



Fresagem de uma liga de DSS (LDX2101): Estudo comparativo do desgaste de ferramentas com diferentes geometrias e revestimentos PVD

VÍTOR FERNANDO CRESPIM SOUSA

outubro de 2021

Fresagem de uma liga de DSS (LDX2101): Estudo comparativo do desgaste de ferramentas com diferentes geometrias e revestimentos PVD

Vitor Fernando Crespim Sousa
1121217

2021

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica





Fresagem de uma liga de DSS (LDX2101): Estudo comparativo do desgaste de ferramentas com diferentes geometrias e revestimentos PVD

Vitor Fernando Crespim Sousa
1121217

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

2021

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica





JÚRI

Presidente

Doutora Isabel Cristina Silva Barros Rodrigues Mendes Pinto
Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Orientador

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

Coorientador

Mestre José Manuel da Silva Fecheira
Assistente Convidado, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Arguente

Doutor Abílio Manuel Pinho de Jesus
Professor Associado, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos os que contribuíram de qualquer forma para a realização desta dissertação. Começo por agradecer ao Professor Doutor Francisco José Gomes da Silva, orientador da presente tese de mestrado, por todo o apoio e incentivo prestado ao longo de toda a realização do trabalho aqui apresentado, crucial e essencial para a concretização do mesmo.

Agradeço ao Eng. José Fecheira pela disponibilidade e ajuda na realização dos ensaios práticos apresentados neste trabalho.

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

Gostaria de agradecer, também, à Eng. Fátima Andrade, técnica do laboratório de Metalografia do Instituto de Engenharia do Porto (ISEP), pela disponibilidade e ajuda prestada na preparação de todas as amostras analisadas e apresentadas neste trabalho.

Pelo fornecimento dos substratos das ferramentas ensaiadas neste trabalho, desejo agradecer ao Eng. Nuno André, da INOVATOOLS, S.A. (Leiria, Portugal) e pelos revestimentos aplicados a estas ferramentas, agradeço ao Eng. Ricardo Alexandre, da TEandM – Tecnologia, Engenharia e Materiais, S. A. (Coimbra, Portugal).

Quero agradecer à minha família e amigos, por todo o apoio e preocupação prestado durante a realização desta dissertação de mestrado.

Um muito obrigado a todos!

PALAVRAS-CHAVE

Fresagem; Otimização do processo; Aço inoxidável duplex; Revestimentos para ferramentas; PVD; *HiPIMS*; Forças de corte; Acabamento superficial; Mecanismos de desgaste.

RESUMO

O processo de maquinagem é bastante relevante, principalmente na produção de peças de alta qualidade e com rigor dimensional, para uma grande variedade de indústrias. Destes processos de maquinagem, a fresagem continua a ser um dos mais utilizados na produção destas peças. Devido a esta popularidade, o processo de fresagem é bastante estudado, dando origem a evoluções do processo, desde a produção de novas ferramentas e máquinas, à aplicação de novos métodos de maquinagem e estratégias. Recentemente, os processos de fresagem utilizam principalmente ferramentas revestidas. Estes revestimentos são também bastante estudados, resultando no desenvolvimento de novas técnicas de deposição e revestimentos capazes de melhorar a qualidade e desempenho das ferramentas utilizadas na fresagem. Outro fator que promove a evolução destes processos de produção, é a evolução do tipo de ligas metálicas que são utilizadas na produção das peças. Algumas destas ligas, tal como as ligas de aço inoxidável duplex, trazem bastantes benefícios na sua aplicação, tendo propriedades mecânicas e de resistência à corrosão bastante elevadas. Estas ligas são aplicadas em várias indústrias e os seus componentes são geralmente produzidos por maquinagem. No entanto, devido às suas propriedades, tais como elevada resistência mecânica e ductilidade (quando comparados com outras ligas de aço inoxidável), estes tipos de ligas são considerados difíceis de maquinar, induzindo um desgaste prematuro nas ferramentas que são utilizadas para o cortar.

Foi realizado um estudo comparativo da fresagem de uma liga de aço inoxidável duplex, LDX 2101. Foram testados cinco tipos de ferramentas, com geometrias e revestimentos diferentes. Os revestimentos que foram testados foram: AlCrN, TiAlN e TiAlSiN, sendo que foram testados dois tipos de revestimento TiAlSiN, um destes obtido por *Direct Current Magnetron Sputtering (dc MS)* e o outro por *High Power Impulse Magnetron Sputtering (HiPIMS)*. Foram realizados ensaios de maquinagem, variando o comprimento de corte e velocidade de avanço (V_f). Analisaram-se as forças de corte desenvolvidas durante estes ensaios, a rugosidade superficial produzida por cada ferramenta e, o desgaste e mecanismos de desgaste apresentados por cada tipo de ferramenta. Os resultados obtidos das análises foram comparados entre si, de forma a determinar a ferramenta com o melhor desempenho, e avaliar a influência da variação dos parâmetros de maquinagem nos resultados obtidos. Foram definidas tendências

para cada uma das ferramentas e determinaram-se mecanismos de desgaste comuns a todas estas, estes sendo principalmente, desgaste abrasivo, adesão de material à ferramenta e delaminação do revestimento. Quanto à ferramenta que produziu melhores resultados, em termos de desgaste e rugosidade superficial produzida, esta foi a ferramenta revestida com TiAlSiN, obtido por *HiPIMS*, sendo seguida pela outra ferramenta revestida por TiAlSiN.

KEYWORDS

Milling; Process optimization; Duplex stainless-steel; Tool coatings; PVD; HiPIMS; Cutting forces; Surface Roughness; Wear mechanisms.

ABSTRACT

The machining process is still quite a relevant manufacturing process, primarily in the production of high-quality and precision parts, for a wide variety of industries. Of these machining process, milling is one of the most used to produce these parts. Due to this popularity, this manufacturing process is heavily researched, enabling the further development and improvement of this process, such as: the production of new cutting tools, development of new strategies and machines. Nowadays, the milling process is carried out using coated tools. These tool coatings are also heavily researched, resulting in the development of new coatings and coating deposition techniques, to improve the performance of these milling tools. Another factor that promotes the evolution of the milling process, is the development and application of new metallic alloy. Some of these alloys, such as duplex stainless steel, bring many advantages with its applications, having great mechanical and corrosion resistance. These alloys are applied in many industries, with its components being generally produced by machining. However, due to the mechanical properties of duplex stainless steels, these alloys are considered hard-to-machine materials, causing premature wear on the milling tools used to process it.

A comparative study on the milling of a duplex stainless-steel alloy, LDX 2101, was carried out. Five tool types were tested, having different geometries and tool coatings. These coatings were: AlCrN, TiAlN and TiAlSiN. Two TiAlSiN coatings were tested, one obtained by the dc MS (Magnetron Sputtering) deposition technique, and the other by HiPIMS (High Power Impulse Magnetron Sputtering). Milling tests were carried out using these tool types, varying the values of feed rate and cutting length. The cutting forces developed during the process were analyzed, as well as the produced machined surface quality and the wear sustained by the tools. The results obtained were compared, to evaluate the influence of parameter variation and to determine the coated tool that exhibited the best performance. Tendencies were defined for each of the analyzed tools and the common wear mechanisms were determined, these being mainly adhesion, abrasion, and coating delamination. Regarding the coated tool's performance, it was concluded that the tool that was coated with TiAlSiN, obtained by HiPIMS, produced the best results, being closely followed by the other TiAlSiN coated tool.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

AlCrN	Nitreto de alumínio e cromo
AlTiN	Nitreto de alumínio e titânio
CVD	<i>Chemical vapor deposition</i>
CNC	<i>Computer numerical control</i>
DLC	<i>Diamond like carbon</i>
DSS	<i>Duplex stainless steel</i>
dc MS	<i>Direct current magnetron sputtering</i>
FEM	<i>Finite element method</i>
GRA	<i>Grey Relational Analysis</i>
HiPIMS	<i>High power impulse magnetron sputtering</i>
HSS	<i>High-speed steel</i>
MEV	Microscopia eletrônica de varrimento
MEF	Método de elementos finitos
Mo	Molibdênio
OTS	<i>Optical tool sensor</i>
PVD	<i>Physical vapor deposition</i>
RSM	<i>Response surface methodology</i>
Ru	Rutênio
SEM	<i>Scanning electron microscopy</i>
SMC	<i>Sheet moulding compound</i>
Ta	Tântalo
TiAlN	Nitreto de titânio e alumínio
TiAlSiN	Nitreto de titânio alumínio e silício
TiAlCrSiN	Nitreto de titânio alumínio cromo e silício
TiN	Nitreto de titânio
Y	Ítrio

Lista de Unidades

GPa	Gigapascal
kW	QuiloWatt
m	Metro
m/min	Metro por minuto
mm	Milímetro

mm/min	Milímetro por minuto
mm/rot	Milímetro por rotação
MPa	Megapascal
mPa	Milipascal
N	Newton
N/mm ²	Newton por milímetro quadrado
Nm	Newton metro
nm	Nanometro
RPM	Rotações por minuto
W	Watt
μm	Micrómetro

Lista de Símbolos

a_e	Largura de corte
a_p	Profundidade de corte
D_c	Diâmetro da ferramenta de corte
E	Módulo de elasticidade/Módulo de <i>Young</i>
f_n	Avanço por rotação
f_z	Avanço por dente
H	Dureza do material
K_c	Força de corte específica
L	Distância percorrida na maquinagem
M_c	Binário de corte
n	Velocidade de rotação da árvore
P_c	Potência líquida de corte
Q	Taxa de remoção de material
Ra	Rugosidade média aritmética
$Rmax$	Rugosidade máxima
T_c	Tempo de maquinagem
VB	Desgaste do flanco de uma ferramenta de corte
V_c	Velocidade de corte
V_f	Velocidade de avanço
Z_c	Número de dentes/lâminas de corte de uma ferramenta

GLOSSÁRIO DE TERMOS

Delaminação	Termo aplicado na descrição do desgaste de um revestimento de uma ferramenta de corte. Refere-se ao destacamento de camadas do revestimento da ferramenta.
Desgaste adesivo	Mecanismo de desgaste, refere-se à adesão do material maquinado à superfície da ferramenta de corte (substrato ou revestimento)
Desgaste abrasivo	Mecanismo de desgaste provocado pela abrasão do material maquinado na ferramenta.
End-mill	Termo geralmente utilizado para uma fresa de topo.
Setup	Preparação necessária para a execução de um determinado processo.
Maquinabilidade	Traduzido de <i>machinability</i> , refere-se à facilidade de maquinar um certo material (mais fácil quanto maior for a sua maquinabilidade).
Metal-duro	Carboneto de tungstênio, geralmente utilizado para fabricar ferramentas de maquinagem, desde insertos a fresas integrais.
MQL	<i>Minimum Quantity Lubrication</i> , é um método de lubrificação de maquinagem que utiliza a menor quantidade possível de lubrificante, geralmente criando uma mistura de ar e óleo aplicada no local do corte.

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 – OPERAÇÕES PRINCIPAIS DE FRESAGEM: A) PERIFÉRICA E B) DE TOPO [6]	10
FIGURA 2 – TIPOS DE FRESA: INTEGRAL [9] A) E FRESAS DE INSERTOS [10] B).	12
FIGURA 3 – FIGURA DE UMA FRESA MONOBLOCO, CONVENCIONAL COM LEGENDA A), VISTA DE TOPO E LEGENDA DAS VÁRIAS FACES E ÂNGULOS DE UMA FRESA CONVENCIONAL B)	18
FIGURA 4 – GEOMETRIAS DE PONTA DE FRESA GERALMENTE UTILIZADAS	19
FIGURA 5 – SISTEMA DE FIXAÇÃO HIDRÁULICO POR BARRAS [40]	23
FIGURA 6 – DINAMÓMETRO DE MESA KISTLER [53]	25
FIGURA 7 – CONSUMO ENERGÉTICO (PERCENTUAL) DOS MÉTODOS PVD E CVD [85]	29
FIGURA 8 – TIPOS DE ESTRUTURA DOS REVESTIMENTOS MAIS COMMUMENTE UTILIZADAS EM FERRAMENTAS DE MAQUINAGEM [84]	30
FIGURA 9 – PROPAGAÇÃO DE UMA FISSURA EM VÁRIOS TIPOS DE REVESTIMENTO [84]	30
FIGURA 10 – REVESTIMENTOS ALTIN-NI, COM PERCENTAGENS DE NI DIFERENTES: 0% A); 1,5% B) E 3% C) [99]	31
FIGURA 11 – DETALHE DO MECANISMO DE DESGASTE, DELAMINAÇÃO DO REVESTIMENTO, NUMA FRESA [103]	34
FIGURA 12 – A) EQUIPAMENTO DE CORTE STRUERS MINITOM E B) EQUIPAMENTO DE MONTAGEM EM RESINA TERMOENDURECÍVEL, STRUERS PEDOPRESS.	45
FIGURA 13 – MONTAGEM DA SECÇÃO TRANSVERSAL DE UMA FERRAMENTA REVESTIDA, JUNTAMENTE COM AS SECÇÕES NÃO REVESTIDAS, SENDO QUE ESTAS VISAVAM APENAS INDUZIR O NECESSÁRIO EQUILÍBRIO NA AMOSTRA	45
FIGURA 14 – MONTAGEM DA PEÇA A MAQUINAR NA BUCHA AUTOCENTRANTE, BISON 3575	47
FIGURA 15 – MONTAGEM DO EQUIPAMENTO DE AQUISIÇÃO DE FORÇAS DE CORTE COM UMA FERRAMENTA	49
FIGURA 16 – REFERÊNCIA UTILIZADA PARA ANÁLISE DAS FERRAMENTAS COM A) 2 GUMES DE CORTE, E COM B) 4 GUMES DE CORTE	52
FIGURA 17 – IMAGENS SEM DE UMA MEDIÇÃO DO REVESTIMENTO TIALSIN, A) ZONAS DE ANÁLISE EDS Z1 E Z2, B) ESPECTROS EDS PARA Z1 C) E Z2 D)	53
FIGURA 18 – ESTRUTURA MULTICAMADA DO REVESTIMENTO DEPOSITADO DE ALCRN	54
FIGURA 19 – GRÁFICO DAS FORÇAS DE CORTE ADQUIRIDAS DE UM ENSAIO A UMA FERRAMENTA T1	55
FIGURA 20 – GRÁFICO DAS FORÇAS DE CORTE ADQUIRIDAS DE UM ENSAIO A UMA FERRAMENTA T2	56
FIGURA 21 – VALORES MÉDIOS DE RA E RMAX OBTIDOS NO SENTIDO RADIAL, PARA AS FERRAMENTAS T1	57
FIGURA 22 – VALORES MÉDIOS DE RA E RMAX OBTIDOS NO SENTIDO TANGENCIAL, PARA AS FERRAMENTAS T1	58
FIGURA 23 – VALORES MÉDIOS DE RA E RMAX OBTIDOS NO SENTIDO RADIAL, PARA AS FERRAMENTAS T2	59

FIGURA 24 – VALORES MÉDIOS DE RA E RMAX OBTIDOS NO SENTIDO TANGENCIAL, PARA AS FERRAMENTAS T2	59
FIGURA 25 – VALORES MÉDIOS DE RA E RMAX OBTIDOS NO SENTIDO RADIAL, PARA AS FERRAMENTAS T3	60
FIGURA 26 – VALORES MÉDIOS DE RA E RMAX OBTIDOS NO SENTIDO TANGENCIAL, PARA AS FERRAMENTAS T3	61
FIGURA 27 – VALORES MÉDIOS DE RA E RMAX OBTIDOS NO SENTIDO RADIAL, PARA AS FERRAMENTAS T4	62
FIGURA 28 – VALORES MÉDIOS DE RA E RMAX OBTIDOS NO SENTIDO TANGENCIAL, PARA AS FERRAMENTAS T4	62
FIGURA 29 – VALORES MÉDIOS DE RA E RMAX OBTIDOS NO SENTIDO RADIAL, PARA AS FERRAMENTAS T5	63
FIGURA 30 – VALORES MÉDIOS DE RA E RMAX OBTIDOS NO SENTIDO TANGENCIAL, PARA AS FERRAMENTAS T5	64
FIGURA 31 – VALORES MÉDIOS DE RA, MEDIDOS NA DIREÇÃO RADIAL À MAQUINAGEM, PRODUZIDOS PELAS FERRAMENTAS T1, T2, T3, T4 E T5, PARA TODAS AS CONDIÇÕES DE ENSAIO	64
FIGURA 32 – VALORES MÉDIOS DE RA, MEDIDOS NA DIREÇÃO TANGENCIAL À MAQUINAGEM, PRODUZIDOS PELAS FERRAMENTAS T1, T2, T3, T4 E T5, PARA TODAS AS CONDIÇÕES DE ENSAIO	65
FIGURA 33 – VALORES MÉDIOS DE VB, MEDIDOS NAS FACES DE FOLGA DAS FERRAMENTAS T1, T2, T3, T4 E T5, PARA TODAS AS CONDIÇÕES DE ENSAIO	70
FIGURA 34 – A) FACE DE FOLGA, COM UMA AMPLIAÇÃO DE 500X, DE UMA FERRAMENTA T1L2F100 E T1L4F100, E B) FACE DE ATAQUE, COM UMA AMPLIAÇÃO DE 500X, DE UMA FERRAMENTA C) T1L2F100, E D) T1L4F100	71
FIGURA 35 – ADESÃO DE MATERIAL NA SUPERFÍCIE DA FACE DE ATAQUE DE UMA FERRAMENTA T1L4F100, COM UMA AMPLIAÇÃO DE 2500X	72
FIGURA 36 – A) FACE DE ATAQUE DE UMA FERRAMENTA T1L4F100 COM AS VÁRIAS ZONAS DE ANÁLISE ASSINALADAS, E B) ESPETRO EDS PARA A ZONA DE ANÁLISE Z3, ONDE EXISTEM INDÍCIOS DE ADESÃO	73
FIGURA 37 –FACE DE FOLGA, COM UMA AMPLIAÇÃO DE 500X, DE UMA FERRAMENTA A) T1L2F75 E B) T1L2F125, E FACE DE ATAQUE, COM UMA AMPLIAÇÃO DE 200X, DE UMA FERRAMENTA C) T1L2F75 E D) T1L2F125	73
FIGURA 38 – ANÁLISE DOS MECANISMOS DE DESGASTE PRESENTES NUMA FACE DE ATAQUE DE UMA FERRAMENTA T1L2F125	74
FIGURA 39 – ANÁLISE DOS MECANISMOS DE DESGASTE PRESENTES NUMA FACE DE ATAQUE DE UMA FERRAMENTA T1L2F125	75
FIGURA 40 – MATERIAL ADERIDO NA FACE DE FOLGA DE UMA FERRAMENTA T2L2F100	76
FIGURA 41 – DELAMINAÇÃO DO REVESTIMENTO REGISTRADO NUMA FACE DE ATAQUE DE UMA FERRAMENTA T2L2F100	76
FIGURA 42 – DESGASTE ABRASIVO PRESENTE NA FACE DE FOLGA DE UMA FERRAMENTA T2L4F125	77
FIGURA 43 – FACE DE ATAQUE DE UMA FERRAMENTA T2L4F125, EXIBINDO ADESÃO DE MATERIAL E DELAMINAÇÃO DO REVESTIMENTO	77
FIGURA 44 – ARESTA POSTIÇA REGISTRADA NUMA FACE DE FOLGA DE UMA FERRAMENTA T3L4F125	78

FIGURA 45 – ADESÃO DE MATERIAL E DESGASTE ABRASIVO DETETADOS NUMA FACE DE ATAQUE DE UMA FERRAMENTA T3L4F125	79
FIGURA 46 – FISSURAS DETETADAS NO REVESTIMENTO DE UMA FERRAMENTA T3, TESTADA A 75% DE AVANÇO E PARA 4 METROS DE COMPRIMENTO DE CORTE	79
FIGURA 47 – FACE DE ATAQUE DE UMA FERRAMENTA T4L2F75 A), T4L4F75 B)	80
FIGURA 48 – ADESÃO DO MATERIAL MAQUINADO NUMA FACE DE ATAQUE DE UMA FERRAMENTA T4L4F100	81
FIGURA 49 – MARCAS DE ABRASÃO REGISTRADAS NUMA FACE DE ATAQUE DE UMA FERRAMENTA T4L4F125	81
FIGURA 50 – ANÁLISE DOS MECANISMOS DE DESGASTE PRESENTES NUMA FACE DE FOLGA DE UMA FERRAMENTA T5L4F100	82
FIGURA 51 – ADESÃO DO MATERIAL MAQUINADO NAS MARCAS DEIXADAS PELA RETIFICAÇÃO DO SUBSTRATO, OBSERVADO NA FACE DE ATAQUE DE UMA FERRAMENTA T5L2F100	83
FIGURA 52 – ADESÃO DO MATERIAL MAQUINADO NA ZONA DE DELAMINAÇÃO DO REVESTIMENTO, OBSERVADO NUMA FACE DE ATAQUE DE UMA FERRAMENTA T5L4F125	84
FIGURA 53 – FACE DE ATAQUE DE UMA FERRAMENTA T5L2F125, COM IDENTIFICAÇÃO DO MECANISMO DE DESGASTE	84

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 – OPERAÇÕES DE FRESAGEM DE TOPO [6]	11
TABELA 2 – TABELA RESUMO DE ESTUDOS REALIZADOS ACERCA DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE FRESAGEM NO PROCESSO	14
TABELA 3 – TABELA RESUMO DE ESTUDOS REALIZADOS ACERCA DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DAS FERRAMENTAS NO PROCESSO DE FRESAGEM	19
TABELA 4 – TIPOS DE SISTEMA DE FIXAÇÃO DE FERRAMENTAS DE FRESAGEM	22
TABELA 5 – TABELA RESUMO DE ESTUDOS REALIZADOS ACERCA DAS FORÇAS DE CORTE DESENVOLVIDAS NOS PROCESSOS DE FRESAGEM	25
TABELA 6 – TÉCNICAS DE DEPOSIÇÃO PRINCIPAIS, PARA OS MÉTODOS PVD E CVD	28
TABELA 7 – MECANISMOS DE DESGASTE COMUMMENTE APRESENTADOS NAS FERRAMENTAS DE FRESAGEM [7]	32
TABELA 8 – TABELA RESUMO DE ESTUDOS REALIZADOS ACERCA DO DESGASTE DE FERRAMENTAS REVESTIDAS UTILIZADAS EM OPERAÇÕES DE FRESAGEM	34
TABELA 9 – TABELA RESUMO DE ESTUDOS REALIZADOS ACERCA DO DESGASTE DE FERRAMENTAS REVESTIDAS UTILIZADAS EM OPERAÇÕES DE FRESAGEM	37
TABELA 10 – TIPOS DE FERRAMENTA PARA A MAQUINAGEM DO AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX LDX 2101	42
TABELA 11 – PARÂMETROS DE DEPOSIÇÃO UTILIZADOS PARA A OBTENÇÃO DOS REVESTIMENTOS, ATRAVÉS DA TÉCNICA <i>DCMS</i>	43
TABELA 12 – PARÂMETROS DE DEPOSIÇÃO UTILIZADOS PARA A OBTENÇÃO DO REVESTIMENTO DE <i>TIALSIN</i> , PELA TÉCNICA <i>HIPIMS</i>	43
TABELA 13 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%WT) DA LIGA LDX 2101	44
TABELA 14 – PARÂMETROS INICIAIS DE MAQUINAGEM	48
TABELA 15 – PARÂMETROS DE MAQUINAGEM PARA CADA TIPO DE FERRAMENTA UTILIZADO	50
TABELA 16 – ESPESURAS MÉDIAS PARA CADA UM DOS REVESTIMENTOS DEPOSITADOS	54
TABELA 17 – VALORES DAS PROPRIEDADES OBTIDAS DOS ENSAIOS DE ULTRAMICRODUREZA PARA TODOS OS REVESTIMENTOS	54
TABELA 18 – VALORES MÉDIOS DE <i>RA</i> , MEDIDOS NAS DIREÇÕES RADIAL E TANGENCIAL, PARA OS TESTES REALIZADOS COM AS FERRAMENTAS T1	57
TABELA 19 – VALORES MÉDIOS DE <i>RA</i> , MEDIDOS NAS DIREÇÕES RADIAL E TANGENCIAL, PARA OS TESTES REALIZADOS COM AS FERRAMENTAS T2	58
TABELA 20 – VALORES MÉDIOS DE <i>RA</i> , MEDIDOS NAS DIREÇÕES RADIAL E TANGENCIAL, PARA OS TESTES REALIZADOS COM AS FERRAMENTAS T3	60
TABELA 21 – VALORES MÉDIOS DE <i>RA</i> , MEDIDOS NAS DIREÇÕES RADIAL E TANGENCIAL, PARA OS TESTES REALIZADOS COM AS FERRAMENTAS T4	61
TABELA 22 – VALORES MÉDIOS DE <i>RA</i> , MEDIDOS NAS DIREÇÕES RADIAL E TANGENCIAL, PARA OS TESTES REALIZADOS COM AS FERRAMENTAS T5	63

TABELA 23 – VALORES MÉDIOS DE VB, MEDIDOS NAS FACES DE FOLGA DAS FERRAMENTAS T1 PARA TODAS AS CONDIÇÕES DE ENSAIO	66
TABELA 24 – VALORES MÉDIOS DE VB, MEDIDOS NAS FACES DE FOLGA DAS FERRAMENTAS T2 PARA TODAS AS CONDIÇÕES DE ENSAIO	67
TABELA 25 – VALORES MÉDIOS DE VB, MEDIDOS NAS FACES DE FOLGA DAS FERRAMENTAS T3 PARA TODAS AS CONDIÇÕES DE ENSAIO	67
TABELA 26 – VALORES MÉDIOS DE VB, MEDIDOS NAS FACES DE FOLGA DAS FERRAMENTAS T4 PARA TODAS AS CONDIÇÕES DE ENSAIO	68
TABELA 27 – VALORES MÉDIOS DE VB, MEDIDOS NAS FACES DE FOLGA DAS FERRAMENTAS T5 PARA TODAS AS CONDIÇÕES DE ENSAIO	69

ÍNDICE

JÚRI.....	5
AGRADECIMENTOS.....	7
RESUMO	IX
ABSTRACT	XI
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	XIII
GLOSSÁRIO DE TERMOS	XV
ÍNDICE DE FIGURAS	XVII
ÍNDICE DE TABELAS	XXI
1 INTRODUÇÃO	3
1.1 Contextualização.....	3
1.2 Objetivos principais.....	3
1.3 Metodologia.....	3
1.4 Estrutura da dissertação	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1 Fresagem.....	10
2.1.1 Tipos de fresa	12
2.1.2 Parâmetros de maquinagem	12
2.1.2.1 Influência dos parâmetros de maquinagem no processo.....	14
2.1.3 Geometria das ferramentas	17
2.1.3.1 Influência da geometria das ferramentas no processo	19
2.1.4 Fixação das ferramentas	22
2.1.5 Fixação das peças a maquinar	23
2.2 Forças de corte.....	24
2.2.1 Aquisição de forças de corte na fresagem	25
2.3 Revestimentos	27
2.3.1 Técnicas de deposição.....	28
2.3.2 Revestimentos para ferramentas de maquinagem	29
2.4 Estudo do desgaste das ferramentas.....	32
2.4.1 Análise do desgaste de ferramentas revestidas.....	34
2.5 Maquinagem de aços inoxidáveis duplex	36
3 DESENVOLVIMENTO	41
3.1 Materiais	41
3.1.1 Ferramentas utilizadas	41
3.1.1.1 Material do substrato	41
3.1.1.2 Geometria das ferramentas.....	41
3.1.1.3 Deposição dos revestimentos.....	42
3.1.2 Material maquinado.....	44

3.2	Métodos	44
3.2.1	Preparação das amostras para análise SEM.....	44
3.2.2	Análise e caracterização do revestimento das ferramentas	46
3.2.2.1	Análise da espessura do revestimento	46
3.2.2.2	Avaliação das propriedades mecânicas do revestimento.....	46
3.2.3	Ensaio de maquinagem.....	47
3.2.3.1	Centro de maquinagem	47
3.2.3.1.1	Fixação da ferramenta	47
3.2.3.1.2	Fixação da peça a maquinar.....	47
3.2.3.1.3	Medição da ferramenta e peça a maquinar.....	48
3.2.3.2	Estratégia de maquinagem	48
3.2.3.3	Análise das forças de corte	48
3.2.3.3.1	Fixação da ferramenta com o dinamómetro	49
3.2.3.4	Parâmetros de maquinagem	49
3.2.4	Análise da rugosidade da superfície maquinada.....	51
3.2.5	Análise do desgaste das ferramentas.....	52
3.3	Apresentação e discussão dos resultados	52
3.3.1	Caracterização dos revestimentos	53
3.3.2	Análise das forças de corte.....	55
3.3.3	Medições de rugosidade da superfície maquinada.....	56
3.3.3.1	Dados obtidos – T1	56
3.3.3.2	Dados obtidos – T2	58
3.3.3.3	Dados obtidos – T3	60
3.3.3.4	Dados obtidos – T4	61
3.3.3.5	Dados obtidos – T5	63
3.3.3.6	Comparação e discussão dos dados obtidos	64
3.3.4	Medição do desgaste de flanco das ferramentas.....	66
3.3.4.1	Dados obtidos – T1	66
3.3.4.2	Dados obtidos – T2	67
3.3.4.3	Dados obtidos – T3	67
3.3.4.4	Dados obtidos – T4	68
3.3.4.5	Dados obtidos – T5	69
3.3.4.6	Comparação e discussão dos dados obtidos	69
3.3.5	Análise dos mecanismos de desgaste das ferramentas	71
3.3.5.1	Análise do desgaste – T1.....	71
3.3.5.2	Análise do desgaste – T2.....	75
3.3.5.3	Análise do desgaste – T3.....	78
3.3.5.4	Análise do desgaste – T4.....	80
3.3.5.5	Análise do desgaste – T5.....	82
3.3.5.6	Discussão dos resultados obtidos.....	85
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	89
4.1	Conclusões	89
4.2	Proposta de trabalhos futuros.....	92

5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	95
6	ANEXOS.....	109
6.1	ANEXO1 – <i>Datasheet</i> do material a maquinar – LDX2101.....	109
6.2	ANEXO2 – <i>Datasheet</i> do dinamómetro KISTLER 9171A	115

INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

1.2 Objetivos principais

1.3 Metodologia

1.4 Estrutura da dissertação

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A maquinagem continua a ser um processo relevante na produção de peças para várias indústrias, significando que este processo é alvo de muita pesquisa por parte da comunidade científica. Existe um grande foco na otimização dos processos de maquinagem, nomeadamente torneamento e fresagem, determinando parâmetros, estratégias e ferramentas ideais para a maquinagem de diversos materiais.

O aço inoxidável duplex apresenta propriedades mecânicas e de resistência à corrosão muito interessantes, fazendo-o um material bastante útil para uma grande variedade de aplicações, nomeadamente para aplicações onde o material estará sujeito a condições de trabalho bastante adversas. Os componentes desta liga são produzidos, geralmente, por processos de maquinagem como a fresagem, no entanto, devido às suas propriedades, tais como uma elevada resistência mecânica e ductilidade, este material é bastante agressivo para as ferramentas, induzindo um desgaste prematuro nas ferramentas, que prejudica a vida-útil e o desempenho desta.

1.2 Objetivos principais

Estudos realizados acerca da maquinagem de ligas metálicas são extremamente úteis, de um ponto de vista de otimização do processo. Desta forma, procurou-se expandir o conhecimento da maquinagem de ligas de aço inoxidável duplex com ferramentas revestidas, um tema que não é muito estudado. O trabalho realizado centra-se em operações de fresagem destas ligas, estudando a influência dos parâmetros deste processo no desempenho das ferramentas e na qualidade de produção destas. Para tal, avaliou-se a rugosidade superficial produzida pelas ferramentas, bem como o desgaste apresentado, quantificando o mesmo e identificando os principais mecanismos de desgaste observados após a maquinagem do aço duplex.

1.3 Metodologia

A metodologia adotada para a realização da presente dissertação está apresentada de seguida, estando esta dividida em três principais secções: Revisão, Materiais e métodos e Resultados e discussão.

Revisão:

- Estudo do processo de maquinagem em questão, analisando artigos científicos recentes, apontados principalmente para a fresagem, avaliando a influência de vários parâmetros associados a este processo;
- Análise de artigos científicos realizados acerca da maquinagem de aços inoxidáveis duplex, analisando as diversas dificuldades sentidas e diferentes métodos utilizados para a maquinagem destas ligas;
- Estudo realizado acerca do estado da arte dos revestimentos utilizados para maquinagem de diversos materiais, analisando artigos científicos para identificar os diversos tipos de revestimentos e as suas principais diferenças, assim como o desenvolvimento de novos revestimentos para maquinagem;

Materiais e métodos:

- Escolha e caracterização das ferramentas a utilizar na maquinagem do aço LDX 2101;
- Definição dos parâmetros de maquinagem iniciais, garantindo que uma comparação das ferramentas pudesse ser realizada;
- Realização de ensaios preliminares, de forma a confirmar que os parâmetros inicialmente escolhidos eram os mais indicados para o estudo comparativo;
- Definição dos parâmetros definitivos de maquinagem e elaboração de um mapa de ensaios;

Resultados e discussão:

- Realização dos ensaios de maquinagem definidos, analisando as forças de corte desenvolvidas durante o processo, qualidade da superfície maquinada e as ferramentas de corte utilizadas;
- Análise de cada tipo de revestimento utilizado nas ferramentas, caracterizando-o quanto à sua espessura e propriedades mecânicas;
- Tratamento dos dados obtidos correspondentes à realização dos ensaios, elaborando tabelas de dados e gráficos de superfície com os valores de desgaste do flanco e da rugosidade superficial produzida;
- Caracterização dos diversos mecanismos de desgaste registados durante a análise das ferramentas;
- Comparação dos dados obtidos para todos os tipos de ferramenta.

1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação irá estar dividida em quatro principais capítulos, tendo início neste primeiro capítulo introdutório.

No segundo capítulo está apresentada a revisão bibliográfica, abordando todos os tópicos considerados relevantes para a elaboração do estudo comparativo das ferramentas.

O capítulo três está dividido em três subcapítulos: O subcapítulo 3.1. apresenta os diversos materiais utilizados na realização da dissertação, desde o material maquinado às ferramentas que foram utilizadas. De seguida, o subcapítulo 3.2. menciona todos os métodos e equipamentos utilizados para a realização deste trabalho, descrevendo os procedimentos utilizados para cada análise em detalhe. Por fim, no subcapítulo 3.3. os resultados obtidos na realização deste trabalho irão ser apresentados e discutidos com grande detalhe, fundamentando este comentário com artigos científicos já publicados.

Finalmente, no quarto capítulo um resumo do desempenho e comportamento de cada ferramenta irá ser feito, apresentando as conclusões relevantes do estudo.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fresagem

2.2 Forças de corte

2.3 Revestimentos

2.4 Estudo do desgaste das ferramentas

2.5 Maquinagem de aços inoxidáveis duplex

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Atualmente o processo de maquinagem continua a ser um processo de fabrico bastante utilizado, devido à crescente necessidade de peças de alta qualidade por indústrias como a aeronáutica e aeroespacial [1,2], e também devido aos avanços recentes feitos nesta área, desde a utilização de novas técnicas de maquinagem ou materiais, até ao desenvolvimento de novas máquinas, como as máquinas *CNC* de 6 eixos, que possibilitam a transformação do material em bruto em peças de elevada complexidade e qualidade, produzidas num único processo contínuo [3-4].

Os processos de maquinagem mais utilizados na produção destas peças são o processo de torneamento e fresagem. Devido a esta popularidade, estes processos de produção são bastante estudados pela comunidade científica, produzindo vários artigos realizados acerca da otimização destes processos, ajudando e permitindo o desenvolvimento de novas técnicas de maquinagem, ferramentas, revestimentos e máquinas. Estes estudos ajudam, também, na expansão do conhecimento acerca da maquinagem de certos materiais, com baixa maquinabilidade [5].

Neste capítulo, apresenta-se toda a informação considerada relevante para o trabalho desenvolvido e descrito no Capítulo 3. O presente capítulo está subdividido em 5 subcapítulos. Cada um destes aborda temas relevantes para o trabalho desenvolvido:

- 2.1. Fresagem – A recolha de informação apresentada neste capítulo está direcionada para o processo de fresagem, devido ao trabalho prático que foi realizado. Irá ser apresentado o princípio de funcionamento do processo, mencionando os tipos de ferramenta que são utilizados, os parâmetros de fresagem e sua influência, os diferentes tipos de geometria que são utilizados e quais os principais benefícios.
- 2.2. Forças de corte – As forças de corte registadas durante o processo providenciam informação relevante para a otimização/monitorização do processo de maquinagem. Neste subcapítulo, é descrita a importância da aquisição das forças de corte desenvolvidas na fresagem, mencionando como é que esta é feita atualmente no processo de fresagem.
- 2.3. Revestimentos – O uso de revestimentos traz bastantes benefícios para uma grande variedade de aplicações, incluindo processos de maquinagem. Aqui, os benefícios trazidos pela utilização de revestimentos irão ser apresentados, abordando as diferentes técnicas de deposição e tipos de revestimento que são atualmente utilizados em processos de maquinagem.
- 2.4. Análise do desgaste das ferramentas – O desgaste apresentado pelas ferramentas após a maquinagem fornece bastante informação acerca do processo e da ferramenta. O estudo deste desgaste possibilita o

desenvolvimento de novas ferramentas, revestimentos e estratégias de maquinagem. Neste subcapítulo, esta importância será explicada, mencionando a influência de vários parâmetros de maquinagem no desgaste da ferramenta, nomeadamente, a influência da geometria/tipo de ferramenta, tipo de revestimento e forças de corte no desgaste da ferramenta.

- 2.5. Maquinagem de aços inoxidáveis duplex - Visto que o material utilizado para o trabalho prático se trata de uma liga de aço inoxidável duplex, foi realizada uma pesquisa de artigos recentes realizados acerca da maquinagem destas ligas. As diferentes dificuldades sentidas na maquinagem destas ligas e as diferentes técnicas atuais de maquinagem utilizadas irão ser apresentadas neste subcapítulo.

2.1 Fresagem

A fresagem é um processo de maquinagem utilizado para a produção de peças de geometrias regulares e/ou complexas, podendo ser aplicado a uma elevada variedade de materiais. Este processo é também caracterizado pelo seu rigor dimensional, sendo utilizado na produção de peças de alta qualidade.

Este processo, tal como outros processos de maquinagem convencionais, remove o material por arranque de aparas. Na fresagem, uma ferramenta em rotação com múltiplas arestas de corte percorre o material, geralmente estacionário, removendo-o e gerando uma superfície plana. Existem duas operações principais na fresagem, a fresagem periférica ou de topo, como observado na Figura 1.

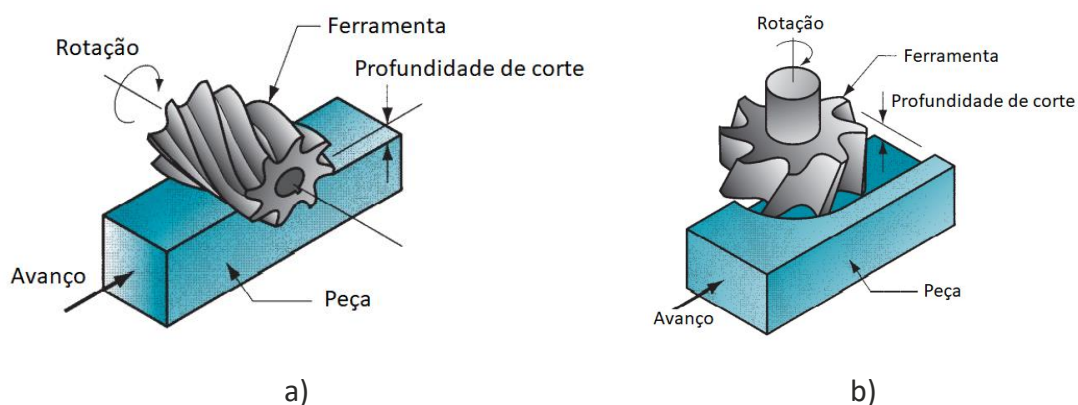
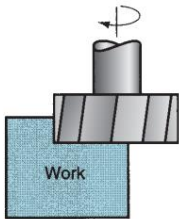
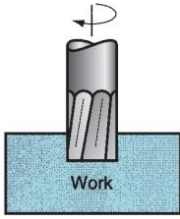
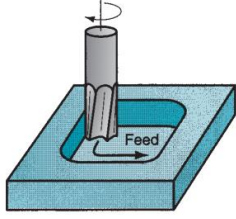
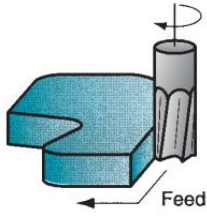
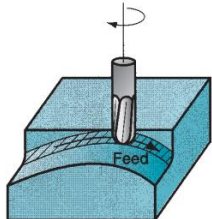


Figura 1 – Operações principais de fresagem: a) periférica e b) de topo [6]

Na fresagem periférica, o eixo de rotação da ferramenta é paralelo à face da peça a maquinar, enquanto na fresagem de topo, o eixo de rotação da ferramenta é perpendicular ao sentido do avanço da ferramenta [6-7].

