos seguindo o procedimento descrito na subcapítulo 3.2.5.

5.4.1. Ferramenta 233

A Figura 58 apresenta os valores de vibração registados para os testes com uma velocidade de corte de 40 m/min para a ferramenta 233. Analisando a Figura 58 a), inicialmente a amplitude da vibração é semelhante aos dois outros testes com a mesma velocidade de corte, mas após 50 segundos, ocorre um súbito aumento da vibração, particularmente nos eixos Y e X. Este

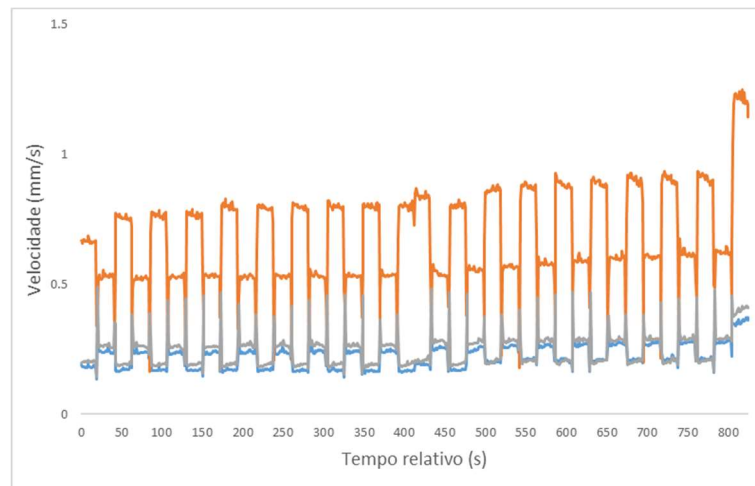
fenómeno pode ser atribuído à fratura de uma das arestas de corte da ferramenta, que de acordo com a norma mencionada no subcapítulo 3.2.5, pode ser considerada uma falha catastrófica. As outras arestas de corte apenas sofreram lascagem localizada e desgaste adesivo, como pode ser observado na Figura 35 c). Yesilyurt *et al.* [138] registou uma ocorrência similar, onde a quebra de uma das arestas de corte da ferramenta resultou num aumento considerável na amplitude de vibração. Esta fratura também pode explicar os valores de vibração excessivos no eixo X deste ensaio. Após este instante, a vibração registada continuou a aumentar progressivamente, devido ao aumento do desgaste da ferramenta. Este aumento pode ser devido ao aumento da fricção gerada pelo maior contacto entre a ferramenta de corte e a peça maquinada, causada pela alteração na geometria da ferramenta que o desgaste criou [139]. Ainda no mesmo teste, inicialmente os eixos X e Z demonstraram valores de vibração similares, mas após os 60 segundos, o eixo X obteve variações mais elevadas, comparativamente ao eixo Z. A diferença de amplitude da vibração entre fresagem concordante e discordante é sempre bastante evidente nos eixos X e Z, enquanto no eixo Y, esta diferença é bastante reduzida, particularmente após a fratura. Este aspeto pode estar ligado à fratura da aresta de corte, visto que nos outros dois testes realizados à mesma velocidade de corte, onde apenas se registou lascagem localizada e desgaste de flanco, como se pode observar na Figura 36 a) e Figura 39, a diferença de vibração entre fresagem concordante e discordante é sempre visível. Toh *et al.* [140] também reportou valores de vibração superiores em fresagem concordante, comparativamente a discordante, particularmente com maiores profundidades de corte.

Os testes com valor de avanço por dente inferiores obtiveram comportamentos semelhantes em termos de variação da vibração ao longo do processo, onde a vibração aumentou ligeiramente com o aumento do desgaste da ferramenta de corte. Nestes testes, houve também uma peculiaridade na transição entre a primeira fresagem e a segunda, onde a vibração se mantém constante por um pequeno período, em contraste com os picos e vales presentes no resto do teste. Este facto pode ser atribuído ao facto de cada operação começar com fresagem concordante, o que leva a valores mais elevados para o eixo Y, e mais baixos para os eixos X e Z.

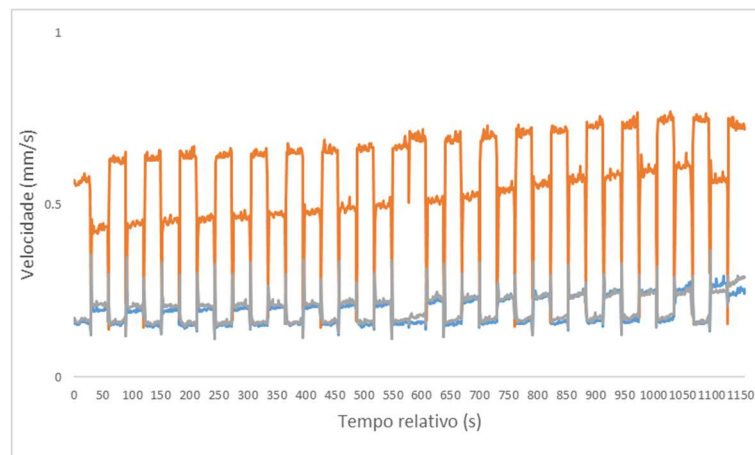


a)

Resultados e Discussão



b)



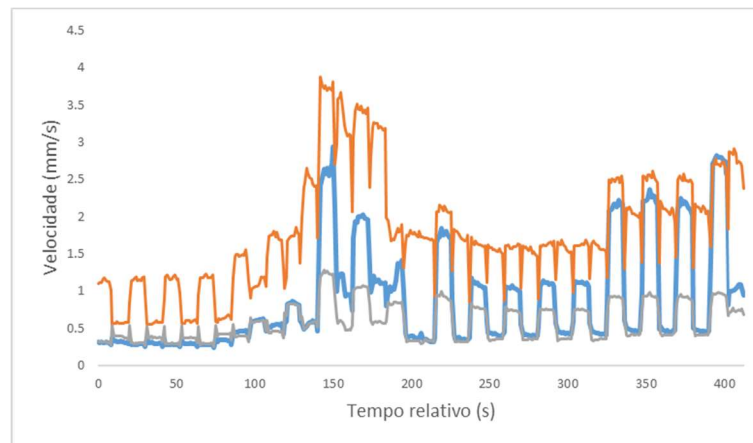
c)

Figura 58 – Valores de vibração durante a operação de fresagem da ferramenta 233: a) V1F3A1, b) V1F2A1 e c) V1F1A1 (— Eixo X; — Eixo Y; — Eixo Z).

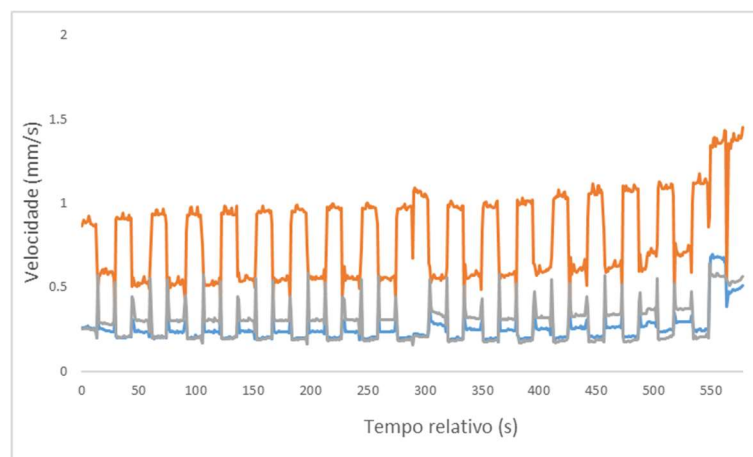
A Figura 59 apresenta os valores de vibração registados para os testes com uma velocidade de corte de 80 m/min. Analisando a Figura 59 a), pode ser observado que após 90 segundos, ocorre um abrupto aumento no valor de vibração obtido, para todos os eixos, devido à falha catastrófica de todas as arestas de corte da ferramenta. Imediatamente após, verificou-se uma redução na amplitude de vibração, que pode ser atribuído ao fim da primeira operação de fresagem e início da segunda. Na marca dos 200 segundos, o sinal de vibração diminui lentamente devido à acumulação de desgaste na ferramenta de corte, onde demonstrou sinais de abrasão, suavizando os contornos da aresta de corte. O aumento súbito de vibração no fim do ensaio foi causado pela fratura de uma das arestas de corte. Novamente, a seguir à fratura, a diferença de vibração entre fresagem concordante e discordante para o eixo Y diminuiu significativamente.

O aumento da vibração no eixo Z foi bastante menos pronunciado, especialmente em fresagem concordante. Em fresagem concordante os eixos X e Z demonstraram valores de vibração similares, enquanto em fresagem discordante o eixo X obteve valores mais elevados. Antes do

aumento súbito da vibração, os eixos X e Z apresentaram valores idênticos de vibração em ambos os métodos de fresagem. Analisando a Figura 59 b), pode ser observado que este teste se comportou de uma maneira similar ao teste V1F2A1 em termos de variação da vibração, onde existe um pequeno aumento dos valores de vibração ao longo da fresagem, com um aumento abrupto de amplitude no fim, possivelmente causado por lascagem das arestas de corte da ferramenta.



a)



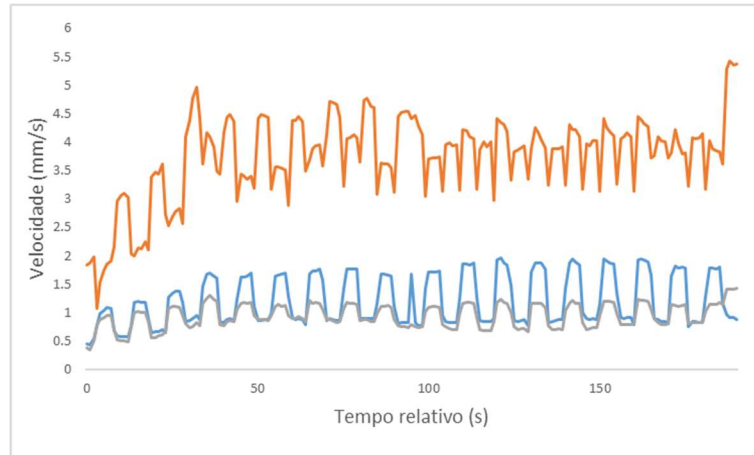
b)

Figura 59 - Valores de vibração durante a operação de fresagem da ferramenta 233: a) V2F2A1 e b) V2F1A1 (— Eixo X; — Eixo Y; — Eixo Z).

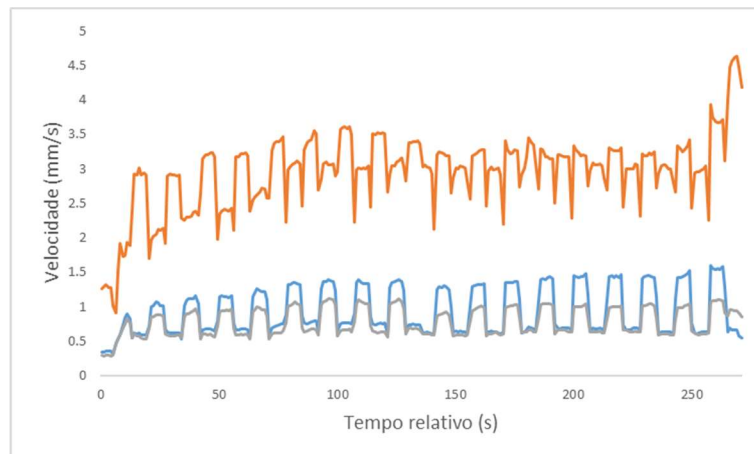
A Figura 60 apresenta os valores de vibração registados para os testes com uma velocidade de corte de 120 m/min. Analisando a Figura 60 a) e Figura 60 b), pode ser observado que ambos os ensaios obtiveram aumentos repentinos de vibração no início do teste, por volta dos 10 segundos, com o teste V3F3A1 estabilizando a níveis superiores de amplitude. Analisando a condição da ferramenta após a primeira operação de fresagem, foi possível observar que todas as arestas de corte possuíam várias fraturas, estando este aspeto apresentado na Figura 42 c). No eixo Y houve um aumento progressivo na amplitude das vibrações, devido ao aumento do desgaste da ferramenta, mas à medida que a ferramenta perdeu a sua aresta de corte, os valores tenderam a estabilizar e diminuir. Houve também uma diminuição progressiva entre os

Resultados e Discussão

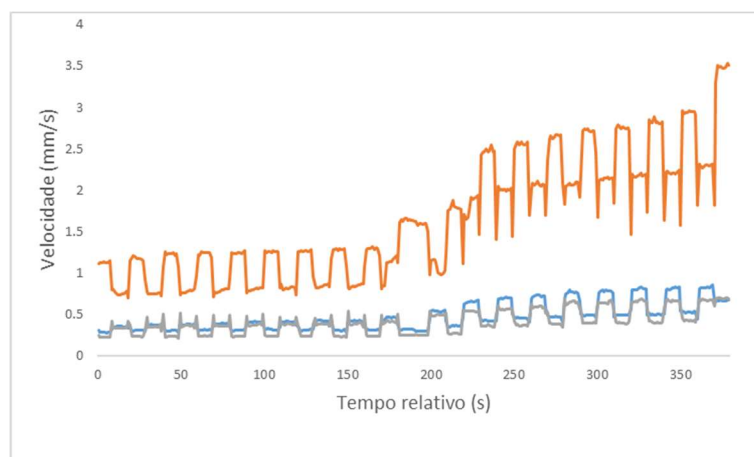
sinais registados em fresagem concordante e discordante, embora com uma magnitude inferior comparativamente aos testes com velocidades de corte inferiores. O desgaste da ferramenta teve um pequeno impacto nos sinais de vibração dos eixos X e Z, com um aumento ligeiro nos primeiros 30 segundos do teste V3F3A1. Este aumento foi mais pronunciado em fresagem discordante.



a)



b)



c)

Figura 60 - Valores de vibração durante a operação de fresagem da ferramenta 233: a) V3F3A1, b) V3F2A1 e c) V3F1A1 (— Eixo X; — Eixo Y; — Eixo Z).

