



ESTUDO COMPARATIVO DE MAQUINAGEM EM DUPLEX 2205

PEDRO ALEXANDRE SAMPAIO CARNEIRO

novembro de 2020

ESTUDO COMPARATIVO DO DESGASTE DE DIFERENTES FERRAMENTAS NA FRESAGEM DE AÇO DUPLEX 2205

Pedro Alexandre Sampaio Carneiro

1120635

2020

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO
DO PORTO

isep

ESTUDO COMPARATIVO DO DESGASTE DE DIFERENTES FERRAMENTAS NA FRESAGEM DE AÇO DUPLEX 2205

Pedro Alexandre Sampaio Carneiro

1120635

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 Silva.

2020

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO
DO PORTO

isep

JÚRI

Presidente

Doutora Rafaela Carla Barros Casais

Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP

Orientador

Doutor Francisco José Gomes da Silva

Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP

Arguente

Professor Doutor António Paulo Monteiro Baptista

Professor Associado com Agregação, Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi financiado e realizado no âmbito do projeto ON-SURF (ANI | P2020 | POCI-01-0247-FEDER-024521), cofinanciado pelo Portugal 2020 e FEDER, através do COMPETE 2020 - Programa Operacional para a Competitividade e Internacionalização.

A elaboração desta dissertação não seria possível sem o apoio de duas pessoas, as quais quero primeiramente agradecer, ao Professor Doutor Francisco José Gomes Silva pela dedicação, compreensão, paciência e sobretudo pelo nível de exigência na elaboração deste trabalho, e ao Vitor Fernando Crespim Sousa pela realização dos ensaios e fornecimento dos dados, o qual foi sempre muito prestável.

Um obrigado aos meus pais e namorada, que não me deixaram desistir e deram-me a motivação para concluir a dissertação.

Um agradecimento à equipa da Brukinag Engenharia - Unipessoal Lda., com quem trabalho diariamente e me proporcionam um excelente ambiente laboral e aprendizagem contínua, sobretudo na metalomecânica de precisão.

PALAVRAS CHAVE

Maquinagem; Fresagem; Aços Inoxidáveis Duplex; DSS 2205; Forças de Corte; Desgaste de Ferramentas; Rugosidade de Superfícies

RESUMO

A versatilidade e rigor da maquinagem, fazem deste um dos processos de fabrico mais utilizados na indústria metalomecânica.

Com a expansão da utilização de aços inoxidáveis duplex, a maquinagem destes é cada vez mais frequente, contudo, este processo não é fácil. O corte destas ligas é caracterizado por vários mecanismos de desgaste na ferramenta, que trazem impacto negativo na qualidade do trabalho produzido.

Ao longo dos anos, tem-se assistido a uma otimização deste processo, assim como ao desenvolvimento de novas ferramentas com revestimentos que melhoram a tribologia do corte e métodos de controlo do desgaste que visam a otimização dos parâmetros.

O presente trabalho visa avaliar o comportamento de ferramentas com variação de parâmetros de corte na fresagem deste tipo de ligas. Para tal, foram utilizadas ferramentas de geometria e composição semelhantes, produzidas por empresas distintas.

A análise comparativa recaiu sobre a qualidade da superfície gerada por maquinagem, através de perfilometria, registo do desgaste por microscopia eletrónica e análise das forças e binário de corte durante a maquinagem.

As experiências realizadas mostram que os parâmetros de corte indicados pelos fabricantes são muito eficazes no equilíbrio entre desgaste, forças de corte e rugosidade. A velocidade de avanço pode ser reduzida, de modo a melhorar a rugosidade, ou aumentada, de modo a otimizar tempos de maquinagem.

KEYWORDS

Machining; Milling; Duplex Stainless Steels; DSS 2205; Cutting Forces; Tool's Wear; Surface Roughness

ABSTRACT

The versatility and quality of the machining make this one of the most used manufacturing processes in the metalworking industry.

With the expansion in the use of duplex stainless steels, its machining is more and more frequent, however, this process is not easy. The cutting of these alloys is characterized by several tool wear mechanisms whose have a negative impact on the quality of the work produced.