Relativamente à fresagem de topo, existem várias operações que podem ser realizadas, estando estas apresentadas na Tabela 1, apresentando a sua designação, representação esquemática e respetiva descrição da operação.

Tabela 1 – Operações de fresagem de topo [6]

Designação	Representação	Descrição
Facejamento		Esta é uma operação bastante comum na fresagem, utilizada principalmente para a obtenção de uma face plana de área considerável.
Fresagem de canais		Consiste na abertura de um canal ou rasgo no material, podendo ser de profundidade elevada ou reduzida. Geralmente, a largura da ferramenta é escolhida com base na profundidade do canal.
Fresagem de caixas		A ferramenta penetra o material, maquinando uma caixa no seu interior. Poderão ser utilizados vários valores de profundidade de corte nestas operações.
Fresagem de contorno		Esta operação é uma junção da fresagem periférica e de topo, permitindo a criação de cantos a 90°. A periferia do material é maquinada, tornando-a plana.
Contorno da superfície		As operações de contorno de superfície utilizam, geralmente, uma fresa esférica, movendo-a ao longo do material numa trajetória curvilínea, produzindo formas tridimensionais mais orgânicas.

Work – Peça a maquinar; *Feed* – Sentido do avanço.

De uma forma geral, as operações de fresagem são realizadas em centros de maquinagem com controlo numérico computadorizado (CNC). Os avanços nestas máquinas e tipo de ferramentas utilizadas, permitem a produção de peças cada vez mais complexas, mantendo o rigor dimensional, mas produzindo de forma mais rápida, aumentando assim a competitividade do processo [3-4].

2.1.1 Tipos de fresa

Existem dois tipos principais de ferramentas que são utilizadas na fresagem (quanto ao seu método construtivo). Estas podem assumir várias geometrias de corte, de forma a melhorar a produção de certos tipos de peça. Estes tipos são: fresas integrais e fresas de insertos.

As fresas integrais são ferramentas que possuem lâminas cortantes na sua extremidade e ao longo do comprimento lateral do corpo da fresa. Estas ferramentas são fabricadas a partir de um só material, sendo este comumente aço rápido (*HSS*) ou carboneto de tungsténio com cobalto como ligante (metal duro). Atualmente, as fresas utilizadas em operações de maquinagem têm normalmente um revestimento na zona útil de corte, de forma a aumentar o seu desempenho [8], em termos de qualidade de produção e vida útil da ferramenta. Uma fresa integral revestida pode ser observada na Figura 2 a).



Figura 2 – Tipos de fresa: integral [9] a) e fresas de insertos [10] b).

As fresas de insertos, como o nome indica, são ferramentas com um corpo sólido, onde são montados insertos de maquinagem, tal como observado na Figura 2b). Estas ferramentas são bastante utilizadas na indústria, visto que o custo destas é mais reduzido, quando comparado com as fresas integrais. Adicionalmente, estes tipos de ferramentas podem atingir grandes diâmetros, possibilitando a realização de operações de desbaste com elevada remoção de material. Os insertos utilizados nestas ferramentas são constituídos por carboneto de tungsténio (WC), com um ligante de cobalto (Co) [10-11]. Estes insertos, ou pastilhas de corte, podem ser revestidos, tal como no caso das fresas integrais, melhorando assim o desempenho de corte da ferramenta.

2.1.2 Parâmetros de maquinagem

Uma correta seleção dos parâmetros de maquinagem é extremamente importante, visto que estes impactam diretamente a estabilidade e qualidade dos processos de maquinagem, com uma correta seleção destes a permitir uma produção de peças com maior qualidade e até prolongar a vida-útil das ferramentas de corte [5]. Isto aplica-se a todos os processos de maquinagem, incluindo a fresagem [12]. A seleção dos parâmetros adequados de fresagem traz vários benefícios de um ponto de vista de

otimização do processo de fresagem, tais como a redução de forças de corte [13] e energia consumida durante o processo [14]. O tipo de ferramenta, revestimento e condições de refrigeração também influenciam o processo, podendo estes ser variados para a produção de várias peças [15-16].

De seguida, os principais parâmetros de fresagem irão ser apresentados, mostrando as várias fórmulas utilizadas para o cálculo de cada um destes.

A velocidade de corte (V_c), expressa em metros por minuto (m/min), indica a velocidade do contacto entre a aresta de corte da ferramenta e a peça a ser maquinada. Pode ser calculada pela seguinte equação (1), onde D_c é o diâmetro da ferramenta, expressa em mm, e n a velocidade de rotação da árvore.

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

A velocidade de rotação da árvore (n), expressa em rotações por minuto (RPM), pode ser calculada através da equação (1), resolvendo a expressão em ordem a n .

O avanço por dente (f_z) expresso em milímetros (mm), é o valor utilizado para o cálculo do avanço. Corresponde à distância (no sentido da maquinagem) percorrida por uma única aresta de corte durante uma rotação. Calculado pela equação (2), onde V_f é a velocidade de avanço, expressa em milímetros por minuto (mm/min), e z_c é o número de dentes da ferramenta (número inteiro).

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

O avanço por rotação (f_n), expresso em milímetros por rotação (mm/rot), é o valor que indica a distância percorrida pela ferramenta durante uma rotação completa desta. Este parâmetro pode ser calculado pela seguinte equação (3).

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

A velocidade de avanço (V_f), expressa em milímetros por minuto (mm/min), corresponde à distância percorrida pela ferramenta por unidade de tempo. Está dependente do avanço por dente (f_z) e número de dentes (z_c) da fresa utilizada. Este parâmetro pode ser calculado seguindo a equação (4).

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

A taxa de remoção de material (Q) (**MRR** – *Material Removal Rate*), é expressa em milímetros cúbicos por minuto (mm³/min) e calculada de acordo com a equação (5). Corresponde ao volume de material removido, estando dependente da profundidade de corte (a_p , mm), da largura de corte (a_e , mm) e da velocidade de avanço (V_f , mm/min).

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

O tempo de maquinagem (T_c), expresso em minutos (min), é o tempo necessário para a realização da operação de maquinagem, dependendo da distância percorrida (L , mm) e da velocidade de avanço (V_f , mm/min). O tempo de maquinagem é calculado de acordo com a equação (6).

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

A potência líquida de corte (P_c), expressa em kilowatt (kW), é a potência requerida pelo equipamento para que o processo possa ser realizado. O cálculo desta potência pode ser feito a partir da equação (7), estando dependente do a_e (mm), a_p (mm), V_f (mm/min) e o valor da força de corte específica (K_c), expressa em Newton por milímetro quadrado (N/mm²).

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

O Binário de corte (M_c), expresso em Newton metro (Nm), é o valor de binário produzido pela fresa durante a maquinagem. Este valor é calculado a partir da equação (8), estando dependente de P_c e de n . O equipamento utilizado deve ser capaz de debitar, no mínimo, o binário e potência calculada.

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

2.1.2.1 Influência dos parâmetros de maquinagem no processo

Tal como mencionado na subsecção anterior, os parâmetros de maquinagem influenciam vários fatores, desde a qualidade da peça produzida e quantidade de material removido [5,15], até à redução do consumo energético, reduzindo assim o custo total do processo [17]. O estudo dos parâmetros de maquinagem e sua influência no processo é bastante benéfico, especialmente de um ponto de vista de otimização. Como tal, existem vários artigos e estudos, recentes, realizados acerca deste tema, identificando os parâmetros críticos para uma certa aplicação. Estes estudos permitem que haja uma expansão do conhecimento do processo de fresagem, fornecendo informação dos parâmetros ideais para a maquinagem de certos materiais ou componentes complexos.

Nesta subsecção, irão estar apresentados, na Tabela 2, trabalhos recentes realizados por vários autores, acerca da influência e estudo destes parâmetros no processo de fresagem, mencionando também alguns métodos utilizados para a otimização destes parâmetros para uma dada finalidade.

Tabela 2 – Tabela resumo de estudos realizados acerca da influência dos parâmetros de fresagem no processo

Autores	Resumo do artigo
Rajeshkumar <i>et al.</i> [18]	Neste estudo, os autores avaliam a influência dos parâmetros de maquinagem em operações de fresagem da liga de titânio, Ti-6Al-4V,

usando *minimum quantity lubrication (MQL)*. Rajeshkumar *et al.* estudam a influência de vários líquidos refrigerantes, tais como: água, óleo de rícino e óleo de éster, todos aplicados em regime *MQL*, bem como a influência de parâmetros como a velocidade de corte e de avanço na qualidade da superfície maquinada, forças de corte desenvolvidas, dano do flanco e coeficiente de atrito. Graças ao método de *Taguchi*, pareado com uma análise relacional de *Grey*, os autores determinaram que o parâmetro mais influente nos *outputs* acima mencionados, era a velocidade de avanço, seguido da velocidade de corte. Com este método, foram determinados os valores ideais para a obtenção dos valores mínimos de *outputs*, possibilitando assim a otimização do processo.

Daniyan *et al.*
[19]

No trabalho apresentado por Daniyan *et al.*, é realizada a otimização de um processo de fresagem de um aço AISI P20. Os autores utilizaram um processo de simulação da maquinagem, de forma a determinar as distribuições de temperatura da ferramenta e peça a maquinar. Utilizaram, também, a metodologia de superfície de resposta (*Response Surface Methodology – RSM*) de forma a determinar a influência da velocidade de corte e avanço na taxa de remoção de material e na rugosidade superficial maquinada. Graças a este método, os autores conseguiram determinar que a velocidade de avanço é o parâmetro mais influente na taxa de remoção de material e rugosidade superficial produzida. Um modelo matemático para otimização do processo também foi desenvolvido, podendo este método ser aplicado a outros processos de fresagem.

Viswanathan
et al. [20]

À semelhança do estudo apresentado em [19], neste estudo, os autores estudam a influência dos parâmetros de corte na taxa de remoção de material e rugosidade superficial maquinada. Os autores avaliam a influência da velocidade de rotação da ferramenta, avanço e profundidade de corte nos fatores mencionados, usando o método de *Taguchi* e *RSM*. Os parâmetros mais influentes na taxa de remoção de material foram determinados como sendo o avanço por dente e profundidade de corte, estando estes valores bastante próximos, ao contrário da velocidade de rotação da ferramenta. Graças a este método, os autores determinaram os parâmetros ideais para obter a maior taxa de remoção de material, realizando um teste para a validação dos parâmetros determinados. Foi obtido um erro de apenas 2,73% na taxa de remoção de material calculada.

Chen *et al.*
[21]

Neste trabalho, os autores apresentam um método de otimização de um processo de maquinagem, reduzindo a pegada energética do processo e diminuindo o tempo de produção. Chen *et al.* propõe um modelo que considera vários tipos de ferramentas e uma gama de parâmetros. Os autores criaram um modelo de otimização integrado

de multiobjectivos para a redução do consumo energético e do tempo de produção, resolvido por um algoritmo multiobjectivos *Cuckoo Search*. Foram realizados testes de validação ao modelo, utilizando várias fresas para operações de facejamento num material com 650 MPa de tensão de cedência (não divulgado). Com este método, foi possível otimizar os parâmetros de maquinagem de forma a reduzir bastante o consumo energético, no entanto, não foi possível impactar significativamente o tempo de produção. Todavia, com o método apresentado neste artigo, é possível otimizar o processo, chegando a um meio-termo, em termos de redução de consumo e de tempo de maquinagem.

Kumar *et al.*
[22]

Os autores pretendiam otimizar um processo de fresagem, particularmente, operações de facejamento de uma liga de aço, AISI 1005, usando ferramentas revestidas com TiN (Nitreto de titânio). O foco deste trabalho era melhorar a rugosidade superficial produzida e taxa de remoção de material, alterando os parâmetros de maquinagem. Como tal, foi analisada a influência da velocidade de rotação da árvore (N), profundidade de corte (a_e) e a velocidade de avanço (V_f) na rugosidade superficial produzida e na taxa de remoção de material. Kumar *et al.* utilizaram o método de *Taguchi* e uma análise de variância (ANOVA) para determinar os parâmetros mais influentes nos fatores mencionados, concluindo que a_e e V_f eram os parâmetros mais influentes no processo. Com estes resultados, os autores conseguiram determinar os parâmetros ideais para obter as condições ótimas de rugosidade superficial maquinada e taxa de remoção de material, otimizando o processo de facejamento de AISI 1005 com sucesso.

Rao *et al.*
[23]

Num trabalho semelhante ao apresentado anteriormente [22], Rao *et al.* [23] procuram otimizar um processo de fresagem de topo, numa liga de alumínio BSL168-T6511. Foi considerada a influência da velocidade de corte, velocidade de avanço e profundidade de corte na rugosidade superficial maquinada, na taxa de remoção de material e na temperatura da ferramenta de corte. Os autores utilizaram o método de *Taguchi* pareado com uma análise relacional de *Grey (GRA)* para otimizar o processo, utilizando uma análise de variância para determinar os parâmetros mais influentes no processo, concluindo que o parâmetro mais influente no processo era a velocidade de avanço, seguido da profundidade de corte. A influência da velocidade de corte neste processo é bastante baixa. Rao *et al.* determinaram com sucesso os parâmetros de maquinagem ideais com vista à otimização do processo, sendo estes 200 mm/min e 2,25 mm para a velocidade de avanço e profundidade de corte, respetivamente.

Kumaran *et al.* [24]

Neste estudo realizado por Kumaran *et al.*, é apresentado um método de otimização de um processo de fresagem de uma liga de alumínio, AlSi7Cu4. Estas são ligas bastante utilizadas na indústria automóvel e aeroespacial, principalmente devido às suas propriedades mecânicas e facilidade na sua fundição. Tal como visto anteriormente, os autores deste estudo procederam à otimização do processo usando o método de *Taguchi*, avaliando os parâmetros mais influentes em vários fatores, através de uma análise de variância. Neste caso, foi avaliada a influência da velocidade de rotação, velocidade de avanço, profundidade de corte e raio de canto do inserto utilizado, na rugosidade da superfície maquinada, taxa de remoção de material, tensões residuais e no formato da apara. Os autores concluíram que, para este caso, a velocidade de rotação era o parâmetro mais influente, seguido do avanço por dente e profundidade de corte. O parâmetro com menor influência no processo era o raio de canto do inserto. Kumaran *et al.* otimizaram o processo com sucesso, aumentando a taxa de remoção de material em cerca de 160%, reduzindo a rugosidade superficial produzida e as tensões residuais em 5,4% e 3,4%, respetivamente. Relativamente ao formato da apara, os autores reportaram uma redução na espessura da apara de cerca de 2,4%.

Tal como visto nos artigos apresentados na Tabela 2 [18-24], os parâmetros de maquinagem têm uma grande influência nos fatores produtivos do processo, tais como a rugosidade superficial, taxa de remoção de material e até consumo energético do equipamento de maquinagem. Existe uma tendência por parte dos vários autores para a utilização do método *Taguchi* com vista à otimização dos processos de maquinagem, principalmente para a melhoria da rugosidade superficial maquinada. Este tipo de estudos acerca da influência dos parâmetros é bastante vantajoso para a otimização dos processos de fresagem, permitindo a utilização do conjunto de parâmetros ideais para obter os melhores resultados para diversos casos, desde a utilização do valor ideal de avanço por dente até à utilização do revestimento mais adequado, com a estrutura correta [25].

2.1.3 Geometria das ferramentas

Tal como os parâmetros de maquinagem, a geometria das ferramentas de maquinagem influencia significativamente a qualidade e estabilidade do processo onde são utilizadas [26], afetando vários fatores, principalmente relacionados com a formação e escoamento da apara de maquinagem. Por exemplo, uma fresa com um maior número de lâminas é geralmente mais indicada para processos de acabamento, uma vez que a rigidez da ferramenta aumenta, permitindo obter valores de rugosidade da superfície maquinada mais baixos [15].

As ferramentas utilizadas para fresagem são fabricadas de forma a corresponder às exigências dos processos onde são aplicadas. Na Figura 3 pode ser observada a geometria de uma ferramenta de fresagem convencional. A legenda da Figura 3 a) é a seguinte: a – Diâmetro de corte; b – Comprimento de corte; c – Comprimento total; d – Diâmetro da haste.

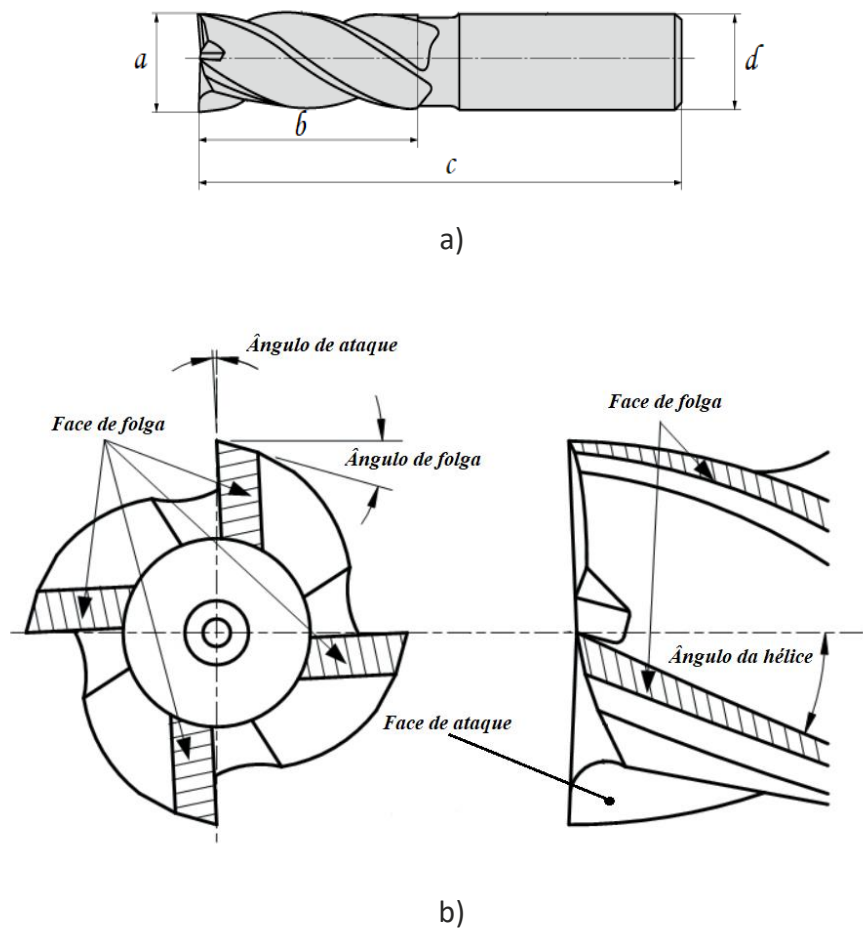


Figura 3 – Figura de uma fresa monobloco, convencional com legenda a), Vista de topo e legenda das várias faces e ângulos de uma fresa convencional b)

Estas ferramentas podem apresentar várias geometrias de ponta, cada uma destas oferecendo vantagens para certas aplicações. Tal como mencionado anteriormente, as fresas esféricas são utilizadas para aplicações onde o acabamento superficial é bastante importante, ou até na produção de formas orgânicas [6, 27]. As geometrias de ponta geralmente utilizadas podem ser observadas na Figura 4.

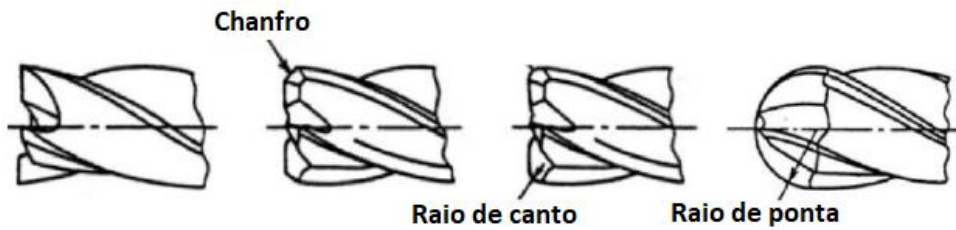


Figura 4 – Geometrias de ponta de fresa geralmente utilizadas

Uma das normas utilizadas para definir a geometria de corte das ferramentas é a norma ISO 3002/1:1982 [28], abrangendo os termos gerais acerca da geometria das ferramentas, tais como, ângulos de trabalho, superfícies das ferramentas, movimento da peça de trabalho e sistemas de referência de planos, utilizados para definir os vários ângulos e formações de apara de maquinagem.

2.1.3.1 Influência da geometria das ferramentas no processo

Tal como mencionado anteriormente, a geometria das ferramentas de fresagem tem uma influência significativa na qualidade e estabilidade dos processos, nomeadamente na rugosidade superficial produzida, vibrações e forças de corte [5, 15, 29]. Existem vários estudos realizados acerca deste tema, testando novas geometrias para a maquinagem de materiais difíceis de maquinar, ou para melhorar/otimizar processos de fresagem. Estes estudos são bastante úteis, fornecendo informações acerca do desempenho de novas geometrias/ferramentas, que poderão ser utilizadas em processos de fresagem, possibilitando assim o desenvolvimento/melhoria destas ferramentas, tais como a produção de fresas com canais internos para a condução de líquido de corte, oferecendo melhorias significativas em termos de baixa rugosidade superficial maquinada, escoamento de apara e redução da temperatura da ferramenta aquando da maquinagem [30].

Na Tabela 3 são apresentados vários artigos recentes, realizados acerca da influência da geometria das ferramentas de fresagem no processo de maquinagem.

Tabela 3 – Tabela resumo de estudos realizados acerca da influência da geometria das ferramentas no processo de fresagem

Autores	Resumo do artigo
Denkena <i>et al.</i> [31]	Neste estudo, Denkena <i>et al.</i> estudam a influencia dos parâmetros de maquinagem, nomeadamente a geometria da ferramenta, na temperatura da ferramenta de fresagem, utilizada na maquinagem de ligas de alumínio comumente usadas na indústria aeronáutica. Foram realizados vários ensaios utilizando ferramentas com e sem chanfro no canto da ferramenta, na maquinagem de componentes finos (com cerca de 2 mm de espessura) de Al-Li 2196. Notou-se que a geometria da ferramenta impacta significativamente o calor gerado durante o processo de maquinagem, bem como as vibrações desenvolvidas durante a fresagem. Os autores notaram que as

ferramentas com chanfro promoviam um processo significativamente mais estável, com menores vibrações de maquinagem. No entanto, em termos da temperatura de maquinagem, as ferramentas que possuíam chanfro produziram temperaturas bastante elevadas, cerca de 300 °C, uma temperatura três vezes superior à registada nos ensaios realizados com as ferramentas sem chanfro (90 °C). Esta temperatura de maquinagem elevada promove a formação de pontos de baixa dureza nos componentes de alumínio.

Huang *et al.*
[32]

Neste trabalho experimental, é estudada a influência do ângulo de ataque e da geometria da ferramenta, em operações de fresagem de cavidades profundas, numa liga de aço duplex, 1.4462. Relativamente à geometria das ferramentas, os autores avaliam a influência do raio de canto, ângulo de ataque e chanfro no canto da ferramenta, no desgaste que estas apresentam após as operações de fresagem. Foi concluído que a presença do chanfro na ponta da ferramenta é o fator mais influente, em termos de geometria, no desgaste das ferramentas. A vida-útil das ferramentas sem chanfro de canto é 3.6 vezes superior àquelas que possuem chanfro. Em relação à influência do raio de canto e ângulo de ataque no desgaste da ferramenta, valores mais altos destes parâmetros promovem uma vida mais longa da ferramenta.

Uhlman *et al.*
[33]

Neste trabalho, é estudada a influência do raio de canto da ferramenta na qualidade da superfície, forças de corte geradas e altura de rebarba, de um processo de microfresagem de ligas de cobre, nomeadamente CuZn30 e CuZn42. Foi concluído que, para ferramentas com raios de canto mais reduzidos, os valores de forças de corte geradas durante o processo eram mais elevados. No entanto, os valores de rugosidade superficial eram mais baixos, quando comparados com os valores obtidos nos ensaios realizados com ferramentas de raio de canto mais elevado. Em relação à altura de rebarba, esta é mais elevada para raios de canto maiores. Este tipo de estudos é importante, especialmente para avaliar a maquinabilidade de certos materiais.

Daniyan *et al.*
[34]

Neste trabalho, os autores apresentam um método para modelar e simular os efeitos geométricos das ferramentas de fresagem, na rugosidade superficial produzida em ligas de titânio, Ti6Al4V. São estudados os seguintes parâmetros: ângulo da hélice, ângulo da aresta de corte e número de lâminas de corte. Os resultados obtidos neste estudo indicam que o número de lâminas é o parâmetro mais influente na qualidade superficial produzida nestas ligas. Foram consideradas ferramentas com 3 e 4 lâminas, utilizadas para operações de desbaste e acabamento. As ferramentas com 4 lâminas

produzem valores mais altos de rugosidade em operações de desbaste, apresentando aresta postiça, visto que o espaço para escoamento de apra é mais reduzido do que nas ferramentas de 3 lâminas. Adicionalmente, a quantidade de material removido é maior para as ferramentas de 3 lâminas, sendo estas indicadas para operações de desbaste. Todavia, para operações de acabamento, onde a quantidade de material a remover é menor do que nas outras operações, uma ferramenta de 4 lâminas pode ser vantajosa, visto que não sofre tantos fenômenos de adesão (aresta postiça), produzindo assim um melhor acabamento superficial.

Boyea *et al.*
[35]

Tal como mencionado anteriormente, a geometria de corte das ferramentas tem uma elevada influência na qualidade e estabilidade do processo [29], nomeadamente nas forças de corte. Neste estudo, Boyea *et al.*, apresentam e testam uma nova geometria de fresa de topo. Esta fresa apresenta zonas indentadas ao longo da hélice, de forma a promover uma melhor formação e escoamento da apra de maquinagem. Os autores testaram esta ferramenta com o auxílio de simulações e ensaios de maquinagem, notando que existiu um aumento da estabilidade dos processos realizados com estas ferramentas, comparado aos realizados com ferramentas convencionais (geometria igual, no entanto sem estas “indentações”). Notou-se uma redução das forças de corte geradas durante o processo e um aumento na taxa de remoção de material, indicando que esta ferramenta promove processos mais estáveis e produtivos.

A. Can [36]

Existem, também, alguns estudos realizados na área da maquinagem de compósitos, onde a geometria é bastante influente. Neste trabalho, é realizado um estudo da maquinabilidade de compósitos SMC (*Sheet moulding compound*), usando ferramentas com números diferentes de lâminas para a fresagem de cavidades, avaliando a influência deste parâmetro geométrico nas forças de corte desenvolvidas durante o processo. Adicionalmente, os autores estudaram também a variação destas forças de corte para vários valores de velocidade de avanço e de corte. Foi concluído que, para ferramentas com um maior número de lâminas, as forças de corte foram maiores. Isto também foi registado para valores mais altos de avanço. Quanto à influência da velocidade de corte nas forças de corte, os autores registaram uma velocidade maior promove forças com uma magnitude mais baixa. Para além das forças de corte, a qualidade da cavidade maquinada foi avaliada, sendo esta afetada principalmente pelo avanço. Esta qualidade é maior para valores menores de avanço e para ferramentas com maior número de lâminas.

2.1.4 Fixação das ferramentas

A fixação da ferramenta é feita por um dispositivo, entre a árvore de uma máquina e uma ferramenta de corte, sem que influencie a eficácia da ferramenta e da própria máquina [37].

Existem vários componentes de fixação para os atuais equipamentos de fresagem, sendo estes desenvolvidos para uma grande gama de aplicações, com uma fixação rígida a ser preferível, de forma a obter peças com precisão dimensional [38]. Existem alguns estudos realizados acerca deste tema, estudando a influência destes métodos de fixação de ferramentas, ou até propondo novos métodos/sistemas de fixação para operações de fresagem, focados na redução de vibrações indesejáveis, promovendo assim a melhoria da estabilidade destes processos [39].

Um sistema de fixação, para manter a eficácia, necessita de satisfazer os seguintes quatro requisitos.

1. Concentricidade: manter a concentricidade entre o eixo de rotação da árvore e da ferramenta de corte;
2. Força de retenção: assegurar a fixação da ferramenta de corte à árvore da máquina;
3. Calibração: possuir o rigor dimensional para suporte das ferramentas de corte;
4. Equilibragem: distribuir corretamente as massas de forma a evitar vibrações excessivas e problemas de alinhamento durante o processo de maquinagem.

Na Tabela 4 irão estar apresentados quatro tipos de sistemas de fixação de ferramentas de fresagem.

Tabela 4 – Tipos de sistema de fixação de ferramentas de fresagem

Designação do sistema	Descrição
Sistema DIN6388	O aperto da ferramenta de corte é feito através de uma pinça metálica, que garante a distribuição da força de aperto pela haste da ferramenta.
Sistema DIN6499	
Sistema térmico	O sistema de fixação por expansão térmica possui um local de alojamento da ferramenta com um diâmetro inferior ao da haste desta. Por indução de corrente elétrica, ocorre a dilatação do suporte, permitindo que a ferramenta seja montada no mesmo. Com a diminuição da temperatura, o suporte contrai, garantindo assim o aperto da ferramenta de corte.
Sistema hidráulico	Em sistemas de fixação hidráulicos, existe um reservatório de óleo que é pressurizado com o aperto de um parafuso. Esta pressão garante a fixação da ferramenta.

Sistema Weldon DIN1835 B	Estes tipos de sistemas de fixação são bastante simples, sendo cada vez mais adotados na indústria. No suporte, existe um parafuso que, quando é apertado, contacta com a ferramenta que possui um entalhe na sua haste, assegurando assim o aperto da ferramenta.
Sistema Whistle Notch DIN1835 E	

2.1.5 Fixação das peças a maquinar

A fixação das peças também influencia os processos de maquinagem, com alguns tipos de fixação a oferecer certas vantagens, principalmente em termos de estabilidade da peça durante o processo, melhorando até a qualidade da superfície maquinada.

Os sistemas para fixação das peças são geralmente escolhidos consoante a aplicação em que vão ser utilizados, dependendo da geometria do material e da complexidade da peça a produzir. Os sistemas mais comumente utilizados são os seguintes:

- **Barras:** Este método é bastante simples, sendo muito utilizado na indústria metalomecânica. Consiste na fixação de uma barra à mesa de trabalho, que irá fixar a peça. Geralmente, a barra é fixada à mesa através de um parafuso. Esta está montada contra um suporte de calcanhar, que atua como um sistema de alavanca. Isto exerce força sobre a peça de trabalho, fixando-a. Existem sistemas de fixação por barra que exercem a força necessária através de um sistema hidráulico, tal como observado na Figura 5.



Figura 5 – Sistema de fixação hidráulico por barras [40]

- **Bases magnéticas:** Este método é utilizado principalmente para peças em que a área seja ampla, permitindo uma fixação adequada.
- **Prensas:** As prensas são muito utilizadas na indústria metalomecânica, possibilitando um posicionamento preciso das peças a maquinar. Estas podem ser manuais ou alimentadas por um sistema de ar comprimido, tornando a fixação mais rápida e precisa.

Para além dos sistemas de fixação mencionados, também podem ser utilizados apertos modulares, que permitem uma redução considerável dos tempos de *setup* das peças. O aperto destes sistemas pode ser realizado manualmente ou automaticamente, sendo esta uma das grandes vantagens destes sistemas, permitindo um melhoramento da produtividade e flexibilidade do processo [41-42].

Existem alguns estudos recentes realizados acerca do desenvolvimento de sistemas de fixação, focados no desenvolvimento de sistemas capazes de permitir a maquinagem de materiais com elevada complexidade, tais como compósitos reforçados [43] ou componentes de espessura reduzida [44], que deformam facilmente com os esforços de maquinagem desenvolvidos durante o processo.

2.2 Forças de corte

As forças de corte desenvolvidas durante o processo de maquinagem fornecem informação relevante quanto à estabilidade e produtividade do processo. Tal como apresentado anteriormente, o seu estudo é bastante comum, avaliando a influência de vários parâmetros de maquinagem nestas forças (Tabelas 2 e 3).

O conhecimento destas forças de corte é essencial para a otimização e melhoria do processo de maquinagem, permitindo o desenvolvimento de novas ferramentas e sistemas de fixação [45]. Estes valores são geralmente obtidos através de vários métodos, tais como: modelos empíricos (baseados nos resultados de testes de maquinagem previamente realizados); métodos analíticos; e pelo método de elementos finitos (MEF). Um dos métodos mais comuns para determinar estas forças de corte é a aplicação da fórmula de Kienzle [46], método aplicado principalmente para processos de torneamento, no entanto, também com algumas aplicações para operações de fresagem [47]. A monitorização e interpretação dos valores destas forças também fornece informação relativamente à maquinabilidade do material, bem como à seleção adequada de parâmetros para processar estes materiais [48-49]. As forças de corte estão relacionadas com o estado da ferramenta, sendo possível a monitorização da vida-útil desta [50-51]. A estabilidade do processo também está diretamente relacionada com as forças de maquinagem, fornecendo informação quanto às vibrações do processo e possíveis problemas de sobrecarga [52].

Relativamente aos métodos de aquisição de forças de maquinagem, atualmente são utilizados dois métodos de determinação destas forças, diretos e indiretos. Os métodos diretos dizem respeito àqueles que utilizam sensores de aquisição de forças de corte, tais como dinamómetros. Estes sistemas são os mais utilizados para a aquisição destas forças, medindo rapidamente e com alta precisão as forças de corte desenvolvidas durante o processo, possibilitando a sua análise em tempo real. Um destes sistemas de aquisição pode ser observado na Figura 6.



Figura 6 – Dinamómetro de mesa Kistler [53]

Quanto aos métodos indiretos, destes fazem parte principalmente métodos analíticos ou numéricos de determinação das forças como é o caso do método de elementos finitos [54-55]. Os métodos de aquisição indiretos são utilizados principalmente para a previsão das forças de corte para um dado processo, possibilitando uma otimização das análises a um custo relativamente baixo [56-57]. No entanto, estes métodos requerem validação, implicando a utilização de dinamómetros para a aquisição das forças de corte, que são sistemas com um custo bastante elevado.

2.2.1 Aquisição de forças de corte na fresagem

Tal como mencionado anteriormente, o conhecimento das forças de corte possibilita a otimização dos processos de maquinagem. Vários parâmetros influenciam as forças de corte, como observado pelos trabalhos apresentados nas Tabelas 2 e 3. O estudo destas forças de corte é um tema bastante popular na comunidade científica. Na Tabela 5 irão ser apresentados vários artigos recentes, realizados acerca da aquisição/otimização das forças de corte em processos de fresagem.

Tabela 5 – Tabela resumo de estudos realizados acerca das forças de corte desenvolvidas nos processos de fresagem

Autores	Resumo do artigo
Phokobye <i>et al.</i> [51]	Neste trabalho, é estudada a influência de vários parâmetros nas forças de corte de um processo de fresagem de aços MS 200, usando uma fresa de metal duro. É utilizado um dinamómetro KISTLER 9225C com um sistema de aquisição de forças de 8 canais, tipo 5070A. Os autores avaliaram a influência da velocidade de corte e de avanço, avanço por dente e a profundidade de corte nas forças de maquinagem desenvolvidas durante o processo. Notou-se que a profundidade de corte era o parâmetro mais influente nestas forças, estas aumentando com o aumento da profundidade, possibilitando a calibração deste processo para a obtenção dos menores valores de força de corte, priorizando a estabilidade do processo. Os valores obtidos nesse estudo podem ser utilizados para a otimização de futuros processos de fresagem deste tipo de ligas.

-
- Kumar *et al.* [58] No seguinte estudo, é realizado um estudo da influência dos parâmetros de corte nas forças de maquinagem, na microfresagem de duas ligas de titânio, Gr5 e Gr12. Os ensaios foram realizados sem refrigeração e com uma ferramenta de metal duro. Foram estabelecidas relações entre os valores de rugosidade superficial maquinada e forças geradas durante a maquinagem. Foi concluído que os parâmetros mais influentes nas forças de maquinagem eram a velocidade de corte e a de avanço, com a primeira a ser a mais influente. Notou-se que para velocidades de corte mais elevadas os valores das forças de corte e da rugosidade superficial eram bastante baixos. Todavia, no caso da velocidade de avanço, registaram-se valores maiores para a rugosidade e forças de corte para altas velocidades de avanço, sendo preferido um valor baixo deste parâmetro para a produção de uma superfície com baixa rugosidade.
-
- Zhang *et al.* [59] Zhang *et al.* propõem um método de otimização para operações de desbaste (fresagem), priorizando a taxa de remoção de material, de modo a aumentar a eficiência do processo. Os autores apresentam um modelo de otimização baseado na estimativa dos parâmetros de maquinagem ideais, conjugando-o com um processo de monitorização em tempo real. Esta monitorização é realizada através da aquisição das forças de corte desenvolvidas durante o processo de maquinagem, relacionando-as com o estado de desgaste da ferramenta e quantidade de vibrações geradas durante o processo. Este método de otimização foi validado com a realização de operações de fresagem numa liga de titânio. Os autores reportaram um aumento na eficiência do processo (remoção do material) de 125% (comparando com ensaios realizados com os parâmetros sugeridos pelo fabricante), após otimização.
-
- Pawar *et al.* [60] As forças de corte fornecem informação relativa ao consumo energético do equipamento de maquinagem. Neste estudo, Pawar *et al.* apresentam um modelo de cálculo do consumo energético do equipamento, baseado nos valores de forças de corte desenvolvidas durante o processo de fresagem de peças com geometrias variadas. Os autores testaram peças de formato concavo e convexo, concluindo que o consumo energético é maior para a maquinagem de peças concavas. Este modelo poderá ser aplicado a várias operações de fresagem, possibilitando a otimização destes processos quanto ao consumo de energia do equipamento, promovendo o uso de novas estratégias de maquinagem ou ferramentas que tornem o processo mais sustentável.
-
- George *et al.* [61] Neste trabalho, os autores realizam um estudo da influência de parâmetros de maquinagem nas forças de corte, para operações de fresagem a seco de ligas de aço inoxidável duplex, 2205 DSS e 2507
-

DSS. Os parâmetros avaliados neste estudo, são a velocidade de rotação da ferramenta e velocidade de avanço. Para além da influência destes parâmetros nas forças de corte, foi avaliada a influência na temperatura de maquinagem. Foi registada uma diminuição das forças de corte com o aumento da velocidade de corte utilizada. Quanto à influência da velocidade de rotação, notou-se uma diminuição das forças de corte até velocidades de rotação de 4200 RPM, causada pelo aumento da temperatura do material a ser maquinado, que sofre um amaciamento, tornando-o mais fácil de maquinar. Valores acima deste, provocam um aumento nas forças de corte, o qual foi registado até 5600 RPM. Este fenómeno deve-se ao elevado desgaste da ferramenta, que provoca um aumento nas forças de maquinagem. Relativamente à velocidade de avanço, registou-se um aumento das forças com o aumento do valor deste parâmetro, causadas pelo aumento da fricção e área de contacto na interface ferramenta-peça.

Tal como visto pelos estudos apresentados na Tabela 5, o conhecimento e controlo das forças de corte é crucial para a otimização e melhoria dos processos de fresagem, fornecendo informação útil para a seleção correta de parâmetros e ferramentas de maquinagem, para a fresagem de peças com formato complexo ou de materiais difíceis-de-maquinar.

2.3 Revestimentos

Os revestimentos duros podem ser aplicados a várias superfícies, trazendo vários benefícios com a sua aplicação, principalmente relacionados com a melhoria do comportamento ao desgaste das superfícies, como por exemplo em moldes de injeção de compósitos reforçados com fibras de vidro [62-63] e ligas metálicas [64], ou em ferramentas para vários processos, tais como estampagem [65-67]. No entanto, estes revestimentos podem ser utilizados tendo em conta as suas propriedades óticas, sendo igualmente aplicados correntemente na indústria automóvel [68-69].

Existem vários tipos de revestimentos que podem ser obtidos, cada um desenvolvido para uma grande variedade de aplicações. Um exemplo de revestimentos com elevada resistência ao desgaste, é o caso dos revestimentos *DLC* (*Diamond like carbon*) [70], geralmente obtidos por *CVD* (*Chemical Vapor Deposition*) [71-72] e *PVD* (*Physical Vapor Deposition*) [73-74], e podendo ser depositados numa grande variedade de substratos, incluindo aços [75-76]. Existem vários revestimentos, monocamada, conhecidos pela sua elevada resistência ao desgaste, tendo sido utilizados em aplicações sujeitas a altos níveis de desgaste abrasivo, tais como: TiB_2 [77-78], $TiAlCrSiN$ [79] e $TiAlSiN$ [80-81]. São também aplicados vários revestimentos multicamada, sendo estes muito populares para aplicações de maquinagem [5,15], permitindo uma junção de propriedades

mecânicas e térmicas, permitindo assim uma melhoria no desempenho das ferramentas revestidas por este tipo de revestimentos.