O teste V3F1A1 também mostrou um aumento de vibração no início do segundo processo de fresagem, por volta dos 180 segundos, devido à lascagem de todas as arestas de corte da ferramenta, sendo que no fim do primeiro processo de fresagem as arestas de corte não apresentaram este mecanismo de desgaste, como se pode observar na Figura 61.

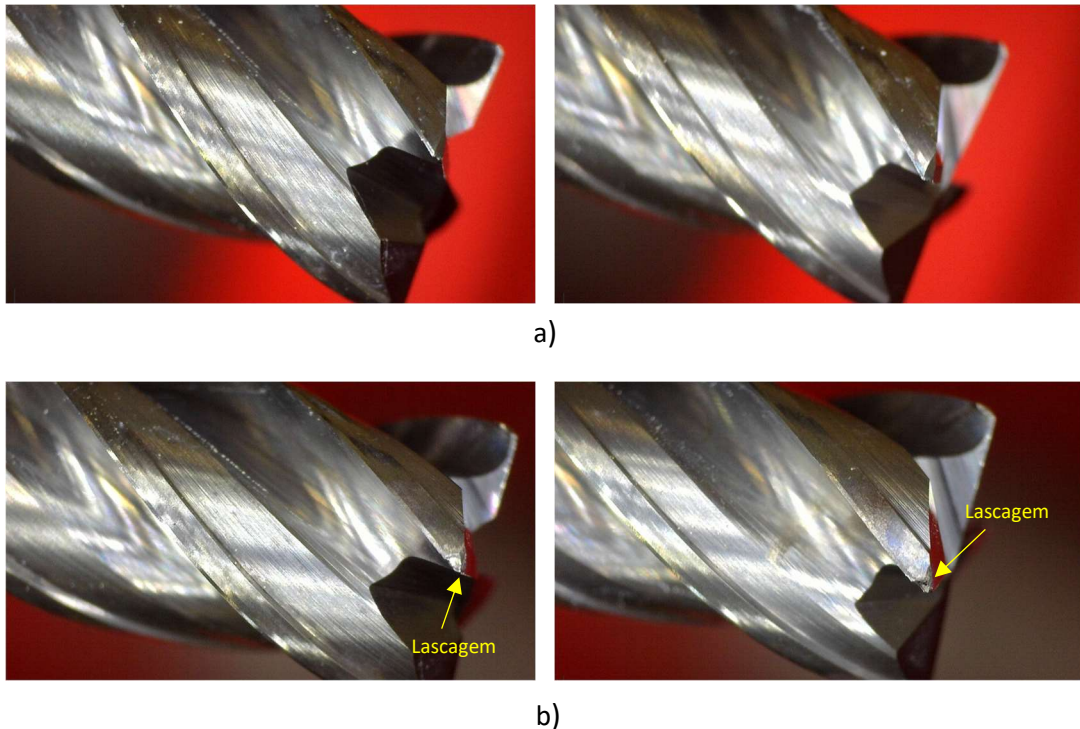


Figura 61 – Imagens do desgaste da ferramenta 233 para o ensaio V3F1A1 adquiridas através de microscopia ótica: a) após o 1º ensaio de fresagem e b) após o 2º ensaio de fresagem.

Resumidamente, foi possível observar os danos excessivos da ferramenta de corte 233, particularmente a fratura e lascagem da aresta de corte, conduziram a um aumento repentino da amplitude de vibração, sendo esta variação mais intensa no caso de fraturas. A progressão do desgaste abrasivo também influenciou negativamente a estabilidade do processo. O eixo Y desenvolveu sempre maior intensidade de vibração em fresagem concordante, enquanto para os eixos X e Z, fresagem discordante foi mais prejudicial. A ocorrência de fraturas da aresta de corte tendeu a diminuir esta diferença de vibrações entre os dois métodos de fresagem. Em todos os casos, o eixo Y produziu vibrações com maior amplitude.

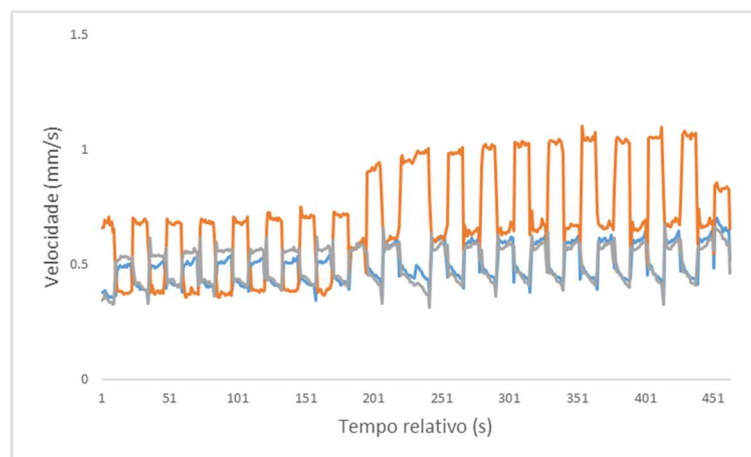
5.4.2. Ferramenta 591

A Figura 62 apresenta os valores de vibração registados para os testes com uma velocidade de corte de 40 m/min para a ferramenta 591. Analisando a Figura 62 a), é possível observar que ocorreu um aumento repentino nas vibrações no fim do primeiro processo de fresagem.

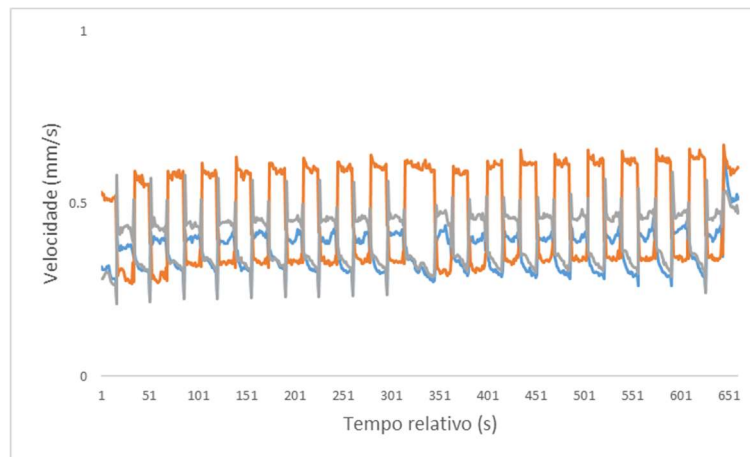
Resultados e Discussão

Examinando a condição da ferramenta após esta passagem, foi possível observar uma pequena lascagem numa das arestas de corte da ferramenta, como se pode observar na Figura 63.

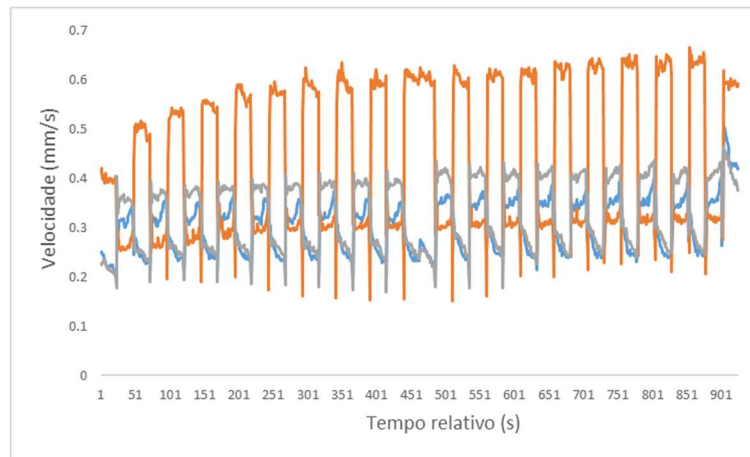
Esta variação repentina foi bastante acentuada no eixo Y, com um aumento médio de 0.2 mm/s entre operações de fresagem concordante. O eixo X não demonstrou variações significativas nos seus valores de vibração com a ocorrência deste mecanismo de desgaste. As outras arestas de corte apenas apresentaram pequenos indícios de desgaste de flanco. Após este instante, foi observado um aumento ligeiro dos valores de vibração até ao fim do teste, causado pelo aumento do desgaste de flanco no segundo processo de fresagem, visto que foi observado um aumento de desgaste entre a primeira passagem da ferramenta e a segunda. O teste V1F1A1 também apresentou um aumento abrupto de vibração no início do primeiro teste, com um aumento progressivo de amplitude até ao seu fim. Neste caso, não foram detetados indícios de desgaste excessivo nas arestas de corte desta ferramenta, apenas sendo possível detetar a lascagem de uma das arestas de corte no segundo processo de fresagem. No entanto, nesta fase da experiência não houve uma variação acentuada da vibração. Tal como foi observado para a ferramenta 233, para o eixo Y existe uma maior instabilidade na fresagem concordante, enquanto para os eixos X e Z a fresagem discordante é mais prejudicial. Hashimoto *et al.* [141] explicou que para fresagem discordante, no início do contacto entre a ferramenta de corte e a peça a maquinar, existe uma flutuação na força de corte que se transforma em vibração transiente, progredindo para vibração *chatter* devido à interferência entre a face de ataque da ferramenta e a peça a maquinar à medida que a espessura da avara aumenta. Em fresagem concordante, vibração transiente é a causa principal de vibração à conta do impacto substancial no início da operação, sendo esta energia dissipada conforme a espessura da avara diminui, estabilizando o processo. Este impacto no começo da operação pode causar os maiores níveis de vibração para o eixo Y em fresagem concordante.



a)



b)



c)

Figura 62 - Valores de vibração durante a operação de fresagem da ferramenta 591: a) V1F3A1, b) V1F2A1 e c) V1F1A1 (— Eixo X; — Eixo Y; — Eixo Z).

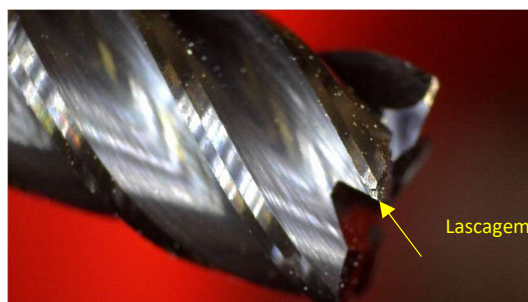
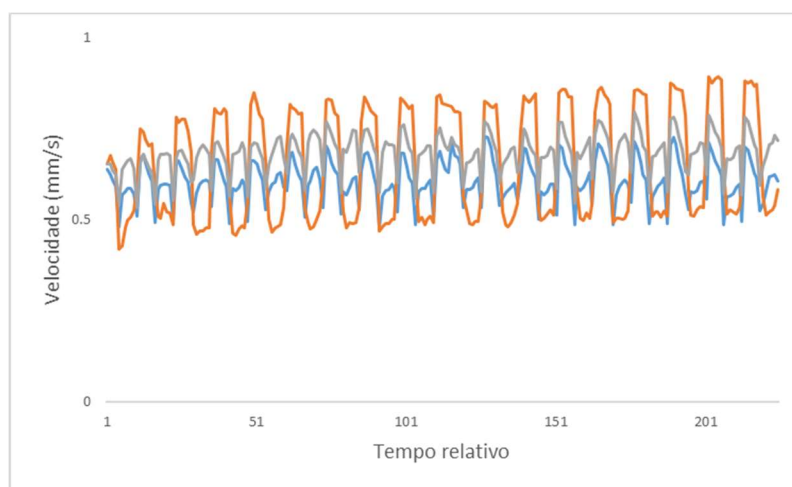


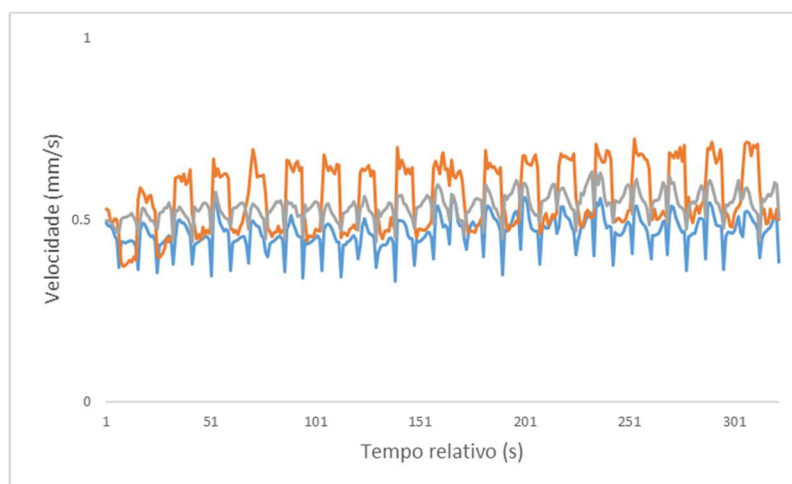
Figura 63 – Imagens do desgaste da ferramenta 591 para o ensaio V1F3A1 após o primeiro processo de fresagem.

