

ANÁLISE COMPARATIVA DO COMPORTAMENTO DE UM INSERTO PROVIDO DE DIFERENTES REVESTIMENTOS NA MAQUINAGEM DE AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX

CARLOS ALBERTO RODRIGUES MARTINS
dezembro de 2017

ANÁLISE COMPARATIVA DO COMPORTAMENTO DE UM INSERTO PROVIDO DE DIFERENTES REVESTIMENTOS NA MAQUINAGEM DE AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX

Carlos Alberto Rodrigues Martins

2017

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO
DO PORTO

isep

ANÁLISE COMPARATIVA DO COMPORTAMENTO DE UM INSERTO PROVIDO DE DIFERENTES REVESTIMENTOS NA MAQUINAGEM DE AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX

Carlos Alberto Rodrigues Martins

1130062

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 Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP e Co-Orientação do Doutor Hernâni Miguel Reis Lopes, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP.

2017

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

POLITÉCNICO
DO PORTO

isep

JÚRI

Presidente

Doutor Rui Pedro Cardoso da Silva Martinho / Arnaldo Manuel Guedes Pinto
Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Orientador

Doutor Francisco José Gomes da Silva
Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Co-orientador

Doutor Hernâni Miguel Reis Lopes
Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Arguente

Professor Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva
*Professor Associado com Agregação, Departamento de Engenharia Mecânica,
Universidade Aveiro*

AGRADECIMENTOS

A dissertação é um trabalho académico individual, no entanto, existem contributos dos quais não posso deixar de realçar a sua importância. Por esse motivo, desejo expressar os meus sinceros agradecimentos:

Ao meu orientador Eng.º Francisco Silva, por toda a sua disponibilidade e orientação ao longo deste trabalho, desde a proposta inicial do tema, até à apresentação final.

Ao meu co-orientador Eng.º Hernâni Lopes.

Ao Eng.º Victor Moreira do Laboratório de Tecnologia Mecânica do ISEP

Ao Eng.º Daniel Figueiredo da empresa Palbit, pela cedência das ferramentas de corte e do material a maquinar.

À minha esposa, filho e família, pela paciência, incentivo e motivação demonstrada no decorrer do meu percurso académico.

A todos os que, directa ou indirectamente, deram algum contributo para a realização deste trabalho. Muito obrigado.

PALAVRAS-CHAVE

Fresagem, Maquinagem de alta velocidade, Ferramentas de corte, Revestimentos, Desgaste, Vida das ferramentas, Aços inoxidáveis Duplex.

RESUMO

A maquinagem por arranque de aparas é, na actualidade, um dos processos de fabrico mais utilizado e de maior relevo no panorama da indústria metalomecânica mundial.

Para além da forte evolução que se tem registado ao longo das últimas décadas nos equipamentos ligados à maquinagem, também as ferramentas têm visto o seu desempenho fortemente melhorado, graças essencialmente ao desenvolvimento de revestimentos, que têm proporcionado um conjunto de propriedades mais indicado a cada situação.

Por outro lado, os aços inoxidáveis Duplex têm registado um forte incremento na sua aplicação, a qual requer, na grande maioria dos casos, o uso da maquinagem para a obtenção das formas necessárias.

Tendo em consideração estes dois factores, o presente trabalho visa essencialmente avaliar o desempenho de um tipo de ferramenta de corte em desenvolvimento pela Palbit, com revestimentos PVD e CVD, aplicada à maquinagem de aços inoxidáveis Duplex.

Os parâmetros de corte e condições de maquinagem foram definidos pelo fabricante da ferramenta e mantiveram-se inalterados em todos os ensaios realizados.

Foram consideradas apenas condições de maquinagem sem utilização de fluido de corte e realizados percursos de corte previamente determinados na fresagem, utilizando um porta-insertos de dois insertos, em condições de maquinagem de alta velocidade.

A análise comparativa recaiu sobre a qualidade da superfície gerada pela maquinagem, avaliada através de perfilometria, desgaste registado por cada uma das ferramentas utilizadas e vibrações geradas.

KEYWORDS

Milling, Machining process, High Speed Machining, Cutting tools, Coatings, Wear, Tool-life, Duplex Alloys

ABSTRACT

Nowadays, machining is one of the most widely used manufacturing process and extremely relevant in the context of metalworking industry.

In addition, despite the strong evolution over the last several decades in machining and related equipment, tools also have seen their performance strongly improved, due mainly to the development of thin coatings, mono and multilayered, which have provided the set of the most appropriate properties for each situation.

On the other hand, the duplex stainless steels have registered a strong increase in its demand, which, in many cases, requires the use of machining processes, in order to obtain the final shape of the required parts.

Taking into account these two factors, this paper aims, essentially evaluate the performance of a cutting tool type in development by Palbit company, but with different PVD and CVD coatings, applied to the machining of duplex stainless steels.

The cutting parameters and machining conditions were recommended by the manufacturer itself and were unchanged in all tests performed.

Only machining conditions without the use of cutting fluid were considered and cutting paths previously determined in the milling were performed using a two-pellet rock under high speed machining conditions.

Comparative analysis was made taking into account the quality of the surfaces generated by machining, evaluated through profilometry and the wear registered on each used tool, as well as the measured vibrations.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

Termo	Designação
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
Al	Alumínio
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio
a _p	Profundidade de corte
a _e	Largura de corte
C	Carbono
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CBN	Nitreto de Boro Cúbico
CD	<i>Compact Disc</i>
CFC	Cubico de faces centradas
CNC	Comando Numérico Computorizado
Co	Cobalto
Cr	Crómio
Cr ₂ O ₃	Óxido de Crómio
CT	<i>Cermets</i>
Cu	Cobre
CVD	<i>Chemical Vapor Deposition</i>
Dc	Diâmetro de corte
EDS	Espectroscopia dispersiva de raios X
f	Avanço por rotação
Fe	Ferro
f _m	Avanço por rotação
f _z	Avanço por dente
h	Eficiência
<i>HRC</i>	<i>Rockwell C Hardness</i>
HV	Ureza Vickers
HB	Dureza Brinell
H	Hidrogénio
hBN	Nitreto hexagonal de Boro
hex	Espessura máxima da apara
hm	Espessura média da apara
<i>HSS</i>	<i>High Speed Steel</i>
<i>ISO</i>	<i>International Standards Organization</i>
Kc ₁	Força de corte específica
kct	Força de corte específica
kr	Ângulo posição
L	Comprimento de avanço
Mg	Magnésio
Mo	Molibdénio
n	Velocidade fuso
NbC	Carboneto Nióbio
Ni	Níquel
Pb	Chumbo
Pc	Potência de corte
PcBN	<i>Poly-Crystalline Cubic Boron Nitride</i>

PCD	<i>Polycrystalline Diamond</i> (Diamante policristalino sintético)
PVD	<i>Physical Vapor Deposition</i>
Q	Taxa remoção
Ra	Rugosidade média aritmética
Rz	Rugosidade máxima
S	Enxofre
Si ₃ N ₄	Nitreto Silício
SiC	Carboneto Silício
TaC	Carboneto Tântalo
Tc	Tempo maquinagem
Ti	Titânio
TiAlN	Nitreto de Alumínio e Titânio
TiC	Carboneto Titânio
TiCN	Carbonitreto de Titânio
TiN	Nitreto de Titânio
TRS	<i>Transverse rupture strength</i> (Força de ruptura transversal)
u	Passo
USB	<i>Universal Standard Bus</i>
V	Vanádio
VB	Desgaste na face de saída
V ₄ C ₃	Carboneto Vanádio
Vc	Velocidade de corte
Vf	Velocidade avanço
W	Tungsténio
WC	Carboneto Tungsténio
ψ_e	Ajuste do ângulo
Zc	Número efectivo dentes
Zn	Zinco
Zn	Número de dentes

Lista de Unidades

Termo	Designação
g	Gramas
kW	QuiloWatt
m	Metros
m/min	Metros por minuto
min	Minuto
mm	Milímetros
mm/min	Milímetros por minuto
mm/rot	Milímetros por rotação
rpm	Rotações por minuto
s	Segundos
μm	Micrometro

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - MOVIMENTO CONCORDANTE (SANDVIK, 2010)	39
FIGURA 2 - MOVIMENTO DISCORDANTE (SANDVIK, 2010)	39
FIGURA 3 - FRESADORA VERTICAL CNC (CENFIM.PT)	41
FIGURA 4 - FRESADORA HORIZONTAL CONVENCIONAL (CENFIM.PT)	42
FIGURA 5 - FRESADORA UNIVERSAL CONVENCIONAL (CENFIM.PT)	42
FIGURA 6 - CENTRO DE MAQUINAGEM VERTICAL (MAZAK.COM)	42
FIGURA 7 - CENTRO DE MAQUINAGEM UNIVERSAL (GROBGROUP.COM)	43
FIGURA 8 - CENTRO DE MAQUINAGEM HORIZONTAL (JYOTI.COM)	43
FIGURA 9 - CENTRO MAQUINAGEM AVANÇADA (HAAS.COM)	45
FIGURA 10 - CONTROLADOR CNC (HAAS.COM)	46
FIGURA 11 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE CINCO EIXOS DE MAQUINAGEM	46
FIGURA 12 - ILUSTRAÇÃO 3D DE UM CENTRO DE MAQUINAGEM DO TIPO MESA/MESA (MASTERCAM, 2011)	47
FIGURA 13 - ILUSTRAÇÃO 3D DE UM CENTRO DE MAQUINAGEM DO TIPO ÁRVORE/MESA (MASTERCAM, 2011)	47
FIGURA 14 - ILUSTRAÇÃO 3D DE UM CENTRO DE MAQUINAGEM DO TIPO ÁRVORE/ÁRVORE (MASTERCAM, 2011)	47
FIGURA 15 - ILUSTRAÇÃO DIÂMETRO DE CORTE DE UMA FERRAMENTA DE CORTE (PALBIT, 2016)	48
FIGURA 16 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO DIÂMETRO DE CORTE (PALBIT, 2016)	48
FIGURA 17 - ILUSTRAÇÃO DA VELOCIDADE DE CORTE (PALBIT, 2016)	49
FIGURA 18 - VELOCIDADES DE CORTE RECOMENDADAS POR UM FABRICANTE DE FERRAMENTAS (PALBIT, 2016)	49
FIGURA 19 – PARÂMETROS DE CORTE MAIS USUAIS NA FRESAGEM (PALBIT, 2016)	50
FIGURA 20 - LARGURA DE CORTE (AE) (PALBIT, 2016)	51
FIGURA 21 – VALOR DE AJUSTE DO ÂNGULO	51
FIGURA 22 – LARGURA DE CORTE QUE INTERVÉM NA POTÊNCIA ÚTIL DA MÁQUINA (PALBIT, 2016)	52
FIGURA 23 - ÂNGULOS DE POSIÇÃO DE INSERTOS EM PORTA-FERRAMENTAS (PALBIT, 2016)	52
FIGURA 24 - TIPIFICAÇÃO DAS GEOMETRIAS DOS INSERTOS DE CORTE (SANDVIK,2010)	53
FIGURA 25 - CLASSIFICAÇÃO DO PASSO DAS FRESAS (SANDVIK, 2010)	53
FIGURA 26 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA RUGOSIDADE MÉDIA ARITMÉTICA R_A	56
FIGURA 27 - FIGURA EFEITO DAS VIBRAÇÕES NA TRAJECTÓRIA DA FERRAMENTA DE CORTE (ALTINTAS, 2000)	58

FIGURA 28 - LÂMINAS EM AÇO RÁPIDO HSS	65
FIGURA 29 - FERRAMENTAS EM METAL DURO SEM REVESTIMENTO (WATTOOL.COM)	67
FIGURA 30 - CLASSIFICAÇÃO ISO DOS GRAUS DE METAL DURO (PALBIT, 2016)	67
FIGURA 31 - INSERTOS DE CORTE EM CERMET (CERAMTEC.COM)	68
FIGURA 32 - INSERTOS DE CORTE EM MATERIAL CERÂMICO (FAWET.COM)	71
FIGURA 33 - FERRAMENTAS DE CORTE ULTRADUROS (DIATEC-PFORZHEIM.DE)	73
FIGURA 34 - REVESTIMENTOS PVD EM INSERTOS DE CORTE (SANDVIK, 2010)	75
FIGURA 35 - REVESTIMENTOS CVD EM INSERTOS DE CORTE EM METAL DURO (SANDVIK, 2010)	75
FIGURA 36 - DIAGRAMA BINÁRIO DE EQUILÍBRIO FE-CR (PADILHA, 2006)	82
FIGURA 37 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA EVOLUÇÃO DOS AÇOS INOXIDÁVEIS EM TORNO DA COMPOSIÇÃO BÁSICA ATRIBUÍDA AO AÇO INOXIDÁVEL AISI 304 (EURO-INOX, 2012)	84
FIGURA 38 - VISÃO TRIDIMENSIONAL DO DIAGRAMA DE EQUILÍBRIO FE-CR-NI (PADILHA <i>ET AL.</i> , 2006)	85
FIGURA 39 - SISTEMA DE DESCARBONIZAÇÃO POR SOPRO COMBINADO (MARIM, 2006)	86
FIGURA 40 - DIAGRAMA DE SCHAEFFLER PARA AÇOS INOXIDÁVEIS (PADILHA E PLAUT, 2009)	86
FIGURA 41 - COEFICIENTE DE PARTIÇÃO DOS ELEMENTOS DE LIGA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DE LAMINAGEM (TEHOVNIK <i>ET AL.</i> , 2011)	87
FIGURA 42 - APRESENTAÇÃO DOS PRODUTOS PALBIT (PALBIT.PT)	95
FIGURA 43 - ESBOÇO DA GEOMETRIA DOS INSERTOS RDHT (PALBIT, 2010)	96
FIGURA 44 – PORTA-INSERTOS UTILIZADO (PALBIT, 2010)	96
FIGURA 45 - ESQUEMA DOS CAMPOS DE APLICAÇÃO DA SÉRIE PH7 (PALBIT, 2010)	97
FIGURA 46 - MICROESTRUTURA DO REVESTIMENTO ALTIN (1500X) (PALBIT)	97
FIGURA 47 - MICROESTRUTURA DO SUBSTRATO DE GRÃO MÉDIO (1500X) (PALBIT)	97
FIGURA 48 - CAMPOS DE APLICAÇÃO DA SÉRIE PH5 (PALBIT)	98
FIGURA 49 - MICROESTRUTURA DO REVESTIMENTO Al_2O_3 (1500X) (PALBIT)	99
FIGURA 50 - MICROESTRUTURA SINTERIZADA DO MICROGRÃO (1500X) (PALBIT)	99
FIGURA 51 - CENTRO DE MAQUINAGEM HAAS VF-2	100
FIGURA 52 - HASTE ANTI-VIBRÁTIL (PALBIT, 2016)	101
FIGURA 53 - CÂMARA DE VÍDEO DE ALTA VELOCIDADE FASTCAM SA4 500K MODELO C1 COLOUR (PHOTRON.COM)	104
FIGURA 54 - BALANÇA DIGITAL APX-200 (DENVERINSTRUMENTUSA.COM)	105
FIGURA 55 - RUGOSÍMETRO MAHR M2 (MAHR.COM)	105
FIGURA 56 - PLACA NATIONAL INSTRUMENTS NI-4431 E ACELERÓMETROS PCB (NATIONAL INSTRUMENTS E PCB)	106

FIGURA 57 - MICROSCÓPIO ELECTRÓNICO DE VARRIMENTO FEI QUANTA 400 FEG (CEMUP)	107
FIGURA 58 - ESQUEMA DE MAQUINAGEM COM INTERPOLAÇÃO HELICOIDAL (PALBIT, 2016)	108
FIGURA 59 – PREPARAÇÃO DO BLOCO DE DUPLEX	111
FIGURA 60 - ENSAIO EXPERIMENTAL	111
FIGURA 61 – VIBRAÇÕES NO ENSAIO A1C1	116
FIGURA 62 – VIBRAÇÕES NO ENSAIO A1C2	116
FIGURA 63 – VIBRAÇÕES NO ENSAIO A1L1	120
FIGURA 64 – VIBRAÇÕES NO ENSAIO A1L2	120
FIGURA 65 - VIBRAÇÕES ENSAIO A2C1	124
FIGURA 66 - VIBRAÇÕES ENSAIO A2C2	124
FIGURA 67 - ZONA Z1 DO REVESTIMENTO FERRAMENTA DO TIPO A	128
FIGURA 68 - COMPOSIÇÃO RELATIVA À ZONA Z1 NA FERRAMENTA DO TIPO A	128
FIGURA 69 – VIBRAÇÕES DO ENSAIO A2L1	129
FIGURA 70 - VIBRAÇÕES DO ENSAIO A2L2	129
FIGURA 71 - SUPERFÍCIE DA FERRAMENTA DO TIPO B	133
FIGURA 72 - ZONA Z1 DA FERRAMENTA DO TIPO B	133
FIGURA 73 - ZONA Z2 DA FERRAMENTA DO TIPO B	133
FIGURA 74 - ZONA Z3 DA FERRAMENTA DO TIPO B	133
FIGURA 75 - ZONA Z4 DA FERRAMENTA DO TIPO B	133
FIGURA 76 - VIBRAÇÕES DO ENSAIO B1C1	134
FIGURA 77 - VIBRAÇÕES DO ENSAIO B1C2	134
FIGURA 78 - VIBRAÇÕES ENSAIO B1L1	137
FIGURA 79 - VIBRAÇÕES ENSAIO B1L2	137
FIGURA 80 - VIBRAÇÕES DO ENSAIO B2C1	141
FIGURA 81 - VIBRAÇÕES DO ENSAIO B2C2	141
FIGURA 82 - VIBRAÇÕES DO ENSAIO B2L1	144
FIGURA 83 - VIBRAÇÕES DO ENSAIO B2L2	144
FIGURA 84 – APARAS RELATIVAS AO MATERIAL 1	148
FIGURA 85 – FRAGMENTOS DE REVESTIMENTO NA APARA DO MATERIAL 1	148
FIGURA 86 - ANÁLISE EDS DA APARA MATERIAL 1	148
FIGURA 87 - APARAS MATERIAL 2	149
FIGURA 88 – FRAGMENTOS DO REVESTIMENTO NA APARA DO MATERIAL 2	149

FIGURA 89 - ANÁLISE EDS DA APARA MATERIAL 2

149

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - OPERAÇÕES DE FRESAGEM (SANDVIK, 2010)	39
TABELA 2 – TIPOS DE FRESAS	62
TABELA 3 – TIPOS DE INSERTOS E PORTA INSERTOS (PALBIT, 2010)	63
TABELA 4 - TIPOS DE AVARIAS DE FERRAMENTAS DE CORTE (SANDVIK, 2010)	78
TABELA 5 - CARACTERÍSTICAS DOS INSERTOS PH7930 E PH5740 (PALBIT)	96
TABELA 6 - CARACTERÍSTICAS DO INSERTO DE CORTE RDHT PH7930 (PALBIT)	97
TABELA 7 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA E FÍSICA DA CLASSE PH7 (PALBIT)	98
TABELA 8 - CARACTERÍSTICAS INSERTO RDHT PH5740 (PALBIT)	99
TABELA 9 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA E FÍSICA DA CLASSE PH5 (PALBIT)	99
TABELA 10 - TABELA DE ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO CENTRO DE MAQUINAGEM HAAS VF-2	100
TABELA 11 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX X2CRNIMOCU25-6-3-3 (ARSOPI)	102
TABELA 12 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX GX2CRNIMON26-7-4 (ARSOPI)	102
TABELA 13 – PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX X2CRNIMOCU25-6-3-3 (ARSOPI)	103
TABELA 14 - PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX GX2CRNIMON26-7-4 (ARSOPI)	103
TABELA 15 - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS RUGOSÍMETRO MAHR M2 (MAHR.COM)	106
TABELA 16 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO MICROSCÓPIO ELECTRÓNICO DE VARRIMENTO	107
TABELA 17 - CONDIÇÕES E PARÂMETROS DOS ENSAIOS	109
TABELA 18 - CODIFICAÇÃO DOS MATERIAIS E FERRAMENTAS	110
TABELA 19 - RESUMO DOS ENSAIOS	110
TABELA 20 - IMAGENS DA FILMAGEM A ALTA VELOCIDADE	112
TABELA 21 - RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE DE CORTE NOS ENSAIOS A1C1 E A1C2 (VALORES EM μM)	113
TABELA 22 - DESGASTE VERIFICADO NOS ENSAIOS A1C1 E A1C2 (VALORES EM G)	114
TABELA 23 - IMAGENS DO DESGASTE DAS FERRAMENTAS CORRESPONDENTES AOS ENSAIOS A1C1 E A1C2	115
TABELA 24 - RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE DE CORTE NOS ENSAIOS A1L1 E A1L2 (VALORES EM μM)	117
TABELA 25 - DESGASTE VERIFICADO NOS ENSAIOS A1L1 E A1L2 (VALORES EM G)	118
TABELA 26 - IMAGENS DO DESGASTE DAS FERRAMENTAS CORRESPONDENTES AOS ENSAIOS A1L1 E A1L2	119
TABELA 27 - RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE DE CORTE NOS ENSAIOS A2C1 E A2C2 (VALORES EM μM)	121
TABELA 28 - DESGASTE VERIFICADO NOS ENSAIOS A2C1 E A2C2 (VALORES EM G)	122

TABELA 29 - IMAGENS DO DESGASTE DAS FERRAMENTAS CORRESPONDENTES AOS ENSAIOS A2C1 E A2C2	123
TABELA 30 - RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE DE CORTE NOS ENSAIOS A2L1 E A2L2 (VALORES EM μM)	125
TABELA 31 - DESGASTE VERIFICADO NOS ENSAIOS A2L1 EA2L2(VALORES EM G)	126
TABELA 32 - IMAGENS DO DESGASTE DAS FERRAMENTAS CORRESPONDENTES AOS ENSAIOS A2L1 E A2L2	127
TABELA 33 - RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE DE CORTE NOS ENSAIOS B1C1 E B1C2 (VALORES EM μM)	129
TABELA 34 - DESGASTE DO ENSAIO B1C1 E B1C2 (VALORES EM G)	130
TABELA 35 - IMAGENS DO DESGASTE DAS FERRAMENTAS CORRESPONDENTES AOS ENSAIOS B2C1 E B2C2	132
TABELA 36 - RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE DE CORTE NOS ENSAIOS B1L1 E B1L2 (VALORES EM μM)	134
TABELA 37 - DESGASTE DOS ENSAIOS B1L1 E B1L2 (VALORES EM G)	135
TABELA 38 - IMAGENS DO DESGASTE DAS FERRAMENTAS CORRESPONDENTES AOS ENSAIOS B1L1 E B1L2	136
TABELA 39 - RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE DE CORTE NOS ENSAIOS B2C1 E B2C2 (VALORES EM μM)	138
TABELA 40 - DESGASTE ENSAIO B2C1 E B2C2 (VALORES EM G)	138
TABELA 41 - IMAGENS DO DESGASTE DAS FERRAMENTAS CORRESPONDENTES AOS ENSAIOS B2C1 E B2C2	139
TABELA 42 - RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE DE CORTE APÓS OS ENSAIOS B2L1 E B2L2 (VALORES EM μM)	141
TABELA 43 - DESGASTE DOS INSERTOS DE CORTE DO ENSAIO B2L1 E B2L2 (VALORES EM G)	142
TABELA 44 - IMAGENS DO DESGASTE DAS FERRAMENTAS CORRESPONDENTES AOS ENSAIOS B2L1 E B2L2	143
TABELA 45 - RESUMO DAS MÉDIAS DAS RUGOSIDADES (μM)	145
TABELA 46 - RESUMO DOS VALORES DE DESGASTE (G)	146
TABELA 47 - MOMENTO NO QUAL SE VERIFICOU OCORRÊNCIA DE AVARIAS	147

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	31
1.1	Enquadramento	31
1.2	Objectivos	32
1.3	Metodologia	33
1.4	Estrutura	33
2	CONTEXTUALIZAÇÃO TEÓRICA	37
2.1	Processos de corte por arranque de apana	37
2.2	Fresagem	37
2.2.1	Equipamento de fresagem	40
2.2.2	Fresadoras CNC	43
2.2.3	Parâmetros de corte	48
2.2.4	Avaliação das superfícies fresadas	54
2.2.5	Vibrações na fresagem	57
2.3	Ferramentas de corte	60
2.3.1	Ferramentas para fresagem	60
2.3.2	Materiais de ferramentas de corte	64
2.3.3	Aços rápidos	64
2.3.4	Metal Duro	66
2.3.5	Cermets	67
2.3.6	Cerâmicos	69
2.3.7	Ultraduros	71
2.3.8	Revestimentos em ferramentas de corte	73
2.3.9	Mecanismos de desgaste e avarias em ferramentas de corte	76

2.4 Materiais	81
2.4.1 Aços inoxidáveis	82
2.4.2 Aços inoxidáveis Duplex	83
2.4.3 Produção dos aços inoxidáveis Duplex	85
2.4.4 Caracterização dos aços inoxidáveis Duplex	88
2.4.5 Maquinabilidade dos aços inoxidáveis Duplex	88
3 DESENVOLVIMENTO	94
3.1 Objectivos do trabalho prático	94
3.2 Apresentação da Palbit	94
3.3 Ferramentas, Materiais e equipamentos	95
3.3.1 Ferramentas	95
3.3.2 Materiais	102
3.3.3 Equipamentos laboratoriais	104
3.4 Ensaios e métodos	107
3.4.1 Condições e parâmetros dos ensaios	108
3.4.2 Ensaios de maquinagem	108
3.5 Resultados	111
3.5.1 Pré-Ensaio (Ensaio zero)	111
3.5.2 Ensaios A1C1 e A1C2	113
3.5.3 Ensaios A1L1 e A1L2	117
3.5.4 Ensaios A2C1 e A2C2	120
3.5.5 Ensaios A2L1 e A2L2	124
3.5.6 Ensaios B1C1 e B1C2	129
3.5.7 Ensaio B1L1 e B1L2	134
3.5.9 Ensaios B2C1 e B2C2	137

3.5.10	Ensaaios B2L1 e B2L2	141
	3.6 Análise geral dos resultados dos ensaios	144
3.6.1	Rugosidade	144
3.6.2	Desgaste	145
3.6.3	Vibrações	146
	3.7 Análise das aparas	147
4	CONCLUSÕES	153
5	BIBLIOGRAFIA	157
	5.1 Artigos, livros e revistas	157
	5.2 Outras fontes	159
6	ANEXOS	163

INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

1.2 Objectivos

1.3 Metodologia

1.4 Estrutura

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

A inovação e desenvolvimento de novos produtos promovem o desenvolvimento das empresas e a sua competitividade, o que por sua vez conduz a uma melhoria na qualidade dos produtos disponíveis no mercado. A competitividade das empresas, em geral, é determinada pela capacidade de compreender e reagir às necessidades dos seus clientes e, por outro lado, ajustar-se à evolução e alteração das tecnologias e dos recursos humanos. Os mais recentes desenvolvimentos tecnológicos e inovação, têm contribuído para um aumento da competitividade das empresas.

O domínio das tecnologias de produção ao nível de organização industrial, processos de fabrico, capacidade para desenvolver novos produtos, inovação e eficiência, são factores-chave de competitividade num mercado cada vez mais global. A sobrevivência das empresas no mercado depende da capacidade de produção, qualidade e competitividade dos preços, com prazos de entrega ajustados à necessidade de cada cliente.

No caso específico das empresas do ramo metalomecânico, podemos destacar como pontos mais relevantes:

- Melhor conhecimento do comportamento dos materiais durante o processo de corte;
- Capacidade de trabalhar novos materiais;
- Possibilidade de simular e prever comportamentos críticos de processo;
- Conhecimento da tecnologia de ponta disponível pelos fabricantes, permite maior autonomia e incremento significativo dos parâmetros de corte, através de novas máquinas, ferramentas e materiais a maquinar;
- Novos sistemas de refrigeração e lubrificação, etc.

A maquinagem é um dos principais processos a que recorre a indústria metalomecânica. Este vem dar resposta à necessidade de se obterem peças de complexidade e com elevada precisão.

A forte evolução registada nos equipamentos de maquinagem, nomeadamente através de uma maior sofisticação dos sistemas de accionamento e controlo, vieram trazer novos desafios às indústrias que desenvolvem ferramentas, as quais necessitaram de acompanhar o desempenho conseguido pelos equipamentos, em termos de velocidade e precisão. Neste aspecto, as ferramentas têm evoluído de uma forma notória, através da adição de revestimentos e graus de metal duro cada vez mais versáteis, permitindo adaptar as características da superfície da ferramenta às propriedades e estado de tratamento próprios de cada material. Isto é conseguido

através do revestimento da superfície das ferramentas em aço rápido ou metal duro, através de uma série de revestimentos finos, cada um dos quais com propriedades específicas, que conferem propriedades de transferência de calor, baixo atrito, elevada dureza e resistência ao desgaste.

Em paralelo assistiu-se ao aparecimento de novas ligas metálicas como os aços com elevada resistência mecânica e aços inoxidáveis Duplex, que aliam ótimas propriedades de resistência mecânica e resistência à corrosão, mesmo em meios ambientes agressivos.

É neste contexto que surge o interesse pela maquinagem de ligas de aço inoxidável Duplex, as quais começam a ser cada vez mais usadas em aplicações ligadas à indústria química e à transformação de polímeros, necessitando-se assim de recorrer à maquinagem como um processo principal para atingir as formas necessárias. Com o aumento da necessidade de maquinar novos materiais, tornam-se obrigatoriamente necessárias ferramentas de corte que correspondam a essas necessidades.

1.2 Objectivos

Este trabalho tem como principal objectivo proceder à análise comparativa do comportamento de dois tipos de revestimentos aplicados em insertos de corte, durante a fresagem de aços inoxidáveis Duplex, em condições de maquinagem extremas, sem recorrer à utilização de fluido de corte e segundo condições de maquinagem de alta velocidade. A concretização do principal objectivo envolve a realização das seguintes tarefas:

- Analisar os requisitos propostos pelo fabricante;
- Efectuar os ensaios de maquinagem nas condições estabelecidas;
- Comparar a rugosidade das superfícies maquinadas;
- Analisar o desgaste provocado em cada uma das ferramentas;
- Registrar a perda de massa dos insertos em cada ensaio;
- Analisar as vibrações resultantes da maquinagem.

Para a concretização das tarefas referidas, foi necessário:

- Estudar as características do material a maquinar;
- Cumprir as condições de corte estabelecidas pelo fabricante das ferramentas de corte;
- Elaborar um procedimento de ensaios;
- Analisar com rigor a superfície resultante de cada ensaio, assim como o estado das arestas de corte e da superfície em geral de cada ferramenta;
- Analisar o desgaste das ferramentas após cada ensaio de maquinagem;
- Analisar as vibrações geradas durante as operações de maquinagem.

Os resultados obtidos durante a realização dos ensaios serão processados e analisados de forma a retirar as devidas conclusões, as quais irão servir de referência ao fabricante para melhoria e desenvolvimento de novas ferramentas e revestimentos.

1.3 Metodologia

A elaboração do presente trabalho seguiu a seguinte metodologia:

- Estudo do estado da arte;
- Estudos dos processos de maquinagem por arranque de apra - Fresagem;
- Estudo das ferramentas de corte, materiais e revestimentos;
- Estudo do Aço Inoxidável Duplex usado no processo de maquinagem;
- Estudo dos ensaios a efectuar;
- Estabelecimento das condições práticas para a realização dos ensaios, tais como, o plano de ensaios e a preparação do trabalho correspondente, fixações e programa CNC dos ensaios de maquinagem;
- Realização dos ensaios de maquinagem;
- Realização da filmagem de alta velocidade das operações iniciais de maquinagem, para a definição das condições de ensaio a realizar;
- Análise, da rugosidade da superfície da peça produzida a cada ensaio de maquinagem;
- Análise da perda de massa das ferramentas após cada ensaio de maquinagem;
- Análise SEM das ferramentas de corte e das aparas de cada material maquinado;
- Análise das vibrações geradas na árvore da máquina durante a maquinagem;
- Elaboração do relatório da presente Dissertação.

1.4 Estrutura

Após esta introdução, a estrutura deste trabalho está organizada em três partes: uma Revisão Bibliográfica inicial, onde se pretende enquadrar o leitor com o tema, passando em revista os desenvolvimentos técnicos e científicos publicados, e seguido pelo Desenvolvimento do trabalho prático, com destaque para a descrição de todos os ensaios e medições realizadas, assim como, o tratamento e análise crítica dos resultados obtidos e termina com as Conclusões finais, onde se faz referência as principais conclusões deste trabalho e são indicadas linhas de investigação para trabalhos futuros.

CONTEXTUALIZAÇÃO TEÓRICA

2.1 Processos de corte por arranque de apar

2.2 Fresagem

2.3 Ferramentas de corte

2.4 Materiais

2 CONTEXTUALIZAÇÃO TEÓRICA

A revisão bibliográfica tem como principal e único objectivo a contextualização teórica sobre o tema abordado, através do estudo de processos por arranque de apara, principalmente fresagem, maquinagem de aços inoxidáveis, ferramentas de corte e materiais, tendo como base a consulta de documentos científicos, tais como artigos, livros, revistas, teses e outros documentos científicos.

2.1 Processos de corte por arranque de apara

Os processos de corte por arranque de apara, também conhecidos por processos de maquinagem, são os processos produtivos mais utilizados a nível industrial, por permitirem a produção de peças com diversas geometrias. Este processo permite obter peças com elevado grau de precisão, bom acabamento superficial, sem que haja alterações significativas das propriedades dos materiais a maquinar. As características apresentadas fazem com que este processo produtivo, na grande maioria das situações, não possa ser substituído por processos sem arranque de apara. Estes processos são muitas vezes complementares aos processos sem arranque de apara. Existem variados tipos de processos por arranque de apara, sendo de destacar a fresagem, furação, rectificação, torneamento, entre outros.

Embora haja muitos processos por arranque de apara, apenas irá ser dado relevo ao processo de fresagem, dado ser este o processo em que assenta o presente trabalho.

2.2 Fresagem

O processo de fresagem evoluiu para um método que permite executar uma ampla variedade de operações. Além de todas as aplicações convencionais da fresagem, esta também é uma alternativa para operações de furação, roscagem, abertura de cavidades e superfícies que costumavam ser torneadas, furadas ou rosqueadas com macho (Sandvik, 2010).

A fresagem é o método de maquinagem mais flexível, podendo-se maquinar uma vasta gama de formas geométricas. O lado negativo desta flexibilidade está relacionado com as muitas variáveis incorporadas ao processo, que tornam a sua optimização um desafio. De uma forma simples, a fresagem é um processo de produção por arranque de apara em que o material é cortado da peça através de uma ferramenta rotativa. A máquina que executa esta operação é designada por fresadora. A fresagem, nos dias de hoje, é um processo de maquinagem universal. A fresagem é um dos processos de maquinagem mais versáteis, em que o material da peça é removido por combinação

de movimentos rotativos e lineares de uma ferramenta cilíndrica com múltiplas arestas de corte. É um processo com elevada eficiência, caracterizado por grandes taxas de remoção de material, pela boa qualidade dos acabamentos superficiais, e ainda pela precisão e flexibilidade das formas que pode gerar. De uma forma geral, tanto a peça como a ferramenta podem assumir movimentos relativos independentes ou combinados, permitindo a execução de uma vasta gama de geometrias.(Tschätsch, 2009)

O desenvolvimento de ferramentas de corte tem contribuído para novas possibilidades, ganhos de produtividade, fiabilidade e qualidade, que se tem conseguido com o auxílio de insertos substituíveis e fresas inteiriças providas de novos revestimentos.

Na maioria dos casos, a fresagem é utilizada na maquinagem de superfícies planas e operações de facejamento, contudo, a evolução da tecnologia contribuiu para o aumento da realização de operações de maquinagem de superfícies complexas. Dentro dessas operações destacam-se as operações de facejamento, desbaste, acabamento, ranhurar, abertura de rasgos, furos, etc., conforme se pode ver na tabela 1. As vantagens deste processo de fabrico residem para além da variedade de formas que podem ser produzidas, também a qualidade dos acabamentos superficiais obtidos, nas altas taxas de remoção de material e na disponibilidade de uma ampla variedade de ferramentas de corte, que podem ser construídas ou associadas para produzir superfícies de geometria complexas. De acordo com a superfície obtida, a forma da ferramenta e a cinemática dos movimentos, há a distinguir de entre os diferentes processos de fresagem:

- Fresagem plana;
- Fresagem circular;
- Fresagem de formas e perfis;
- Fresagem de geração.

As fresadoras são máquinas-ferramentas construídas especialmente para assegurar os movimentos relativos da peça e da ferramenta, necessários para a efetivação dos processos de fresagem com a geometria pretendida.

As fresas são ferramentas rotativas de maquinagem, usualmente constituídas por múltiplos gumes cortantes, dispostos simetricamente ao redor de um eixo, removendo intermitentemente material da peça. Para que a fresa consiga cortar o material, é necessário que existam três movimentos distintos: a rotação da fresa, a penetração dela sobre o material e o avanço do material em direcção à fresa. Este movimento descrito pode ser concordante ou discordante. No movimento concordante, como vemos na figura 1, a peça é empurrada na mesma direcção do movimento de rotação

da ferramenta. Este tipo de movimento pode gerar ressaltos que pode dar origem à fractura da ferramenta e, com isso, obter um fraco acabamento da superfície da peça fresada. No caso do movimento discordante, como podemos ver na figura 2, a peça é empurrada contra o movimento de rotação da ferramenta. O movimento discordante é o movimento mais adequado na fresagem e, por isso, deve-se optar por este na maioria dos casos, na realização de movimentos de maquinagem (Tschätsch, 2009).

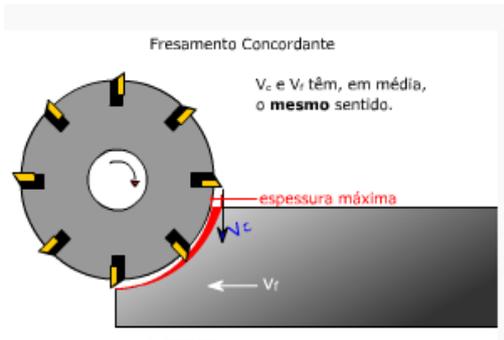


Figura 1 - Movimento concordante (Sandvik, 2010)

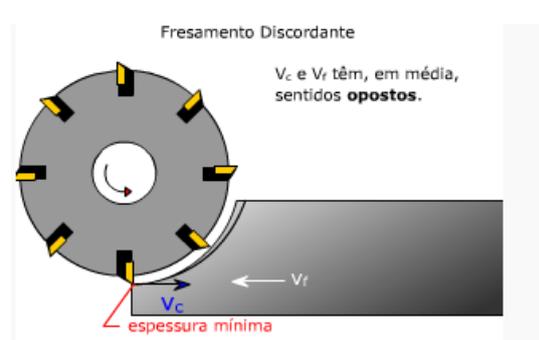
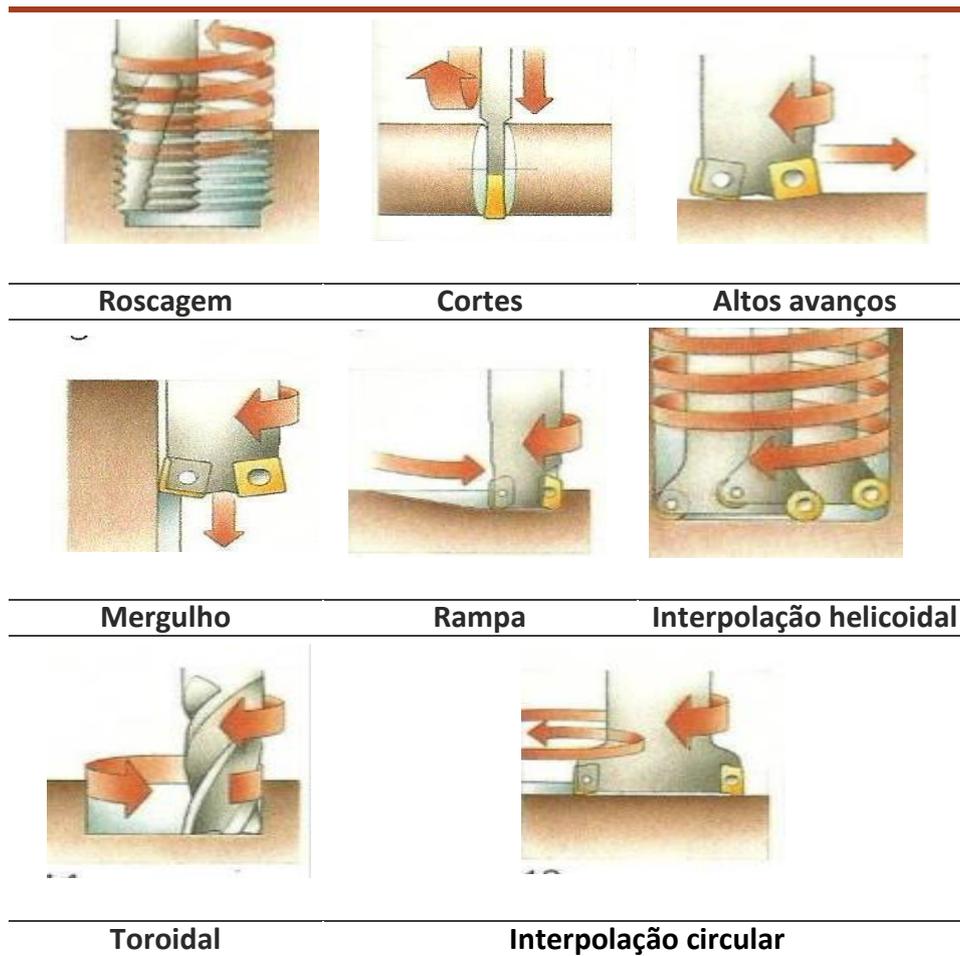


Figura 2 - Movimento discordante (Sandvik, 2010)

Tabela 1 - Operações de fresagem (Sandvik, 2010)

Principais operações de fresagem		
Facejamento	Cantos a 90º	Perfis
Cavidades	Canais	Torno fresagem



2.2.1 Equipamento de fresagem

No que diz respeito aos equipamentos, existem máquinas de fresagem convencional e não-convencional, classificando-se as mesmas em função da árvore principal, sendo divididas em fresadoras verticais, horizontais, universais e centros de maquinagem. As máquinas-ferramentas convencionais, como tornos, fresadoras, furadoras radiais, retificadoras, etc., poderá considerar-se com fazendo parte de uma tecnologia do passado, dando lugar às máquinas CNC. Desde o fabrico da máquina convencional, com os movimentos totalmente dependentes do operador, até às máquinas CNC de alta velocidade, que não exigem a presença permanente do operador, o caminho percorrido foi imenso.