Over the years, there has been an optimization of this process, development of new tools, with coatings that improve the cutting tribological features, and wear control methods that look to optimize the parameters.

The present work aims to evaluate the behavior of tools with variation in cutting parameters when milling this type of alloys. For this purpose, tools produced by different companies, with similar geometry and composition were used and analysed.

Comparative analysis focused on the quality of the surface generated by machining has been made through profilometry, evaluation of the wear by scanning electron microscopy and analysis of cutting forces and torque during machining.

The performed work has shown that the cutting data indicated by tool manufacturers are very effective in balancing wear, cutting forces and roughness. Cutting feed can be reduced to improve roughness or increased to optimize machining times.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
Ae	Avanço lateral
Ap	Avanço vertical
CBN	Nitreto Cúbico de Boro
CEMUP	Centro de Materiais da Universidade do Porto
CCC	Cúbico de corpo centrado
CFC	Cúbico de faces centradas
CNC	Controlo numérico computadorizado
CVD	<i>Chemical Vapor Deposition</i>
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
DSS	<i>Duplex Stainless Steel</i>
EN	<i>European Standard</i>
f	Velocidade de avanço
f _z	Avanço por dente
HM	<i>Hard Metal</i> – Metal duro
HSS	<i>High Speed Steel</i> – Aço Rápido
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
PCD	Diamante policristalino
PREN	<i>Pitting Resistance Equivalent Number</i>
PVD	<i>Physical Vapor Deposition</i>
SAF	<i>Sandvik Austenite Ferrite</i>
SEM	<i>Scanning Electron Microscopy</i>
UNS	<i>Unified Numbering System</i>
VB	Desgaste do flanco
Vc	Velocidade de corte
ZTA	Zona Termicamente Afetada

Lista de Unidades

°C	Grau Celsius
g	Grama
Pa	Pascal
HB	Dureza Brinell
HRC	Dureza Rockwell C

HV	Dureza Vickers
J	Joule
V	Volt
W	Watt
m	Metro
min	Minuto
rot	Rotação
rpm	Rotação por minuto
s	Segundo

Lista de Símbolos

%	Porcentagem
°	Grau
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio
AlTiN	Nitreto de Titânio Alumínio
C	Carbono
Cr	Crômio
CrN	Nitreto de Crômio
Cu	Cobre
Fe	Ferro
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
N	Azoto
NbC	Carboneto de Nióbio
Ni	Níquel
Si	Silício
SiC	Carboneto de Silício
TaC	Carboneto de Tântalo
TiC	Carboneto de Titânio
TiCN	Carbo-Nitreto de Titânio
TiN	Nitreto de Titânio
V	Vanádio
W	Tungstênio
WC	Carboneto de Tungstênio

GLOSSÁRIO DE TERMOS

<i>Cutoff</i>	Comprimento de onda a partir do qual um filtro é efetivo
<i>Food Grade</i>	Apto para uso na indústria alimentar
<i>Set-up</i>	Preparação para o trabalho; aperto da peça; aperto da ferramenta
<i>Standard</i>	Norma, padrão