Estes revestimentos têm uma grande aplicação nos processos de maquinagem, nomeadamente torneamento e fresagem [5,15], aumentando a estabilidade e produtividade dos processos onde são aplicados, reduzindo forças de corte, aumentando a qualidade da superfície produzida e melhorando a vida-útil da ferramenta de forma significativa. Os revestimentos conferem propriedades excelentes às ferramentas, melhorando as propriedades mecânicas, diminuindo o coeficiente de atrito e melhorando o escoamento do calor da zona de maquinagem [5,15]. No presente subcapítulo, irão ser apresentadas as várias técnicas de deposição utilizadas na obtenção de revestimentos.

2.3.1 Técnicas de deposição

As técnicas utilizadas para a obtenção de revestimentos podem ser divididas em duas categoriais principais: processo de deposição química de vapor (*CVD – Chemical Vapor Deposition*) e deposição física de vapor (*PVD -Physical Vapor Deposition*) [82-83]. As várias técnicas de deposição PVD e CVD estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Técnicas de deposição principais, para os métodos PVD e CVD

Método de deposição	Técnicas de deposição
PVD	<ul style="list-style-type: none"> • Projeção catódica (<i>sputtering</i>); • Evaporação no vácuo; • Deposição iónica.
CVD	<ul style="list-style-type: none"> • CVD realizado em vácuo; • CVD com ausência de vácuo.

Para a realização do revestimento através de CVD, é colocado um substrato num reator, que é aquecido a temperaturas entre os 500 °C e 1000 °C. No reator, está contido hidrogénio no estado gasoso, geralmente a pressões baixas ou atmosféricas. De seguida, são adicionados compostos voláteis dentro do reator que reagem com o hidrogénio, formando um revestimento no substrato, podendo obter-se espessuras consideráveis [5, 15]. Este método tem várias vantagens na produção de revestimentos: tem a capacidade de depositar revestimentos em materiais refratários; torna possível controlar o tamanho do grão do revestimento, alterando os parâmetros do processo; e é um método que pode ser realizado à pressão atmosférica.

Relativamente aos revestimentos obtidos por PVD, estes podem ser produzidos pelas técnicas apresentadas na Tabela 6, no entanto, dentro desta categoria, as técnicas para deposição de revestimentos mais utilizadas são as de projeção catódica (*sputtering*) [83]. Existem várias técnicas de *sputtering*, no entanto, o seu princípio de funcionamento é bastante semelhante. Na projeção catódica, os átomos de um alvo

(com composição semelhante ao revestimento final), são ejetados através do bombardeamento de iões de um gás inerte (geralmente árgon), e são transportados por meio de um plasma até à superfície de um substrato (colocado dentro do reator), onde condensam, dando origem ao revestimento. Este processo tem uma temperatura de deposição baixa, quando comparado aos métodos CVD, sendo possível depositar revestimentos em materiais com baixos pontos de fusão. Uma outra vantagem destes métodos, é o facto de ser mais eficiente do que os métodos CVD em termos energéticos [84-85], tal como observado na Figura 7.

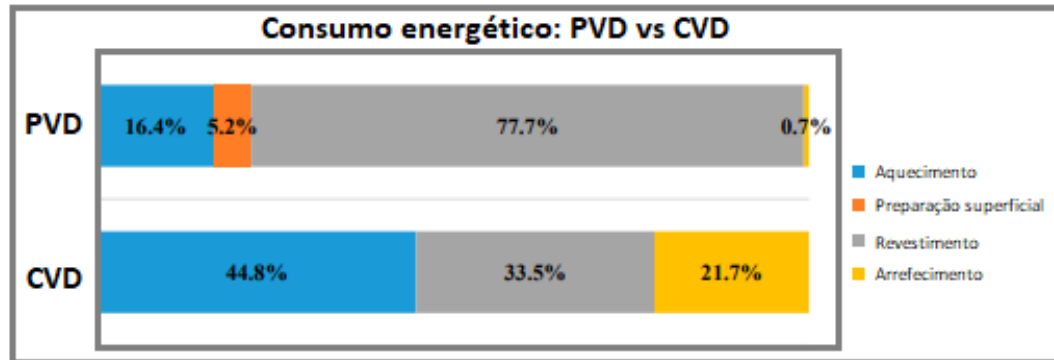


Figura 7 – Consumo energético (percentual) dos métodos PVD e CVD [85]

Uma técnica PVD de *sputtering, high power impulse magnetron sputtering (HiPIMS)*, é bastante recente, mostrando bastante potencial [85]. Esta técnica exhibe um forte potencial na produção de revestimentos com boas propriedades, devido à elevada taxa de ionização associada a esta técnica [86]. Estudos recentes, revelam o potencial do uso de revestimentos obtidos por esta técnica na maquinagem, com revestimentos a serem depositados por esta técnica a exibirem valores de propriedades mecânicas (dureza e módulo de elasticidade) bastante elevados, quando comparados com revestimentos obtidos por técnicas mais convencionais [87-88]. Adicionalmente, são reportados valores elevados da força de adesão do revestimento ao substrato [89], bem como um maior nível de tensões residuais no revestimento [90]. Estes fatores favorecem o comportamento ao desgaste e desempenho das ferramentas revestidas [15, 91].

2.3.2 Revestimentos para ferramentas de maquinagem

Tal como mencionado anteriormente, a utilização de revestimentos em ferramentas de maquinagem tem vários benefícios, desde a melhoria da qualidade de produção até ao aumento da vida-útil da ferramenta [5,15]. Os revestimentos utilizados na maquinagem podem ter vários tipos de estrutura, apresentadas na Figura 8.



Figura 8 – Tipos de estrutura dos revestimentos mais comumente utilizadas em ferramentas de maquinagem [84]

Como pode ser observado na Figura 8, existem vários tipos de estrutura que os revestimentos podem apresentar, nomeadamente:

- a) Revestimento monocamada;
- b) Revestimento de dupla camada;
- c) Revestimento em gradiente;
- d) Revestimento multicamada;
- e) Revestimento nanoestruturado (multicamada com espessura nanométrica);
- f) Revestimento nanocompósito.

Os revestimentos multicamada, principalmente aqueles que consistem em camadas alternadas de dois tipos de material (Figura 8, revestimento d)), são o tipo de revestimentos mais utilizados para ferramentas de maquinagem. Esta estrutura oferece uma ótima combinação de propriedades mecânicas e térmicas, possibilitando um aumento significativo da vida-útil e da qualidade de produção da ferramenta [5,15]. O aumento de vida-útil neste tipo de revestimentos, deve-se, também, à sua estrutura, visto que um revestimento com um maior número de camadas tem uma maior resistência à propagação de fissuras [84, 92-93]. Na Figura 9 está representado um esquema da propagação de fissuras em revestimentos de várias estruturas.

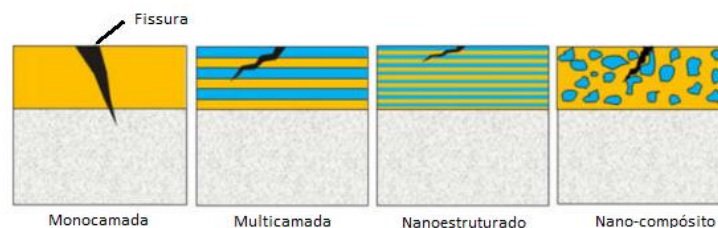


Figura 9 – Propagação de uma fissura em vários tipos de revestimento [84]

A adição de camadas aos revestimentos pode ser feita para melhorar as propriedades de adesão destes, depositando a camada exterior (“camada de trabalho”, visto que é a que contacta com o material) com excelentes propriedades de adesão, promovendo um melhor comportamento ao desgaste de todo revestimento.

A composição dos revestimentos influencia as suas propriedades, incluindo a composição das camadas destes. Por exemplo, os primeiros revestimentos aplicados a ferramentas de corte foram os revestimentos TiN (Nitreto de titânio), estes foram melhorados com a adição de alumínio ao revestimento, criando assim TiAlN (Nitreto de titânio e alumínio). Este tipo de revestimentos mostrou ser bastante útil para operações de maquinagem utilizando altas velocidades, sendo hoje utilizado numa grande variedade de aplicações de maquinagem, principalmente devido à camada de óxidos que é criada à superfície deste revestimento, conferindo à ferramenta uma elevada resistência à oxidação [93-96]. O estudo realizado acerca do desempenho destes revestimentos leva ao desenvolvimento de novos tipos de revestimento, tais como os revestimentos à base de TiAlN atualmente em estudo.

Devido ao bom desempenho deste revestimento para aplicações de maquinagem, estão a ser atualmente desenvolvidos vários tipos de revestimentos, exibindo todo o tipo de estruturas, tendo sempre como base o TiAlN [97], desde a inclusão de camadas intermédias de elementos como Cr, para promover microestruturas desejadas nos revestimentos [98], melhorando assim as suas propriedades, até ao desenvolvimento dos novos revestimentos nanocompósitos e nanoestruturados (camadas múltiplas de ordem nanométrica), que exibem elevadas propriedades mecânicas e de resistência à propagação de fissuras. Existem, também, vários estudos recentes acerca da dopagem de revestimentos à base de TiAlN com vários elementos, de forma a alterar as suas propriedades mecânicas e microestruturas, tal como observado na Figura 10, onde pode ser observada a influência da adição de Ni na microestrutura de revestimentos AlTiN [99]. Na Figura 10 a), pode ser observada a microestrutura do revestimento sem a adição de Ni, esta apresenta uma estrutura colunar, nas Figuras 10 b) e c), estão apresentadas as microestruturas do revestimento de AlTiN com um conteúdo de 1,5% e 3% de Ni, respetivamente. A adição do Ni a este revestimento provoca uma homogeneização da microestrutura do revestimento, melhorando as propriedades mecânicas do revestimento, principalmente a sua dureza.

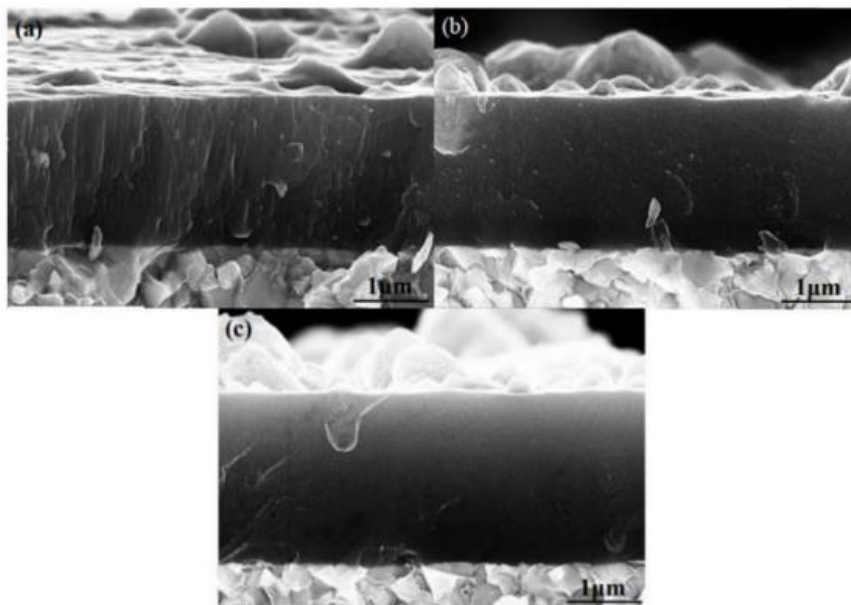


Figura 10 – Revestimentos AlTiN-Ni, com percentagens de Ni diferentes: 0% a); 1,5% b) e 3% c) [99]

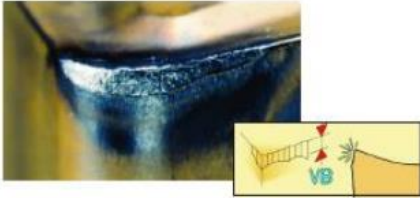
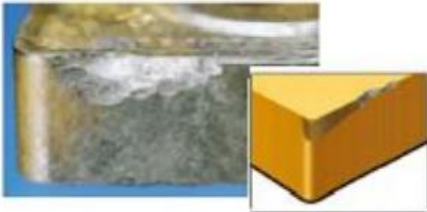

Ainda relativamente aos elementos dopantes utilizados neste tipo de revestimentos, alguns estudos apresentam resultados promissores para elementos tais como o Mo [100], Y [101], Ta [101] e Ru [101-102]. Com a adição destes elementos, são obtidos revestimentos com propriedades mecânicas muito elevadas, nomeadamente dureza e módulo de elasticidade, e com elevada resistência à propagação de fissuras, especialmente no caso da adição dos elementos Mo e Ru [97].



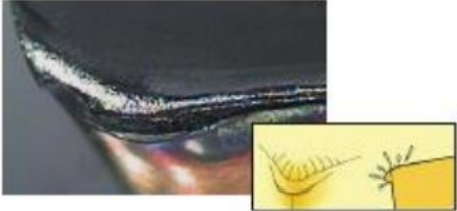

2.4 Estudo do desgaste das ferramentas

O desgaste de uma ferramenta de corte é a indicação principal da vida-útil da ferramenta, estando relacionado com o desempenho desta. Este desgaste é provocado pelas interações da ferramenta com a peça a maquinar e com a apra gerada durante a maquinagem. O desgaste das ferramentas apresenta-se de várias maneiras, exibindo diferentes mecanismos de desgaste, que estão dependentes do material da ferramenta, parâmetros de maquinagem, material a maquinar e geometria de corte [15]. Como tal, a interpretação deste desgaste fornece informação importante, no que toca à otimização do processo de maquinagem e à maquinabilidade de diversos materiais, especialmente ligas consideradas difíceis-de-maquinar [5, 97].

Existem classificações para os mecanismos de desgaste, os quais se apresentam de várias formas. Na Tabela 7 estão apresentados os mecanismos de desgaste comumente identificados nas ferramentas de corte [7].

Tabela 7 – Mecanismos de desgaste comumente apresentados nas ferramentas de fresagem [7]

Mecanismo de desgaste/Tipo de desgaste		Representação
Abrasivo	Desgaste do flanco	
Mecânico	Lascagem	
Adesivo	Desgaste tipo entalhe	

	Aresta postiça	
Químico	Formação de cratera	
	Deformação	
Térmico	Fratura	

Os diferentes tipos de desgaste irão ser descritos de seguida:

- **Desgaste do flanco:** Este tipo de desgaste é o mais comum e o que menos impacta a vida-útil da ferramenta. Ocorre devido à abrasão causada pelo contacto da ferramenta com o material;
- **Lascagem:** Resulta da sobrecarga de tensões de compressão resultantes do processo de corte. Estas tensões são causadas por fenómenos de escoamento da avara, ou uma seleção indevida dos parâmetros de maquinagem;
- **Desgaste tipo entalhe:** Apresenta-se na ferramenta sob a forma de microfissuras no flanco e face de folga das ferramentas. Estas fissuras irão propagar-se, originando fraturas na aresta de corte, comprometendo a sua integridade;
- **Aresta postiça:** Este fenómeno resulta da soldadura de material na face de ataque das ferramentas, causada pelas altas pressões do processo de maquinagem. A presença da aresta postiça prejudica diretamente a qualidade superficial maquinada;
- **Formação de cratera (químico):** Este fenómeno ocorre na face de ataque da ferramenta, devido a uma reação química entre o material e a ferramenta de

corde. A cratera formada pode alargar, resultando no enfraquecimento da aresta de corte;

- **Deformação (térmica):** A ferramenta sofre deformação plástica devido ao amaciamento do material da ferramenta, devido às elevadas temperaturas desenvolvidas no processo de maquinagem;
- **Fratura (térmica):** Este fenómeno ocorre devido às mudanças bruscas de temperatura na ferramenta, causada pelas elevadas temperaturas de maquinagem. Apresenta-se sob a forma de várias fraturas perpendiculares à aresta de corte.

2.4.1 Análise do desgaste de ferramentas revestidas

A análise do desgaste das ferramentas revestidas também oferece várias vantagens em termos de otimização do processo, possibilitando o desenvolvimento de novas ferramentas e revestimentos, capazes de produzir melhores resultados em termos de qualidade do processo e vida-útil da ferramenta [5,15,97].

Os mecanismos de desgaste apresentam-se da forma referida na subsecção anterior, no entanto, para além daqueles apresentados na Tabela 7, as ferramentas revestidas apresentam mecanismos de desgaste do revestimento, como por exemplo, a delaminação, fissuração e lascagem do revestimento. Um exemplo de delaminação do revestimento pode ser observado na Figura 11 [103].



Figura 11 – Detalhe do mecanismo de desgaste, delaminação do revestimento, numa fresa [103]

Existem vários estudos realizados acerca do desgaste de ferramentas revestidas, utilizadas em operações de fresagem. Tal como mencionado anteriormente, estes tipos de estudos são bastante úteis, fornecendo informação relevante para otimização do processo. No caso das ferramentas revestidas, o estudo dos mecanismos de desgaste permite uma correta seleção do revestimento ideal para certas aplicações [5,15]. Na Tabela 8 estão apresentados vários estudos realizados acerca da utilização de fresas revestidas em operações de maquinagem, avaliando o seu desempenho e comportamento ao desgaste.

Tabela 8 – Tabela resumo de estudos realizados acerca do desgaste de ferramentas revestidas utilizadas em operações de fresagem

Autores	Resumo do artigo
Bandapalli <i>et al.</i> [103]	<p>Neste estudo, é analisado o desempenho dos revestimentos PVD AlTiN e TiAlN, utilizados em operações de microfresagem de uma liga de titânio. O desgaste das ferramentas revestidas foi avaliado e comparado com uma ferramenta não revestida. Registou-se, para os dois tipos de revestimento, os mesmos mecanismos de desgaste, sendo estes principalmente delaminação do revestimento e adesão do material maquinado à superfície das ferramentas. A adesão de material é promovida por altas temperaturas de maquinagem, provocadas pelo corte desta liga. Em relação ao desgaste apresentado pela ferramenta não revestida, este apresentou principalmente adesão de material, no entanto, numa menor escala, quando comparado com a encontrada nas ferramentas revestidas, significando que, para este caso, é preferível a utilização de uma ferramenta não revestida, principalmente devido ao custo.</p>
An <i>et al.</i> [104]	<p>An <i>et al.</i> apresentam uma investigação no desgaste de ferramentas revestidas por PVD e CVD, após operações de facejamento em ligas de titânio Ti-6242S e Ti-555. Foram testadas ferramentas não revestidas e ferramentas revestidas com CVD-Ti(C,N) + Al₂O₃ + TiN e PVD – (Ti, Al)N + TiN. Os autores verificaram que, após os ensaios de maquinagem de Ti-6242S, o revestimento CVD apresentava indícios de lascagem, ainda que não muito severo, e adesão de material. Os mesmos mecanismos de desgaste foram registados para os revestimentos PVD, com a adição de desgaste devido a temperaturas elevadas desenvolvidas no contacto.</p> <p>Para os ensaios de maquinagem da liga de titânio Ti-555, o revestimento de CVD sofreu delaminação, com a ferramenta a apresentar desgaste adesivo e lascagem grave. No caso do revestimento PVD, este sofreu desgaste térmico na face de ataque e adesão na face de folga. Dos resultados destes ensaios de maquinagem, os autores concluíram que o revestimento PVD apresentava um melhor comportamento ao desgaste, devido principalmente a uma maior resistência à propagação de fissuras, que provocaram a falha do revestimento CVD.</p>
Sousa <i>et al.</i> [105]	<p>Neste trabalho, é apresentado um estudo comparativo de ferramentas revestidas com TiAlN e TiAlSiN, em operações de fresagem numa liga de aço, W 1.2711. Foi avaliada a influência de vários parâmetros na rugosidade superficial produzida, forças de corte e no desgaste das ferramentas. Foi avaliada a influência do tipo da ferramenta, sendo testados dois: uma fresa de topo e uma esférica. Relativamente aos parâmetros de maquinagem, foi variado o comprimento de corte e velocidade de corte, sendo testadas as</p>

ferramentas para valores de 2 e 4 metros de comprimento de corte e de 40 m/min, 80 m/min e 120 m/min de velocidade de corte.

Os valores ótimos de rugosidade superficial e desgaste são obtidos para um menor comprimento de corte, visto que um aumento deste parâmetro promove maior desgaste da ferramenta. Foram registados os melhores resultados para todas as ferramentas ensaiadas a 80 m/min de velocidade de corte.

Relativamente à geometria, para as fresas de topo, não foram registadas grandes diferenças nos resultados obtidos e no desgaste apresentado para as ferramentas revestidas com TiAlN e TiAlSiN, não justificando o uso do TiAlSiN. No entanto, as fresas esféricas que foram revestidas com TiAlSiN apresentaram os melhores resultados, em termos de valores mínimos de rugosidade e desgaste, quando comparadas com todas as outras ferramentas.

Sousa *et al.*
[106]

Sousa *et al.* apresentam um estudo comparativo de ferramentas não revestidas e revestidas por um revestimento DLC/CrN multicamada. Tal como no trabalho anteriormente apresentado [105], é avaliada a influência do comprimento de corte e da velocidade de avanço no desgaste e desempenho das ferramentas testadas. Ambas as ferramentas testadas exibem um comportamento semelhante em termos de quantidade de desgaste apresentada e qualidade da superfície maquinada. Na parte inicial dos testes, as ferramentas revestidas têm um maior desempenho do que as não revestidas, no entanto, esta diferença não é acentuada. Todavia, com o aumento do comprimento de corte, as ferramentas revestidas exibem uma maior quantidade de desgaste e produzem superfícies com valores de rugosidade superiores àqueles obtidos com as ferramentas não revestidas. Relativamente aos mecanismos de desgaste apresentados pelas ferramentas, ambas as ferramentas apresentam indícios de abrasão e adesão de material, com as ferramentas revestidas a mostrarem uma maior quantidade de material aderido à sua superfície. Adicionalmente, as ferramentas revestidas apresentam mecanismos de delaminação e fissuração do revestimento.

2.5 Maquinagem de aços inoxidáveis duplex

Devido às suas propriedades mecânicas e de resistência à corrosão excelentes, combinando os benefícios de possuir as fases α -ferrite e γ -austenite [107], os aços inoxidáveis duplex (DSS) têm uma vasta gama de aplicações [108-109]. Estas ligas apresentam melhores propriedades quando comparadas com ligas de aço inoxidável mais convencionais, resultando num interesse crescente neste tipo de ligas, sendo mais aplicado do que as “super-ligas” à base de Ni [110]. Devido a esta popularidade, existe

um grande interesse no estudo da otimização de processos de maquinagem aplicados a este material, principalmente devido ao desgaste que este material provoca nas ferramentas de corte. Na Tabela 9, estão apresentados vários artigos realizados acerca da maquinagem destas ligas, utilizando principalmente ferramentas revestidas. Nestes estudos, são avaliadas a influência das condições de corte e ferramentas na maquinagem de aços inoxidáveis duplex, analisando e identificando os mecanismos de desgaste mais comumente apresentados pelas ferramentas após cortar este material.

Tabela 9 – Tabela resumo de estudos realizados acerca do desgaste de ferramentas revestidas utilizadas em operações de fresagem

Autores	Resumo do artigo
Martinho <i>et al.</i> [111]	Martinho <i>et al.</i> avaliam o desempenho de duas pastilhas de corte com revestimentos PVD e CVD, utilizadas em operações de desbaste de um aço inoxidável duplex, X2CrNiMoCu25-6-3-3. Foram avaliados os comportamentos das ferramentas de corte com revestimentos PVD (AlTiN - monocamada) e CVD (TiN/ TiCN/Al ₂ O ₃ - multicamada) em estudos de análise da rugosidade superficial, avaliação do desgaste da ferramenta e monitorização dos níveis de vibração produzidos nos testes. Os parâmetros de corte foram mantidos para todos os ensaios. As pastilhas de corte revestidas pelo processo CVD de (TiN/TiCN/Al ₂ O ₃) apresentam um melhor comportamento ao desgaste, sendo mais eficazes em operações de desbastes, onde a qualidade da superfície maquinada não é um fator importante. No entanto, relativamente a operações de acabamento, as ferramentas revestidas com AlTiN produziram uma superfície com boa qualidade, sendo melhor do que a obtida pelas ferramentas CVD.
Airao <i>et al.</i> [112]	Neste trabalho, é testada a influência da velocidade de corte e velocidade de avanço, na rugosidade superficial maquinada, obtida em ensaios de fresagem realizados numa liga de aço inoxidável duplex SS 2507, com e sem lubrificante. Após os ensaios de maquinagem, a rugosidade superficial maquinada foi avaliada, registando valores mais baixos para os ensaios realizados com refrigeração. Relativamente à influência dos parâmetros de maquinagem, registou-se um aumento da rugosidade superficial para valores maiores de velocidade de avanço. No entanto, a velocidade de avanço foi determinada como o parâmetro mais influente na qualidade da superfície maquinada. Os autores foram capazes de produzir a melhor qualidade de superfície maquinada para baixos valores de avanço e valores elevados de velocidade de corte.
Gouveia <i>et al.</i> [113]	Neste trabalho, foram realizados ensaios de fresagem de uma liga de aço inoxidável duplex, usando dois comprimentos de corte diferentes, mantendo a trajetória, a velocidade de corte, a profundidade de corte

axial e radial e o avanço por dente constante. Foram testadas ferramentas com 2, 3 e 4 lâminas, e dois revestimentos (AlCrN e TiAlN), analisando-se o comportamento ao desgaste para cada comprimento de corte e avaliando posteriormente a rugosidade superficial da peça maquinada.

Conclui-se que as ferramentas com quatro lâminas de corte produzem valores de rugosidade superficial da peça mais baixos, em comparação com as ferramentas de 2 ou 3 lâminas de corte. O revestimento TiAlN apresentou melhores resultados em termos de desgaste do flanco, em relação ao AlCrN, que apresentou um desgaste prematuro e severo.

Neste estudo, é realizada uma comparação do desgaste e da vida-útil de dois tipos de ferramentas revestidas na maquinagem de uma liga de aço inoxidável duplex, UNS S32750. Os autores realizaram ensaios de fresagem utilizando uma ferramenta PVD AlTiN e uma ferramenta CVD TiCN Al₂O₃, avaliando os mecanismos de desgaste e a vida-útil destas ferramentas, comparando-os com os resultados obtidos com uma ferramenta não revestida.

Ahmed *et al.*
[114] A ferramenta revestida por PVD com AlTiN apresentou a vida-útil maior, sendo duas vezes superior à do revestimento CVD, e três vezes superior à da ferramenta não revestida. Relativamente aos mecanismos de desgaste, ambas as ferramentas apresentaram, predominantemente, desgaste adesivo e lascagem. No entanto, a ferramenta CVD apresentou algum desgaste térmico (fissuras provocadas por fadiga térmica). Quanto à ferramenta não revestida, esta apresentou principalmente desgaste abrasivo, adesivo e lascagem severa.

Silva *et al.*
[115] Silva *et al.* apresenta um estudo onde foram analisadas pastilhas de carboneto de tungstênio revestidas por PVD e CVD, para avaliar o comportamento destas, em operações de maquinagem de um aço inoxidável super duplex, GX2CrNiMoN26-7-4, identificando os mecanismos de desgaste que afetam cada um dos revestimentos, bem como avaliando a qualidade da superfície da peça produzida. Foi registado o nível de vibração, de forma a associar o tipo de revestimento ou falha da pastilha ao nível de vibrações geradas na árvore da máquina. Após a realização dos ensaios, os autores concluíram que as ferramentas revestidas com TiAlN por PVD, produzem superfícies com menor rugosidade e apresentam um melhor comportamento ao desgaste, evidenciando as vantagens deste tipo de revestimento em relação ao revestimento por CVD, de TiCN/TiN/Al₂O₃, na maquinagem do aço inoxidável super duplex.

DESENVOLVIMENTO

3.1 Materiais

3.2 Métodos

3.3 Resultados

3 DESENVOLVIMENTO

No presente capítulo irão estar apresentadas as informações relativas aos materiais utilizados e os métodos adotados para a realização deste trabalho. O capítulo está dividido em três subcapítulos, 3.1. Materiais, 3.2. Métodos e 3.3. Resultados e discussão, onde resultados obtidos nos ensaios de maquinagem irão estar apresentados, fazendo uma avaliação do desempenho das ferramentas, quanto ao desgaste e qualidade do acabamento superficial produzido.

3.1 Materiais

Nesta subsecção, irão ser apresentados os vários materiais utilizados para a realização dos ensaios de maquinagem, nomeadamente as ferramentas que foram utilizadas, referindo qual o material do substrato e revestimento, e a geometria de cada uma das mesmas. O material maquinado irá ser também apresentado, mencionando qual o seu formato inicial, as suas propriedades mecânicas (principais) e a sua composição química.

3.1.1 Ferramentas utilizadas

3.1.1.1 Material do substrato

Todas as ferramentas de corte utilizadas nos ensaios de maquinagem tinham por base um substrato de Carboneto de Tungsténio (WC-Co), posteriormente provido de um revestimento duro. O carboneto é de grau 6110 e apresenta uma granulometria média de cerca de 0.3 μm . Adicionalmente, como aglutinante foi utilizado Cobalto (~6%wt). As ferramentas não revestidas foram fornecidas pela empresa InovaTools, S.A. (Marinha Grande, Portugal).

3.1.1.2 Geometria das ferramentas

Todas as ferramentas utilizadas tinham um diâmetro de 4 mm e um comprimento útil de corte de 68 mm, no entanto, estas possuíam geometrias diferentes. Foram produzidas desta forma, para avaliar a influência do tipo de geometria no desempenho da ferramenta. Assim, foram produzidas ferramentas com quatro geometrias diferentes. Adicionalmente, estas ferramentas foram revestidas com três revestimentos distintos, nomeadamente, TiAlN, TiAlSiN e AlCrN, tornando possível a avaliação da influência do revestimento da ferramenta no comportamento desta durante os testes de maquinagem. Salienta-se que foram testados dois tipos de revestimentos TiAlSiN obtidos com recurso a métodos de deposição diferente, um destes obtido pela técnica de deposição convencional (utilizada na deposição dos outros revestimentos), *dcMS*

(*direct current Magnetron Sputtering*), enquanto o outro revestimento, igualmente de TiAlSiN, foi obtido pela técnica *HiPIMS* (*High Power Impulse Magnetron Sputtering*).

No total, foram produzidos cinco tipos de ferramentas diferentes para a maquinagem do aço LDX 2101, tendo geometrias e revestimentos variados. Os diferentes tipos de ferramenta utilizados podem ser observados na Tabela 10, onde estão apresentadas as características e a identificação dos tipos de ferramentas envolvidos.

Tabela 10 – Tipos de ferramenta para a maquinagem do aço inoxidável duplex LDX 2101

Ref. Ferramenta	Geometria	Nº de lâminas	Ângulo de ataque	Ângulo de folga	Revestimento
T1	<i>Flat end-mill</i>	2	30°	10°	AlCrN (<i>dcMS</i>)
T2	<i>End-mill</i> com um chanfro de 45° a 0,08 mm da aresta de corte	4	35°	10°	TiAlN (<i>dcMS</i>)
T3	<i>Flat end-mill</i>	4	40°	5°	AlCrN (<i>dcMS</i>)
T4	<i>End-mill</i> com um raio de canto de 0,2 mm	4	35°	10°	TiAlSiN (<i>dcMS</i>)
T5	<i>End-mill</i> com um raio de canto de 0,2 mm	4	35°	10°	TiAlSiN (<i>HiPIMS</i>)

Após a receção dos substratos, as ferramentas foram sujeitas a um processo de limpeza por ultrassons, utilizando acetona como agente de limpeza. Numa primeira etapa, as ferramentas foram sujeitas a uma limpeza com uma duração de 10 minutos. Seguidamente, os substratos foram sujeitos a uma nova limpeza (trocando a acetona), desta vez durante 5 minutos. Este processo de limpeza foi realizado de forma a garantir que não existiam impurezas nos substratos aquando da deposição dos revestimentos, evitando possíveis defeitos nos revestimentos depositados.

3.1.1.3 Deposição dos revestimentos

Tal como mencionado na secção anterior, foram utilizadas duas técnicas de deposição para a obtenção dos revestimentos mencionados. Para a deposição dos revestimentos obtidos por *dcMS*, foi utilizado um equipamento CemeCom CC800 / 9ML *PVD Unbalanced Magnetron Sputtering*, com a capacidade de albergar quatro alvos. De forma a garantir a homogeneidade dos revestimentos depositados, a velocidade de rotação do porta-ferramentas foi definida como 1 rpm. Para a deposição dos

revestimentos TiAlN e TiAlSiN, foram utilizados quatro alvos com uma composição química semelhante, no entanto, no caso da deposição do revestimento AlCrN, foram utilizados dois alvos compostos por 100% Cr e dois alvos compostos por 100% Al. Estes alvos foram dispostos de uma forma alternada dentro do reator, resultando num revestimento composto por camadas alternadas de Cr e Al. Os parâmetros de deposição utilizados para os revestimentos mencionados podem ser observados na Tabela 11.

Tabela 11 – Parâmetros de deposição utilizados para a obtenção dos revestimentos, através da técnica *dcMS*

Parâmetros	TiAlN	TiAlSiN	AlCrN
Tempo de deposição [min.]	240	240	240
Gases utilizados no reator	Ar ⁺ + Kr + N ₂	Ar ⁺ + Kr + N ₂	Ar ⁺ + Kr + N ₂
Material do alvo	4x TiAl 40/60	4x TiAlSi 38/57/5	2x Al + 2x Cr
Pressão de trabalho [mPa]	580	580	580
Temperatura [°C]	450	450	450
Bias [V]	- 110	- 110	- 110
Densidade de corrente do alvo [A/cm ²]	20	20	20
Velocidade de rotação do porta-ferramentas [RPM]	1	1	1

Para as ferramentas revestidas com TiAlSiN depositado pela técnica *HiPIMS*, foi utilizado um equipamento CemeCom CC800/HiPIMS. Os parâmetros utilizados para a obtenção deste revestimento podem ser observados na Tabela 12.

Tabela 12 – Parâmetros de deposição utilizados para a obtenção do revestimento de TiAlSiN, pela técnica *HiPIMS*

Parâmetros	TiAlSiN
Tempo de deposição [min.]	240
Gases utilizados no reator	Ar ⁺ + Kr + N ₂
Material do alvo	4x TiAlSi 38/57/5
Pressão de trabalho [mPa]	580
Temperatura [°C]	450
Bias [V]	- 110
Densidade de corrente do alvo [A/cm ²]	20

Frequência de impulso [Hz]	40
Duração do impulso [μs]	400
Velocidade de rotação do porta-ferramentas [rpm]	1

Os parâmetros de deposição foram selecionados com base em experiências bem-sucedidas anteriormente aplicadas a substratos/material de substrato semelhantes. Após o processo de deposição, todas as ferramentas foram embaladas cuidadosamente, evitando o manuseamento da zona de corte destas.

3.1.2 Material maquinado

O material utilizado nos testes de maquinagem tratava-se de um aço inoxidável duplex, mais concretamente, a liga LDX 2101. O material foi fabricado e fornecido pela empresa Outokumpu (Helsínquia, Finlândia), sendo providenciado sob o formato de um varão cilíndrico, com um diâmetro de 75 milímetros. De acordo com o fornecedor, o material apresenta uma tensão de cedência de 450 MPa, e uma resistência à tração de 650 MPa. O aço em questão tem uma dureza de cerca de 280 ± 20 HV₅, e a sua composição química está apresentada na Tabela 13. Para verificar os valores de dureza do material, foram efetuadas dez medições ao longo do mesmo, utilizando uma máquina universal de ensaios de dureza, EMCO M4U (Kuchl, Áustria), usando uma carga de 5 kgf com um tempo de permanência à carga máxima de 30 segundos. Estes valores vão de encontro aos dados providenciados pelo fornecedor (Ficha técnica disponível em anexo, Anexo 1).

Tabela 13 – Composição química (%wt) da liga LDX 2101

C	Mn	Cu	Cr	Ni	Mo	N
0,03	5,0	0,3	21,5	1,5	0,3	0,22

3.2 Métodos

Na presente subsecção irão ser apresentados os métodos e equipamentos utilizados para a realização das várias análises, desde a preparação das amostras até à análise do desgaste das ferramentas.

3.2.1 Preparação das amostras para análise SEM

Para avaliar a espessura dos revestimentos aplicados às ferramentas por microscopia eletrónica de varrimento (MEV), foi cortada uma ferramenta de cada tipo na zona de corte revestida, de forma a produzir uma secção transversal de cada uma destas, para que depois estas fossem lixadas e polidas, permitindo assim a análise das secções transversais. As ferramentas foram cortadas utilizando um equipamento de corte com uma serra de disco diamantada, STRUERS MINITOM (Struers, Inc., Cleveland, OH, USA).

Após o corte de cada uma das ferramentas, procedeu-se à montagem destas em resina termoendurecível. A montagem foi realizada utilizando o equipamento de prensagem a quente, STRUERS PEDOPRESS (Struers, Inc., Cleveland, OH, USA). O equipamento de corte e de montagem podem ser observados na Figura 12 a) e b), respetivamente.



a)



b)

Figura 12 – a) Equipamento de corte STRUERS MINITOM e b) equipamento de montagem em resina termoendurecível, STRUERS PEDOPRESS.

A montagem em resina facilita o manuseamento das amostras durante os processos posteriores de lixagem e polimento.

As propriedades do material de substrato (carboneto de tungsténio) dificultaram os processos de lixagem das amostras, provocando desníveis na superfície da amostra montada, desgastando a resina mais rapidamente do que a secção transversal. Estes desníveis influenciam a análise da espessura do revestimento, produzindo valores incorretos. Para diminuir estes desníveis, as amostras foram montadas juntamente com três secções de carboneto de tungsténio, provenientes da mesma ferramenta (parte não revestida). Este tipo de montagem pode ser observado na Figura 13.



Figura 13 – Montagem da secção transversal de uma ferramenta revestida, juntamente com as secções não revestidas, sendo que estas visavam apenas induzir o necessário equilíbrio na amostra

A distribuição das secções de carboneto de tungsténio irá diminuir os desníveis produzidos durante o processo de lixagem (maior equilíbrio global), promovendo um

desgaste da superfície mais uniforme. Todas as amostras foram sujeitas ao mesmo procedimento de lixagem e polimento.

Relativamente às operações de lixagem, foram utilizadas lixas de granulometria decrescente, usando-as na seguinte sequência: 220, 500, 800 e 1200. Durante este processo, as amostras foram rodadas 90° sempre que se alterava a lixa. Este procedimento reduz as marcas anteriormente deixadas na superfície da amostra.

Após a lixagem, as amostras foram sujeitas a um processo de polimento, de forma a eliminar quaisquer marcas ainda presentes na superfície da amostra. Este processo de polimento é composto por duas etapas, numa primeira etapa as amostras são polidas utilizando uma suspensão com partículas de diamante de 3 µm, durante cerca de 15 minutos. Seguidamente, as amostras são polidas utilizando outra suspensão de partículas de diamante, desta vez com partículas de 1 µm, tendo tido esta etapa a mesma duração da primeira.

3.2.2 Análise e caracterização do revestimento das ferramentas

3.2.2.1 Análise da espessura do revestimento

Para avaliar a espessura dos revestimentos depositados, foram preparadas amostras de acordo com o procedimento descrito na subsecção 3.2.1. Estas foram sujeitas a uma análise de microscopia eletrónica de varrimento, de forma a efetuar as medições da espessura dos revestimentos. Para esta análise, foi utilizado um microscópio eletrónico de varrimento FEI QUANTA 400 FEG (FEI, Hillsboro, OR, USA), equipado com um sistema de microanálise EDAX *Genesys Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*. Este sistema de espectroscopia de raios-X por dispersão de energia (EDS) permite realizar uma análise elementar ou caracterizar quimicamente as amostras em análise.

Quanto ao procedimento de medição da espessura dos revestimentos, foram realizadas várias medições por amostra, no mínimo seis, escolhendo zonas diferentes do revestimento. Adicionalmente, a mesma gama de ampliações foi utilizada na análise de todos os revestimentos, de forma a permitir a comparação dos resultados obtidos.

A composição química do revestimento foi também analisada neste equipamento, submetendo as amostras a análises EDS. Foi utilizado um potencial de feixe de 15 kV, sendo esporadicamente reduzido para 10 kV, de forma a reduzir o volume de interação e, portanto, reduzir a quantidade de ruído presente nos espectros. Este tipo de análise apresenta alguns problemas de precisão em análises quantitativas, no entanto, considerou-se que seria suficiente para confirmar a composição química dos revestimentos em análise, evitando a utilização de técnicas mais dispendiosas.

3.2.2.2 Avaliação das propriedades mecânicas do revestimento

As propriedades mecânicas dos revestimentos depositados foram avaliadas, nomeadamente dureza e módulo de elasticidade. Estes testes foram efetuados para cada um dos tipos de revestimento, particularmente os revestimentos de TiAlN, TiAlSiN

e AlCrN, obtidos por *dc MS*, e para o revestimento de TiAlSiN depositado por *HiPIMS*. Os testes foram realizados em amostras planas, do mesmo material do substrato das ferramentas. Estas amostras foram colocadas dentro do reator aquando do processo de deposição de cada um dos revestimentos mencionados. Na análise das amostras revestidas, foi utilizado um equipamento dinâmico para testes de ultramicrodureza, Fischerscope H100 (Fischer, Waldachtal, Alemanha), utilizando uma carga máxima de 50 mN, aplicada durante 30 segundos. A partir da energia absorvida (registada durante este ensaio), é possível calcular os valores de dureza e módulo de elasticidade dos revestimentos sujeitos a estes ensaios.