As fresadoras verticais são aquelas em que o eixo da árvore ocupa a posição vertical, perpendicular à superfície de trabalho da máquina, a exemplo da figura 3. A peça a maquinar pode ser trabalhada segundo o eixo vertical Z, movimentando a fresa no sentido ascendente ou descendente, e segundo os eixos horizontais Y e X, através de movimentações laterais.

As fresadoras horizontais são aquelas em que a posição da árvore se encontra sempre na horizontal. Este tipo de fresadora utiliza a fresa montada sobre um eixo horizontal, como se verifica na figura 4.



Figura 3 - Fresadora vertical CNC (Cenfim.pt)

A fresadora horizontal é utilizada para trabalho de facejamento na horizontal e para efectuar ranhuras e perfis rectilíneos. Neste tipo de fresadora, a ferramenta mais utilizada é a fresa do tipo cilíndrico. Ao nível dos movimentos, tal como nas fresadoras verticais, apresentam três movimentos da mesa de fixação da peça: um vertical e dois horizontais.

As fresadoras universais são semelhantes à apresentada na figura 5. Estas permitem posicionar a ferramenta segundo um dos eixos, vertical, horizontal ou segundo qualquer eixo oblíquo.

Os centros de maquinagem como os apresentados nas figuras 6, 7 e 8, são máquinas que, mediante os seus eixos de trabalho disponíveis, permitem efectuar operações de maquinagem. Estes centros de maquinagem podem ser verticais, horizontais ou universais, e permitem realizar operações que eram executadas apenas por torneamento. Este tipo de máquinas é cada vez mais utilizado na indústria metalomecânica, substituindo por completo máquinas designadas por convencionais. Estes centros de maquinagem são máquinas que utilizam o comando numérico computadorizado, o que lhes permite que estas tenham maior autonomia de trabalho, comparativamente às máquinas de operações convencionais, cujas operações de maquinagem dependem totalmente do operador.

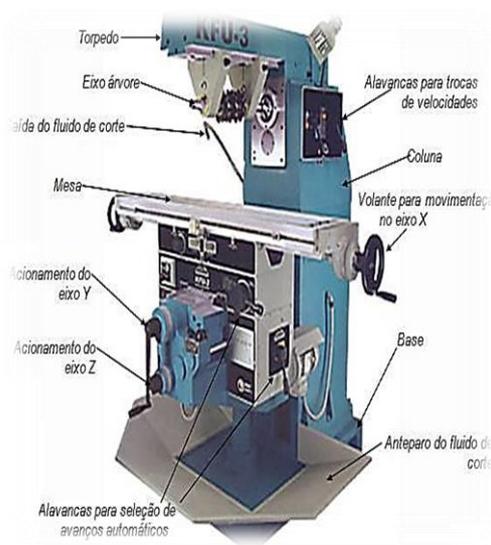


Figura 4 - Fresadora horizontal convencional (Cenfim.pt)

Figura 5 - Fresadora universal convencional (Cenfim.pt)

Mazak



Figura 6 - Centro de maquinagem vertical (Mazak.com)



Figura 7 - Centro de maquinagem universal (Grobgroup.com)

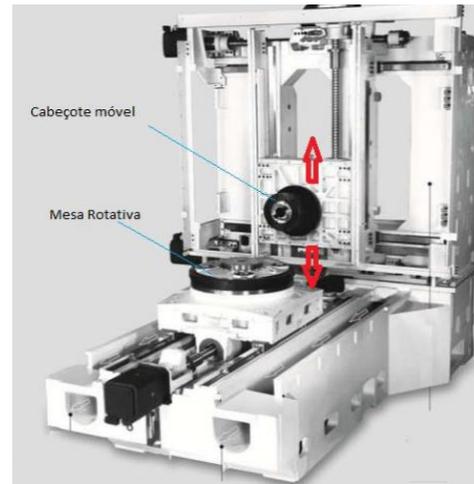


Figura 8 - Centro de maquinagem horizontal (Jyoti.com)

2.2.2 Fresadoras CNC

A indústria aeroespacial foi o grande motor do desenvolvimento das máquinas-ferramentas, isto porque a qualidade do trabalho exigido era dificilmente alcançado pelas máquinas convencionais, que para além de requerer elevado tempo de maquinagem, também se traduzia em resultados com elevada imprecisão e ineficiência. Era necessário que as máquinas passassem a ter mudança automática de ferramenta, alimentação de matéria-prima com recurso a paletes robotizadas, compensação de temperaturas e sistemas anti-vibráteis. Estes eram alguns dos pontos-chave que faltavam para melhorar os processos de maquinagem. É neste contexto de necessidade, descrito anteriormente, que se dá o desenvolvimento dos centros de maquinagem. Estas máquinas permitem a execução de várias operações de fresagem, furação e roscagem, num modo sequencial e automático com elevada precisão e em tempos mais reduzidos a nível de preparação, produção e paragens. Além das vantagens anteriormente referidas, também é de destacar a superior qualidade dos componentes fabricados, e maior fiabilidade tanto a nível de tolerâncias dimensionais, como ao nível de acabamentos superficiais, entre outros.

Para a realização de uma peça com uma geometria simples nas máquinas CNC, é requerido a construção de um programa cuja elaboração pode ser realizada manualmente, através da análise e cálculo das trajectórias das ferramentas. A introdução do programa pode ser realizada directamente na máquina, via teclado, ou via suporte externo: *RS232*, *USB*, *CD*, entre outros. Se se pretender maquinar uma peça de geometria com maior grau de complexidade, a programação realiza-se com a ajuda

de programas CAD/CAM, utilizando a geometria da peça desenhada que, após ser pós-processado o código de maquinagem, este é enviado para o comando da máquina através de suporte externo (Souza *et al.*, 2009). O programa CNC é redigido em relação a um triedro de referência, escolhido pelo programador, denominado por zero da peça, que é muitas vezes posicionado num ponto singular da peça acabada, a partir do qual se determinam as cotas dos pontos de posicionamento e pontos característicos das trajectórias das ferramentas. O programa descreve o tipo de operação a realizar, as trajectórias, localização da operação de maquinagem, o número da ferramenta a utilizar e os parâmetros de maquinagem, tais como a velocidade de rotação da árvore, o avanço, etc.

Actualmente, o CNC é incorporado em diversos, acabando processos automáticos de fabricação, tais como: fresagem, torneamento, rectificação, corte a Laser e polimento, entre outros. O sistema CAM pode ser utilizado na criação de programas CNC para maquinagem por fresagem, torneamento, furação, electroerosão, rectificação, etc. (Souza *et al.*, 2009). O CAM facilita a criação de componentes com geometrias complexas que seriam difíceis ou mesmo impossíveis de conseguir. Segundo Completo *et al.* (2009), antigamente era corrente afirmar que o controlo numérico computadorizado não poderia ser rentável para produções de médias séries. No entanto, com a ajuda dos métodos de programação actualmente existentes, e com a redução dos tempos improdutivo (troca de ferramentas e troca da mesa de trabalho), permite-nos afirmar que não existe qualquer limitação quanto à quantidade de peças a produzir.

Um centro de maquinagem, como o exemplo apresentado na figura 9, é uma máquina-ferramenta baseada numa fresadora, mas que pode apresentar em relação a esta, um conjunto de funções e possibilidades, tais como:

- Troca automática de ferramentas;
- Mesas amovíveis de trabalho;
- Sistema de calibração da ferramenta;
- Detecção automática de quebra da ferramenta;
- Eixos suplementares, rotativos e outros (4º e 5º eixos);
- Blindagens exteriores de protecção;
- Evacuadores automáticos de avara;
- Sistemas de lubrificação avançados.



Figura 9 - Centro maquinagem avançada (Haas.com)

Tal como nas fresadoras, os centros de maquinagem classificam-se de acordo com o posicionamento da sua árvore principal. Quando esta se encontra na posição vertical, designam-se por Centros de Maquinagem vertical, quando se encontram na posição horizontal, por horizontal. Pode-se ainda distinguir os centros de maquinagem pelo número de eixos segundo os quais é permitida a maquinagem de uma peça, que habitualmente são de 3, 4 ou 5 eixos. Quanto aos movimentos característicos realizados por um centro de maquinagem durante uma operação de fresagem, temos:

- Movimento Principal ou movimento de Corte, executado pela fresa que é animada de movimento circular uniforme a uma determinada velocidade de rotação;
- Movimento de Penetração, realizado pela fresa que está acoplada à árvore principal e penetra o material numa determinada dimensão;
- Movimento de Avanço, que é normalmente executado pela peça (excepto em máquinas de mesa fixa) que se desloca segundo um sistema de dois ou mais eixos e define a velocidade do deslocamento linear relativo entre a fresa e a peça, é normalmente expressa em milímetros (Hoffman, et al.2012).

O controlador numérico possibilita o controlo quase autónomo de máquinas e é aplicado principalmente em fresadoras, rectificadoras, máquinas de furação profunda, tornos, centros de maquinagem, e também em outros tipos de máquinas utilizados em processos de conformação plástica como quinadoras, curvadoras de tubo, etc. O comando numérico computadorizado permite o controlo simultâneo de vários eixos, através de uma lista de movimentos escrita num código específico. O painel de controlo numérico permite efectuar manualmente os deslocamentos dos eixos da máquina, e as outras teclas dispõem de funções de comando para definir o modo de trabalho representado por símbolos normalizados (Overby, 2011). A figura 10 apresenta um exemplo do controlador utilizado pela marca de máquinas Haas, idêntico ao da máquina usada nos ensaios experimentais

Na fresagem, o número de eixos refere-se ao número de graus de liberdade de um centro de maquinagem em posicionar ferramentas de corte (Cavalheiro, 1998). Nas máquinas com dois eixos, as ferramentas movimentam-se apenas nas direcções X e Y, permitindo apenas aplicações planares. Quando são máquinas com dois eixos e meio, acrescenta-se a maquinagem no eixo Z. Neste caso, este eixo pode ser posicionado, mas não pode ser usado em movimentos simultâneos com os eixos X e Y. É utilizado apenas para posicionar a ferramenta em níveis de profundidade de corte. É possível utilizar a maquinagem de dois eixos e meio para fabricar peças tridimensionais. As máquinas com três eixos movimentam os eixos X, Y e Z simultaneamente durante a maquinagem, permitindo a interpolação linear utilizando os três eixos simultaneamente, mas as interpolações circulares podem ser realizadas apenas em duas dimensões. Centros com mais de três eixos, acrescentam às características de maquinagem tridimensional um ou dois eixos de rotação controláveis, permitindo rotações em torno de um eixo paralelo e perpendicular à mesa. Os quatro eixos simultâneos funcionam como o descrito anteriormente, mas com a possibilidade do quarto eixo estar a ser utilizado também para efectuar movimentos de corte, simultaneamente com os três eixos cartesianos (Souza *et al*, 2009). As máquinas com cinco eixos, segundo Souza *et al*. (2009), para além dos três eixos cartesianos, permitem ainda rotações sob os eixos suplementares, como podemos verificar na figura 11. Os eixos adicionais estão associados a movimentos rotativos que podem ocorrer na mesa da máquina e/ou no eixo da árvore, dependendo do tipo de máquina e fabricante. O autor Souza *et al*. (2009) divide a fresagem de cinco eixos em três mais dois eixos e em cinco eixos simultâneos. Quando nos referimos a três mais dois eixos, significa que a remoção de material é realizada em movimentações de três eixos e a máquina pode posicionar-se em outras duas direcções. No caso de cinco eixos simultâneos, a remoção de material pode ser realizada em movimentações da ferramenta em cinco eixos simultaneamente.



Figura 10 - Controlador CNC (Haas.com)

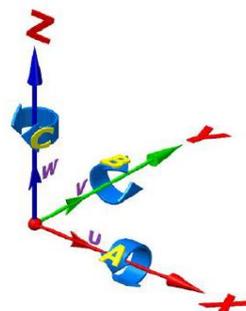


Figura 11 - Representação esquemática de cinco eixos de maquinagem

Os movimentos adicionais de um centro de maquinagem multi-eixos aumentam consideravelmente a capacidade de produzir peças maquinadas mais complexas e variadas. As máquinas multi-eixos podem ser do tipo:

- Mesa/Mesa;
- Árvore/Mesa;
- Árvore/Árvore.

Máquinas do tipo Mesa/Mesa, possuem ambos os eixos rotativos na mesa, como mostra a figura 12, com os eixos de translação X, Y e Z e 2 eixos de rotação, A e C.

Os centros de maquinagem do tipo Árvore/Mesa, têm um eixo rotativo na mesa e outro na árvore, trabalhando estes independentemente um do outro. Como se pode visualizar na figura 13, existem três eixos de translação X, Y e Z e dois eixos de rotação, neste caso os eixos B e C.

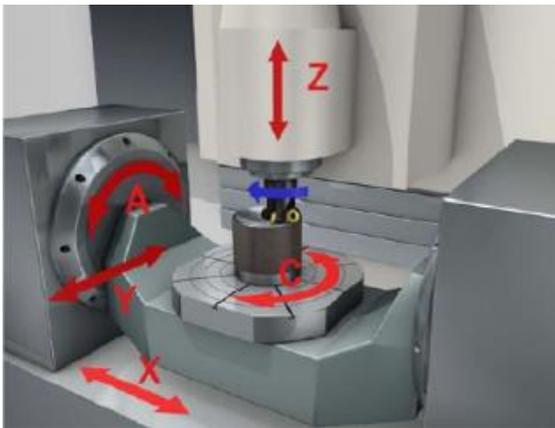


Figura 12 - Ilustração 3D de um centro de maquinagem do tipo Mesa/Mesa (Mastercam, 2011)

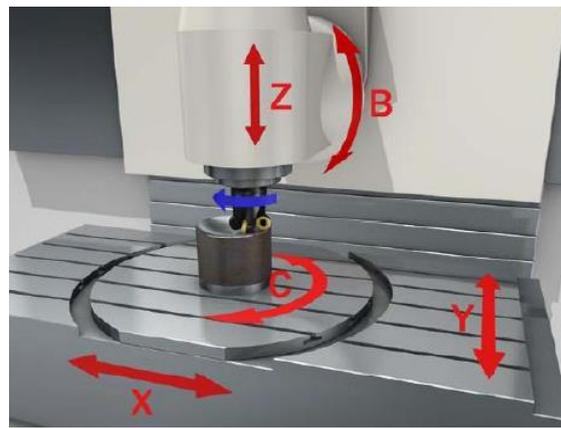


Figura 13 - Ilustração 3D de um centro de maquinagem do tipo Árvore/Mesa (Mastercam, 2011)

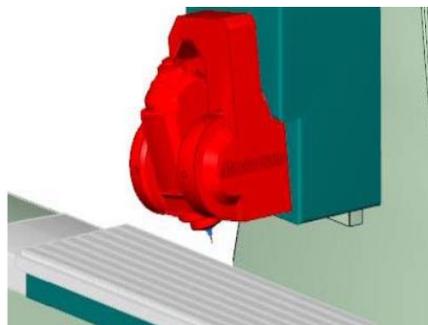


Figura 14 - Ilustração 3D de um centro de maquinagem do tipo Árvore/Árvore (Mastercam, 2011)

No caso das máquinas do tipo *Árvore/Árvore*, ambos os eixos de rotação se encontram na árvore, como podemos ver na figura 14. Tal como nos casos anteriores, existem três eixos de translação e dois eixos de rotação.

2.2.3 Parâmetros de corte

Os parâmetros de corte são determinados em função do material a maquinar, do material da ferramenta, da potência disponível para realizar a operação e do tipo de acabamento pretendido. Uma fresa executa normalmente uma ou um grupo das seguintes operações básicas de corte: radial, periférica ou axial. Através das variações dos métodos de fresagem, pode-se redireccionar a operação de corte nesses sentidos de avanço, em relação ao eixo de rotação da ferramenta. A fresa roda em relação à peça, perpendicularmente à direcção do avanço radial. Geralmente, na fresagem de disco e facejamento, usam-se as arestas de corte periféricas da ferramenta. Na fresagem em mergulho, usam-se as arestas de corte da face ou extremidade da ferramenta, quando ela avança axialmente, executando uma operação parcial de furação. Na preparação das operações de fresagem, deve-se estabelecer previamente uma série de definições. Definimos a dinâmica da fresa rotativa com um determinado diâmetro, figura 15, avançando contra a peça, com um diâmetro efectivo de corte.

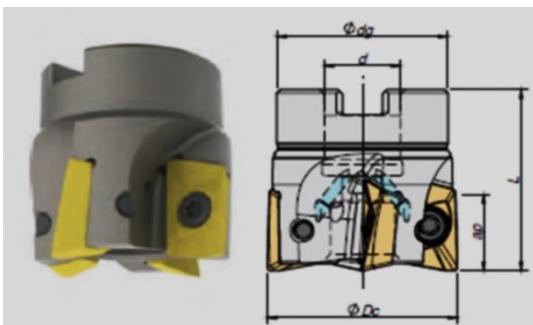


Figura 15 - Ilustração diâmetro de corte de uma ferramenta de corte (Palbit, 2016)

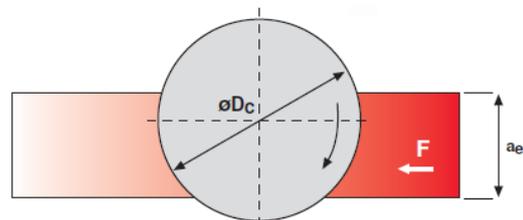


Figura 16 - Representação esquemática do diâmetro de corte (Palbit, 2016)

O diâmetro de corte (D_c) apropriado para determinado trabalho de maquinagem deve ser calculado, tendo em conta as dimensões da área da peça a trabalhar, como é exemplificado na figura 16. O cálculo do diâmetro de corte deve ser realizado através da equação (1) (Sandvik, 2010).

$$D_c \cong 1,3 - 1,5a_e \quad (1)$$

A velocidade de corte (V_c), normalmente expressa em m/min, indica a velocidade superficial a que a aresta de corte trabalha sobre a peça, figura 17. Este é um valor

específico da ferramenta de corte e um dos dados de corte que garante a execução eficaz das operações dentro do que é esperado, tendo em conta o tipo de ferramenta e o material da mesma. A velocidade de corte é calculada através da equação (2). Muitas vezes, tendo em conta o tipo de material a maquinar e o tipo de ferramenta de corte a utilizar, os fabricantes de ferramentas já definem os valores de referência para a velocidade de corte, como o exemplo apresentado na figura 18.

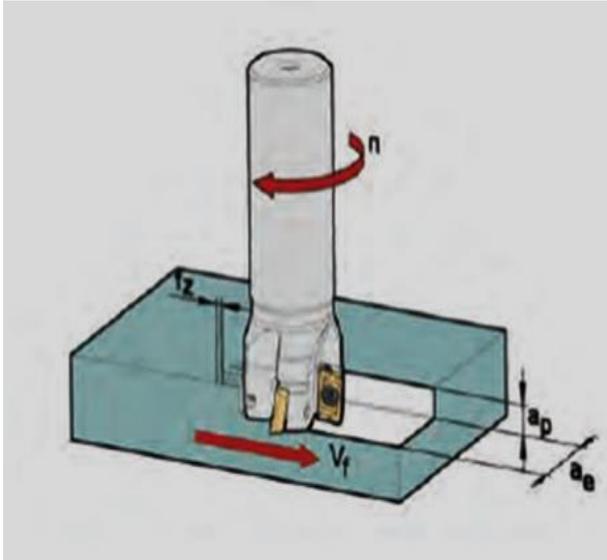


Figura 17 - Ilustração da velocidade de corte (Palbit, 2016)

$$V_c = \frac{n \cdot \pi \cdot D_c}{1000} \quad (2)$$

A velocidade do fuso corresponde ao número de rotações da fresa por minuto (n), figura 19. Este é um valor específico da máquina, e é calculado em função da velocidade de corte recomendada para uma determinada operação de maquinagem. A velocidade do fuso pode ser calculada através da equação (3) (Sandvik, 2010).

Material Group	V_c (m/min)	
	min	max
Non-alloy Steel < 600 N/mm ²	250	325
Non-alloy Steel < 800 N/mm ²	210	300
Alloy Steel 800 N/mm ² - 1000 N/mm ²	175	250
Alloy Steel 1000 N/mm ² - 1400 N/mm ²	125	210
Alloy Steel 1400 N/mm ² - 1600 N/mm ²	80	150
Ferretic/Martensetic Stainless Steel - Soft	120	175
Ferretic/Martensetic Stainless Steel - Hard	80	110
Cast Iron - Soft	210	250
Cast Iron - Hard	140	175
Aluminium Si < 2% - Soft	400	600
Aluminium Si 2 - 10% - hard	200	250
Copper/Copper Alloys - Soft	400	600
Brass - Soft	200	250
Hardened materials 46-54 HRc	80	130
Hardened materials 55-62 HRc	70	100
Hardened materials 63-70 HRc	50	90

Figura 18 - Velocidades de corte recomendadas por um fabricante de ferramentas (Palbit, 2016)

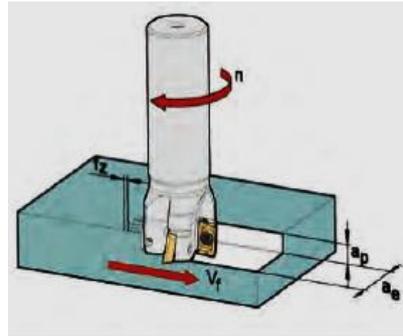


Figura 19 – Parâmetros de corte mais usuais na fresagem (Palbit, 2016)

$$n = \frac{V_c \cdot 1000}{\pi \cdot D_c} \quad (3)$$

O avanço por minuto (V_f), também conhecido como avanço da mesa, avanço da máquina ou velocidade de avanço, corresponde ao avanço da ferramenta em relação à peça, definida em unidade de distância por tempo, função do avanço por dente e do número de dentes da fresa. O avanço por minuto é calculado de acordo com a fórmula apresentada na equação (4).

$$V_f = n \cdot Z_n \cdot f_z \quad (4)$$

A espessura máxima da aparada é o mais importante indicador de limitação de uma ferramenta em uma determinada operação. As arestas de corte de uma fresa são desenvolvidas e testadas com um valor inicial recomendado, assim como valores mínimos e máximos.

O avanço por dente (f_z) permite definir o avanço da mesa no processo de fresagem. Como a fresa é uma ferramenta com várias arestas de corte, é necessário um valor para garantir o trabalho de cada aresta de corte em condições satisfatórias. Esta corresponde à distância linear percorrida pela ferramenta, enquanto um determinado dente está em processo de corte. O valor de avanço por dente é calculado a partir da espessura máxima recomendada da aparada. A equação (5) define o avanço por dente.

$$f_z = \frac{V_f}{n \cdot Z_n} \quad (5)$$

O número de dentes da fresa (z) varia bastante e serve para determinar o avanço da mesa, enquanto o número efectivo de dentes é o número de dentes em contacto com o material. O tipo de material, largura da peça, estabilidade, potência e acabamento superficial, determinam a quantidade de dentes necessária.

O avanço por rotação é um parâmetro usado para o cálculo do avanço e geralmente serve para determinar a capacidade de acabamento superficial produzido pela fresa. O

seu valor é determinado recorrendo à equação (6), sendo que este indica o quanto a ferramenta se desloca durante a rotação.

$$f = Z_n \cdot fz \quad (6)$$

A profundidade de corte corresponde ao volume de material que é removido da peça pela ferramenta. Trata-se da distância que a ferramenta penetra na superfície não maquinada. A largura de corte (ae), como mostra a figura 20, é a largura da peça que está sob a acção do diâmetro da fresa. Ou seja, a distância transversal em relação à superfície que está a ser maquinada ou, se o diâmetro da ferramenta for menor, corresponde à distância coberta pela ferramenta. A largura de corte deve ser ajustada tornando o valor dado pela equação (7).

$$ae = \frac{3}{4} D_c \quad (7)$$

A espessura média da apara (hm) é um valor importante para determinar a força específica e também para os cálculos da potência requerida. O seu cálculo é efectuado através da equação (8). O valor de ajuste do ângulo (ω_e) pode ser determinado por consulta do catálogo do fabricante das ferramentas de corte, a exemplo do apresentado na figura 21.

$$hm = \frac{360 \cdot fz \cdot ae}{\pi \cdot D_c \cdot \omega_e} \cdot \text{sinkr} \quad (8)$$

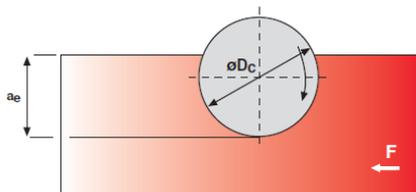


Figura 20 - Largura de corte (ae)
(Palbit, 2016)

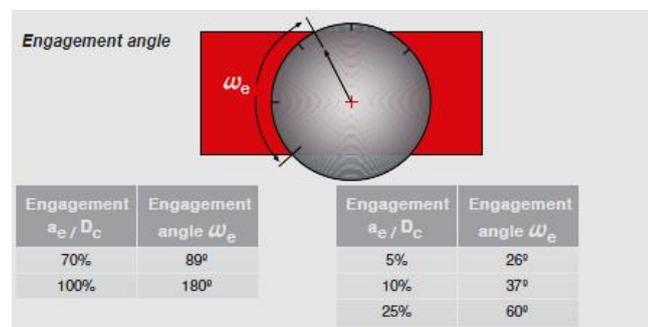


Figura 21 – Valor de ajuste do ângulo
 ω_e (Palbit, 2016)

A taxa de remoção de apara (Q) é o volume do material removido em um certo intervalo de tempo, e pode ser estabelecido usando os valores da profundidade, largura e avanço de corte. O cálculo da taxa de remoção é determinado pela equação (9).

$$Q = \frac{ae \cdot ap \cdot Vf}{1000} \tag{9}$$

O tempo de maquinagem, ou período de acção da fresa, é o comprimento de maquinagem dividido pelo avanço da mesa. O cálculo do tempo de maquinagem (T_c) pode ser realizado através da equação (10).

$$T_c = \frac{L}{V_f} \tag{10}$$

A força de corte específica é um factor de cálculo de potência, que deve ter em conta o material a maquinar e a espessura da aparta. A força de corte específica (K_c) pode ser obtida através da equação (11).

$$K_c = K_{c1} \cdot hm_m^{-mc} \tag{11}$$

A potência útil de corte (P_c) está directamente relacionada com uma máquina-ferramenta, em que a potência útil pode ser calculada para garantir que a fresa escolhida permite executar as operações de maquinagem, figura 22. O cálculo da potência útil é realizado recorrendo à equação (12).

$$P_c = \frac{ap \cdot ae \cdot Vf}{60000000 \cdot n} \cdot K_c \tag{12}$$

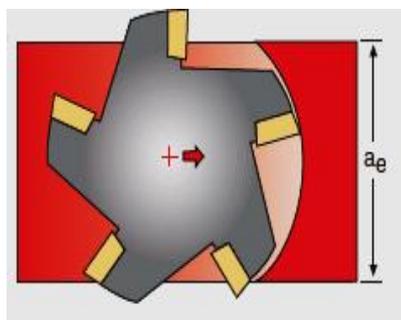


Figura 22 – Largura de corte que intervém na Potência útil da máquina (Palbit, 2016)

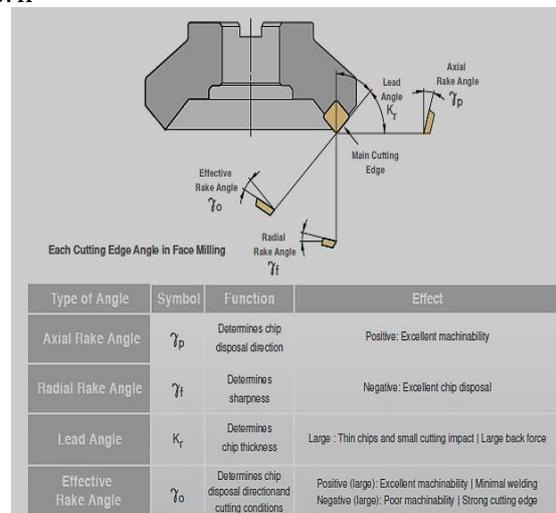


Figura 23 - Ângulos de posição de insertos em porta-ferramentas (Palbit, 2016)

Conforme se pode observar na figura 24, a selecção das geometrias dos insertos de corte foram divididas em três áreas de aplicação, que de forma simplista se dividem em:

- Geometrias de aplicação leve (L);

- Geral (M);
- Pesada (H).



Figura 24 - Tipificação das geometrias dos insertos de corte (Sandvik,2010)

O passo é a distância entre dentes consecutivos da fresa, ou seja a distância entre um ponto da aresta de corte para o mesmo ponto da aresta de corte seguinte. As fresas geralmente são classificadas como:

- Passo largo (L);
- Fino (M);
- Extra fino (H);

Na figura 25 podemos observar esta classificação retirada do catálogo do fabricante Sandvik. Os diferentes passos influenciam a estabilidade da operação, consumo do equipamento e adequação do material da peça. Um passo diferencial significa um espaçamento desigual dos dentes da fresa, e trata-se de um meio eficaz de se opor às tendências de vibração (Sandvik, 2010).



Figura 25 - Classificação do passo das fresas (Sandvik, 2010)

2.2.4 Avaliação das superfícies fresadas

A qualidade das superfícies produzidas pelo processo de maquinagem varia mediante o tipo de material, processo de fabrico, parâmetros e ferramentas utilizadas. A condição final de uma superfície maquinada é o resultado de um processo que envolve deformação plástica, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, vibração, tensões residuais e reacções químicas. Todos estes factores podem originar resultados diferentes na superfície maquinada. Assim, o termo integridade superficial é utilizado para descrever a qualidade de uma superfície. O conjunto de alterações que ocorrem na superfície de peças, devido à acção de ferramentas de corte ou outros processos de fabrico, é denominado integridade de superfície. O fim último da maquinagem é produzir peças mecânicas, com superfícies funcionais, precisão dimensional e geométrica adequada e, ainda, com o acabamento superficial requerido (Davim, 2005).

Dessa forma, o conceito de integridade superficial não pode ser definido apenas numa dimensão, abrangendo somente a textura da superfície ou forma geométrica. Esse termo engloba outras características da superfície trabalhada e das camadas abaixo dessa. As alterações superficiais podem ser classificadas em alterações da superfície da peça (acabamento) e alterações em camadas internas da peça (alterações sub-superficiais). O acabamento de uma superfície maquinada é a combinação de vários factores, podendo estes serem divididos em rugosidade, ondulações e falhas. A exigência de acabamento de um determinado componente deve estar prevista desde da fase de projecto (Kalpakjian, 1995).

Kalpakjian (1995) detalha os seguintes factores que devem ser considerados para a determinação do acabamento superficial de uma peça:

- Grau de acoplamento entre componentes;
- Coeficiente de atrito, desgaste e lubrificação;
- Resistência à fadiga e à corrosão;
- Resistividade eléctrica e térmica de contacto;
- Processamento posterior (cromagem, pintura, etc.);
- Aparência;
- Custo.

As ondulações consistem em irregularidades superficiais ou erros geométricos, cujos espaçamentos são maiores que as irregularidades consideradas rugosidades. Estas podem ser originadas por vibrações, flexões da ferramenta de corte e/ou da peça quando sujeita à força de maquinagem, temperatura originada durante o corte, erros de fixação da peça ou da ferramenta (Kalpakjian, 1995).

As falhas são interrupções na topografia típica de uma superfície, de carácter não intencional, inesperado e indesejável. Podem ser causadas por defeitos inerentes de inclusões, fracturas, bolhas, ou podem ser originadas durante o processo de corte (Kalpakjian, 1995).

2.2.4.1 Rugosidade superficial

A rugosidade de uma superfície é composta de irregularidades finas ou de erros micro-geométricos resultantes da acção inerente ao processo de corte (marcas de avanço, aresta postiça de corte, desgaste da ferramenta, etc.).

Na maquinagem, as ondulações e falhas devem ser evitadas na obtenção de uma superfície, pois representam erros. A rugosidade, por sua vez, é um parâmetro especificado de acordo com a aplicação da superfície maquinada da peça. Em geral, uma peça maquinada é analisada em termos de dimensão, forma, orientação e rugosidade. A peça é analisada depois da operação de maquinagem, ou mesmo durante, de acordo com as tolerâncias e rugosidade especificadas no projecto. Por sua vez a rugosidade, é afectada por um elevado número de variáveis, e pode ser estimada através diversos parâmetros, tais como:

- Parâmetros de amplitude, determinados por alturas dos picos, profundidades dos vales, ou pelos dois, sem considerar o espaçamento entre as irregularidades ao longo da superfície;
- Parâmetros de espaço, determinados pelo espaçamento do desvio do perfil ao longo da superfície;
- Parâmetros híbridos, determinados pela combinação dos parâmetros de amplitude e de espaço.

De todos os parâmetros apresentados, o parâmetro de amplitude da rugosidade média R_a é o mais utilizado como parâmetro de controlo do processo, uma vez que alterações do seu valor representam alterações no processo de fabrico, como o produzido pelo desgaste da ferramenta de corte. Um exemplo da representação gráfica dos valores de R_a pode ser observado na figura 26. Como representa um valor médio, é um parâmetro estável, que não é influenciado pelos efeitos ocasionais. Embora o parâmetro R_a seja bastante vantajoso, este isoladamente, não é suficiente para identificar algumas características importantes da superfície, pois superfícies geometricamente diferentes podem apresentar valores de R_a muito próximos e com parâmetros e características de trabalho bastante diferentes (Machado, 2009).

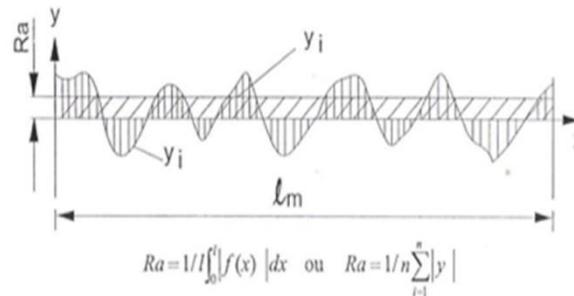


Figura 26 - Representação gráfica da rugosidade média aritmética R_a

Nas operações de fresagem em que a ferramenta utilizada é nova, a área de contacto é uniforme entre as superfícies e são, baixos níveis de vibração e não se forma aresta postiça de corte. Nesta situação, a rugosidade será teoricamente formada pelas marcas de avanço de corte deixadas na peça pela ferramenta. A rugosidade é influenciada por vários parâmetros de maquinagem, incluindo a geometria da ferramenta de corte, a geometria da peça, o material da peça, as condições de corte e o material da ferramenta.

Em geral, a rugosidade é menor, ou seja, o acabamento é melhor quando:

- As flexões geradas por esforços de maquinagem ou vibrações são pequenas;
- A ponta da ferramenta possui um raio arredondado;
- A ferramenta e a peça estão correctamente posicionadas e centradas;
- O material da peça está isento de defeitos metalúrgicos (fissuras, bolhas, lacunas, inclusões, etc.);
- O eixo principal da máquina-ferramenta está correctamente alinhado e as guias não possuem desgaste;
- A aresta de corte não apresenta desgaste ou quebra;
- O corte ocorre sem formação de aresta postiça de corte.

As condições de corte têm grande efeito sobre a rugosidade, sendo o avanço o parâmetro mais influente, isto é, a altura dos picos e a profundidade dos vales das marcas de avanço tendem a aumentar em proporção quadrática ao avanço. Em velocidades de corte baixas, pode ocorrer a formação da aresta postiça de corte, originando uma superfície com um acabamento de qualidade inferior. Um aumento do avanço com velocidades de corte baixas, resulta numa superfície com acabamento fraco. Isso é normalmente atribuído a um aumento da dimensão da aresta postiça de corte da ferramenta. O efeito da aresta postiça de corte no acabamento superficial é atribuído ao facto de que partes dela são cortadas durante o processo, e permanecem agarradas à superfície da peça durante o processo de maquinagem. Portanto, o acabamento melhora quando se aumenta a velocidade de corte, porque provoca o desaparecimento da aresta postiça de corte. Além disso, o aumento da temperatura

cria uma menor resistência ao corte do material, contribuindo para a redução das forças de maquinagem e, conseqüentemente, para a melhoria do acabamento. Porém, o aumento da velocidade de corte é obtido através do aumento da rotação do eixo-árvore, que pode atingir valores que originam vibrações e que prejudicam o acabamento da superfície da peça (Machado, 2009).

A profundidade de maquinagem aumenta as forças envolvidas no corte e, com isso, o risco de ocorrerem flexões no material. A altura das ondulações também é incrementada com a profundidade de corte.

A máquina-ferramenta deve ser rígida, não possuir erros de alinhamento e os seus movimentos têm que ser precisos, para que a qualidade do acabamento não seja afectada. Para além disto, é recomendada:

- Potência suficiente para manter a velocidade e o avanço previstos;
- Resiliência suficiente para evitar flexões;
- Rigidez e amortecimento contra vibrações;
- Possuir uma base adequada para minimizar vibrações e sua transmissão para outras máquinas;
- Exactidão no fabrico dos componentes, evitando desalinhamentos;
- Meios adequados para suportar rigidamente a peça e a ferramenta.

A composição química, dureza, microestrutura e consistência metalúrgica do material da peça, são factores que também influenciam o acabamento. O acabamento, em geral, pode ser melhorado da seguinte forma:

- Composição química desfavorável ao aparecimento da aresta postiça de corte;
 - Alta dureza e baixa ductilidade;
 - Granulometria fina e alta dureza dos microconstituintes;
 - Consistência nas propriedades ao longo de toda a secção transversal.
- (Machado, 2009)

2.2.5 Vibrações na fresagem

Ao longo dos últimos anos, têm vindo a ser desenvolvidos vários estudos com o objectivo de aumentar os limites da estabilidade do processo de maquinagem, o que pode ser realizado de forma passiva, ou activa. Os métodos passivos, alteram normalmente as características dinâmicas do sistema máquina/fixação/ferramenta, aumentando a sua rigidez dinâmica, ou seja, a sua capacidade de resistir ou absorver vibrações, melhorando de forma geral os limites de estabilidade no processo de maquinagem (Wang, 2010). Em contrapartida, nos métodos activos, as vibrações são monitorizadas durante o processo de maquinagem, e as características dinâmicas do sistema máquina/fixação/ferramenta podem ser alteradas de acordo com as

necessidades (Hajikolaie, 2010). Uma outra via de atenuar as vibrações no processo de maquinagem é por meio da interrupção do mecanismo de regeneração ou auto-excitação, ao invés de se alterar as características dinâmicas do sistema máquina/fixação/ferramenta.