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - RESISTÊNCIA À CORROSÃO VS. RESISTÊNCIA MECÂNICA DOS AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENITÍCOS E DUPLEX (OUTOKUMPU GROUP, 2010)	10
FIGURA 2 – TÉCNICAS DE FRESAGEM RELATIVAMENTE AO EIXO DA FERRAMENTA (DORMER, 2010)	16
FIGURA 3 - DETERMINAÇÃO DA ESPESSURA DA APARA (SANDVIK COROMANT, 2005)	19
FIGURA 4 – CONE DO TIPO SK (LINK SPA, 2019)	20
FIGURA 5 – CONE DO TIPO BT (LINK SPA, 2019)	21
FIGURA 6 – CONE DO TIPO HSK (LINK SPA, 2019)	21
FIGURA 7 – ESQUEMA DE MONTAGEM POR PINÇA TIPO ER (STEPHENSON & DAN AGAPIOU, 2016)	22
FIGURA 8 – CONE HIDRÁULICO (STEPHENSON & DAN AGAPIOU, 2016)	22
FIGURA 9 - PARÂMETROS GEOMÉTRICOS E NOMENCLATURA NUMA FRESA DE TOPO (DORMER, 2010)	25
FIGURA 10 - VARIAÇÃO DA DUREZA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DE MATERIAIS PARA FERRAMENTAS (SILVA, 2008A)	31
FIGURA 11 - EXEMPLO DE REVESTIMENTO MULTICAMADA (SILVA, 2008B)	32
FIGURA 12 - ESQUEMA DE DEPOSIÇÃO PVD, (A) SPUTTRING, (B) EVAPORAÇÃO (BAPTISTA <i>ET AL.</i> , 2018)	33
FIGURA 13 - COEFICIENTE DE ATRITO DE ALCRN E ALCRN-T APLICANDO UMA CARGA DE 1N (CADENA <i>ET AL.</i> , 2013)	35
FIGURA 14 - TIPOS DE DESGASTE EM FERRAMENTAS (STEPHENSON & AGAPIOU, 2016)	37
FIGURA 15 - DESGASTE DE FLANCO (SANDVIK COROMANT, 2012)	41
FIGURA 16 - MEDIÇÃO DO DESGASTE DOS FLANCOS – VB (SILVA, 2008B)	41
FIGURA 17 - DESGASTE EM CRATERA (SANDVIK COROMANT, 2012)	42
FIGURA 18 – MEDIÇÃO DO DESGASTE POR CRATERA (ISO, 1993)	42
FIGURA 19 - DESGASTE POR ENTALHE (SANDVIK COROMANT, 2012)	43
FIGURA 20 - DEFORMAÇÃO PLÁSTICA NUMA FERRAMENTA (SANDVIK COROMANT, 2012)	43
FIGURA 21 - FISSURA POR FADIGA TÉRMICA (SANDVIK COROMANT, 2012)	44
FIGURA 22 - FISSURA POR FADIGA MECÂNICA (SILVA, 2008B)	44
FIGURA 23 - QUEBRA DA ARESTA (SANDVIK COROMANT, 2012)	44
FIGURA 24 - FORMAÇÃO DE ARESTA POSTIÇA (SANDVIK COROMANT, 2012)	45
FIGURA 25 - FRATURA EM FERRAMENTA (SILVA, 2008B)	45
FIGURA 26 - LOCALIZAÇÃO DOS MECANISMOS DE DESGASTE NO CORTE (DADIC, 2016)	46
FIGURA 27 - MECANISMOS DE DESGASTE EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE (SILVA, 2008A)	46