3.2.3 Ensaios de maquinagem

3.2.3.1 Centro de maquinagem

Todos os ensaios de maquinagem foram realizados no mesmo equipamento, um centro de maquinagem HAAS (Oxnard, CA, USA), modelo VF-2. Este centro de maquinagem tem como velocidade de rotação máxima 10 000 RPM e tem uma potência máxima de 20 kW. A máquina utiliza três eixos para maquinar, tendo uma mesa com 914 mm de comprimento e 356 mm de largura. A altura da mesa à árvore do equipamento é de 610 mm. Quanto à refrigeração, o equipamento utiliza fluído de corte para operações de maquinagem (que requerem refrigeração), uma emulsão composta por 5% óleo e 95% água.

3.2.3.1.1 Fixação da ferramenta

A fixação da ferramenta é feita por uma série de componentes, nomeadamente, um cone ISO40 DIN69871, um porta-pinças ER32 H70, um tirante ISO 7388-2 e uma pinça ER DIN 6499. Estes componentes são utilizados para os ensaios de maquinagem em que não se utilizou o equipamento de aquisição de forças de corte.

3.2.3.1.2 Fixação da peça a maquinar

Devido à geometria inicial da peça, sendo esta cilíndrica, foi utilizada uma bucha autocentrante de três mordentes, Bison 3575 (BISON-BIAL, Bliesk Podiaski, Polónia). A montagem utilizada pode ser observada na Figura 14.



Figura 14 – Montagem da peça a maquinar na bucha autocentrante, Bison 3575

3.2.3.1.3 Medição da ferramenta e peça a maquinar

A medição do comprimento e diâmetro das ferramentas de corte foi efetuado utilizando um sensor de ferramentas ótico (*Optical Tool Sensor – OTS*), da marca Renishaw (Reino Unido, Inglaterra). Esta medição deve ser efetuada para todos os ensaios de maquinagem.

Para determinar o zero-peça da máquina, é necessário efetuar a medição da peça de trabalho. Esta é feita através de um apalpador de contacto com transmissão ótica, da marca Renishaw (Reino Unido, Inglaterra), modelo OMP40. Com este equipamento, é determinada a posição inicial nos três eixos (X, Y e Z).

3.2.3.2 Estratégia de maquinagem

Devido à geometria do material a maquinar, optou-se por uma estratégia de maquinagem em que a ferramenta irá maquinar a peça seguindo um caminho em espiral, descrito da periferia do material até ao centro deste. Quanto aos parâmetros de maquinagem iniciais, estes foram escolhidos com base nos valores aconselhados pelo fabricante dos substratos das ferramentas. Os parâmetros de maquinagem foram aplicados a todas as ferramentas, de forma a permitir a comparação dos resultados obtidos, tanto no que respeita ao desgaste como à qualidade da superfície maquinada. Os parâmetros iniciais determinados podem ser observados na Tabela 14.

Tabela 14 – Parâmetros iniciais de maquinagem

Parâmetro inicial	Valor
Profundidade de corte – a_p [mm]	0,08
Largura de corte - a_e [mm]	3
Velocidade de corte [m/min]	60
Avanço [mm/min]	479
Comprimento de corte [m]	25

Os parâmetros observados na Tabela 14 foram aplicados para todas as ferramentas. Adicionalmente, estes foram utilizados para a realização de ensaios preliminares, usando um equipamento de aquisição de forças de corte. Estes ensaios irão servir para corrigir algum dos parâmetros inicialmente escolhidos.

3.2.3.3 Análise das forças de corte

As forças de corte desenvolvidas durante o processo de maquinagem foram analisadas, usando um dinamómetro rotativo de quatro componentes. Este equipamento denomina-se KISTLER 9171A e está pareado com um sistema de aquisição de dados KISTLER 5697A1 (Kistler, Winterthur, Suíça), permitindo a recolha de dados de forças de

corde desenvolvidas nos eixos X, Y e Z, bem como o binário desenvolvido durante o processo (Mz) (Ficha técnica disponível em anexo, Anexo 2).

Tal como mencionado na secção anterior, realizaram-se ensaios preliminares utilizando este equipamento, de forma a identificar qualquer aumento ou comportamento anormal das forças de corte durante estes ensaios. Graças a este procedimento, foi possível identificar que a partir dos 4 metros de comprimento de corte, as ferramentas já apresentavam níveis significativos de desgaste, com alguns fenómenos notáveis a partir dos 2 metros de comprimento de corte. Como tal, decidiu-se alterar o parâmetro inicial de 25 metros de comprimento de corte, criando duas novas condições de ensaio, uma para 2 metros e outra para 4 metros de comprimentos de corte.

3.2.3.3.1 Fixação da ferramenta com o dinamómetro

A fixação da ferramenta neste equipamento é feita da mesma forma que é descrita na Subsecção 3.2.3.1.1. Este equipamento tem um cone ISO40 DIN69871, um porta-pinças ER32 H70 e um tirante ISO 7388-2. Como tal, pode ser utilizada uma pinça ER DIN 6499. A montagem deste equipamento no interior do centro de maquinagem com uma ferramenta pode ser observada na Figura 15.

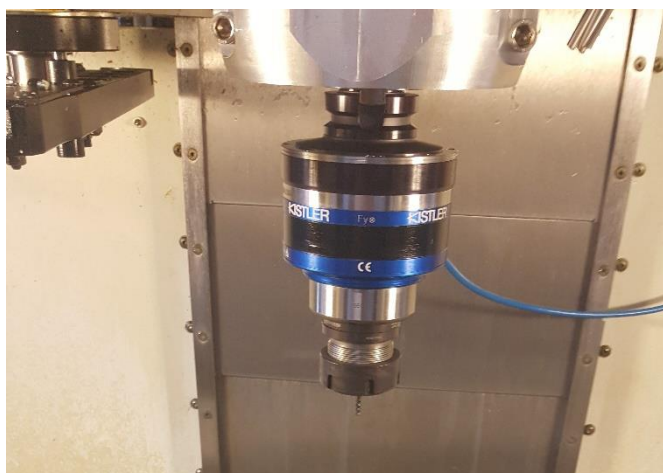


Figura 15 – Montagem do equipamento de aquisição de forças de corte com uma ferramenta

3.2.3.4 Parâmetros de maquinagem

Com os parâmetros iniciais ajustados, foram criadas mais duas condições de corte adicionais, desta vez introduzindo uma variação positiva e negativa de 25% ao valor inicial do avanço, permitindo assim a análise da influência do avanço no desgaste das ferramentas e na qualidade da superfície maquinada. Quanto aos valores de profundidade, largura e velocidade de corte, estes foram mantidos constantes para os restantes ensaios. Na Tabela 15, podem ser observados os parâmetros de maquinagem e a respetiva referência para cada ferramenta ensaiada.

Tabela 15 – Parâmetros de maquinagem para cada tipo de ferramenta utilizado

Referência	Revestimento	Número de lâminas	Avanço [mm/min]	Comprimento de corte [m]
T1L4F75	AlCrN (<i>dc MS</i>)	2	359.25	4
T1L2F75	AlCrN (<i>dc MS</i>)	2	359.25	2
T1L4F100	AlCrN (<i>dc MS</i>)	2	479	4
T1L2F100	AlCrN (<i>dc MS</i>)	2	479	2
T1L4F125	AlCrN (<i>dc MS</i>)	2	598.25	4
T1L2F125	AlCrN (<i>dc MS</i>)	2	598.25	2
T2L4F75	TiAlN (<i>dc MS</i>)	4	359.25	4
T2L2F75	TiAlN (<i>dc MS</i>)	4	359.25	2
T2L4F100	TiAlN (<i>dc MS</i>)	4	479	4
T2L2F100	TiAlN (<i>dc MS</i>)	4	479	2
T2L4F125	TiAlN(<i>dc MS</i>)	4	598.25	4
T2L2F125	TiAlN (<i>dc MS</i>)	4	598.25	2
T3L4F75	AlCrN (<i>dc MS</i>)	4	359.25	4
T3L2F75	AlCrN (<i>dc MS</i>)	4	359.25	2
T3L4F100	AlCrN (<i>dc MS</i>)	4	479	4
T3L2F100	AlCrN (<i>dc MS</i>)	4	479	2
T3L4F125	AlCrN (<i>dc MS</i>)	4	598.25	4
T3L2F125	AlCrN (<i>dc MS</i>)	4	598.25	2
T4L4F75	TiAlSiN (<i>dc MS</i>)	4	359.25	4
T4L2F75	TiAlSiN (<i>dc MS</i>)	4	359.25	2
T4L4F100	TiAlSiN (<i>dc MS</i>)	4	479	4
T4L2F100	TiAlSiN (<i>dc MS</i>)	4	479	2
T4L4F125	TiAlSiN (<i>dc MS</i>)	4	598.25	4
T4L2F125	TiAlSiN (<i>dc MS</i>)	4	598.25	2
T5L4F75	TiAlSiN (<i>HiPIMS</i>)	4	359.25	4

T5L2F75	TiAlSiN (<i>HiPIMS</i>)	4	359.25	2
T5L4F100	TiAlSiN (<i>HiPIMS</i>)	4	479	4
T5L2F100	TiAlSiN (<i>HiPIMS</i>)	4	479	2
T5L4F125	TiAlSiN (<i>HiPIMS</i>)	4	598.25	4
T5L2F125	TiAlSiN (<i>HiPIMS</i>)	4	598.25	2

Para cada uma das condições de corte apresentadas na Tabela 15, foram realizados três ensaios (com ferramentas novas), de forma a produzir um maior número de resultados, melhorando assim a consistência dos dados obtidos.

A utilização de fluído de corte nos ensaios de maquinagem dificulta a análise por microscopia eletrónica de varrimento das ferramentas. Como tal, após cada ensaio as ferramentas foram sujeitas a uma limpeza por ultrassons durante 5 minutos, utilizando acetona. A duração desta limpeza é curta, de modo a evitar a remoção de material aderido na zona de corte das ferramentas.

3.2.4 Análise da rugosidade da superfície maquinada

A análise da rugosidade superficial produzida é bastante importante, visto que esta está relacionada com o desempenho das ferramentas, o desgaste destas e a estabilidade do processo de maquinagem em si. Para medir a rugosidade da superfície maquinada, foi utilizado um rugosímetro MAHR PERTHOMETER M2 *profilometer* (Mahr, Gottingen, Alemanha), seguindo a norma DIN EN ISO 4288/ASME b461. Foram analisados os valores de rugosidade média aritmética (R_a) e rugosidade máxima (R_{max}). Os perfis R também foram recolhidos, de forma a identificar algum pico acentuado ou algum outro fenómeno presente na superfície maquinada. De forma a obter informações relacionadas com a estabilidade do processo de maquinagem, foram efetuadas medições no sentido radial e tangencial (relativas à direção da maquinagem). Se um grande desvio entre estes valores de rugosidade fosse detetado, significaria que haveria instabilidade no processo, principalmente a nível de vibrações da ferramenta aquando da maquinagem.

Relativamente aos parâmetros dos ensaios de rugosidade, foram efetuadas medições com um comprimento de 5,6 mm, que correspondem a sete segmentos do valor de *cut-off*, que é de 0,8 mm. O primeiro e último segmento não são considerados, visto que a aceleração e desaceleração do apalpador pode induzir erros nas medições da rugosidade.

A avaliação da rugosidade superficial produzida foi efetuada após cada ensaio de maquinagem, efetuando-se um mínimo de cinco medições em ambas as direções mencionadas. Os valores obtidos destas cinco medições foram utilizados para calcular o valor de R_a e $R_{máx}$ médio.

3.2.5 Análise do desgaste das ferramentas

Depois dos ensaios de maquinagem, as ferramentas foram analisadas por microscopia eletrónica de varrimento, para que o desgaste das ferramentas fosse avaliado e para que os mecanismos de desgaste principais fossem identificados. O desgaste foi quantificado analisando o valor de desgaste de flanco (VB) apresentado pelas ferramentas, procedimento que foi efetuado de acordo com a norma ISO 8688-2:1986.

Foi criada uma referência para a análise das ferramentas de dois e quatro gumes de corte, tal como pode ser observado na Figura 16. Tanto a face de ataque (*rake face*) (RF) como a face de folga (*clearance face*) (CF) foram analisadas, identificando os mecanismos de desgaste predominantes e medindo o desgaste de flanco nas CF's de todas as ferramentas.

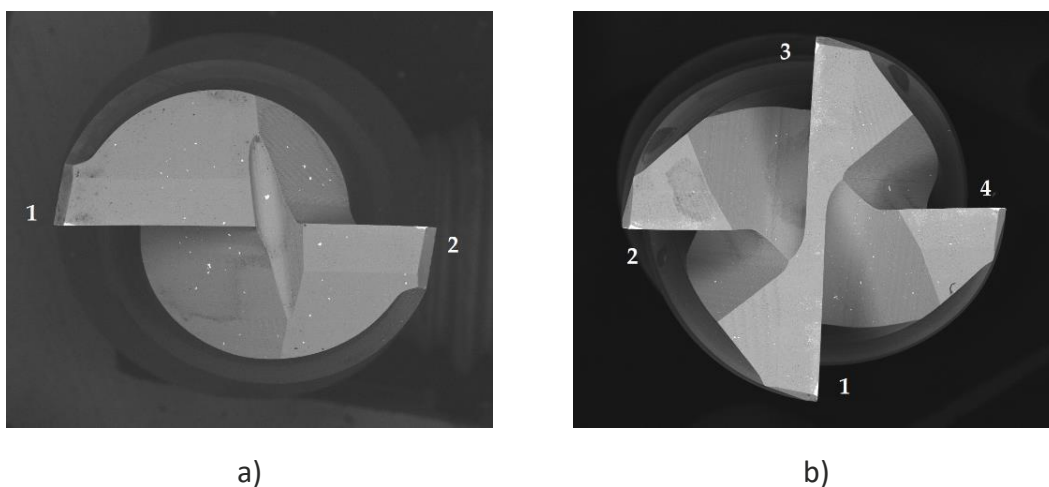


Figura 16 – Referência utilizada para análise das ferramentas com a) 2 gumes de corte, e com b) 4 gumes de corte

A numeração apresentada na Figura 16 foi adotada para a identificação dos gumes na análise das imagens recolhidas da extremidade das ferramentas. Adicionalmente, foi utilizado nas legendas RF (*rake face*) ou CF (*clearance face*), para a identificação da face em análise. Foram igualmente utilizados nas legendas das imagens recolhidas, números de 01 a 03, visto que foram ensaiadas três ferramentas por condição de corte apresentada na Tabela 6.

3.3 Apresentação e discussão dos resultados

Nesta subsecção, irão ser apresentados os dados obtidos para os diferentes ensaios realizados para cada tipo de ferramenta, nomeadamente: caracterização dos revestimentos, análise das forças de corte obtidas durante o processo, análise da rugosidade da superfície maquinada e análise do desgaste das ferramentas. Adicionalmente, os mecanismos de desgaste principais irão ser identificados para todas as ferramentas e condições de ensaio. Irá ser feita uma comparação e discussão destes resultados, determinando o tipo de ferramenta que sofre menos desgaste e que produz uma melhor rugosidade superficial na peça.

3.3.1 Caracterização dos revestimentos

Os quatro diferentes tipos de revestimento foram analisados de acordo com o procedimento descrito nas secções 3.2.2.1 e 3.2.2.2. Os valores médios de espessura foram obtidos a partir de medições realizadas em várias zonas das amostras revestidas. A composição dos revestimentos foi confirmada a partir de análises EDS realizadas a estes. Um exemplo de medição e espectro EDS do revestimento de TiAlSiN (*dc MS*) podem ser observados na Figura 17.

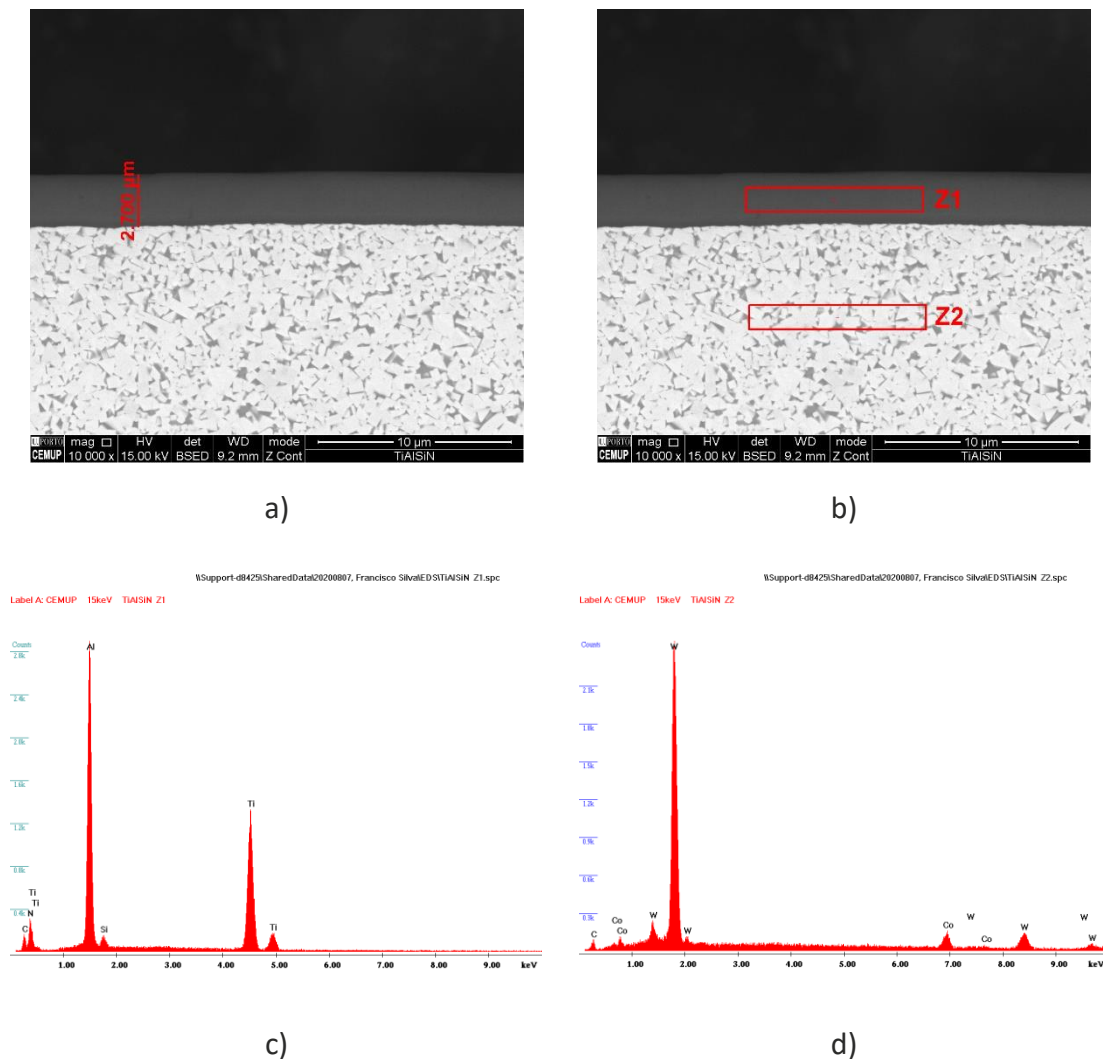


Figura 17 – Imagens SEM de uma medição do revestimento TiAlSiN, a) zonas de análise EDS Z1 e Z2, b) espectros EDS para Z1 c) e Z2 d)

Os valores médios de espessura obtidos para todos os revestimentos podem ser observados na Tabela 16. Note-se que para a determinação dos valores da espessura do revestimento de AlCrN, foram consideradas medições efetuadas nas ferramentas T1 e T3.

Tabela 16 – Espessuras médias para cada um dos revestimentos depositados

Revestimento	Espessura [μm]
TiAlN (<i>dc MS</i>)	2,812 \pm 0,120
TiAlSiN (<i>dc MS</i>)	2,799 \pm 0,163
AlCrN (<i>dc MS</i>)	2,965 \pm 0,220
TiAlSiN (<i>HiPIMS</i>)	2,310 \pm 0,122

A estrutura do revestimento de AlCrN não foi observada nas amostras preparadas para análise por microscopia eletrónica de varrimento, isto porque os processos de lixagem e polimento provocam uma homogeneização das camadas do revestimento, resultando numa aparência de um revestimento monolítico. Então, a estrutura multicamada deste revestimento foi observada utilizando uma amostra sujeita a fratura frágil do revestimento. Esta estrutura pode ser observada na Figura 18.

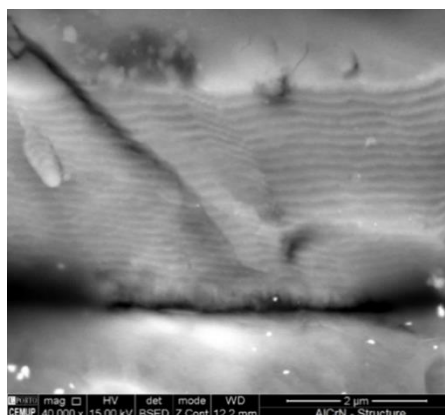


Figura 18 – Estrutura multicamada do revestimento depositado de AlCrN

As propriedades mecânicas dos revestimentos também foram determinadas, nomeadamente a dureza e módulo de elasticidade. Os valores obtidos para estas propriedades podem ser observados na Tabela 17. Nesta mesma tabela, o rácio H/E também é apresentado, visto que este está relacionado com o comportamento ao desgaste dos revestimentos, principalmente com a resistência à deformação plástica.

Tabela 17 – Valores das propriedades obtidas dos ensaios de ultramicrodureza para todos os revestimentos

Revestimento	Dureza – H	Módulo de elasticidade – E	H/E
	[GPa]	[GPa]	
TiAlN (<i>dc MS</i>)	22,9 \pm 1,2	312 \pm 9	0,073
TiAlSiN (<i>dc MS</i>)	21,6 \pm 0,9	266 \pm 7	0,081
AlCrN (<i>dc MS</i>)	36,8 \pm 2,1	335 \pm 5	0,110
TiAlSiN (<i>HiPIMS</i>)	31,4 \pm 1,2	317 \pm 11	0,099

3.3.2 Análise das forças de corte

A análise das forças de corte pode ser bastante útil para a monitorização do processo de maquinagem, especialmente para avaliar a estabilidade do processo, e até desgaste da ferramenta. Tal como mencionado anteriormente, devido aos parâmetros utilizados, nomeadamente a profundidade e largura de corte, os valores das forças de corte foram relativamente baixos.

Ao analisar os gráficos das forças de corte recolhidos para cada ferramenta e condição de ensaio, foi notada uma tendência comum. Independente do valor de avanço, as forças de corte em componentes F_x , F_y e F_z , registaram um aumento ao longo dos ensaios. Em particular, o componente F_z sofreu a maior variação ao longo dos ensaios para todas as ferramentas testadas. Este aumento nas componentes das forças de corte foi observado para 2 metros de comprimento de corte, sendo uma tendência constante desde o início até ao final do teste, até que a ferramenta atinja os 4 metros de comprimento de corte. Os valores do binário (M_z) também foram analisados, no entanto, estes eram bastante baixos, exibindo um comportamento constante para todos os ensaios realizados.

Uma ligeira diferença no comportamento das forças de corte registadas para as ferramentas T1 em relação às restantes ferramentas foi notada. Os componentes F_x e F_y apresentavam valores diferentes, sendo o valor de F_x superior. Adicionalmente, o aumento das forças destes componentes ao longo do ensaio não foi tão significativo como aquele registado para as ferramentas T2, T3, T4 e T5. Relativamente ao componente em F_z , o comportamento manteve-se constante para todas as ferramentas ensaiadas. Na Figura 19, está apresentado um gráfico correspondente à medição das forças de corte obtido num ensaio de uma ferramenta T1, enquanto na Figura 20, pode ser observado um gráfico obtido num ensaio de uma ferramenta T2.

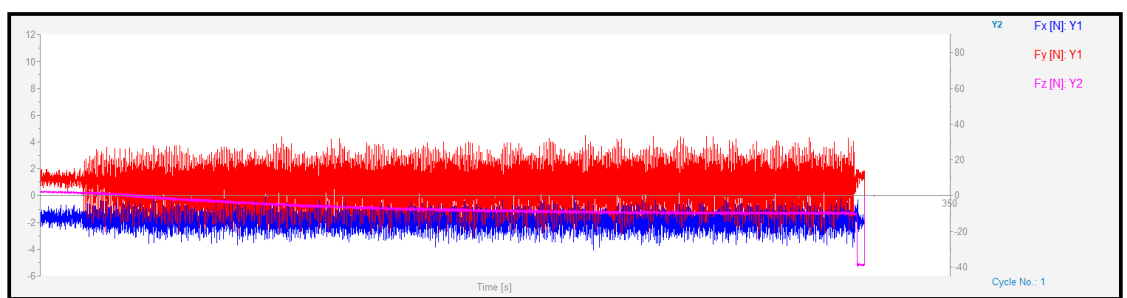


Figura 19 – Gráfico das forças de corte adquiridas de um ensaio a uma ferramenta T1

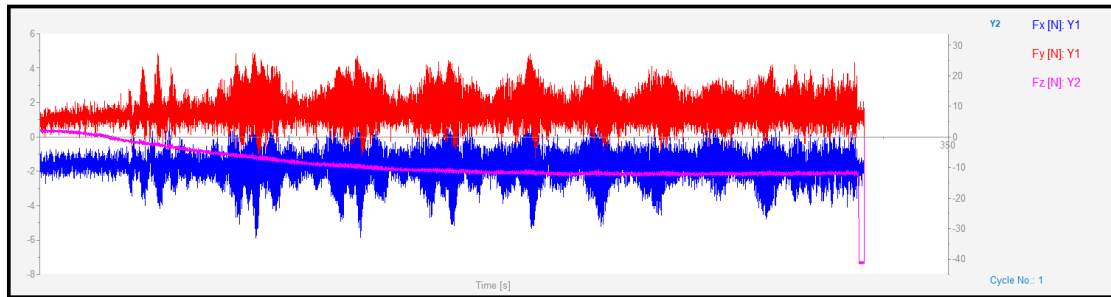


Figura 20 – Gráfico das forças de corte adquiridas de um ensaio a uma ferramenta T2

Relativamente à parte inicial e final dos gráficos, o comportamento das forças é anormal, devido ao início e final do ensaio em questão, visto que a ferramenta a entrar em contacto com o material e a paragem do dinamómetro rotativo, irão influenciar os valores das forças de corte. Entendeu-se por bem não editar os gráficos e omitir estes fenómenos.

Existe uma clara diferença no comportamento das componentes Fx e Fy das ferramentas T1 para as ferramentas T2. Os gráficos de forças de corte dos ensaios das ferramentas T3, T4 e T5 apresentam o mesmo comportamento observado na Figura A2 (com valores ligeiramente diferentes). Isto é devido à geometria da ferramenta, visto que as ferramentas T1 possuem dois gumes de corte, enquanto as restantes possuem quatro gumes.

O valor de avanço influencia a magnitude das forças de corte registadas, sendo registado um aumento das forças de corte (em todos os componentes) para valores de avanço maiores, sendo o valor mais baixo de forças de corte obtido para as condições de ensaio realizadas a 75% de avanço. Este comportamento registou-se para todas as ferramentas ensaiadas.

3.3.3 Medições de rugosidade da superfície maquinada

Os valores de rugosidade superficial obtidos irão ser apresentados, mostrando os valores médios de Ra, para a direção radial e tangencial. Estes resultados irão estar divididos para cada tipo de ferramenta ensaiada (de T1 a T5), sendo comparados entre eles no final da presente subsecção.

3.3.3.1 Dados obtidos – T1

Relativamente à rugosidade produzida pelas ferramentas T1 para todas as condições de ensaio, os valores médios obtidos podem ser observados na Tabela 18. Adicionalmente os valores de Ra e R_{máx} irão estar apresentados nos gráficos de barras das Figuras 21 e 22, referentes à rugosidade medida no sentido radial e tangencial.

Tabela 18 – Valores médios de Ra, medidos nas direções radial e tangencial, para os testes realizados com as ferramentas T1

Referência do ensaio	Ra – Sentido radial [μm]	Ra – Sentido tangencial [μm]
T1L2F75	0,193 \pm 0,015	0,182 \pm 0,019
T1L4F75	0,325 \pm 0,021	0,345 \pm 0,031
T1L2F100	0,219 \pm 0,019	0,223 \pm 0,011
T1L4F100	0,394 \pm 0,033	0,389 \pm 0,016
T1L2F125	0,254 \pm 0,012	0,327 \pm 0,044
T1L4F125	0,481 \pm 0,036	0,492 \pm 0,056

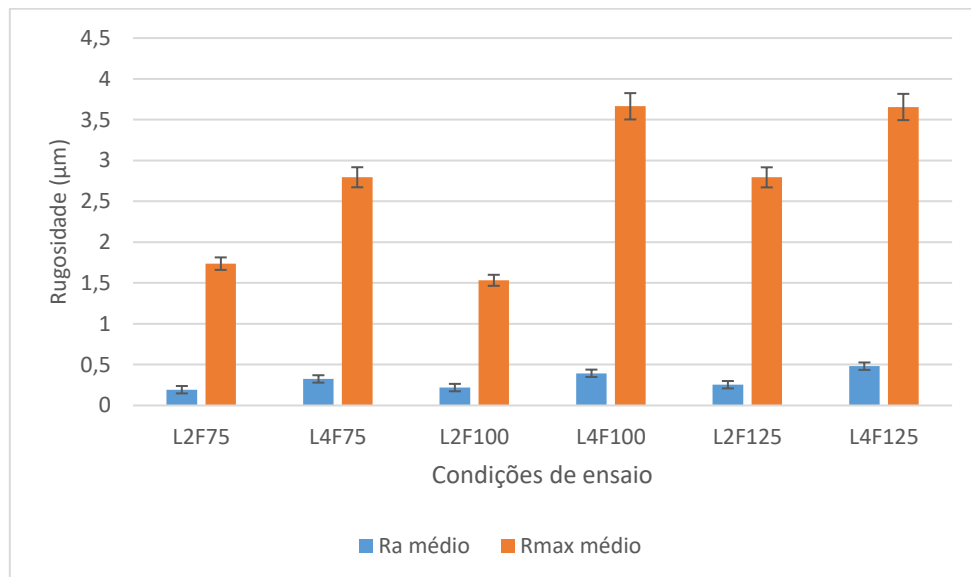


Figura 21 – Valores médios de Ra e Rmax obtidos no sentido radial, para as ferramentas T1

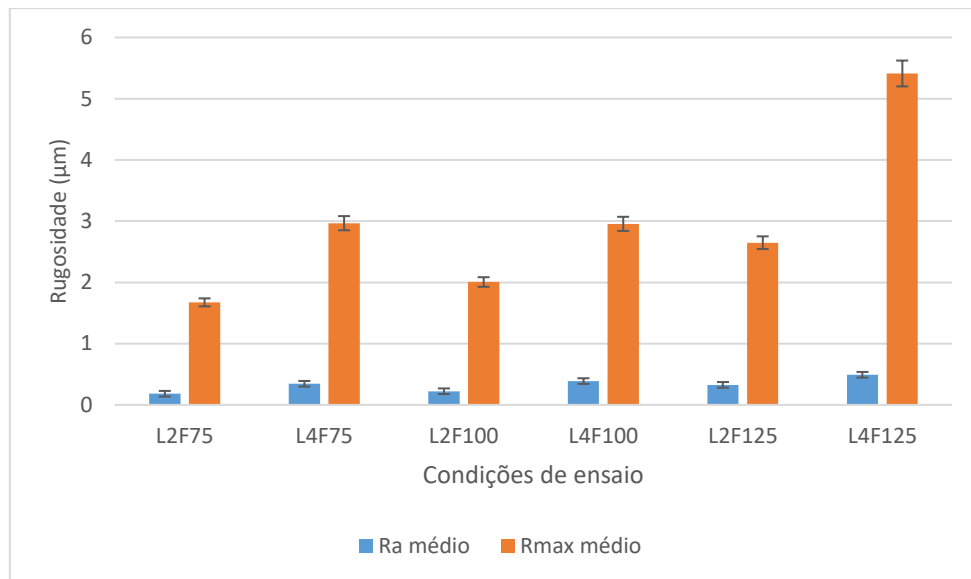


Figura 22 – Valores médios de Ra e Rmax obtidos no sentido tangencial, para as ferramentas T1

Analisando os valores apresentados na Tabela 18, pode ser notado um ligeiro desvio dos valores medidos no sentido radial, relativamente aos obtidos no sentido tangencial. Todavia, este desvio não é significativo, podendo concluir-se que o processo de maquinagem é estável. Os valores de Ra médios para os dois sentidos de medição possuem a mesma tendência, isto é, o valor de Ra tende a aumentar para comprimentos de corte mais elevados (4 metros), com os valores de Ra mais baixos a serem obtidos nos ensaios de comprimentos de corte de 2 metros, para todos os valores de avanço. Isto deve-se à severidade de desgaste apresentada pelas ferramentas, que é superior para comprimentos de corte mais elevados.

Relativamente à influência do avanço na rugosidade superficial produzida, quanto maior o valor de avanço utilizado, maior é o valor de Ra da superfície maquinada. Os valores máximos de Ra são obtidos para as condições que utilizam 125% do avanço inicial, particularmente, para a condição T1L4F125.

3.3.3.2 Dados obtidos – T2

De seguida, irão ser apresentados os valores médios de Ra produzidos pelas ferramentas T2, para todas condições de ensaio. Estes valores podem ser observados na Tabela 19. Adicionalmente, os valores de Rmax e Ra médios, obtidos para ambas as direções de medição, estão representados nas Figuras 23 e 24.

Tabela 19 – Valores médios de Ra, medidos nas direções radial e tangencial, para os testes realizados com as ferramentas T2

Referência do ensaio	Ra – Sentido radial [µm]	Ra – Sentido tangencial [µm]
T2L2F75	0,291 ± 0,018	0,260 ± 0,012
T2L4F75	0,401 ± 0,026	0,436 ± 0,021

T2L2F100	0,325 ± 0,017	0,301 ± 0,015
T2L4F100	0,413 ± 0,031	0,405 ± 0,026
T2L2F125	0,409 ± 0,019	0,409 ± 0,014
T2L4F125	0,505 ± 0,037	0,477 ± 0,022

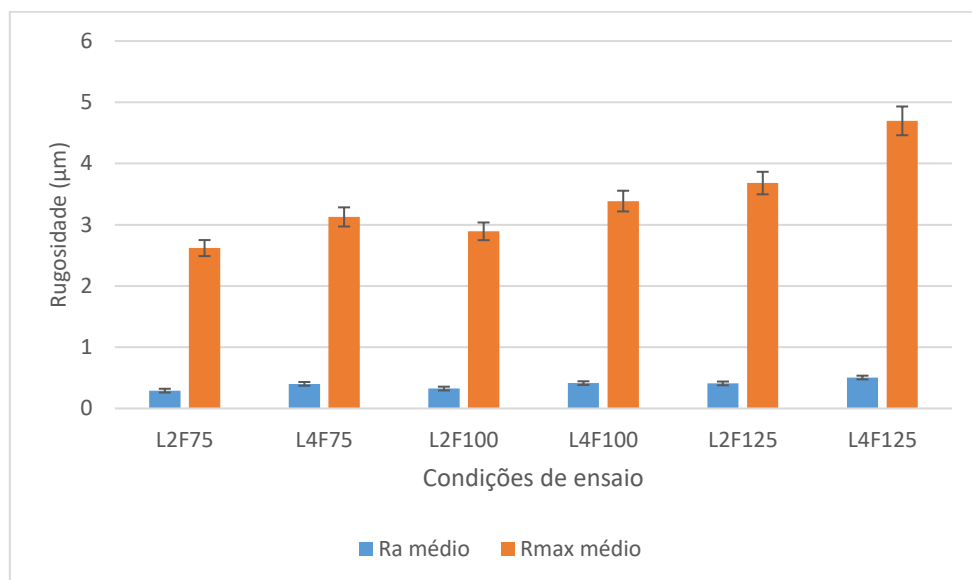


Figura 23 – Valores médios de Ra e Rmax obtidos no sentido radial, para as ferramentas T2

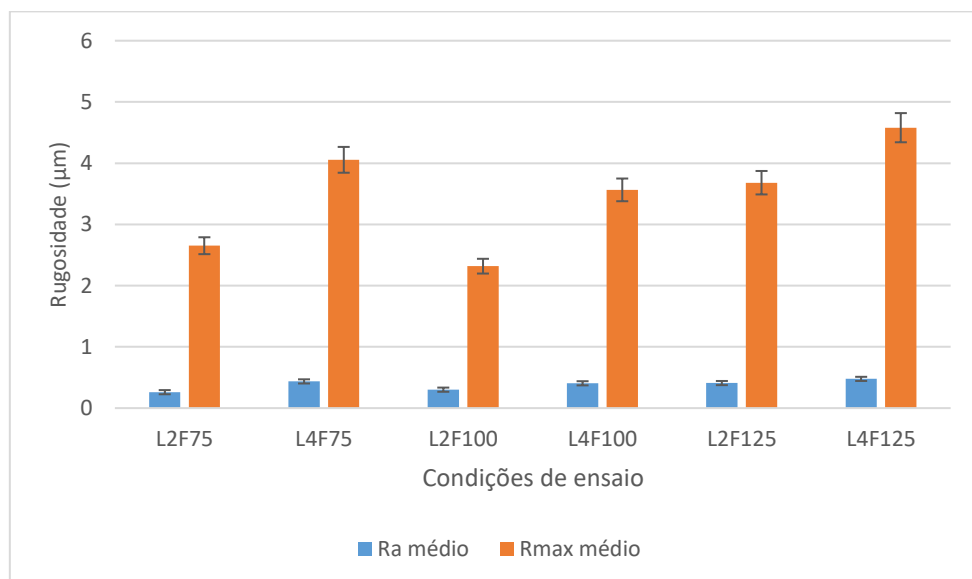


Figura 24 – Valores médios de Ra e Rmax obtidos no sentido tangencial, para as ferramentas T2

À semelhança do que foi observado para as ferramentas T1, os valores de Ra médios, apresentados na Tabela 19, não indicam um desvio significativo entre si, significando que não existiram vibrações excessivas durante o processo de maquinagem. A tendência dos valores de Ra médios registados para a ferramenta T2 é a mesma das da ferramenta anteriormente analisada, obtendo-se os valores de Ra mais baixos para ensaios que

utilizam um valor de avanço e comprimento de corte menor, com o menor valor de Ra médio a registar-se para a condição T2L2F75. Salienta-se que, apesar da rugosidade aumentar com o valor de avanço utilizado durante a maquinagem, o aumento do valor de Ra das condições que utilizam 75% para 100% (479 mm/min) é menos acentuado do que aquele registado de 100% para 125% de avanço.

3.3.3.3 Dados obtidos – T3

Os valores de Ra médio registado para os ensaios de maquinagem realizados com as ferramentas T3 estão apresentados na Tabela 20, estando os valores de Ra e Rmax representados nas Figuras 25 e 26. Relativamente à estabilidade do processo de maquinagem, pelos valores apresentados na Tabela 20, pode concluir-se que este é bastante estável, não apresentando um desvio significativo dos valores medidos na direção radial, relativamente à tangencial.