Como já referido, a maquinagem dos materiais é constantemente acompanhada por vibrações entre a peça e a ferramenta. O nível máximo das vibrações tolerável, ou seja, a máxima amplitude das vibrações num processo de maquinagem, depende do modo de operação, podendo ser dividido em dois níveis:

- Operações de desbaste: o que determina o efeito das vibrações é principalmente o desgaste/vida da ferramenta;
- Operações de acabamento: a qualidade da superfície e precisão dimensional são os parâmetros que determinam o nível máximo das vibrações.

Existe uma relação entre as vibrações durante o processo e o resultado do trabalho, sendo que em trabalhos com baixa amplitude de vibração, a vibração é provocada pelo movimento relativo entre a ferramenta e a peça e é função da combinação do avanço e da velocidade de corte. A rugosidade cinemática pode ser teoricamente calculada em função do diâmetro da ferramenta e do avanço por dente. A parte superior da figura 27 mostra as relações geométricas para esta condição. Os valores da rugosidade representam uma medida relativa para a estabilidade do processo. Um processo estável pode ser caracterizado por boa qualidade da superfície e reduzido desgaste de ferramenta, enquanto um processo instável está associado a agravamento do acabamento da superfície e desgaste pronunciado da ferramenta (Altintas, 2000).

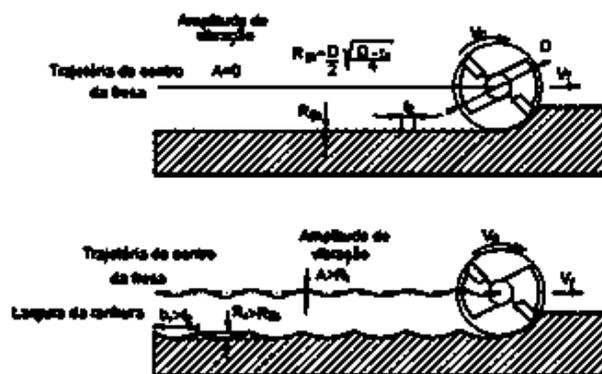


Figura 27 - Figura Efeito das vibrações na trajetória da ferramenta de corte (Altintas, 2000)

As vibrações podem ser originadas por mais que uma fonte. Essas fontes podem ser:

- Vibrações externas à máquina-ferramenta;
- Vibrações geradas pela própria maquinagem;
- Vibrações por falta de homogeneidade da peça;

- Vibrações por corte interrompido;
- Vibrações geradas pela máquina-ferramenta.

As vibrações externas às máquinas-ferramentas são normalmente geradas por outras máquinas. As vibrações criadas pela própria máquina, ou vibrações regenerativas ou auto-excitadas, são causadas por forças dinâmicas resultantes de desequilíbrios sendo algumas destas forças resultantes do próprio corte do material pela ferramenta. Segundo Altintas (2000), estas últimas resultam de um mecanismo de auto-excitação que surge da geração da apana durante as operações de maquinagem. Inicialmente, um dos modos estruturais do sistema máquina-ferramenta-peça é excitado por forças dinâmicas de corte. As vibrações crescentes elevam as componentes da força de maquinagem e podem provocar desgaste excessivo ou avaria da ferramenta, provocando um agravamento da qualidade da superfície e uma baixa precisão dimensional da peça.

As vibrações por falta de homogeneidade da peça resultam na variação da dureza que promovem pequenos choques sobre a ferramenta. Na ausência de amortecimento originam vibrações de grande amplitude, que podem afectar a qualidade da superfície produzida.

As vibrações por corte interrompido dizem respeito a operações de maquinagem com corte interrompido, em que a ferramenta sofre impactos consideráveis, originando forças dinâmicas periódicas de elevada amplitude e que provocam níveis de vibração indesejados.

Vibrações provocadas pela própria máquina surgem em accionamentos de componentes dotados de movimento rotativo e componentes com movimento de translação. Estas vibrações podem-se apresentar sob duas formas já descritas anteriormente: livres e forçadas. As vibrações forçadas são causadas por rotação de massas desequilibradas, por engrenagens, correias, rolamentos com irregularidades.

Os parâmetros de corte também podem ter influência nas vibrações e estabilidade do processo. A profundidade de corte axial incrementa o processo de auto-excitação das vibrações. Geralmente, o efeito das profundidades de corte radial e axial sobre a estabilidade em processos de fresagem são similares. A velocidade de corte afecta a estabilidade de duas formas distintas. A primeira delas está associada ao processo de amortecimento que ocorre em velocidades de corte muito baixas, onde o aumento da estabilidade é bastante significativo. O outro efeito ocorre em velocidades de corte mais elevadas, e está associado à diferença de fase entre as ondulações referentes a cortes subsequentes. O efeito do avanço sobre a estabilidade geralmente não é muito

forte, e está relacionado com o seu efeito sobre a pressão específica de corte (Tlustý, 2000).

Quanto maior o número de dentes da ferramenta de corte utilizada na maquinagem, simultaneamente maior será a tendência para o aparecimento de vibrações regenerativas, devido ao efeito acumulativo da diferença de fase entre as ondulações de cortes subsequentes (Tobias, 1965).

2.3 Ferramentas de corte

As ferramentas de corte utilizadas nos processos de maquinagem mecânica são constituídas por arestas cortantes, que têm como finalidade o arranque da peça. A geometria da ferramenta de corte exerce influência na maquinagem dos materiais, mais precisamente, na forma da zona de deformação da peça, na distribuição da tensão, na temperatura e no esforço de corte.

Como já referido, as máquinas não estariam tão evoluídas se não fosse a igual evolução das ferramentas de corte. O papel desempenhado pelas ferramentas de corte é de extrema importância neste aspecto. Há três parâmetros que influenciam a capacidade de uma ferramenta de corte, são o substrato, o revestimento e a geometria de corte. Uma ferramenta de corte tem de aliar algumas características relevantes, conforme será referido adiante. O aparecimento de novas ferramentas de corte, sobretudo nas últimas duas décadas, contribuiu para o desenvolvimento tecnológico da maquinagem e, com isso, a capacidade de maquinar novos materiais (Rosa e Diniz, 1999).

Existem no mercado ferramentas compostas de aço rápido, carboneto metálico e Cermet, cerâmica convencional, que pode ser reforçada com fibras de silício ou nitreto de boro cúbico e diamante policristalino. Além dos variados materiais dos substratos, os tipos e processos de revestimento também acompanharam a evolução das ferramentas de corte. Nos dias de hoje, mais de cinquenta por cento das ferramentas produzidas de metal duro são revestidas pelo processo de PVD ou CVD.

2.3.1 Ferramentas para fresagem

Antes de se dar início a um trabalho de maquinagem deve-se seleccionar as ferramentas de corte apropriadas, tendo em conta o tipo de operação, material a maquinar, parâmetros de corte e o tipo de máquina disponível. A selecção da ferramenta deverá ser feita tomando em consideração alguns factores, tais como a escolha de uma ferramenta com o maior diâmetro e rigidez para a realização da operação, bem como com o menor comprimento em balanço que a operação permitir.

Outro aspecto a ter em atenção prende-se com as arestas de corte da fresa. As fresas com corte ao centro permitem operações de abertura de caixa, furação e mergulho, enquanto que as fresas sem corte ao centro apenas permitem operações periféricas e de abertura de rasgos. Para além da disposição das arestas de corte é importante ter em análise o número de arestas de corte. O aumento do número de arestas de corte aumenta a resistência à flexão da fresa, embora faça com que o espaço para a saída das aparas seja menor. Assim podemos dizer que um número menor de arestas de corte é indicado para operações de desbaste, dado que permite o escoamento de aparas de dimensão superior, aumentando a taxa de remoção de material. No entanto, a qualidade superficial obtida será afectada. Pelos factores referidos anteriormente, recomenda-se a realização de operações de acabamento a utilização de fresas com o maior número possível de arestas de corte. A utilização de um número maior de arestas de corte contribui para que o tamanho da apara seja menor, fazendo com que seja possível obter melhores acabamentos superficiais. Um dos outros factores, diz respeito ao ângulo da hélice. O aumento do número de canais torna a carga nas faces individuais mais homogénea e, conseqüentemente, permite acabamentos melhores. No entanto, ângulos de hélice elevados promovem um aumento da carga vertical ao longo do eixo da fresa.

Mediante os tipos de operações de maquinagem que se pretendam realizar, as ferramentas de corte podem assumir diferentes tipos e materiais. Um exemplo são as fresas, que podem ter arestas de corte ao longo de toda a sua superfície frontal (topo), como também podem ter lâminas de corte numa parte da sua extensão lateral, o que permite realizar desbaste periférico. As ferramentas de fresagem disponíveis no mercado, independente do seu fabricante, podem ter diversas formas, tamanhos, revestimentos, ângulos de ataque e número de lâminas. As lâminas de corte não actuam em simultâneo, mas sim alternadamente, durante a trajectória circular de maquinagem (Chiaverini, 1977).

Dentro das fresas do tipo periféricas e faciais podemos destacar:

- Fresas de topo radial;
- Fresa de disco;
- Fresa de perfil.

Na tabela 2 são apresentados os vários tipos de fresas. As fresas de topo radial possuem arestas cortantes periféricas, com rasgo de chaveta para fixação no fuso.

Tabela 2 – Tipos de fresas

		
Disco	Topo Radial	Perfis
		
Esféricas	Ripa	Tórica

As fresas de disco possuem arestas de corte nos lados e também na periferia. As facas estão em zig-zag, de modo que cada faca alternada corte num lado determinado do rasgo. Isto permite que sejam realizados cortes profundos e fortes. As fresas de perfil têm as arestas de corte periféricas localizadas num cone e não num cilindro. Esta geometria permite dar origem a um ângulo simples ou duplo (Dormer, 2017).

No que diz respeito as fresas cilíndricas de topo, estas podem ser (tabela 2):

- Tóricas;
- Esféricas;
- Raio de canto;
- Ripa;
- Mini fresa.

As fresas cilíndricas de topo tórica, podem ser descritas resumidamente como fresas que possuem um ângulo recto na extremidade da fresa e permitem obter faces perpendiculares. As fresas cilíndricas de topo esférico apresentam nos extremos das fresas uma semiesfera. As fresas de topo plano boleado ou de ponta esférica, permitem obter superfícies boleadas, cujo raio é o raio de bico da própria fresa. As fresas cilíndricas com raio de canto são muito semelhantes às anteriores, mas com a característica de apresentar um pequeno raio na extremidade. As mini-fresas cilíndricas de topo são iguais às anteriormente apresentadas, mas com um diâmetro de corte de 0,5 mm até 1 mm. Dentro das fresas cilíndricas de topo, temos ainda a fresa de topo e ripa, que têm a particularidade de, para além do poder de corte no topo, conseguir cortar material nas laterais. Para além das ferramentas sólidas, temos também as ferramentas de insertos intercambiáveis, onde a aresta de corte é separada da haste/suporte e que pode estar brasada, soldada ou fixa por parafuso ou alavanca. Os insertos são normalmente constituídos por carboneto de tungsténio, diamante policristalino ou nitreto de boro cúbico. Alguns exemplos esquemáticos de insertos de corte e de porta-insertos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Tipos de insertos e porta insertos (Palbit, 2010)



A utilização de insertos de corte tem algumas vantagens, das quais podemos destacar as seguintes:

- Só uma pequena porção da ferramenta é necessária para realizar o corte;
- Devido ao pequeno tamanho do inserto, a sua fabricação é mais fácil do que uma ferramenta sólida do mesmo material,

- Redução de custos devido ao suporte poder ser constituído por um material mais barato e robusto.

Em algumas situações, os insertos são melhores do que as ferramentas inteiriças, porque combinam a robustez do suporte com a dureza do inserto. Por sua vez a utilização de insertos também implica algumas desvantagens, em que podemos destacar as seguintes:

- A junção do suporte e inserto reduz a rigidez;
- Emperos térmicos no porta-ferramenta e insertos;
- Fractura dos sistemas de fixação dos insertos.

2.3.2 Materiais de ferramentas de corte

O processo de maquinagem, como já foi referido, baseia-se na remoção de material, utilizando como ferramenta um material mais duro e mecanicamente mais resistente que o material da peça a maquinar. O aparecimento de novos materiais e ligas estruturais, com melhores propriedades a nível de resistência mecânica e dureza, contribuíram para a produção de novas e melhoradas ferramentas de corte. As propriedades necessárias num material para fabricação de ferramentas de corte são (Matsumoto e Diniz, 2000):

- Alta dureza;
- Tenacidade suficiente para evitar a fractura;
- Elevada resistência à abrasão;
- Alta resistência à compressão;
- Alta resistência ao corte;
- Boas propriedades mecânicas e térmicas a altas temperaturas;
- Alta resistência ao choque térmico;
- Alta resistência ao impacto;
- Ser quimicamente inerte.

Estas propriedades não se reúnem num único material, mas, dependendo da aplicação, priorizam-se algumas delas, para que se possam reunir. As ferramentas de corte utilizadas actualmente na indústria são de várias naturezas, podendo ser aços rápidos, metal duro, cerâmicos, Cermets, ultraduros, etc.

2.3.3 Aços rápidos

Os aços rápidos podem ser classificados em duas categorias, segundo a AISI:

- Aços rápidos ao Tungsténio – Grupo T;
- Aços rápidos ao Molibdénio – Grupo M;

Os aços rápidos são aços fortemente ligados, em que os principais elementos de liga são o Tungstênio, no estado recozido, sendo a sua microestrutura constituída por uma dispersão de carbonetos complexos numa matriz ferrítica. Também o processo de fabrico influencia a dimensão dos grãos dos carbonetos, que tendem a crescer durante a solidificação (Sandvik, 2010).

Os diferentes elementos de liga e o seu efeito nos aços rápidos são:

- W e Mo – formam carbonetos muito duros e aumentam a dureza a quente;
- V – forma carbonetos muito duros e aumenta a resistência ao desgaste;
- Cr – forma carbonetos facilmente solúveis e aumenta a profundidade de têmpera;
- Co – não forma carbonetos, mas aumenta a dureza a quente.

O Crómio aparece com uma percentagem entre 3% e 5%, o que justifica um bom compromisso entre a dureza e tenacidade. Este elemento de liga é responsável pela elevada temperabilidade dos aços rápidos, endurecendo por completo mesmo em secções elevadas. Os aços rápidos ao Cobalto têm maior dureza a quente e resistência ao desgaste. Do grupo de aços rápidos com W e Mo, destaca-se o aço M2, de elevada tenacidade e baixo custo, utilizado em ferramentas de geometria complexa para corte ligeiro e baixas velocidades de corte. As ferramentas de aço rápido sofreram dois grandes desenvolvimentos, no sentido de melhorar as suas características, os quais tiveram como origem:

- Fabrico através da metalurgia do pó, ou pulverometalurgia (prensagem e sinterização);
- Revestimento através de CVD;
- Revestimento através de PVD (Sandvik, 2010).

são apresentados, alguns exemplos de aços rápidos.

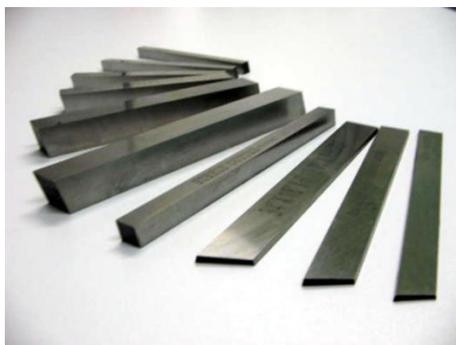


Figura 28 - Lâminas em aço rápido HSS

2.3.4 Metal Duro

O maior avanço na área dos materiais para ferramentas de corte foi dado com a descoberta do aço rápido e o segundo com a descoberta do metal duro, sendo que este último permitiu aumentar em cerca de dez vezes (de 35 m/min para 300 m/min, ou mesmo mais) (Stemmer, 1995). O material desenvolvido na Alemanha inicialmente continha WC + Co e mostrou-se muito eficiente na maquinagem de ferros fundidos cinzentos, mas com baixa resistência ao desgaste na superfície de saída, durante a maquinagem dos aços. Para ultrapassar essa limitação, adicionaram então TiC, TaC e/ou NbC aos WC + Co, melhorando o desempenho durante a maquinagem dos aços. As razões que contribuíram para a melhoria do desgaste na superfície de saída durante a maquinagem de aços foram:

- Os carbonetos adicionados terem maiores durezas que o WC, apresentando maior resistência ao desgaste por abrasão;
- A solubilidade dos carbonetos adicionados ser muito menor que a do WC, o que inibe a difusão, um dos mecanismos de desgaste a altas temperaturas;
- A estabilidade química dos carbonetos adicionados ser maior que a do WC, o que implicou maiores dificuldades de dissolução e da difusão desses elementos.

As ferramentas de carbonetos sinterizados são as mais utilizadas na indústria, devido à possibilidade de combinações da sua composição química, obtendo-se as propriedades desejadas de dureza, resistência ao desgaste e tenacidade. Na figura 29, podemos ver alguns exemplos de insertos de corte em metal duro. O carboneto de Tungstênio pode estar só ou combinado com outros carbonetos, como o Carboneto de Vanádio, Carboneto de Nióbio, Óxido de Crômio e Carboneto de Tântalo. O Cobalto é um elemento aglomerante, tendo como função ligar as partículas duras e garantir a tenacidade do material (Sandvik, 2010). Com o desenvolvimento de uma grande quantidade de carbonetos para diferentes aplicações pelos fabricantes de ferramentas de corte de metal de duro, e de forma a normalizar esta situação, a ISO criou uma classificação para os carbonetos, como podemos visualizar na figura 30. A classificação efectuada pela ISO tem como objectivo fazer com que os utilizadores reconheçam as qualidades disponíveis pelos fabricantes e seleccionem para as suas aplicações os carbonetos mais adequados (Stemmer, 1995). Para tal, a ISO recomenda o agrupamento dos carbonetos sinterizados, em três grandes classes:

- Grupo P, que abrange a maquinagem de materiais ferrosos de apara longa (aços c/ e s/liga e as fundições maleáveis);
- Grupo M, que engloba a maquinagem de materiais mais difíceis, como por exemplo os aços inoxidáveis austeníticos, aços refractários, aços com Manganês, etc.;

- Grupo K, compreende a maquinação de materiais de apara curta, como ferros fundidos, aços endurecidos e materiais não ferrosos (ligas de Al, Cu e polímeros). Este grupo na última década foi subdividido em três novos grupos: N, S e H.

Em suma, segundo a norma ISO/ANSI, os materiais a maquirar na verdade estão agrupados em seis grupos de carbonetos sinterizados. Normalmente, escolhemos um material de referência para definir as suas características e condições de corte (Sandvik, 2010).



Figura 29 - Ferramentas em metal duro sem revestimento (wattool.com)

ISO/ANSI	Material de referência:	ISO	Material	HB (Brinell)
P	Aços Material de referência: Aço baixa-liga	P	Unalloyed steel	125-220
N	Aços inoxidáveis Material de referência: Aço inoxidável austenítico	M	Low-alloyed steel	220-280
M	Ferros fundidos Material de referência: Ferro fundido branco Ferro fundido nodular	K	High-alloy steel	280-380
S	Ligas de alumínio Material de referência: Fundida, não envelhecida	M	SS - Ferrito/martensítico	200-330
H	Ligas resistentes ao calor Material de referência: À base de Ni	M	SS - Austenítico	200-330
H	Aços endurecidos Material de referência: Endurecido e temperado	K	SS - Austenítico-ferrítico (Duplex)	230-260
		K	Malleable cast iron	130-230
		K	Grey cast iron	180-245
		K	Nodular cast iron	160-250
		S	Heat Resistant Super Alloys	200-320
		H	Hardened Steels	40-55 HRC

Figura 30 - Classificação ISO dos graus de metal duro (Palbit, 2016)

2.3.5 Cermets

Os Cermets tiveram dois factores que contribuíram para o seu aparecimento. O primeiro foi a descoberta de que a adição de TiO aumentava significativamente a resistência ao desgaste, durante a maquinação dos aços. O segundo factor foi a escassez de tungsténio, durante a Segunda Guerra Mundial, que fez com que fosse necessário o desenvolvimento de um material com características similares ao metal duro. Embora o registo da patente do Cermet tenha a data de 1931, só foi a partir de 1970 que o Cermet entrou realmente no mercado (Kolaska e Dreyer, 1990). Os Cermets são materiais formados pela mistura de material cerâmico numa matriz metálica. A parte cerâmica é formada por compostos refractários, não metálicos, podendo estes ser:

- TiC;
- TiN;
- WC;

- Tântalo;
- Nióbio.

A parte metálica corresponde ao aglomerante com menor ponto de fusão, sendo por exemplo, Cobalto, Níquel ou Molibdênio. Deve ser aplicado numa gama de velocidades inferior à aconselhada para os cerâmicos e superior à dos carbonetos sinterizados. É utilizado preferencialmente em operações de acabamento ou desbaste ligeiro, em torneamento e fresagem. Conforme já referido, este material é constituído por TiC, TiN, e geralmente tem o Níquel como elemento de ligação, para além da presença de outros elementos, como Al, Co, Mo ou compostos de Mo_2C , TaC, NbC, WC, TaN, entre outros. As ferramentas são aplicadas principalmente no acabamento dos aços, com altas velocidades e baixos avanços. As características principais são alta dureza a elevadas temperaturas e grande estabilidade química, com pouca tendência à difusão. O Cermet apresenta uma dureza elevada, garantida pela dureza do TiC em relação ao WC, o que garante aos Cermets uma maior resistência ao desgaste e permite maiores velocidades de corte. Como todos os outros materiais, os Cermets também apresentam algumas desvantagens, principalmente no que se refere às suas propriedades térmicas, possuem uma baixa condutividade térmica e elevado coeficiente de dilatação. O Cermet também possui um baixo coeficiente de resistência ao choque térmico, inferior ao do metal duro, daí a aplicação do Cermet só ser eficiente em avanços baixos, pequenas profundidades de corte e altas velocidades (operações de acabamento) na maquinagem dos materiais ferrosos. Devido à grande afinidade química do titânio com a maioria das ligas metálicas não ferrosas, a sua utilização fica restringida à maquinagem de materiais ferrosos (Sandvik, 2010). A figura 31 apresenta alguns exemplos de insertos de corte de Cermet com diferentes geometrias destinadas a diferentes aplicações de maquinagem.



Figura 31 - Insertos de corte em Cermet (Ceramtec.com)

2.3.6 Cerâmicos

Não existe na literatura uma definição clássica para os materiais cerâmicos que possa identificar prontamente este grupo de materiais. As cerâmicas, por vezes, são muito mais conhecidas pelas suas propriedades do que propriamente por uma definição clássica. A definição a seguir trata de uma união de pontos que identificam as cerâmicas descritos por diversos autores (Machado, 2009). As cerâmicas são compostas por elementos metálicos e não metálicos, geralmente na forma de óxidos, carbonetos ou nitretos. A maioria tem estrutura cristalina, mas em contraste com os metais, as ligações entre os elementos são iônicas ou covalentes. Os materiais cerâmicos, em geral, possuem as seguintes propriedades:

- São materiais refractários, capazes de suportar altas temperaturas sem perder resistência mecânica;
- Possuem alta resistência ao desgaste em operações de maquinagem;
- São materiais frágeis;
- Têm baixa condutividade térmica;
- Apresentam boa estabilidade química e térmica;
- Possuem boa resistência à fluência;
- Apresentam alta resistência à compressão e baixa resistência à tração.

Normalmente, as cerâmicas são utilizadas onde é necessário elevada dureza e resistência ao desgaste. As cerâmicas à base de alumina apresentam excelente inércia química durante a maquinagem de materiais ferrosos. Estes não apresentam tenacidade suficiente e, por esse motivo, não é possível criar quebra-aperas integrais nas ferramentas, o que faz com que a sua aplicação na maquinagem dos aços ao carbono e de baixa liga seja bastante afectada. Porém, quando se trata de aços com dureza elevada, acima de 45 HRC, as cerâmicas são aplicadas, principalmente, no corte contínuo. Quanto ao corte interrompido, ainda existem grandes limitações, excepto na fresagem de ferro fundido cinzento, no qual as cerâmicas à base de nitreto de silício mostram ser muito eficientes. No passado, o que limitava a aplicação das cerâmicas era a fragilidade que estas apresentavam. Com a introdução no mercado das cerâmicas mistas, cerâmicas reforçadas com SiC e cerâmicas à base de nitreto de silício, estas começaram a ser aplicadas até em cortes interrompidos, como na fresagem dos ferros fundidos cinzentos, com altas velocidades de corte e elevados valores de avanço. Isto só é possível porque o grau de tenacidade conseguido nesses insertos é significativo, relativamente aos materiais puros (Machado *et al.*, 2009).

As cerâmicas, de modo geral, possuem algumas propriedades melhores e outras piores que os Cermets e os metais duros. Apresentam maior dureza a quente, maior resistência à oxidação e menor afinidade química com o material da peça, enquanto o

metal duro possui maior tenacidade e maior resistência ao choque térmico (Machado *et al.*, 2009).

Os materiais cerâmicos mais utilizados como ferramentas de corte são o Óxido de Alumínio (Al_2O_3) e o Nitreto de Silício (Si_3N_4). Estes materiais são caracterizados pela sua elevada resistência ao desgaste, mas também pela sua fraca resistência ao choque. As principais vantagens da utilização de ferramentas de corte em material cerâmico são:

- Conservação da dureza durante o corte, até aos 1200°C ;
- Grande estabilidade química e resistência à oxidação e difusão (carbonetos sensíveis a altas temperaturas);
- Baixo coeficiente de atrito;
- Baixo coeficiente de dilatação térmica;
- Boa resistência à compressão;
- Deformação plástica nula.

Os materiais cerâmicos podem ser subdivididos em ferramentas de corte de dois tipos:

- Óxido de Alumínio (puro, misto e reforçado);
- Nitreto de Silício (Nitreto Silício e Sialon).

O Óxido de Alumínio puro tem valores de tenacidade e condutividade térmica baixos. Estas características não são positivas para a maquinagem, podendo ocorrer roturas frágeis e uma grande susceptibilidade aos choques térmicos em operações de corte interrompidos ou se existirem inclusões no material a maquinar. A adição de pequenas quantidades de Óxido de Zircónio, Óxido de Crómio e Óxido de Titânio, permite melhorar a sua tenacidade. A composição química da cerâmica mista é constituída por Alumina, em cerca de 30% de uma fase metálica formada por elementos duros, tais como o Carboneto de Titânio (TiC) e/ou Nitreto de Titânio (TiN) (Sandvik, 2010).

As cerâmicas à base de Nitreto de Silício (Si_3N_4) são materiais com características diferentes das cerâmicas à base de Óxido de Alumínio, e têm em relação a estas a vantagem de ter maior resistência a choques térmicos e maior tenacidade. Têm uma dureza a quente superior aos carbonetos, mas não tem a estabilidade química das cerâmicas à base de Óxido de Alumínio, na maquinagem dos aços. O Sialon é constituído por uma base de Nitreto de Silício, em que parte do Silício é substituída por Alumínio, e parte do Azoto por Oxigénio, obtendo-se o composto da forma Si-Al-O-N. Têm resistência a temperaturas altas, superiores aos nitretos tradicionais, e também valores de coeficiente de dilatação térmica melhora (Stemmer, 1995). Na figura 32 podemos observar alguns exemplos de insertos de corte em material cerâmico.



Figura 32 - Insertos de corte em material cerâmico (Fawet.com)

2.3.7 Ultraduros

Os materiais ultraduros são materiais com dureza superior a 3000 HV. Os materiais ultraduros utilizados no fabrico de ferramentas de corte podem ser os seguintes:

- Diamantes naturais mono ou policristalino;
- Diamante sintético monocristalino;
- Diamante sintético policristalino (PCD);
- Nitreto cúbico de boro (cBN);
- Nitreto cúbico de boro policristalino (PcBN).

As ferramentas de diamante natural são usadas principalmente quando se requer bom acabamento nos componentes maquinados. Os diamantes sintéticos foram produzidos pela primeira vez na década de 1950, mas apenas no final da década de 1970 entraram no mercado como ferramentas de corte (Sandvik, 2010). O diamante sintético é obtido sujeitando o carbono, na forma de grafite, a temperaturas e pressões extremamente altas (da ordem de 2000°C e 7 GPa). Como na Grafite, os átomos de Carbono estão dispostos na forma hexagonal, mas após a sinterização, este transforma-se em diamante, possuindo uma estrutura CFC. Para ser mais económico, o processo é realizado na presença de um catalisador durante a reacção de transformação, normalmente o Cobalto. De forma similar, e pouco tempo depois de o Diamante sintético ser obtido, o hBN (Nitreto hexagonal de Boro) também foi transformado em cBN (Nitreto cúbico de Boro). O desenvolvimento do processo de obtenção do Diamante e do cBN a altas temperaturas e pressão, permitiu a produção de monocristais sintéticos na ordem de oito milímetros. Assim, é possível encontrar no mercado ferramentas de monocristais de Diamante com arestas de 8 mm de comprimento e 2 mm de espessura. As ferramentas policristalinas de Diamante e de cBN (PCD e PcBN, respectivamente) são obtidas pelo processo de pulverometalurgia usando monocristais de Diamante e cBN, respectivamente, ou pelo processo de CVD. Mais uma vez, deve-se adicionar catalisadores para acelerar a sinterização. Neste processo, pode-se obter uma variedade imensa de propriedades finais nos produtos que depende do tamanho dos grãos dos monocristais os quais variam com o tempo de

permanência na câmara de transformação, e do solvente/catalisador utilizado. Devido a problemas de instabilidade térmica no produto final de PCD, a variação dos solventes utilizados é restrita, sendo que acontece o contrário nos PcBNs), do grau de sinterização, etc., tornando possível desenvolver produtos para aplicações específicas (Heath, 1986).

A tenacidade dos policristalinos é muito superior à dos monocristais, portanto, o campo de aplicação é maior, apesar da dureza e da resistência ao desgaste dos monocristais ser maior. Esta propriedade pode ser melhorada ao aumentar-se o tamanho dos grãos dos policristais, pois inversamente ao que acontece com o metal duro, aqui a resistência ao desgaste cresce com o aumento do tamanho dos grãos (Clark e Sem, 1998).

O revestimento de Diamante conseguido pelo processo CVD, similarmente ao revestimento de metal duro, é obtido a baixa pressão. Uma mistura de gases à base de carbono e de hidrogênio são dissociados e depositados a altas temperaturas, aproximadamente 2000°C e a pressões abaixo da pressão atmosférica.

O Diamante sintético tem a limitação de não poder ser utilizado na maquinagem dos de aços ou de qualquer outro material ferroso, pois está sujeito a voltar ao estado de Grafite quando as temperaturas ultrapassarem os 700°C e na presença de oxigênio. Ao contrário, o PcBN tem-se mostrado excelente na maquinagem dos aços, ligas de níquel e ferros fundidos. O PcBN é termicamente mais estável, até temperaturas na ordem dos 1200°C, apresentando uma resistência ao ataque químico superior à do diamante. Os materiais mais representativos desta categoria são o Nitreto de Boro Cúbico (CBN) e o Diamante Sintético Policristalino (PCD). O primeiro é obtido com grão muito fino de Nitreto de Boro de estrutura hexagonal, que é sujeito a uma elevada compressão e temperatura. É um material muito abrasivo e, a nível de dureza, ocupa um lugar de destaque. Uma percentagem baixa de CBN, combinada com um aglomerante cerâmico, confere ao inserto de corte uma excelente resistência ao desgaste por abrasão e estabilidade química. Esta configuração permite uma aptidão especial para a maquinagem de aços e ligas fundidas endurecidas. Uma maior percentagem de CBN determina uma maior tenacidade. O campo de aplicação deste material é na maquinagem de materiais duros acima dos 48 HRC, o que permite obter um acabamento superficial muitas vezes comparável com um processo de rectificação (Stemmer, 1995).

O material mais duro é o Diamante monocristalino. O Diamante policristalino sintético (PCD) tem dureza ligeiramente inferior, sendo obtido através de uma tecnologia que utiliza elevadas temperaturas e pressões. A sua elevada dureza, superior a 6000 HV, confere uma elevada resistência ao desgaste por abrasão. Por esta razão, é o material

escolhido para o fabrico de mós e insertos de corte (Sandvik, 2010). A estrutura cristalina resulta de arranjos cúbicos de faces centradas com orientação desordenada, por forma, a evitar a propagação de uma fractura em qualquer direcção. As temperaturas na zona de corte nas ferramentas de PCD devem ser inferiores a 600°C.

As elevadas temperaturas na interface ferramenta/peça e altas velocidades, transformam o diamante em grafite nos materiais ferrosos, devido à afinidade química dos materiais, pelo que esta característica condiciona a sua utilização. Em contrapartida, é uma boa ferramenta para maquinagem de materiais não ferrosos, tais como ligas de Al e Si, e também em materiais compósitos de matriz metálica, plásticos reforçados, cerâmicos, metais duros sinterizados, assim como ligas de Cu e Zn. Em suma e como já referido, o PCD e CBN são os materiais ideais para a maquinagem de materiais abrasivos e ambos constituem tecnologia avançada no corte por arranque de aparas. Podemos observar na figura 33 alguns exemplos de insertos de corte em vários tipos de material ultraduro utilizados no processo de fresagem.

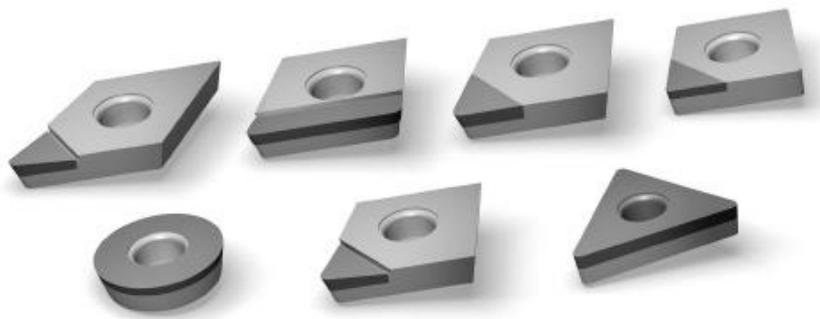


Figura 33 - Ferramentas de corte ultraduros (Diatec-Pforzheim.de)

2.3.8 Revestimentos em ferramentas de corte

A introdução de novos materiais, energia e novos processos de fabrico entraram em colisão com as questões ambientais devido à produção de resíduos, resultantes dos vários processos industriais. Este fenómeno foi crescendo e surgiram, na segunda metade do século XX, as organizações ambientais a alertar para a gravidade da situação. Com o aumento da contestação, gerou-se uma consciência global sobre a necessidade de controlar a emissão de poluentes. As várias acções desenvolvidas incidiram na procura de novos métodos de fabrico, utilização de planos de racionalização energética e utilização de produtos biodegradáveis e recicláveis. Embora as medidas a tomar encontrem alguma resistência devido aos custos económicos da sua implantação, tem-se assistido a algumas evoluções significativas (Davim, 2006).

Na década de 90, começaram a aparecer no mercado outras especificidades de revestimentos que melhoraram a eficiência do corte em função do material a maquinar, tipo de operação, entre outros. O aparecimento de insertos de fixação mecânica e os revestimentos, permitiram duplicar as velocidades e triplicar os avanços de corte. Os revestimentos contribuíram para o aumento do volume de peças produzidas por unidade de tempo, e reduziu os custos por peça com ferramentas. Actualmente, tanto em operações de torneamento e de fresagem, recorre-se à utilização de metal duro revestido. Os principais revestimentos são fabricados à base de nitretos, óxidos e carbonetos, dispostos em multicamadas, dos quais se destaca:

- Carboneto de Titânio;
- Nitreto de Titânio;
- Carbonitreto de Titânio;
- Óxido de Alumínio;
- Nitreto de Alumínio e Titânio;
- Diamante policristalino.

Os Carbonetos de Titânio e o Óxido de Alumínio são materiais muito duros, proporcionando uma boa resistência ao desgaste e estabilidade química, produzem uma barreira química ao calor gerado na interface ferramenta/peça. O Nitreto de Titânio não é um material tão duro, mas possui um coeficiente de atrito baixo, diminuindo a tendência para o aparecimento de cratera e a formação da aresta postiza de corte. Os nitretos podem ser aplicados a temperaturas baixas, não afectando a substrato, mas podem igualmente ser sintetizados por CVD a temperaturas mais elevadas, principalmente em sistemas multicamada. A combinação de camadas múltiplas foi desenvolvida com o objectivo de conciliar as melhores propriedades dos diferentes revestimentos em função do material a maquinar, tipo de operação, etc. Na selecção do revestimento adequado, temos de considerar o nível de dureza pretendido a quente, estabilidade química e o coeficiente de atrito. A baixa condutividade térmica destas camadas significa que a transferência de calor por condução é baixa, garantindo protecção do substrato. O Carbonitreto de Titânio (TiCN) tem excelentes propriedades de adesão. A espessura média do revestimento raramente ultrapassa 12 μm , porque apesar de aumentar a resistência ao desgaste, a sua fragilidade também aumenta. O TiCN apresenta uma boa adesão ao substrato, mas necessita de uma barreira ao calor. Para tal, é combinado com o Óxido de Alumínio, de maneira a evitar o sobreaquecimento. Tanto o Óxido de Alumínio como o Nitreto de Titânio, quando combinados com um revestimento intermédio correcto, formam diferentes camadas externas com excelentes propriedades. Os revestimentos são aplicados na maioria dos casos em carbonetos sinterizados (metal duro), no entanto, também é possível aplicar em HSS, Cermets e materiais cerâmicos. Os parâmetros de

deposição são otimizados para minimizar determinados efeitos, tal como a decarbonização do substrato. As modernas tecnologias de revestimentos (CVD e PVD) permitem um melhor desempenho do substrato, mantendo a tenacidade da aresta de corte e incrementando a resistência ao desgaste.

O revestimento PVD consiste na deposição física em fase de vapor, em que o revestimento é obtido pela adição de material sobre o substrato, criando uma película de espessura na ordem dos 2 μm a 5 μm , como podemos observar na figura 34. Este revestimento permite manter e prolongar a vida da aresta de corte da ferramenta em condições de trabalho, evitando a formação da aresta postiça de corte, lascagem, deformação plástica, etc. Os revestimentos aplicados de forma mais corrente são o Nitreto de Titânio (TiN), Carbonitreto de Titânio (TiCN), e Nitreto Titânio/Alumínio (TiAlN). São utilizados quando pretendemos maior tenacidade da ferramenta de corte durante operações severas, quebrando a apara e evitando problemas de vibração

O revestimento CVD assenta na deposição química em fase de vapor, em que os revestimentos aplicados por este método não originam sobre espessura ao substrato, produz uma combinação química entre o substrato e o revestimento formando multicamadas na zona superficial, conforme representado na figura 35. Os tipos de revestimento mais aplicados por este processo, são o carboneto de titânio (TiC), nitreto de titânio (TiN), Carbonitreto de titânio (Ti(C,N)) e o óxido de alumínio (Al_2O_3). Este tipo de revestimento permite aumentar a velocidade de corte e protege o substrato do calor permitindo o aumento da produção. Como já referido anteriormente, o metal duro é um composto de carboneto de tungsténio e Cobalto, em que também podem ser utilizados TaC, Tic e NbC para melhorar outras propriedades como a dureza a quente, resistência ao desgaste e resistência química. O carboneto é o principal componente para garantir a dureza e o Cobalto é o material ligante que oferece a tenacidade.

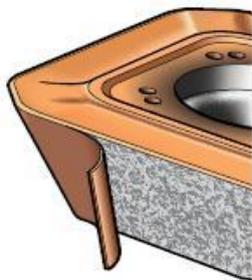


Figura 34 - Revestimentos PVD em insertos de corte (Sandvik, 2010)



Figura 35 - Revestimentos CVD em insertos de corte em metal duro (Sandvik, 2010)

As características mecânicas exigidas aos materiais das ferramentas de corte são, por vezes, difíceis de se obterem. Isto porque, quando se aumenta a dureza, diminuiu-se a tenacidade, e vice-versa. A solução ideal é conferir à ferramenta uma grande dureza e elevada tenacidade. As características ideais para as ferramentas de corte só são possíveis através de revestimentos, que conferem à ferramenta uma grande dureza superficial, com a adequada tenacidade do substrato (Sandvik, 2010).