Resultados e Discussão

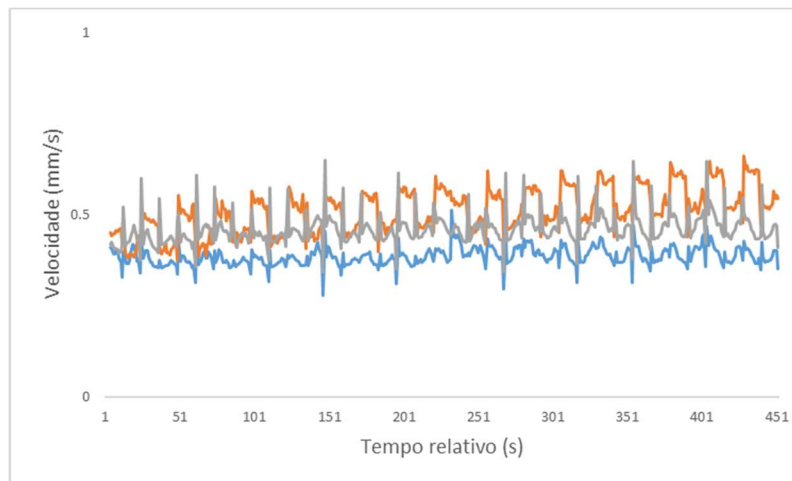
A Figura 64 apresenta os valores de vibração registados para os testes com uma velocidade de corte de 80 m/min para a ferramenta 591. Estes testes comportaram-se todos de uma maneira similar no que diz respeito à variação de vibração ao longo da fresagem, onde houve um aumento progressivo de amplitude nos três casos. Este aumento foi bastante pequeno para todos os testes, comparativamente ao registado para a velocidade de corte de 40 m/min, com uma variação máxima de amplitude 0.2 mm/s do início ao fim da fresagem. Esta reduzida variação pode ser atribuída ao bom comportamento destas ferramentas no que diz respeito ao desgaste gerado, onde apenas foi observado desgaste adesivo e pequenas quantidades de desgaste abrasivo. Nos eixos X e Y, não houve uma diferença significativa entre os dois métodos de fresagem utilizados, algo que não se observou para a velocidade de corte de 40 m/min.



a)



b)



c)

Figura 64 - Valores de vibração durante a operação de fresagem da ferramenta 591: a) V2F3A1, b) V2F2A1 e c) V2F1A1 (— Eixo X; — Eixo Y; — Eixo Z).

A Figura 66 apresenta os valores de vibração registrados para os testes com uma velocidade de corte de 120 m/min para a ferramenta 591. Analisando a Figura 66 a), é possível observar novamente um aumento drástico do sinal de vibração recolhida, por volta dos 50 segundos, que foi causado pela fratura de três das arestas de corte da ferramenta, tal como foi observado nas outras situações. O desgaste na primeira passagem da ferramenta pode ser observado na Figura 65. Como foi possível observar na ferramenta 233, o eixo X apresenta uma maior variação de vibração com a ocorrência de lascagem ou fratura das arestas de corte, comparativamente ao eixo Z. No entanto, nos casos em que não ocorre dano excessivo da ferramenta, eles apresentam valores bastante parecidos. Analisando a Figura 66 b), foi observado um comportamento bastante esporádico no início do processo, com variações repentinas no sinal de vibração. Neste caso, não foi detetado dano excessivo na ferramenta de corte, sendo apenas detetados baixos níveis de desgaste abrasivo e bastante desgaste adesivo. A criação de arestas postizas pode ter levado a esta variação, modificando a geometria da aresta de corte. No entanto, nenhum dos ensaios que mostraram também a formação deste mecanismo se comportaram da mesma forma.

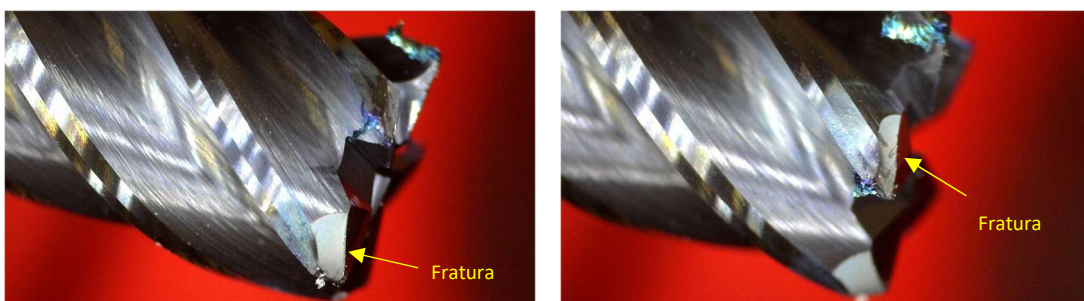
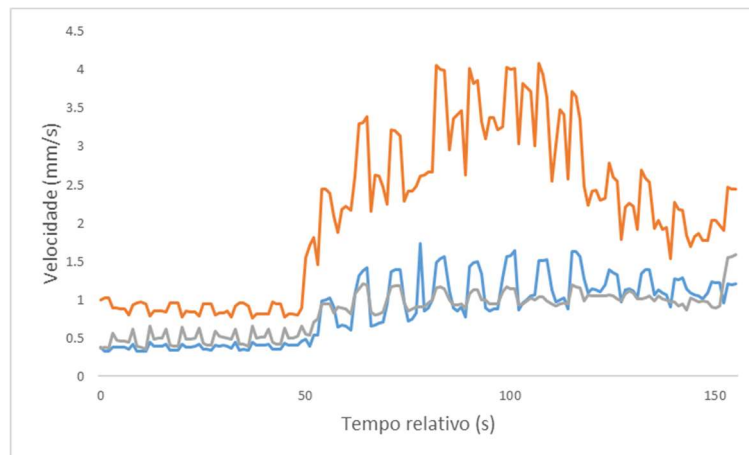
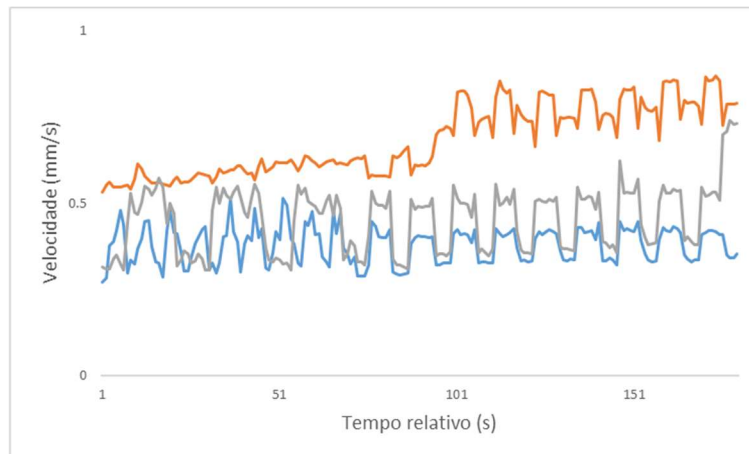


Figura 65 - Imagens do desgaste da ferramenta 591 para o ensaio V3F3A1 após o primeiro processo de fresagem.

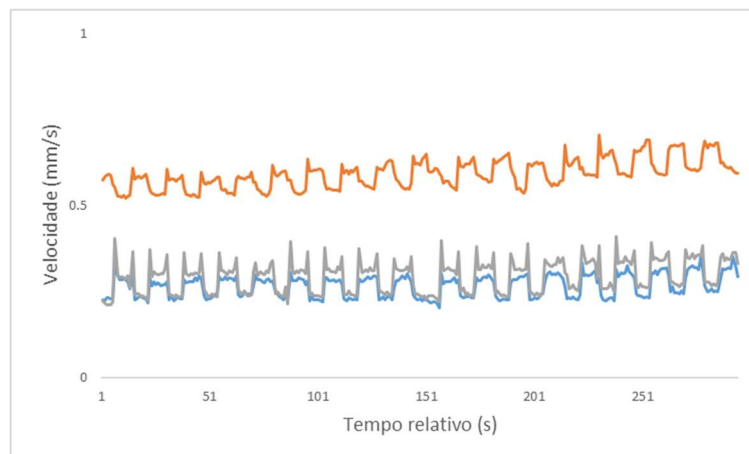
Resultados e Discussão



a)



b)



c)

Figura 66 - Valores de vibração durante a operação de fresagem da ferramenta 591: a) V3F3A1, b) V3F2A1 e c) V3F1A1 (— Eixo X; — Eixo Y; — Eixo Z).

Em suma, tal como para a ferramenta 233, o desgaste incorrido na ferramenta de corte apresentou um impacto substancial nos valores de vibração observados. Neste caso, a lascagem e fratura das arestas de corte impõem um aumento substancial à instabilidade do processo,

mas a uma menor intensidade, quando comparado com a ferramenta 233. A acumulação de desgaste adesivo e abrasivo, também levou à variação da amplitude da vibração registada. O eixo Y apresentou novamente a menor estabilidade, no entanto a sua diferença em relação aos eixos X e Z é bastante inferior, quando comparada com a diferença registada para a ferramenta 233. Em geral, esta ferramenta apresentou valores de vibração inferiores aos observados na ferramenta 233, sendo este aspeto explicado pelo menor desgaste que a ferramenta 591 sofreu. Comparando os testes V3F3A1 de ambas as ferramentas, é ainda possível notar que nas situações onde ambas sofreram elevado desgaste, levando à fratura das arestas de corte, o aumento da vibração é maior na ferramenta 233, sendo este o caso também para as situações onde ocorreu lascagem. Nos casos em que o desgaste observado nas ferramentas de corte é reduzido, com apenas desgaste adesivo e abrasivo, a ferramenta 233 apresentou na mesma valores de instabilidade superiores, com a diferença a ser reduzida, mas relevante. Esta maior instabilidade da ferramenta 233 pode ser uma das causas do maior desgaste observado em todos os ensaios e parâmetros de corte utilizados, comparativamente à ferramenta 591.

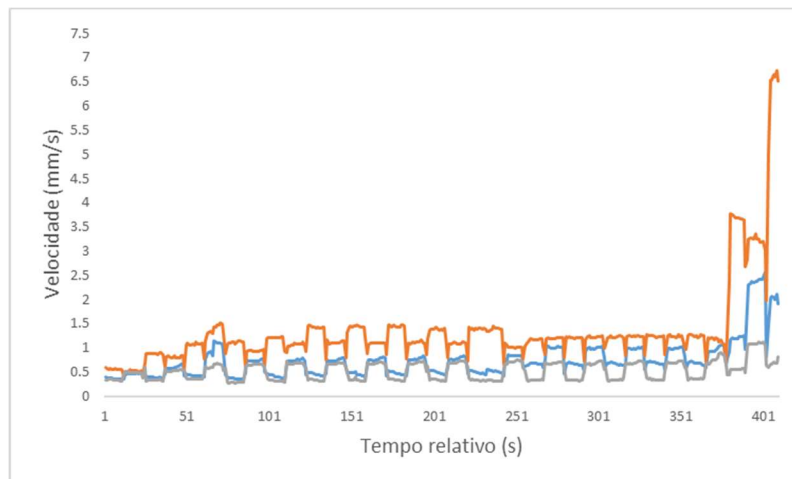
5.4.3. Ferramenta 592

A Figura 67 apresenta os valores de vibração registados para os testes com uma velocidade de corte de 40 m/min para a ferramenta 592. Analisando a Figura 67 a), foi possível constatar um aumento abrupto da amplitude de vibração no início do ensaio, por volta dos 30 segundos, sendo esta variação atribuída à lascagem das arestas de corte da ferramenta, como se pode observar na Figura 68.