FIGURA 28 - REGISTO DE FORÇAS DE CORTE ENTRE FERRAMENTA NOVA E FERRAMENTA USADA (BLATTNER, 2016)	48
FIGURA 29 - MEDIÇÃO DA FORÇA DE CORTE NUMA FERRAMENTA COM DUAS LÂMINAS (BLATTNER, 2016)	49
FIGURA 30 - A: DINAMÓMETRO ROTACIONAL; B: DINAMÓMETRO ESTACIONÁRIO	49
FIGURA 31 - ÍNDICES DE MAQUINABILIDADE PARA FERRAMENTAS HM E HSS EM AÇOS INOXIDÁVEIS, TENDO POR BASE AISI 316 (TMR STAINLESS, 2014)	50
FIGURA 32 - DIAGRAMA DE ISO CORROSÃO EM ÁCIDO SULFÚRICO (SANDVIK COROMANT, 2020)	61
FIGURA 33 - TAXAS DE CORROSÃO EM MEIO COM ÁCIDOS ACÉTICOS E FÓRMICOS (SANDVIK COROMANT, 2020)	61
FIGURA 34 - DIAGRAMA DE ISO CORROSÃO EM ÁCIDO CLORÍDRICO (SANDVIK COROMANT, 2020)	62
FIGURA 35 - TEMPERATURA CRÍTICAS PARA A FORMAÇÃO DE CORROSÃO POR PITES (SANDVIK COROMANT, 2020)	62
FIGURA 36 - RESISTÊNCIA À CORROSÃO SOB TENSÃO NUMA SOLUÇÃO COM CLORETOS (SANDVIK COROMANT, 2020)	63
FIGURA 37 – HAAS VF-2 SS (HAAS AUTOMATION INC., 2017)	67
FIGURA 38 - FIXAÇÃO DA PEÇA NA BUCHA AUTOCENTRANTE	69
FIGURA 39 - MONTAGEM DO DINAMÓMETRO E FERRAMENTA DE CORTE	70
FIGURA 40 - ESPESSURA DOS REVESTIMENTOS (A) HPMT #951; (B) DORMER S260	71
FIGURA 41 - MÉDIA DE RUGOSIDADES TANGENCIAIS (VALORES EM μM)	80
FIGURA 42 - MÉDIA DE RUGOSIDADES RADIAIS (VALORES EM μM)	80
FIGURA 43 - IDENTIFICAÇÃO DE PROBLEMAS NA MONTAGEM DA PEÇA: (A) – REMOÇÃO EXCESSIVA DE MATERIAL; (B) – FERRAMENTA NÃO REMOVE MATERIAL; (C) – CORTE INTERROMPIDO	124
FIGURA 44 - RESUMOS DAS AMPLITUDES DAS FORÇAS F_x E F_y REGISTRADAS NOS ENSAIOS	125

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX E ALGUNS AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS NA CONDIÇÃO DE FORJADOS (TMR STAINLESS, 2014)	10
TABELA 2 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX E ALGUNS AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS NA CONDIÇÃO DE VAZADOS (TMR STAINLESS, 2014)	12
TABELA 3 - PARÂMETROS GEOMÉTRICOS E NOMENCLATURA NUMA FRESA DE TOPO (DORMER, 2010)	25
TABELA 4 - GEOMETRIAS DE FRESAS MAIS COMUNS (DORMER, 2010)	26
TABELA 5 - CLASSES DE FERRAMENTAS DE CORTE ISO (MACHININGCLOUD, 2016)	27
TABELA 6 - NOMENCLATURA DOS AÇOS RAPÍDOS SEGUNDO A ISO 11054 (ISO, 2006)	28
TABELA 7 - PROPRIEDADES HSS E HM (DORMER, 2010)	29
TABELA 8 - RESULTADOS DE IMPROVING THE WEAR RESISTANCE OF MOULDS FOR THE INJECTION OF GLASS FIBRE–REINFORCED PLASTICS USING PVD COATINGS: A COMPARATIVE STUDY (SILVA ET AL., 2017)	34
TABELA 9 - TIPOS DE DESGASTE, MECANISMOS, CARATERÍSTICAS E POSSÍVEIS SOLUÇÕES EM FERRAMENTAS (STEPHENSON & AGAPIOU, 2016)	38
TABELA 10 - VALORES LIMITE (VB) RECOMENDADOS NA PRÁTICA PARA DIFERENTES MATERIAIS DE FERRAMENTA. SILVA, 2008B)	41
TABELA 11 - ÍNDICES DE MAQUINABILIDADE DE AÇOS INOX COM BASE NO AÇO AO CARBONO (BRITISH STAINLESS STEEL ASSOCIATION, 2018)	50
TABELA 12 - PARÂMETROS DE CORTE UTILIZADOS POR P. M. REIS E F. G. SILVA	53
TABELA 13 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA SAF 2205 (ARSOPI, 2013)	60
TABELA 14 – PROPRIEDADES FÍSICAS SAF 2205 (ARSOPI, 2013; SANDVIK COROMANT, 2020)	60
TABELA 15 - PROPRIEDADES MECÂNICAS SAF 2205 (ARSOPI, 2013)	64
TABELA 16 - ESPECIFICAÇÕES MAHR M2	64
TABELA 17 - ESPECIFICAÇÕES FEI QUANTA 400FEG ESEM	65
TABELA 18 - ESPECIFICAÇÕES KISTLER - 9171A	66
TABELA 19 - HAAS VF-2 SS CURSOS DOS EIXOS (HAAS AUTOMATION INC., 2017)	67
TABELA 20 - HAAS VF-2 SS CARATERÍSTICAS FUSO (HAAS AUTOMATION INC., 2017)	67
TABELA 21 - HAAS VF-2 SS CARACTERÍSTICAS MESA (HAAS AUTOMATION INC., 2017)	68
TABELA 22 - HAAS VF-2 SS VELOCIDADES DE AVANÇO (HAAS AUTOMATION INC., 2017)	68
TABELA 23 - HAAS VF-2 SS IMPULSOS DE MOTORES (HAAS AUTOMATION INC., 2017)	68
TABELA 24 - HAAS VF-2 SS CARACTERÍSTICAS PORTA FERRAMENTAS (HAAS AUTOMATION INC., 2017)	68
TABELA 25 - CARATERÍSTICAS BISON 3575 (LINK SPA, 2019)	69