2.3.9 Mecanismos de desgaste e avarias em ferramentas de corte

A preponderância do tipo de desgaste na ferramenta depende dos parâmetros de corte, do material da ferramenta, da peça, das condições de corte, da utilização correcta do lubrificante e estabilidade geral do processo, entre outros. As avarias e o desgaste são o resultado da interacção entre as ferramentas, material a maquinar e das condições de trabalho, resultando da acção de factores mecânicos, térmicos, químicos e abrasivos. A vida útil da ferramenta é definida como o tempo de corte efectivo da(s) sua(s) aresta(s) em trabalho, antes que seja necessário afiá-la ou substituí-la (Davim, 2006). A vida das ferramentas de corte pode ser avaliada através de vários indícios, tais como o aumento da rugosidade superficial dos componentes maquinados, o aumento das forças de corte e consequente aumento da potência consumida, a precisão dimensional e pela formação da avara. Qualquer uma destas situações pode ser atingida por desgaste gradual ou por avaria súbita. Geralmente, o desgaste da ferramenta é função do tempo e a avaria tem carácter aleatório. O estado de tensão e o gradiente de temperaturas na face de ataque/saída, condicionam os mecanismos de desgaste. A variação das condições de corte promove uma modificação do estado de tensão e do gradiente de temperatura, alterando deste modo os mecanismos de desgaste. Como resultado dos factores de carga aplicados na aresta de corte, a maquinagem de metais é dominada pelos seguintes mecanismos de desgaste (Astakhov et Davim, 2008):

- Desgaste por abrasão;
- Desgaste por difusão;
- Desgaste por oxidação;
- Desgaste por fadiga;
- Desgaste por adesão.

Consideram-se dois grupos no processo de degradação das ferramentas de corte: os que conduzem ao colapso da ferramenta de forma súbita e repentina, como resultado de tensões de origem mecânica ou térmica, que são designadas por avarias, e as que conduzem a uma remoção gradual e progressiva de material na face de ataque e saída da ferramenta, que são designadas por desgaste.

Existem três formas de avarias: rotura frágil da aresta de corte, deformação plástica do gume devido ao seu amolecimento e roturas devido a tensões de origem térmica. As primeiras avarias referem-se essencialmente a estados de tensão de origem mecânica e de corte intermitente ou interrompido. As segundas são originadas por temperaturas elevadas e pressões na face de ataque, provocando deformação plástica da aresta de corte, e conseqüente má formação da apara. As últimas são originadas por tensões térmicas são provocadas por fases sucessivas de aquecimento e arrefecimento brusco na aresta de corte das ferramentas, devido a acesso do fluido irregular.

A análise do desgaste da ferramenta é muito importante para a optimização do processo de corte. A inspecção pode ser realizada através de um aparelho óptico, lupa, microscópio ou outro, que permitem a caracterização do tipo de desgaste na vizinhança da aresta de corte. Em geral, o desgaste dá-se em duas regiões adjacentes à aresta de corte: face de ataque e face de saída, sendo o último designado por linear. Quando as irregularidades são lineares e se estendem por toda a superfície desgastada, é um indício de fraca qualidade da ferramenta de corte. A utilização de ferramentas adequadas, parâmetros de corte correctos e estabilidade geral do processo, são as condições necessárias para um desenvolvimento ideal e controlado do desgaste.

São diferentes os tipos de desgaste que podem ocorrer nomeadamente:

- Desgaste de flanco;
- Desgaste da face de saída;
- Cratera na face de ataque;
- Deformação plástica;
- Desgaste tipo entalhe;
- Fractura térmica;
- Fractura por fadiga mecânica;
- Apra aparente ou aresta postiça de corte.

O desgaste da face de saída ocorre na face de saída do gume e é originada principalmente devido ao mecanismo de abrasão, sendo o tipo de desgaste mais frequente. O seu desenvolvimento pode ser positivo, uma vez que torna o gume de corte mais afiado no decorrer da maquinagem. No entanto, para uma dada utilização, o atrito contra a superfície maquinada deteriora o desempenho do gume de corte, porque um excessivo desgaste deste tipo provoca um estado superficial de fraca qualidade. A tabela 4 apresenta exemplos e sugestões de melhoria, de forma a minimizar as avarias em ferramentas de corte. As recomendações visam melhorar o desempenho das ferramentas de corte ao nível da qualidade, tempo de maquinagem e custos.

Tabela 4 - Tipos de avarias de ferramentas de corte (Sandvik, 2010)

Imagem/Descrição	Causas	Soluções
 <p>Desgaste de flanco</p>	<p>Velocidade de corte muito alta; Classe muito tenaz: Resistência ao desgaste insuficiente; Falta de refrigeração.</p>	<p>Reduzir a velocidade de corte; Seleccionar uma classe mais adequada de acordo com a exigência por tenacidade ou resistência ao desgaste; Adicionar refrigeração.</p>
 <p>Desgaste tipo Entalhe</p>	<p>Materiais pastosos e/ou endurecidos por trabalho. Uso de ângulo de posição de 90°; A geometria é muito negativa.</p>	<p>Seleccionar uma aresta mais viva; Diminuir o ângulo de posição; Seleccionar uma classe com revestimento CVD (para maior resistência ao desgaste); Seleccionar uma classe com revestimento PVD (para resistência à escamação e aresta postiça); Variar a profundidade.</p>
 <p>Craterização</p>	<p>Velocidade de corte e/ou avanço muito alto; Classe muito tenaz; Quebra-apara muito estreito.</p>	<p>Reduzir a velocidade de corte ou o avanço; Seleccionar uma classe mais resistente ao desgaste; Seleccionar uma geometria mais aberta/positiva.</p>
 <p>Deformação plástica-Depressão</p>	<p>Carga de calor e pressão altas, temperatura de corte muito alta; Classe muito tenaz/macia; Falta de refrigeração.</p>	<p>Diminuir a carga de calor e pressão, reduzindo a velocidade de corte e/ou avanço; Se ocorrer depressão da aresta, reduzir o avanço primeiro;</p>



**Deformação plástica
Impressão**

Se ocorrer depressão do flanco, reduzir a velocidade primeiro; Seleccionar uma classe mais resistente ao desgaste/calor; Seleccionar uma geometria mais aberta/positiva; Melhorar a refrigeração.



Aresta postiça

Temperatura de corte muito baixa; Solda do cavaco no inserto; Material pastoso; Geometria muito negativa.

Aumentar a temperatura de corte, aumentando a velocidade ou o avanço; Seleccionar uma classe com cobertura PVD, (menos arestas postiças nos revestimentos PVD); Seleccionar uma geometria mais positiva.



Escamação

Material abrasivo; Esforço de tracção na aresta de corte devido à carga adesiva.

Aumentar a velocidade de corte; Seleccionar uma classe mais tenaz com melhor segurança.



Lascamento na aresta

Condições instáveis; Classe muito dura/quebradiça.

Tornar as condições da máquina mais estáveis; Seleccionar uma classe mais tenaz; Seleccionar uma geometria mais robusta.



Fissuras térmicas

Temperaturas variadas na aresta de corte; Refrigeração e cortes intermitentes; A classe é sensível às variações de temperatura.

Desligar a refrigeração ou aplicar refrigeração constante para obter um nível de temperatura uniforme; Reduzir a velocidade.

**Fractura**

Desgaste excessivo;
Classe muito tenaz
(deformação e quebra);
Classe muito dura.

Maquinar em operações mais curtas (tempo em corte): verificar como o desgaste começa e qual o tipo de desgaste dominante;
Alterar os dados de corte;
Seleccionar um inserto/geometria mais adequada.

**Lascamento fora da área de corte**

Entupimento de aparas devido à maquinagem de encontro a cantos a 90°;
As aparas são desviadas contra a aresta de corte;
Direcção do avanço ou avanço não optimizados.

Mudar o percurso da operação (para evitar ir de encontro a cantos a 90°);
Mudar o avanço;
Mudar para uma classe PVD;
Seleccionar uma geometria de inserto que altere o fluxo.

A cratera na face de ataque é a avaria que ocorre na face de ataque da ferramenta onde se geram temperaturas e pressões altas através dos mecanismos de abrasão e difusão. A formação deste tipo de desgaste altera a geometria da aresta de corte e pode comprometer a boa formação da avara, mudar a direcção das forças de corte e provocar o enfraquecimento da aresta de corte. A deformação plástica desenvolve-se devido à combinação entre temperaturas e pressões elevadas na aresta de corte. Os factores que mais influenciam este tipo de desgaste são as velocidades de corte e avanços elevados, assim como a dureza do material a maquinar. O raio da ponta e a geometria de corte são factores importantes na diminuição deste tipo de desgaste. A cratera em forma de entalhe ocorre na face de saída e é um caso típico de desgaste por adesão, mas também pode ser provocada por desgaste por oxidação. Geram-se microfissuras sucessivas, que conduzem à formação da fractura em forma de um V, afectando o estado superficial e integridade da aresta de corte. O fenómeno da fractura térmica gera-se principalmente através de um ciclo de fadiga térmica, devido a mudanças bruscas da temperatura na zona de corte. Esta situação pode ocorrer em maquinagens de corte interrompido, ou quando é realizada de uma forma inadequada ou quando a refrigeração/lubrificação não é adequada. Este tipo de fractura gera uma série de ranhuras em forma de pente na face da ferramenta, fazendo com que esta

comece a desintegrar-se. A fractura por fadiga acontece quando as forças de corte e as suas variações são excessivas e cíclicas. Estas variações podem ser exageradas para a resistência e dureza da aresta de corte (Sandvik, 2010). Um dos principais fenómenos de avaria nas ferramentas de corte é a aparada aparente ou aresta postiça de corte. A formação da aresta postiça de corte ocorre em duas etapas: adesão do material maquinado à face de ataque e crescimento da aparada aderente. Esta adesão depende da compatibilidade metalúrgica dos materiais. A temperatura na interface aparada/ferramenta é importante no aparecimento e na aceleração da adesão do material à face de ataque da ferramenta. O estado da superfície da peça maquinada piora com o aumento da aresta postiça de corte e, com a sua progressão, existe o risco de quebra da aresta de corte da ferramenta (Sandvik, 2010).

2.4 Materiais

Quando se analisam os materiais maquinados mais comuns, com o objectivo de otimizar os resultados das operações de maquinagem, algumas propriedades chamam mais a atenção, como dureza, resistência mecânica, ductilidade, condutividade térmica, capacidade de endurecimento por deformação, para além de outras propriedades relacionadas com a microestrutura. Normalmente, valores de dureza baixos permitem maquinar com maiores velocidades de corte, de avanço e de profundidade, bem como, aumentar tempos de vida das ferramentas, e com taxas elevadas de remoção de material a menores custos. Nos materiais com baixa dureza e alta ductilidade, o seu acabamento superficial acaba por ser mais fraco e tem tendência a formar rebarbas durante a maquinagem. As rebarbas necessitam de operações posteriores, aumentando assim os custos de maquinagem. Os materiais com baixa ductilidade e dureza moderada são, geralmente, de fácil maquinagem, como é o caso do ferro fundido, em que as aparadas tendem a ser altamente segmentadas e a energia necessária para a sua remoção é baixa. A alta condutividade térmica significa que o calor produzido na região de formação da aparada é rapidamente conduzido para as imediações, longe da região de corte (Machado, 2009). De uma forma geral e simplificada, podem-se classificar as ligas metálicas para maquinagem na seguinte ordem:

- Ligas de alumínio, de cobre e de magnésio;
- Aços não ligados;
- Ferros fundidos;
- Aços ligados;
- Aços inoxidáveis;
- Ligas de alta resistência térmica e mecânica (Machado, 2009).

2.4.1 Aços inoxidáveis

Os aços inoxidáveis constituem uma categoria de aços caracterizados por terem na sua composição química um elevado teor em Cr. O diagrama de fases do sistema Fe-Cr da figura 36, é a base dos aços inoxidáveis modernos: além do Cr, também contêm uma série de outros elementos de liga, cuja presença melhora determinadas propriedades específicas (Lo, 2009).

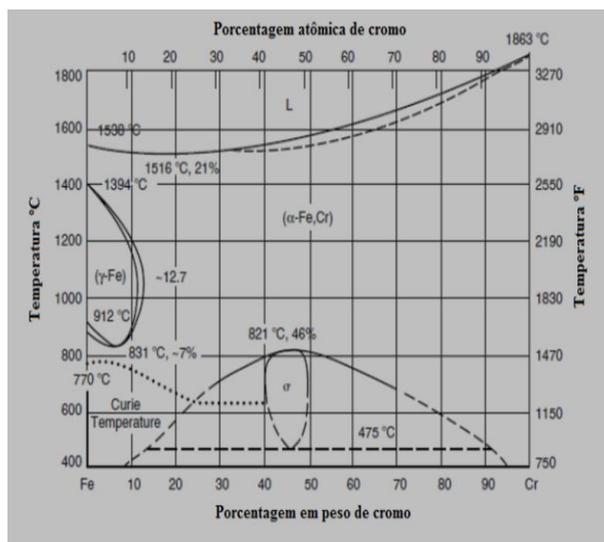


Figura 36 - Diagrama binário de equilíbrio Fe-Cr (Padilha, 2006)

Os aços inoxidáveis são ligas ferrosas que contêm no mínimo 10,5% de Crômio e máximo de 1,2% de Carbono, entre outros elementos de liga (Lima, 2007).

O Crômio é o principal elemento de liga desta família de aços, conferindo-lhes propriedades únicas no que toca à resistência à corrosão. Existem alguns metais e ligas que sob condições ambientais, perdem a sua reactividade e tornam-se extremamente inertes. Este fenómeno é denominado passividade e é exibido pelo Crômio, Ferro, Níquel, Titânio e muitas das suas ligas. O comportamento passivo é resultado da formação de uma película de Óxido de Crômio muito fina e altamente aderente sobre a superfície do metal, a qual serve como barreira protectora contra a corrosão (Callister, 2002). A formação do filme passivo é proveniente da reacção do Crômio com o Oxigénio do meio, produzindo um fino filme de Óxido de Crômio. Nos metais que sofrem passivação, baixos níveis de Oxigénio podem torná-los susceptíveis à corrosão localizada, devido à dificuldade de formação do filme passivo de Cr_2O_3 , enquanto, teores altos de Oxigénio podem favorecer a formação desse filme (Mariano *et al.*, 2006).

Existe uma grande variedade de aços inoxidáveis, com níveis progressivamente maiores de resistência à corrosão. Isto é resultado da adição controlada de elementos de liga, cada um dando propriedades específicas relativamente à resistência mecânica e à possibilidade de resistir a diferentes meios corrosivos (Soares, 2009).

Na figura 37, a composição base de um aço inoxidável é atribuída à designação AISI 304, a qual pode evoluir em diferentes direcções através da adição de elementos bem determinados, conseguindo-se uma evolução notória das propriedades no sentido mais desejado, definidas em função de cada aplicação específica (Euro-Inox, 2012).

Segundo a Euro-Inox (2012), organismo que congrega os fabricantes de aços inoxidáveis e as instituições que habitualmente investigam e certificam este tipo de produtos a nível Europeu, a classificação dos aços inoxidáveis em famílias processa-se de uma forma muito simples:

- Austeníticos: Ligas Fe – Cr – Ni, com teor em C < 0.1% e com composição típica de 12%Cr e 8%Ni. É normalmente fornecido na condição de não-magnético e corresponde a cerca de 65% do consumo mundial de aços inoxidáveis;
- Ferríticos: Ligas Fe – Cr, com C < 0.1%, normalmente não contendo Níquel, fornecidos na condição de magnético;
- Martensíticos: Ligas Fe – Cr, com C > 0.1%, normalmente não contendo Níquel, fornecidos na condição de magnético e endurecido através de tratamento térmico;
- Duplex: Ligas Fe – Cr - Ni, com estrutura distribuída de forma equitativa entre ferrite e austenite, fornecido na condição de magnético (Euro-Inox, 2012)

2.4.2 Aços inoxidáveis Duplex

Os aços inoxidáveis Duplex são ligas do sistema Fe – Cr – Ni - Mo que possuem Azoto. O Azoto substitui parcialmente o Níquel, com o objectivo de melhorar as propriedades mecânicas, bem como, a sua resistência à corrosão e diminuir o custo. O diagrama ternário Fe – Cr - Ni é o diagrama básico de aços inoxidáveis que mostra a presença de apenas três fases sólidas: austenite, ferrite e fase sigma. Para uma alta razão Cr/Ni, a ferrite (fase delta) pode ocorrer durante a solidificação, e a fase sigma pode ocorrer durante o envelhecimento, com temperaturas entre 550°C e 900°C. O intervalo composicional do campo da fase sigma aumenta, quando a temperatura está abaixo de 900°C, como é representado na Figura 38 (Padilha *et al.*, 2006).

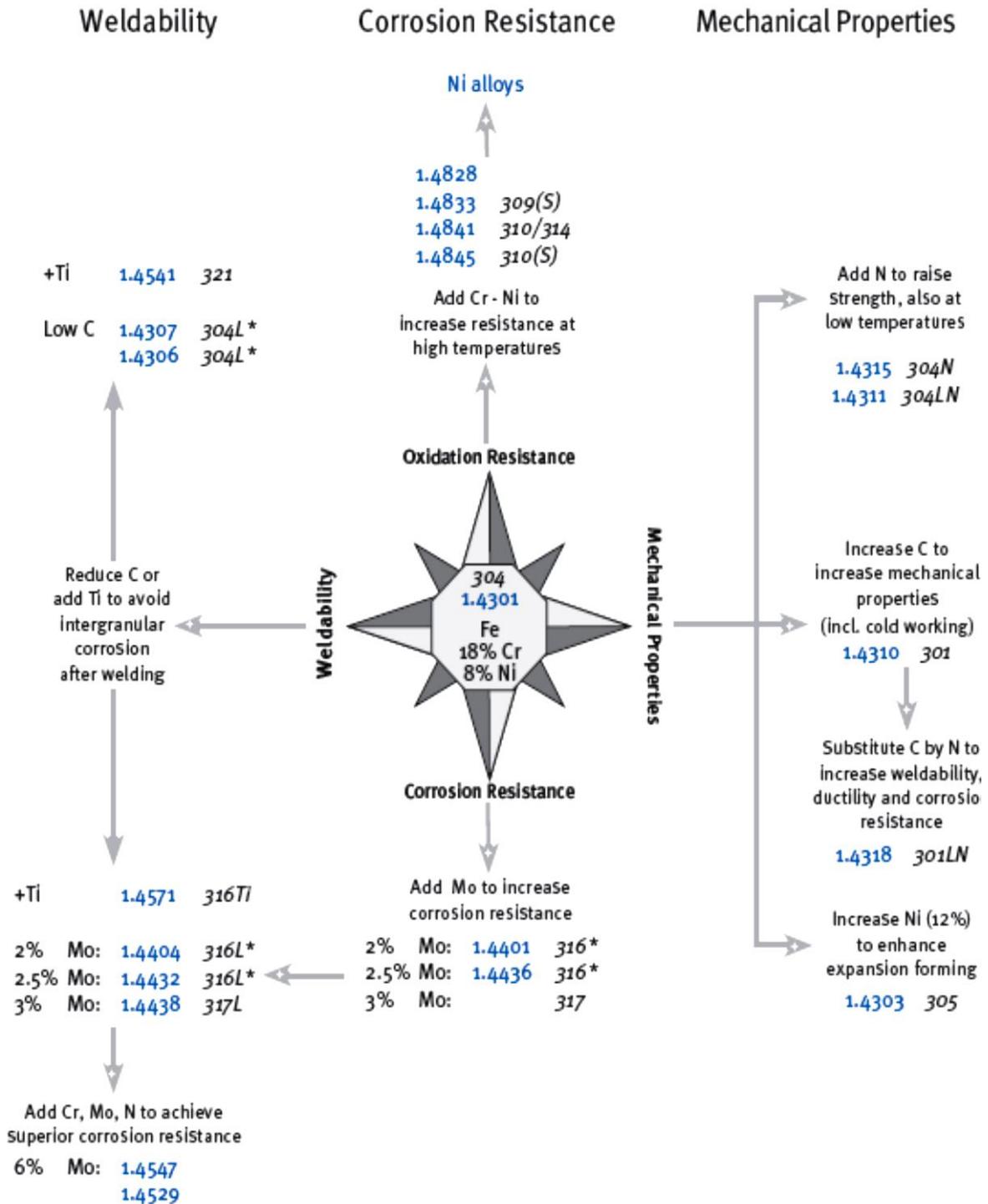


Figura 37 - Diagrama esquemático da evolução dos aços inoxidáveis em torno da composição básica atribuída ao aço inoxidável AISI 304 (Euro-inox, 2012)

As propriedades ou características dos aços inoxidáveis Duplex dependem da composição química, que apresenta altos teores de Cr e Mo, e de um tratamento termomecânico durante a conformação mecânica, a uma temperatura próxima dos 1200°C, originando uma microestrutura balanceada, composta de aproximadamente

50% de ferrite e 50% de austenite, precipitada em forma de ilhas, com uma quantidade de contornos de grão alfa/alfa e gama/gama similar à quantidade de interfaces alfa/gama (ASM Handbook, 1992), o que permite uma combinação excelente de propriedades mecânicas, especialmente um alto limite de escoamento e uma alta tenacidade, com e uma alta resistência à corrosão por picadas e sob tensão, em meios que contenham cloretos.

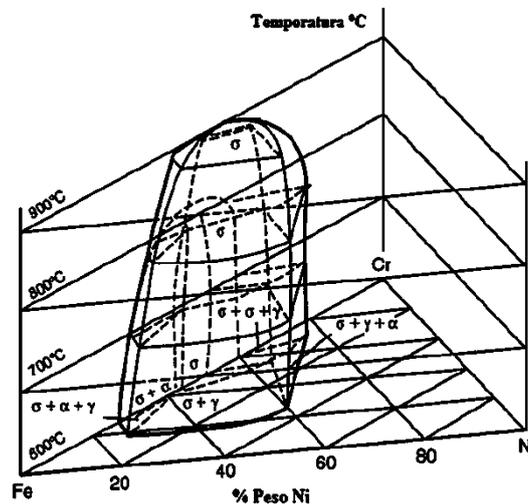


Figura 38 - Visão tridimensional do diagrama de equilíbrio Fe-Cr-Ni (Padilha *et al.*, 2006)

Devido à estrutura de grãos muito finos e à mistura de ferrite e austenite, a resistência mecânica dos aços inoxidáveis Duplex é muito alta, portanto, podem ser utilizados em ambientes corrosivos nas gamas de temperaturas de -50°C a 300°C. Neste contexto, são muito utilizados na construção de componentes para as indústrias nucleares e de extração de petróleo, como por exemplo carcaças de bombas, válvulas, tubagens, elementos estruturais, componentes rotativos e permutadores de calor. A utilização dos aços inoxidáveis Duplex nestes ambientes corrosivos, contribuem para a redução de custos com matéria-prima e mão-de-obra nas construções em que são aplicados (Borsato, 2006).

2.4.3 Produção dos aços inoxidáveis Duplex

Os aços inoxidáveis Duplex são produzidos através de um sistema de descarbonização por sopro, combinando Oxigênio e Azoto, como mostra a figura 39, e, por isso, podem apresentar baixíssimo teor em carbono (Borsato, 2006).

O modo de solidificação de um aço inoxidável Duplex depende essencialmente da composição química. A Figura 40 apresenta o diagrama de Schaeffler usado para prever a microestrutura com base no Crômio e Níquel equivalentes (Ribeiro e Santos, 2009). As faixas de composição típica dos aços inoxidáveis Ferríticos, Martensíticos, Austeníticos e ligas Duplex estão expostas neste diagrama.

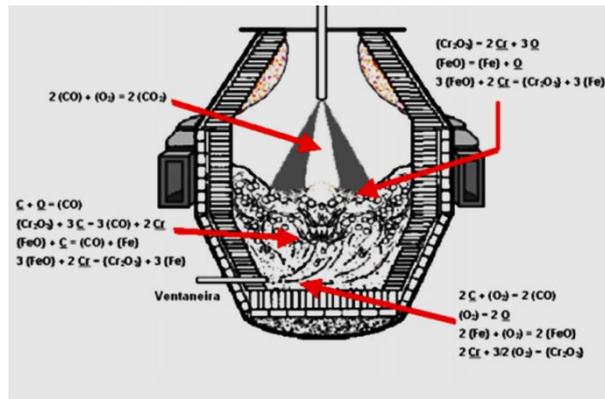


Figura 39 - Sistema de decarbonização por sopro combinado (Marim, 2006)

O método Schaeffler permite uma avaliação aproximada da microestrutura em função da composição do aço, entretanto esse método não leva em conta a influência da taxa de arrefecimento e os tratamentos térmicos de envelhecimento. A previsão do seu modo e da sequência de solidificação também pode ser avaliada previamente com sucesso, usando as proporções de crómio e níquel equivalentes (Padilha *et al.*,2006). Uma microestrutura completamente ferrítica forma-se durante o início da solidificação. A transformação parcial da ferrite em austenite ocorre durante o posterior arrefecimento, produzindo precipitados de austenite na matriz de ferrite. Durante a laminação a quente e o recozimento, a microestrutura permanece dentro do campo bifásico do diagrama de fases Fe-Cr-Ni, com lamelas alternadas de ferrite e austenite.

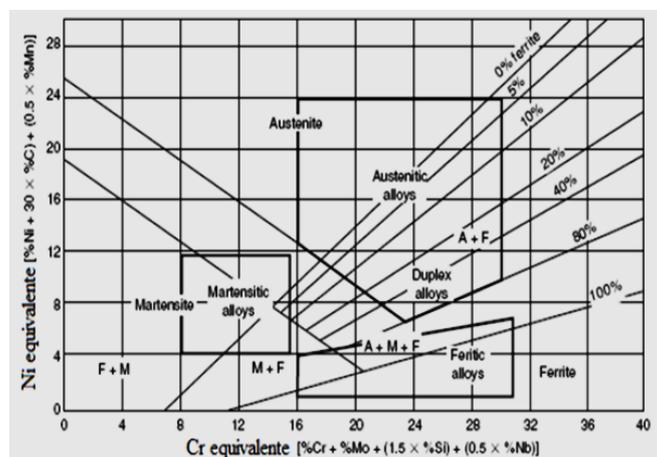


Figura 40 - Diagrama de Schaeffler para aços inoxidáveis (Padilha e Plaut, 2009)

Os aços inoxidáveis Duplex são processados por laminação ou forjamento a quente, e laminação a frio, seguido de tratamentos térmicos de recozimento e de têmpera, para equilibrar a proporção das duas fases (Reick, 1998; Padilha, 1999).

As fases ferrite e austenite têm composições químicas diferentes. A obtenção da proporção 1:1 entre estas fases num aço inoxidável Duplex é atingida principalmente

através do controlo dos elementos estabilizadores da austenite (Carbono, Níquel, Azoto, Cobre e Manganês) e ferrite (Crómio, Molibdénio, Tungsténio, Nióbio, Ferro e Silício) (Reick., 1998; Pohl, 2004; Bonollo., 2009; Padilha, 2009; Ribeiro, 2009). Para cada elemento, o coeficiente de partição pode ser definido como a razão entre a quantidade de elementos na ferrite e na austenite (Bonollo *et al.*, 2009). A Figura 41 mostra o coeficiente de partição dos elementos de liga em função da temperatura de laminagem.

O Azoto é o elemento mais importante na determinação do balanço adequado de fases, pelo seu forte poder estabilizador da austenite, e pela sua elevada difusão, uma vez que é um elemento intersticial (Ribeiro, 2009).

A partição dos elementos entre austenite e ferrite é conduzida pelo fenómeno da difusão, ou seja, o coeficiente de partição depende da taxa de arrefecimento. No arrefecimento lento, existe uma excelente partição dos elementos entre as duas fases, baseado nas características termodinâmicas de cada elemento. Já quando o arrefecimento é rápido, a difusão é inibida, produzindo austenite e ferrite de composição homogénea, conduzindo a coeficientes de partição com valores muito próximos de 1 (Bonollo, 2009).

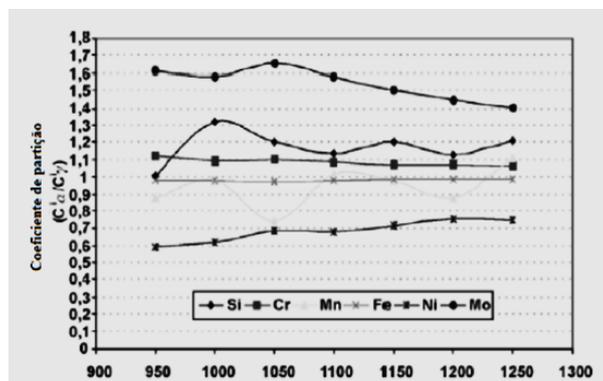


Figura 41 - Coeficiente de partição dos elementos de liga em função da temperatura de laminagem (Tehovnik *et al.*, 2011)

Os dois principais objectivos do tratamento térmico de solubilização é o ajuste das proporções das fases ferrite e austenite, e solubilizar as fases secundárias formadas durante o arrefecimento (Ribeiro, 2009). O tratamento térmico de solubilização é feito, geralmente, entre 1000°C e 1200°C (Nilson, 1992). A formação de austenite ocorre entre 650°C e 1.200°C, por nucleação e crescimento. Em temperaturas abaixo

de 650°C, a ferrite de um aço inoxidável Duplex transforma-se em austenite por meio de um mecanismo muito semelhante ao da formação da martensite (Martins, 2008).

2.4.4 Caracterização dos aços inoxidáveis Duplex

Com vista a explorar da melhor forma as propriedades deste tipo de materiais, foram desenvolvidas inúmeras formulações, correspondentes a outras tantas composições, que visam responder às mais diversas necessidades do mercado nas mais distintas áreas. Previamente à selecção de um dado material para um determinado tipo de aplicação, este necessita ser convenientemente caracterizado nas mais diversas vertentes. O factor custo é normalmente um dos factores mais preponderantes na selecção de um dado material. Sendo os aços inoxidáveis Duplex materiais relativamente dispendiosos, só é ponderada a sua utilização quando o seu conjunto de propriedades satisfaz os requisitos de aplicação como nenhum outro material de custo inferior. Devido à presença da fase ferrítica, os aços inoxidáveis Duplex possuem um menor coeficiente de expansão térmica que os Austeníticos. Os aços inoxidáveis Austeníticos são facilmente trabalháveis por extrusão, permitindo com relativa facilidade a obtenção de tubagens, sendo esta uma das suas principais aplicações, na área da produção de produtos químicos e na petroquímica. Estes aços prestam-se, com relativa facilidade, a serem conformados pelos processos mais usuais. (IMOA, 2009).

2.4.5 Maquinabilidade dos aços inoxidáveis Duplex

Uma boa maquinabilidade traduz-se num bom acabamento de superfície, em baixa força e potência de corte, e também baixo desgaste da ferramenta de corte. Não existe ainda hoje uma definição satisfatória, e muito menos um processo incontroverso de avaliação da maquinabilidade, apesar de mais de um século de investigação (Davim, 2006).

A maquinabilidade de um material pode ser definida como a aptidão que um material tem para ser processado com uma ferramenta de corte, com o objectivo de alterar a sua forma inicial. O estado da máquina ferramenta, rigidez, precisão, condições de produção e a preparação da peça a maquinar, também têm um peso significativo no processo. É difícil traduzir a influência das diferentes propriedades dos materiais e da maior ou menor aptidão destes ao corte por arranque de aparas, através de indicadores de maquinabilidade. Contudo a maquinabilidade pode ser avaliada por vários critérios como:

- Desgaste da ferramenta;
- Qualidade superficial;

- Forças de corte;
- Tipo de apara produzida.

Existem estudos que reflectem que nenhum deles é totalmente esclarecedor, o que é uma consequência da complexidade do fenómeno de corte, resultando daí ambiguidades nos ensaios e na apreciação dos resultados experimentais. Alguns dos indicadores de maquinabilidade usados são:

- Vida da ferramenta;
- Formação da apara;
- Estado da superfície;
- Rugosidade superficial;
- Volume de apara removida por unidade de tempo;
- Potência específica de corte;
- Tendência para formação de aresta postiça de corte.

O material deve possuir propriedades que permitam a sua maquinabilidade. Materiais com elevado índice de maquinabilidade consideram-se fáceis de maquinar, com índice menor consideram-se mais difíceis de maquinar. A vida da ferramenta de corte é um critério muito utilizado na avaliação da maquinabilidade do material. A maquinabilidade relativa exprime a relação, em percentagem, entre a velocidade de corte do material a avaliar e a velocidade de um material-padrão num ensaio *standard*. Este consiste na comparação entre materiais a maquinar, daí o termo maquinabilidade relativa. O ensaio-padrão contempla características, tais como, vida da ferramenta, desgaste da aresta de corte, força de corte, temperatura na zona de corte e quantidade de material removido. Um material com índice igual a um, ou seja, cem por cento, significa o valor de referência como boa maquinabilidade.

Os aços inoxidáveis representam também uma significativa parcela dos materiais submetidos a operações de maquinagem. Os aços inoxidáveis ferríticos podem conter aditivos para melhorar a sua maquinabilidade, como o Enxofre, mas, em geral, o efeito não é similar ao obtido nos aços ao carbono com os mesmos aditivos. Os aços inoxidáveis Martensíticos são maquinados no estado recozido, pois o seu conteúdo de carbono permite a presença de carbonetos de cromo na matriz, aumentando assim o desgaste das ferramentas. Os aços austeníticos são os mais comuns e podem conter aditivos para facilitar a maquinagem e o seu desempenho. No entanto, os aditivos prejudicam a resistência à corrosão desses aços e, portanto, têm de ser usados com moderação. Os aços inoxidáveis são caracterizados pela sua alta capacidade de endurecimento por deformação, além de serem materiais que aderem à aresta de corte, formando aresta postiça na ferramenta. Quando se pretende maquinar estas ligas, após estas passarem por algum tipo de trabalho a frio, deve-se procurar usar uma profundidade de maquinagem que ultrapasse a camada encruada, de forma a

evitar assim um desgaste excessivo da ferramenta. Devido à baixa condutividade térmica dos aços inoxidáveis, a maior parte do calor, geralmente carregada pela avara, deverá ser absorvida pela aresta de corte, contribuindo mais rapidamente para a sua deterioração. Por este motivo, as arestas de corte mais afiadas devem ser escolhidas com substratos ou revestimentos de maior condutividade térmica. No que se refere às forças de corte, os aços inoxidáveis apresentam valores mais elevados, se compararmos com os aços ao carbono. No que toca à maquinagem, estes aços podem facilmente apresentar resistência mecânica na ordem do dobro da apresentada pelos aços inoxidáveis austeníticos mais comuns. Isto traz inconvenientes óbvios para a maquinagem, requerendo o uso de ferramentas mais resistentes e de máquinas mais potentes. Os aços inoxidáveis Duplex apresentam limites de escoamento duas vezes superiores aos aços inoxidáveis austeníticos sem Azoto, sendo a sua taxa inicial de endurecimento é comparada à dos tipos austeníticos mais comuns.

A avara formada durante a maquinagem de um aço inoxidável Duplex é bastante resistente e abrasiva para a ferramenta de corte. Isto acontece especialmente com os tipos Duplex com mais elementos de liga, devido a serem produzidos com um teor de enxofre muito reduzido. Por este motivo, não é possível resolver o problema da quebra da avara. Pelas razões, apontadas os aços inoxidáveis Duplex são tipicamente mais difíceis de serem maquinados que os aços inoxidáveis Austeníticos. São necessárias forças de corte mais elevadas e o desgaste da ferramenta de corte é mais severo na maquinagem dos aços inoxidáveis Duplex.

A maquinabilidade é mais difícil comparativamente aos aços inoxidáveis austeníticos e é mais evidente quando se utilizam ferramentas de corte fabricadas com carbonetos. As orientações a seguir para a maquinagem são geralmente aplicáveis a todos os aços inoxidáveis, mas a sua importância é ainda maior no caso dos aços inoxidáveis Duplex. Nos processos de maquinagem de aços inoxidáveis Duplex, devem-se utilizar máquinas potentes e rígidas, devendo a ferramenta e a peça serem fixas por elementos que confirmam elevada rigidez à montagem e minimize a presença de vibrações.

Segundo um estudo realizado nesta área da maquinagem de aços inoxidáveis Duplex com ferramenta revestidas com AlTiN e AlCrN através do processo PVD, a grande dificuldade da maquinagem deste material resume-se à sua alta plasticidade e tendência a encruar, principalmente nos aços inoxidáveis austeníticos (AISI 316 – 160HB), semelhantes ao do caso de estudo, que levam a condições de corte muito severas. Para além disso este tipo de material tem baixa condutividade térmica na zona de contacto, que por sua vez, aumenta consideravelmente o desgaste da ferramenta. A sua maquinabilidade pode ser melhorada com a utilização de ferramentas de corte revestidas. Os revestimentos PVD com baixa condutividade térmica, que permitem bons acabamentos superficiais, devem ser utilizados. Isto leva

a grandes melhorias a nível de características de fricção na interface peça/ferramenta, bem como no processo de extracção da apara. Neste estudo em particular, foram maquinados placas de aço inoxidável Duplex recorrendo a fresas de topo de acabamento com 8 mm de diâmetro em metal duro com quatro revestimentos diferentes: AlCrN, AlCrNbN, AlTiN refinado e AlTiN nano-cristalino. Os parâmetros de maquinagem foram: $V_c = 120$ m/min; $f = 0.05$ mm/min; $A_p = 10$ mm; $A_e = 0.5$ mm. Ambos os revestimentos à base de AlTiN e AlCrN têm alta resistência à oxidação devido à formação de alumina na superfície das suas camadas. A influência do tratamento superficial de pós-deposição na ferramenta na intensidade de desgaste da mesma foi investigada. A superfície do revestimento antes e depois do tratamento de pós-deposição foi analisada utilizando curvas de relação *Abbot-Firestone*. A intensidade do desgaste ocorrido para as ferramentas com revestimento AlTi nano-cristalino, para um percurso de maquinagem de 150 metros foi mínima. Portanto, foram realizados, os estudos da importância da selecção do revestimento, bem como, do pós-tratamento superficial na melhoria da maquinabilidade dos aços inoxidáveis. Como os pós-tratamentos resultam sempre num aumento da longevidade da ferramenta. O revestimento AlTiN nano-cristalino superou o AlTiN refinado na fase pós rodagem do desgaste, quase duplicando a sua vida útil. Quanto aos revestimentos à base de AlCrN, o AlCrNbN com estrutura do tipo (200), tem um desempenho muito melhor do que o AlCrN com estrutura (111) (Endrino, 2005).

Segundo outro estudo nesta área da maquinagem dos aços inoxidáveis Duplex em que foram utilizadas quatro fresas de diferentes fabricantes com número de lâminas diferentes e com diferentes revestimentos na maquinagem de um aço inoxidável Duplex CD4MCuN. As ferramentas utilizadas nesse estudo foram:

- Fresa Walter modelo Protostar N45 Compact H3014018 de quatro lâminas revestidas com Nitreto de Titânio-Alumínio (TiAlN);
- Fresa HPMT modelo SE30 Plungemill G10040005006 de três lâminas revestidas com Alcrona (AlCrN).
- Fresa HPMT modelo SE45 Noviano Standard V47BXZ024GX040001 de quatro lâminas revestidas com Alcrona (AlCrN);
- Fresa Dormer modelo Spectrum S812HA de duas lâminas revestidas com Alcrona (AlCrN).

As condições de maquinagem mantiveram-se independentes da ferramenta. Os parâmetros de corte foram:

- Rotação (N) = 4000 rpm;
- Profundidade de corte (A_p) = 0.5 mm;
- Desbaste lateral (A_e) = 3 mm;
- Velocidade de corte (V_c) = 50.27 m/min;

- Profundidade de corte (A_p) = 0.5 mm.

As fresas realizaram ensaios de 8 ciclos com percurso de corte de 7.5 metros e ensaios de 16 ciclos com percurso de corte de 15 metros.

Nos ensaios deste estudo foram detectados desgastes semelhantes em todas as ferramentas, bem como os resultados desses problemas na peça de trabalho, só variou a intensidade/gravidade dos mesmos. De uma forma geral ocorreram fissuras, entalhes e lascagem na aresta de corte e até mesmo quebra parcial da extremidade da aresta de corte e desgaste nos flancos.

Concluíram neste estudo que o aço inoxidável Duplex utilizado foi muito severo para as ferramentas de corte utilizadas, tendo em conta o percurso de corte reduzido e tendo em conta os danos ocorridos nas ferramentas. Nos ensaios de 16 ciclos as fresas de quatro lâminas apresentaram resultados melhores a nível de parâmetros de R_a , R_z e R_{max} , sendo portanto a escolha mais apropriada para desbastes laterais neste tipo de material (Reis, 2014).

DESENVOLVIMENTO

3.1 Objectivos do trabalho prático

3.2 Apresentação da Palbit

3.3 Ferramentas, Materiais e equipamentos

3.4 Ensaios e métodos

3.5 Resultados

3.6 Análise geral dos resultados dos ensaios

3.7 Análise das aparas

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Objectivos do trabalho prático

O principal objectivo deste trabalho é a análise do desgaste de dois tipos insertos de corte com a mesma geometria e substrato similar, mas providos de revestimentos PVD e CVD, desenvolvidas pelo fabricante Palbit, S.A. e especialmente destinados à maquinagem de aço inoxidável Duplex. Durante a realização dos ensaios de maquinagem, avaliou-se o desgaste das ferramentas, através de microscopia electrónica de varrimento, foram medidas a rugosidade das superfícies maquinadas e analisadas as vibrações geradas.