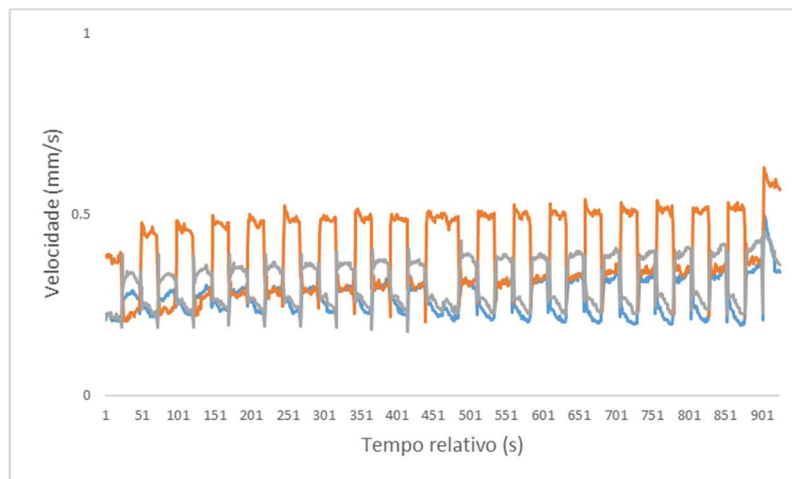
Já no fim do teste foi possível observar um aumento catastrófico da instabilidade do processo, mas este aspeto advém da quebra total da ferramenta de corte, não sendo possível finalizar o ensaio. Como também foi observado para ferramenta 233, a ocorrência de lascagem ou de fraturas nas arestas de corte, tendeu a diminuir a diferença de vibração entre os dois métodos de fresagem, especialmente para o eixo Y. Mais uma vez, o eixo X mostrou uma maior variação de amplitude com a acumulação de desgaste, comparativamente ao eixo Z.

O teste V1F1A1 demonstrou um aumento ligeiro de vibração ao longo do teste, sendo este facto novamente atribuído à acumulação de desgaste na ferramenta de corte, onde foi constatado o aumento de desgaste abrasivo da primeira passagem para a segunda. De novo, o eixo Y apresentou maior instabilidade em fresagem concordante, enquanto o eixo X e Z obtiveram maiores valores de vibração em fresagem discordante.

Resultados e Discussão



a)



b)

Figura 67 - Valores de vibração durante a operação de fresagem da ferramenta 592: a) V1F3A1 e b) V1F1A1 (— Eixo X; — Eixo Y; — Eixo Z)

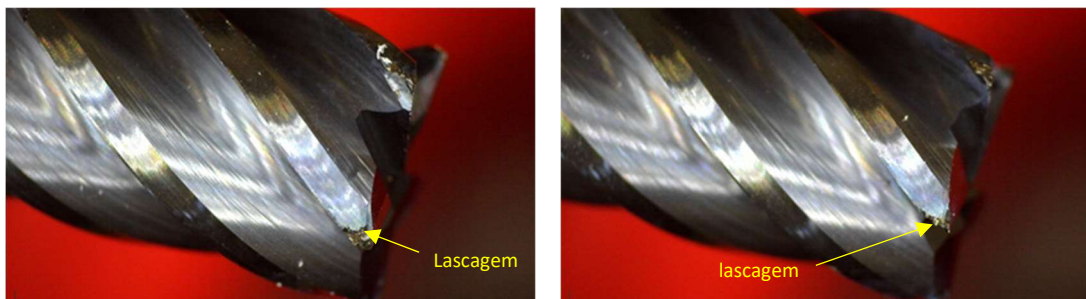
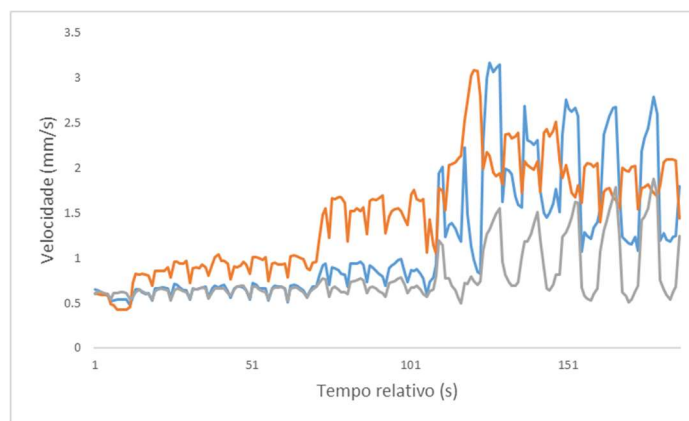


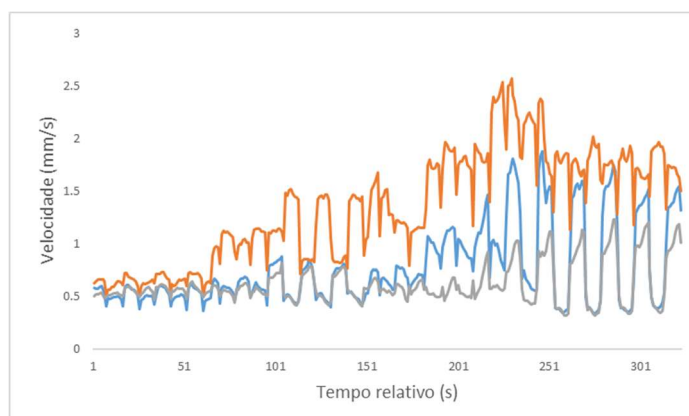
Figura 68 - Imagens do desgaste da ferramenta 592 para o ensaio V1F3A1 após o primeiro processo de fresagem.

A Figura 69 apresenta os valores de vibração registrados para os testes com uma velocidade de corte de 80 m/min para a ferramenta 592. Analisando a Figura 69 a) e b), foi possível verificar

variações da vibração, tanto negativas como positivas, ao longo de todos os ensaios de fresagem. No fim do primeiro processo de fresagem, foi observada lascagem severa em algumas das arestas de corte com outras a demonstrar fraturas, sendo o teste V2F3A1 o mais afetado. Já no segundo processo de fresagem, ocorreu a quebra total da ferramenta no teste V2F3A1, onde foi detetado novamente um aumento significativo de instabilidade, no entanto bastante inferior ao que foi observado no teste V1F3A1. Aqui, foi possível também observar um aumento excessivo da vibração no eixo X, algo que também foi constatado no outro teste onde houve a quebra da ferramenta. Esta ferramenta de corte também mostrou um comportamento bastante pior a elevados níveis de instabilidade, apresentando a quebra da ferramenta a níveis máximos de vibração inferiores aos observados na ferramenta 233, onde não houve quebra da ferramenta, apenas fratura das arestas de corte. O teste V2F2A1 também mostrou indícios de início de quebra da ferramenta, já que apresentou no final da segundo passagem, níveis de desgaste bastante similares aos encontrados no teste V2F3A1 no final da primeira passagem. Analisando a Figura 69 c), pode-se observar um aumento ligeiro da vibração ao longo do teste, visto que não houve a presença de lascagem ou fratura na ferramenta, apenas manifestando desgaste adesivo e abrasivo.

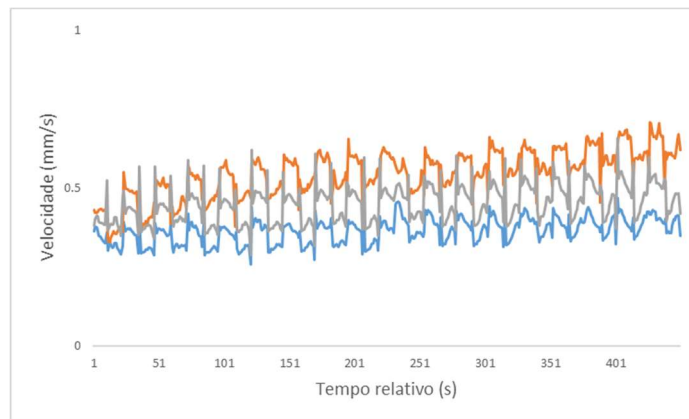


a)



b)

Resultados e Discussão

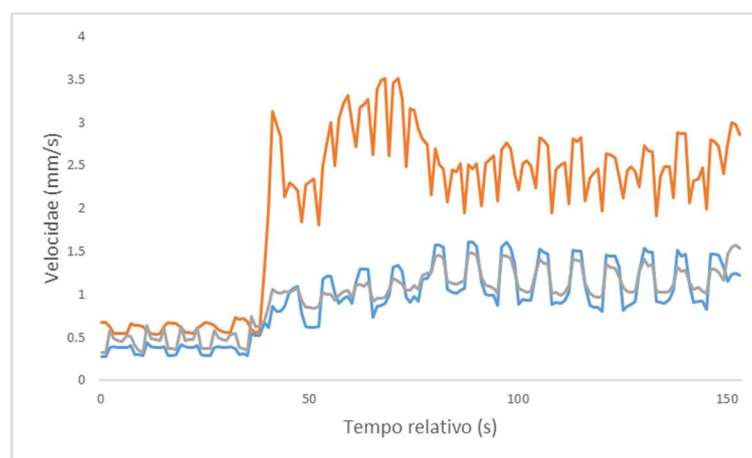


c)

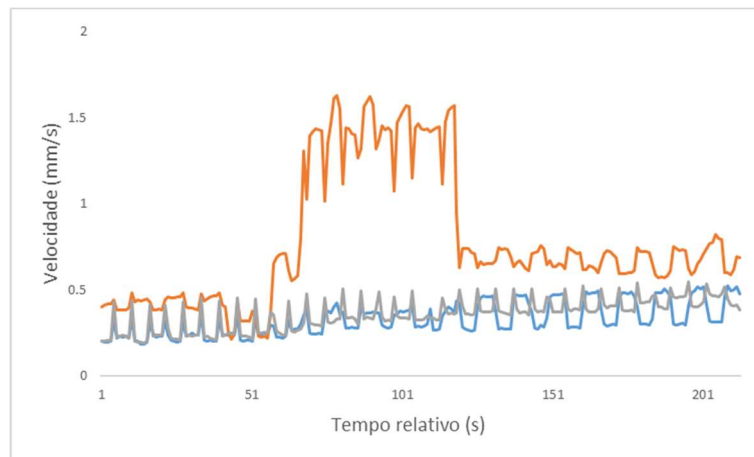
Figura 69 - Valores de vibração durante a operação de fresagem da ferramenta 592: a) V2F3A1, b) V2F2A1 e c) V2F1A1 (— Eixo X; — Eixo Y; — Eixo Z).

A Figura 70 apresenta os valores de vibração registados para os testes com uma velocidade de corte de 120 m/min para a ferramenta 592. Os testes V3F3A1 e V3F2A1 mostraram um aumento de vibração por volta dos 50 segundos, sendo o aumento do V3F3A1 bastante mais elevado. Após esta variação de vibração houve uma diminuição da amplitude observada, particularmente na zona do fim da primeira passagem e início da segunda. Este aumento para o teste V3F3A1 pode ser atribuído à fratura das suas arestas de corte, enquanto para o teste V3F2A1 ocorreu apenas lascagem de baixa intensidade. Este desgaste pode ser observado na Figura 71.

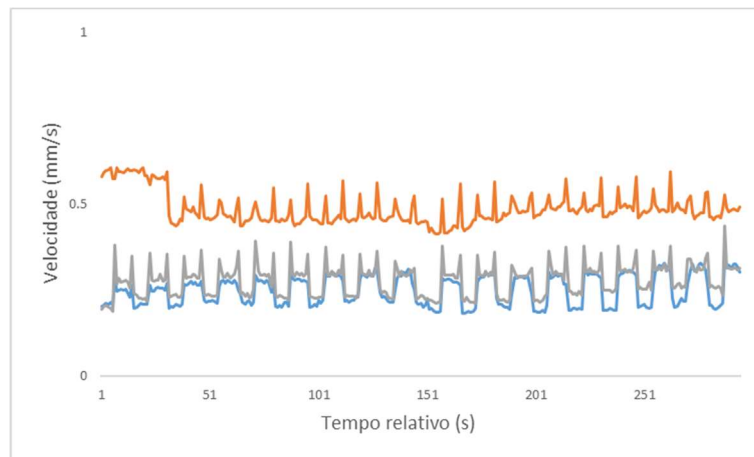
A diminuição da vibração no início do segundo processo de fresagem, pode ser atribuída ao desgaste abrasivo das zonas apresentadas na Figura 71, onde houve a suavização dos seus contornos, aumentando a sua área de contacto com a peça a maquinar, assim diminuindo a instabilidade do processo. O teste V3F1A1 não demonstrou um aumento significativo de vibração ao longo do teste, visto que o desgaste observado nas suas arestas de corte foi bastante reduzido.



a)

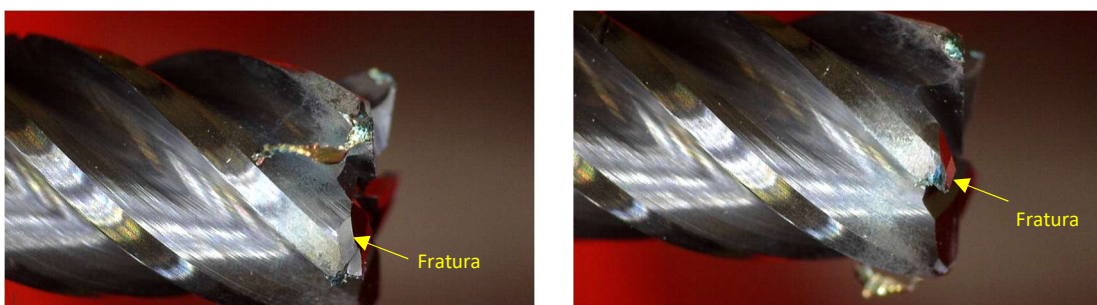


b)

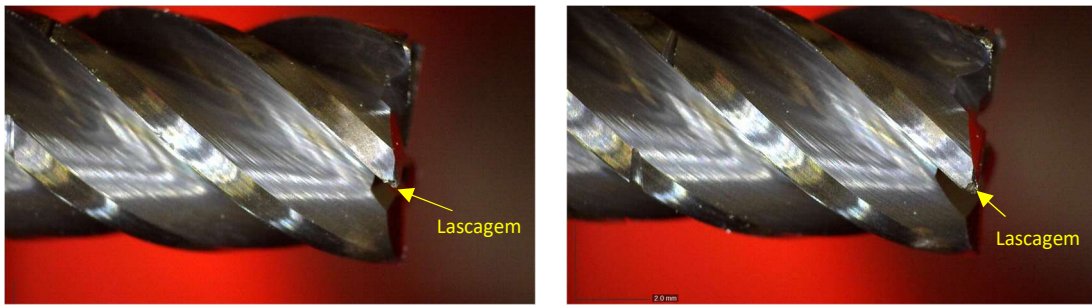


c)

Figura 70 - Valores de vibração durante a operação de fresagem da ferramenta 592: a) V3F3A1, b) V3F2A1 e c) V3F1A1 (— Eixo X; — Eixo Y; — Eixo Z).



a)



b)

Figura 71 - Imagens do desgaste da ferramenta 592 para o primeiro processo de fresagem: a) V3F3A1 e b) V3F2A1.