Tabela 20 – Valores médios de Ra, medidos nas direções radial e tangencial, para os testes realizados com as ferramentas T3

Referência do ensaio	Ra – Sentido radial [μm]	Ra – Sentido tangencial [μm]
T3L2F75	0,234 \pm 0,016	0,206 \pm 0,013
T3L4F75	0,270 \pm 0,019	0,273 \pm 0,029
T3L2F100	0,209 \pm 0,009	0,211 \pm 0,021
T3L4F100	0,299 \pm 0,011	0,295 \pm 0,031
T3L2F125	0,172 \pm 0,012	0,190 \pm 0,012
T3L4F125	0,228 \pm 0,022	0,228 \pm 0,025

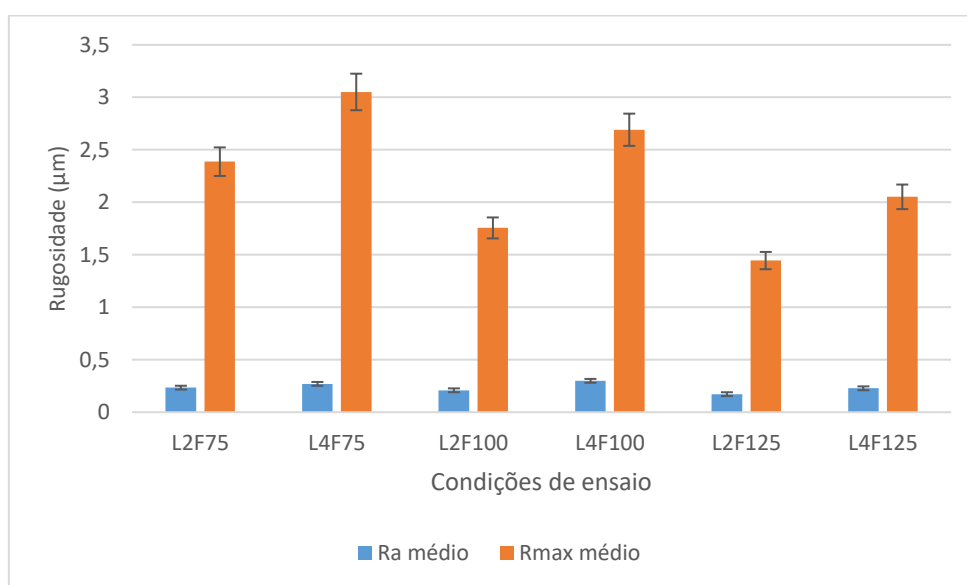


Figura 25 – Valores médios de Ra e Rmax obtidos no sentido radial, para as ferramentas T3

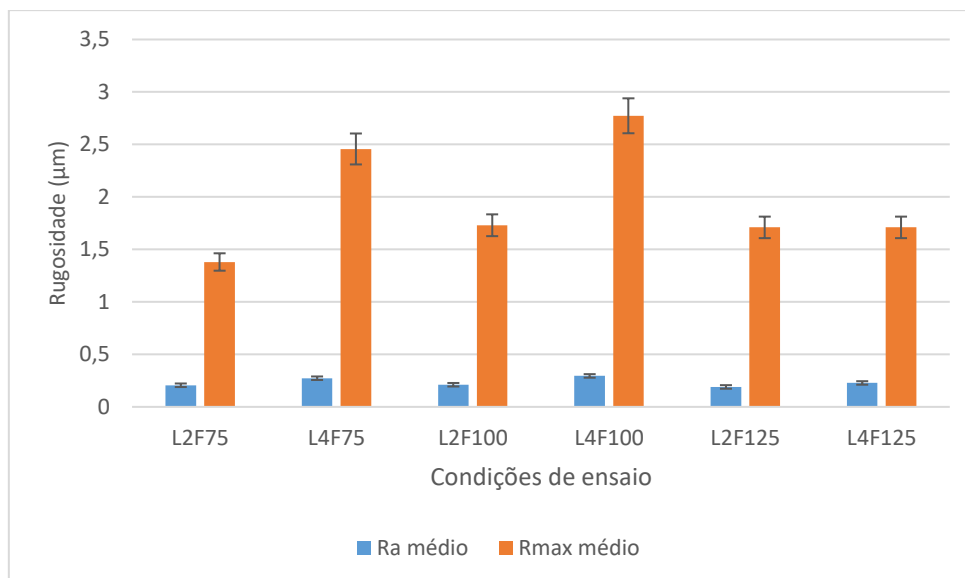


Figura 26 – Valores médios de Ra e Rmax obtidos no sentido tangencial, para as ferramentas T3

Os valores médios de Ra registados para estas ferramentas é bastante inferior aos valores produzidos pelas ferramentas T1 e T2. Relativamente à variação dos valores de Ra com os parâmetros de maquinagem, estes tendem a aumentar com o aumento do comprimento de corte, tal como observado para as ferramentas previamente apresentadas. No entanto, a variação do valor médio de Ra com o avanço não é igual ao registado para as ferramentas T1 e T2. Este valor diminui para valores de avanço de 75%, todavia, esta diminuição não é tão acentuada como aquela registada para as ferramentas T1 e T2. Adicionalmente, a rugosidade superficial produzida para ensaios que utilizam 75% e 100% de avanço é bastante próxima. Contrariamente ao que foi apresentado até este momento, foi registada uma diminuição nos valores de Ra médio para valores de avanço de 125%, sendo esta bastante acentuada. As condições de ensaio de 125% de avanço produziram a melhor qualidade superficial, particularmente, a condição T3L2F125.

3.3.3.4 Dados obtidos – T4

Os dados obtidos quanto aos valores de Ra registados após os ensaios de maquinagem realizados com as ferramentas T4 estão apresentados na Tabela 21. Analisando os valores apresentados, pode concluir-se que o processo de maquinagem é estável, sem vibrações excessivas desenvolvidas durante o processo. Adicionalmente, na Figura 27 e 28 estão apresentados os valores medidos de Ra e Rmax, para a direção radial e tangencial.

Tabela 21 – Valores médios de Ra, medidos nas direções radial e tangencial, para os testes realizados com as ferramentas T4

Referência do ensaio	Ra – Sentido radial [µm]	Ra – Sentido tangencial [µm]
T4L2F75	0,194 ± 0,018	0,175 ± 0,011

T4L4F75	0,253 ± 0,025	0,253 ± 0,018
T4L2F100	0,259 ± 0,016	0,247 ± 0,011
T4L4F100	0,274 ± 0,019	0,284 ± 0,016
T4L2F125	0,250 ± 0,022	0,270 ± 0,014
T4L4F125	0,284 ± 0,033	0,323 ± 0,021

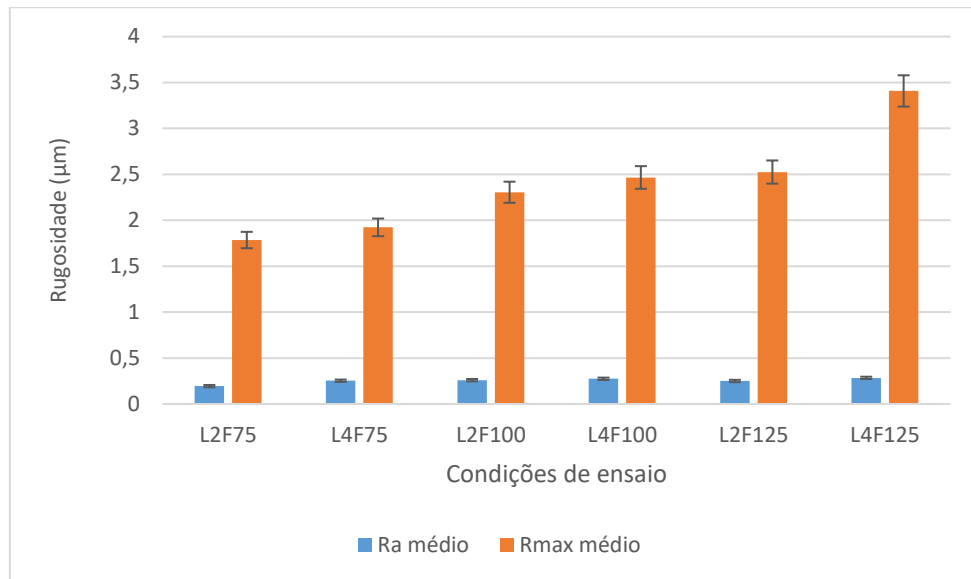


Figura 27 – Valores médios de Ra e Rmax obtidos no sentido radial, para as ferramentas T4

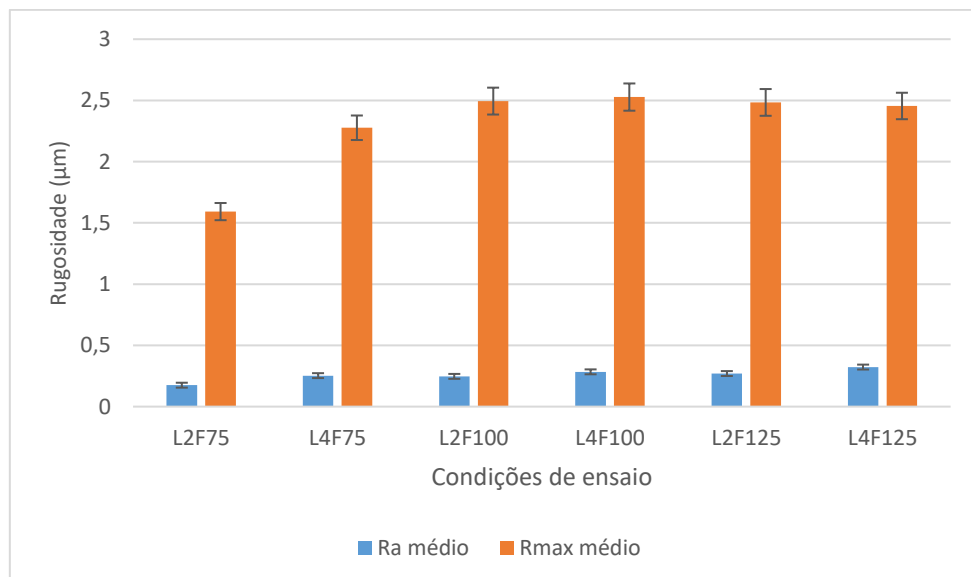


Figura 28 – Valores médios de Ra e Rmax obtidos no sentido tangencial, para as ferramentas T4

Quanto à variação dos valores de Ra com o comprimento de corte, tal como o observado para as outras ferramentas, estes valores tendem a aumentar com o aumento do comprimento de corte. Relativamente à influência do avanço, quanto menor for o valor

de avanço, menor é o valor de Ra registado. Isto vai de encontro ao que foi registado para as ferramentas T1 e T2. A superfície maquinada com as ferramentas T4 que apresenta a melhor qualidade, foi a produzida pelo ensaio T4L2F75.

3.3.3.5 Dados obtidos – T5

Na Tabela 22 irão estar apresentados os valores de Ra médios para os ensaios de maquinagem realizados utilizando a ferramenta T5. Esta ferramenta é igual à T4, diferindo apenas no método de deposição utilizado para obter o revestimento da ferramenta. Como tal, os valores médios de Ra são bastante próximos dos valores registados para T4, seguindo a mesma tendência, e indicando um processo estável.

Tabela 22 – Valores médios de Ra, medidos nas direções radial e tangencial, para os testes realizados com as ferramentas T5

Referência do ensaio	Ra – Sentido radial [μm]	Ra – Sentido tangencial [μm]
T5L2F75	0,191 \pm 0,013	0,207 \pm 0,013
T5L4F75	0,199 \pm 0,018	0,224 \pm 0,019
T5L2F100	0,206 \pm 0,013	0,234 \pm 0,009
T5L4F100	0,262 \pm 0,021	0,260 \pm 0,012
T5L2F125	0,233 \pm 0,026	0,227 \pm 0,015
T5L4F125	0,286 \pm 0,031	0,286 \pm 0,023

Nas seguintes Figuras 29 e 30, os valores de Ra e Rmax médios, medidos em ambas as direções, estão apresentados.

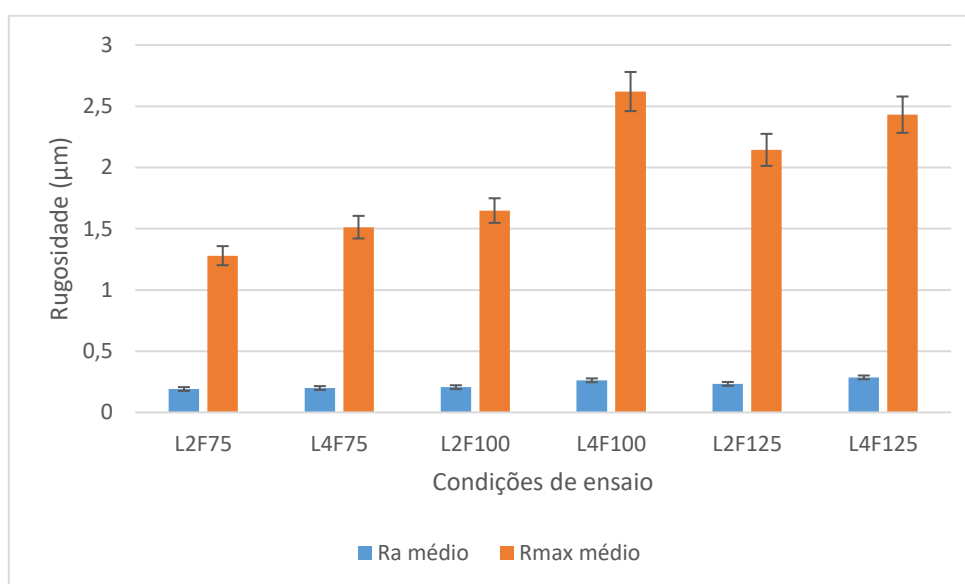


Figura 29 – Valores médios de Ra e Rmax obtidos no sentido radial, para as ferramentas T5

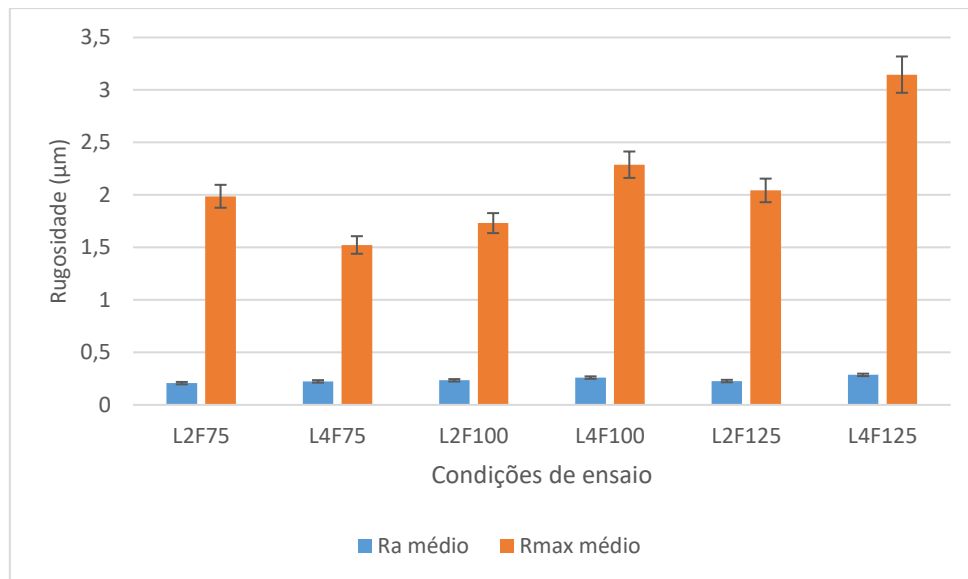


Figura 30 – Valores médios de Ra e Rmax obtidos no sentido tangencial, para as ferramentas T5

Os valores de Ra médio são maiores para comprimentos de corte mais elevados, tal como registado para os ensaios realizados com as restantes ferramentas. Adicionalmente, tal como observado em T1, T2 e T4, para valores de avanço superiores a qualidade da superfície maquinada tende a diminuir (aumento do valor de Ra).

3.3.3.6 Comparação e discussão dos dados obtidos

Na presente subsecção, irá ser realizada uma comparação dos dados apresentados anteriormente. Nas Figuras 31 e 32, irão estar apresentados os valores de Ra médio para todas as ferramentas testadas, medido na direção radial e tangencial, respetivamente. As condições de corte irão estar identificadas de acordo com a referência das ferramentas mencionada na Subsecção 3.2., sendo que o número a seguir ao “L” indica o valor de comprimento de corte, e o número que segue o “F” indica a percentagem de avanço utilizada no ensaio de maquinagem.

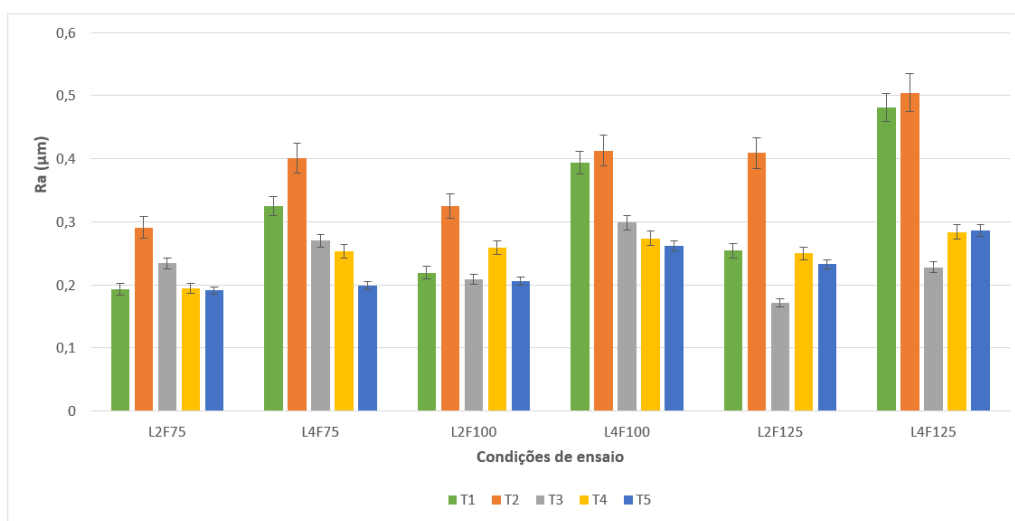


Figura 31 – Valores médios de Ra, medidos na direção radial à maquinagem, produzidos pelas ferramentas T1, T2, T3, T4 e T5, para todas as condições de ensaio

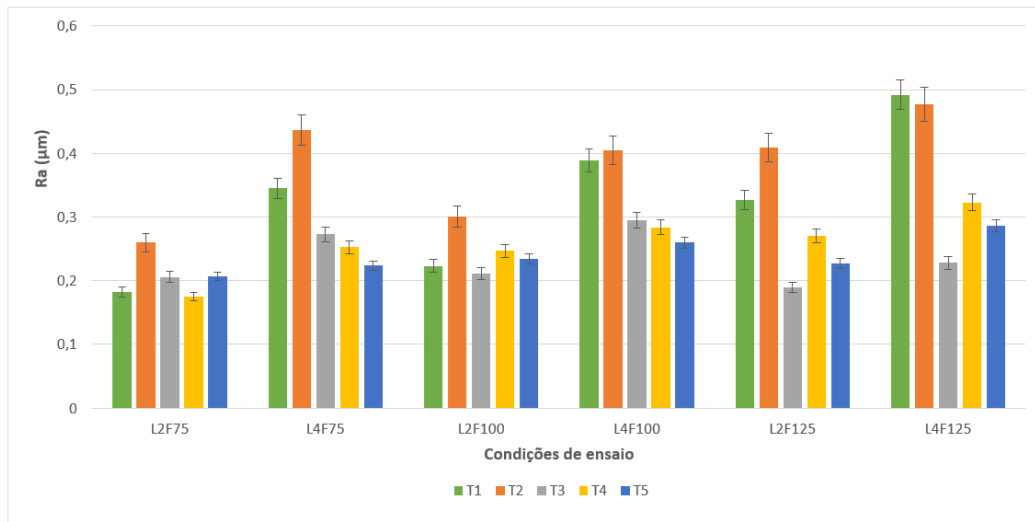


Figura 32 – Valores médios de Ra, medidos na direção tangencial à maquinagem, produzidos pelas ferramentas T1, T2, T3, T4 e T5, para todas as condições de ensaio

Tal como observado nas Figuras 31 e 32, os valores médios de Ra tendem a aumentar para comprimentos de corte mais elevados, uma tendência que se regista para todas as ferramentas. Notou-se, também, que existia uma variação na qualidade da superfície maquinada para diferentes valores de avanço. Este parâmetro tem um elevado impacto na rugosidade da superfície maquinada [112,116]. De uma forma geral, o aumento do avanço irá prejudicar a qualidade da superfície maquinada, este comportamento foi observado para quatro das ferramentas testadas. Para T1, T2, T4 e T5, os valores médios mínimos de Ra foram registados para condições que utilizam 75% de avanço. Relativamente à ferramenta T3, foi registado um decréscimo significativo no valor médio de Ra com o aumento do avanço, obtendo-se os melhores resultados em termos de qualidade superficial para ensaios realizados a 125% do avanço, isto poderá ser a uma seleção indevida de parâmetros de maquinagem (para esta ferramenta em particular). Os valores médios menores de Ra foram obtidos para a ferramenta T3, todavia, os resultados obtidos para as ferramentas T5 e T4 foram bastante próximos dos obtidos para T3, sendo estes considerados satisfatórios.

Tanto as ferramentas revestidas por TiAlSiN, como a ferramenta com quatro gumes de corte revestida com AlCrN, produziram bons resultados em termos de rugosidade, com a última a ter o melhor desempenho de entre todas as ferramentas. O número de gumes de corte tem uma grande influência na qualidade da superfície maquinada [109], visto que a ferramenta revestida com AlCrN com dois gumes produziu valores de Ra maiores, principalmente para valores de comprimento de corte e avanço mais elevados.

Relativamente às ferramentas revestidas com TiAlSiN (T4 e T5), tal como mencionado anteriormente, apesar dos valores de Ra médios serem superiores àqueles obtidos para T3, estes são bastante inferiores aos obtidos para as ferramentas T1 e T2, sendo considerados satisfatórios. Apesar de produzires valores de Ra bastante próximos, a ferramenta T5 produz valores inferiores aos obtidos para T4. Isto poderá ser atribuído à técnica de deposição *HiPIMS*, que produz revestimentos com valores de tensões residuais compressivas maiores (quando comparado com a técnica de deposição *dc MS*)

[89-90]. Estas tensões residuais compressivas podem ser benéficas para a produção de uma superfície maquinada com baixa rugosidade [97], visto que promovem uma melhor coesão do revestimento e uma aresta de corte mais rígida e fina [91]. Os revestimentos multicamada obtidos por PVD, tal como o revestimento da ferramenta T4, também possuem um elevado nível de tensões residuais compressivas, o que contribuiu para o bom desempenho deste tipo de ferramentas, na produção de uma superfície maquinada de boa qualidade [15].

3.3.4 Medição do desgaste de flanco das ferramentas

Tal como na subsecção 3.3.3., aqui irão ser apresentados os valores médios de desgaste do flanco (VB) de todas as ferramentas (T1 a T5), medidas na face de folga para todas as condições de ensaio, seguindo a norma ISO 8688-2:1986 [117].

3.3.4.1 Dados obtidos – T1

Os valores médios de desgaste do flanco (VB) das ferramentas T1 estão apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Valores médios de VB, medidos nas faces de folga das ferramentas T1 para todas as condições de ensaio

Referência do ensaio	Valor médio de VB [μm]
T1L2F75	14,22 \pm 1,05
T1L4F75	18,34 \pm 1,16
T1L2F100	9,67 \pm 0,78
T1L4F100	12,27 \pm 0,98
T1L2F125	23,32 \pm 1,84
T1L4F125	25,20 \pm 1,76

Analisando os valores de desgaste do flanco apresentados na Tabela 23, pode ser observado um aumento de desgaste para comprimentos de corte mais longos, para todas as condições de ensaio testadas. No entanto, é um aumento pouco acentuado.

Relativamente à influência da variação do avanço no desgaste do flanco das ferramentas, foi registado o menor valor de desgaste para os ensaios realizados com 100% do valor do avanço. Este desgaste aumentou quando o avanço variou, apresentando um valor máximo para os ensaios realizados a 125% de avanço, particularmente o ensaio T1L4F125. O facto de o desgaste ser menor para os valores de avanço inicialmente escolhidos (479 mm/min), significa que os parâmetros inicialmente determinados são ideais para esta ferramenta, especialmente se se pretender prolongar a vida útil desta.

3.3.4.2 Dados obtidos – T2

Na Tabela 24 estão apresentados os valores médios de VB, medidos nas faces de folga das ferramentas T2.

Tabela 24 – Valores médios de VB, medidos nas faces de folga das ferramentas T2 para todas as condições de ensaio

Referência do ensaio	Valor médio de VB [μm]
T2L2F75	8,380 \pm 0,69
T2L4F75	13,18 \pm 1,12
T2L2F100	7,040 \pm 0,24
T2L4F100	10,01 \pm 0,98
T2L2F125	13,21 \pm 1,12
T2L4F125	25,12 \pm 1,05

Tal como observado nos resultados relativos à ferramenta T1, o desgaste do flanco da ferramenta T2 é influenciado pelo comprimento de corte, sendo maior para os ensaios realizados para 4 metros de comprimento de corte. Todavia, esta variação não é tão significativa como a variação do desgaste provocada pela variação do valor de avanço. Tal como observado na ferramenta T1, os valores menores de VB médio são registados para os ensaios realizados a 100% de avanço, sofrendo um aumento para valores mais baixos (75%) e mais altos (125%) do avanço.

3.3.4.3 Dados obtidos – T3

Na Tabela 25 estão apresentados os valores médios de VB, registados para todas as condições de ensaio das ferramentas T3.

Tabela 25 – Valores médios de VB, medidos nas faces de folga das ferramentas T3 para todas as condições de ensaio

Referência do ensaio	Valor médio de VB [μm]
T3L2F75	11,72 \pm 1,06
T3L4F75	12,54 \pm 0,85
T3L2F100	14,17 \pm 1,60
T3L4F100	16,26 \pm 1,55
T3L2F125	6,820 \pm 0,55
T3L4F125	8,570 \pm 0,19

Observando os valores da Tabela 25, pode ser vista a mesma tendência de incremento do desgaste com o comprimento de corte. Este aumento é esperado e é menor quando comparado com as variações de desgaste do flanco para valores diferentes de avanço.

Ao contrário do que foi registado para as ferramentas T1 e T2, os valores maiores de desgaste VB foram observados para as condições de ensaio que utilizam 100% de avanço. Para as ferramentas T4, foi registada uma diminuição do valor médio de VB para ensaios que utilizam 75% e 125% de avanço, com os valores mínimos a serem registados para os ensaios realizados a 125% de avanço. Esta variação é semelhante à registada para os valores médios de Ra da superfície maquinada por este tipo de ferramenta. Com os valores menores a serem registados, também, para ensaios realizados a 125% do valor de avanço inicial. Isto pode estar relacionado com a quantidade de desgaste apresentado pelas ferramentas, pois as ferramentas que sofrem menos desgaste, geralmente, irão produzir uma melhor qualidade da superfície maquinada [118].

3.3.4.4 Dados obtidos – T4

Na presente subsecção, estão apresentados na Tabela 26 os valores médios de VB das ferramentas T4.

Tabela 26 – Valores médios de VB, medidos nas faces de folga das ferramentas T4 para todas as condições de ensaio

Referência do ensaio	Valor médio de VB [μm]
T4L2F75	6,710 \pm 0,36
T4L4F75	13,71 \pm 0,74
T4L2F100	10,47 \pm 0,66
T4L4F100	18,80 \pm 1,16
T4L2F125	4,770 \pm 0,22
T4L4F125	5,830 \pm 0,65

Analisando os valores da Tabela 26, pode ser visto um claro aumento do valor médio de VB com o comprimento de corte, tal como o esperado. A intensificação do desgaste do flanco para comprimentos de corte mais elevados é mais acentuada para os valores de avanço de 75% e 100%, sendo mínima no caso dos ensaios realizados para 125% do valor do avanço inicial.

Relativamente à variação dos valores de desgaste para diferentes valores de avanço, tal como o que foi registado para a ferramenta T3, os valores médios de VB são menores para os ensaios realizados a 125% do avanço. Existe, também, uma diminuição dos valores de desgaste de flanco para ensaios realizados a 75% do valor de avanço, no entanto, esta diminuição não é tão acentuada como a observada para os ensaios realizados com os maiores valores de avanço.

Para as ferramentas T4, os valores mínimos de desgaste são obtidos para os ensaios realizados a 125% de avanço, no entanto, salienta-se que os valores de VB obtidos para as restantes condições de ensaio, são menores quando comparados com as ferramentas T1, T2 e T3, salientando o bom comportamento ao desgaste da ferramenta T4, e a apetência da ferramenta para trabalhar com maior velocidade de avanço.

3.3.4.5 Dados obtidos – T5

Os valores médios de VB, medidos nas faces de folga das ferramentas T5 para todas as condições de ensaio, são apresentados de seguida na Tabela 27.

Tabela 27 – Valores médios de VB, medidos nas faces de folga das ferramentas T5 para todas as condições de ensaio

Referência do ensaio	Valor médio de VB [μm]
T5L2F75	5,13 \pm 0,09
T5L4F75	8,26 \pm 0,14
T5L2F100	8,80 \pm 0,11
T5L4F100	13,41 \pm 1,19
T5L2F125	4,82 \pm 0,24
T5L4F125	5,14 \pm 0,12

Observando os valores da Tabela 27, pode ser identificada a mesma tendência dos valores médios de VB que aquela observada para as ferramentas T3 e T4. Existe um aumento de desgaste do flanco para comprimentos de corte maiores, no entanto, esta variação não é muito acentuada, tal como o que foi observado para as ferramentas T1, T2, T3 e T4. O valor médio de VB é maior para os ensaios realizados para 100% de avanço, verificando-se uma diminuição para valores de 75% e 125% de avanço. A diminuição é mais acentuada para valores mais elevados de avanço, com as condições T5L2F125 e T5L4F125 a exibirem os valores de VB mais baixos.

Os valores de desgaste do flanco da ferramenta T5 são os mais baixos de todas as ferramentas, estando bastante próximos dos valores obtidos para a ferramenta T4. Adicionalmente, notou-se que a influência do comprimento de corte no desgaste do flanco das ferramentas era menor para as ferramentas T5, comparativamente às ferramentas T4.

3.3.4.6 Comparação e discussão dos dados obtidos

Os valores médios de desgaste do flanco de todas as ferramentas, medido para todas as condições de ensaio, está apresentado na Figura 33. A nomenclatura utilizada para as condições de ensaio é igual à descrita em 3.3.3.6.

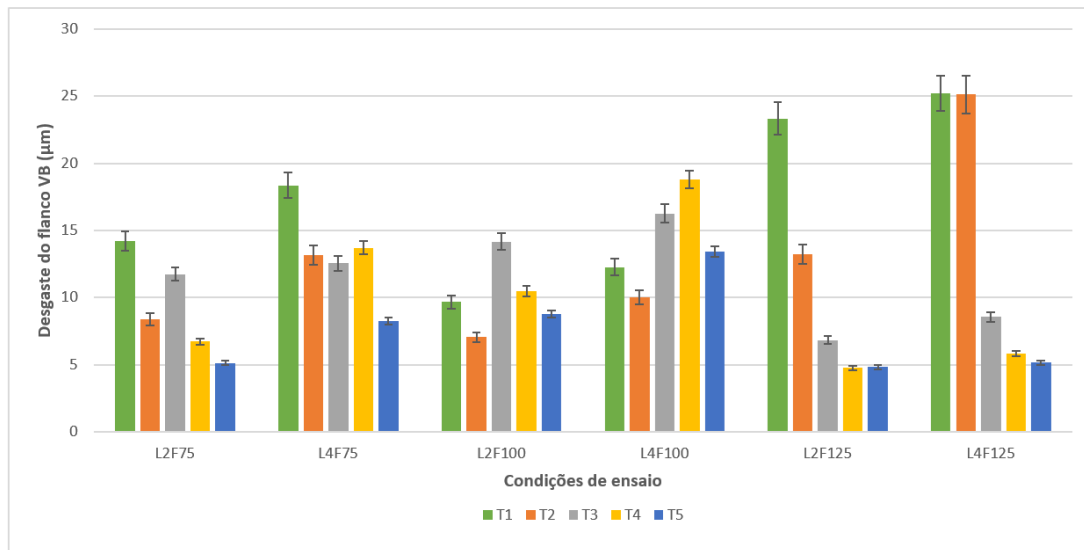


Figura 33 – Valores médios de VB, medidos nas faces de folga das ferramentas T1, T2, T3, T4 e T5, para todas as condições de ensaio

Analisando a Figura 33, é possível notar um claro aumento do valor médio de VB com o aumento do comprimento de corte, particularmente para as ferramentas T1 e T2. Este aumento é experienciado por todas as ferramentas, no entanto, não é tão intenso para as ferramentas T3, T4 e T5. Isto significa que estas ferramentas têm um melhor comportamento ao desgaste para comprimentos de corte mais elevado, sofrendo menos desgaste de flanco para maiores distâncias de maquinagem [97].

Relativamente à influência do avanço nos valores médios de VB registados para as ferramentas, nota-se uma clara influência deste parâmetro no desgaste, sendo a ferramenta T1 a mais afetada em termos de desgaste do flanco, com o aumento ou diminuição do valor de avanço. A ferramenta T2 descreve uma tendência semelhante, no entanto, a intensidade do desgaste é mais elevada para comprimentos de corte maiores do que para avanços menores/maiores. Relativamente às ferramentas T3, T4 e T5, os valores médios de VB obtidos para estas seguiram a mesma tendência, diminuindo tanto para avanços menores como maiores, exibindo uma diminuição de desgaste de flanco para valores de avanço de 125%. Estes baixos valores de desgaste, especialmente para valores elevados de avanço, indicam que as ferramentas T3, T4 e T5 têm um excelente comportamento ao desgaste, quando comparadas com as ferramentas T1 e T2. Isto pode ser explicado pela geometria da ferramenta e pelos revestimentos utilizados na maquinagem [15], especialmente os revestimentos de TiAlSiN, aplicados nas ferramentas T4 e T5. As ferramentas revestidas com TiAlSiN sofreram menos desgaste do flanco, com as ferramentas T5 a apresentarem os valores mínimos de desgaste do flanco. Os benefícios da utilização deste revestimento para aplicações exigentes estão documentados [97], no entanto, é de salientar que o revestimento que foi obtido pela técnica de *HiPIMS* mostra o melhor comportamento ao desgaste de todas os outros em análise. Geralmente, esta técnica de deposição confere melhores propriedades mecânicas aos revestimentos, quando comparadas com técnicas de deposição mais convencionais, como o *dc MS* [87-88], o que contribui para

um melhor desempenho ao desgaste por parte do revestimento. A técnica *HiPIMS* também confere uma melhor adesão dos revestimentos ao substrato [89], o que está relacionado com um melhoramento do comportamento ao desgaste do revestimento. As tensões residuais induzidas por esta técnica [90] também contribuem para um aumento da resistência ao desgaste do revestimento [5, 15].

3.3.5 Análise dos mecanismos de desgaste das ferramentas

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

3.3.5.1 Análise do desgaste – T1

Na presente subsecção, irão ser apresentadas as imagens recolhidas da análise por MEV/SEM realizada às ferramentas T1. Estas ferramentas sofreram principalmente desgaste por abrasão, fissuração e delaminação do revestimento, e apresentaram algum desgaste causado pela adesão do material à superfície da ferramenta. Tal como observado para os valores de desgaste do flanco das ferramentas, para comprimentos de corte mais longos, o desgaste que as ferramentas apresentam é mais severo, tal como observado na Figura 34.

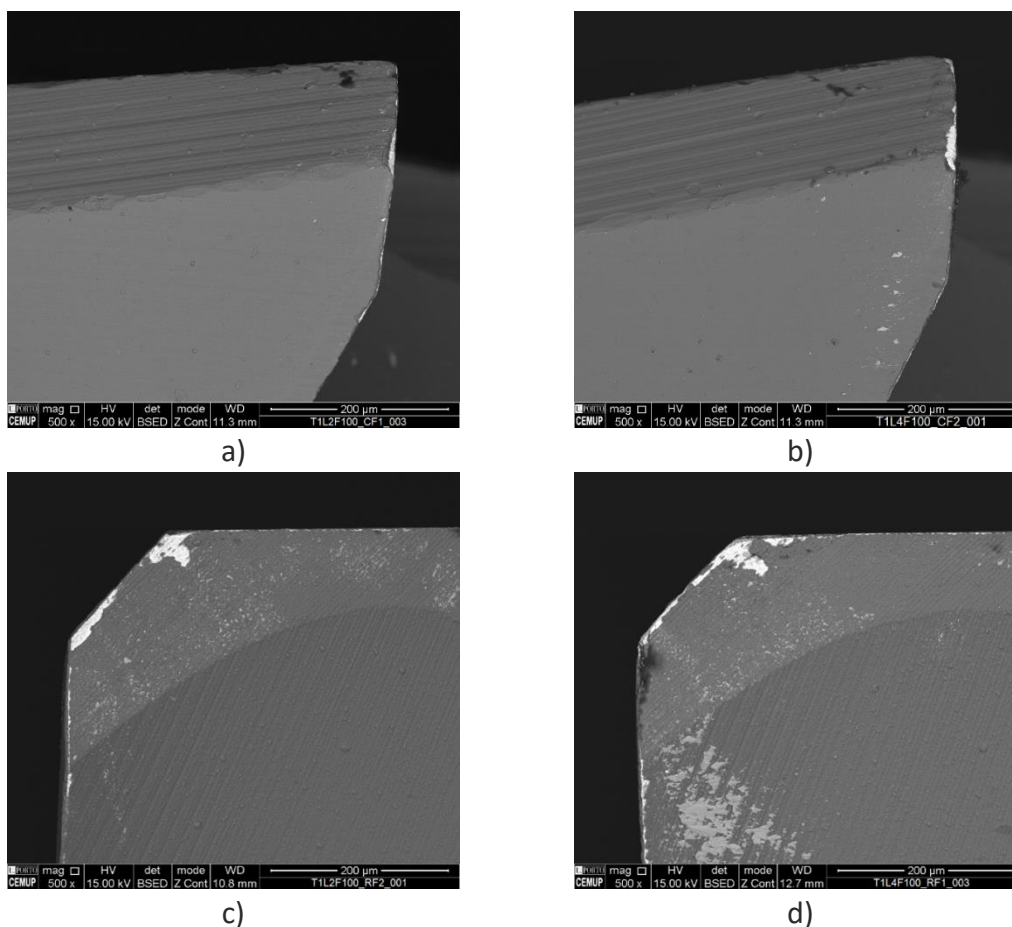


Figura 34 – a) Face de folga, com uma ampliação de 500x, de uma ferramenta T1L2F100 e T1L4F100, e b) face de ataque, com uma ampliação de 500x, de uma ferramenta c) T1L2F100, e d) T1L4F100

Tal como observado na Figura 34, o desgaste é mais severo para ensaios realizados para 4 metros de comprimento de corte, exibindo mais desgaste do flanco e apresentando mecanismos de desgaste mais desenvolvidos do que é observado nas ferramentas ensaiadas para 2 metros de comprimento de corte. É notada a presença de material aderido na superfície da ferramenta (Figura 34 d)), sendo que esta adesão de material promove o desgaste abrasivo nessa zona, o que irá eventualmente conduzir à delaminação do revestimento. A adesão do material na face de ataque da ferramenta T1L4F100_003 pode ser observada em maior detalhe na Figura 35.

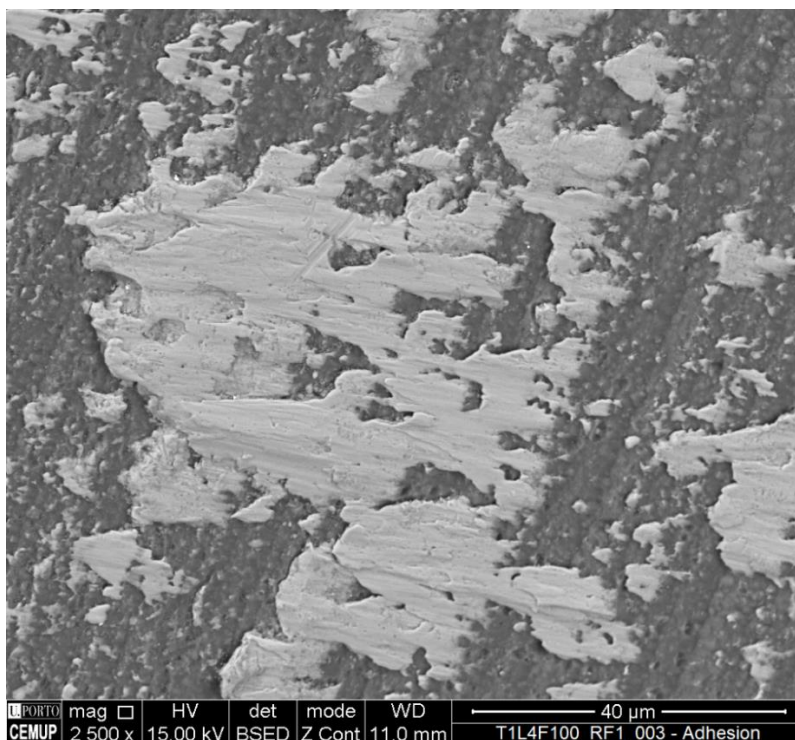


Figura 35 – Adesão de material na superfície da face de ataque de uma ferramenta T1L4F100, com uma ampliação de 2500x

O desgaste por adesão observado na Figura 35 foi analisado, de modo a determinar se se tratava do material a ser maquinado. Para este efeito, foram realizadas análises EDS, determinando a composição química do material aderido, confirmando que se tratava de facto do aço inoxidável duplex a ser maquinado, tal como observado na Figura 36. Desta forma, pode ser concluído que um aumento do comprimento de corte promove a formação/desenvolvimento de mecanismos de desgaste, principalmente a adesão de material à superfície da ferramenta.