Com este trabalho, pretende-se obter dados comparativos entre estes dois tipos de inserto. Realizaram-se ensaios em operações de desbaste, em condições extremas e na ausência de lubrificação. Os parâmetros utilizados em todos os ensaios foram sugeridos pelo fabricante. Os quais se mantiveram inalterados para todos os ensaios, independentemente do tipo de aço inoxidável Duplex. Os ensaios referidos não têm como objectivo a optimização de parâmetros, mas a comparação do comportamento dos insertos com dois tipos de revestimento.

3.2 Apresentação da Palbit

A Palbit é uma empresa fabricante de insertos de corte utilizados na maquinagem. A evolução da empresa pode ser resumida da seguinte forma:

- 1916: Assegura a concessão da exploração das minas de Galena na região do Palhal;
- 1941: A Palbit é adquirida pelo grupo SAPEC, o que contribui para a sua expansão;
- 1952: A Palbit instalou linhas de produção de pós de tungsténio e misturas, a partir de carboneto de tungsténio;
- 2017: A Palbit tem como principal actividade produzir ferramentas de corte, ferramentas anti-desgaste e ferramentas para pedreiras.

Na área das ferramentas de corte, a Palbit desenvolve e fabrica ferramentas de corte para uma vasta gama de aplicações de fresagem, torneamento, furação e ferramentas especiais destinadas à indústria automóvel, aeronáutica, moldes, área médica, estampagem, entre outras. As suas ferramentas de corte são concebidas de acordo com geometrias ISO ou geometrias para aplicações especiais. Os materiais utilizados na sua produção vão desde o metal duro ao PCD ou CBN.

Na área das ferramentas anti-desgaste produzem todo o tipo de ferramentas especiais destinadas ao fabrico de tubagens, petróleo/gás, aeronáutica, electrónica, indústria do papel, instrumentos de alta precisão e máquinas, figura 42. Estas ferramentas têm elevada resistência ao desgaste, impacto, corrosão e deformação.

Quanto à área das ferramentas para pedreiras, destinadas à exploração da pedra e minas, são produzidos equipamentos de perfuração, ferramentas para acabamento de pedra e ferramentas para máquinas de transformação de pedra.



Figura 42 - Apresentação dos produtos Palbit (Palbit.pt)

3.3 Ferramentas, Materiais e equipamentos

Neste capítulo são apresentadas e caracterizadas as ferramentas/equipamentos, materiais maquinados e equipamentos de ensaio.

3.3.1 Ferramentas

Conforme já foi mencionado, os ensaios de maquinagem utilizaram insertos de corte do fabricante Palbit. As ferramentas de corte utilizadas são do tipo RDHT, cujas principais dimensões são apresentadas na figura 43. São insertos de corte circulares, que permitem ser rodados até três posições da face de corte, conseguindo com isto uma maior rentabilidade. Para suporte dos insertos, foi utilizado um porta-insertos com diâmetro de 16 mm e de dois alojamentos, conforme se mostra na figura 44. Este tipo de insertos é normalmente utilizado em operações de fresagem. Nos ensaios de maquinagem, utilizaram-se insertos do tipo RDHT de classes diferentes, PH7930 e PH5740. As características principais que as diferenciam são apresentadas na tabela 5.

Tabela 5 - Características dos insertos PH7930 e PH5740 (Palbit)

Designação	Dimensões	Ângulo Ataque	Classe	Substrato	Revestimento
RDHT 0802 MOE-LS	De acordo com a Norma ISO	+13°	PH7930	PH0930	PVD AlTiN (7 µm)
RDHT 0802 MOE-LS	De acordo com a Norma ISO	+13°	PH5740	PH0710	CVD Al ₂ O ₃ Ti(C,N) (15 µm)

3.3.1.1 Insertos de corte PH7930

O inserto Palbit do tipo RDHT classe PH7930 pertence à série PH7, cujos graus são revestidos pelo processo PVD. Esta série destina-se à maquinagem de aços inoxidáveis, aços refractários e ferros fundidos, figura 45. Estas ferramentas têm uma duração superior em 30% relativamente à série PH6. A série PH7, segundo o fabricante, permite velocidades de corte superiores, devido à utilização de Carbonetos de Tungsténio especiais, com revestimento por PVD em AlTiN, ver figuras 46, 47 e 48. Devido ao revestimento PVD, é possível obter maior dureza, resistência à oxidação, resistência a altas temperaturas, menor desgaste e maior durabilidade. Na Tabela 6 são apresentadas as principais características técnicas, como tipo de revestimento, espessura, e a Tabela 8 apresenta-nos a composição química, granulometria e as propriedades físicas e mecânicas.

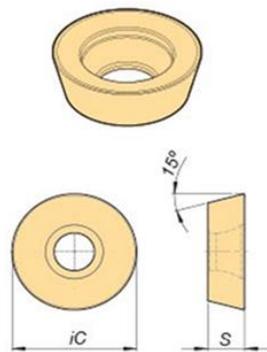


Figura 43 - Esboço da geometria dos insertos RDHT (Palbit, 2010)

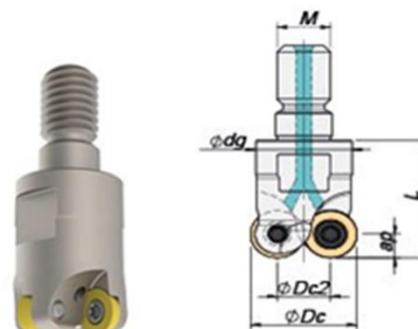


Figura 44 – Porta-insertos utilizado (Palbit, 2010)

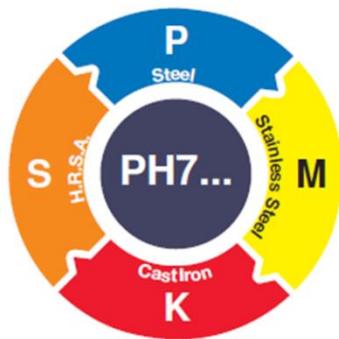


Figura 45 - Esquema dos campos de aplicação da série PH7 (Palbit, 2010)



Figura 48 - Imagem do revestimento PVD (AlTiN) (Palbit)

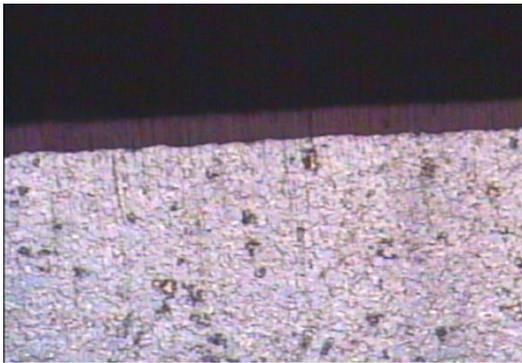


Figura 46 - Microestrutura do revestimento AlTiN (1500x) (Palbit)

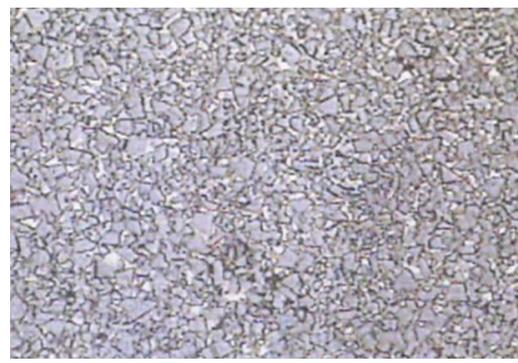


Figura 47 - Microestrutura do substrato de grão médio (1500x) (Palbit)

Tabela 6 - Características do inserto de corte RDHT PH7930 (Palbit)

Características do inserto RDHT PH7930	
Cor	Cinzento Rosado
Micro-Dureza (HV)	Aproximadamente 3600
Revestimento	AlTiN + "Al ₂ O ₃ "
Espessura (µm)	6 - 7
Processo	PVD – Deposição Física em Vapor

Tabela 7 - Composição química e física da classe PH7 (Palbit)

Composição Química (em % peso):				
% Co	10,00 ± 0,20	% γ (TaC+NbC+TiC) + Outro	(0,5-1,5)	
% WC	Balanço para 100%			
Granulometria do WC utilizado na mistura: Médio ($\approx 3,0\mu\text{m}$)				
Propriedades Físicas e Mecânicas no estado Sinterizado				
Dureza	1385 ± 40	HV10	Tamanho Grão ASTM	Microgrão-Fino
TRS (B)	3100	N/mm ²	Porosidade	<A02 B00 C00

3.3.1.2 Inseto de corte PH 5740

O inserto Palbit tipo RDHT classe PH5740 pertence à série PH5, cujos graus são revestidos por CVD. Esta série destina-se à maquinagem de aços ao carbono e aços inoxidáveis, como mostra a figura 48.

ISO	PSM	Material	HB (Brinell)
P	1	Aços não ligados	125-220
	2	Aços de baixa liga	220-280
	3	Aços de alta liga	280-380
M	4	Ferrítico/Martensítico	200-330
	5	Austenítico	200-330
	6	Austenítico-ferrítico (Duplex)	230-260

Figura 48 - Campos de aplicação da série PH5 (Palbit)

Segundo o fabricante, a série PH5 é utilizada em operações de corte com arranque de apara e em operações de desbaste e semi-desbaste, em regime de médias velocidades de corte. A composição do revestimento CVD é TiN/TiCN/Al₂O₃, ver figuras 49 e 50, onde é possível ver a microestrutura do substrato sinterizado. Por estes motivos, é possível obter maior dureza, resistência à oxidação, resistência a altas temperaturas, menor desgaste e maior durabilidade.

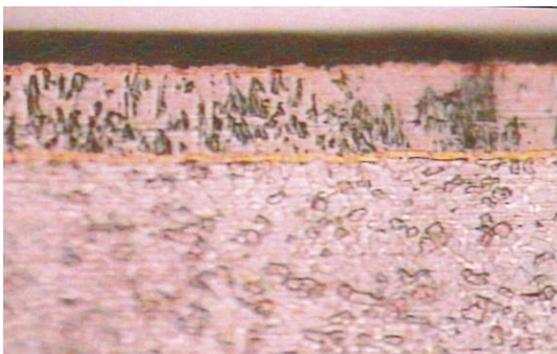


Figura 49 - Microestrutura do revestimento Al_2O_3 (1500x) (Palbit)



Figura 50 - Microestrutura sinterizada do microgrão (1500x) (Palbit)

Na Tabela 9 são apresentadas as principais características técnicas como revestimento, espessura, e na Tabela 10 é apresentada a composição química, granulometria, propriedades físicas e mecânicas.

Tabela 8 - Características inserto RDHT PH5740 (Palbit)

Características do inserto RDHT PH5740		
Cor	Preta	
Revestimento	TiN/TiCN/ Al_2O_3	
Espessura (μm)	TiN/TiCN: 7-11 Al_2O_3 : 4-7	Total: 13-17
Processo	CVD – Deposição Química em Fase Vapor	
Tipo de Al_2O_3	Alfa	

Tabela 9 - Composição química e física da classe PH5 (Palbit)

Composição Química:				
Em Peso				
% Co	11.50 ± 0.20	% γ (TaC+NbC+TiC) + Outro	(1.0-2.0)	
% WC	Balanco para 100%			
Granulometria do WC utilizado na mistura:				
Microgrão ($\approx 0.8\mu\text{m}$)				
Propriedades Físicas e Mecânicas em Sinterizado				
Dureza	1480 ± 40	HV10	Tamanho Grão ASTM	Microgrão-Fino
TRS (B)	3500	N/mm ²	Porosidade	<A02 B00 C00

3.3.1.3 Centro de maquinagem

O centro de maquinagem utilizado para a realização dos ensaios está localizado no Laboratório de Tecnologia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP). É um centro de maquinagem da marca HAAS, modelo VF-2, e cujo modelo é apresentado na figura 51.



Figura 51 - Centro de maquinagem HAAS VF-2

As especificações técnicas do centro de maquinagem podem ser consultadas na Tabela 11.

Tabela 10 - Tabela de especificações técnicas do centro de maquinagem HAAS VF-2

Cursos	Características
Eixo X	762 mm
Eixo Y	406 mm
Eixo Z	508 mm
Nariz da árvore à mesa (máx)	610 mm
Nariz da árvore á mesa (min)	102 mm
Mesa	Características
Comprimento	914 mm
Largura	356 mm
Peso máximo na mesa	1361 kg
Árvore	Características
Potência máxima	22,4 KW
Velocidade máxima	10000 rpm
Força máxima	122 Nm @ 2000 rpm
Sistema transmissão	Directa
Força máxima c/caixa de transmissão opcional	339 Nm @ 450 rpm
Cone	CT ou BT 40
Lubrificação do rolamento	Injeção de ar/óleo
Líquido refrigeração	Emulsão

Avanço		Características
Em X		25,4 m/min
Em Y		25,4 m/min
Em Z		25,4 m/min
Em corte (máxima)		16,5 m/min
Motores do eixo		Características
Força máxima X		11343 N
Força máxima Y		11343 N
Força máxima Z		18683 N
Armazém de ferramentas		Características
Tipo		Carrossel
Capacidade		20
Diâmetro máximo da ferramenta (cheio)		89 mm
Peso máximo da ferramenta		5,4 Kg
Ferramenta a Ferramenta (média)		4,2 s
Apara a apara (média)		4,5 s
Geral		Características
Ar necessário		113 L/min, 6,9 bar
Capacidade do líquido de refrigeração		208 L

3.3.1.4 Acessórios

Para além da fresa de dentes postiços, utilizou-se uma haste anti-vibrátil do tipo apresentado na figura 52. Como o próprio nome indica, este acessório tem como principal objectivo introduzir amortecimento no sistema e, assim, reduzir o nível de vibrações durante o processo de maquinação.

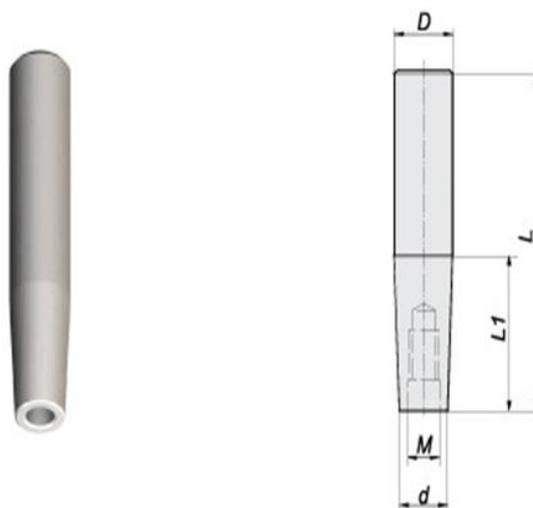


Figura 52 - Haste anti-vibrátil (Palbit, 2016)

3.3.2 Materiais

Os materiais utilizados para a realização deste trabalho foram dois tipos de aço inoxidável Duplex: X2CrNiMoCu25-6-3-3 e GX2CrNiMoN26-7-4.

A combinação das suas características permite que estes tenham aplicações em contextos adversos, no que diz respeito à resistência, durabilidade e manutenção, conforme já referido no capítulo anterior.

3.3.2.1 Composição química

Os aços inoxidáveis Duplex dos tipos X2CrNiMoCu25-6-3-3 e GX2CrNiMoN26-7-4, utilizados neste trabalho, foram vazados e fornecidos pela empresa Arsopi. O aço X2CrNiMoCu25-6-3-3 é um aço equivalente ao aço EN 1.4507 e o aço GX2CrNiMoN26-7-4 é equivalente ao EN 1.4501.

De uma forma resumida, a composição química do aço inoxidável Duplex X2CrNiMoCu25-6-3-3 é apresentada na Tabela 11. Enquanto a composição química do aço Inoxidável Duplex GX2CrNiMoN26-7-4 é apresentado na Tabela 12.

Tabela 11 - Composição química do aço inoxidável Duplex X2CrNiMoCu25-6-3-3 (Arsopi)

Análise Química														
% Máxima														
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb	V	W	N	Co	Fe
0,03	0,95	1,47	0,02	0,00	25,12	5,89	0,2	0,14	0,01	0,02	0,08	0,12	0,08	63,16

Tabela 12 - Composição química do aço inoxidável Duplex GX2CrNiMoN26-7-4 (Arsopi)

Análise Química														
% Máxima														
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb	V	W	N	Co	Fe
0,03	1,00	1,00	0,035	0,015	26,00	8,00	4,00	1,00	0,01	0,02	1,00	0,30	0,00	0,00

3.3.2.2 Propriedades físicas e mecânicas

Os aços inoxidáveis Duplex X2CrNiMoCu25-6-3-3 e o GX2CrNiMoN26-7-4 têm alta resistência mecânica devido à sua estrutura Duplex e ao seu teor em Azoto, possuindo características muito especiais. Entre elas está o seu excelente comportamento

plástico, que tem como característica apresentar elevadas deformações sem que ocorra estricção até temperaturas próximas de 50% da sua temperatura de fusão.

As principais características físicas e mecânicas do aço inoxidável Duplex X2CrNiMoCu25-6-3-3 e GX2CrNiMoN26-7-4 são apresentadas de uma forma resumida na Tabela 13 e Tabela 15, respectivamente. Os aços inoxidáveis Austeníticos e Duplex têm propriedades físicas e mecânicas que lhes conferem uma maquinabilidade diferente, quando comparados com o aço ao carbono e aos aços inoxidáveis Ferríticos ou Martensíticos. A maior diferença está na alta ductilidade, bem como na sua tendência de encruamento e de formação de arestas postizas nas ferramentas de corte. Para além destas características, nos inoxidáveis Duplex a formação da apara é dificultada, pela elevada resistência mecânica destes materiais.

Em todos os processos de maquinagem que envolvam o processamento de aços inoxidáveis Duplex, o encruamento é mais evidenciado que nos aços ao carbono e aços Ferríticos e Martensíticos. O aumento da dureza da superfície maquinada faz com que a vida da ferramenta diminuía drasticamente.

Tabela 13 – Propriedades físicas e mecânicas do aço inoxidável Duplex X2CrNiMoCu25-6-3-3 (Arsopi)

Propriedades Físicas e Mecânicas	
Peso Específico	7,81 kg/dm ³
Resistência à tracção	760 MPa
Tensão de cedência 0.2%	550 MPa
Módulo de Young	199 GPa
Dureza	220-270 HB
Alongamento	25%
Coefficiente de Poisson	0,32
Resistência ao impacto Charpy V 20°C	80 J
Resistência ao impacto Charpy V 46°C	45 J

Tabela 14 - Propriedades físicas e mecânicas do aço inoxidável Duplex GX2CrNiMoN26-7-4 (Arsopi)

Propriedades Físicas e Mecânicas	
Peso Específico	7,80 kg/dm ³
Resistência à tracção	711 MPa
Tensão de cedência 0.2%	500 MPa
Módulo de Young	200 GPa

Dureza	290 HB
Alongamento	25%
Coeficiente de Poisson	0,32
Resistência ao impacto Charpy V 20°C	60 J
Resistência ao impacto Charpy V 46°C	40 J

3.3.3 Equipamentos laboratoriais

Para a recolha e tratamento de dados dos ensaios realizados, foi necessário recorrer a alguns equipamentos laboratoriais. Desses equipamentos, cumpre destacar os seguintes:

- Câmara de filmar de alta velocidade;
- Balança digital;
- Rugosímetro;
- Acelerómetros e placa de aquisição de sinal;
- Microscópio electrónico de varrimento.

3.3.3.1 Câmara de vídeo de alta velocidade

A câmara de vídeo de alta velocidade permite gravar o percurso de maquinagem com óptima resolução, de forma a analisar ao detalhe a formação da apara. Sem recorrer a esta tecnologia, seria praticamente impossível perceber a forma como a apara é arrancada e toda a dinâmica em volta do corte. Isto só é possível porque a câmara de alta velocidade utilizada consegue captar até 500.000 de imagens por segundo. A câmara utilizada foi uma câmara FASTCAM SA4 500K C1. As principais características podem ser vistas na figura 53.



Fabricante	Photron
Marca e Modelo	FASTCAM SA4 500K
Max Frame	500.000fps
Memória	8 GB

Figura 53 - Câmara de vídeo de alta velocidade FASTCAM SA4 500K Modelo C1 Colour (Photron.com)

3.3.3.2 Balança digital de precisão

Com vista a verificar diferenças na massa dos insertos utilizados, foi necessário utilizar uma balança digital de precisão existente no Laboratório de Metalografia do ISEP, para efectuar as pesagens antes e depois da realização de cada um dos ensaios de maquinação. A balança utilizada foi uma balança digital da Denver Instruments, modelo APX-200, cujas características são apresentadas na figura 54.



Modelo	APX-200
Capacidade	200 g
Campo pesagem	0 a 200 g
Precisão	0,1 mg

Figura 54 - Balança digital APX-200 (DenverInstrumentusa.com)

3.3.3.3 Rugosímetro

Para analisar o estado superficial do aço inoxidável Duplex após cada ensaio de maquinação, foi utilizado um rugosímetro da marca Mahr, modelo M2, existente no Laboratório de Tribologia do ISEP, que pode ser observado na figura 55. As características técnicas do rugosímetro são apresentadas na tabela 14.



Figura 55 - Rugosímetro Mahr M2 (Mahr.com)

Tabela 15 - Características técnicas rugosímetro Mahr M2 (Mahr.com)

Princípio de medição	Método <i>Stylus</i>
Alcance medições	Até 150 μm
Filtro	Seleccção automática
Cut-offs	0.25/0.8/2.5 mm
Comprimento de travessia conforme DIN EN ISO 4288/ASME 8461:	1,75/5,6/17,5 mm; conforme EN ISO 12085:1 mm, 2 mm, 4 mm, 8 mm, 12 mm, 16 mm
Comprimentos de amostra	De 1 até 5 mm
<i>Standards</i>	DIN/ISO/CNOMO (MOTIF)
Parâmetro conforme DIN/ISO/SEP	Ra, Rz, Rmax, Rz, Rp, Rq, R1, R3z, Rk, Rvk, Mr1, Mr2, Mr, Sm, R _{Pc} , as per JIS:Ra, Rz, Rv, S _m , s _{tp}
Tipo impressão	Perfil R (ISO/JIS), perfil-P (MOTIF), curva de relação do material, registo de medição

3.3.3.4 Acelerómetros

Para recolha e tratamento de vibrações geradas durante os ensaios de maquinagem, foram aplicados dois acelerómetros na árvore do centro de maquinagem. O equipamento de recolha das vibrações é constituído por uma placa da National Instruments NI-4431, e dois acelerómetros da PCB, modelo 352A24 e modelo 352C22 (anexo I). Na figura 56 é apresentada a imagem da placa e dos dois acelerómetros utilizados na recolha do sinal em aceleração durante os ensaios. Os dados recolhidos foram posteriormente processados através do *software* LabVIEW, utilizando um computador.



Figura 56 - Placa National Instruments NI-4431 e acelerómetros PCB (National Instruments e PCB)

3.3.3.5 Microscópio electrónico de varrimento

Para análise do estado de degradação das ferramentas de corte de forma detalhada, após a realização dos ensaios de maquinagem, recorreu-se a um microscópio electrónico de varrimento da marca FEI, modelo Quanta 400 FEG, semelhante ao

apresentado na figura 57. Os dados técnicos referentes ao equipamento são apresentados na Tabela 16.



Figura 57 - Microscópio electrónico de varrimento FEI Quanta 400 FEG (CEMUP)

Tabela 16 - Especificações técnicas do microscópio electrónico de varrimento

Especificações Microscópio Electrónico Varrimento	
Emissão de campo de alta resolução-SEM coluna otimizada para alto brilho/alta	Câmara de vácuo
Lente objectiva de 45 de geometria com bombeamento diferencial através da lente e aberturas das objectivas aquecidas	Alto vácuo: 6×10^{-4} Pa;
Resolução	Baixo vácuo: 10 a 130 Pa;
<u>Alto vácuo:</u>	ESEM vácuo: 10-4000 Pa.
- 0,8 N·m a 30 kV (STEM);	Sistema de vácuo
- 1,2 N·m a 30 kV (SE);	1x240 l/s TMP, PVP 2x;
- 2,5 N·m a 30 kV (BSE);	Patenteado através da lente
- 3,0 N·m a 1 kV (SE).	diferencial de bombeamento;
<u>Baixo vácuo:</u>	Comprimento do caminho de gás:
- 1,5 N·m a 30 kV (SE)	10 ou 2 mm
- 2,5 N·m a 30 kV (BSE);	Câmara
- 3,0 N·m a 1 kV (SE).	379 mm da esquerda para direita;
Modo de vácuo estendido (ESEM):	10 mm WD analítica;
- 1,5 N·m a 30 kV(SE).	10 Portas;
Voltagem de aceleração: 200 V - 30 kV ;	EDX ângulo de saída 35°.
Corrente da sonda até 100 nA – continuamente ajustável.	5-eixos motorizados etapa
Detectores	X, Y = 100 milímetros;
Everhardt Thornley SE D;	Z = 60 milímetros (Z-folga de 75
Baixo vácuo SE (LFD);	milímetros);
Gasoso SE D (GSED);	T=-5° a +70° (WD dependente);
IB-CCD;	R= 360°, contínua.
Estado sólido BSED.	

3.4 Ensaios e métodos

Neste capítulo faz-se uma breve abordagem às condições no que refere a parâmetros, operações, e metodologias adoptadas durante e após a realização dos ensaios.

3.4.1 Condições e parâmetros dos ensaios

A estratégia de maquinagem utilizada foi a de realização de cavidade com interpolação helicoidal, com entrada em rampa, conforme se ilustra na imagem 58.

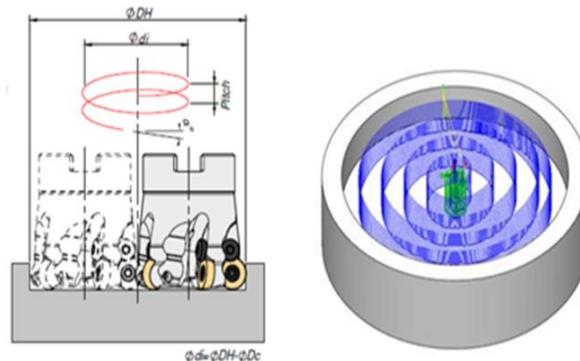


Figura 58 - Esquema de maquinagem com interpolação helicoidal (Palbit, 2016)

Os parâmetros e condições dos ensaios foram estipulados pelo próprio fabricante dos insertos e mantiveram-se inalterados em todos os ensaios realizados. Os principais parâmetros utilizados e condições de ensaio são apresentados na Tabela 17. Como a fresagem é um processo intermitente, as temperaturas geradas na aresta de corte apresentam variações cíclicas entre vários níveis. A combinação de variações cíclicas térmicas e de tensões na aresta de corte que podem resultar em fissuras e, no pior cenário, podem levar ao final prematuro da vida da ferramenta. Nestes ensaios optou-se por não se utilizar fluido de corte, por se tratar da condição mais severa de ensaio. Além disso, a presença do fluido de corte impedia a filmagem da formação da apara com a câmara de alta velocidade. Quanto mais quente a área de corte, mais inapropriado se torna o uso do fluido de corte.

3.4.2 Ensaios de maquinagem

Foram realizados dezasseis ensaios de maquinagem para além do pré-ensaio, que serviu para assegurar que as condições de maquinagem eram as mais indicadas. Foram utilizados dois materiais para maquinagem e dois grupos de quatro insertos com revestimento PVD e CVD.

3.4.2.1 Metodologia dos ensaios

O ensaio experimental foi designado de pré-ensaio ou ensaio zero e apenas foi considerado neste relatório para análise do comportamento de um tipo de insertos de corte, com recurso a filmagem de alta velocidade durante o ensaio. Os ensaios realizados tiveram duas variantes, que foram os ensaios de apenas um ciclo completo

por face de corte, e os ensaios de dois ciclos de corte completos por face de corte. Os ensaios de um ciclo completo de maquinagem, tiveram uma duração de 324 segundos, com uma profundidade de corte constante de um milímetro. Os ensaios de dois ciclos completos de maquinagem, tiveram um tempo de ciclo de 647 segundos, com uma profundidade de corte constante de um milímetro. Foram realizados ensaios de maquinagem completos sem interrupção, ou seja, corte contínuo, tendo sido recolhida as vibrações geradas nas duas direcções ortogonais. Cada par de insertos utilizados realizou sempre dois ensaios iguais em cada tipo de aço. Entre os ensaios, foram efectuadas pesagens dos insertos de corte, recolha da rugosidade da superfície maquinada.

Tabela 17 - Condições e parâmetros dos ensaios

Parâmetros/Condições		
Vc	120	[m/min]
n	1516	[rpm]
f	716,1	[mm/min]
ap	1,0	[mm]
fz	0,15	[mm/rot]
Dc	16	[mm]
Z	2	Unidades
ae	6,4	[mm]
r	4	
Tempo/ciclo	11	[min]
Frequência das Lâminas	50,53	[Hz]
Comprimento de corte	7,876	[m]
Operação	Cavidade	
Entrada	Rampa	
Estratégia	Interpolação Helicoidal	
Fluido de corte	Sem fluido de corte	
Refrigeração	Ar comprimido	

Para recolha das vibrações, foram instalados dois acelerómetros na árvore do centro de maquinagem, de forma a recolher os valores de vibração no eixo X e Y.

A recolha dos valores da rugosidade foi efectuada no fim de cada ensaio de maquinagem. Ao fim de cada ciclo de maquinagem, a superfície maquinada foi limpa, recorrendo a acetona e papel. Depois procedia-se à recolha dos valores da rugosidade tangencial e radial, com auxílio do rugosímetro. Além da recolha dos dados da rugosidade e do sinal de vibração, também foi registado o desgaste dos insertos através da sua pesagem individual, de forma a podermos estimar a variação de massa entre ensaios.

De forma a facilitar a interpretação do relatório, optou-se por codificar os materiais e os insertos de corte, sendo estes apresentados na Tabela 18, e usados na descrição dos ensaios realizados Tabela 19. É de referir que a interpretação e discussão dos resultados tem por base a identificação atribuída na tabela 19.

Tabela 18 - Codificação dos materiais e ferramentas

Descrição	Codificação
Inserto de corte PH7930	Ferramenta do tipo A
Inserto de corte PH5740	Ferramenta do tipo B
Aço X2CrNiMoCu25-6-3-3	Material 1
Aço GX2CrNiMoN26-7-4	Material 2

Tabela 19 - Resumo dos ensaios

Ensaio	Ref ^a	Inserto	Revestimento	Tipo de aço	Comprimento de corte [m]
1	A1C1	(A) PH7930	PVD	(1) X2CrNiMoCu25-6-3-3	(C) 3,94
2	A1C2	(A) PH7930	PVD	(1) X2CrNiMoCu25-6-3-3	(C) 3,94
3	A1L1	(A) PH7930	PVD	(1) X2CrNiMoCu25-6-3-3	(L) 7,87
4	A1L2	(A) PH7930	PVD	(1) X2CrNiMoCu25-6-3-3	(L) 7,87
5	A2C1	(A) PH7930	PVD	(2) GX2CrNiMoN26-7-4	(C) 3,94
6	A2C2	(A) PH7930	PVD	(2) GX2CrNiMoN26-7-4	(C) 3,94
7	A2L1	(A) PH7930	PVD	(2) GX2CrNiMoN26-7-4	(L) 7,87
8	A2L2	(A) PH7930	PVD	(2) GX2CrNiMoN26-7-4	(L) 7,87
9	B1C1	(B) PH5740	CVD	(1) X2CrNiMoCu25-6-3-3	(C) 3,94
10	B1C2	(B) PH5740	CVD	(1) X2CrNiMoCu25-6-3-3	(C) 3,94
11	B1L1	(B) PH5740	CVD	(1) X2CrNiMoCu25-6-3-3	(L) 7,87
12	B1L2	(B) PH5740	CVD	(1) X2CrNiMoCu25-6-3-3	(L) 7,87
13	B2C1	(B) PH5740	CVD	(2) GX2CrNiMoN26-7-4	(C) 3,94
14	B2C2	(B) PH5740	CVD	(2) GX2CrNiMoN26-7-4	(C) 3,94
15	B2L1	(B) PH5740	CVD	(2) GX2CrNiMoN26-7-4	(L) 7,87
16	B2L2	(B) PH5740	CVD	(2) GX2CrNiMoN26-7-4	(L) 7,87

3.5 Resultados

Após a realização dos ensaios de maquinagem e de se ter efectuado as recolhas de dados necessárias, procedeu-se à análise e interpretação dos valores recolhidos no que se refere à rugosidade superficial, variação de massa dos insertos de corte, vibrações e análise do estado de degradação de cada face de corte, a partir das imagens recolhidas com o microscópio electrónico de varrimento.

3.5.1 Pré-Ensaio (Ensaio zero)

O pré-ensaio serviu para analisar se as condições de ensaio eram adequadas para a recolha de dados. Este foi aproveitado para realizar a recolha de imagens com a câmara de vídeo de alta velocidade, os quais permitiram observar em detalhe a interacção entre o inserto e o material e a formação da apara durante o corte. Os parâmetros definidos para o pré-ensaio mostraram-se adequadas tendo sido adoptadas para os restantes ensaios. Nas figuras 59 e 60 são apresentadas imagens recolhidas da operação do bloco do pré-ensaio.

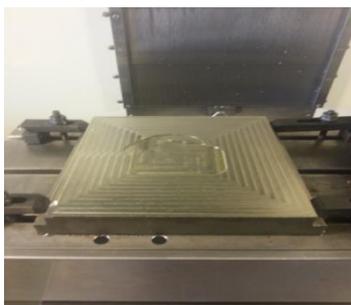
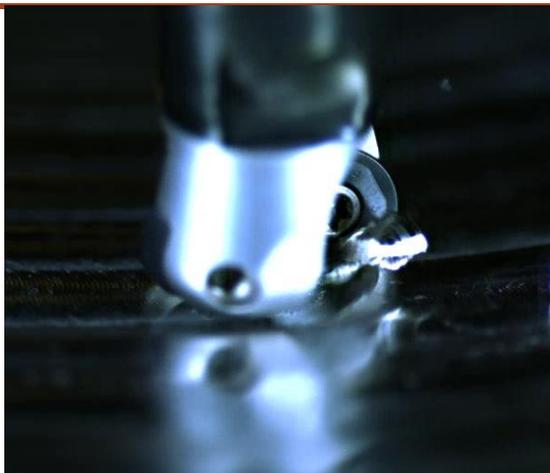
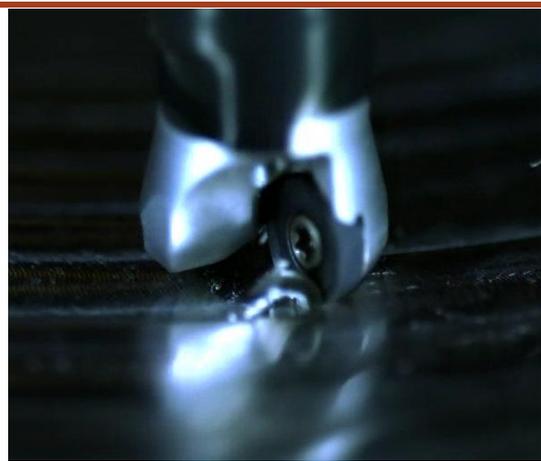
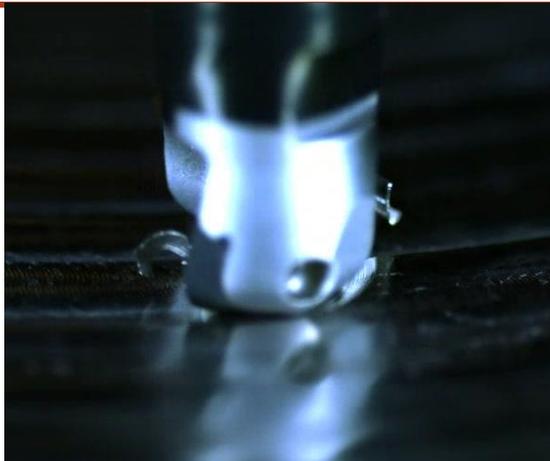
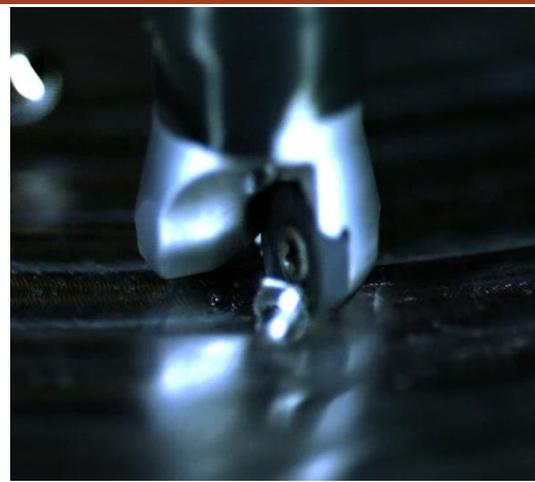


Figura 59 – Preparação do bloco de Duplex Figura 60 - Ensaio experimental

3.5.1.1 Imagens de alta velocidade

Através da observação das imagens de vídeo realizados durante o ensaio experimental, foi possível verificar o desempenho dos dois tipos de ferramentas de corte durante o corte do material 1. Na Tabela 20 são apresentados algumas imagens extraídas do vídeo de alta velocidade. Sem recurso a imagens de alta velocidade jamais seria possível identificar que não há desprendimento adequado das aparas. O ângulo de ataque e o quebra-apara dos insertos de corte mostraram-se pouco eficazes. Houve circunstâncias em que as aparas se mantiveram presas à ferramenta demasiado tempo, o que provocava o esmagamento da apara pela ferramenta, situação que contribui para o desgaste precoce da ferramenta, aumentando a probabilidade de ocorrer a fractura da aresta cortante, para além de prejudicar o acabamento superficial da peça.

Tabela 20 - Imagens da filmagem a alta velocidade

Imagens de alta velocidade do ensaio experimental

3.5.2 Ensaio A1C1 e A1C2

Nos ensaios A1C1 e A1C2 utilizaram-se ferramenta do tipo A, que realizou um percurso de corte de 3,94 m no material 1. No fim do ensaio A1C1, os insertos de corte foram retirados do porta-insertos e rodados para dar início ao ensaio A1C2. Trata-se de uma repetição de ensaios e tem como principal objectivo permitir calcular a média dos parâmetros e identificar eventuais desvios entre ensaios.

3.5.2.1 Análise da rugosidade

As rugosidades Ra, Rz e Rmax obtidos experimentalmente para o percurso de maquinagem de cada um dos ensaios de um ciclo de corte são apresentados na Tabela 21. As respectivas médias são consideradas como valores de referência e são representativos do estado geral do nível de rugosidade superficial. Para além das médias, foi calculado o desvio padrão.

Tabela 21 - Rugosidade da superfície de corte nos ensaios A1C1 e A1C2 (Valores em μm)

MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE MAQUINADA						
	RADIAL			TANGENCIAL		
	Ra	Rz	Rmax	Ra	Rz	Rmax
ENSAIO A1C1						
MEDIÇÃO 1	0,713	3,970	4,580	0,680	3,960	6,490
MEDIÇÃO 2	0,695	3,950	6,920	0,586	3,540	4,460
MEDIÇÃO 3	0,731	4,170	4,530	0,915	4,410	5,440
MÉDIA	0,713	4,030	5,343	0,727	3,970	5,463
DESVIO PADRÃO \pm	0,015	0,099	1,115	0,138	0,355	0,829
ENSAIO A1C2						
MEDIÇÃO 1	0,588	0,588	4,220	7,730	0,678	4,930
MEDIÇÃO 2	0,600	4,620	7,080	0,579	3,820	5,580
MEDIÇÃO 3	0,457	3,530	4,490	0,823	5,870	8,350
MÉDIA	0,548	4,123	6,433	0,693	4,873	7,543
DESVIO PADRÃO \pm	0,065	0,450	1,400	0,100	0,838	1,396

A análise dos resultados apresentados na tabela 21 relativos aos valores da rugosidade Ra, Rz e Rmax, nas direcções radial e tangencial, mostram que estes são muito próximos nos dois ensaios. Se compararmos os valores de Ra radial e tangencial do ensaio A1C1 com os valores do ensaio A1C2, verifica-se que os valores de Ra radial e tangencial são superiores no A1C1.

3.5.2.2 Análise do desgaste

A estimativa do desgaste através da pesagem individual de cada inserto, antes e após a realização de cada ensaio, permitiu obter valores correspondentes à perda de massa dos insertos de corte.