Resumidamente, esta ferramenta de corte mostrou um comportamento similar às outras duas ferramentas de corte, com a acumulação de desgaste a aumentar a instabilidade do processo e a progressão do desgaste abrasivo em situações onde ocorreu lascagem e fratura das arestas de corte a diminuir a amplitude das vibrações. Esta ferramenta apresentou valores de vibração bastante similares aos encontrados na ferramenta 591, especialmente nos casos onde houve reduzido desgaste nas ferramentas de corte. No entanto, a ferramenta 233 apresentou alterações na amplitude de vibração bastante superiores em casos de lascagem e fratura da ferramenta, comparativamente à ferramenta 592. A ferramenta 592 foi a única a apresentar uma quebra total, contudo esta quebra aconteceu a valores de vibração inferiores aos registados em alguns testes das outras ferramentas, o que mostra que esta ferramenta apresenta uma maior suscetibilidade a altos valores de vibração. Foi também observada uma elevada correlação entre o desgaste acumulado na ferramenta e a sua instabilidade, visto que os testes que mostraram o maior desgaste na aresta de corte apresentaram também os maiores valores de vibração, enquanto os testes com a menor intensidade de desgaste mostraram a maior estabilidade. An *et al.* [121] estudou a correlação entre valores de força de corte e desgaste de flanco da ferramenta de corte na fresagem de um aço de alta resistência, onde conclui que existe uma relação bastante evidente entre estes dois parâmetros, sendo obtida uma correlação média de 96%. A análise da evolução dos valores de vibração ao longo do processo, mostrou ser um excelente método de averiguação da condição física da ferramenta de corte, sendo possível detetar a ocorrência de desgaste excessivo e da acumulação de desgaste na ferramenta de corte. Geralmente, a análise dos valores de vibração do processo de fresagem demonstra ser um bom método de monitorização do fim de vida da ferramenta de corte [142].

5.5. Análise crítica global e recomendação da melhor ferramenta e conjunto de parâmetros

Em geral, pela análise executada e pelos fatores discutidos acima, foi possível concluir que as três ferramentas de corte apresentaram desempenhos diferentes para cada condição de ensaio, onde nenhuma das ferramentas demonstrou uma melhor performance em todas as

situações testadas e para os três parâmetros testados, com certas ferramentas a apresentarem melhores valores em certos casos e piores em outros.

O aumento do avanço por dente levou sempre a valores superiores de desgaste, instabilidade e rugosidade superficial, originando também aumentos na intensidade dos mecanismos de desgaste observados. Visto isto, a utilização de avanço por dente de 0,1 mm/dente acarreta sempre elevados valores de desgaste e instabilidade às ferramentas de corte, não sendo aconselhada a sua utilização, particularmente para as ferramentas 233 e 592.

O aumento da velocidade de corte não mostrou uma influência igual para cada ferramenta de corte e cada aspeto estudado, melhorando o comportamento das ferramentas em relação ao desgaste, estabilidade e rugosidade em certos casos, e piorando noutros.

No que diz respeito ao desgaste observado nas ferramentas de corte, a ferramenta 591 claramente apresentou o melhor rendimento, com valores de desgaste de flanco inferiores em todos os testes realizados, comparativamente às outras duas ferramentas. Este facto foi ainda mais evidente a valores de velocidade de corte inferiores e na combinação de valores de velocidade de corte baixos e avanço por dente altos. Em termos de mecanismos de desgaste, também apresentou a menor quantidade de desgaste abrasivo, especialmente nos testes com velocidade de corte de 80 m/min e 120 m/min. Também não apresentou lascagem ou fratura das suas arestas de corte, com exceção do teste com os valores mais severos de velocidade de corte e avanço por dente. No entanto, foram observadas quantidades significativas de desgaste adesivo nas suas arestas de corte, em quantidades similares ao encontrado nas outras ferramentas de corte. A ferramenta 233 apresentou o pior desempenho em termos de desgaste acumulado, contudo com valores semelhantes à ferramenta 592. O facto da ferramenta 233 apresentar apenas quatro dentes de corte pode ter agravado a quantidade de desgaste observado, já que cada dente possuiu uma maior carga de trabalho, comparativamente às outras ferramentas de corte, acelerando assim a deterioração das suas arestas de corte [132]. No entanto, a sua configuração geométrica e o revestimento utilizado podem ter contribuído para a obtenção de menor desgaste adesivo no revestimento.

No que se refere à estabilidade do processo de fresagem, a ferramenta 591 apresentou novamente o melhor desempenho, com valores de vibração razoáveis na maior parte dos casos. Este foi o caso, devido ao reduzido desgaste observado na ferramenta de corte, já que nos casos onde as outras ferramentas obtiveram valores de desgaste de flanco similares, os valores de vibração observados entre as ferramentas foram bastante similares. A ferramenta 233 apresentou valores de amplitude de vibração bastante mais elevados, comparativamente às outras ferramentas, devido ao desgaste ocorrido nesta ferramenta, elevando a sua instabilidade consideravelmente.

Quanto aos valores de rugosidade registados, como já foi referido no subcapítulo 5.2, as ferramentas mostraram desempenhos bastante semelhantes, com a ferramenta 233 a obter superfícies com melhor qualidade para valores de velocidade de corte inferiores. Aqui pode-se notar que o desgaste incorrido na ferramenta de corte não apresentou uma correlação muito boa com a rugosidade superficial obtida, com a ferramenta 233 a obter valores de rugosidade superficial similares às outras duas ferramentas, quando obteve um pior desempenho no que

Resultados e Discussão

diz respeito ao desgaste. Este facto pode estar ligado à menor quantidade de desgaste adesivo gerado na ferramenta 233, onde foi observada uma menor intensidade de formação de arestas postizas de corte. No entanto, analisando a correlação entre desgaste e rugosidade em cada ferramenta, foi possível observar um aumento da rugosidade superficial com o aumento do desgaste observado.

Analisando o desempenho global das ferramentas de corte, é possível concluir que a ferramenta 591 é a mais indicada para a fresagem deste tipo de material, visto que apresentou valores inferiores de desgaste, levando a um processo de fresagem mais estável e produzindo na maior parte dos casos superfícies com bom acabamento superficial. A ferramenta 233 mostrou ser a menos adequada para a fresagem deste material, com elevado desgaste em vários dos testes e valores bastante altos de instabilidade (vibração).

No que diz respeito às melhores combinações de parâmetros de ensaio para a ferramenta 591, a combinação de velocidade de corte de 120 m/min e avanço por dente de 0.1 mm/dente impõem demasiado desgaste à ferramenta, e por isso, não deve ser utilizada. No entanto todas as outras combinações levaram a valores de desgaste aceitáveis. A utilização de velocidades de corte de 40 m/min confere tempos elevados à fresagem, diminuindo a produtividade do processo, não mostrando variações significativas no desgaste e rugosidade registados, sendo obtidos valores de rugosidade superior em alguns casos, comparativamente às outras velocidades de corte. Em termos da melhor mistura de condições de ensaio, a combinação de velocidade de corte 120 m/min e 0.07 mm/dente fornece ao processo a melhor mistura de desgaste, estabilidade e qualidade da superfície maquinada, também oferecendo ao processo uma elevada produtividade, sendo esta a combinação recomendada na fresagem do aço W 1.2711. A combinação de 80 m/min e 0.1 mm/dente também apresenta muito boas qualidades, contudo apresenta valores de rugosidade ligeiramente superiores, com uma produtividade inferior.

6. Conclusão

No presente capítulo também irão ser apresentadas todas as conclusões retiradas acerca de cada ferramenta de corte, tal como serão discutidas propostas para trabalhos futuros.

6.1. Contributo científico

Esta dissertação focou-se no estudo do desempenho de três diferentes ferramentas sólidas de carboneto de tungsténio revestidas por PVD, na fresagem de um aço pré-tratado W 1.2711, sendo este aço bastante difícil de maquinar, dado a sua elevada dureza. Duas das ferramentas de corte apresentaram geometria idêntica, com o mesmo revestimento. A outra ferramenta apresentou uma diferente geometria e revestimento. Neste caso, foi analisado o desgaste incorrido em cada ferramenta de corte, a qualidade da superfície maquinada e a instabilidade observada ao longo dos vários testes. Foi também investigada a influência de certos parâmetros de corte, nomeadamente a velocidade de corte, avanço por dente e profundidade de corte. Também foi realizada uma análise comparativa entre as diferentes ferramentas, de modo a determinar a ferramenta com as melhores características na fresagem de W 1.2711, tal como a melhor combinação de parâmetros de fresagem. As três ferramentas de corte utilizadas, foram identificadas com um código específico. A ferramenta 233, apresenta uma geometria com quatro arestas de corte e um diâmetro de 6 mm, onde foi depositado o revestimento AlCrN, com uma espessura média de 1.35 μm . As ferramentas 591 e 592, apresentam ambas cinco dentes de corte, diâmetro de 6 mm e um revestimento TiAlN. No entanto, o revestimento da ferramenta 591 apresenta uma espessura de 2.81 μm , enquanto a ferramenta 592 apresenta um revestimento com uma espessura de apenas 1.80 μm . De seguida, serão apresentados as conclusões obtidos para cada ferramenta de corte:

- Ferramenta 233 - No que diz respeito ao desgaste observado nos diversos ensaios, foram observados valores de desgaste de flanco bastante elevados em certos ensaios, com outros ensaios a mostrar níveis razoáveis de desgaste. Neste caso, o aumento do avanço por dente mostrou um impacto bastante negativo no desgaste incorrido, particularmente a velocidades de corte inferiores. A velocidade de corte não apresentou uma influência linear, com o seu aumento a piorar a condição da ferramenta de corte em certas ocasiões e a melhorar noutras. Quanto aos mecanismos principais de desgaste, foi observado desgaste adesivo e abrasivo em todos os ensaios realizados, com a formação de arestas postiças em certos casos. O aumento do avanço por dente e velocidade de corte levou sempre a um aumento da quantidade e

Conclusão

intensidade destes mecanismos. Nos testes com valores superiores de avanço por dente e velocidade de corte, também foi possível observar lascagem das arestas de corte e fissuração. Quanto à instabilidade observada, foram detetados elevados valores de vibração em vários dos testes efetuados, particularmente nos testes que obtiveram valores de desgaste de flanco elevados. Este facto advém do aumento drástico nos valores de vibrações obtidos, com a ocorrência de lascagem ou fratura das arestas de corte da ferramenta. O aumento progressivo do desgaste adesivo e abrasivo, também originou um aumento reduzido da amplitude de vibrações ao longo dos testes. O aumento do avanço por dente, novamente apresentou uma influência negativa na instabilidade do processo. O eixo Y mostrou os maiores valores de vibração, particularmente em fresagem concordante. Esta ferramenta produziu superfícies com boa qualidade na maior parte dos casos, com exceção do teste V3F3A1. O aumento do avanço por dente aumentou os valores médios de R_a , enquanto a variação da velocidade de corte apresentou um pequeno impacto quando utilizados valores de avanço por dente inferiores. O aumento da velocidade de corte piorou a qualidade superficial, para valores de avanço por dente de 0.07 e 0.1 mm/dente.