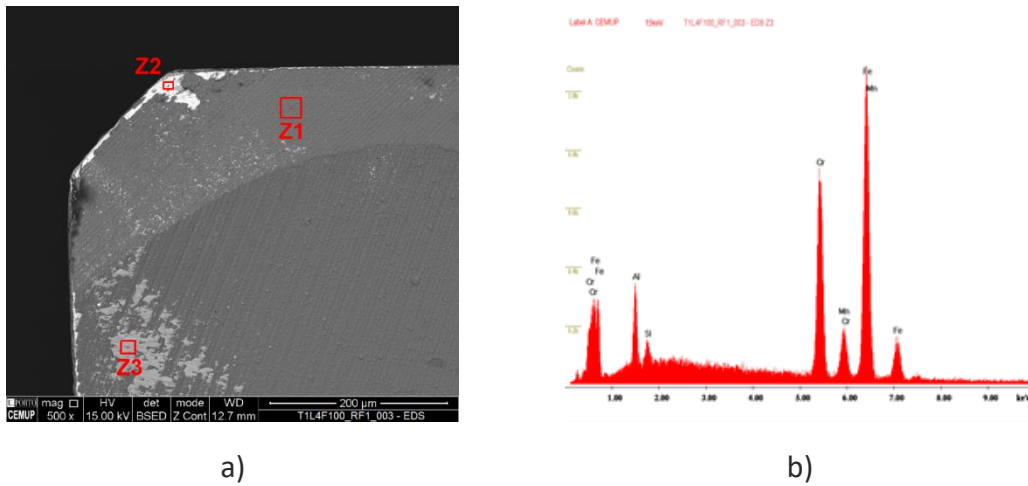


Figura 36 – a) Face de ataque de uma ferramenta T1L4F100 com as várias zonas de análise assinaladas, e b) espectro EDS para a zona de análise Z3, onde existem indícios de adesão

Relativamente à influência do avanço no desgaste das ferramentas T1, existe um claro aumento do desgaste com a variação do valor de avanço, no entanto, todos os mecanismos de desgaste mencionados estão presentes para todas as condições de avanço. Na Figura 37, as faces de folga e de ataque de ferramentas testadas a 75% e 125% do valor de avanço, podem ser observadas.

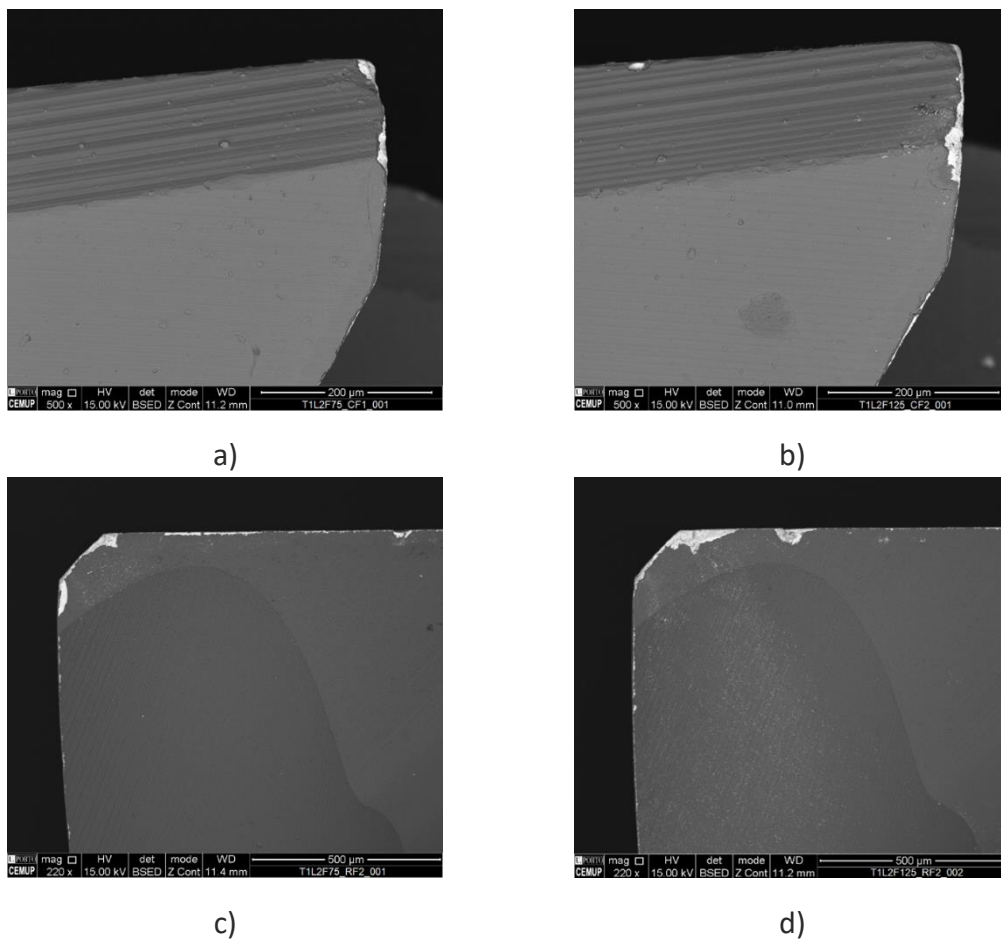


Figura 37 –Face de folga, com uma ampliação de 500x, de uma ferramenta a) T1L2F75 e b) T1L2F125, e face de ataque, com uma ampliação de 200x, de uma ferramenta c) T1L2F75 e d) T1L2F125

O desgaste apresentado na Figura 37 para as ferramentas utilizadas em ensaios realizados a 75% e 125% de avanço é superior ao desgaste observado para as ferramentas ensaiadas a 100% de avanço. Isto é evidenciado pelos valores médios de VB registados e apresentados previamente.

Durante a análise desta ferramenta, os seguintes mecanismos de desgaste predominantes foram identificados: desgaste abrasivo (observado em detalhe na Figura 38)), fissuração/delaminação do revestimento e indícios de material aderido na superfície das ferramentas. Estes mecanismos são comumente registados na maquinagem de aços inoxidáveis duplex [114,119].

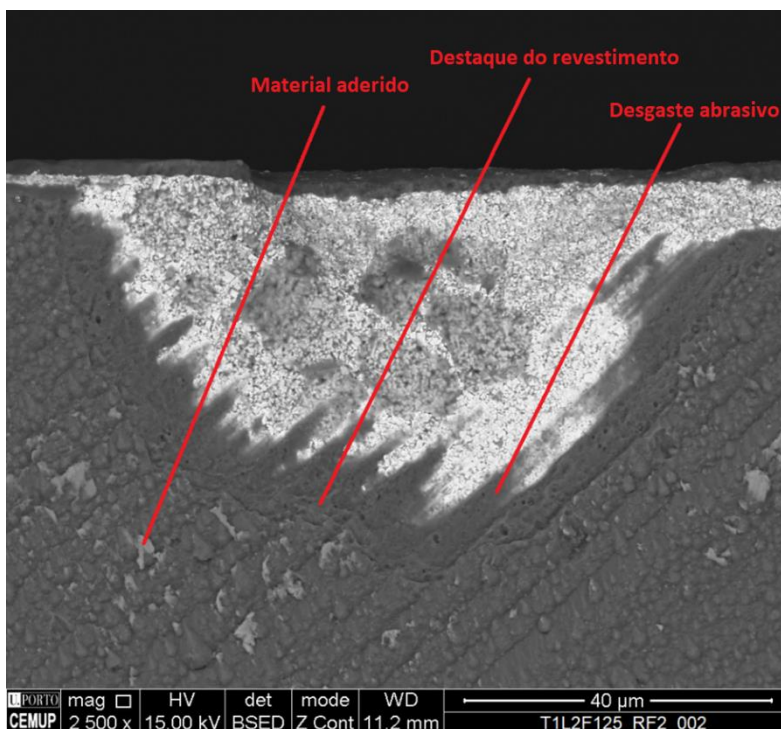


Figura 38 – Análise dos mecanismos de desgaste presentes numa face de ataque de uma ferramenta T1L2F125

Tal como pode ser observado pela Figura 38, aos 2 metros de comprimento de corte já são detetados alguns mecanismos de desgaste relevantes, estando o substrato exposto (observado na face de ataque), exibindo claras marcas de abrasão, destacamento do revestimento e apresentando algum material aderido na superfície. A adesão de material à superfície da ferramenta é promovida pelo aumento do comprimento de corte, começando este por se acumular nas ranhuras deixadas à superfície da ferramenta (provocadas pelo processo de retificação da ferramenta/ substrato), tal como observado na Figura 38. A quantidade de material acumulado é maior para comprimentos de corte maiores, observado na Figura 35, promovendo o desgaste abrasivo destas zonas, eventualmente resultando na falha do revestimento. Para além dos mecanismos de desgaste predominantes, foi registada a fissuração do revestimento, fenómeno observado principalmente nos ensaios conduzidos a 75% de avanço. Este fenómeno pode ser observado na Figura 34, e em mais detalhe na Figura 39.

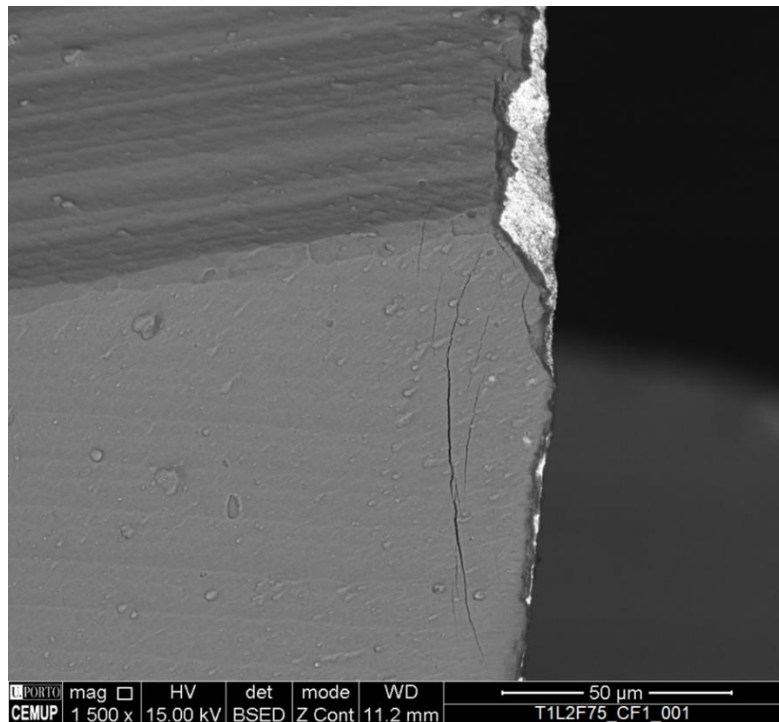


Figura 39 – Análise dos mecanismos de desgaste presentes numa face de ataque de uma ferramenta T1L2F125

Em suma, os mecanismos de desgaste observados para as ferramentas T1 são: fissuração e delaminação do revestimento, desgaste abrasivo e adesão de material [120]. A fissuração do revestimento é predominante para os ensaios realizados com um valor de avanço de 75%. Relativamente à adesão de material, esta não foi influenciada pela variação do avanço, estando presente na superfície das ferramentas testadas para 4 metros de comprimento de corte.

3.3.5.2 Análise do desgaste – T2

Relativamente ao desgaste observado nas ferramentas T2, tal como observado na ferramenta T1, existe uma intensificação acentuada do desgaste para maiores comprimentos de corte, sendo este parâmetro mais influente no desgaste, comparativamente ao avanço.

Quanto aos mecanismos de desgaste observados, estes foram os mesmos registados nas ferramentas T1, ainda que com diferentes intensidades. Os principais mecanismos de desgaste identificados foram: abrasão, adesão de material à superfície da ferramenta, delaminação do revestimento e alguma fissuração do revestimento.

Apesar das ferramentas T2 apresentarem mais desgaste para comprimentos de corte maiores, o desgaste registado não é tão intenso como o registado para as ferramentas T1, o que vai de encontro às medições do desgaste do flanco previamente apresentadas. Apesar do desgaste destas ferramentas não ser tão severo como o das T1, foi registada uma maior quantidade de adesão de material na superfície da ferramenta. Esta adesão foi registada nas faces de folga e ataque da ferramenta T2 para comprimentos de corte iguais a 2 metros, o que não se registou no caso das ferramentas T1. Indícios de adesão

de material na face de folga de uma ferramenta T2, testada a 2 metros de comprimento de corte, podem ser observados na seguinte Figura 40.

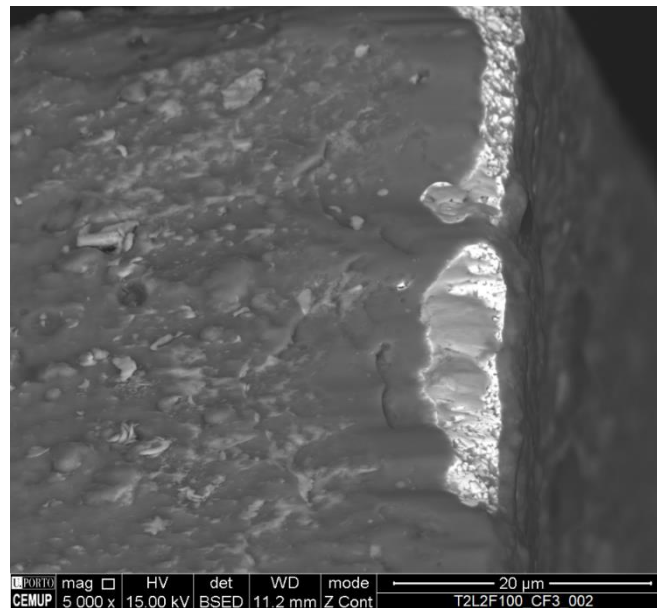


Figura 40 – Material aderido na face de folga de uma ferramenta T2L2F100

Esta adesão de material irá conduzir à delaminação do revestimento [105], como pode ser observado na Figura 41, estando marcadas as zonas de delaminação do revestimento na face de ataque de uma ferramenta T2, onde também pode ser observada a presença de material aderido.

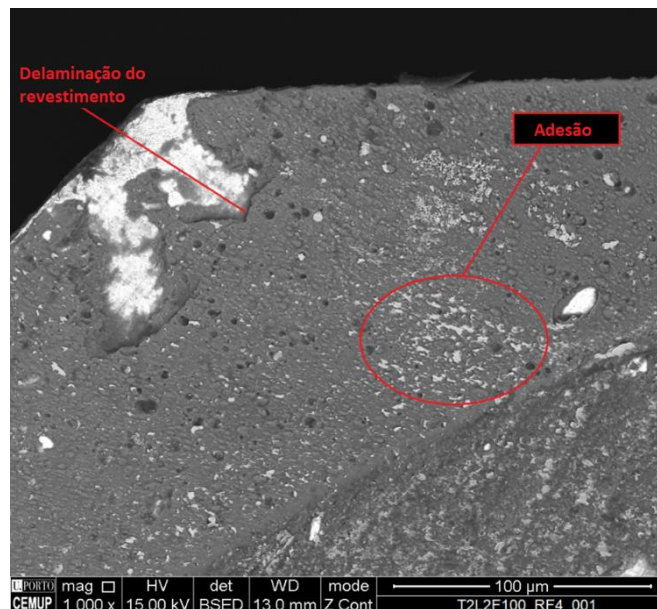


Figura 41 – Delaminação do revestimento registado numa face de ataque de uma ferramenta T2L2F100

Relativamente à influência do valor de avanço nos mecanismos de desgaste apresentados pela ferramenta T2, foi notado que uma redução no valor de avanço iria promover a adesão de material maquinado à superfície da ferramenta. No entanto, para valores de avanço maiores, particularmente para os ensaios realizados com 125% do

avanço, as ferramentas apresentaram mais desgaste abrasivo e fissuração do revestimento. Este desgaste abrasivo registou-se com mais intensidade na face de folga das ferramentas T2, tal como observado na Figura 42. Para estas condições, foi registada adesão de material, no entanto, esta encontrou-se principalmente na face de ataque das ferramentas T2 (ensaiadas a 125% de avanço). As faces de ataque exibiram, também mais delaminação do revestimento, possivelmente causado pela maior quantidade de material aderido nestas faces. Estes mecanismos de desgaste podem ser observados na face de ataque de uma ferramenta T2, ensaiada a 125% de avanço, apresentada na Figura 43.

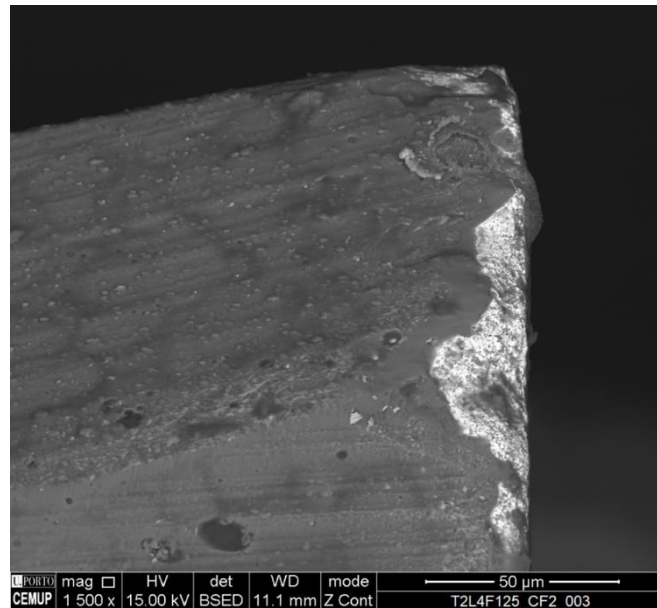


Figura 42 – Desgaste abrasivo presente na face de folga de uma ferramenta T2L4F125

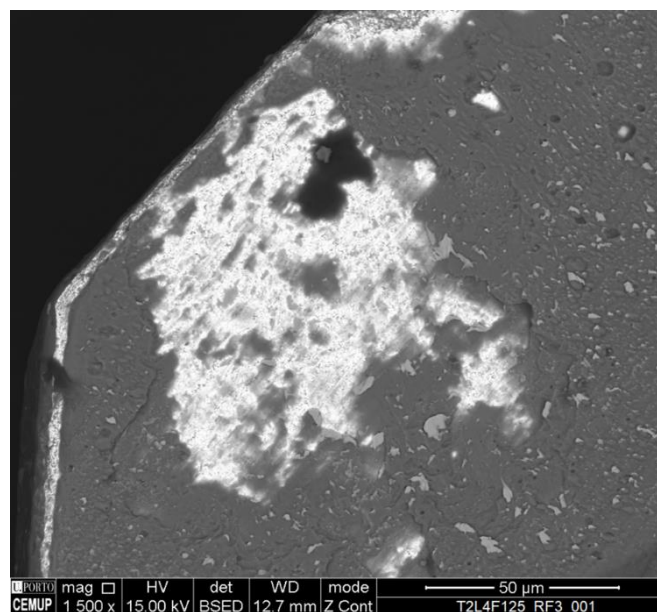


Figura 43 – Face de ataque de uma ferramenta T2L4F125, exibindo adesão de material e delaminação do revestimento

3.3.5.3 Análise do desgaste – T3

Relativamente ao desgaste apresentado pelas ferramentas T3, tal como esperado, a severidade deste aumenta para valores maiores de comprimento de corte, intensificando os mecanismos de desgaste presentes na ferramenta. O principal mecanismo de desgaste observado nestas ferramentas foi a adesão de material, originando, em alguns casos, aresta postiça. Este fenómeno pode ser observado na seguinte Figura 44.

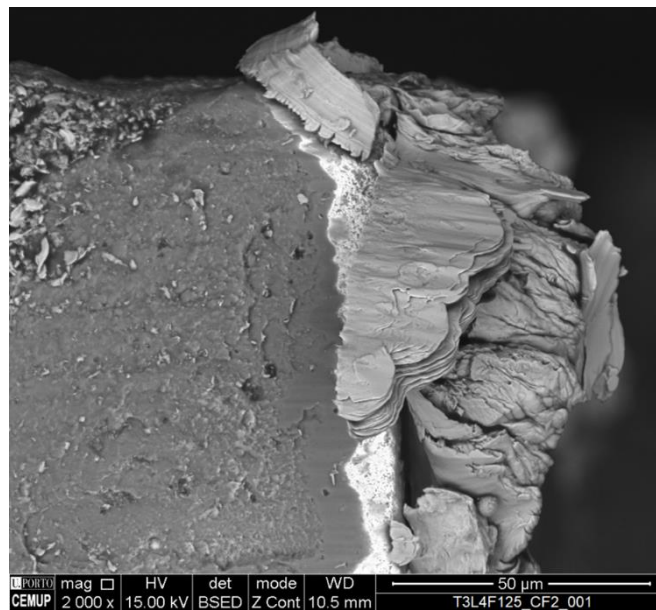


Figura 44 – Aresta postiça registada numa face de folga de uma ferramenta T3L4F125

Neste caso, o aumento do valor do avanço promoveu a adesão do material maquinado, com a maior quantidade de material aderido a ser observada para os ensaios realizados para 125% do valor de avanço. Tal como observado nas ferramentas T1 e T2, existe desgaste abrasivo e delaminação do revestimento. Na Figura 45, uma face de ataque de uma ferramenta T3 pode ser observada, exibindo desgaste por adesão de material e delaminação do revestimento. O desgaste abrasivo apresenta-se principalmente na fronteira do revestimento delaminado.

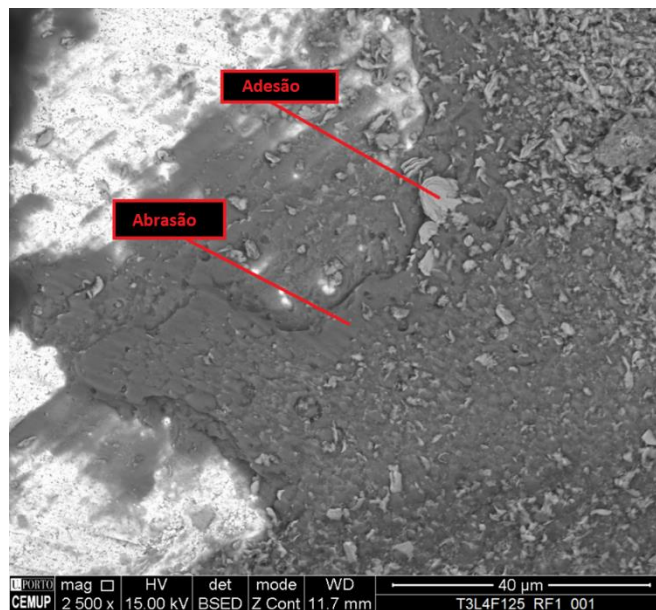


Figura 45 – Adesão de material e desgaste abrasivo detetados numa face de ataque de uma ferramenta T3L4F125

Ao contrário do que foi observado para as ferramentas T1 e T2, não foram identificadas fissuras de grande dimensão no revestimento. No entanto, foram identificadas algumas fissuras de escala nanométrica. Estas “nano-fissuras” irão eventualmente evoluir/propagar, originando fissuras de maior dimensão que irão causar a falha do revestimento. Estas fissuras podem ser observadas em maior detalhe na Figura 46.

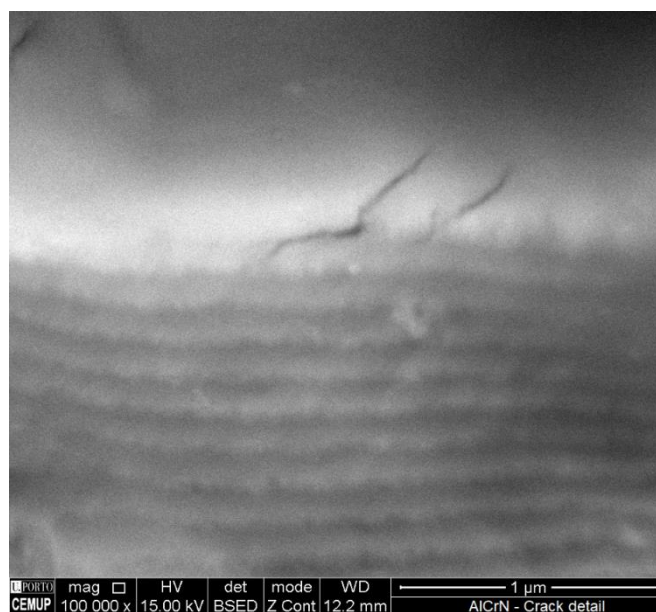


Figura 46 – Fissuras detetadas no revestimento de uma ferramenta T3, testada a 75% de avanço e para 4 metros de comprimento de corte

O facto de não terem sido observadas fissuras desenvolvidas no revestimento, pode ser atribuído à estrutura multicamada do revestimento, que promove a resistência à propagação de fissuras do mesmo [5, 15,97].

Em suma, as ferramentas T3 apresentaram grandes quantidades de material aderido à superfície da ferramenta e alguma abrasão, o que eventualmente provocou a

delaminação do revestimento e exposição do substrato em algumas zonas. Apesar disto, as ferramentas apresentaram níveis relativamente baixos de desgaste de flanco (comparativamente a T1 e T2). Adicionalmente, esta ferramenta produziu resultados bastante satisfatórios em termos da rugosidade da superfície maquinada. Comparando o desempenho da ferramenta T1 com o da T3, ambas munidas do mesmo revestimento de AlCrN, pode ser concluído que existe um benefício em utilizar uma ferramenta com quatro gumes para maquinar ligas de aço inoxidável duplex.

3.3.5.4 *Análise do desgaste – T4*

As ferramentas T4 apresentaram o segundo valor mais baixo de desgaste de flanco, particularmente para valores de avanço maiores. No entanto, foi registado desgaste considerável nas faces de ataque destas ferramentas (em relação à quantidade observada na face de folga). Este desgaste foi mais intenso nas ferramentas ensaiadas a 75% de avanço, como pode ser observado na Figura 47.

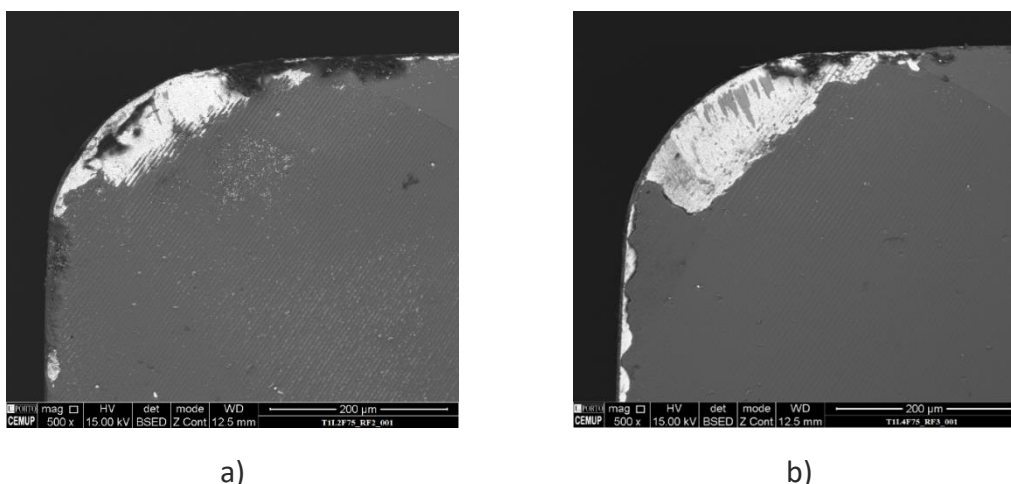


Figura 47 – Face de ataque de uma ferramenta T4L2F75 a), T4L4F75 b)

Relativamente aos mecanismos de desgaste observados, estes foram principalmente: adesão de material, abrasão e delaminação do revestimento. Tal como observado nas restantes ferramentas, o mecanismo de delaminação do revestimento é provocado pela adesão do material e abrasão desta área. Isto pode ser observado na Figura 48, onde pode ser vista a acumulação de material nas marcas deixadas pelo processo de retificação do substrato.

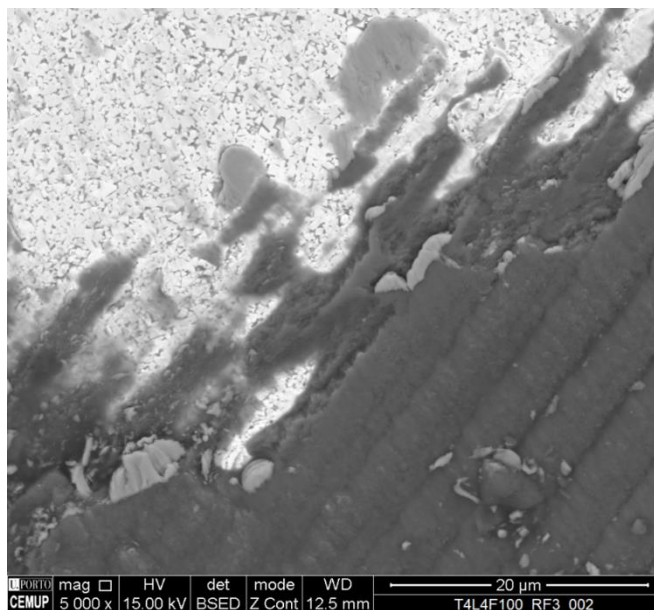


Figura 48 – Adesão do material maquinado numa face de ataque de uma ferramenta T4L4F100

Quanto à influência dos parâmetros nos mecanismos de desgaste presentes nas ferramentas T4 para comprimentos de corte mais elevados, os mecanismos são mais intensos, no entanto, o valor de avanço promove a formação de certos mecanismos de desgaste. Por exemplo, foi observada uma maior quantidade de material aderidos para os ensaios realizados a 75%, enquanto para os ensaios realizados a 125% o mecanismo de desgaste predominante era o desgaste abrasivo, apresentando alguns indícios de adesão de material. Na Figura 49, pode ser observada uma face de ataque de uma ferramenta T4, ensaiada a 125% de avanço e 4 metros de comprimento de corte.

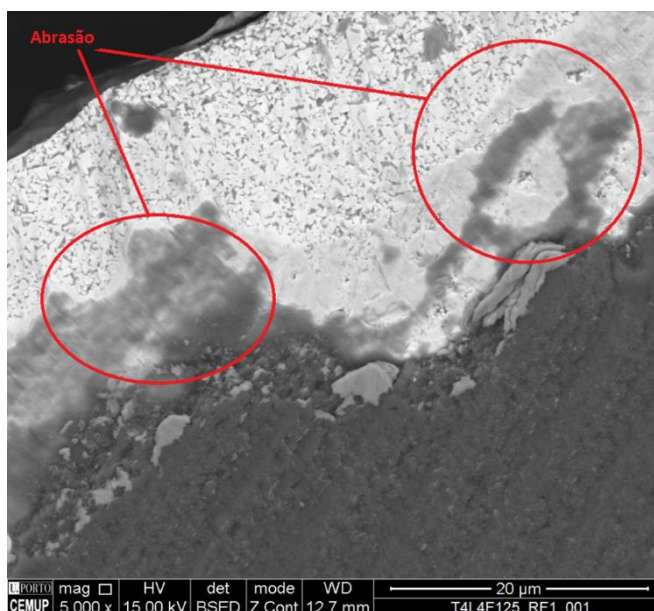


Figura 49 – Marcas de abrasão registadas numa face de ataque de uma ferramenta T4L4F125

Como pode ser visto na Figura 49, há presença de material aderido, especialmente na fronteira do revestimento delaminado. Todavia, o desgaste abrasivo é predominante.

Ao contrário do que foi observado em T1, T2 e T3, não foi notada a presença de fissuras no revestimento das ferramentas T4. Adicionalmente, este tipo de ferramentas sofreu menos desgaste do flanco quando comparado com as ferramentas previamente analisadas. No entanto, foi registado desgaste considerável nas faces de ataque das ferramentas T4 que foram testadas. Isto deve-se ao mecanismo de formação e remoção da apara, fazendo com que esta seja empurrada contra a face de ataque das ferramentas testadas, promovendo assim a adesão nesta área das ferramentas. O desgaste abrasivo é promovido nestas zonas de adesão, resultando na delaminação do revestimento, induzindo assim um maior desgaste na face de ataque destas ferramentas.

3.3.5.5 *Análise do desgaste – T5*

Visto que as ferramentas T5 e T4 apenas diferem no método de deposição do revestimento, estas apresentaram um comportamento muito semelhante, tal como visto pelos dados apresentados relativamente à rugosidade superficial produzida e do desgaste do flanco apresentado. Esta semelhança estendeu-se para os mecanismos de desgaste registados, sendo observados nas ferramentas T5 os mesmos mecanismos de desgaste considerados como principais registados na ferramenta previamente analisada, sendo estes: desgaste por adesão, desgaste abrasivo e delaminação do revestimento. No entanto, estes mecanismos apresentaram-se de uma forma menos intensa, quando comparado com os mecanismos de desgaste observados em T4.

A variação dos parâmetros de maquinação influenciam os mecanismos de desgaste desenvolvidos nas ferramentas T5, da mesma forma que nas ferramentas T4. Um aumento do comprimento de corte promove a intensificação dos mecanismos de desgaste, tais como a adesão de material à superfície da ferramenta e desgaste abrasivo. Quanto à influência do avanço, quanto menor este for, maior é a tendência para o material aderir à ferramenta, sendo registados ligeiros indícios de adesão nas faces de folga das ferramentas, tal como observado na Figura 50.

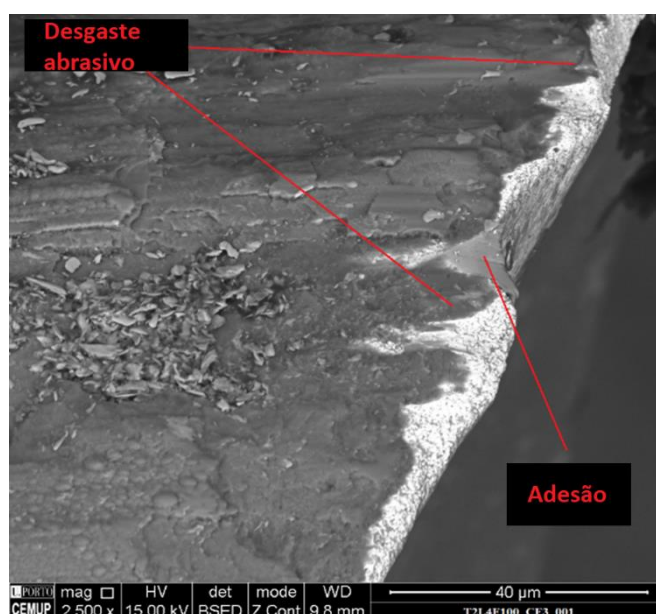


Figura 50 – Análise dos mecanismos de desgaste presentes numa face de folga de uma ferramenta T5L4F100

Tal como observado na análise das ferramentas T4, para valores mais elevados de avanço, o desgaste abrasivo é predominante, enquanto para valores mais baixos de avanço, a adesão de material à superfície da ferramenta é mais abundante.

Relativamente à delaminação do revestimento, esta acontece do mesmo modo registado para as ferramentas analisadas, com o material a aderir à superfície da ferramenta, principalmente nas marcas deixadas pelo processo de retificação do substrato. Este fenómeno pode ser observado na Figura 51.

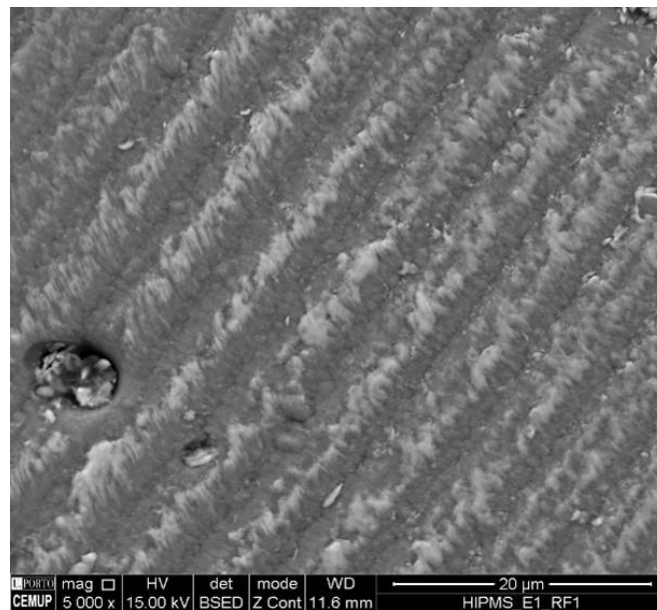


Figura 51 – Adesão do material maquinado nas marcas deixadas pela retificação do substrato, observado na face de ataque de uma ferramenta T5L2F100

Tal como mencionado anteriormente, o material irá acumular-se nestas zonas, promovendo a abrasão da área e delaminação do revestimento. Na Figura 52, pode ser observada uma face de ataque de uma ferramenta T5, testada a 100% de avanço e quatro metros de comprimento de corte, com o substrato exposto. Pode ser notada a delaminação do revestimento e a adesão do material maquinado à fronteira do revestimento/substrato.

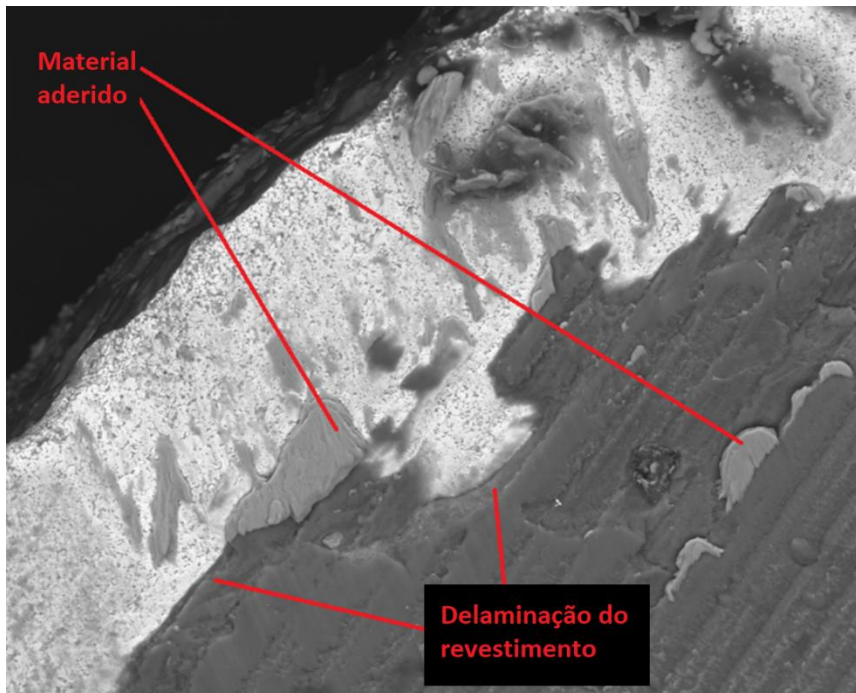


Figura 52 – Adesão do material maquinado na zona de delaminação do revestimento, observado numa face de ataque de uma ferramenta T5L4F125

Para além dos principais mecanismos de desgaste, foi notada, também, a presença de aresta postiça, provocada por uma acumulação de material no substrato exposto de algumas ferramentas testadas. Na Figura 53, este fenómeno pode ser observado em detalhe. Este mecanismo não foi observado em todas as ferramentas, não sendo considerado um mecanismo de desgaste principal.

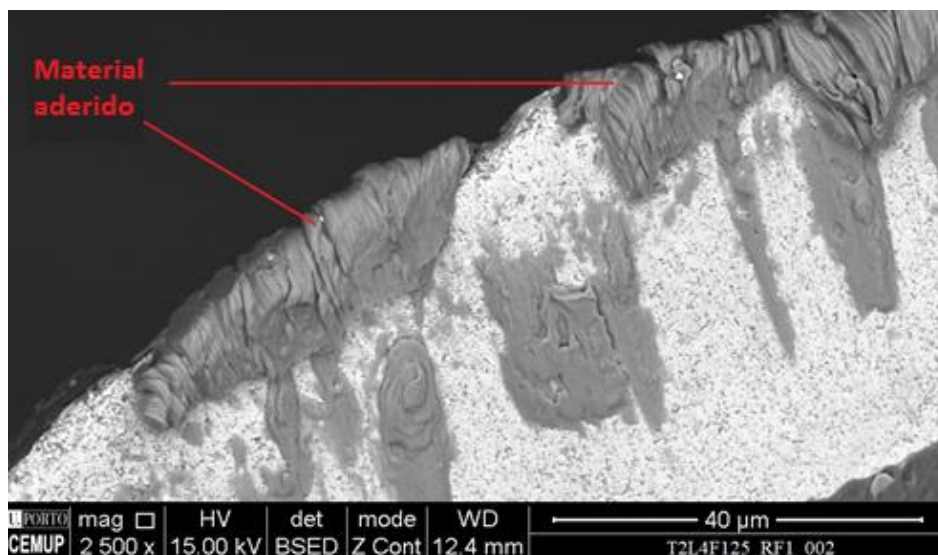


Figura 53 – Face de ataque de uma ferramenta T5L2F125, com identificação do mecanismo de desgaste

Resumidamente, o comportamento ao desgaste das ferramentas T5 é muito semelhante ao observado nas ferramentas T4, ambas exibindo os mesmos mecanismos de desgaste, com a ferramenta T5 a mostrar menos severidade destes.