Tabela 22, é perceptível que os insertos de corte tiveram um desgaste desigual durante os dois ensaios. Houve uma maior perda de massa no ensaio A1C1 que no A1C2. Este resultado vai de encontro aos valores obtidos na análise das superfícies maquinadas. Verifica-se que o superior desgaste observado através da perda de massa dos insertos no ensaio A1C1, corresponde a valores superiores da rugosidade Ra.

Tabela 22 - Desgaste verificado nos ensaios A1C1 e A1C2 (Valores em g)

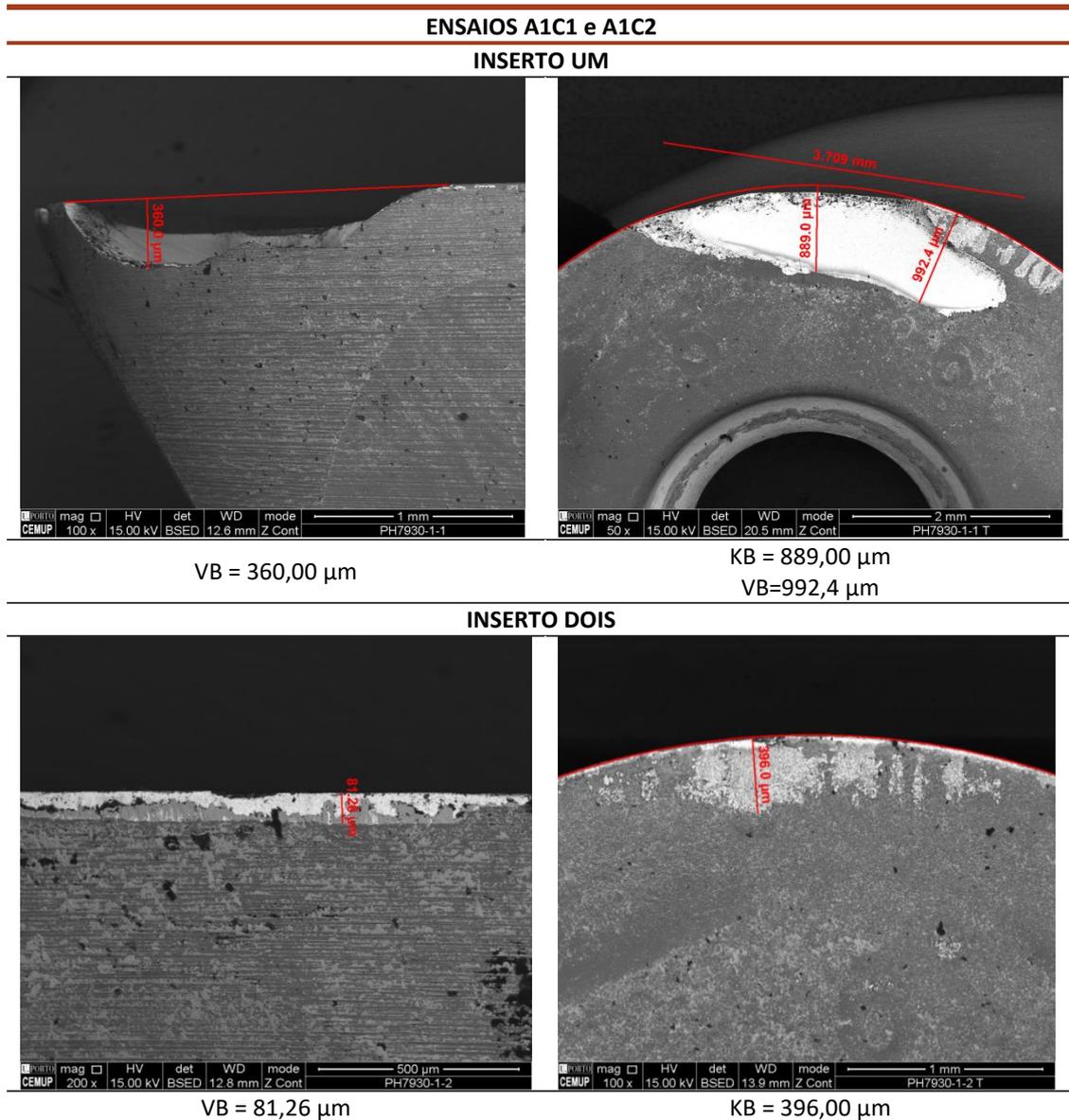
ENSAIO	A1C1		A1C2
AÇO	X2CrNiMoCu25-6-3-3		X2CrNiMoCu25-6-3-3
INSERTO	PH7930 (PVD)		PH7930 (PVD)
PAR DE INSERTO	1		1
Nº VOLTAS	1		1
FACE CORTE	1		2
INSERTO 1 (g)	1,0299	1,0291	1,0281
INSERTO 2 (g)	1,0262	1,0222	1,0210
PESO TOTAL (g)	2,0561	2,0513	2,0491
PERDA MÉDIA/ENSAIO (g)	-0,0048		-0,0022
PERDA TOTAL (g)			0,0070

3.5.2.3 Análise do desgaste por microscopia electrónica de varrimento

As imagens de microscopia electrónica de varrimento correspondentes aos ensaios A1C1 e A1C2 são apresentadas na Tabela 23, sendo possível observar em detalhe o tipo de desgaste/avaria ocorrido durante os ensaios.

Estas revelam que um dos insertos sofreu danos severos durante os ensaios, enquanto a outra apenas sofreu desgaste do flanco, fruto do trabalho de corte. Os dois insertos de corte que realizaram os ensaios A1C1 e A1C2 tiveram diferentes comportamentos durante os ensaios. Esta diferença de desgaste pode ser correlacionada com os diferentes valores de rugosidade verificados em cada um dos ensaios, em que o ensaio A1C1 apresenta valores de Ra radiais e tangenciais superiores ao ensaio A1C2.

Tabela 23 - Imagens do desgaste das ferramentas correspondentes aos ensaios A1C1 e A1C2



O inserto de corte apresenta sinais evidentes de avaria, tais como fracturas na aresta de corte, com um VB de 360 μm e delaminação do revestimento na superfície, com um KB de 992,4 μm. O outro inserto de corte apresenta um desgaste mais reduzido na aresta de corte, com VB igual a 81,26 μm e na face horizontal um KB de 396 μm, valor considerado bastante razoável, se tomarmos em conta as condições severas dos ensaios. Não são conhecidas as razões por detrás da avaria da ferramenta, mas pode-

se colocar como hipótese de ter sido originada por heterogeneidades presentes no material a maquinar, eventuais defeitos de fabrico da ferramenta de corte ou parâmetros de corte inadequados. As heterogeneidades podem ser inclusões de partículas mais duras, etc. A ausência de fluido de corte pode ter sido outra das causas.

3.5.2.4 Análise das vibrações

Uma outra via de identificar o desgaste ou avaria progressivo das ferramentas de corte durante a maquinagem é através da análise do nível das vibrações geradas durante o decorrer do processo. Os dados foram recolhidos através de acelerómetros aplicados na árvore da máquina, nos eixos X e Y, recorrendo ao equipamento mencionado anteriormente e processados utilizando um programa desenvolvido no *software Labview*. Os sinais em aceleração foram integrados no tempo e por forma a velocidade, por isso este é um parâmetro habitualmente usado na avaliação dos estados de ferramentas. Os valores RMS da amplitude da vibração na forma de velocidade foram determinados com intervalos de um segundo, sendo o seu resultado dos ensaios A1C1 e A1C2 apresentados, respectivamente nas figuras 61 e 62. Pela análise da amplitude de vibração RMS da figura 61, é possível identificar o momento em que ocorreu a fractura da aresta de corte do inserto, identificado anteriormente a partir das imagens recolhidas com o microscópio electrónico de varrimento. A avaria terá ocorrido aos 171 segundos, onde se observa um pico no valor da velocidade que atingiu os 0,2 mm/s tendo-se observado um agravamento até ao final do ensaio, onde atingiu uma velocidade próxima dos 1,5 mm/s, aos 321 segundos. O ensaio A1C1 foi o ensaio onde se detectou picos de vibração mais elevados. A figura 62 apresenta os valores RMS da amplitude da vibração gerada durante o ensaio A1C2. Neste, o nível de vibrações foi menor. Todo o ensaio A1C2 apresentou valores sempre muito estáveis e constantes, só se verificando o aumento das vibrações a partir dos 301 segundos do ensaio de maquinagem onde atingiu uma velocidade de 1,2 mm/s.

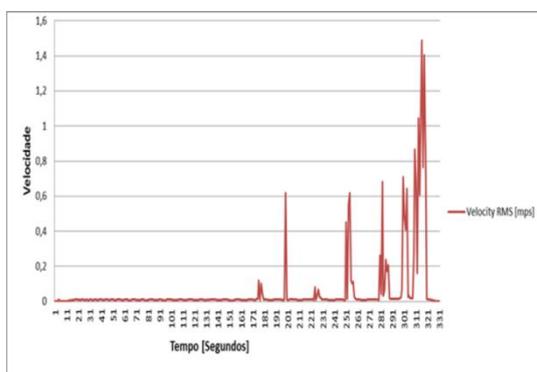


Figura 61 – Vibrações no ensaio A1C1

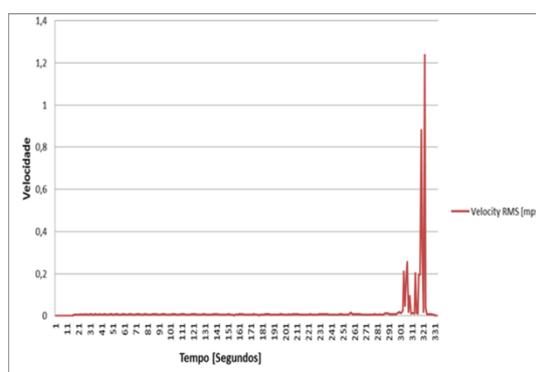


Figura 62 – Vibrações no ensaio A1C2

O aumento da amplitude de vibração detectado aos 301 segundos do ensaio A1C2 já corresponde à parte final do ensaio, onde a ferramenta já apresenta bastante desgaste. Tendo em conta os valores das vibrações do ensaio A1C2 e as imagens obtidas por microscopia electrónica de varrimento, pode-se afirmar que o desgaste apresentado é normal. Por esse mesmo motivo os valores da rugosidade do ensaio A1C2 são inferiores.

3.5.3 Ensaio A1L1 e A1L2

Nos ensaios A1L1 e A1L2 foram utilizadas ferramenta do tipo A, que realizaram um percurso de maquinagem de 7,87 metros, com um tempo de maquinagem de 647 segundos no material.

3.5.3.1 Análise da rugosidade

Os dados das rugosidades obtidos experimentalmente para o percurso de maquinagem dos ensaios de dois ciclos são apresentados na Tabela 24. Os resultados destes ensaios para valores de Ra, nas direcções radial e tangencial, são mais próximos.

Tabela 24 - Rugosidade da superfície de corte nos ensaios A1L1 e A1L2 (Valores em μm)

MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE MAQUINADA						
	RADIAL			TANGENCIAL		
	Ra	Rz	Rmax	Ra	Rz	Rmax
ENSAIO A1L1						
MEDIÇÃO 1	0,947	9,400	9,600	0,792	4,290	5,660
MEDIÇÃO 2	0,642	4,300	5,050	0,730	4,310	5,610
MEDIÇÃO 3	0,684	4,520	5,170	0,958	5,980	7,170
MÉDIA	0,758	6,073	6,607	0,827	4,860	6,147
DESVIO PADRÃO \pm	0,135	2,354	2,117	0,096	0,792	0,724
ENSAIO A1L2						
MEDIÇÃO 1	0,538	5,300	9,560	0,702	5,060	7,660
MEDIÇÃO 2	0,684	3,840	6,290	0,608	4,000	6,120
MEDIÇÃO 3	0,431	3,280	7,270	0,413	3,950	6,270
MÉDIA	0,551	4,140	7,707	0,574	4,337	6,683
DESVIO PADRÃO \pm	0,104	0,852	1,370	0,120	0,512	0,693

No entanto, se compararmos os valores de Ra radial do ensaio A1L1 com os valores de Ra radial do ensaio A1L2, verifica-se que os valores de Ra radial e tangencial do ensaio A1L1 são superiores ao ensaio A1L2. Em resumo, os valores obtidos de Ra, Rz e Rmax radial e tangencial do ensaio A1L2 são inferiores aos valores obtidos no ensaio A1L1.

No ensaio A1L2 conseguiu-se uma melhor qualidade do acabamento superficial. Se for tido em conta que estes dois ensaios realizaram dois ciclos, e compararmos com os valores obtidos nos ensaios A1C1 e A1C2 de apenas um ciclo, conclui-se que os valores obtidos no ensaio de dois ciclos são ligeiramente superiores aos correspondentes a apenas um ciclo. Tendo em consideração que nos ensaios A1L1 e A1L2 os insertos de corte realizaram o dobro do percurso, este resultado só poderá ser justificado pela elevada heterogeneidade do aço inoxidável Duplex.

3.5.3.2 Análise do desgaste

A partir da análise dos resultados apresentados na Tabela 25, é possível identificar que os insertos de corte tiveram um desgaste superior durante o ensaio A1L2 em relação ao ensaio A1L1. Contudo, essa perda de massa superior no ensaio A1L2 não se reflectiu na qualidade superficial, visto que este ensaio apresenta valores mais satisfatórios que os verificados no ensaio A1L1. Contudo, o ensaio A1L2 perdeu mais do dobro de massa relativamente ao ensaio A1L1.

Tabela 25 - Desgaste verificado nos ensaios A1L1 e A1L2 (Valores em g)

ENSAIO	A1L1		A1L2
AÇO	X2CrNiMoCu25-6-3-3		X2CrNiMoCu25-6-3-3
INSERTO	PH7930 (PVD)		PH7930 (PVD)
PAR DE INSERTO	2		2
Nº VOLTAS	2		2
FACE CORTE	1		2
INSERTO 1 (g)	1,0342	1,0342	1,0331
INSERTO 2 (g)	1,0349	1,0337	1,0320
PESO TOTAL (g)	2,0691	2,0679	2,0651
PERDA /ENSAIO (g)	-0,0012		-0,0028
PERDA TOTAL (g)			0,0040

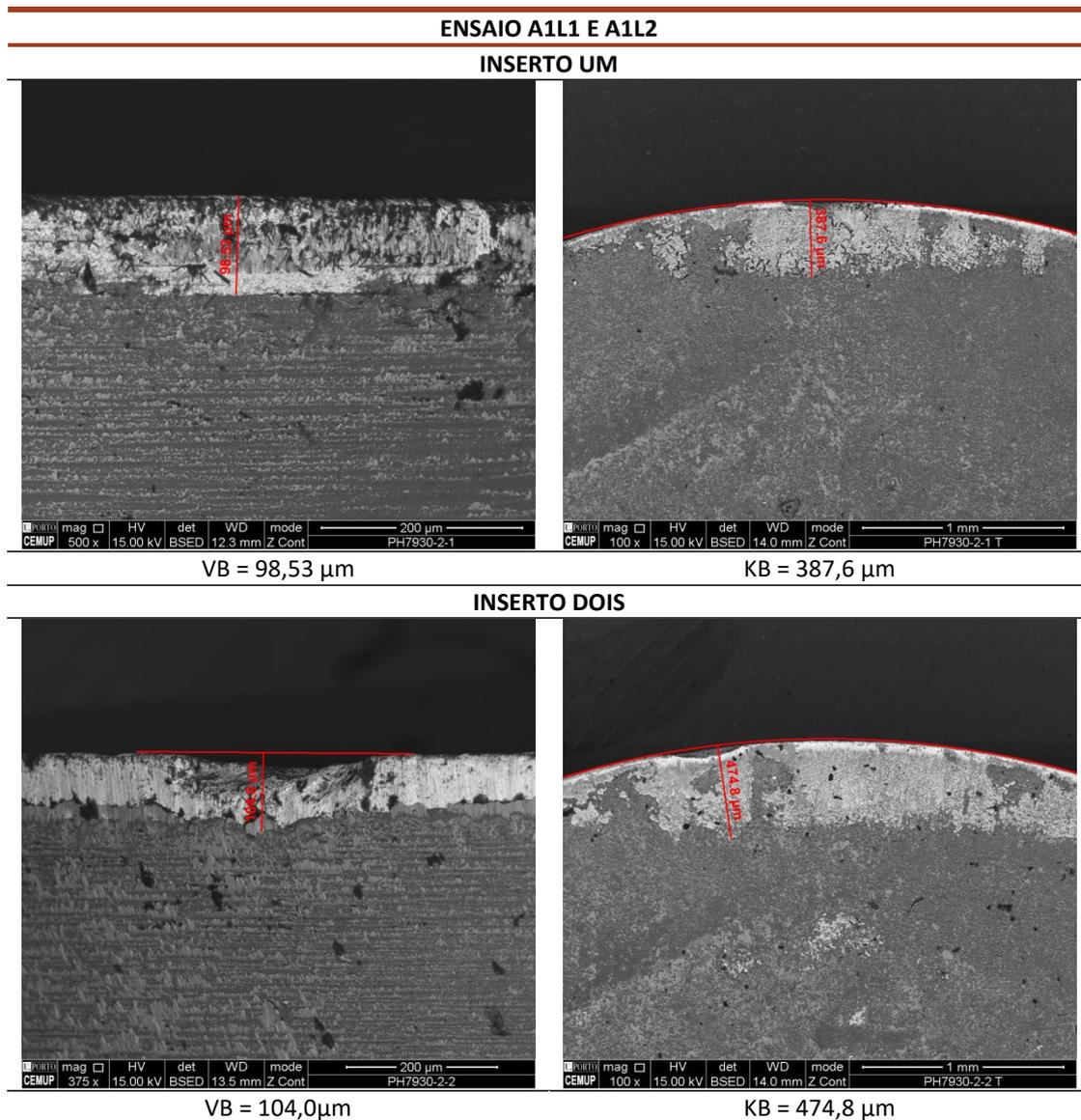
Apesar dos insertos serem idênticos, nos ensaios A1C1 e A2C2, desenvolveram apenas metade do trabalho desenvolvido nos ensaios A1L1 e A2L2, mas perderam mais 0,0030 gramas. Este resultado só pode ser justificado pela variação das propriedades mecânicas do material.

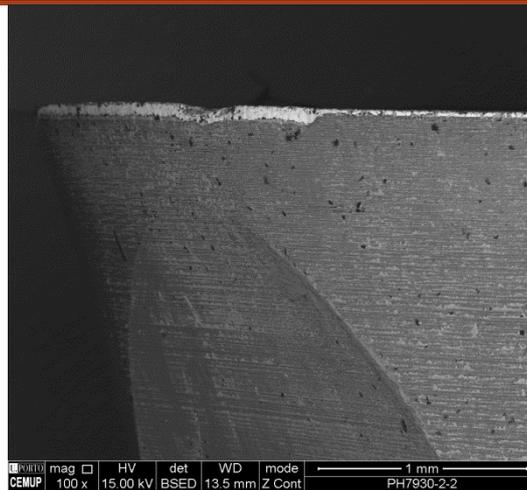
3.5.3.3 Análise do desgaste por microscopia electrónica de varrimento

As imagens resultantes da análise de microscopia electrónica de varrimento realizadas no par de insertos de corte são apresentadas na tabela 26. A sua análise revela que os insertos de corte a nível geral apresentaram um desgaste do flanco. Este retrata o

longo período de maquinagem efectuado pelos insertos. Os insertos de corte, não apresentam sinais relevantes de avaria ao contrário do observado nos insertos dos ensaios A1C1 e A1C2. Nas imagens apresentadas na tabela 26 é possível observar numa das pastilhas um desgaste das arestas de corte com um VB igual a 98,53 μm e perda de revestimento com um KB igual a 387,6 μm . A outra pastilha de corte apresenta um desgaste com um VB igual a 104 μm e perda de revestimento e desgaste com um KB de 474,8 μm . Estes dois insertos de corte apresentaram um comportamento bastante semelhante ao nível de desgaste. Sendo o par de insertos de corte do tipo A com menor perda de massa de 0,0040 gramas.

Tabela 26 - Imagens do desgaste das ferramentas correspondentes aos ensaios A1L1 e A1L2





3.5.3.4 Análise das vibrações

No que se refere à análise das vibrações medidas durante os ensaios A1L1 e A1L2, estas mantiveram-se estáveis e sem apresentarem picos que revelem desgaste anormal ou avaria das ferramentas de corte. Os valores de RMS da amplitude da velocidade de vibração referente aos ensaios A1L1 e A1L2 são apresentados nas figuras 63 e 64, respectivamente. Nestes é possível identificar que também no final do ensaio se observa um ligeiro aumento na amplitude de vibração. Estas têm como origem o tipo de operação de maquinagem adoptado para a cavidade, pois, neste tipo de maquinagem, no final do percurso, e com o aumento da profundidade, também aumenta o contacto da ferramenta com a parede da cavidade da peça, gerando maior contacto com a ferramenta e, com isso, o aumento da amplitude da vibração.

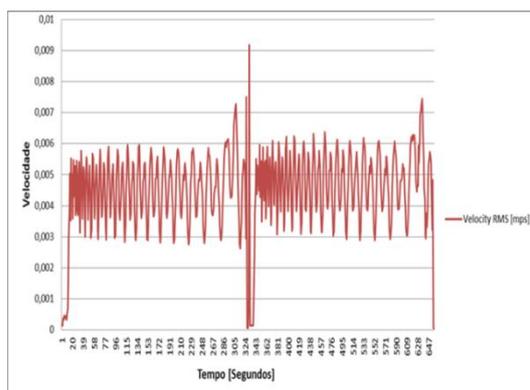


Figura 63 – Vibrações no ensaio A1L1

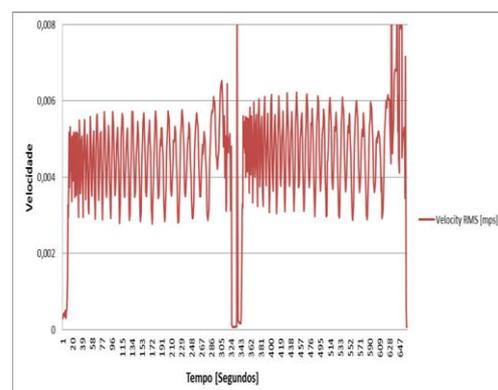


Figura 64 – Vibrações no ensaio A1L2

3.5.4 Ensaios A2C1 e A2C2

Nos ensaios A2C1 e A2C2 foram utilizadas ferramentas do tipo A na maquinagem do material 2. Os ensaios seguiram a mesma metodologia utilizada nos ensaios descritos anteriormente.

3.5.4.1 Análise da rugosidade

Os dados obtidos experimentalmente na superfície maquinada de cada um dos ensaios estão apresentados na Tabela 27. O ensaio A2C1 e A2C2 são ensaios equivalentes aos ensaios A1C1 e A1C2, com excepção do material que passou a ser o material 2.

Tendo isso em conta, e comparando o ensaio A2C1 e A2C2 com o ensaio A1C1 e A1C2, verifica-se que os ensaios A2C1 e A2C2 apresentam valores de Ra radial e tangencial superior aos ensaios A1C1 e A1C2, embora essa diferença seja pouco significativa. Dentro dos ensaios A2C1 e A2C2, verifica-se a mesma situação registada para os ensaios A1C1 e A1C2, isto é os valores de Ra, Rz e Rmax medidos na direcção radial e tangencial são superiores no primeiro ensaio A2C1. No que se refere ao acabamento superficial, observa-se que as ferramentas do tipo A possuem um ligeiro melhor desempenho na maquinagem do material 1.

Tabela 27 - Rugosidade da superfície de corte nos ensaios A2C1 e A2C2 (Valores em μm)

MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE MAQUINADA						
	RADIAL			TANGENCIAL		
	Ra	Rz	Rmax	Ra	Rz	Rmax
ENSAIO A2C1						
MEDIÇÃO 1	0,857	4,300	5,810	0,820	9,400	6,900
MEDIÇÃO 2	0,862	6,320	6,600	0,876	9,420	6,600
MEDIÇÃO 3	0,802	4,270	4,680	0,923	4,450	5,750
MÉDIA	0,840	4,963	5,697	0,873	7,757	6,417
DESVIO PADRÃO \pm	0,027	0,959	0,788	0,042	2,338	0,487
ENSAIO A2C2						
MEDIÇÃO 1	0,493	3,300	3,950	0,430	3,570	4,130
MEDIÇÃO 2	0,579	3,500	8,190	0,578	3,550	5,060
MEDIÇÃO 3	0,593	4,310	6,060	0,680	7,690	10,800
MÉDIA	0,555	3,703	6,067	0,563	4,937	6,663
DESVIO PADRÃO \pm	0,044	0,437	1,731	0,103	1,947	2,950

3.5.4.2 Análise do desgaste

A análise dos resultados apresentados na Tabela 28 permite verificar que o par de insertos utilizados nos ensaios A2C1 e A2C2 teve uma perda de massa de 0,066 gramas. Se compararmos esta perda de massa com o par de insertos dos ensaios A1C1 e A1C2, verifica-se que os segundos apresentam um desgaste um pouco inferior aos observados nos primeiros. Os insertos usados nos ensaios A2C1 e A2C2 foram os usados no ensaio A2C2, os que sofreram maior perda de massa no ensaio. Embora se

tenha verificado um menor desgaste dos insertos de corte nos ensaios A2C1 e A2C2, estes apresentaram maiores valores para a rugosidade. Nesta situação em concreto, o nível de desgaste verificado nas ferramentas de corte não se reflectiu no acabamento superficial da peça maquinada.

Tabela 28 - Desgaste verificado nos ensaios A2C1 e A2C2 (Valores em g)

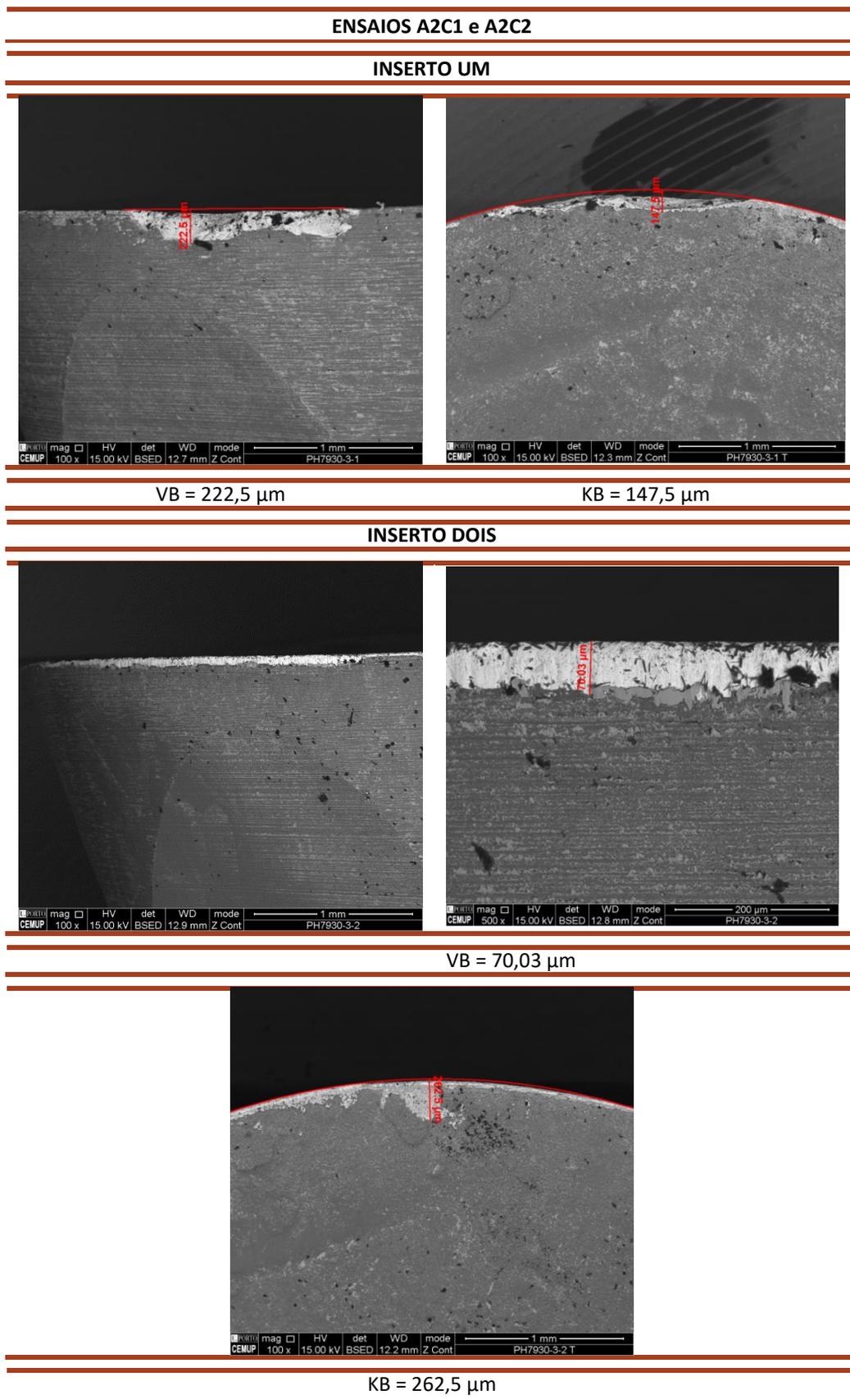
ENSAIO	A2C1		A2C2
AÇO	GX2CrNiMoN26-7-4		GX2CrNiMoN26-7-4
INSERTO	PH7930 (PVD)		PH7930 (PVD)
PAR DE INSERTO	3		3
Nº VOLTAS	1		1
FACE CORTE	1		2
INSERTO 1 (g)	1,0324	1,0313	1,0292
INSERTO 2 (g)	1,0335	1,0327	1,0301
PESO TOTAL (g)	2,0659	2,0640	2,0593
PERDA /ENSAIO (g)	-0,0019		-0,0047
PERDA TOTAL (g)			0,0066

Esperava-se obter melhor acabamento na superfície maquinada nos ensaios onde as ferramentas sofreram menor desgaste, o que não acabou por se verificar. Esta discrepância pode em grande parte ser justificada pela diferença na qualidade do aço inoxidável Duplex, usado nestes ensaios, o qual é de difícil controlo.

3.5.4.3 Análise do desgaste por microscopia electrónica de varrimento

Ao analisar as imagens apresentadas na Tabela 28, verifica-se que um dos insertos apresenta sinais de avaria com fracturas na aresta de corte, com um VB de 222,5 µm e KB de 147,5 µm. Já o outro inserto apresentava um desgaste homogéneo do flanco ao longo da aresta de corte, com um VB bastante aceitável de 70,03 µm e KB de 262,5 µm, mas com ausência de sinais de avaria. Tendo em conta as imagens recolhidas por microscopia electrónica, os valores da rugosidade e da perda de massa dos insertos de corte, podemos afirmar que o ensaio A2C1 foi onde ocorreu avaria da ferramenta e, por esse motivo, foram obtidos valores de Ra e Rmax superiores aos obtidos no ensaio A2C2. Apesar de neste ensaio se ter verificado maior perda de massa, com 0,0047 gramas perdidas contra os 0,0019 gramas no ensaio A2C1.

Tabela 29 - Imagens do desgaste das ferramentas correspondentes aos ensaios A2C1 e A2C2



3.5.4.3.1 Análise das vibrações

A evolução dos valores de RMS da vibração no tempo apresentados na figura 65, e referentes ao ensaio A2C1, não permite identificar qualquer ocorrência de avaria nos insertos de corte. Isto vem confirmar a ausência de avarias verificado na análise das imagens obtidas através de microscopia electrónica de varrimento e, também através dos valores das pesagens. Pelo contrário, na figura 66 são apresentados a evolução no tempo do nível de RMS da vibração para o ensaio A2C2 o qual revela pelo aparecimento de um pico de vibração de 0,2 mm/s, próximo dos 193 segundos. Embora este não seja um valor muito significativo, representa a fase onde terá ocorrido o contacto dos insertos de corte com alguma heterogeneidade do material, ou simplesmente poderá ter sido o primeiro sintoma de avaria da ferramenta, que acabou por evoluir ao longo do decorrer do ensaio. O registo do aumento do nível da vibração após os 193 segundos mostra o desgaste prematuro da ferramenta, e que vem suportar o valor de desgaste observado através da pesagem dos insertos no final do ensaio.

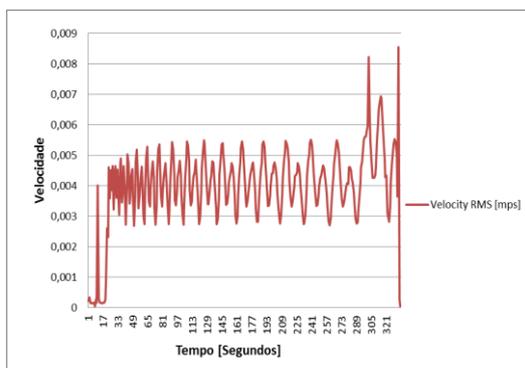


Figura 65 - Vibrações ensaio A2C1

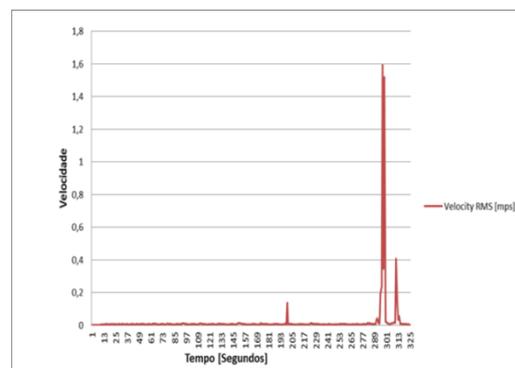


Figura 66 - Vibrações ensaio A2C2

3.5.5 Ensaios A2L1 e A2L2

Nos ensaios A2L1 e A2L2 foram utilizadas ferramentas do tipo A na maquinagem do material 2. Estes seguiram a mesma metodologia descrita para os ensaios anteriores.

3.5.5.1 Análise das rugosidades

Os valores obtidos experimentalmente na superfície maquinada após cada um dos ensaios estão resumidos na

Tabela 30. Os ensaios A2L1 e A2L2 podem ser comparados com os A1L1 e A1L2. Apesar de terem sido usados dois aços inoxidáveis Duplex diferentes, verifica-se que os ensaios A2L1 e A2L2 apresentam valores de Ra, Rz e Rmax radial e tangencial superior aos obtidos nos ensaios A1L1 e A1L2. No entanto, se compararmos os valores de Ra,

entre ensaio A2L1 e o ensaio A2L2, para a direcção radial e tangencial, verifica-se que o último apresenta valores mais baixos. No entanto são observados valores de Rz e Rmax superiores no ensaio A2L2.

Tabela 30 - Rugosidade da superfície de corte nos ensaios A2L1 e A2L2 (Valores em μm)

MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE MAQUINADA						
	RADIAL			TANGENCIAL		
	Ra	Rz	Rmax	Ra	Rz	Rmax
ENSAIO A2L1						
MEDIÇÃO 1	0,857	5,010	6,410	0,952	7,410	13,800
MEDIÇÃO 2	0,788	5,460	10,100	0,689	4,020	7,220
MEDIÇÃO 3	0,786	4,620	5,430	0,710	4,550	6,020
MÉDIA	0,810	5,030	7,313	0,784	5,327	9,013
DESVIO PADRÃO \pm	0,033	0,343	2,011	0,119	1,489	3,420
ENSAIO A2L2						
MEDIÇÃO 1	0,622	5,940	17,500	0,708	4,160	5,190
MEDIÇÃO 2	0,730	4,400	4,740	0,609	7,960	24,000
MEDIÇÃO 3	0,779	5,370	10,500	0,978	6,110	6,660
MÉDIA	0,710	5,237	10,913	0,765	6,077	11,950
DESVIO PADRÃO \pm	0,066	0,636	5,217	0,156	1,552	8,542

Quanto ao acabamento superficial, as ferramentas do tipo A tiveram melhor desempenho no ensaio A1L1 e A1L2 na maquinagem do material 1.

3.5.5.2 Análise do desgaste

A partir dos valores de desgaste apresentados na Tabela 31, é possível afirmar que os insertos de corte dos ensaios A2L1 e A2L2 tiveram um desgaste superior relativamente aos ensaios A1L1 e A1L2. Sendo respectivamente de 0,0073 gramas, e 0,0040 gramas. O ensaio A2L1 foi o que apresentou maior perda de massa dos insertos de corte, sendo de 0,0072 gramas, enquanto no ensaio A2L2 a perda de massa foi marginal de 0,0001 grama. Durante o ensaio A2L2, os insertos sofreram um desgaste bastante baixo, por esse motivo, os valores de Ra radial e tangencial foram inferiores aos registados no ensaio A2L1.

Tabela 31 - Desgaste verificado nos ensaios A2L1 e A2L2 (Valores em g)

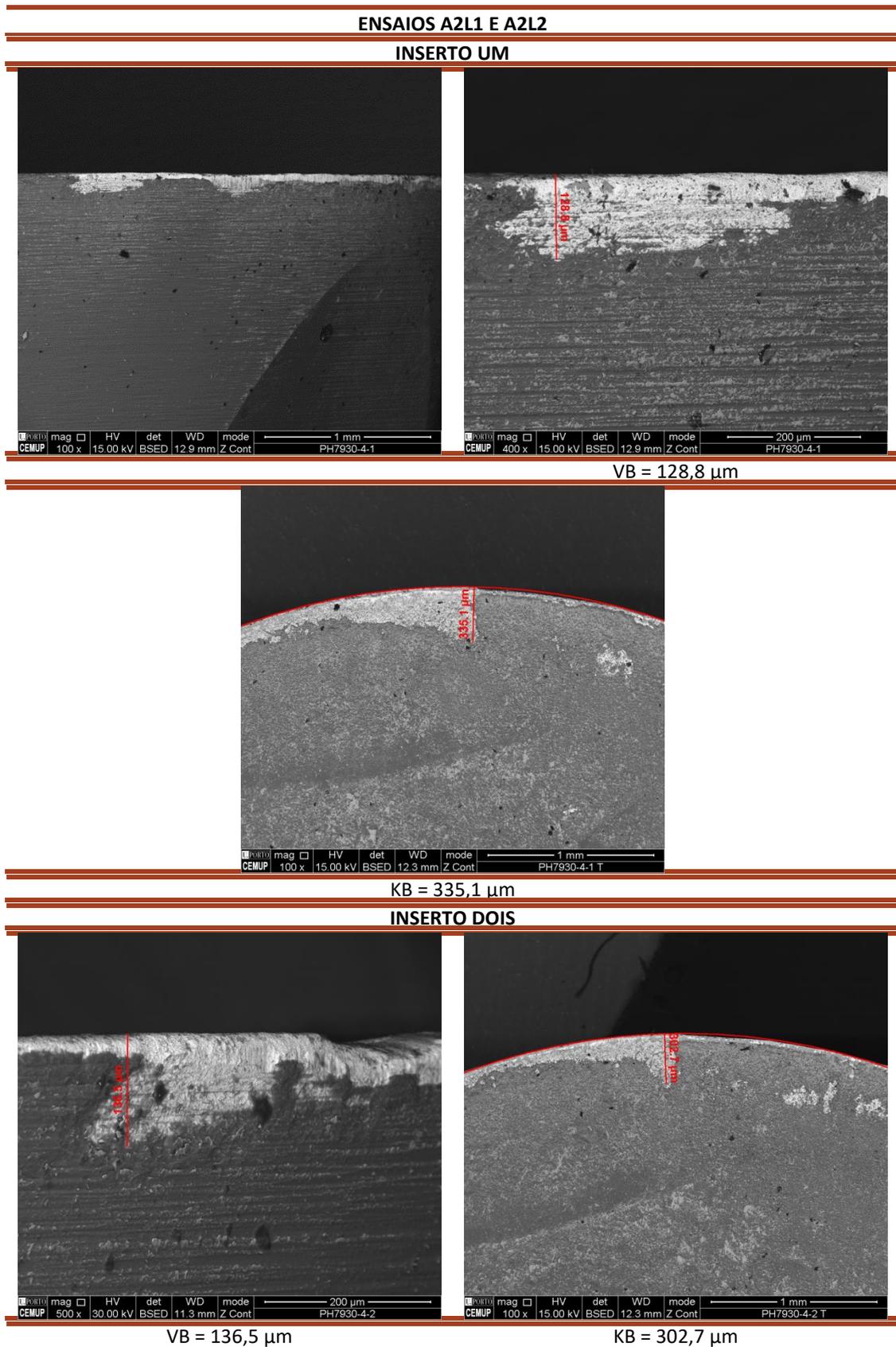
ENSAIO	A2L1		A2L2
AÇO	GX2CrNiMoN26-7-4		GX2CrNiMoN26-7-4
INSERTO	PH7930 (PVD)		PH7930 (PVD)
PAR DE INSERTO	4		4
Nº VOLTAS	2		2
FACE CORTE	1		2
INSERTO 1 (g)	1,0344	1,0303	1,0305
INSERTO 2 (g)	1,0339	1,0308	1,0307
PESO TOTAL (g)	2,0683	2,0611	2,0612
PERDA /ENSAIO (g)	-0,0072		-0,0001
PERDA TOTAL (g)			0,0073

3.5.5.3 Análise do desgaste por microscopia electrónica de varrimento

As imagens obtidas por microscopia electrónica de varrimento realizada às ferramentas usadas nos ensaios A2L1 e A2L2, podem ser observadas na Tabela 32. Um dos insertos de corte apresenta um desgaste com um VB de 128,8 μm e uma perda de revestimento com KB de 335,1 μm . O outro inserto apresenta um desgaste com um VB de 136,5 μm e uma perda de revestimento com KB de 302,7 μm . Este último, para além do desgaste, apresenta sinais de fractura na aresta de corte.