- Ferramenta 591 - Tal como foi observado para as outras ferramentas de corte, o aumento do avanço por dente apresentou um impacto negativo nos três parâmetros estudados. No entanto, esta influência foi mais pronunciada no caso dos valores de rugosidade obtidos, já que houve pouca variação no desgaste de flanco registado entre os diferentes ensaios. Quanto aos valores de desgaste de flanco em concreto, esta ferramenta apresentou pouco desgaste nas suas arestas de corte, sendo o teste V3F3A1 o único caso onde foram observados valores excessivos de desgaste. O aumento da velocidade de corte também apresentou uma influência reduzida no desgaste registado. Quanto aos mecanismos de desgaste observados, estes foram maioritariamente desgaste adesivo, podendo ser detetado desgaste abrasivo nos testes com velocidade de corte de 40 m/min, no entanto com intensidade bastante reduzida comparativamente às outras ferramentas. Contudo, esta ferramenta apresentou quantidades de desgaste adesivo semelhantes ao observado nas outras ferramentas, sendo a sua intensidade superior em certas condições de ensaio. Os testes com os valores máximos de velocidade de corte e avanço por dente, também apresentou lascagem de todas as arestas de corte, com algumas a sofrer fraturas. Devido ao menor desgaste registado, os valores de instabilidade observados nesta ferramenta de corte também foram bastante reduzidos, com um aumento de vibração ao longo dos testes, à medida que o desgaste acumulado na ferramenta de corte progrediu. Neste caso, este aumento pode ser atribuído ao aumento da intensidade do desgaste adesivo. Foram obtidos valores de rugosidade superficial aceitáveis, com valores de R_a superiores a velocidades de corte e avanço por dente mais elevadas, sendo a acumulação de desgaste também prejudicial para a obtenção de superfícies de alta qualidade.
- Ferramenta 592 - Em termos de desgaste de flanco, a ferramenta 592 registou valores semelhantes à ferramenta 233, no entanto registou um melhor desempenho a altos

Conclusão

valores de velocidades de corte e baixos avanços por dente. O aumento do avanço por dente e da velocidade de corte apresentaram sempre um impacto negativo no desgaste observado. Como principais mecanismos de desgaste esta ferramenta, apresentou desgaste adesivo, abrasivo e lascagem. Tal como para as outras ferramentas o aumento das condições de ensaio elevou a severidade do dano observado. Nos testes com avanço por dente de 0.1 mm/dente ocorreu também fissuração e em dois dos casos a eventual quebra total da ferramenta de corte. Nesta ferramenta em concreto, o uso de valores de avanço por dente elevados impôs sempre elevado desgaste à ferramenta, não sendo recomendado o seu uso com estas condições de ensaio. Quanto aos valores de vibração recolhidos, esta ferramenta apresentou um melhor desempenho, comparativamente à ferramenta 233, onde apresentou menores aumentos perante a acumulação de desgaste, particularmente nos casos de lascagem e fratura das arestas de corte. Dito isto, esta ferramenta não lidou bem com aumentos bruscos da vibração, com a quebra da ferramenta a ocorrer a baixos níveis de vibração, comparativamente ao que foi registado na ferramenta 233. Por fim, obteve superfícies com qualidade semelhante às outras ferramentas, com o aumento do avanço por dente a aumentar os valores de rugosidade média observados. Também foi observada uma boa correlação entre a rugosidade superficial e o desgaste observado na ferramenta de corte. O aumento da velocidade de corte levou a peças maquinadas com melhor qualidade superficial.

Em geral, o avanço por dente apresentou uma influência mais elevada nos três parâmetros estudados, comparativamente à influência da velocidade de corte. Este aspeto é relevante já que, os ensaios com avanço por dente 0.1 mm/dente demonstraram consistentemente os maiores valores de desgaste para qualquer velocidade de corte, enquanto os ensaios com velocidade de corte de 120 m/min, apresentaram em certos casos valores bastante reduzidos de desgaste, especialmente quando combinados com baixos valores de avanço por dente.

Foi também possível concluir que, a implementação da trajetória em espiral contribui para diminuição do desgaste e vibrações observadas, sendo este o caso para as três ferramentas de corte. No entanto, não foi possível constatar o mesmo fenómeno, no que diz respeito à rugosidade superficial, com os testes em espiral a obter valores de R_a e R_z semelhantes, e valores de R_{max} bastante superiores, comparativamente aos testes com valores de velocidade de corte a avanço por dente iguais, mas trajetória intermitente.

Comparando o desempenho global das ferramentas de corte, foi possível concluir que a ferramenta 591 mostrou ser a melhor escolha na fresagem deste material, com valores de desgaste e instabilidade bastante baixos, significativamente inferiores aos registados com as outras ferramentas, conseguindo obter superfícies com valores de rugosidade razoáveis.

Quanto à melhor combinação de parâmetros de corte para a ferramenta 591, a mistura de uma velocidade de corte de 120 m/min e avanço por dente de 0.07 mm/dente foi o ensaio que proporcionou ao processo o melhor conjunto de características em todos os parâmetros estudados.

A escrita desta dissertação ainda resultou na elaboração de um artigo:

Conclusão

- Do estudo das vibrações geradas no processo de fresagem foi elaborado um artigo acerca da análise da evolução das vibrações ao longo da maquinagem, focando-se na explicação e causa da variação na amplitude da vibração observada e recorrentes peculiaridades.

6.2. Sugestão de trabalhos futuros

Durante a realização desta dissertação e da análise de todos os dados obtidos, foram surgindo aspetos que poderiam ser melhorados, e pontos que poderiam ser estudados mais a fundo. Estes aspetos foram:

- Analisar mais aprofundadamente a influência do método de fresagem no desgaste observado, tal como o impacto e as diferenças entre fresagem concordante e discordante;
- Analisar o impacto da utilização do revestimento na ferramenta de corte, comparando o seu comportamento a ferramentas não revestidas;
- Aferir o impacto do número de arestas de corte no desempenho da ferramenta, utilizando ferramentas com diferentes geometrias e o mesmo revestimento;
- Analisar mais detalhadamente a influência da profundidade de corte, particularmente utilizando valores elevados de velocidade de corte e avanço por dente.

Referências

- [1] V. Sousa, F. J. G. Silva, J. S. Fecheira, H. M. Lopes, R. P. Martinho, and R. B. Casais, "Assessing the cutting forces in machining processes: An overview," in *Procedia Manufacturing*, Elsevier B.V., 2020, pp. 787–794. doi: 10.1016/j.promfg.2020.10.110.
- [2] V. F. C. Sousa and F. J. G. Silva, "Recent advances in turning processes using coated tools—A comprehensive review," *Metals*, vol. 10, 2020, 120. doi: 10.3390/met10020170.
- [3] V. F. C. Sousa and F. J. G. Silva, "Recent advances on coated milling tool technology—a comprehensive review," *Coatings*, vol. 10, no. 3, 2020, doi: 10.3390/coatings10030235.
- [4] R. P. Martinho, F. J. G. Silva, and A. P. M. Baptista, "Wear behaviour of uncoated and diamond coated Si₃N₄ tools under severe turning conditions," *Wear*, vol. 263, no. 7-12, pp. 1417–1422, 2007, doi: 10.1016/j.wear.2007.01.048.
- [5] 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, 2021, doi: 10.1016/j.wear.2021.203695.
- [6] S. Coromant (2010), "Manual técnico de usinagem, torneamento, fresamento, furação, mandrilamento e sistemas de fixação", Sandvik Coromant, São Paulo – Brasil.
- [7] Y. Luo, X. chun Wu, H. bin Wang, and Y. an Min, "A comparative study on non-quenched and quenched prehardened steel for large section plastic mould," *J Mater Process Technol*, vol. 209, no. 14, pp. 5437–5442, 2009, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2009.04.019.
- [8] Groover, M.P. (2019), "Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems, 7th Edition". John Wiley & Sons, Nova Jersey - EUA. ISBN: 978-1-119-47521-7.
- [9] R. Batista, "Tendências do Corte por Arranque de Apara-Maquinagem," Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2010.
- [10] J. R. Davis, "Metals Handbook, ninth Edition, Vol. 16: Machining", (1989) ASM International, Materials Park, Ohio-EUA. ISBN 10: 0871700220, ISBN 13: 9780871700223.
- [11] F. R. Nogueira *et al.*, "A Comparative Study on the Wear Mechanisms of Uncoated and TiAlTaN-Coated Tools Used in Machining AMPCO® Alloy," *Coatings*, vol. 14, no. 1, p. 4, 2023, doi: 10.3390/coatings14010004.
- [12] W. Sun, C. zheng Duan, and W. dian Yin, "Chip formation mechanism in machining of Al/SiCp composites based on analysis of particle damage," *J Manuf Process*, vol. 64, pp. 861–877, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.jmapro.2021.02.032.
- [13] 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 Ti6242S and Ti-555 titanium alloys," *Int J Refract Metals Hard Mater*, vol. 86, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.ijrmhm.2019.105091.
- [14] V. F. C. Sousa, F. Fernandes, F. J. G. Silva, R. D. F. S. Costa, N. Sebbe, and R. C. M. Sales-Contini, "Wear Behavior Phenomena of TiN/TiAlN HiPIMS PVD-Coated Tools on Milling Inconel 718," *Metals*, vol. 13, no. 4, 2023, doi: 10.3390/met13040684.
- [15] 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*, vol. 11, no. 16, p. 7762, 2021, doi: 10.3390/app11167762.
- [16] J. P. Davim, "Machinability of Advanced Materials", John Wiley & Sons, Nova Jersey – EUA (2014). ISBN:9781848213968,

Referências

- [17] V. F. C. Sousa, F. J. G. Silva, J. S. Fecheira, H. M. Lopes, R. P. Martinho, R. B. Casais and L. P. Ferreira, "Cutting Forces Assessment in CNC Machining Processes: A Critical Review," *Sensors*, vol. 20, no. 16, pp. 1–26, 2020, doi: 10.3390/s20164536.
- [18] F. J. G. Silva, R. P. Martinho, L. L. Magalhães, F. Fernandes and R. C. M. Sales-Contini, "A Comparative Study of Different Milling Strategies on Productivity, Tool Wear, Surface Roughness, and Vibration," *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 8, no. 3, p. 115, 2024, doi: 10.3390/jmmp8030115.
- [19] O. Wrublak, L. Alberto Pilatti, and B. Pedroso, "Parâmetros e métodos de usinagem e sua relação com os custos do processo e o acabamento final do produto." 4º Encontro De Engenharia e Tecnologia Dos Campos Gerais, 2008.
- [20] M. Barbosa, F. J. G. Silva, C. Pimentel, and R. M. Gouveia, "A Novel Concept of CNC Machining Center Automatic Feeder," *Procedia Manuf*, vol. 17, pp. 952–959, 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.10.111.
- [21] 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: 10.1016/j.vacuum.2008.03.065.
- [22] W. Li, B. Zhou, L. Xing, H. He, X. Ni, M. Li and Z. Gong, "Influence of cutting parameters and tool nose radius on the wear behavior of coated carbide tool when turning austenitic stainless steel," *Mater Today Commun*, vol. 37, 2023, doi: 10.1016/j.mtcomm.2023.107349.
- [23] A. B. Kordabad and M. Boroushaki, "Emotional learning based intelligent controller for MIMO peripheral milling process," *Journal of Applied and Computational Mechanics*, vol. 6, no. 3, pp. 480–492, 2020, doi: 10.22055/JACM.2019.30188.1696.
- [24] G. Schneider, Jr. "Cutting-Tool Applications". ASM International, Materials Park, Ohio-EUA (2002). ISBN: 0615121918 / 9780615121918
- [25] M. Szigety, R. Bobrovsky, T. Czánová, and J. Pilc, "Study of Primary Contact in Process of Face Milling," *Advances in Manufacturing Science and Technology*, vol. 36, no. 4, 2012, doi: 10.2478v10264-012-0025-0.
- [26] J. P. Davim, "Machining: Fundamentals and recent advances". Springer London, (2008). doi: 10.1007/978-1-84800-213-5.
- [27] S. K. Harisha, G. R. Rajkumar, and V. Pawar, "Statistical Investigation of Tool Geometry for Minimization of Cutting Force in Turning of Hardened Steel," *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, pp. 11277-11282, 2018. doi: 10.1016/j.matpr.2018.02.094
- [28] S. Coromant (2010), "Manual técnico de usinagem, torneamento, fresamento, furação, mandrilamento e sistemas de fixação ", Sandvik Coromant, São Paulo – Brasil.
- [29] G. Bi, F. Wang, R. Fu, and P. Chen, "Wear characteristics of multi-tooth milling cutter in milling CFRP and its impact on machining performance," *J Manuf Process*, vol. 81, pp. 580–593, 2022, doi: 10.1016/j.jmapro.2022.07.008.
- [30] ISO 3002-1:1982 - Basic quantities in cutting and grinding: Part 1: Geometry of the active part of the cutting tools- General terms, reference systems, tool and working angles, chip breakers. - International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 1982.
- [31] ISO 3002-2:1982 - Basic quantities in cutting and grinding: Part 2: Geometry of the active part of cutting tools — General conversion formulae to relate tool and working angles. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 1982.
- [32] DIN EN ISO 4288 – Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Rules and procedures for the assessment of surface texture - International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 1996.
- [33] ISO 8688-2:1986 - Tool-life testing in milling – Part 2: End milling. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 1996