3.3.5.6 *Discussão dos resultados obtidos*

Relativamente aos mecanismos de desgaste identificados nas ferramentas, os mais predominantes foram desgaste abrasivo e adesão do material à superfície da ferramenta, isto vai de encontro com o que é normalmente observado na maquinagem de aços inoxidáveis duplex [88, 114].

A ferramenta que sofreu menos adesão de material foi a ferramenta T1, visto que esta é a ferramenta que possui dois gumes. Esta geometria promove uma remoção da apara melhor, quando comparada com as ferramentas com quatro gumes, o que se deve ao facto de existir uma maior área que pode ser irrigada pelo líquido de corte. No entanto, esta ferramenta apresenta desgaste abrasivo, fissuração e delaminação do revestimento, mesmo possuindo um revestimento multicamada, como o AlCrN que foi utilizado. Adicionalmente, o nível de desgaste observado neste tipo de ferramentas foi bastante severo, principalmente quando comparado com o desgaste apresentado na ferramenta T3, revestida com o mesmo tipo de revestimento, mas possuindo quatro gumes, indicando que quatro gumes de corte produzem melhores resultados, em termos de desgaste, aquando da maquinagem deste tipo de ligas [113].

As ferramentas T3 apresentaram grandes quantidades de material aderido quando comparadas com as restantes ferramentas, sendo que este fenómeno se verificou principalmente para comprimentos de corte mais elevados. Esta elevada quantidade de material aderido provocou a formação de aresta postiça, observada em várias ferramentas T3. Apesar disto, o desgaste do flanco destas ferramentas não foi tão acentuado como aquele que foi registado para as ferramentas T1 e T2. Adicionalmente, não foi notada a presença de fissuras significativas neste revestimento, devido à sua estrutura multicamada, que promove a resistência à propagação de fissuras do revestimento [5, 15]

Ambas as ferramentas revestidas com o revestimento TiAlSiN, T4 e T5, apresentaram pouco desgaste, com a ferramenta T5 a exibir a menor quantidade de desgaste entre todas as ferramentas. No entanto, a ferramenta T4 apresenta um desgaste semelhante, apenas ligeiramente mais severo. Este revestimento, TiAlSiN, apresenta um bom comportamento ao desgaste, mesmo na maquinagem de materiais com baixa maquinabilidade [97]. Apesar destas ferramentas apresentarem um baixo nível de desgaste de flanco, comparando este desgaste ao observado nas faces de ataque, observou-se que este era mais intenso, principalmente devido à acumulação de material aderido nestas zonas.

O modo de falha do revestimento é comum para todas as ferramentas analisadas, a delaminação do revestimento é observada predominantemente nas faces de ataque das ferramentas. A adesão do material à superfície da ferramenta promove o desgaste abrasivo nestas zonas, que por sua vez promove a delaminação do revestimento, expondo o substrato. Esta exposição do substrato origina zonas de fronteira entre o revestimento e o substrato, onde o material maquinado tende a aderir em grande quantidade, promovendo assim um ciclo de delaminação do revestimento [105].

CONCLUSÕES

4.1 Conclusões

4.2 Proposta de trabalhos futuros

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

A elaboração da presente dissertação resultou na elaboração de três artigos:

- Do estudo acerca dos revestimentos com base TiAlN utilizados na maquinagem resultou a elaboração e publicação de um artigo de revisão acerca da utilização e desempenho deste tipo de revestimento nos processos de maquinagem [97].
- Com os resultados obtidos para as ferramentas T1, T2, T3, T4 e T5, foram elaborados dois artigos comparativos. Um deles, acerca do desempenho das diferentes ferramentas com diferentes geometrias e revestimentos na maquinagem do aço LDX 2101, focado na comparação das técnicas de deposição utilizadas, oferecendo uma comparação mais completa entre as ferramentas revestidas por TiAlSiN, obtido por *dc MS* e *HiPIMS* [121-122], e outro em fase de publicação na revista *Advances in Manufacturing* (Springer), para o qual já foi dada resposta aos Revisores (*Minor Revisions*).

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

4.1 Conclusões

Na presente dissertação, foi apresentado um estudo comparativo do desempenho de cinco tipos de ferramentas, com revestimentos e geometrias diferentes, na maquinagem de um aço inoxidável duplex, LDX 2101. As forças de corte desenvolvidas durante os ensaios de maquinagem foram analisadas, revelando ter um comportamento bastante estável para todas as ferramentas. Foi detetado um aumento das forças de corte, nomeadamente em F_z , a partir dos 2 metros de comprimento de corte. Ainda relativamente às forças de corte analisadas, foi notada uma ligeira diferença no comportamento dos componentes F_x e F_y das ferramentas T1, comparativamente às restantes ferramentas. Estes componentes apresentaram magnitudes ligeiramente diferentes, assim como frequências e amplitudes diferentes (tal como visto no capítulo referente à análise das forças de corte). Isto foi atribuído à geometria da ferramenta, esta sendo a única que apresentava dois gumes de corte. Relativamente aos resultados das restantes análises, estes irão estar apresentados, seguidamente, de uma forma resumida para cada uma das ferramentas analisadas:

- Ferramentas T1 – Estas ferramentas produziram os melhores resultados, em termos de rugosidade superficial maquinada e desgaste, para as condições iniciais de ensaio. Relativamente aos valores de R_a médios obtidos após os ensaios destas ferramentas, existe uma clara influência do comprimento de

cutor na qualidade da superfície maquinada, obtendo-se os valores de Ra mais baixos para ensaios realizados para 2 metros de comprimento de corte e para os valores de avanço de 75%. Em termos de desgaste do flanco das ferramentas, o qual tem influência direta nos valores de Ra, os valores mais baixos de VB são obtidos para as condições que utilizam 100% do avanço considerado, com o aumento do valor de comprimento de corte a promover um aumento destes valores. Os mecanismos de desgaste principais são a abrasão e a fissuração/delaminação do revestimento, com alguns indícios de material aderido na superfície.

- Ferramentas T2 – Os resultados obtidos nos ensaios destas ferramentas são semelhantes aos de T1, com os valores mais baixos de Ra e VB a serem obtidos para valores de avanço de 100% e para comprimentos de corte mais baixos. Uma diminuição do avanço promove a obtenção de valores de Ra da superfície maquinada mais baixos. Relativamente ao desgaste, para as condições de ensaio de 125% e 75% de avanço, o desgaste registado foi mais intenso, quando comparado com as condições de 100% e com as ferramentas T1 ensaiadas nessas mesmas condições. Em relação aos mecanismos de desgaste, foram determinados como principais: a adesão do material maquinado à ferramenta, desgaste abrasivo e delaminação/fissuração do revestimento. A quantidade de material aderido nesta ferramenta foi maior em comparação à registada em T1.
- Ferramentas T3 – Esta ferramenta produziu resultados bastante satisfatórios no que toca à rugosidade superficial produzida, obtendo os valores mais baixos de Ra produzidos de entre todas as ferramentas, para as condições de ensaio que utilizaram 125% do valor de avanço. Os valores mais altos de Ra foram medidos nas superfícies maquinadas a 100% de avanço, no entanto, estes valores são mais baixos do que qualquer valor apresentado pelas ferramentas T1 e T2. Relativamente ao comportamento ao desgaste das ferramentas, a geometria de quatro gumes de corte das ferramentas T3 provou ser bastante benéfica, tendo as ferramentas sofrido menos desgaste do que aquele apresentado pelas ferramentas T1. O comprimento de corte influenciou os valores de Ra e de VB obtidos, no entanto, este parâmetro não é tão influente como nas ferramentas T1 e T2. Quanto aos mecanismos de desgaste identificados nesta ferramenta, o predominante era a adesão do material maquinado, seguido por desgaste abrasivo e delaminação do revestimento. O aumento do valor de avanço promoveu a quantidade de material aderido nestas ferramentas, originando aresta postíça para os ensaios realizados a 125% de avanço. Ao contrário do que foi registado em T1 e T2, não foram encontradas fissuras no revestimento de grandes dimensões, encontrando-se algumas “nano-fissuras”. Este facto deve-se à estrutura do revestimento promover uma maior resistência à propagação de fissuras no revestimento.
- Ferramentas T4 – Este tipo de ferramentas apresentou os segundos melhores resultados, em termos de comportamento ao desgaste e rugosidade superficial maquinada. Relativamente à rugosidade da superfície maquinada, foi registada a mesma influência do comprimento de corte, como observado para as

ferramentas T1, T2 e T3. No entanto, relativamente à influência do avanço nos valores de Ra medidos, registou-se que os valores mais baixos de Ra eram obtidos para as condições de ensaio que utilizam 75% do avanço. Em termos de desgaste apresentado pelas ferramentas, estas apresentaram o nível mais baixo de desgaste do flanco, quando comparado com as ferramentas T1, T2 e T3, principalmente para valores elevados de avanço. Relativamente à influência do comprimento de corte nos valores de desgaste do flanco, registou-se que este parâmetro era mais influente para valores de avanço de 75%, não alterando os valores de desgaste de flanco registados nos ensaios realizados a 125% de avanço. Apesar do desgaste do flanco nestas ferramentas ser mínimo, foi registado algum desgaste nas faces de ataque destas ferramentas, exibindo mecanismos de desgaste como adesão, desgaste abrasivo e delaminação do revestimento. De uma forma geral, esta ferramenta produziu resultados bastante satisfatórios, em termos da qualidade superficial maquinada e de desgaste sofrido.

- Ferramentas T5 – Devido à semelhança desta ferramenta com a previamente analisada, os resultados obtidos nos ensaios realizados com as ferramentas T5 são bastante próximos e seguem as mesmas tendências do que foi registado para as ferramentas T4. No entanto, esta ferramenta apresenta os valores mais baixos de rugosidade superficial produzida e de desgaste do flanco, apresentando também uma resistência à variação do comprimento de corte, não sofrendo grandes desvios de resultados para ensaios realizados tanto a 2 metros de comprimento de corte como a 4 metros, significando que estas ferramentas conseguem maquinar maiores comprimentos de corte, sem sofrer desgaste muito severo. Esta superioridade pode ser atribuída à técnica de deposição *HiPIMS*, que confere ao revestimento melhores propriedades mecânicas, de adesão ao substrato e nível de tensões residuais compressivas presentes no revestimento. Estes fatores estão associados a um melhor desempenho por parte das ferramentas, especialmente no que diz respeito à produção de uma superfície maquinada de baixa rugosidade e à resistência ao desgaste.

Da análise comparativa das ferramentas, notou-se que estas sofreram os mesmos mecanismos de desgaste, ainda que com intensidades diferentes. Adicionalmente, foi identificado o modo de falha do revestimento, sendo este comum a todas as ferramentas analisadas. A adesão do material na superfície da ferramenta promove a abrasão nesta área. Este desgaste abrasivo irá promover a delaminação do revestimento, o qual, por sua vez, irá promover novamente a adesão nesta área de fronteira entre o filme e a zona do substrato já sujeita a delaminação. Isto origina um ciclo de desgaste durante o processo de maquinagem, eventualmente resultando na falha da ferramenta.

4.2 Proposta de trabalhos futuros

Este trabalho poderá ser expandido realizando uma avaliação de várias geometrias de ferramentas de corte com maior diferenciação entre si. Adicionalmente, este estudo pode ser realizado em operações de desbaste e de acabamento. Para operações de desbaste, as forças de corte esperadas são de maior magnitude, quando comparadas com operações de acabamento, dando origem a um estudo possivelmente interessante acerca do estudo das forças de maquinagem desenvolvidas durante este tipo de operações.

Com os desenvolvimentos recentes realizados na área dos revestimentos à base de TiAlN, nomeadamente, os “novos” elementos dopantes destes revestimentos, seria interessante avaliar a influência da presença de elementos como Ta, Y e Mo nas propriedades e desempenho dos revestimentos, avaliando a rugosidade superficial maquinada e o desgaste sofrido.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

1- Kulkarni, B.H.; Nadakatti, M.M.; Kulkarni, S.C.; Kulkarni, R.M. (2020) 'Investigations on effect of nanofluid based minimum quantity lubrication technique for surface milling of Al7075-T6 aerospace alloy'. *Materials Today: Proceedings*, 27, pp. 251–256. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.10.127>

2- Mersni, W.; Boujelbene, M.; Salem, S.B.; Singh, H.P. (2020) 'Machining time and quadratic mean roughness optimization'. *Materials Today: Proceedings*, 26(2), pp. 2619–2624. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.553>

3- Gabiccini, M.; Bracci, A.; Battaglia, E. (2011) 'On the estimation of continuous mappings from cradle-style to 6-axis machines for face-milled hypoid gear generation'. *Mechanism and Machine Theory*, 46, pp. 1492–1506. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2011.05.003>

4 - Moriya, T.; Nakamoto, K.; Ishida, T.; Takeuchi, Y. Creation of V-shaped microgrooves with flat-ends by 6-axis control ultraprecision machining. *CIRP Annals*, 59, pp. 61–66. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.054>

5 - Sousa V.F.C.; Silva, F.J.G. (2020) 'Recent Advances in Turning Processes Using Coated Tools—A Comprehensive Review'. *Metals*, 10(2), 170. <https://doi.org/10.3390/met10020170>

6 - 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.

7 - S. Coromant (2010) 'Manual técnico de usinagem, torneamento, fresamento, furação, mandrilamento e sistemas de fixação'. Sandvik Coromant, São Paulo – Brasil.

8 – Shaw, M.C.; Cookson, J.O. (2004) 'Metal cutting principles, vol. 2'. Oxford university press, Nova York – EUA. ISBN: 9780195142068

9 – Dömer-Pramet, (2021) 'Milling catalogue 2021'. Disponível em: https://www.dormerpramet.com/downloads/dormerpramet_milling_catalogue_2021-en.pdf

10 – Smith, G.T. (2008) 'Cutting Tool Technology: Industrial Handbook'. Springer-Verlag, Londres – R.U. ISBN: 9781848002050

11 – Edwards, R. (1994) 'Cutting tools'. London: Institute of Materials, Londres – R.U. ISBN: 0901716480

- 12 – Grabowski, R.; Denkena, B.; Köhler, J. (2014) 'Prediction of process forces and stability of end mills with complex geometries'. *Procedia CIRP*, 14, pp. 119–124. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.101>
- 13 – Wojciechowski, S.; Maruda, R.W.; Barrans, S.; Nieslony, P.; Krolczyk, G.M. (2017) 'Optimisation of machining parameters during ball end milling of hardened steel with various surface inclinations'. *Measurement*, 111, pp. 18–28. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.07.020>
- 14 – Li, C.; Chen, C.; Tang, Y.; Li, L. (2017) 'Selection of optimum parameters in multi-pass face milling for maximum energy efficiency and minimum production cost'. *Journal of Cleaner Production*, 140, pp. 1805–1818. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.086>
- 15 – Sousa V.F.C.; Silva, F.J.G. (2020) 'Recent Advances on Coated Milling Tool Technology—A Comprehensive Review'. *Coatings*, 10(3), 235. <https://doi.org/10.3390/coatings10030235>
- 16 – Ausgpurger, T.; Koch, M.; Lakner, T.; De Bartolomeis, A.; Shokrani, A.; Bergs, T. (2021) 'Development of a virtual sensor for the comparison of heat partitions in milling under cryogenic cooling lubrication and high-pressure cutting fluid supply'. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 35, pp. 118-131. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.05.004>
- 17 – Xiao, Y.; Jiang, Z.; Gu, Q.; Yan, W.; Wang, R. (2021) 'A novel approach to CNC machining center processing parameters optimization considering energy-saving and low-cost'. *Journal of Manufacturing Systems*, 59, pp. 535-548. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.03.023>
- 18 – Rajeshkumar, N.; Ramesh, S. (2020) 'Design & optimization of machining parameters of minimum quantity lubrication in milling of Ti-6Al-4V'. *Materials Today: Proceedings*, In Press, Corrected proof. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.474>
- 19 – Daniyan, I.A.; Tlhabadira, I.; Daramola, O.O.; Mpofu, K. (2019) 'Design and Optimization of Machining Parameters for Effective AISI P20 Removal Rate during Milling Operation'. *Procedia CIRP*, 84, pp. 861-867. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.301>
- 20 - Viswanathan, G.; Praveen, R.; Prabhu, L.; Prakash, S. (2021) 'Evaluating the machining parameters for milling P20 HH mould steel using a specific end mill'. *Materials Today: Proceedings*, 46(17), pp. 8248-8253. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.236>
- 21 – Chen, X.; Li, C.; Tang, Y.; Li, L.; Du, Y. Li, L. (2019) 'Integrated optimization of cutting tool and cutting parameters in face milling for minimizing energy footprint and production time'. *Energy*, 175, pp. 1021–1037. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.157>

- 22 – Kumar, S.; Saravanan, I.; Patnaik, L. (2020) 'Optimization of surface roughness and material removal rate in milling of AISI 1005 carbon steel using Taguchi approach'. *Materials Today: Proceedings*, 22(3), pp. 654-658. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.039>
- 23 - Rao, B.S.; Babu, C.K.; Nayaka, H.S. (2021) 'Multi-response optimization of machining parameters for end milling process on BSL168-T6511 aluminium alloy using Taguchi based grey relational analysis'. *Materials Today: Proceedings*, In Press, Corrected Proof. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.680>
- 24 – Kumara, D.; S. Paramavisam, S.S.S.S.; Natarajan, H. (2021) 'Optimization of high-speed machining cutting parameters for end milling of AlSi7Cu4 using Taguchi based technique of order preference similarity to the ideal solution'. *Materials Today: Proceedings*, In Press, Corrected Proof. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.134>
- 25 - Santhakumar, J.; Iqbal U.M.; Prakash, M. (2018) 'Taguchi-Grey Relational Based Multi-Response Optimization on the Performance of Tool Coating Thickness in Pocket Milling'. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), pp. 13422–13428. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.336>
- 26 - Harisha, S.K.; Rajkumar, G.R.; Pawar, V.; Keshav, M. (2018) 'Statistical investigation of tool geometry for minimization of cutting force in turning of hardened steel'. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), pp. 11277–11282. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.094>
- 27 – Biondani, F.G.; Bissacco, G. (2019) 'Effect of cutting edge micro geometry on surface generation in ball end milling'. *CIRP Annals*, 68(1), pp. 571-574. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.017>
- 28 – ISO 3002/1:1982 – Basic quantities in cutting and grinding – part 1: Geometry of the active part of cutting tools – General terms, reference systems, tool and working angles, chip breakers.
- 29 – Vobroucek, J. (2015) 'The Influence of Milling Tool Geometry on the Quality of the Machined Surface'. *Procedia Engineering*, 100, pp. 1556-1561. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.528>
- 30 - Lakner, T.; Bergs, T.; Döbbeler, B. (2019) 'Additively manufactured milling tool with focused cutting fluid supply'. *Procedia CIRP*, 81, pp. 464–469. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.118>
- 31 – Denkena, B.; Bruning, J.; Niederwestber, D. Grabowski, R. (2016) 'Influence of Machining Parameters on Heat Generation during Milling of Aluminum Alloys'. *Procedia CIRP*, 46, pp. 39-42. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.192>
- 32 – Huang, N., Krebs, E., Baumann, J.; Zhou, Y.; Wu, S.; Biermann, D. (2020) 'Experimental investigation on influence of engagement angle and tool geometry on plunge milling'. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 108, pp. 1973–1981. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05480-x>

- 33 – Uhlman, E.; Kuche, Y.; Polte, J.; Polte, M. (2018) 'Influence of cutting edge micro-geometry in micro-milling of copper alloys with reduced lead content'. *Procedia CIRP*, 77, pp. 662-665. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.182>
- 34 – Daniyan, I.; Tlhabadira, I.; Mporo, K.; Adeodu A. (2021) 'Investigating the geometrical effects of cutting tool on the surface roughness of titanium alloy (Ti6Al4V) during milling operation'. *Procedia CIRP*, 99, pp. 157-164. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.03.097>
- 35 – Boyea, J.; George, S.M.; Sharivker, L.; Penkert, W. (2021) 'Studies of End Mill Flute Geometry Enhancements on Specific Cutting Energy and Chip Formation'. *Procedia CIRP*, 101, pp. 286-289. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.02.032>
- 36 – Can, A. (2019) 'Study on the Machinability of SMC Composites During Hole Milling: Influence of Tool Geometry and Machining Parameters'. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44, pp. 7599–7616. <https://doi.org/10.1007/s13369-019-03865-z>
- 37 – Agapiou, J.; Rivin, E.; Xie, C. (1995) 'Toolholder/Spindle Interfaces for CNC Machine Tools'. *CIRP Annals*, 44(1), pp. 383-387. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62347-6](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62347-6)
- 38 - Klotz, S.; Gerstenmeyer, M.; Zanger, F.; Schulze, V. (2014) 'Influence of clamping systems during drilling carbon fiber reinforced plastics'. *Procedia CIRP*, 13, pp. 208–213.
- 39 – Xia, Y.; Wan, Y.; Luo, X.; Wang, H.; Gong, N.; Cao, J.; Liu, Z.; Song, Q. (2020) 'Development of a toolholder with high dynamic stiffness for mitigating chatter and improving machining efficiency in face milling'. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 145, 106928. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.106928>
- 40 – AMF, (2021) 'Elementos de fixação hidráulicos'. Disponível em: <https://www.amf.de/files/amf-assets/news/downloads/catalogues/Catalogo-AMF-Elementos-de-fixacao-hidraulicos.pdf>
- 41 – Kumar, S.; Campilho, R.D.S.G.; Silva, F.J.G. (2019) 'Rethinking modular jigs' design regarding the optimization of machining times'. *Procedia Manufacturing*, 38, pp. 876-883. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.169>
- 42 – Costa, C.; Silva, F.J.G.; Gouveia, R.M.; Martinho, R.P. (2018) 'Development of hydraulic clamping tools for the machining of complex shape mechanical components'. *Procedia Manufacturing*, 17, pp. 563-570. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.10.097>
- 43 – Klotz, S.; Zanger, F.; Schulze, V. (2014) 'Influence of Clamping Systems during Milling of Carbon Fiber Reinforced Composites'. *Procedia CIRP*, 24, pp. 38-43. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.07.142>
- 44 – Munoa, J.; Sanz-Calle, M.; Dombovari, Z.; Iglesias, A.; Pena-Barrio, J.; Stepan, G. (2020) 'Tuneable clamping table for chatter avoidance in thin-walled part milling'. *CIRP Annals*, 69(1), pp. 313-316. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.04.081>

- 45 – Vazquez, K.P.M.; Giardini, C.; Ceretti, E. (2014) ‘Cutting force modeling’. *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*, Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, pp. 315–329. https://doi.org/10.1007/978-3-642-20617-7_6399
- 46 – Toenshoff, H.K. (2014) ‘Cutting, fundamentals’. *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*, Springer: Berlin/Heidelberg, Germany. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35950-7_6633-10
- 47 – Grote, K.; Antonsson, E.K. (2009) ‘Springer Handbook of Mechanical Engineering’. Springer, Nova York, EUA. ISBN: 9783540491316
- 48 – Strafford, K.N.; Audy, J. (1997) ‘Indirect monitoring of machinability in carbon steels by measurement of cutting forces’. *Journal of Materials Processing Technology*, 67, pp. 150–156. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(96\)02835-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(96)02835-X)
- 49 – Venkatesan, K.; Manivannan, K.; Devendiran, S.; Mathew, A.T.; Ghazaly, N.M.; Aadhavan, B.S.M.N. (2019) ‘Study of forces, surface finish and chip morphology on machining of inconel 825’. *Procedia Manufacturing*, 30, pp. 611–618. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.086>
- 50 – Vasu, M.; Nayaka, H.S. (2018) ‘Investigation of cutting force tool tip temperature and surface roughness during dry machining of spring steel’. *Materials Today: Proceedings*, 5, pp. 7141–7149. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.379>
- 51 – Phokobye, S.N.; Daniyan, I.A.; Tlhabadira, I.; Masu, L.; VanStaden, L.R. (2019) ‘Model design and optimization of carbide milling cutter for milling operation of M200 tool steel’. *Procedia CIRP*, 84, pp. 954–959. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.300>
- 52 – Wan, M.; Yin, W.; Zhang, W.H. (2016) ‘Study on the correction of cutting force measurement with table dynamometer’. *Procedia CIRP*, 56, pp. 119–123. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.10.035>
- 53 – Kistler ‘KISTLER – measure, analyse, innovate’. Disponível em: <https://www.kistler.com/en/solutions/research-and-development-testing/dynamometers-for-cutting-force-measurement/>
- 54 – Batuev, V.A.; Batuev, V.V.; Ardashev, D.V.; Shipulin, L.V.; Degtyareva-Kashutina, A.S. (2019) ‘Analytical calculation of cutting forces and analysis of their change at 3-D milling’. *Procedia Manufacturing*, 32, pp. 42–49. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.181>
- 55 – Davoudinejad, A.; Chiappini, E.; Trelli, S.; Annoni, M.; Strano, M. (2015) ‘Finite element simulation and validation of chip formation and cutting forces in dry and cryogenic cutting of Ti–6Al–4V’. *Procedia Manufacturing*, 1, pp. 728–739. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.09.037>
- 56 – Sousa, V.F.C.; Silva, F.J.G.; Fecheira, J.S.; Lopes, H.M.; Martinho, R.P.; Casais, R.B.; Ferreira, L.P. (2020) ‘Cutting Forces Assessment in CNC Machining Processes: A Critical Review’. *Sensors*, 20, 4536. <https://doi.org/10.3390/s20164536>

- 57 – Sousa, V.F.C.; Silva, F.J.G.; Fecheira, J.S.; Lopes, H.M.; Martinho, R.P.; Casais, R.B. (2020) 'Accessing the cutting forces in machining processes: An overview'. *Procedia Manufacturing*, 51, pp. 787-794. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.110>
- 58 – Kumar, M.S.K.; Gurudatt, B.; Reddappa, H.N.; Suresh, R. (2021) 'Investigations on the effect of Machining parameters on Machining force and roughness in Micro-Milling of Titanium Gr5 and Gr12 alloys under dry Machining conditions using carbide tool'. *Materials Today: Proceedings*, In Press, Corrected Proof. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.082>
- 59 – Zhang, X.; Pan, T.; Ma, A.; Zhao, W. (2022) 'High efficiency orientated milling parameter optimization with tool wear monitoring in roughing operation'. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 165, 108394. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108394>
- 60 – Pawar, S.S.; Bera, T.C.; Sangwan, K.S. (2021) 'Modelling of Energy Consumption for Milling of Circular Geometry'. *Procedia CIRP*, 98, pp. 470-475. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.136>
- 61 – George, P.; Wins, K.L.D.; Dhas, D.S.E.J.; George, P.; Anuja, Beatrice, B.A. (2021). 'Effect of machining parameters on cutting force during dry milling of 2205 DSS and 2507 SDSS materials'. *Materials Today: Proceedings*, In Press, Corrected Proof. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.097>
- 62 – Martinho, R.P.; Silva, F.J.G.; Alexandre, R.J.D.; Baptista, A.P.M. (2011) 'TiB₂ Nanostructured Coating for GFRP Injection Moulds'. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 11, pp. 5375-5382. <https://doi.org/10.1166/jnn.2011.3772>
- 63 – Silva, F.J.G.; Martinho, R.P.; Alexandre, R.J.D.; Baptista, A.P.M. (2011) 'Increasing the wear resistance of molds for injection of glass fiber reinforced pastics'. *Wear*, 271, pp. 2494-2499. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.01.074>
- 64 – Nunes, V.; Silva, F.J.G.; Andrade, M.F.; Alexandre, R.; Baptista, A.P.M. (2017). 'Increasing the lifespan of high-pressure die cast molds subjected to severe wear'. *Surface and Coatings Technology*, 332, pp. 319-331. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.05.098>
- 65 – Fernandes, L.; Silva, F.J.G.; Paiva, O.C.; Baptista, A.; Pinto, G. (2018) 'Minimizing the Adhesion Effects in Food Packages Forming buy the Use of Advanced Coatings'. *Procedia Manufacturing*, 17, pp. 886-894. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.10.141>
- 66 – Fernandes, L.; Silva, F.J.G.; Alexandre, R. (2019) 'Study of TiAlN PVD Coating on Stamping Dies Used in Tinplate Food Package Production'. *Micromachines*, 10, 182. <https://doi.org/10.3390/mi10030182>
- 67 – Fernandes, L.; Silva, F.J.G.; Andrade, M.F.; Alexandre, R.; Baptista, A.P.M.; Rodrigues, C. (2017) 'Increasing the stamping tools lifespan by using Mo and B₄C PVD coatings'. *Surface and Coatings Technology*, 325, pp. 107-119. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.06.043>

- 68 – Baptista, A.; Pinto, G.; Silva, F.J.G.; Ferreira, A.A.; Pinto, A.G.; Sousa, V.F.C. (2021) 'Wear Characterization of Chromium PVD Coatings on Polymeric Substrate for Automotive Optical Components'. *Coatings*, 11, 555. <https://doi.org/10.3390/coatings11050555>
- 69 – Ferreira, A.A.; Silva, F.J.G.; Pinto, A.G.; Sousa, V.F.C. (2021) 'Characterization of Thin Chromium Coatings Produced by PVD Sputtering for Optical Applications'. *Coatings*, 11, 215. <https://doi.org/10.3390/coatings11020215>
- 70 – Silva, F.G.; Neto, M.A.; Fernandes, A.J.S.; F.M. Costa, Oliveira, F.J.; Silva, R.F. (2009) 'Adhesion and Wear Behaviour of NCD Coatings on Si₃N₄ by Micro-Abrasion Tests'. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 9, pp. 3938-3943. <https://doi.org/10.1166/jnn.2009.NS93>
- 71 – Silva, F.J.G.; Fernandes, A.J.S.; Costa, F.M.; Baptista, A.P.M.; Pereira, E. (2005) 'Unstressed PACVD Diamond films on steel pre-coated with a composite layer'. *Surface and Catings Technology*, 191, pp. 102-107. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.02.036>
- 72 – Silva, F.J.G.; Casais, R.C.B.; Baptista, A.P.M.; Marques, M.J.; Sousa, V.M.C.; Alexandre, R. (2021) 'Comparative Study of the Wear Behavior of B4C Monolayered and CrN/CrCN/DLC Multilayered Physical Vapor Deposition Coatings Under High Contact Loads: An Experimental Analysis'. *Journal of Tribology*, 144, 031701. <https://doi.org/10.1115/1.4051226>
- 73 – Silva, F.J.G.; Martinho, R.P.; Baptista, A.P.M. (2014) 'Characterization of laboratory and industrial CrN/CrCN/diamond-like carbon coatings'. *Thin Solid Films*, 550, pp. 278-284. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2013.11.042>
- 74 – Silva, F.J.G.; Baptista, A.P.M.; Pereira, E.; Teixeira, V.; Fan, Q.H.; Fernandes, A.J.S.; Costa, F.M. (2002) 'Microwave plasma chemical vapour deposition Diamond nucleation on ferrous substrates with Ti and Cr interlayers'. *Diamond and Related Materials*, 11, pp. 1617-1622. [https://doi.org/10.1016/S0925-9635\(02\)00029-8](https://doi.org/10.1016/S0925-9635(02)00029-8)
- 75 – Silva, F.J.G.; Fernandes, A.J.S.; Costa, F.M.; Teixeira, V.; Baptista, A.P.M.; Pereira, E. (2003) 'Tribological behaviour of CVD Diamond films on steel substrates'. *Wear*, 255, pp. 846-853. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00145-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00145-5)
- 76 – Silva, F.J.G.; Fernandes, A.J.S.; Costa, F.M.; Baptista, A.P.M.; Pereira, E. (2004) 'A new interlayer approach for CVD diamond coating on steel substrates'. *Diamond and Related Materials*, 13, pp. 828-833. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2003.10.081>
- 77 – Silva, F.J.G.; Casais, R.C.B.; Martinho, R.P.; Baptista, A.P.M. (2012) 'Mechanical and Tribological Characterization of TiB₂ Thin Films'. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 12, pp. 9187-9194. <https://doi.org/10.1166/jnn.2012.6759>
- 78 – Andrade, M.C.; Martinho, R.P.; Silva, F.J.G.; Alexandre, R.J.D.; Baptista, A.P.M. (2009) 'Influence of the abrasive particles size in the micro-abrasion wear tests of TiAlSiN thin coatings'. *Wear*, 267, pp. 12-18.

- 79 – Martinho, R.P.; Andrade, M.C.; Silva, F.J.G.; Alexandre, R.J.D.; Baptista, A.P.M. (2009) 'Micro-abrasion wear behaviour of TiAlCrSiN nanostructured coatings'. *Wear*, pp.1160-1165. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.12.063>
- 80 – Silva, F.J.G.; Martinho, R.P.; Alexandre, R.J.D.; Baptista, A.P.M. (2012) 'Wear Resistance of TiAlSiN Thin Coatings'. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 12, pp. 9094-9101. <https://doi.org/10.1166/jnn.2012.6760>
- 81 – Andrade, M.F.C.; Martinho, R.P.; Silva, F.J.G.; Alexandre, R.J.D.; Baptista, A.P.M. (2009) 'Influence of the abrasive particles size in the micro-abrasion wear tests of TiAlSiN thin coatings'. *Wear*, 267(1-4), pp. 12-18. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.12.114>
- 82 – Cheng, K. (2008) 'Machining dynamics: fundamentals, applications and practices'. Springer-Verlag, Londres – R.U. ISBN: 9781846283680
- 83 – Baptista, A.; Silva, F.J.G.; Porteiro, J.; Míguez, J.L.; Pinto, G.; Fernandes, L. (2018) 'On the Physical Vapour Deposition (PVD): Evolution of Magnetron Sputtering Processes for Industrial Applications'. *Procedia Manufacturing*, 17, pp. 746–757. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.10.125>
- 84 – Caliskan, H.; Panjan, P.; Kurbanoglu, C. (2017) 'Hard Coatings on Cutting Tools and Surface Finish'. *Comprehensive Materials Finishing*, 3, pp. 230-242. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.09178-5>
- 85 – Baptista, A.; Silva, F.; Porteiro, J.; Míguez, J.; Pinto, G. (2018) 'Sputtering Physical Vapour Deposition (PVD) Coatings: A Critical Review on Process Improvement and Market Trend Demands'. *Coatings*, 8, 402. <https://doi.org/10.3390/coatings8110402>
- 86 – Alami, J.; Bolz, S.; Sarakinos, K. (2009) 'High power pulsed magnetron sputtering: Fundamentals and applications'. *Journal of Alloys and Compounds*, 483(1-2), pp. 530-534. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.08.104>
- 87 – Ma, Q.; Li, L.; Xu, Y.; Gu, J.; Wang, L.; Xu, Y. (2017) 'Effect of bias voltage on TiAlSiN nanocomposite coatings deposited by HiPIMS'. *Applied Surface Science*, 392, pp. 826-833. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.09.028>
- 88 – Zhao, B.; Zhao, X.; Lin, L.; Zou, L. (2020) 'Effect of bias voltage on mechanical properties, milling performance and thermal crack propagation of cathodic arc ion-plated TiAlN coatings'. *Thin Solid Films*, 708, 1381116. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2020.138116>
- 89 – Zauner, L.; Ertelthaler, P.; Wojcik, T.; Bolvardi, H.; Kolozsvári, S.; Mayrhofer, P.H.; Riedl, H. (2020) 'Reactive HiPIMS deposition of Ti-Al-N: Influence of the deposition parameters on the cubic to hexagonal phase transition'. *Surface and Coatings Technology*, 382, 125007. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125007>
- 90 – Tillmann, W.; Grisales, D.; Stangier, D.; Thomann, C.-A.; Debus, J.; Nienhaus, A.; Apel, D. (2020) 'Residual stresses and tribomechanical behaviour of TiAlN and TiAlCN

monolayer and multilayer coatings by DCMS and HiPIMS'. *Surface and Coatings Technology*, 406, 126664. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126664>

91 – Klocke, F.; Krieg, T. (2019) 'Coated Tools for Metal Cutting—Features and Applications'. *CIRP Annals*, 48, pp. 515–525. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63231-4](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63231-4)

92 – Shuai, J.; Zuo, X.; Wang, Z.; Guo, P.; Xu, B.; Zhou, J.; Wang, A.; Ke, P. (2020) 'Comparative study on crack resistance of TiAlN monolithic and Ti/TiAlN multilayer coatings'. *Ceramics International*, 46, pp. 6672–6681. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.11.155>

93 – Man, B.Y.; Guzman, L.; Miotello, A.; Adami, M. (2004) 'Microstructure, oxidation and H₂- permeation resistance of TiAlN films deposited by DC magnetron sputtering technique'. *Surface and Coatings Technology*, 180–181, pp. 9–14. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.10.021>

94 – Hsieh, J.H.; Liang, C.; Yu, C.H.; Wu, W. (1998) 'Deposition and characterization of TiAlN and multi-layered TiN/TiAlN coatings using unbalanced magnetron sputtering'. *Surface and Coatings Technology*, 108–109, pp. 132–137.

95 – Kale, A.N.; Ravindranath, K.; Kothari, D.C.; Raole, P.M. (2001) 'Tribological properties of (Ti, Al)N coatings deposited at different bias voltages using the cathodic arc technique'. *Surface and Coatings Technology*, 145, pp. 60–70.