Para além destes, também se verificou a perda do seu revestimento na superfície da ferramenta do tipo A. Através da análise da zona 1 assinalada na figura 67 e através da análise química EDS foi possível identificar a composição do revestimento que se apresenta na forma gráfica na figura 68. Esta apresenta uma composição à base de Titânio e Alumínio, correspondente à base do seu revestimento.

Tabela 32 - Imagens do desgaste das ferramentas correspondentes aos ensaios A2L1 e A2L2



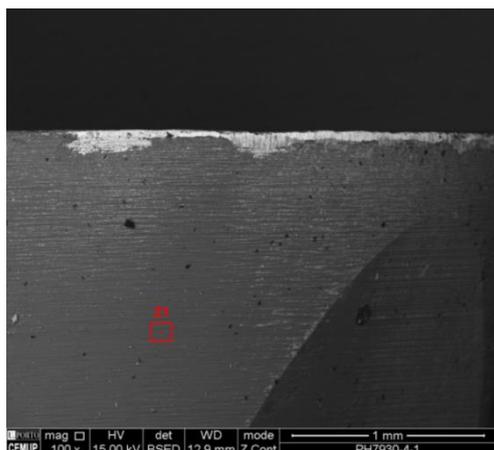


Figura 67 - Zona Z1 do revestimento ferramenta do tipo A

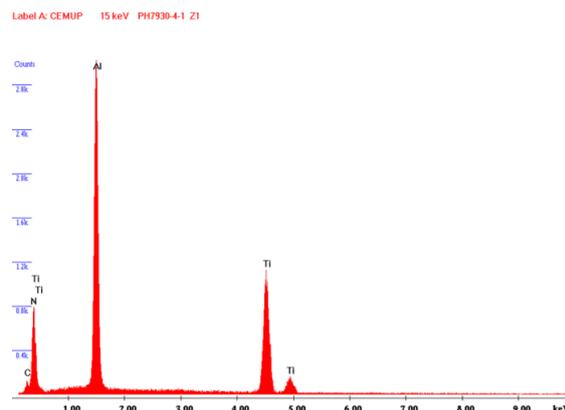


Figura 68 - Composição relativa à zona Z1 na ferramenta do tipo A

A sua composição revela algum revestimento, mas com indícios de perda parcial. Este fenómeno acontece devido ao desgaste natural provocado pela fricção do inserto na peça de trabalho. Também se observam pequenos pontos brancos ao longo da superfície, que são provocados pelo choque da apara extraída com a superfície da ferramenta. Existe uma zona onde, aparentemente, ficou material da peça de trabalho e impurezas aderidas à superfície de corte. Esta adesão pode dever-se à configuração da ferramenta ou ao processo de revestimento, que apresenta uma maior dificuldade na extracção da apara da zona de trabalho, resultando numa acumulação de impurezas na sua superfície. Este fenómeno estará na base de se ter verificado no ensaio A2L2 os insertos apresentaram uma perda marginal de massa (0,001). Isto é devido à compensação do desgaste pela adesão de material à superfície da ferramenta de corte.

3.5.5.4 Análise das vibrações

Pela análise do nível RMS da vibração apresentada na figura 69 e relativas ao ensaio A2L1, verifica-se que o nível se mantém praticamente constante ao longo de todo o ensaio. No instante próximo dos 320 segundos é observado uma perturbação na amplitude de vibração que tem como origem a passagem do primeiro para o segundo ciclo de maquinagem.

Quanto ao nível RMS da vibração registado no ensaio A2L2 e que se apresenta na figura 70 são detectadas a partir dos 298 segundos uns picos no nível de vibração que reflectem a degradação progressiva da ferramenta de corte .

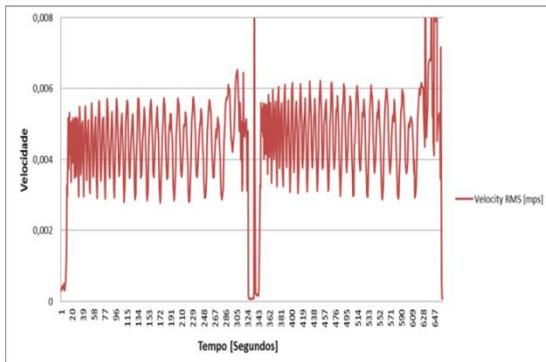


Figura 69 – Vibrações do ensaio A2L1

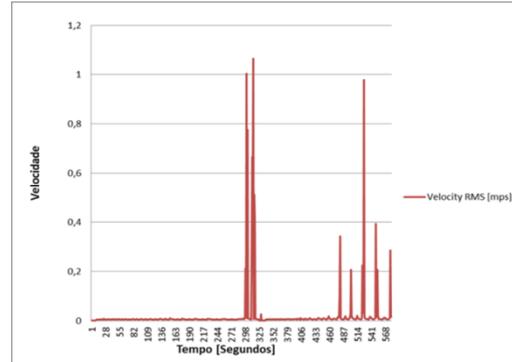


Figura 70 - Vibrações do ensaio A2L2

3.5.6 Ensaios B1C1 e B1C2

Nos ensaios B1C1 e B1C2 foram utilizadas ferramentas do tipo B na maquinação do material 1, tendo sido analisados a rugosidade da superfície, o desgaste dos inserts e o nível RMS da vibração.

3.5.6.1 Análise da rugosidade

Os ensaios B1C1 e B1C2 diferenciam-se dos ensaios A1C1 e A1C2 pelo tipo de inserts utilizados. Nos ensaios B1C1 e B1C2, os valores de Ra, Rz e Rmax, para as direcções radial e tangencial são superiores aos observados nos ensaios A1C1 e A1C2 (Tabela 33). Relativamente ao acabamento superficial, os ensaios B1C1 e B1C2 apresentam indicadores de pior qualidade do que os obtidos nos ensaios A1C1 e A1C2. As ferramentas do tipo A tiveram um melhor desempenho na maquinação do material 1 do que as ferramentas do tipo B. Os ensaios B1C1 e B1C2 foram os ensaios que apresentaram os piores resultados, em comparação com todos os outros ensaios realizados, como se comprova através da análise comparativa com os valores apresentados na tabela 36.

Tabela 33 - Rugosidade da superfície de corte nos ensaios B1C1 e B1C2 (Valores em μm)

MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE MAQUINADA						
	RADIAL			TANGENCIAL		
	Ra	Rz	Rmax	Ra	Rz	Rmax
ENSAIO B1C1						
MEDIÇÃO 1	0,972	4,930	6,680	0,685	11,800	6,800
MEDIÇÃO 2	0,987	5,780	11,000	1,062	5,640	6,510
MEDIÇÃO 3	1,223	6,960	8,530	0,689	4,440	7,210
MÉDIA	1,061	5,890	8,737	0,812	7,293	6,840
DESVIO PADRÃO \pm	0,115	0,832	1,770	0,177	3,224	0,287
ENSAIO B1C2						
MEDIÇÃO 1	1,238	5,880	8,470	1,745	8,260	9,330

MEDIÇÃO 2	1,155	5,910	8,940	1,590	8,530	9,600
MEDIÇÃO 3	1,218	7,860	13,100	0,895	4,910	9,810
MÉDIA	1,204	6,550	10,170	1,410	7,233	9,580
DESVIO PADRÃO ±	0,035	0,926	2,081	0,370	1,647	0,196

3.5.6.2 Análise do desgaste

É perceptível através dos valores apresentados na Tabela 34, que os insertos de corte tiveram um desgaste superior durante o ensaio B1C1, com uma perda de massa de 0,0023 gramas em comparação com o ensaio B1C2, que teve uma perda de massa de apenas 0,0007 gramas. Refira-se que os dois ensaios B1C1 e B1C2 ocorreu uma perda total de massa de 0,0030 gramas.

Se compararmos a perda de massa ocorrida no ensaio A1C1 e A1C2, em que os insertos de corte perderam no total dos ensaios 0,0070 gramas, verifica-se que as ferramentas do tipo B sofreram menos 57% de perda de massa em relação às ferramentas do tipo A.

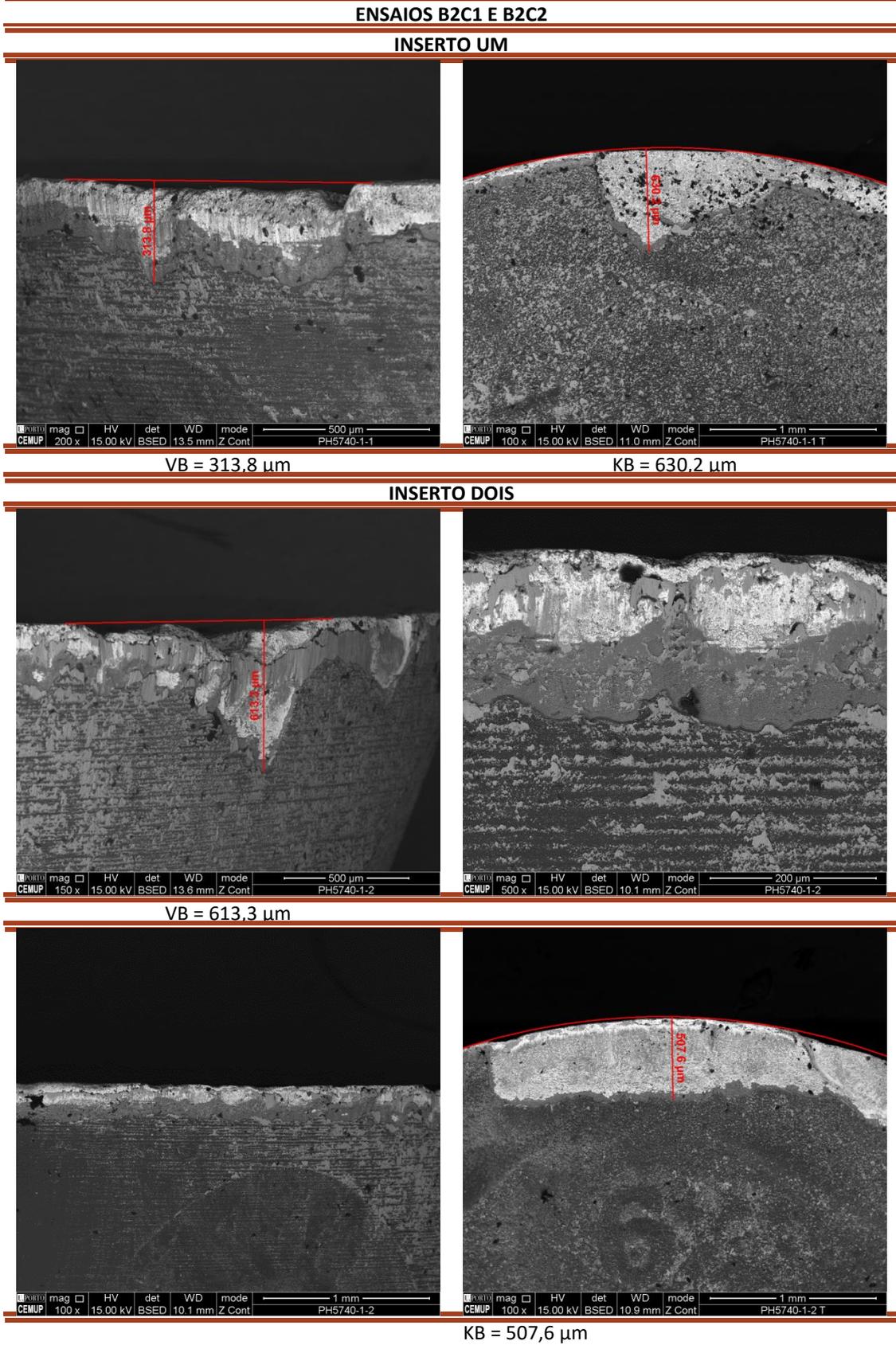
Tabela 34 - Desgaste do ensaio B1C1 e B1C2 (Valores em g)

ENSAIO	B1C1		B1C2
AÇO	X2CrNiMoCu25-6-3-3		X2CrNiMoCu25-6-3-3
INSERTO	PH5740 (CVD)		PH5740 (CVD)
PAR DE INSERTO	1		1
Nº VOLTAS	1		1
FACE CORTE	1		2
INSERTO 1 (g)	1,0418	1,0402	1,0398
INSERTO 2 (g)	1,0423	1,0416	1,0413
PESO TOTAL (g)	2,0841	2,0818	2,0811
PERDA /ENSAIO (g)	-0,0023		-0,0007
PERDA TOTAL (g)			0,0030

3.5.6.3 Análise do desgaste por microscopia electrónica de varrimento

As imagens obtidas pela análise de microscopia electrónica de varrimento às ferramentas do tipo B relativas aos ensaios B1C1 e B1C2 podem ser observadas na Tabela 35. Os resultados em termos de rugosidade mostraram ser pouco satisfatórios e são comprovados pela análise das imagens recolhidas através do microscópio electrónico de varrimento. Ambos os insertos apresentam crateras e desgaste. Um dos insertos de corte apresenta um desgaste com um VB de 313,8 μm e uma perda de revestimento com um KB de 613,3 μm . O outro inserto de corte apresenta um desgaste com um VB de 630,2 μm e uma perda de revestimento com KB de 507,6 μm . Refira-se que para as mesmas condições de ensaio, as ferramentas do tipo B apresentaram melhores resultados. Na superfície das ferramentas do tipo B foi detectada adesão de diferentes partículas, que foram assinaladas em quatro zonas identificadas na figura 71. Isto acontece devido ao desgaste natural provocado pela fricção do inserto na peça de trabalho, embora esta perda seja bastante acentuada, o que mostra a fraca resistência do revestimento. Também se verificaram pontos brancos ao longo da superfície, provocados pelo choque da apara extraída com a superfície do inserto. Identifica-se ainda uma região que apresenta material da peça de trabalho e impurezas. Através da análise química EDS da zona Z1 foi obtida a composição química do material que se apresenta na figura 72. Nesta é possível verificar que o substrato do inserto de corte, é maioritariamente constituído por Tungsténio e Cobalto. No que se refere à composição da zona Z2, figura 73, mostra a presença de titânio proveniente do revestimento e crómio proveniente do material maquinado que aderiu à ferramenta. A composição da zona Z3 representada na figura 74 mostra a presença de óxido de alumínio que corresponde ao revestimento da ferramenta. A figura 75 mostra a composição da zona Z4 sendo constituída na sua maioria por Ferro, Crómio, Níquel, Silício e Cobre, que corresponde à composição do material maquinado. Este facto permite constatar uma forte adesão de material às ferramentas de corte. Esta adesão tem influência negativa no acabamento superficial da peça e na durabilidade das ferramentas de corte.

Tabela 35 - Imagens do desgaste das ferramentas correspondentes aos ensaios B2C1 e B2C2



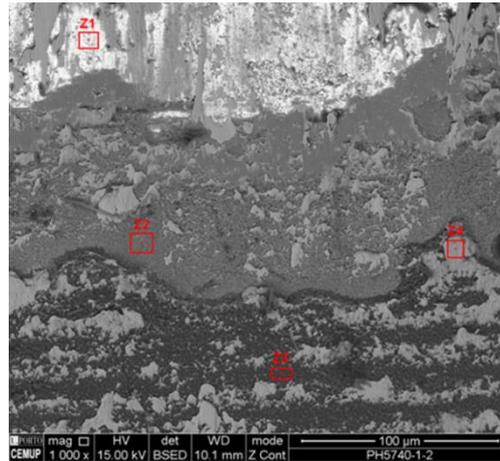


Figura 71 - Superfície da ferramenta do tipo B

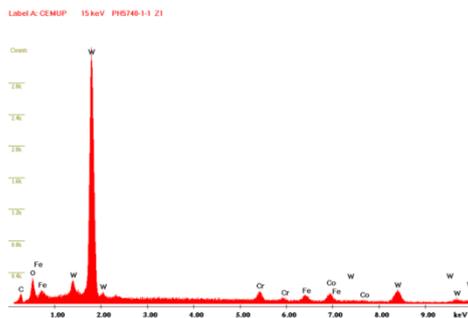


Figura 72 - Zona Z1 da ferramenta do tipo B

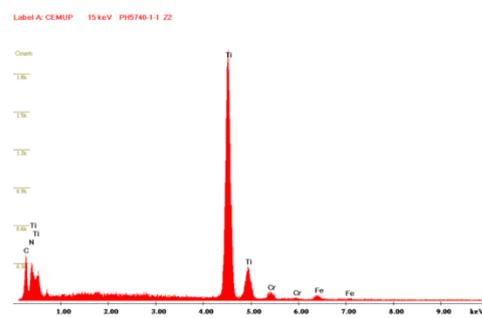


Figura 73 - Zona Z2 da ferramenta do tipo B

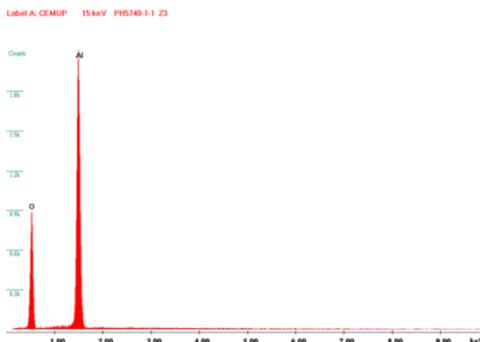


Figura 74 - Zona Z3 da ferramenta do tipo B

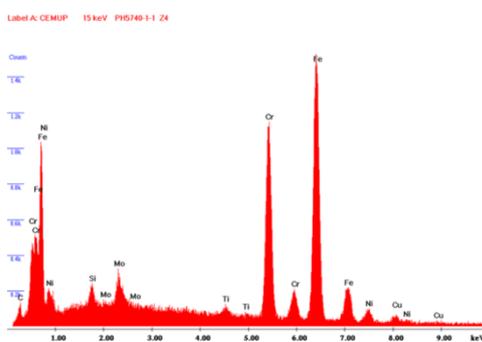


Figura 75 - Zona Z4 da ferramenta do tipo B

3.5.6.4 Análise das vibrações

Os níveis RMS da vibração registada nos ensaios B1C1 e B1C2 são apresentados nas figuras 76 e 77, respectivamente. Estes apresentam um nível de vibração baixo e constante, não apresentando qualquer evidência de ocorrência de avarias ou desgaste prematuro da ferramenta.

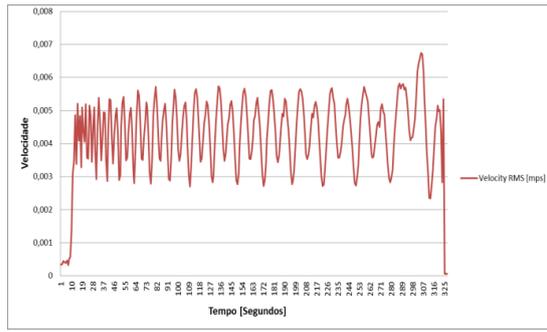


Figura 76 - Vibrações do ensaio B1C1

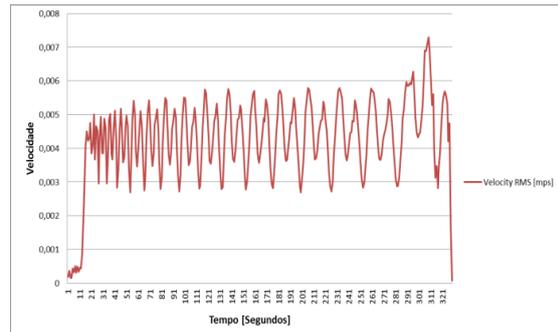


Figura 77 - Vibrações do ensaio B1C2

3.5.7 Ensaio B1L1 e B1L2

Nos ensaios B1L1 e B1L2 foram utilizadas ferramentas do tipo B na maquinação do material 1. À semelhança dos ensaios anteriores foi seguida a mesma metodologia anteriormente descrita, por forma a poder realizar uma análise comparativa. Análise das rugosidades

Nos ensaios B1L1 e B1L2 foram usadas ferramentas do tipo A, sendo que os resultados comparados com os obtidos nos ensaios A1L1 e A1L2 em que foram, utilizadas ferramentas do tipo A. O ensaio B1L2 apresentou valores de Ra, Rz e Rmax, para a direcção radial e tangencial, muito próximos dos valores obtidos no ensaio A1L1, conforme pode ser comprovado pelos valores apresentados na tabela 36. O ensaio B1L2 apresenta valores de Ra superiores aos obtidos nos ensaios A1L1 e A1L2. Os valores de Ra radiais e tangenciais superiores aos apresentados nos ensaios A1L1 e A1L2. Os valores de Ra, Rz e Rmax do ensaio B1L2 apresentam um agravamento relativamente ao ensaio B1L1. Os valores da rugosidade nos ensaios B1C1 e B1C2 apresentam uma melhoria significativa em relação aos ensaios B1L1 e B1L2.

Tabela 36 - Rugosidade da superfície de corte nos ensaios B1L1 e B1L2 (Valores em μm)

	MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE MAQUINADA					
	RADIAL			TANGENCIAL		
	Ra	Rz	Rmax	Ra	Rz	Rmax
ENSAIO B1L1						
MEDIÇÃO 1	0,675	4,560	6,020	0,920	4,760	5,180
MEDIÇÃO 2	0,766	4,650	6,340	0,994	5,900	6,640
MEDIÇÃO 3	0,907	5,670	7,400	0,708	4,500	5,890
MÉDIA	0,783	4,960	6,587	0,874	5,053	5,903
DESVIO PADRÃO \pm	0,095	0,503	0,590	0,121	0,608	0,596

ENSAIO B1L2						
MEDIÇÃO 1	1,533	7,950	11,200	1,350	9,990	16,600
MEDIÇÃO 2	1,092	6,570	9,220	2,045	9,930	16,500
MEDIÇÃO 3	1,120	6,490	10,400	1,538	8,060	10,800
MÉDIA	1,248	7,003	10,273	1,639	9,327	14,633
DESVIO PADRÃO ±	0,202	0,670	0,813	0,299	0,896	2,711

3.5.7.1 Análise do desgaste

Os valores da perda de massa apresentadas na Tabela 37, mostra que, embora os ensaios B1L1 e B1L2 sejam de maior duração, o desgaste nestas ferramentas foi inferior ao registado nos ensaios B1C1 e B1C2. As ferramentas realizaram o dobro do percurso, mas apresentaram uma perda de massa 12% menor. No ensaio B1L1, os insertos sofreram uma perda de massa de 0,0014 gramas e no ensaio B1L2, de 0,0012 gramas, totalizando uma perda de massa de 0,0026 gramas. Se compararmos a perda de massa entre as ferramentas do tipo A e do tipo B para as mesmas condições de ensaio, verificamos que as do tipo A apresentam um desgaste em 13% superior às do tipo B.

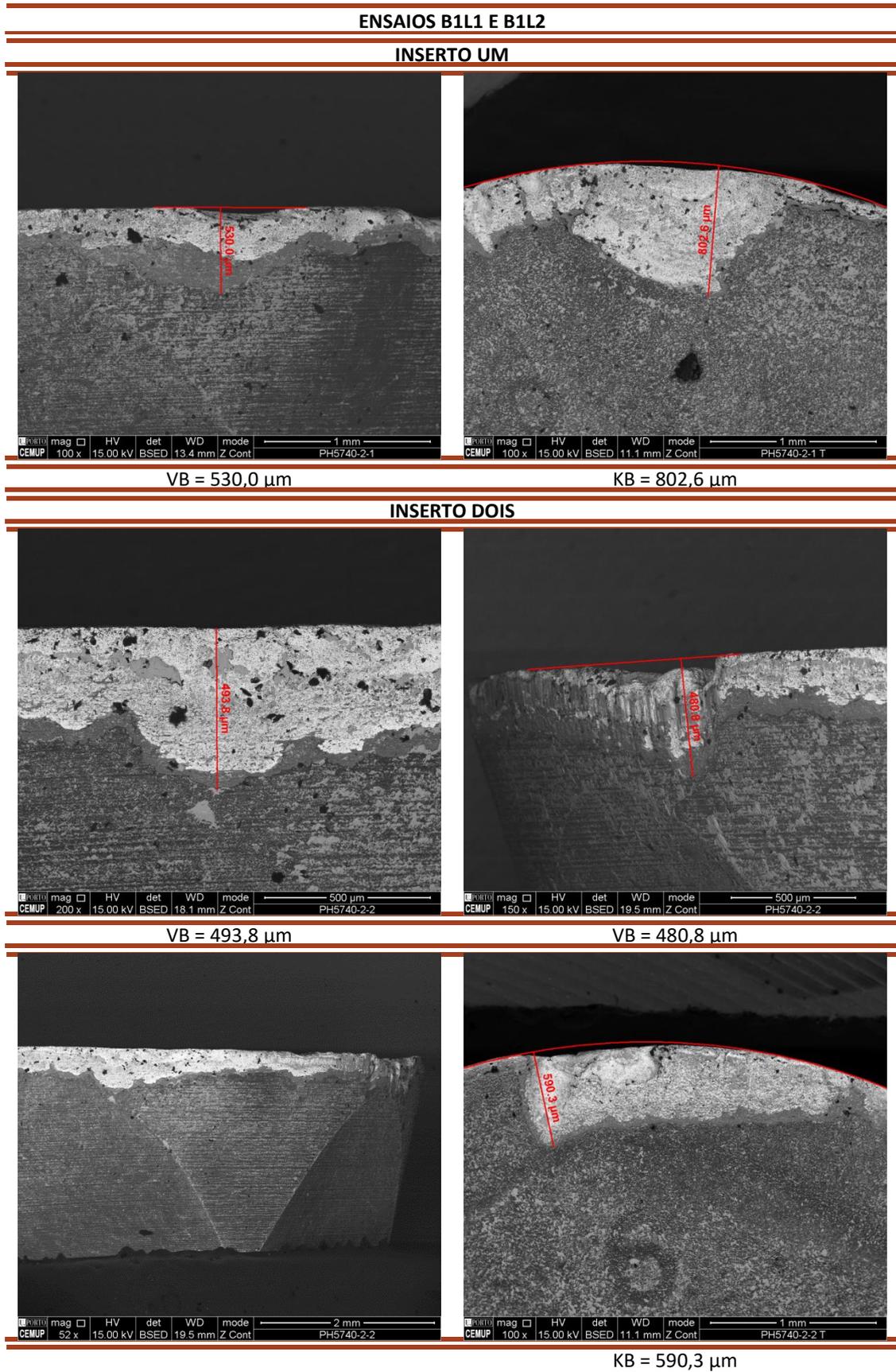
Tabela 37 - Desgaste dos ensaios B1L1 e B1L2 (Valores em g)

ENSAIO	B1L1		B1L2
AÇO	X2CrNiMoCu25-6-3-3		X2CrNiMoCu25-6-3-3
INSERTO	PH5740 (CVD)		PH5740 (CVD)
PAR DE INSERTO	2		2
Nº VOLTAS	2		2
FACE CORTE	1		2
INSERTO 1 (g)	1,0420	1,0418	1,0415
INSERTO 2 (g)	1,0417	1,0405	1,0396
PESO TOTAL (g)	2,0837	2,0823	2,0811
PERDA /ENSAIO (g)	-0,0014		-0,0012
PERDA TOTAL (g)			0,0026

3.5.7.2 Análise do desgaste por microscopia electrónica de varrimento

A Tabela 38 mostra o estado dos insertos após estes ensaios. Os insertos apresentam desgaste inferior relativamente aos observados nas ferramentas do tipo A. Contudo apresentam graves avarias em ambos os insertos com fracturas nas arestas cortantes e crateras acentuadas. Uma apresenta uma fractura com um VB de 530 µm e com uma perda de revestimento com uma propagação com KB de 802,6 µm, enquanto a outra apresentou um VB de 480,8 µm e uma perda de revestimento de KB de 590 µm.

Tabela 38 - Imagens do desgaste das ferramentas correspondentes aos ensaios B1L1 e B1L2



3.5.8 Análise das vibrações

Pela análise do nível RMS da vibração apresentada na figura 78, referente ao ensaio B1L1, não é possível identificar sinais de avarias ou desgaste prematuro da ferramenta, uma vez que o nível de vibração é baixo e se mantém praticamente constante durante o ensaio. Já o nível de vibração relativo ao ensaio B1L2 representado na figura 79 é possível identificar através do aumento brusco do nível de vibração o momento em que se iniciou uma degradação severa do estado da ferramenta, o qual ocorreu para o instante próximo dos 300 segundos. A partir dos 441 segundos do ensaio registou-se um aumento contínuo do nível das vibrações, tendo como resultado o aumento da rugosidade da superfície da peça.

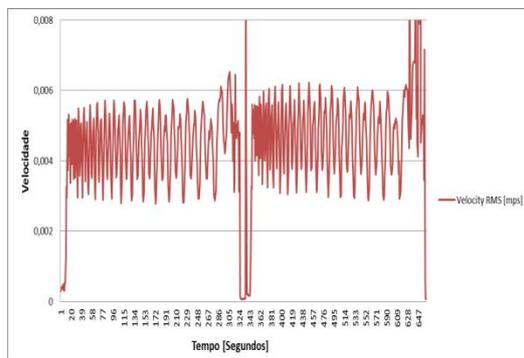


Figura 78 - Vibrações ensaio B1L1

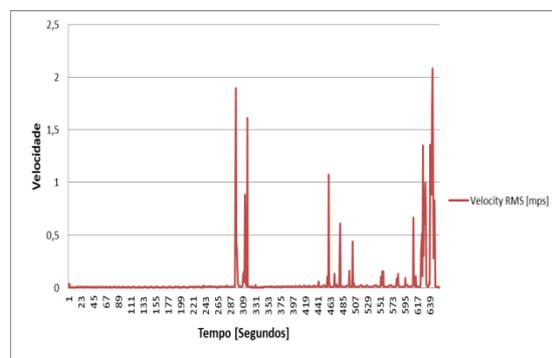


Figura 79 - Vibrações ensaio B1L2

3.5.9 Ensaios B2C1 e B2C2

Nos ensaios B2C1 e B2C2 foram utilizadas ferramentas do tipo B na maquinagem do material 2, tendo sido seguida a mesma metodologia anteriormente descrita para análise dos resultados dos ensaios realizados.

3.5.9.1 Análise das rugosidades

Como os ensaios B2C1 e B2C2 são similares aos ensaios A2C1 e A2C2, é realizada uma análise comparativa entre resultados. O ensaio B2C1, apresenta valores inferiores para Ra e Rz, mas superiores para Rmax relativamente ao ensaio A2C1. O ensaio A2C2 apresentou valores mais elevados de Ra, Rz e Rmax que os obtidos para o ensaio B2C1. Dentro dos ensaios com as ferramentas do tipo B, o ensaio B2C1 foi o que apresentou melhores resultados. Os valores da rugosidade dos ensaios B2C1 e B2C2 podem ser consultados na Tabela 39. Em geral, verificou-se que as ferramentas do tipo B conferem pior acabamento superficial que as ferramentas do tipo A.

Tabela 39 - Rugosidade da superfície de corte nos ensaios B2C1 e B2C2 (Valores em μm)

MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE MAQUINADA						
	RADIAL			TANGENCIAL		
	Ra	Rz	Rmax	Ra	Rz	Rmax
ENSAIO B2C1						
MEDIÇÃO 1	0,599	4,100	7,870	0,775	6,010	11,800
MEDIÇÃO 2	0,783	5,900	11,100	0,552	4,070	6,150
MEDIÇÃO 3	0,626	4,300	8,370	0,863	5,600	9,570
MÉDIA	0,669	4,767	9,113	0,730	5,227	9,173
DESVIO PADRÃO \pm	0,081	0,806	1,420	0,131	0,835	2,324
ENSAIO B2C2						
MEDIÇÃO 1	1,033	5,070	5,940	0,873	6,050	12,200
MEDIÇÃO 2	0,977	5,260	8,090	0,870	4,530	5,820
MEDIÇÃO 3	0,995	5,200	6,110	0,863	4,980	7,480
MÉDIA	1,002	5,177	6,713	0,869	5,187	8,500
DESVIO PADRÃO \pm	0,023	0,079	0,976	0,004	0,638	2,708

3.5.9.2 Análise do desgaste

Os valores da perda massa apresentados na Tabela 40, mostram que a perda total de massa foi de 0,0021 gramas. Se compararmos este valor com os obtidos para os ensaios B2C1 e B2C2 constata-se que nos primeiros se observa uma redução em 68% na perda de massa, nas mesmas condições. Este resultado mostra, mais uma vez que as ferramentas do tipo B apresentam menor desgaste.

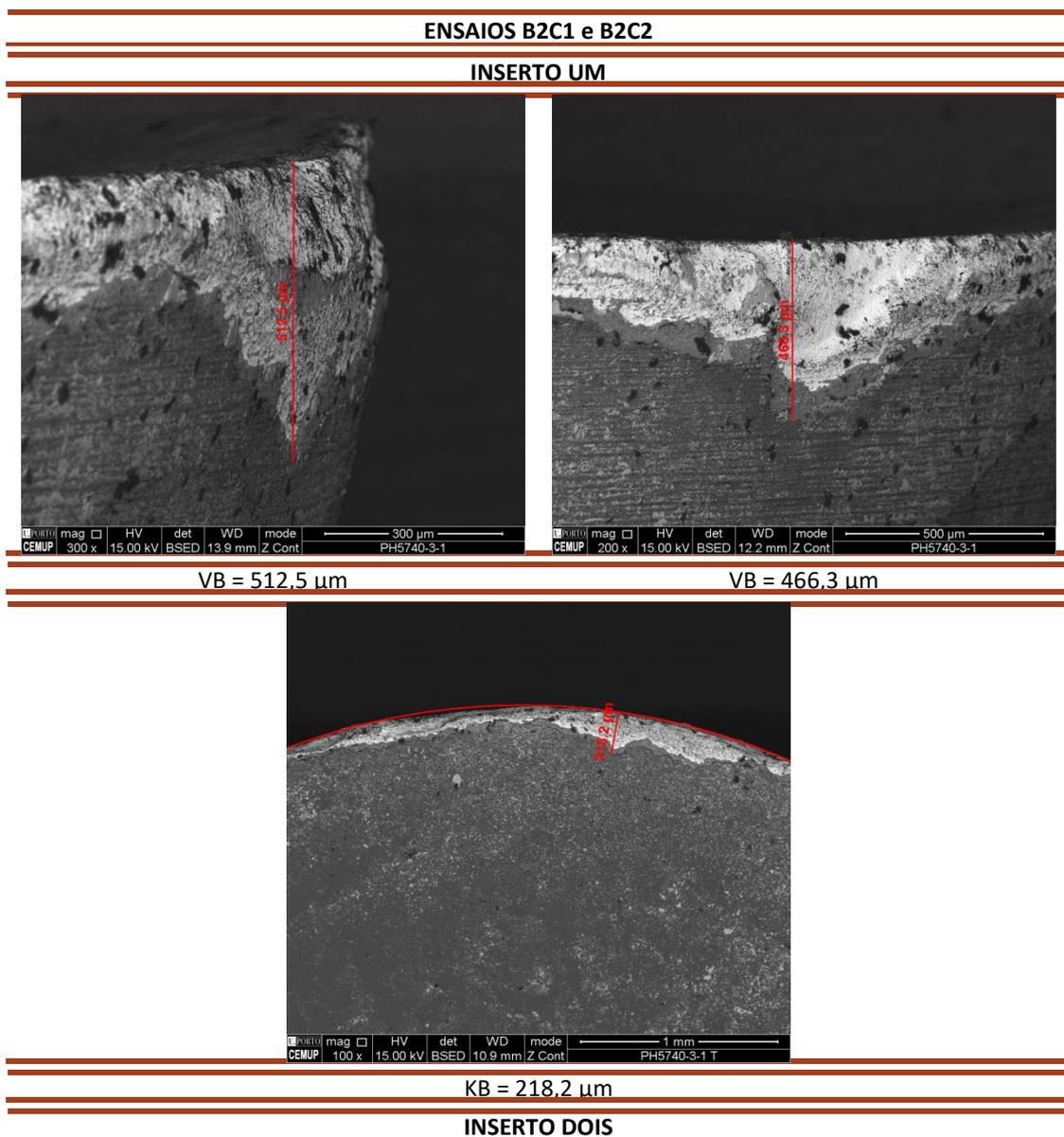
Tabela 40 - Desgaste ensaio B2C1 e B2C2 (Valores em g)

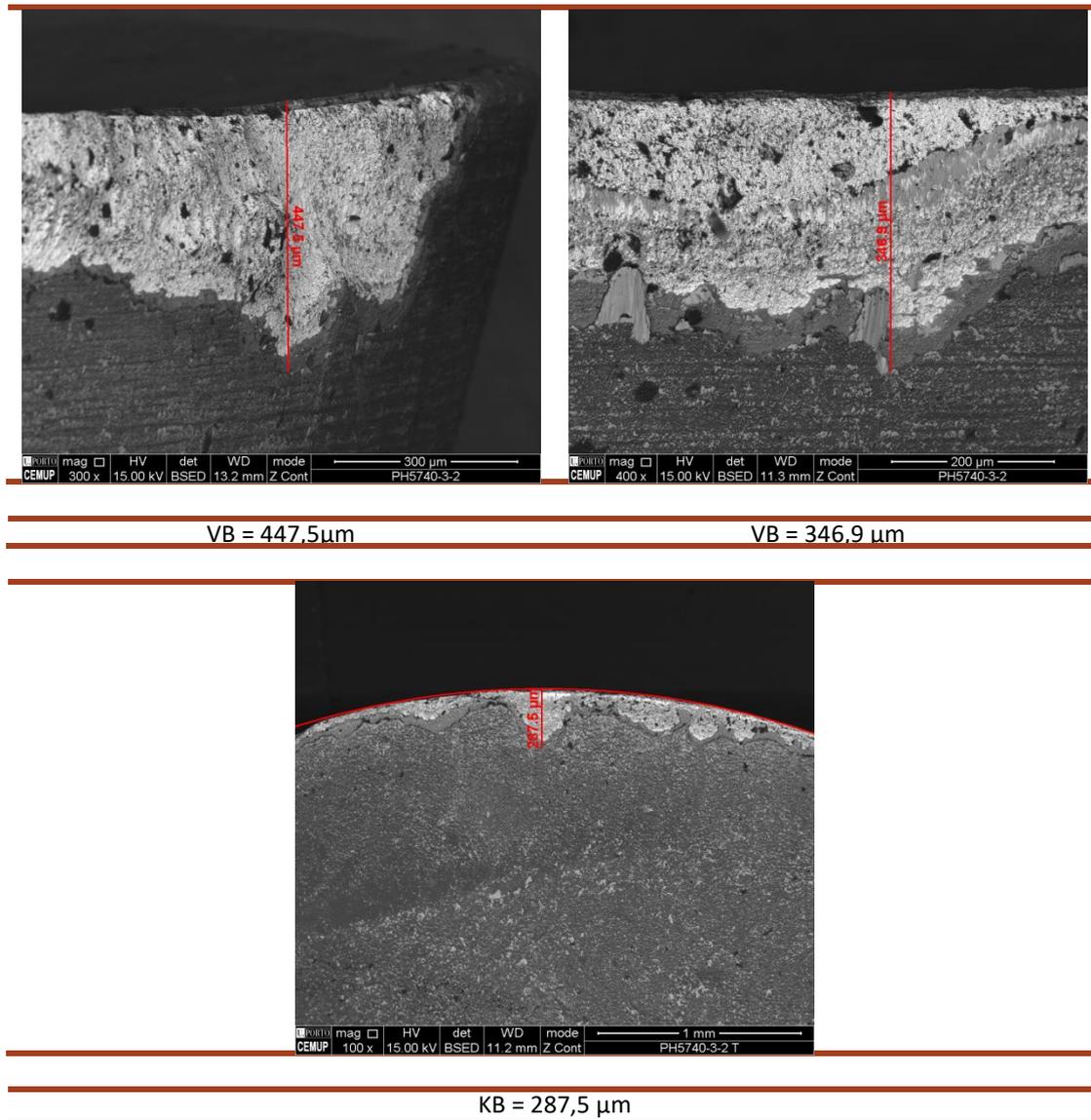
ENSAIO	B2C1		B2C2
AÇO	GX2CrNiMoN26-7-4		GX2CrNiMoN26-7-4
INSERTO	PH5740 (CVD)		PH5740 (CVD)
PAR DE INSERTO	3		3
Nº VOLTAS	1		1
FACE CORTE	1		2
INSERTO 1 (gr)	1,0420	1,0416	1,0410
INSERTO 2 (gr)	1,0360	1,0354	1,0349
PESO TOTAL (gr)	2,0780	2,0770	2,0759
PERDA /ENSAIO (gr)	0,0010		0,0011
PERDA TOTAL (gr)			-0,0021

3.5.9.3 Análise do desgaste por microscopia electrónica de varrimento

As imagens obtidas por microscopia electrónica de varrimento realizada às ferramentas do tipo B apresentadas na tabela 41. Através da sua análise é possível identificar que os insertos de corte possuem um grande desgaste. O ensaio B2C1 apresentou valores bastantes satisfatórios de rugosidade comparativamente com os resultados obtidos anteriormente com este tipo de insertos de corte. No ensaio B2C2 já se verificou um agravamento do acabamento superficial. Os insertos de corte apresentam grande desgaste, sendo que um deles apresenta um VB de 512,5 μm e KB de 218,2 μm .e o outro um VB máximo de 467,5 μm e KB de 287,5 μm .