Referências

- [34] ISO 3002/4:1982 - Basic quantities in cutting and grinding: Part 4: Forces, energy, power. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 1982.
- [35] H. El-Hofy, "Fundamentals of Machining Processes: Conventional and Nonconventional Processes." 3rd Edition, (2018) CRC Press, Boca Raton, Florida, EUA. ISBN 9781138334908.
- [36] I. Iglesias, A. Sanchez, and F. J. G. Silva, "Robotic path compensation training method for optimizing face milling operations based on non-contact CMM techniques," *Robot Comput Integr Manuf*, vol. 85, p. 102623, 2024, doi: 10.1016/j.rcim.2023.102623.
- [37] A. F. V. Pedroso, N. P. V. Sebbe, F. J. G. Silva, R. D. S. G. Campilho and R. C. M. Sales-Contini, "An overview on the recent advances in robot-assisted compensation methods used in machining lightweight materials," *Robot Comput Integr Manuf*, vol. 91, p. 102844, 2025, doi: 10.1016/j.rcim.2024.102844.
- [38] F. J. G. Silva, R. P. Martinho, and A. P. M. Baptista, "Characterization of laboratory and industrial CrN/CrCN/diamond-like carbon coatings," *Thin Solid Films*, vol. 550, pp. 278–284, 2014, doi: 10.1016/j.tsf.2013.11.042.
- [39] A. Rizzo, S. Goel, M. L. Grilli, R. Inglesias, L. Jaworska and P. Novak, "The critical raw materials in cutting tools for machining applications: A review," *Metals*, vol. 13, pp. 1377, 2020. Doi: 10.3390/ma13061377.
- [40] S. V Kirsanov, "Material Cutting and Cutting Tools." (2012), Tomks Polytechnic University Publishing house, Tomsk, Russia.
- [41] F. Matos, T. R. F. Silva, V. F. C. Sousa, F. Marques, D. Figueiredo and F. J. G. Silva, "On the Influence of Binder Material in PCBN Cutting Tools for Turning Operations of Inconel 718," *Metals*, vol. 13, no. 5, p. 934, 2023, doi: 10.3390/met13050934.
- [42] S. N. Grigoriev, S. V. Fedorov, and K. Hamdy, "Materials, properties, manufacturing methods and cutting performance of innovative ceramic cutting tools - A review," *EDP Sciences*, vol. 6, 2019. doi: 10.1051/mfreview/2019016.
- [43] F. J. G. Silva, A. P. M. Baptista, E. Pereira, V. Teixeira and Q. H. Fan, "Microwave plasma chemical vapour deposition diamond nucleation on ferrous substrates with Ti and Cr interlayers," *Diam Relat Mater*, vol. 11, no. 9, pp. 1617–1622, 2002, doi: 10.1016/S0925-9635(02)00029-8.
- [44] F. J. G. Silva, A. J. S. Fernandes, F. M. Costa, A. P. M. Baptista, and E. Pereira, "A new interlayer approach for CVD diamond coating of steel substrates," *Diam Relat Mater*, vol. 13, no. 4–8, pp. 828–833, 2004, doi: 10.1016/j.diamond.2003.10.081.
- [45] M. Zeren and Ş. Karagöz, "Sintering of polycrystalline diamond cutting tools," *Mater Des*, vol. 28, no. 3, pp. 1055–1058, 2007, doi: 10.1016/j.matdes.2005.09.018.
- [46] 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.
- [47] C. Artini, M. L. Muolo, and A. Passerone, "Diamond-metal interfaces in cutting tools: A review," *J Mater Sci*, vol. 47, no. 7, pp. 3252–3264, Apr. 2012, doi: 10.1007/s10853-011-6164-6.
- [48] G. Jiang, Z. Jianguo, P. Yanan, K. Renke, N. Yoshiharu and S. Paul, "A critical review on the chemical wear and wear suppression of diamond tools in diamond cutting of ferrous metals," IOP Publishing Ltd, vol.2, 01, 2020. doi: 10.1088/2631-7990/ab5d8f.
- [49] Y. Wang, B. Mao, S. Chu, S. Chen, H. Xing and H. Zhao, "Advanced manufacturing of high-speed steels: A critical review of the process design, microstructural evolution, and engineering performance," Elsevier Editora Ltda, 2023. doi: 10.1016/j.jmrt.2023.04.269.

Referências

- [50] P. L. C. Serra, A. S. A. Furtado, J. R. De Barros, W. R. V Sampaio, and T. H. C. Costa, "A Review of Duplex Treatment Effect on High-Speed Steel Tools Thermal Conductivity And Roughness Analysis," *JMEST*, vol. 7, 2020.
- [51] A. F. V. Pedroso, N. P. V. Sebbe, R. D. F. Costa, M. L. S. Barbosa, R. C. M. Sales-Contini and F. J. G. Silva, "INCONEL® Alloy Machining and Tool Wear Finite Element Analysis Assessment: An Extended Review," *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 8, no. 1, p. 37, 2024, doi: 10.3390/jmmp8010037.
- [52] Z. Ma, X. Xu, X. Huang, W. Ming, Q. An, and M. Chen, "Cutting performance and tool wear of SiAlON and TiC-whisker-reinforced Si₃N₄ ceramic tools inside milling Inconel 718," *Ceram Int*, vol. 48, no. 3, pp. 3096–3108, 2022, doi: 10.1016/j.ceramint.2021.10.084.
- [53] X. Tian, J. Zhao, J. Zhao, Z. Gong, and Y. Dong, "Effect of cutting speed on cutting forces and wear mechanisms in high-speed face milling of Inconel 718 with Sialon ceramic tools," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 69, no. 9–12, pp. 2669–2678, Dec. 2013, doi: 10.1007/s00170-013-5206-4.
- [54] B. Rao and Y. C. Shin, "Analysis on high-speed face-milling of 7075-T6 aluminum using carbide and diamond cutters," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 41, pp. 1763-1781, 2001. doi: 10.1016/S0890-6955(01)00033-5.
- [55] S. Khatai, R. Kumar, A. Kumar Sahoo, and A. Panda, "Investigation on tool wear and chip morphology in hard turning of EN 31 steel using AlTiN-PVD coated carbide cutting tool," *Mater Today Proc*, vol. 59, pp. 1810–1816, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.04.387.
- [56] V. Nunes, F. J. G. Silva, M. F. Andrade, R. Alexandre, and A. P. M. Baptista, "Increasing the lifespan of high-pressure die cast molds subjected to severe wear," *Surf Coat Technol*, vol. 332, pp. 319–331, 2017, doi: 10.1016/j.surfcoat.2017.05.098.
- [57] S. Dabees, S. Mirzaei, P. Kaspar, V. Holcman, and D. Sobola, "Characterization and Evaluation of Engineered Coating Techniques for Different Cutting Tools—Review," *Materials*, vol. 15, pp. 5633, Aug. 01, 2022. doi: 10.3390/ma15165633.
- [58] K. Bobzin, "High-performance coatings for cutting tools," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 18, pp. 1-9, Aug. 01, 2017. doi: 10.1016/j.cirpj.2016.11.004.
- [59] K. Choy, "Chemical vapour deposition of coatings." *Progress in Materials Science*, vol. 48, pp. 57-170, 2003. Doi: 10.1016/S0079-6425(01)00009-3.
- [60] F. J. G. Silva, A. J. S. Fernandes, F. M. Costa, A. P. M. Baptista, and E. Pereira, "Unstressed PACVD diamond films on steel pre-coated with a composite multilayer," *Surf Coat Technol*, vol. 191, no. 1, pp. 102–107, 2005, doi: 10.1016/j.surfcoat.2004.02.036.
- [61] A. A. Ferreira, F. J. G. Silva, A. G. Pinto, and V. F. C. Sousa, "Characterization of Thin Chromium Coatings Produced by PVD Sputtering for Optical Applications," *Coatings*, vol. 11, no. 2, p. 215, 2021, doi: 10.3390/coatings11020215.
- [62] A. Baptista, G. Pinto, F. J. G. Silva, A. A. Ferreira, A. G. Pinto, and V. F. C. Sousa, "Wear Characterization of Chromium PVD Coatings on Polymeric Substrate for Automotive Optical Components," *Coatings*, vol. 11, no. 5, p. 555, 2021, doi: 10.3390/coatings11050555.
- [63] F. J. G. Silva, R. P. Martinho, and A. P. M. Baptista, "Characterization of laboratory and industrial CrN/CrCN/diamond-like carbon coatings," *Thin Solid Films*, vol. 550, pp. 278–284, 2014, doi: 10.1016/j.tsf.2013.11.042.
- [64] 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, pp. 402, 2018. doi: 10.3390/COATINGS8110402.

Referências

- Engineering*, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2024, pp. 784–795. doi: 10.1007/978-3-031-38241-3_87.
- [79] 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 B4C Monolayered and CrN/CrCN/DLC Multilayered Physical Vapor Deposition Coatings Under High Contact Loads: An Experimental Analysis,” *J Tribol*, vol. 144, no. 3, 2022, doi: 10.1115/1.4051226.
- [80] M. Folea, A. Roman, and N.-B. Lupulescu, “An overview of DLC coatings on cutting tools performance,” *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, vol. 8, pp. 30-36, 2010.
- [81] V. F. C. Sousa, F. J. G. Silva, H. Lopes, R. C. B. Casais and A. Baptista, “Wear Behavior and Machining Performance of TiAlSiN-Coated Tools Obtained by dc MS and HiPIMS: A Comparative Study,” *Materials*, vol. 14, no. 18, p. 5122, 2021, doi: 10.3390/ma14185122.
- [82] R. Casais, A. M. Baptista, F. J. Silva, F. Andrade, V. Sousa, and M. J. Marques, “Experimental study on the wear behavior of B4C and TiB2 monolayered PVD coatings under high contact loads,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 120, no. 9–10, pp. 6585–6604, 2022, doi: 10.1007/s00170-022-09182-4.
- [83] V. Varghese, A. K., M. R. Ramesh, and D. Chakradhar, “Investigation on the performance of AlCrN and AlTiN coated cemented carbide inserts during end milling of maraging steel under dry, wet and cryogenic environments,” *J Manuf Process*, vol. 43, pp. 136–144, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.jmapro.2019.05.021.
- [84] 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/Al₂O₃/TiN coated carbide tools behavior in rough end milling operations,” *Coatings*, vol. 9, no. 6, 2019, doi: 10.3390/COATINGS9060392.
- [85] P. Haja Syeddu Masooth, V. Jayakumar, and G. Bharathiraja, “Experimental investigation on surface roughness in CNC end milling process by uncoated and TiAlN coated carbide end mill under dry conditions,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 22, pp. 726-736, 2020. doi: 10.1016/j.matpr.2019.10.036.
- [86] I. Uzun, K. Aslantas, and F. Bedir, “An experimental investigation of the effect of coating material on tool wear in micro milling of Inconel 718 super alloy,” *Wear*, vol. 300, no. 1–2, pp. 8–19, 2013, doi: 10.1016/j.wear.2013.01.103.
- [87] A. Aramcharoen, P. T. Mativenga, S. Yang, K. E. Cooke, and D. G. Teer, “Evaluation and selection of hard coatings for micro milling of hardened tool steel,” *Int J Mach Tools Manuf*, vol. 48, no. 14, pp. 1578–1584, 2008, doi: 10.1016/j.ijmactools.2008.05.011.
- [88] B. D. Beake, L. Ning, S. C. Veldhuis, A. B. Lornberg and A. Weaver, “Wear performance of different PVD coatings during hard wet end milling of H13 tool steel,” *Surf Coat Technol*, vol. 279, pp. 118–125, 2015, doi: 10.1016/j.surfcoat.2015.08.038.
- [89] B. Wang and Z. Liu, “Influences of tool structure, tool material and tool wear on machined surface integrity during turning and milling of titanium and nickel alloys: a review,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 98, no. 5–8, pp. 1925–1975, 2018, doi: 10.1007/s00170-018-2314-1.
- [90] V. Bushlya, J. Zhou, and J. E. Ståhl, “Effect of cutting conditions on machinability of superalloy inconel 718 during high-speed turning with coated and uncoated PCBN tools,” *Procedia CIRP*, vol. 3, pp. 370-375, 2012. doi: 10.1016/j.procir.2012.07.064.
- [91] A. Thakur, A. Mohanty, and S. Gangopadhyay, “Comparative study of surface integrity aspects of Incoloy 825 during machining with uncoated and CVD multilayer coated inserts,” *Appl Surf Sci*, vol. 320, pp. 829–837, 2014, doi: 10.1016/j.apsusc.2014.09.129.