96 – Mitsuo, A.; Uchida, S.; Nihira, N.; Iwaki, M. (1998) 'Improvement of high-temperature oxidation resistance of titanium nitride and titanium carbide films by aluminum ion implantation'. *Surface and Coatings Technology*, 103-104, pp. 98–103. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(98\)00380-6](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(98)00380-6)

97 – Sousa, V.F.C.; Silva, F.J.G.; Pinto, G.F.; Baptista, A., Alexandre, R. (2021) 'Characteristics and Wear Mechanisms of TiAlN-Based Coatings for Machining Applications: A Comprehensive Review'. *Metals*, 11, 260. <https://doi.org/10.3390/met11020260>

98 – Du, H.; Zhao, H.; Xiong, J.; Xian, G. (2013) 'Effect of interlayers on the structure and properties of TiAlN based coatings on WC-Co cemented carbide substrate'. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 37, pp. 60–66. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2012.10.017>

99 – Yi, J.; Chen, S.; Chen, K.; Xu, Y.; Chen, Q.; Zhu, C.; Liu, L. (2019) 'Effects of Ni content on microstructure, mechanical properties and Inconel 718 cutting performance of AlTiN-Ni nanocomposite coatings'. *Ceramics International*, 45, pp. 474–480. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.09.192>

100 – Yang, K.; Xian, G.; Zhao, H.; Fan, H.; Wang, J.; Wang, H.; Du, H. (2015) 'Effect of Mo content on the structure and mechanical properties of TiAlMoN films deposited on WC-Co cemented carbide substrate by magnetron sputtering'. *International Journal of*

Refractory Metals and Hard Materials, 52, pp. 29–35.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2015.04.016>

101 – Aninat, R.; Valle, N.; Chemin, J.-B.; Duday, D.; Michotte, C.; Penoy, M.; Bourgeois, L.; Choquet, P. (2019) ‘Addition of Ta and Y in a hard Ti-Al-N PVD coating: Individual and conjugated effect on the oxidation and wear properties’. *Corrosion Science*, 156, pp. 171–180. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.04.042>

102 – Zou, H.K.; Chen, L.; Chang, K.K.; Pei, F.; Du, Y. (2019) ‘Enhanced hardness and age-hardening of TiAlN coatings through Ru-addition’. *Scripta Materialia*, 162, pp. 382–386. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2018.11.051>

103 – Bandapalli, C.; Sutaria, B.M.; Prasad Bhatt, D.V.; Singh, K.K. (2018) ‘Tool Wear Analysis of Micro End Mills - Uncoated and PVD Coated TiAlN AlTiN in High Speed Micro Milling of Titanium Alloy - Ti-0.3Mo-0.8Ni’. *Procedia CIRP*, 77, pp. 626–629. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.191>

104 – An, Q.; Chen, J.; Tao, Z.; Ming, W.; Chen, M. (2019) ‘Experimental investigation on tool wear characteristics of PVD and CVD coatings during face milling of Ti 6242S and Ti-555 titanium alloys’. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 86, 105091. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2019.105091>

105 – Sousa, V. F. C. ; Silva, F. J. G.; Alexandre, R.; Fecheira, J. S.; Silva, F. P. N. (2021) ‘Study of the wear behaviour of TiAlSiN and TiAlN PVD coated tools on milling operations of pre-hardened tool steel’. *Wear*, 476, 203695. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203695>

106 – Sousa, V.F.C.; Castanheira, J.; Silva, F.J.G.; Fecheira, J.S.; Pinto, G.; Baptista, A. (2021) ‘Wear Behavior of Uncoated and Coated Tools in Milling Operations of AMPCO (Cu-Be) Alloy’. *Applied Sciences*, 11, 7762. <https://doi.org/10.3390/app11167762>

107 – Cheng, X.; Wang, Y.; Li, X.; Dong, C. (2018) ‘Interaction between austenite-ferrite phases on passive performance of 2205 duplex stainless steel’. *Journal of Materials Science & Technology*, 34(11), pp. 2140–2148. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.02.020>

108 – Vinoth Jebaraj, A.; Ajaykumar, L.; Deepak, C. R.; Aditya, K. V. V. (2017) ‘Weldability, machinability and surfacing of commercial duplex stainless steel AISI2205 for marine applications – A recent review’. *Journal of Advanced Research*, 8(3), pp. 183–199. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2017.01.002>

109 – Nomani, J.; Pramanik, A.; Hilditch, T.; Littlefair, G. (2015) ‘Chip formation mechanism and machinability of wrought duplex stainless steel alloys’. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 80(5-8), pp. 1127–1135. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7113-3>

110 – Chail, G.; Kangas, P. (2016) ‘Super and hyper duplex stainless steels: structures, properties, and applications’. *Procedia Structural Integrity*, 2, pp. 1755–1762. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.221>

- 111 – Martinho, R.P., Silva, F.J.G., Martins, C.; Lopes, H. (2019) ‘Comparative study of PVD and CVD cutting tools performance in milling of duplex stainless steel’. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102, pp. 2423–2439. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03351-8>
- 112 – Airao, J.; Chaudhary, B.; Bajpai, V.; Khanna, N. (2018) ‘An Experimental Study of Surface Roughness Variation in End Milling of Super Duplex 2507 Stainless Steel’. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), pp. 3682–3689. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.619>
- 113 – Gouveia, R.M.; Silva, F.J.G.; Reis, P.; Baptista, A.P.M. (2016) ‘Machining Duplex Stainless Steel: Comparative Study Regarding End Mill Coated Tools’. *Coatings*, 6, 51. <https://doi.org/10.3390/coatings6040051>
- 114 – Seid Ahmed, Y.; Paiva, J.M.; Covelli, D.; Veldhuis, S.C. (2017) ‘Investigation of Coated Cutting Tool Performance during Machining of Super Duplex Stainless Steels through 3D Wear Evaluations’. *Coatings*, 7, 127. <https://doi.org/10.3390/coatings7080127>
- 115 – Silva, F.J.G.; Martinho, R.P.; Martins, C.; Lopes, H.; Gouveia, R.M. (2019) ‘Machining GX2CrNiMoN26-7-4 DSS Alloy: Wear Analysis of TiAlN and TiCN/Al₂O₃/TiN Coated Carbide Tools Behavior in Rough End Milling Operations’. *Coatings*, 9, 392. <https://doi.org/10.3390/coatings9060392>
- 116 – Policena, M.R.; Devitte, C.; Fronza, G.; Garcia, R.F.; Souza, A.J. (2018) ‘Surface roughness analysis in finishing end-milling of duplex stainless steel UNS S32205’. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 98, pp. 1617–1625. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2356-4>
- 117 – ISO 8688-2:1986 – Tool-life testing in milling – Part 2: End milling.
- 118 – Zhang, J. Z.; Chen, J. C.; Kirby, E. D. (2007) ‘Surface roughness optimization in an end-milling operation using the Taguchi design method’. *Journal of Materials Processing Technology*, 184(1-3), pp. 233–239. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.029>
- 119 – Dos Santos, A. G.; da Silva, M. B.; Jackson, M. J. (2018) ‘Tungsten carbide micro-tool wear when micro milling UNS S32205 duplex stainless steel’. *Wear*, 414-415, pp. 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.08.007>
- 120 – Diniz, A.E.; Machado, A.R.; Corrêa, J.G. (2016) ‘Tool wear mechanisms in the machining of steels and stainless steels’. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87, pp. 3157–3168. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8704-3>
- 121 - Sousa, V.F.C.; Silva, F.J.G.; Lopes, H.; Casais, R.C.B.; Baptista, A.; Pinto, G.; Alexandre, R. (2021) ‘Wear Behavior and Machining Performance of TiAlSiN-Coated Tools Obtained by dc MS and HiPIMS: A Comparative Study’. *Materials*, 14, 5122. <https://doi.org/10.3390/ma14185122>

122 – Sousa, V.F.C.; Silva, F.J.G.; Alexandre, R.; Fecheira, J.S.; Pinto, G.; Baptista, A. (2021) 'Experimental study on the wear evolution of different PVD coated tools under milling operations of LDX2101 duplex stainless steel'. *Advances in Manufacturing, Under revision (Minor revisions)*.

ANEXOS

6.1 ANEXO 1 - Datasheet do material a maquinar - LDX2101

6.2 ANEXO 2 - Datasheet do dinamómetro KISTLER 9171A

6 ANEXOS

6.1 ANEXO1 – *Datasheet* do material a maquinar – LDX2101



General characteristics

Forta is associated with strength. This range covers the strongest stainless steels in our portfolio. It also brings together three product groups:

- **Forta Duplex** products for high strength, high to very high corrosion resistance, and enhanced resistance to stress corrosion cracking
- **Forta H-Series** fully austenitic products for high strength and high ductility
- **Forta Temper rolled** products for high strength and high hardness

The charts and diagrams in this datasheet are focused on the Forta Duplex grades and show how this strength fits in with other stainless steel grades. Examples of where the products are typically used are given throughout the datasheet. The Forta range contains duplex and other high strength stainless steels, with a yield strength of typically minimum 400 MPa, that enable thinner structures and weight reduction. Table 1 shows the entire range with the three parts.

Grades

Table 1

Steel designations		Performance				Typical chemical composition, % by mass							
Outokumpu name	EN	ASTM		PRE	A ¹¹ %	R _{p0.2} MPa	Grade family	C	Cr	Ni	Mo	N	Others
		Type	UNS										
Duplex, high strength, high corrosion resistance and enhanced resistance to stress corrosion cracking													
Forta DX 2205	1.4462	-	S32205 ¹¹	35	20	500	D	0.02	22.4	5.7	3.1	0.17	-
Forta LDX 2101	1.4162	-	S32101	26	20	530	D	0.03	21.5	1.5	0.3	0.22	5Mn Cu
Forta DX 2304	1.4362	-	S32304	26	20	450	D	0.02	23	4.8	0.3	0.1	Cu
Forta EDX 2304	1.4362	-	S32304	28	25 ¹¹	500 ¹¹	D	0.02	23.8	4.3	0.5	0.18	Cu
Forta LDX 2404	1.4662	-	S82441	34	20	550	D	0.02	24	3.6	1.6	0.27	3Mn Cu
Forta SDX 100	1.4501	-	S32760	42	25 ¹¹	530 ¹¹	D	0.02	25.4	6.9	3.8	0.27	W Cu
Forta SDX 2507	1.4410	-	S32750	43	20	550	D	0.02	25	7	4	0.27	-
For comparison													
Core 304L/4307	1.4307	304L	S30403	18	45	220	A	0.02	18.1	8.1	-	-	-
Supra 316L/4404	1.4404	316L	S31603	24	40	240	A	0.02	17.2	10.1	2.1	-	-
Ultra 904L	1.4539	904L	N08904	34	35	240	A	0.01	19.8	24.2	4.3	-	1.4Cu
Ultra 254 SM0	1.4547	-	S31254	43	35	320	A	0.01	20	18	6.1	0.2	Cu

Grade family: D = duplex, A = austenitic, F = ferritic. ¹¹ Min. values acc. to ASTM A240, for strip t = 5 mm. Elongation reference varies between different standards, information referenced here denotes A₅ - otherwise see footnote for specific grade or inquire to reference alternative standard. ¹² Also available in S31803.
¹³ Outokumpu MDS-D35 for EDX 2304. ¹⁴ Min. values for plate acc. to EN 10088-2.

Mechanical properties

Tables 5, 7 and 8 show the mechanical properties for flat rolled products, data according to EN 10088 and EN 10028 when applicable. The allowable design values may vary between product forms. The appropriate values are given in the relevant specifications. Table 6 shows mechanical properties for flat rolled products according to ASTM A240.

Mechanical properties, metric

Table 5

Outokumpu name	EN	ASTM UNS	Product form	Yield strength $R_{p0.2}$ [MPa]	Tensile strength R_m [MPa]	Elongation A [%]	Elongation A_{50} [%]
Forta DX 2205	1.4462	S32205	Cold rolled coil (C)	500	700-950	20	20
			Hot rolled coil (H)	460	700-950	25	25
			Quarto plate (P)	460	640-840	25	25
			Wire rod ¹⁾	510	750	35	–
			Bar	450	650-880	25	–
Forta LDX 2101	1.4162	S32101	Cold rolled coil (C)	530	700-900	30	20
			Hot rolled coil (H)	480	680-900	30	30
			Quarto plate (P)	450	650-850	30	30
			Wire rod ¹⁾	480	700	38	–
			Bar	400	650-900	25	–
Forta DX 2304	1.4362	S32304	Cold rolled coil (C)	450	650-850	20	20
			Hot rolled coil (H)	400	650-850	20	20
			Quarto plate (P)	400	630-800	25	25
			Wire rod ¹⁾	500	700	35	–
			Bar	400	600-830	25	–
Forta EDX 2304	1.4362	S32304	Cold rolled coil (C) ²⁾	500	690	25	–
			Hot rolled coil (H) ²⁾	500	690	25	–
Forta LDX 2404	1.4662	S82441	Cold rolled coil (C)	550	750-900	25	20
			Hot rolled coil (H)	550	750-900	25	–
			Quarto plate (P)	480	680-900	25	–
			Bar	450	650-900	25	–
			Forta SDX 100	1.4501	S32760	Cold rolled coil (C)	550
			Hot rolled coil (H)	530	750-1000	25	25
			Quarto plate (P)	530	730-930	25	25
Forta SDX 2507	1.4410	S32750	Cold rolled coil (C)	550	750-1000	20	20
			Hot rolled coil (H)	530	750-1000	20	20
			Quarto plate (P)	530	730-930	20	20
			Bar	530	730-930	25	–
			Forta FDX 27	1.4637 ³⁾	S82031	Cold rolled coil (C) ⁴⁾	500

Note: Values according to EN 10088-2 / EN 10088-3 minimum values unless marked otherwise.

¹⁾ Outokumpu typical values.

²⁾ Values according to Outokumpu MDS-D35.

³⁾ Designation included in Stahl-Eisen-Liste.

⁴⁾ Values according to ASTM A240.

⁵⁾ A_{50} initial length = 50 mm.

A_{50} initial length = 80 mm, A initial length = $5.65\sqrt{S_0}$ (A_0)

More product forms may be available than shown in table.

For more information, please see steelfinder.outokumpu.com

Mechanical properties, imperial

Table 6

Outokumpu name	EN	ASTM UNS	Product form	Yield strength $R_{m,2}$ (ksi)	Tensile strength R_m (ksi)	Elongation A_{50} (%)
Forta DX 2205	1.4462	S32205	Cold rolled coil (C)	65	95	25
			Hot rolled coil (H)	65	95	25
			Quarto plate (P)	65	95	25
			Wire rod ²⁾	74	109	-
Forta LDX 2101	1.4162	S32101	Cold rolled coil (C)	77	101	30
			Hot rolled coil (H)	65	94	30
			Quarto plate (P)	65	94	30
			Wire rod ²⁾	70	102	-
Forta DX 2304	1.4362	S32304	Cold rolled coil (C)	58	87	25
			Hot rolled coil (H)	58	87	25
			Quarto plate (P)	58	87	25
			Wire rod ²⁾	73	102	-
Forta EDX 2304	1.4362	S32304	Cold rolled coil (C) ²⁾	73	100	25 ²⁾
			Hot rolled coil (H) ²⁾	73	100	25 ²⁾
Forta LDX 2404	1.4662	S82441	Cold rolled coil (C)	78	107	25
			Hot rolled coil (H)	78	107	25
			Quarto plate (P)	70	99	25
Forta SDX 100	1.4501	S32760	Cold rolled coil (C)	80	108	25
			Hot rolled coil (H)	80	108	25
			Quarto plate (P)	80	108	25
Forta SDX 2507	1.4410	S32750	Cold rolled coil (C)	80	116	15
			Hot rolled coil (H)	80	116	15
			Quarto plate (P)	80	116	15
Forta FDX 27	1.4637 ⁴⁾	S82031	Cold rolled coil (C)	73	102	35

Note: Values according to ASTM A240 minimum values unless marked otherwise.

¹⁾ Outokumpu typical values

²⁾ Values according to Outokumpu MDS-035

³⁾ A_{50}

⁴⁾ Designation included in Stahl-Eisen-Liste.

Product forms: cold rolled coil and sheet (C), hot rolled coil and sheet (H), quarto plate (P), wire rod (R). More product forms may be available than are shown in the table.

For more information, please see steelfinder.outokumpu.com

A_{50} initial length = 50 mm

Impact toughness. Minimum values according to EN 10028, transverse direction, plate / cold rolled and hot rolled coil, [J]

Table 7

	Forta LDX 2101	Forta DX 2304 ¹⁾	Forta LDX 2404	Forta DX 2205	Forta SDX 100	Forta SDX 2507
20°C	40 / 80	90 / 90	60 / 80	100 / 100	90 / 90	90 / 90
-40°C	27 / 50	40 / 40	40 / 40	40 / 40	40 / 40	40 / 40

¹⁾ Also valid for Forta EDX 2304 since they have the same EN number.



Fig 9. Fatigue strength, 50% probability of failure at 2 million cycles, tested with $R = 0.1$, $F = 20$ Hz.

Fatigue

The high tensile strength of duplex steels also implies high fatigue strength. Forta range Duplex grades have fatigue strength in the same order as the 0.2% yield strength. The fatigue strength for 2 million cycles tested with $R = \sigma_{min}/\sigma_{max} = 0.1$ in air at room temperature at 20 Hz are shown in Figure 9.

Mechanical properties at 20 °C/68 °F, typical values, metric/imperial

Table 8

Outokumpu name	EN	ASTM UNS	Product form	Yield strength R _{0.2} (MPa/ksi)	Yield strength R _{0.01} (MPa/ksi)	Tensile strength R _m (MPa/ksi)	Elongation A (%)	Hardness
Forta DX 2205	1.4462	S32205	Cold rolled coil (C)	690/100	740/107	880/127	26 ^{a)}	101 HRBW
			Hot rolled coil (H)	630/91	725/105	840/121	30	250 HBW
			Quarto plate (P)	510/74	–	750/109	35	230 HBW
Forta LDX 2101	1.4162	S32101	Cold rolled coil (C)	610/88	660/95	810/117	29 ^{a)}	99 HRBW
			Hot rolled coil (H)	560/81	630/91	755/109	35	235 HBW
			Quarto plate (P)	500/72	–	700/101	38	225 HBW
Forta DX 2304	1.4362	S32304	Cold rolled coil (C)	620/90	660/95	790/114	26 ^{a)}	99 HRBW
			Hot rolled coil (H)	600/87	670/97	765/111	30	235 HBW
			Quarto plate (P)	450/65	–	670/97	40	210 HBW
Forta EDX 2304	1.4362	S32304	Cold rolled coil (C)	600/87	–	770/111	30 ^{a)}	–
			Hot rolled coil (H)	600/87	–	750/109	30	–
Forta LDX 2404	1.4662	S82441	Cold rolled coil (C)	640/93	–	850/123	24 ^{a)}	–
			Hot rolled coil (H)	645/93	720/104	825/119	30	250 HBW
			Quarto plate (P)	520/75	–	750/109	33	230 HB
Forta SDX 100			Quarto plate (P)	580/84	–	830/120	35	260 HBW
Forta SDX 2507	1.4410	S32750	Cold rolled coil (C)	730/106	790/114	970/140	24 ^{a)}	103 HRBW
			Hot rolled coil (H)	700/101	785/114	905/131	30	270 HBW
			Quarto plate (P)	580/84	–	830/120	35	250 HBW
Forta FDX 27	1.4637	S82031	Cold rolled coil (C)	650/94	647/94	850/123	36 ^{a)}	–

^{a)} A₀ initial length = 80 mm.

More product forms may be available than are shown in the table. For more information, please see stoelfinder.outokumpu.com

Mechanical properties at elevated temperatures, minimum yield strength according to EN 10028-7

Table 9

Outokumpu name	Strength	100 °C/212 °F	150 °C/302 °F	200 °C/392 °F	250 °C/482 °F
Forta DX 2205	Yield strength R _{0.2} (MPa/ksi)	360/52	335/48	315/45	300/43
	Tensile strength R _m (MPa/ksi)	590/85	570/82	550/79	540/78
Forta LDX 2101	Yield strength R _{0.2} (MPa/ksi)	380/55	350/50	330/47	320/46
	Tensile strength R _m (MPa/ksi)	590/85	560/81	540/78	540/78
Forta DX 2304 ¹⁾	Yield strength R _{0.2} (MPa/ksi)	330/47	300/43	280/40	265/38
	Tensile strength R _m (MPa/ksi)	540/78	520/75	500/72	490/71
Forta LDX 2404	Yield strength R _{0.2} (MPa/ksi)	385/55	345/50	325/47	315/45
Forta SDX 100	Yield strength R _{0.2} (MPa/ksi)	450/65	420/60	400/58	380/55
	Tensile strength R _m (MPa/ksi)	680/98	660/95	640/92	630/91
Forta SDX 2507	Yield strength R _{0.2} (MPa/ksi)	680/98	660/95	640/92	630/91
	Tensile strength R _m (MPa/ksi)	680/98	660/95	640/92	630/91
Forta FDX 27 ²⁾	Yield strength R _{0.2} (MPa/ksi)	400/58	360/52	340/49	330/48
	Tensile strength R _m (MPa/ksi)	600/87	570/83	560/81	550/80

¹⁾ Also valid for Forta EDX 2304 since they have the same EN number. However, typical values are higher for Forta EDX 2304 compared to Forta DX 2304. Contact Outokumpu for more details.

²⁾ Values from internal standard, AM 641.

Physical properties

In Tables 10 and 11 physical properties are given for Forta duplex grades.

Values according to EN 10088-1

Table 10

Metric									
Outokumpu name	EN	ASTM Type	UNS	Density (kg/dm ³)	Modulus of elasticity at 20 °C (GPa)	Coefficient of thermal expansion 20–100 °C (10 ⁻⁶ /K)	Thermal conductivity at 20 °C [W/(m x K)]	Thermal capacity at 20 °C [J/(kg x K)]	Electrical resistivity at 20 °C [Ω x mm ² /m]
Forta DX 2205	1.4462	-	S32205	7.8	200	13.0	15	500	0.8
Forta LDX 2101	1.4162	-	S32101	7.7	205	13.0	15	500	0.75
Forta DX 2304	1.4362	-	S32304	7.8	200	13.0	15	500	0.8
Forta EDX 2304	1.4362	-	S32304	7.8	200	13.0	15	500	0.8
Forta LDX 2404	1.4662	-	S82441	7.7	205	13.0	15	500	0.8
Forta SDX 100	1.4501	-	S32760	7.8	200	13.0	15	500	0.8
Forta SDX 2507	1.4410	-	S32750	7.8	200	13.0	15	500	0.8
Forta FDX 27	1.4637*	-	S82031	r. r.	205	12.5	14.b	500	0.8

*1 Designation included in Stahl-Eisen-Liste, own data. Note: Values according to EN 10088-1.

Values according to EN 10088-1

Table 11

Imperial						
Outokumpu name	Density (lbm/in ³)	Modulus of elasticity (psi)	Coefficient of thermal expansion 68–212 °F (µin / (in x °F))	Thermal conductivity [Btu/(hr x ft x °F)]	Thermal capacity [Btu/(lbm x °F)]	Electrical resistivity [µΩ x in]
Forta DX 2205	0.282	29 x 10 ⁴	7.2	8.7	0.119	31.50
Forta LDX 2101	0.278	30 x 10 ⁴	7.2	8.7	0.119	29.53
Forta DX 2304	0.282	29 x 10 ⁴	7.2	8.7	0.119	31.50
Forta EDX 2304	0.282	29 x 10 ⁴	7.2	8.7	0.119	31.50
Forta LDX 2404	0.278	30 x 10 ⁴	7.2	8.7	0.119	31.50
Forta SDX 100	0.282	29 x 10 ⁴	7.2	8.7	0.119	31.50
Forta SDX 2507	0.282	29 x 10 ⁴	7.2	8.7	0.119	31.50
Forta FDX 27	0.278	30 x 10 ⁴	6.9	8.3	0.119	31.50

Typical values *)

Table 12

		20 °C	100 °C	200 °C	300 °C
Density	g/cm ³	7.8	-	-	-
Modulus of elasticity	GPa	200	194	186	180
Poissons ratio	-	0.3	-	-	-
Linear expansion at (RT → T)°C	x 10 ⁻⁴ /°C	-	13.0	13.5	14.0
Thermal conductivity	W/m °C	15	16	17	18
Thermal capacity	J/kg °C	500	530	560	590
Electric resistivity	µΩm	0.80	0.85	0.90	1.00

*) Values may differ slightly between the different duplex grades. RT=Room temperature.

6.2 ANEXO2 – *Datasheet* do dinamómetro KISTLER 9171A

Force

KISTLER

measure. analyze. innovate.

4-component Dynamometer (RCD)

Type 9171A...

Rotating – for Measuring Cutting Forces in Heavy Machining

The rotating 4-component dynamometer (RCD) Type 9171A... permits the measurement of the forces and the on a rotating tool. It is mounted in the machine spindle instead of a common tool holder. Energy and measured values are transmitted on a non-contact basis, preventing wear.

- Cutting force measurement on the rotating tool
- 4-component measurement: F_x , F_y , F_z as well as M_z
- up to max. 12 000 min^{-1}
- Forces measurable up to 30 kN
- Non-contact data transmission
- Internal cutting fluid supply possible
- Available for conventional machine spindle interfaces
- Several tool adapters available
- High run-out accuracy and balancing quality
- Complete measuring system



Description

The complete measuring system comprises a rotor, stator, connecting cable and signal conditioner. The spindle type on the machine tool determines which rotor version is required. The spindle adapter is also exchangeable. The same applies to the tool adapters. The piezoelectric 4-component sensor, four charge amplifiers and the digital transmission electronics are integrated into the rotor. It measures the radial forces F_x and F_y , axial force F_z as well as torque M_z .

Digitized measuring signals to the stator, the range selection of the charge amplifiers and the power supply are transmitted without contact. The stator is fastened to the machine tool with a gap of a few millimeters.

The signal conditioner is the interface to the following data acquisition system. It is responsible for the power supply and the control of the system. Settings of measuring ranges as well as settings at the low-pass filter are performed manually at the signal conditioner or via the serial interface. The measuring signals are available as analog ± 10 Volt signal. Either the DynoWare software from Kistler, or compatible data acquisition software, can be used to record the data.

Technical Data

Rotor Type 9171Axxx0

Speed, max.	min^{-1}	12 000
Measuring range 1, nominal	F_x, F_y	N
	F_z	N
	M_z	N·m
Calibration range		in acc. with page 5
Sensitivity range 1	F_x, F_y	mV/N
	F_z	mV/N
	M_z	mV/N·m
Sensitivity range 2	F_x, F_y	mV/N
	F_z	mV/N
	M_z	mV/N·m
Sensitivity range 3	F_x, F_y	mV/N
	F_z	mV/N
	M_z	mV/N·m
Linearity	%FSD	$\leq \pm 1,0$
Hysteresis	%FSD	$\leq 1,0$

Page 1/7

The information corresponds to the current state of knowledge. Kistler reserves the right to make technical changes without advance notice. Liability for the consequential damages arising from the application of Kistler products is excluded.

©2015, Kistler Group, Eulachstrasse 22, 8408 Winterthur, Switzerland
Tel. +41 52 224 11 11, Fax +41 52 224 14 14, info@kistler.com, www.kistler.com
Kistler is a registered trademark of Kistler Holding AG.

9171A_003-155d-02_15

4-component Dynamometer (RCD) - Rotating - for Measuring Large Cutting Forces in Heavy Machining, Type 9171A...

KISTLER
measure. analyze. innovate.

Technical Data (continued)

Crosstalk	$F_x \leftrightarrow F_y$	%FSO	$\leq \pm 2,0$
	$F_{x,y} \rightarrow F_z$	%FSO	$\leq \pm 3,0$
	$F_z \rightarrow F_{x,y}$	%FSO	$\leq \pm 1,0$
	$F_z \rightarrow M_z$	mN·m/N	$\leq \pm 1$
Natural frequency ¹⁾	$f_{0, F_{x,y}}$	Hz	$\approx 1\ 100$
	f_{0, F_z}	Hz	$\approx 7\ 600$
Natural frequency ²⁾	$f_{0, F_{x,y}}$	Hz	≈ 900
	f_{0, F_z}	Hz	$\approx 5\ 800$
Low-pass (anti-aliasing)		kHz	3,0
Low-pass filter type			6 pole, Butterworth
Sampling rate per channel		kHz	22,2
Resolution		bit	12
Operating temperature range		°C	0 ... 60
Degree of protection (IEC 60529)			IP67
Internal cutting fluid pressure, max.		bar	70
Balancing class		G	$\leq 2,5$
Weight (rotor only, without spindle adapter, without tool adapter)		kg	$\approx 3,3$
Weight Type 9171A151x (with attached spindle adapter HSK-A100 and tool adapter ER32) measured without tool and clamping nut		kg	$\approx 7,2$

¹⁾ Applies to Type 9171A150x (RCD with spindle adapter HSK-A100, without tool adapter)

²⁾ Applies to Type 9171A151x (RCD with spindle adapter HSK-A100 and tool adapter ER32) measured with collet, clamping nut, tool $m_{tool} = 126\text{ g}$

Signal Conditioner Type 5238B...

Number of channels			4
Number of ranges per channel			3
Low-pass (adjustable)			
Cut-off frequency 1		kHz	0,1
Cut-off frequency 2		kHz	0,3
Cut-off frequency 3		kHz	1,0
Low-pass filter type			6 pole, Butterworth
Signal output FSO		V	± 10
Connector signal output			4xBNC neg. D-Sub neg. 15 pin
Interface (for remote control)			RS-232C
Power supply	VAC	V	100 ... 240
Tolerance		%	± 10
Mains frequency		Hz	50 ... 60
Operating temperature range		°C	0 ... 60
Degree of protection (IEC 60529)			IP30
Dimensions WxHxD		mm	248x253x146
Weight (signal conditioner only)		kg	3,4

The information corresponds to the current state of knowledge. Kistler reserves the right to make technical changes without advance notice. Liability for the consequential damages arising from the application of Kistler products is excluded.

Application

A rotating dynamometer is used to measure the three orthogonal forces F_x , F_y and F_z as well as torque M_z during cutting production processes, especially during milling and drilling. A rotating dynamometer enables:

- Recording of the mechanical load during the cutting process
- Analysis of the wear process
- Optimization of cutting parameters
- Calculation of material-specific constants (e.g. the specific cutting force)
- Optimization of tool geometry and coating
- Verification of cutting simulations

The forces and the torque are measured close to the cutting edge of the tool. This allows the active force vector on single flute tools to be measured directly. Due to the newly developed piezoelectric sensor located in the rotor, it is possible to record highly dynamic signals.

Advantages of a Rotating Dynamometer

Employing a rotating dynamometer as a measuring tool offers a number of advantages to the user:

- The torque to be applied during the machining process is measured directly. This permits an accurate assessment of the condition of the tool, such as its state of wear
- The rotor of a rotating dynamometer rotates with the tool and allows the direct quantification of the mechanical load of the tool
- Thanks to the independence of workpiece mass, size and shape, the cutting force and torque of the cutting process can be measured on complex and cost-intensive components, e.g. structural parts of aircraft or Blisks (Blade Integrated Disc)

9171A_003-155d-02_15

Page 2/7

©2015, Kistler Group, Eulachstrasse 22, 8408 Winterthur, Switzerland
Tel. +41 52 224 11 11, Fax +41 52 224 14 14, info@kistler.com, www.kistler.com
Kistler is a registered trademark of Kistler Holding AG.

4-component Dynamometer (RCD) - Rotating – for Measuring Large Cutting Forces in Heavy Machining, Type 9171A...

KISTLER

measure. analyze. innovate.

Modularity

The spindle adapter as well as the tool adapter for Type 9171A... are removable to provide the highest possible flexibility to the user. For example, by simply exchanging the spindle adapter it is possible to use the dynamometer on several machine tools with different spindle interfaces. The detailed description of the process can be found in the instruction manual.

Signals of a Rotating Dynamometer (RCD)

The Type 9171A... rotating dynamometer is based on a piezo-electric 4-component sensor and it represents the core element of the rotor design. Through the spindle interface, the rotor is installed directly by the machine spindle and therefore follows the rotation. This means that the coordinate system of the RCD also rotates around the vertical Z-axis. Due to the rotating coordinate system of the RCD, it is possible to directly assess the mechanical loads of the tool cutting edge.

Mounting the RCD Type 9171A...

Like a conventional tool, the rotor of a rotating dynamometer is pulled into the machine spindle through the spindle adapter. The user is responsible for mounting the stator onto the machine structure or the stationary part of the machine spindle. There is a detailed description of this procedure in the instruction manual.

Handling the RCD Type 9171A... During Operation

To prevent a collision between the stator and the stator holder, we recommend inserting the RCD Type 9171A... into the machine spindle manually.

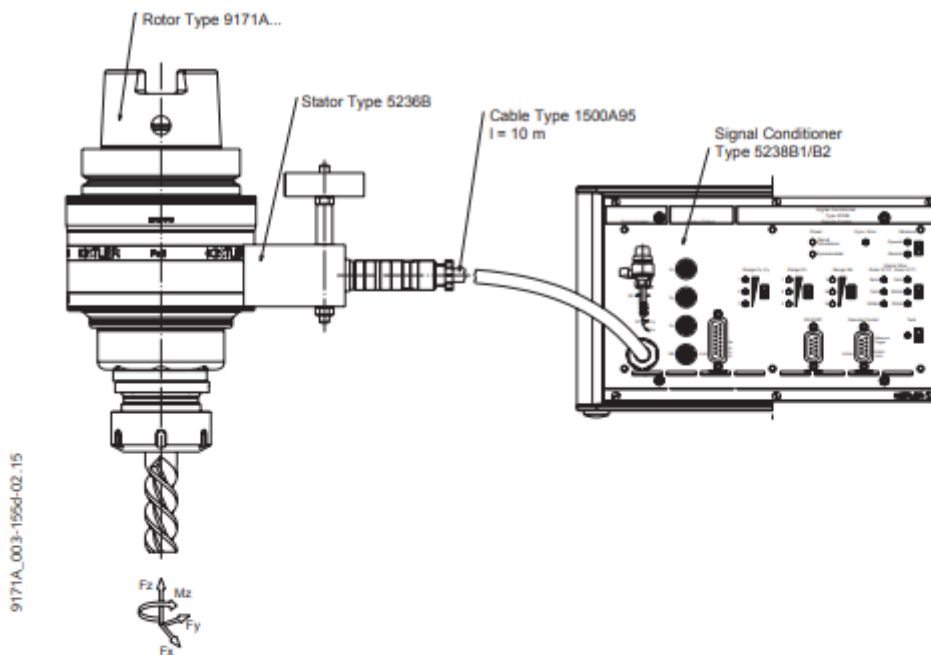


Fig. 1: Scheme of the measuring chain

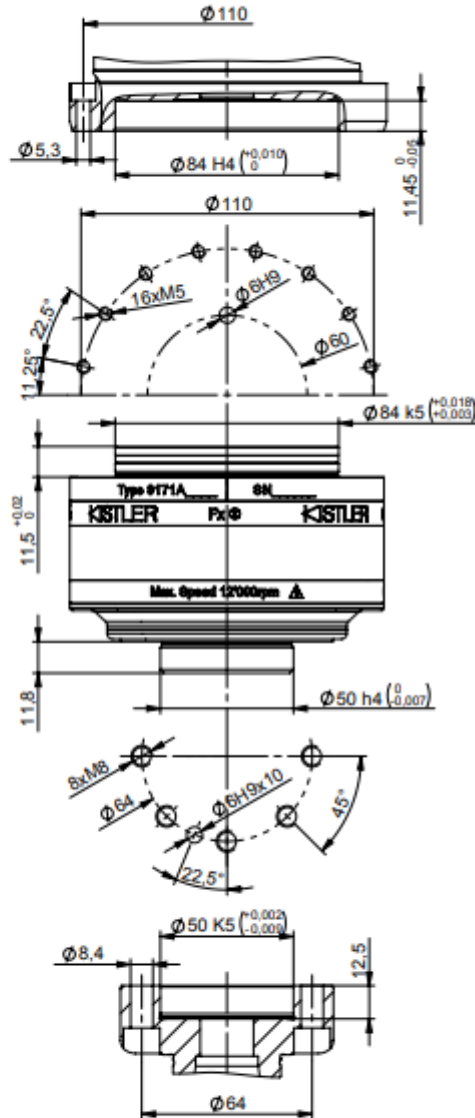
Page 3/7

The information corresponds to the current state of knowledge. Kistler reserves the right to make technical changes without advance notice. Liability for the consequential damages arising from the application of Kistler products is excluded.

©2015, Kistler Group, Eulachstrasse 22, 8408 Winterthur, Switzerland
Tel. +41 52 224 11 11, Fax +41 52 224 14 14, info@kistler.com, www.kistler.com
Kistler is a registered trademark of Kistler Holding AG.

4-component Dynamometer (RCD) - Rotating - for Measuring Large Cutting Forces in Heavy Machining, Type 9171A...

KISTLER
measure. analyze. innovate.



9171A_003-155d-02.15

Fig. 2: Dimensions of interfaces

Page 4/7

The information corresponds to the current state of knowledge. Kistler reserves the right to make technical changes without advance notice. Liability for the consequential damages arising from the application of Kistler products is excluded.

©2015, Kistler Group, Eulachstrasse 22, 8408 Winterthur, Switzerland
Tel. +41 52 224 11 11, Fax +41 52 224 14 14, info@kistler.com, www.kistler.com
Kistler is a registered trademark of Kistler Holding AG.

4-component Dynamometer (RCD) - Rotating – for Measuring Large Cutting Forces in Heavy Machining, Type 9171A...

KISTLER
measure. analyze. innovate.

Calibration Ranges of the Different RCD Types

Type	Spindle Adapter			Calibration range 1	Calibration range 2	Calibration range 3
9171A100x	-	F_x, F_y	N	18 000	7 500	1 900
		F_z	N	28 000	7 500	1 900
		M_x	N-m	1 000	380	95
9171A130x	HSK-A63	F_x, F_y	N	3 000	1 500	300
		F_z	N	28 000	7 000	1 500
		M_x	N-m	1 000	380	95
9171A140x	HSK-A80	F_x, F_y	N	5 000	2 500	500
		F_z	N	28 000	7 000	1 500
		M_x	N-m	1 000	380	95
9171A150x	HSK-A100	F_x, F_y	N	7 500	4 000	1 000
		F_z	N	28 000	7 000	1 500
		M_x	N-m	1 000	380	95
9171A220x	DIN 69871-AD40	F_x, F_y	N	3 000	1 500	300
		F_z	N	28 000	7 000	1 500
		M_x	N-m	1 000	380	95
9171A230x	DIN 69871-AD50	F_x, F_y	N	7 000	3 500	500
		F_z	N	28 000	7 000	1 500
		M_x	N-m	1 000	380	95
9171A250x	MA5 403 BT 40	F_x, F_y	N	3 000	1 500	300
		F_z	N	28 000	7 000	1 500
		M_x	N-m	1 000	380	95
9171A260x	MA5 403 BT 50	F_x, F_y	N	7 000	3 500	500
		F_z	N	28 000	7 000	1 500
		M_x	N-m	1 000	380	95
9171A280x	ANSI B5.50-40	F_x, F_y	N	3 000	1 500	300
		F_z	N	28 000	7 000	1 500
		M_x	N-m	1 000	380	95
9171A290x	ANSI B5.50-50	F_x, F_y	N	7 000	3 500	500
		F_z	N	28 000	7 000	1 500
		M_x	N-m	1 000	380	95
9171A320x	Capto C6	F_x, F_y	N	3 000	1 500	300
		F_z	N	28 000	7 000	1 500
		M_x	N-m	1 000	380	95
9171A330x	Capto C8	F_x, F_y	N	5 000	2 500	500
		F_z	N	28 000	7 000	1 500
		M_x	N-m	1 000	380	95

9171A_003-156d-02_15

Page 5/7

The information corresponds to the current state of knowledge. Kistler reserves the right to make technical changes without advance notice. Liability for the consequential damages arising from the application of Kistler products is excluded.

©2015, Kistler Group, Eulachstrasse 22, 8408 Winterthur, Switzerland
Tel. +41 52 224 11 11, Fax +41 52 224 14 14, info@kistler.com, www.kistler.com
Kistler is a registered trademark of Kistler Holding AG.

4-component Dynamometer (RCD) - Rotating – for Measuring Large Cutting Forces in Heavy Machining, Type 9171A...

KISTLER

measure. analyze. innovate.

Components of a Measuring Chain

- Rotor
- Stator
- Connecting cable (l = 10 m)
- Signal conditioner for rack installation
- Signal conditioner for desktop case

Type

9171Axxx0
5236B
1500A95
5238B1
5238B2

Ordering Example: 9171A3232

Tested RCD Type 9171A... measuring system consisting of:

- Rotor Type 9171A100
- Mounted spindle adapter Capto C6 (removable)
- Mounted powRgrip® collet chuck secuRgrip® PG32-SG (removable)
- Stator Type 5236B
- Connection cable Type 1500A95
- Signal conditioner Type 5238B2

Ordering Key

Rotating 4-component
Cutting force dynamometer RCD

Type 9171A

Spindle Adapter (removable)

Flange adapter (w/o spindle adapter)	10
HSK-A63	13
HSK-A80	14
HSK-A100	15
DIN 69871-AD40	22
DIN 69871-AD50	23
MAS 403 BT 40	25
MAS 403 BT 50	26
ANSI B5.50-40	28
ANSI B5.50-50	29
Capto C6	32
Capto C8	33

Additional spindle adapters on request

Tool Adapter (removable)

Flange adapter (w/o tool adapter)	0
Collet chuck ER 32 (DIN 6499 – B32)	1
Collet chuck ER 40 (DIN 6499 – B40)	2
powRgrip® collet chuck secuRgrip® PG 32-SG	3

Measuring System

Rotor only	0
Complete measuring system with rotor, stator, connecting cable and signal conditioner (rack mounted unit)	1
Complete measuring system with rotor, stator, connecting cable and signal conditioner (desktop case)	2

Spindle Adapter (Available Separately)

Spindle Adapter	Art. No.
HSK-A63	55127703
HSK-A80	55127778
HSK-A100	55127779
DIN 69871-AD40	55127805
DIN 69871-AD50	55127806
MAS 403 BT 40	55127808
MAS 403 BT 50	55127809
ANSI B5.50-40	55127812
ANSI B5.50-50	55127817
Capto C6	55127820
Capto C8	55127821

Included Accessories

- Coolant tube
- O-ring seal for coolant tube
- Balancing ring
- Screws
- Clamping pins

9171A_003-1556d-02_15

Page 6/7

The information corresponds to the current state of knowledge. Kistler reserves the right to make technical changes without advance notice. Liability for the consequential damages arising from the application of Kistler products is excluded.

©2015, Kistler Group, Eulachstrasse 22, 8408 Winterthur, Switzerland
Tel. +41 52 224 11 11, Fax +41 52 224 14 14, info@kistler.com, www.kistler.com
Kistler is a registered trademark of Kistler Holding AG.

4-component Dynamometer (RCD) - Rotating - for Measuring Large Cutting Forces in Heavy Machining, Type 9171A...

KISTLER
measure. analyze. innovate.

Tool Adapter (Available Separately)

Tool Adapter	Art. No.
Collet chuck ER32 (DIN 6499-B32)	55127219
Collet chuck ER40 (DIN 6499-B40)	55127224
powRgrip® collet chuck secuRgrip® PG32-SG	55125318

Included Accessories for Tool Adapter

- Clamping nut
- Hook wrench (only ER collet chuck)
- Ratchet spanner/handle bar (only powRgrip® collet chuck secuRgrip®)
- Balancing rings
- Screws
- Clamping pins

Ordering Key

Collet DIN 6499-B32-UP

Type 9169A

Tool Diameter d

1 ... 2 mm	02
2 ... 3 mm	03
3 ... 4 mm	04
4 ... 5 mm	05
5 ... 6 mm	06
6 ... 7 mm	07
7 ... 8 mm	08
8 ... 9 mm	09
9 ... 10 mm	10
10 ... 11 mm	11
11 ... 12 mm	12
12 ... 13 mm	13
13 ... 14 mm	14
14 ... 15 mm	15
15 ... 16 mm	16
16 ... 17 mm	17
17 ... 18 mm	18
18 ... 19 mm	19
19 ... 20 mm	20

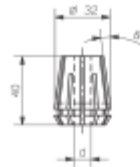


Fig. 2: Collet Type 9169A...

9171A_003-155d-02..15

powRgrip® and secuRgrip® are registered trademarks of Rego-Fix AG.

Page 7/7

The information corresponds to the current state of knowledge. Kistler reserves the right to make technical changes without advance notice. Liability for the consequential damages arising from the application of Kistler products is excluded.

©2015, Kistler Group, Eulachstrasse 22, 8408 Winterthur, Switzerland
Tel. +41 52 224 11 11, Fax +41 52 224 14 14, info@kistler.com, www.kistler.com
Kistler is a registered trademark of Kistler Holding AG.