Tabela 41 - Imagens do desgaste das ferramentas correspondentes aos ensaios B2C1 e B2C2





3.5.9.4 Análise das vibrações

Os níveis de vibração registados nos ensaios B2C1 e B2C2 estão representados nas figuras 80 e 81. Nesta não são identificados níveis de vibração que se possam associar a avaria ou desgaste prematuro das ferramentas. Contudo no ensaio B2C2 aos 73 segundos identificou-se uma pequena variação da vibração, o que pode identificar o momento de avaria da ferramenta que justifica os valores de rugosidade média superiores ao ensaio B2C1. No entanto os valores de vibração são baixos e mantêm-se constantes durante os ensaios.

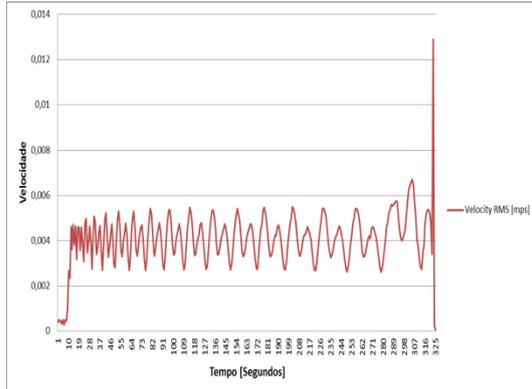


Figura 80 - Vibrações do ensaio B2C1

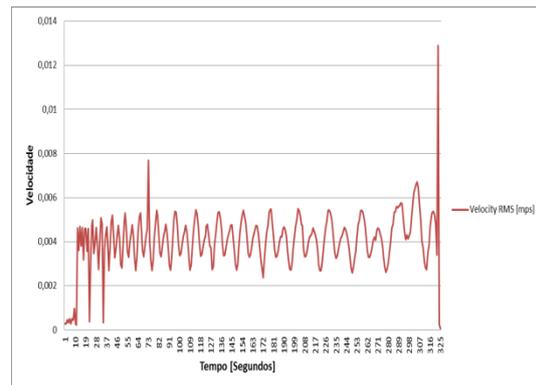


Figura 81 - Vibrações do ensaio B2C2

3.5.10 Ensaios B2L1 e B2L2

As condições dos ensaios B2L1 e B2L2 são semelhantes aos ensaios A2L1 e A2L2, com exceção de agora ser usada a ferramenta do tipo B. Os ensaios seguiram a mesma metodologia utilizada nos ensaios anteriormente, sendo em seguida apresentados os resultados relativos à análise da rugosidade, desgaste da ferramenta e nível de vibração.

3.5.10.1 Análise das rugosidades

O ensaio B2L1, apresenta valores da rugosidade Ra, Rz e Rmax para as direcções radial e tangencial inferiores aos dos ensaios A2L1 e A2L2, conforme se pode comprovar pelos valores apresentados na tabela 42.

Tabela 42 - Rugosidade da superfície de corte após os ensaios B2L1 e B2L2 (Valores em μm)

MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE MAQUINADA						
	RADIAL			TANGENCIAL		
	Ra	Rz	Rmax	Ra	Rz	Rmax
ENSAIO B2L1						
MEDIÇÃO 1	0,804	4,680	7,410	0,960	4,610	5,790
MEDIÇÃO 2	0,626	3,290	4,840	0,627	4,370	7,040
MEDIÇÃO 3	0,659	4,770	5,480	0,745	4,250	4,900
MÉDIA	0,696	4,247	5,910	0,777	4,410	5,910
DESVIO PADRÃO \pm	0,077	0,677	1,092	0,138	0,150	0,878
ENSAIO B2L2						
MEDIÇÃO 1	0,814	5,060	9,820	2,011	9,870	11,900
MEDIÇÃO 2	1,029	4,790	6,610	0,853	4,190	8,070
MEDIÇÃO 3	1,488	6,980	7,860	1,164	6,490	11,100
MÉDIA	1,110	5,610	8,097	1,343	6,850	10,357
DESVIO PADRÃO \pm	0,281	0,975	1,321	0,489	2,333	1,650

Pelo contrário no ensaio B2L2 regista-se valores superiores de Ra, Rz e Rmax. Se analisarmos os resultados de todos os ensaios realizados com ferramentas do tipo B, o ensaio B2L1 foi o que apresentou valores mais baixos para a rugosidade.

3.5.10.2 Análise do desgaste

Os insertos de corte utilizados nos ensaios B2L1 e B2L2 foram os que apresentaram maior perda de massa, dentro dos ensaios com ferramentas do tipo B, sendo os valores apresentados na Tabela 43. No ensaio B2L1 ocorreu uma perda de massa de 0,0036 gramas e no ensaio B2L2 de 0,0020 gramas, com uma perda total de 0,0056 gramas. No entanto, as ferramentas do tipo B utilizadas nos ensaios B2L1 e B2L2 perderam menos 23% de massa, quando comparadas com as ferramentas do tipo A, utilizadas nos ensaios A2L1 e A2L2. Independentemente do tipo de aço maquinado, verifica-se que as ferramentas de corte do tipo B foram as que globalmente apresentaram menor desgaste, que ferramenta de corte do tipo A. No entanto, esta maior resistência ao desgaste não se reflectiu em melhor acabamento, muito pelo contrário, apresentou valores rugosidade mais elevada.

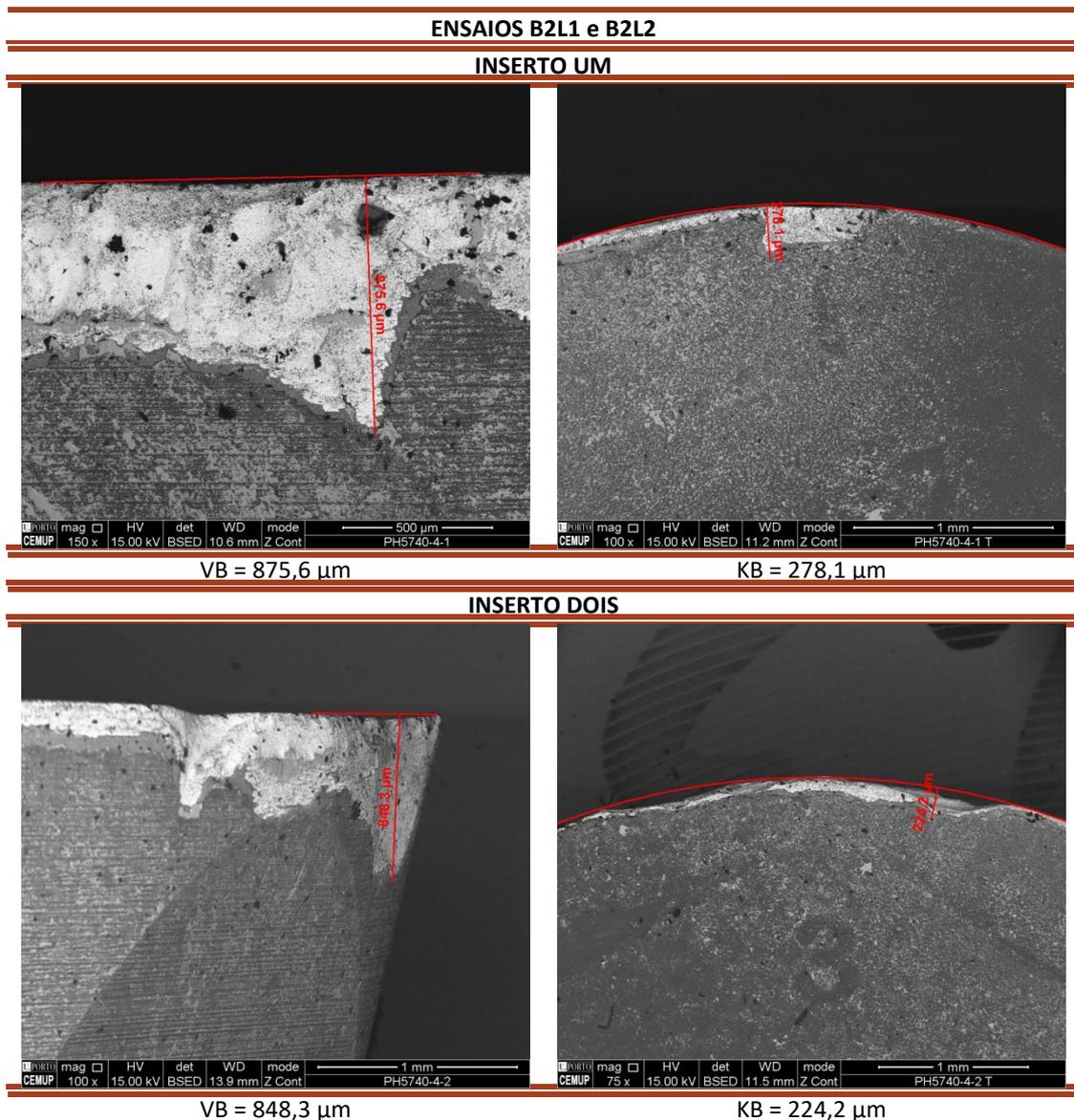
Tabela 43 - Desgaste dos insertos de corte do ensaio B2L1 e B2L2 (Valores em g)

ENSAIO	B2L1		B2L2
AÇO	GX2CrNiMoN26-7-4		GX2CrNiMoN26-7-4
INSERTO	PH5740 (CVD)		PH5740 (CVD)
PAR DE INSRTOS	4		4
Nº VOLTAS	2		2
FACE CORTE	1		2
INSERTO 1 (g)	1,0417	1,0389	1,0383
INSERTO 2 (g)	1,0416	1,0408	1,0394
PESO TOTAL (g)	2,0833	2,0797	2,0777
PERDA /ENSAIO (g)	0,0036		0,0020
PERDA TOTAL (g)			-0,0056

3.5.10.3 Análise do desgaste por microscopia electrónica de varrimento

Na tabela 44 são apresentadas as imagens das ferramentas usadas nos ensaios B2L1 e B2L2, obtidas por microscopia electrónica de varrimento. Os ensaios B2L1 e B2L2 foram, dentro dos ensaios com este tipo de inserto de corte, os que sofreram maior desgaste. Esse desgaste confirma-se através da análise das imagens obtidas, em que um dos insertos tem um desgaste com VB de 875,6 μm e KB de 278,1 μm , e outro, para além do desgaste, apresenta várias fracturas e crateras na aresta de corte, com VB de 848,3 μm e KB de 224,2 μm .

Tabela 44 - Imagens do desgaste das ferramentas correspondentes aos ensaios B2L1 e B2L2



3.5.10.4 Análise das vibrações

As figuras 82 e 83 apresentam o nível RMS da vibração medida durante os ensaios B2L1 e B2L2, respectivamente. A partir da análise do nível de vibração não é possível

identificar em ambos os ensaios perturbações que possam ser associadas à ocorrência de uma degradação abrupta da ferramenta, embora estes apresentem valores em amplitude máxima distintos.

O ensaio B2L2 foi o ensaio onde o nível da vibração registada foi superior, justificando assim os valores das rugosidades obtidos.

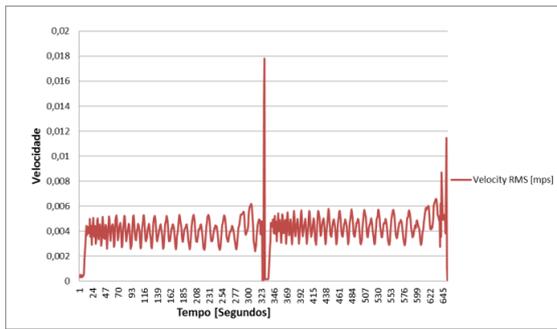


Figura 82 - Vibrações do ensaio B2L1

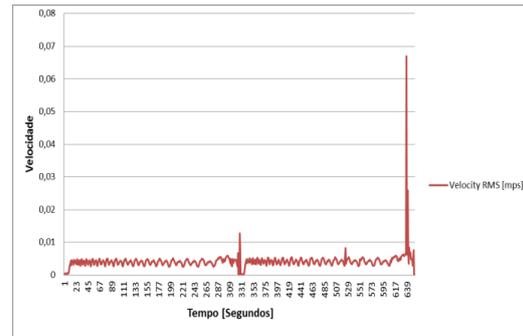


Figura 83 - Vibrações do ensaio B2L2

3.6 Análise geral dos resultados dos ensaios

Aqui é realizada uma reflexão sobre a globalidade dos resultados obtidos experimentalmente. Foram realizados no total dezasseis ensaios, divididos por tipos de inserto de corte e por tipo de aço inoxidável Duplex. Na Tabela 45 é apresentado um resumo da média das rugosidades obtidas em cada um dos ensaios realizados, de forma a facilitar a sua análise comparativa. A Tabela 46 apresenta o desgaste identificado em cada par de insertos utilizados em cada ensaio.

3.6.1 Rugosidade

As superfícies maquinadas foram submetidas a uma verificação da rugosidade no fim de cada ensaio, com o objectivo de avaliar o desgaste da ferramenta. A qualidade das superfícies dos dois aços inoxidáveis Duplex foram avaliadas através da medição nas direcções radial e tangencial. Nestas condições foram avaliados os valores dos parâmetros: Ra, Rz e Rmáx.

Para a direcção radial, foi possível medir a rugosidade nas fronteiras do passo, isto é nas zonas de união das passagens feitas pela fresa. Para a direcção tangencial foi medida a rugosidade paralelamente à trajectória da ferramenta. Para cada ensaio, foram realizados seis conjuntos de medidas da rugosidade, três na direcção radial e três na direcção tangencial, o qual teve como objectivo determinar o valor representativo da rugosidade média na superfície da peça.

Tabela 45 - Resumo das médias das rugosidades (μm)

Ensaio	Radial			Tangencial		
	Ra	Rz	Rmax	Ra	Rz	Rmax
A1C1	0.713	4.030	5.343	0.727	3.970	5.463
A1C2	0.548	4.123	6.433	0.693	4.873	7.543
A1L1	0.758	6.073	6.607	0.827	4.860	6.147
A1L2	0.551	4.140	7.707	0.574	4.337	6.683
A2C1	0.840	4.963	5.697	0.873	7.757	6.417
A2C2	0.555	3.703	6.067	0.563	4.537	6.663
A2L1	0.810	5.030	7.313	0.784	5.327	9.013
A2L2	0.710	5.237	10.913	0.765	6.077	11.950
B1C1	1.061	5.890	8.737	0.812	7.293	6.840
B1C2	1.204	6.550	10.170	1.410	7.233	9.580
B1L1	0.783	4.960	6.587	0.874	5.053	5.903
B1L2	1.248	7.003	10.273	1.639	9.327	14.633
B2C1	0.669	4.767	9.113	0.730	5.227	9.173
B2C2	1.002	5.177	6.713	0.869	5.187	8.500
B2L1	0.696	4.247	5.910	0.777	4.410	5.910
B2L2	1,110	5,610	8,097	1,343	6,850	10,357

Esta tarefa revelou-se de certo modo complicada, possivelmente devido às vibrações e ao desgaste das ferramentas terem originado zonas onde a rugosidade era ligeiramente maior do que outras, daí a necessidade de se determinar um valor médio para cada ensaio. Na análise superficial das peças, verificaram-se variações de rugosidades acentuadas, consoante a ferramenta utilizada, o aço maquinado e a duração dos ensaios. Com base na Tabela 45 verificamos que, de uma maneira geral, as ferramentas do tipo A apresentam melhor acabamento superficial nos ensaios realizados com os dois materiais 1 e 2 do que as ferramentas do tipo B.

3.6.2 Desgaste

Após a realização dos ensaios, verificou-se um desgaste semelhante e com severidade semelhante em todas as ferramentas. Houve a ocorrência de fracturas, lascagem ou delaminação do revestimento na face e aresta de corte, e desgaste do flanco. Todas estas ocorrências de avarias e desgaste tiveram consequências práticas no incremento da rugosidade superficial da peça trabalhada, sendo que nos casos em que ocorreu fractura da aresta de corte, esse aumento foi mais significativo. Verificou-se a formação de relevos (apesar de muito pequenos) nas zonas de fronteira entre as passagens e, conseqüentemente, valores de rugosidade menos satisfatórios.

Ao analisarmos os valores apresentados na Tabela 46, constata-se que as ferramentas do tipo A foram as que maior desgaste sofreram, apresentando uma perda de massa muito superior às ferramentas do tipo B. Tendo em conta a análise efectuada anteriormente à média das rugosidades, verificou-se que os inserts que sofreram

maior desgaste foram também os que apresentaram melhor acabamento superficial. As ferramentas do tipo B apresentaram muito pouco desgaste, no entanto, os valores de rugosidade foram mais elevados.

Tabela 46 - Resumo dos valores de desgaste (g)

Ensaio	Perda (g)	Perda/Ensaio (g)	Perda/Tipo (g)
A1C1	0,0048		
A1C2	0,0022	0,0070	
A1L1	0,0012		
A1L2	0,0028	0,0040	0,0110
A2C1	0,0019		
A2C2	0,0047	0,0066	
A2L1	0,0072		
A2L2	0,0001	0,0073	0,0140
B1C1	0,0023		
B1C2	0,0007	0,0030	
B1L1	0,0014		
B1L2	0,0012	0,0026	0,0056
B2C1	0,0010		
B2C2	0,0011	0,0021	
B2L1	0,0036		
B2L2	0,0020	0,0056	0,0077

3.6.3 Vibrações

A recolha das vibrações nos ensaios realizados permitiu identificar que as ferramentas do tipo A apresentam níveis de vibração mais elevados, sendo também nestas onde ocorreu maior número de avarias.

O aumento severo do nível de vibração no decurso dos ensaios permitiu identificar o instante em que se deu avaria da ferramenta, ou então, quando o desgaste começa a ser acentuado. No que diz respeito ao nível de vibração produzido pelas ferramentas do tipo B, este manteve-se sempre com valores baixos e estáveis, o que se traduziu num menor número de avarias como se verificou nos ensaios com as ferramentas A. Os instantes em que se manifestou a primeira ocorrência de avaria na ferramenta, identificada através do aumento abrupto no nível de vibração, estão assinalados na **Erro! A origem da referência não foi encontrada..**

Tabela 47 - Momento no qual se verificou ocorrência de avarias

Ensaio	Tempo total de ensaio (s)	Momento da ocorrência (s)
A1C1	315	171
A1C2	315	301
A1L1	630	-
A1L2	630	-
A2C1	315	-
A2C2	315	289
A2L1	630	487
A2L2	630	-
B1C1	315	-
B1C2	315	-
B1L1	630	-
B1L2	630	441
B2C1	315	-
B2C2	315	-
B2L1	630	-
B2L2	630	-

3.7 Análise das aparas

Foram recolhidas aparas após os ensaios de maquinagem dos materiais 1 e 2. As aparas foram analisadas por microscopia electrónica de varrimento. Nas imagens apresentadas nas figuras 84, 85 e 86 é possível observar a análise realizada às aparas referentes ao material 1. Nas imagens 87, 88 e 89, é possível observar as aparas referentes ao material 2. As aparas formadas dos dois aços inoxidáveis Duplex apresentam uma geometria semelhante, não sendo possível identificar características que as permita diferenciar. Estas são caracterizadas por serem aparas curtas e fragmentadas, que apresentam irregularidades nas extremidades, conforme se pode observar nas figuras 84 e 89. As irregularidades nas extremidades são sinal da dificuldade na extracção da apara e do atrito envolvido. Também apresentam zona de esmagamento, com estrias sucessivas, devido ao elevado esforço de corte gerado pelo ângulo de ataque. Tal como é possível observar nas imagens da figura 85 e 87, as aparas apresentam elevada deformação plástica.

Foram também detectados pequenos fragmentos retidos nas aparas que são visíveis nas figuras 85 e 88, os quais foram analisados quimicamente por EDS, permitindo identificar através dos gráficos das figuras 86 e 89 que estes são partes do revestimento dos insertos de corte, indicando que o revestimento aplicado se vai desintegrando.

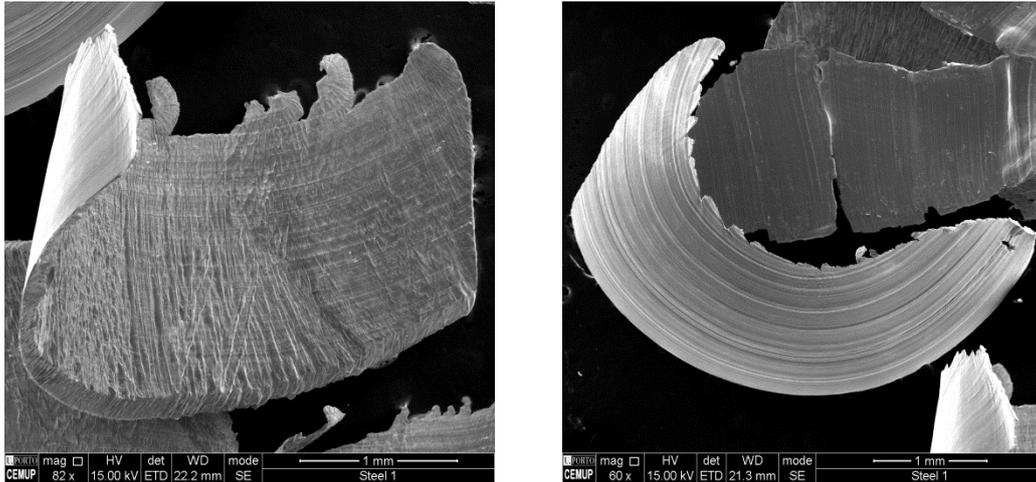


Figura 84 – Aparas relativas ao material 1

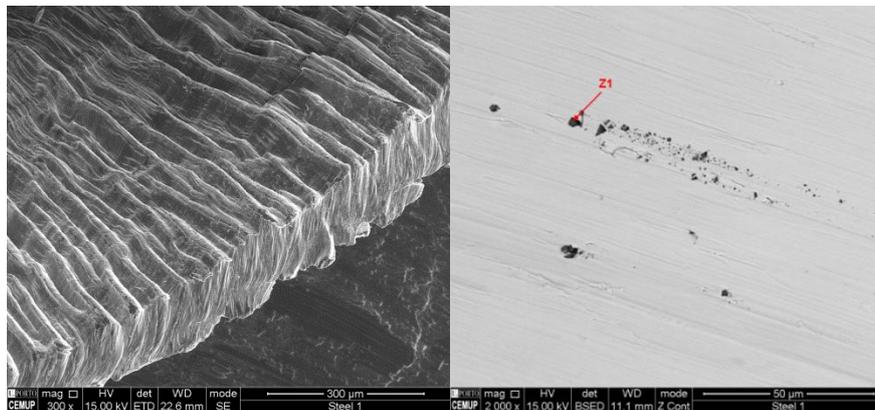


Figura 85 – Fragmentos de revestimento na apara do material 1

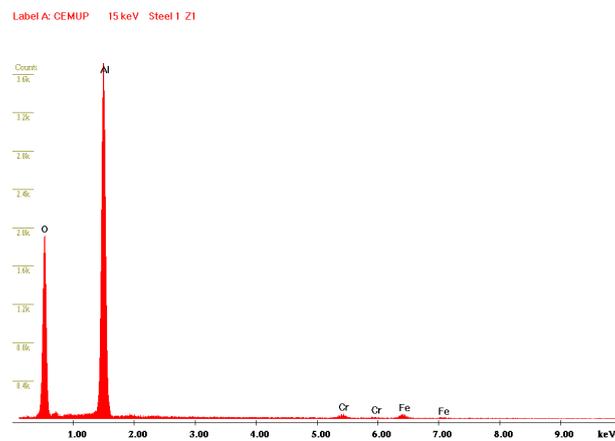


Figura 86 - Análise EDS da apara material 1

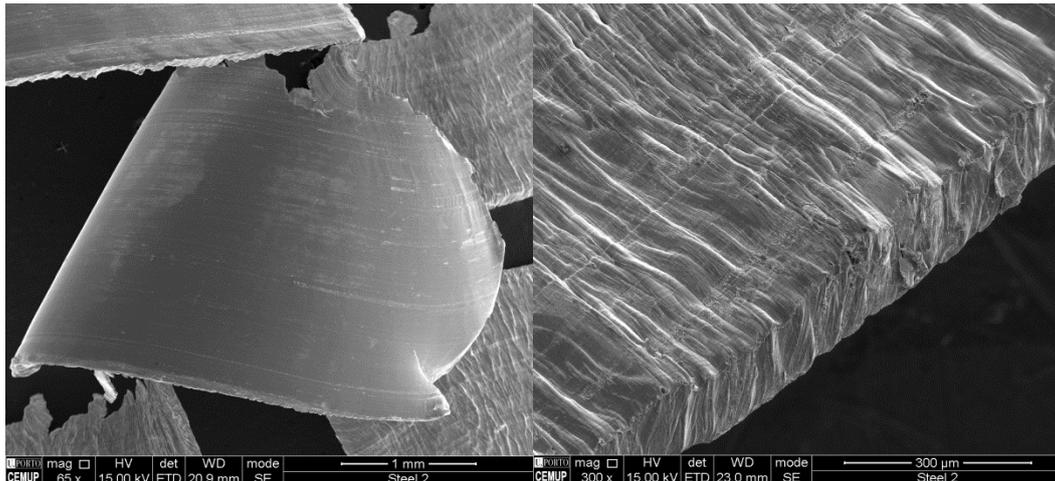


Figura 87 - Aparas material 2

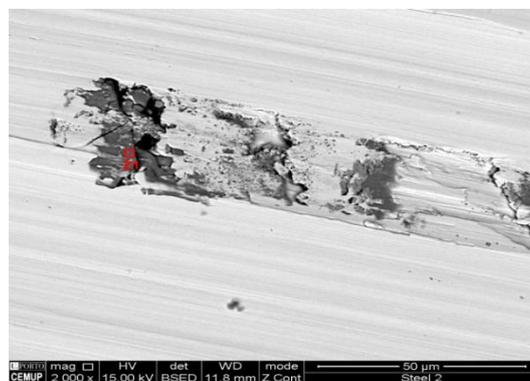


Figura 88 – Fragmentos do revestimento na apara do material 2

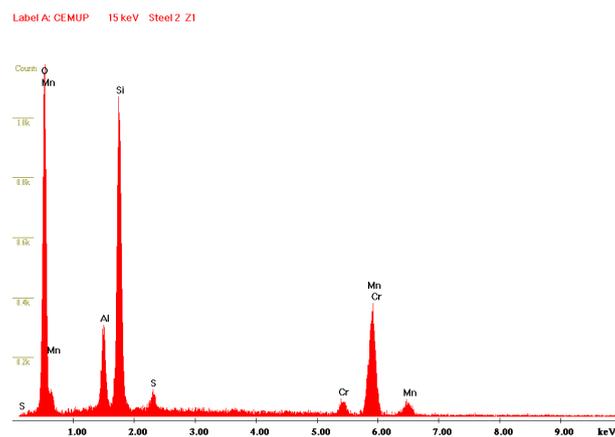


Figura 89 - Análise EDS da apara material 2

CONCLUSÕES

4.1 CONCLUSÃO FINAL

4.2 TRABALHOS FUTUROS

4 CONCLUSÕES

4.1 Considerações finais

Os ensaios realizados permitiram chegar a conclusões que são úteis para trabalhos futuros de desenvolvimento de novas ferramentas e aperfeiçoamento das mesmas. De uma maneira geral, podemos afirmar que:

- Os insertos de corte do tipo PH7930 identificados nos ensaios como ferramentas do tipo A, revestidas por PVD, obtiveram melhores resultados a nível de acabamento superficial, com as superfícies maquinadas a apresentar valores mais baixos de Ra. No entanto, o desgaste dos insertos de corte PH7930 foi superior ao apresentado pelos insertos de corte PH5740, identificados nos ensaios como ferramentas do tipo B;
- Os insertos de corte PH5740 apresentaram maior resistência ao desgaste que as PH7930. No entanto, essa resistência ao desgaste não se traduziu numa melhoria do acabamento superficial das peças maquinadas, pois a maior rugosidade das peças maquinadas foi obtida com insertos de corte PH5740;
- Os insertos de corte PH7930 registaram muito mais problemas de avarias que os insertos do tipo PH5740, apresentando um comportamento mais frágil;
- Os insertos de corte do tipo PH7930 parecem ter melhor potencial para operações de acabamento, e não tanto para operações de desbaste. Já os insertos de corte do tipo PH5740 apresentam melhor potencial para operações de desbaste, onde o acabamento superficial não é tão importante;
- Também podemos concluir, através dos resultados apresentados, que nos ensaios de um ciclo os resultados não foram melhores que os registados em ensaios onde a ferramenta realizou dois ciclos;
- Tendo em conta aspectos económicos, e considerando os ensaios e os momentos que ocorreu avaria através da análise das vibrações, é possível definir parâmetros de corte, que permita maximizar a rentabilidade do processo de maquinagem de aços inoxidáveis Duplex;
- Da análise do vídeo de alta velocidade do ensaio experimental com os insertos do tipo PH5740, foi possível identificar que em algumas circunstâncias ocorre a prisão da apara debaixo da ferramenta, existindo alguma dificuldade na sua libertação. Esta situação é provocada pelo tamanho elevado da apara gerada e que está relacionado com o ângulo de ataque da ferramenta que é pouco apropriado para a maquinagem de materiais muito duros. Esta ocorrência contribui para que as aparas permaneçam mais tempo em contacto com a ferramenta e com a peça, contribuindo para o desgaste precoce da ferramenta;
- Tendo em conta os resultados obtidos com os insertos de corte PH5740, pode-se afirmar que um baixo desgaste do inserto não significa um bom acabamento superficial, como seria de esperar. Muito pelo contrário, concluiu-se que um bom acabamento superficial tem de ser acompanhado por um desgaste uniforme do inserto de corte;

- O ângulo de ataque da ferramenta de +13° não é o mais indicado para a maquinagem do aço inoxidável Duplex, visto tratar-se de um material bastante duro;
- Também se conclui que a resistência do revestimento não é a mais adequada, tendo em conta que se detectaram fragmentos de revestimento nas aparas do material.

Tomando em consideração que os ensaios foram realizados em condições extremas de maquinagem, pode-se afirmar que os insertos desempenharam bem as suas funções. Se nas condições descritas neste relatório os insertos, na maioria das situações, tiveram um desempenho aceitável, com a optimização dos parâmetros, certamente se conseguiria uma melhoria significativa dos resultados.

4.2 Trabalhos futuros

Com estes ensaios, foi obtida experiência prática no desempenho das ferramentas em condições extremas. No entanto, ficam como sugestões para trabalhos futuros:

- Desenvolver ensaios para optimização dos parâmetros de corte com estes dois tipos de ferramenta;
- Realizar ensaios com insertos de corte de outros fabricantes, de forma a haver um maior conhecimento sobre as vantagens e desvantagens de cada tipo de inserto.

BIBLIOGRAFIA

5.1 Artigos, livros e revistas

5.2 Outras fontes

5 BIBLIOGRAFIA

5.1 Artigos, livros e revistas

ASM HANDBOOK, (1992) Alloy Phase Diagrams. ASM International, Ohio

Astakhov V.et.Davim J.P. (2008) "Tools(Geometry and materials) and tool wear" Machining: Fundamentals and recent, Springer

Ansell, C. T.; Taylor, J.(1962) "The surface finishing properties of a carbide and ceramic cutting tool", Proceedings the 3rd International MTDR Conference Advances in Machine Tool Design and Research, September

Batista, S. R. F.; Kuri, S. E.; Mariano, N. A. (2011) Comportamento de corrosão de aços inoxidáveis dúplex fundidos, em água do mar sintética. 6º Congresso brasileiro de Engenharia de fabricação. Caxias do Sul - RS

Callister, W. D. J. (2002)Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 5ª edição. ed. Rio de Janeiro: LTC

Completo, A., Festas, A. e Davim, J. (2009). Tecnologia de fabrico, Publindústria.

Chiaverini, V. (1979) Aços e ferros fundidos. 4ª ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais.

Chiaverini, V. (1977). Tecnologia Mecânica- Processos de Fabricação e Tratamento Vol. II, 2ª Edição.

Cavalheiro, (1998) - A. Z. Sistematização do Planejamento da Programação via CAM do Fresamento de Cavidades de Moldes para Peças Injetadas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis;

Clark, L E.; Sem, P. K., (1998). Advances in the development of ultrahard cutting tool material. Industrial Diamond Review, n. 2.

Dormer Technical Handbook, s.d

Davim, J. P., (2005) Maquinabilidade de materiais compósitos – Análise experimental, Lição de Síntese.

Davim, J. P. , Correia, A. E.,(2006) Maquinagem a alta velocidade – Fresagem /CNC, Publindústria.

Endrino, J., Fox-Rabinovich, G., & Gey, C. (20 de Dezembro de 2005). Hard AlTiN, AlCrN PVD coatings for machining of austenitic stainless steel. Obtido de Science Direct: www.sciencedirect.com

Ferraresi, D., 1970 “Fundamentos da Usinagem dos Metais”, Edgard Blücher Ltda, Brasil.

Fastcam_SA4_HW_Manual_Rev100en.pdf

Grzesik, W., (2003), “Friction Behaviour of Heat Isolating Coatings in Machining: Mechanical Thermal, and Energy-Based Considerations”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 43

Heath, P. J. (1986), Properties and uses of amborite, Industrial Diamond Review.

Hoffman, P. J.; Hopewell E.S.; Janes, B.; Sharp, K. M. (2012) Precision Machining

Kalpakjian, Serope.(1995),Manufacturing Engineering and Technology 3rd edition

Kolaska, H.; Dreyer, K (1990), Metal Duro, Cermets e cerâmica. Metal Mecânica

Lima, L. I. L. (2007) Metodologia para avaliação da corrosão da zona termicamente afetada de aço Inoxidável ferrítico AISI 439 soldado. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte

Matsumoto, H. and Diniz, A.E., (2000), “Torneamento de Aços Endurecidos utilizando Ferramentas Cerâmicas”, In: 1º Congresso Nacional de Engenharia Mecânica-CONEM, Natal-RN.

Machado, I. F.; Padilha, A. F. (2000) Aging Behaviour of 25Cr–17Mn High Nitrogen Duplex Stainless Steel. ISIJ International, v. 40, n. 7

Mariano, N. A.; Pires, A. C.; Murolo, J. P.; Kuri, S. E.(2006) Avaliação da resistência à corrosão em aço inoxidável martensítico do tipo Cr-Ni em meio marinho sintético simulando atividades em águas profundas. Revista Escola de Minas, v. 59, n. 1

Martins, M.; Casteletti, L. C.(2009) Microstructural characteristics and corrosion behavior of a super duplex stainless steel casting. Materials Characterization, v. 60, Senatore, M.; Finzetto, L.; Perea, E. (2007) Estudo comparativo entre os aços inoxidáveis dúplex e os inoxidáveis AISI 304L/316L. Revista Escola de Minas, v. 60, n. nº 1

Marin, H. (2006) Modelamento Matemático do Refino do Aço Inoxidável em convertedores AOD-L; Belo Horizonte: UFMG

Oliveira, Á. F. (2006). Influência dos elementos químicos no aço

Overby, A. (2011) CNC Machining Handbook Building Programing and Implementation

Lo, K.H., Shek, C.H. and Lai, J.K.L. (2009) Recent Developments in Stainless Steels. Materials Science and Engineering R, 65, 39-104. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mser.2009.03.001>. [ONLINE] [Consultado em 05.04.2016]

Mc Graw Hill

Reis, P, (2014) Dissertação Estudo Comparativo do comportamento de diferentes ferramentas na na fresagem de aços duplex

Rosa, A.B. and Diniz, A.E, (1999), “Influência das Condições de Usinagem na Rugosidade de Peças de Aço Fresadas com Fresas de Topo de Metal Duro e Coronite”, In: 15º Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica-COBEM, Águas de Lindóia-SP, ABCM.

Sandvik, (2010) Catálogo Principal.

Souza, A. e Ulbrich, C. (2009). Engenharia Integrada por Computador e Sistemas – CAD/CAM/CNC – Princípios e Aplicações. Artliber – Editora.

Schulz, H., Emrich, A.K., Finzer, T., Dörr, J., (2000), “Quais são e para que Servem os Revestimentos”, Máquina e Metais.

Sandvik - Manual Técnico. (2010).

Silva, F. J. (2008). Acetatos de maquinagem 4 - Desgaste e avarias nas ferramentas.

Silva, F. J. (2008). Acetatos de maquinagem 5 - Materiais para Ferramentas.

Silva, F. J. (2008). Acetatos de maquinagem 5 - Vida das ferramentas e custos de maquinagem.

Sandvik (2005), Manual técnico de usinagem;

Sandvik (2010), Catálogo Principal;

Stemmer, C. H. (1995) Ferramentas de corte II 2ª Edição Editora DAUFSC

Tschätsch, H. (2008) Applied Machining Technology, Springer

Technology, DELMAR CENGAGE Learning

5.2 Outras fontes

www.arsopi.pt/pt/fundição/materiais/ [consultado em 15 01 2017]

<http://www.cenfim.pt>

<http://www.cemup.up.pt>

<http://www.denverinstrumentusa.com>

www.diatec-pforzheim.de/Bilder/Produkte/CVD-PKD-CBN/Wendeplatten-aus-MKD-CVD-PKD-und-CBN.jp, [ONLINE] [Consultado em 25.09.2017]

www.dormerpramet.com- Manual técnico Dormer digital.[ONLINE] [Consultado em 24 06 2017]

www.dormerpramet.com- Pramet Catalogue 2017.[ONLINE] [Consultado em 24 06 2017]

www.dormerpramet.com- Dormer Catalogue 2017.[ONLINE] [Consultado em 24 06 2017]

www.mahr.com

www.mazak.com

www.photron.com

www.palbit.pt/en/products.7/cutting-tools.813/inserts.897/milling-inserts.898/wnhu.a5197.html. [ONLINE] [Consultado em 14.07.2016]

www.palbit.pt/pt/downloads.803/ferramentas-de-orte.932/catalogos.936.html Palbit – Catálogo Geral Métrico 2016. [ONLINE] [Consultado em 14.07.2016].

www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/general_turning/troubleshooting-/pages/default.aspx. [ONLINE] [Consultado em 11.05.2016].

ANEXOS

6.1 ANEXO1

6.1.1 ANEXO2

6 Anexos

6.1 ANEXO 1

Acelerómetro Modelo	
Fabricante	pcb-piezotronics.industrialpartner
Imagem	
Modelo	352C22
Tamanho	Miniatura
Peso	0,5 gm
Material	Ceramic shear ICP® accel
Sensibilidade	(±15%) 10 mV/g (1.0 mV/(m/s ²))
Campo medida	±500 g pk (±4900 m/s ² pk)
Resolução	0.004 g rms (0.04 m/s ² rms)
Frequência	(±5%) 1.0 to 10000 Hz
Montagem	Colagem com adesivo
Fabricante	pcb-piezotronics.industrialpartner

Imagem



Modelo	352A24
Tamanho	Miniatura
Peso	0,8 gm
Material	Ceramic shear ICP® accel
Sensibilidade	(±10%) 100 mV/g (10.2 mV/(m/s²))
Campo Medida	±50 g pk (±490 m/s² pk)
Resolução	0.0002 g rms (0.002 m/s² rms)
Frequência	(±5%) 1.0 to 8000 Hz
Montagem	Colagem com adesivo