Referências

- [92] H. Tschätsch, "Applied Machining Technology." (2009), Springer, Berlin, Germany. Doi: 10.1007/978-3-642-01007-1.
- [93] R. Serra, S. Profile, A. Ouahabi, and W. Rmili, "An end-of life criterion from cutting tool vibrations," 15th International Congress on Experimental Mechanics, 2012. Doi: <https://www.researchgate.net/publication/257297902>.
- [94] N. H. Cook, "Tool Wear and Tool Life" *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 95, pp. 931-938, 1973. Doi: 10.1115/1.3438271.
- [95] R. D. F. S. Costa, R. C. M. Sales-Contini, F. J. G. Silva, N. Sebbe, and A. M. P. Jesus, "A Critical Review on Fiber Metal Laminates (FML): From Manufacturing to Sustainable Processing," *Metals*, vol. 13, no. 4, p. 638, 2023, doi: 10.3390/met13040638.
- [96] J. Mahmood, G. e. Mustafa, and M. Ali, "Accurate estimation of tool wear levels during milling, drilling and turning operations by designing novel hyperparameter tuned models based on LightGBM and stacking," *Measurement (Lond)*, vol. 190, 2022, doi: 10.1016/j.measurement.2022.110722.
- [97] M. S. Srinivas, P. Sangeeth, N. Venkaiah, and M. R. Sankar, "State of the art on tool wear characterization in micro-milling," *Mater Today Proc*, 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.07.019.
- [98] K. Zhuang, D. Zhu, X. Zhang, and H. Ding, "Notch wear prediction model in turning of Inconel 718 with ceramic tools considering the influence of work hardened layer," *Wear*, vol. 313, no. 1–2, pp. 63–74, 2014, doi: 10.1016/j.wear.2014.02.007.
- [99] M. S. Kasim, C. H. Che Haron, J. A. Ghani, M. A. Sulaiman, and M. Z. A. Yazid, "Wear mechanism and notch wear location prediction model in ball nose end milling of Inconel 718," *Wear*, vol. 302, no. 1–2, pp. 1171–1179, 2013, doi: 10.1016/j.wear.2012.12.040.
- [100] B. Zhang, Y. Du, H. Liu, L. Xin, Y. Yang, and L. Li, "Experimental Study on High-Speed Milling of SiCf/SiC Composites with PCD and CVD Diamond Tools," *Materials*, vol. 14, no. 13, 2021, doi: 10.3390/ma14133470.
- [101] V. F. C. Sousa, F. J. G. Silva, R. Alexandre, G. Pinto, A. Baptista, and J. S. Fecheira, "Investigations on the Wear Performance of Coated Tools in Machining UNS S32101 Duplex Stainless Steel," *Metals*, vol. 12, no. 6, 2022, doi: 10.3390/met12060896.
- [102] R. P. Martinho, F. J. G. Silva, C. Martins, and H. Lopes, "Comparative study of PVD and CVD cutting tools performance in milling of duplex stainless steel," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 102, no. 5–8, pp. 2423–2439, 2019, doi: 10.1007/s00170-019-03351-8.
- [103] W. Liu, Q. Chu, J. Zeng, R. He, H. Wu and Z. Wu, "PVD-CrAlN and TiAlN coated Si3N4 ceramic cutting inserts-2. High speed face milling performance and wear mechanism study," *Ceram International*, vol. 43, no. 12, pp. 9488–9492, 2017, doi: 10.1016/j.ceramint.2017.04.127.
- [104] H. Hoseiny, F. G. Caballero, R. M'Saoubi, B. Högman, J. Weidow, and H. O. Andrén, "The Influence of Heat Treatment on the Microstructure and Machinability of a Prehardened Mold Steel," *Metall Mater Trans A Phys Metall Mater Sci*, vol. 46, no. 5, pp. 2157–2171, 2015, doi: 10.1007/s11661-015-2789-4.
- [105] Z. Li, J. Zhang, B. Dai, and Y. Liu, "Microstructure and corrosion resistance property of laser transformation hardening pre-hardened AISI P20 plastic die steel," *Opt Laser Technol*, vol. 122, 2020, doi: 10.1016/j.optlastec.2019.105852.
- [106] "Plastic Mould Steels: Tool steels for plastic processing." <https://www.bohler.jp/en/> (acedido a 27 de Outubro, 2024).
- [107] F. Kara, "Optimization of surface roughness in finish milling of AISI P20+S plastic-mold steel," *Materiali in Tehnologije*, vol. 52, no. 2, pp. 195–200, 2018, doi: 10.17222/mit.2017.088.

Referências

- [108] W. K. Law, K. C. Wong, H. Wang, Z. Sun, and C. S. Lim, "Microstructure Evolution in Additively Manufactured Steel Molds: A Review," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 30, no. 6, 2021. doi: 10.1007/s11665-021-05948-1.
- [109] D. Guo, D. Yu, P. Zhang, W. Song, B. Zhang, and K. Peng, "Laminar plasma jet surface hardening of P20 mold steel: Analysis on the wear and corrosion behaviors," *Surf Coat Technol*, vol. 415, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.surfcoat.2021.127129.
- [110] S. S. S. Kalpakjian, "Manufacturing Engineering and Technology", 6th ed. 2009, Pearson, London, United Kingdom. ISBN-13: 9780135211427.
- [111] A. Medvedeva, J. Bergström, S. Gunnarsson, P. Krakhmalev, and L. G. Nordh, "Influence of nickel content on machinability of a hot-work tool steel in prehardened condition," *Mater Des*, vol. 32, no. 2, pp. 706–715, 2011, doi: 10.1016/j.matdes.2010.07.037.
- [112] F. Silva, J. Santos, and R. Gouveia, "Dissolution of Grain Boundary Carbides by the Effect of Solution Annealing Heat Treatment and Aging Treatment on Heat-Resistant Cast Steel HK30," *Metals*, vol. 7, no. 7, p. 251, 2017, doi: 10.3390/met7070251.
- [113] H. Hoseiny, F. G. Caballero, B. Hogman and D. San Martin, "The effect of the martensitic packet size on the machinability of modified AISI P20 prehardened mold steel," *J Mater Sci*, vol. 47, no. 8, pp. 3613–3620, 2012, doi: 10.1007/s10853-011-6208-Y.
- [114] S. Zahoor, N. A. Mufti, M. Q. Saleem, M. P. Mughal, and M. A. M. Qureshi, "Effect of machine tool's spindle forced vibrations on surface roughness, dimensional accuracy, and tool wear in vertical milling of AISI P20," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 89, no. 9–12, pp. 3671–3679, 2017, doi: 10.1007/s00170-016-9346-1.
- [115] A. Marcon, Itabr Gomes, J. de Oliveira, R. Agnelli, and C. Antonio Barbosa, "Study on the Machinability of VP100 Mold Steel," COBEM 2009 20th International Congress of Mechanical Engineering, 2009.
- [116] S. Zahoor, N. A. Mufti, M. Q. Saleem, and A. Shehzad, "An investigation into surface integrity of AISI P20 machined under the influence of spindle forced vibrations," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 96, no. 9–12, pp. 3565–3574, 2018, doi: 10.1007/s00170-018-1804-5.
- [117] ArcelorMittal, <https://industeel.arcelormittal.com/product/steels-for-moulds-tools-and-dies/>. (acedido a Julho, 2024)
- [118] InovaTools, <https://www.schnittdaten.eu/v4/#technologie>. (acedido em Julho, 2024).
- [119] K. D. Bouzakis, S. Hadjiyiannis, G. Skordaris, I. Mirisidis and K. Efstathiou, "The effect of coating thickness, mechanical strength and hardness properties on the milling performance of PVD coated cemented carbides inserts," *Surf Coat Technol*, vol. 177–178, pp. 657–664, Jan. 2004, doi: 10.1016/j.surfcoat.2003.08.003.
- [120] K. Bouzakis, S. Hadjiyiannis, G. Skordaris, I. Mirisidis and K. Efstathiou, "The influence of the coating thickness on its strength properties and on the milling performance of PVD coated inserts," *Surf Coat Technol*, vol. 174, pp. 393–401, 2003, doi: 10.1016/S0257-8972(03)00678-9.
- [121] Q. An, C. Wang, J. Xu, P. Liu, and M. Chen, "Experimental investigation on hard milling of high strength steel using PVD-AlTiN coated cemented carbide tool," *Int J Refract Metals Hard Mater*, vol. 43, pp. 94–101, 2014, doi: 10.1016/j.ijrmhm.2013.11.007.
- [122] P. Horajski, L. Bohdal, L. Kukielka, R. Patyk, P. Kaldunski, and S. Legutko, "Advanced structural and technological method of reducing distortion in thin-walled welded structures," *Materials*, vol. 14, no. 3, pp. 1–24, 2021, doi: 10.3390/ma14030504.
- [123] J. Nithyanandam, S. LalDas, and K. Palanikumar, "Surface Roughness Analysis in Turning of Titanium Alloy by Nanocoated Carbide Insert," *Procedia Materials Science*, vol. 5, pp. 2159–2168, 2014, doi: 10.1016/j.mspro.2014.07.420.

Referências

- [124] N. S. Kumar, A. Shetty, A. Shetty, K. Ananth, and H. Shetty, "Effect of spindle speed and feed rate on surface roughness of carbon steels in CNC turning," in *Procedia Engineering*, vol. 38, pp. 691–697, 2012. doi: 10.1016/j.proeng.2012.06.087.
- [125] A. R. Natasha, J. A. Ghani, C. H. Che Haron, and J. Syarif, "The influence of machining condition and cutting tool wear on surface roughness of AISI 4340 steel," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 290, p. 012017, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/290/1/012017.
- [126] S. Sun, M. Brandt, and M. S. Dargusch, "Characteristics of cutting forces and chip formation in machining of titanium alloys," *Int J Mach Tools Manuf*, vol. 49, no. 7–8, pp. 561–568, Jun. 2009, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2009.02.008.
- [127] S. A. Khan, S. L. Soo, D. K. Aspinwall, C. Sage and P. Harden, "Tool wear/life evaluation when finish turning Inconel 718 using PCBN tooling," *Procedia CIRP*, vol. 1, pp. 283–288, 2012. doi: 10.1016/j.procir.2012.04.051.
- [128] N. R. Dhar and M. Kamruzzaman, "Cutting temperature, tool wear, surface roughness and dimensional deviation in turning AISI-4037 steel under cryogenic condition," *Int J Mach Tools Manuf*, vol. 47, no. 5 SPEC. ISS., pp. 754–759, 2007, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2006.09.018.
- [129] C. Natarajan, S. Muthu, and P. Karuppuswamy, "Investigation of cutting parameters of surface roughness for a non-ferrous material using artificial neural network in CNC turning," *Journal of Mechanical Engineering Research*, vol. 3, pp. 1-14, 2011.
- [130] A. B. Abdullah, L. Y. Chia, and Z. Samad, "The Effect of Feed Rate and Cutting Speed to Surface Roughness," *Asian J Sci Res*, vol. 1, no. 1, pp. 12–21, 2007, doi: 10.3923/ajsr.2008.12.21.
- [131] M. T. Hayajneh, M. S. Tahat, and J. Bluhm, "A Study of the Effects of Machining Parameters on the Surface Roughness in the End-Milling Process," *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 1-5, 2007.
- [132] R. Gouveia, F. Silva, P. Reis, and A. Baptista, "Machining Duplex Stainless Steel: Comparative Study Regarding End Mill Coated Tools," *Coatings*, vol. 6, no. 4, p. 51, 2016, doi: 10.3390/coatings6040051.
- [133] J. Gu, G. Barber, S. Tung, and R. J. Gu, "Tool life and wear mechanism of uncoated and coated milling inserts," *Wear*, vol. 225–229, pp. 273–284, 1999, doi: 10.1016/S0043-1648(99)00074-5.
- [134] L. Aihua, D. Jianxin, C. Haibing, C. Yangyang, and Z. Jun, "Friction and wear properties of TiN, TiAlN, AlTiN and CrAlN PVD nitride coatings," *Int J Refract Metals Hard Mater*, vol. 31, pp. 82–88, 2012, doi: 10.1016/j.ijrmhm.2011.09.010.
- [135] M. Abdoos, K. Yamamoto, B. Bose, G. Fox-Rabinovich, and S. Veldhuis, "Effect of coating thickness on the tool wear performance of low stress TiAlN PVD coating during turning of compacted graphite iron (CGI)," *Wear*, vol. 422–423, pp. 128–136, 2019, doi: 10.1016/j.wear.2019.01.062.
- [136] I. Korkut and M. A. Donertas, "The influence of feed rate and cutting speed on the cutting forces, surface roughness and tool–chip contact length during face milling," *Mater Des*, vol. 28, no. 1, pp. 308–312, 2007, doi: 10.1016/j.matdes.2005.06.002.
- [137] J. A. Ghani, I. A. Choudhury, and H. H. Masjuki, "Wear mechanism of TiN coated carbide and uncoated cermets tools at high cutting speed applications," *J Mater Process Technol*, vol. 153–154, pp. 1067–1073, Nov. 2004, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.352.
- [138] I. Yesilyurt and H. Ozturk, "Tool condition monitoring in milling using vibration analysis," *Int J Prod Res*, vol. 45, no. 4, pp. 1013–1028, 2007, doi: 10.1080/00207540600677781.

Referências

- [139] R. Y. Chiou and S. Y. Liang, "Analysis of acoustic emission in chatter vibration with tool wear effect in turning," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 40, no. 7, pp. 927-941, 2000. doi: 10.1016/S0890-6955(99)00093-0.
- [140] C. K. Toh, "Vibration analysis in high speed rough and finish milling hardened steel," *J Sound Vib*, vol. 278, no. 1-2, pp. 101-115, Nov. 2004, doi: 10.1016/j.jsv.2003.11.012.
- [141] M. Hashimoto, E. Marui, and S. Kato, "Experimental research on cutting force variation during primary chatter vibration occurring in plain milling operation," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 36, no. 2, pp. 183-201, 1996. doi: 10.1016/0890-6955(95)98760-5.
- [142] M. E. R. Bonifgo and A. E. Diniz, "Correlating tool wear, tool life, surface roughness and tool vibration in finish turning with coated carbide tools," *Wear*, vol. 173, no. 1-2, pp. 137-144, 1994. doi: 10.1016/0043-1648(94)90266-6.

Declaração de Integridade

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

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

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

Nome: André Filipe Silva Mesquita

ISEP, Porto, 15 de Outubro de 2024