TABELA 26 - CARATERÍSTICAS DORMER S260	72
TABELA 27 - CARATERÍSTICAS HPMT#951	73
TABELA 28 - PARÂMETROS DE CORTES UTILIZADOS NOS ENSAIOS DE MAQUINAGEM	74
TABELA 29 - AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE DORMER S260, ENSAIO 1	75
TABELA 30 - AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE DORMER S260, ENSAIO 2	75
TABELA 31 - AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE DORMER S260, ENSAIO 3	76
TABELA 32 - AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE DORMER S260, ENSAIO 4	76
TABELA 33 - AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE DORMER S260, ENSAIO 5	77
TABELA 34 - AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE HPMT 951, ENSAIO 1	77
TABELA 35 - AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE HPMT 951, ENSAIO 2	78
TABELA 36 - AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE HPMT 951, ENSAIO 3	78
TABELA 37 - AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE HPMT 951, ENSAIO 4	79
TABELA 38 - AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE HPMT 951, ENSAIO 5	79
TABELA 39 - DESGASTE DORMER S260 ENSAIO 1	82
TABELA 40 - DESGASTE DORMER S260 ENSAIO 2	87
TABELA 41 - DESGASTE DORMER S260 ENSAIO 3	91
TABELA 42 - DESGASTE DORMER S260 ENSAIO 4	94
TABELA 43 - DESGASTE DORMER S260 ENSAIO 5	98
TABELA 44 - DESGASTE HPMT #951 ENSAIO 1	100
TABELA 45 - DESGASTE HPMT #951 ENSAIO 2	103
TABELA 46 - DESGASTE HPMT #951 ENSAIO 3	104
TABELA 47 - DESGASTE HPMT #951 ENSAIO 4	106
TABELA 48 - RESULTADOS DAS FORÇAS DE CORTE COM A FERRAMENTA DORMER S260 ENSAIO 1	111
TABELA 49 - RESULTADOS DAS FORÇAS DE CORTE COM A FERRAMENTA DORMER S260 ENSAIO 2	113
TABELA 50 - RESULTADOS DAS FORÇAS DE CORTE COM A FERRAMENTA DORMER S260 ENSAIO 3	114
TABELA 51 - RESULTADOS DAS FORÇAS DE CORTE COM A FERRAMENTA DORMER S260 ENSAIO 4	115
TABELA 52 - RESULTADOS DAS FORÇAS DE CORTE COM A FERRAMENTA DORMER S260 ENSAIO 5	116
TABELA 53 - RESULTADOS DAS FORÇAS DE CORTE COM A FERRAMENTA HPMT #951 ENSAIO 1	118
TABELA 54 - RESULTADOS DAS FORÇAS DE CORTE COM A FERRAMENTA HPMT #951 ENSAIO 2	120
TABELA 55 - RESULTADOS DAS FORÇAS DE CORTE COM A FERRAMENTA HPMT #951 ENSAIO 3	121
TABELA 56 - RESULTADOS DAS FORÇAS DE CORTE COM A FERRAMENTA HPMT #951 ENSAIO 4	122

TABELA 57 - RESULTADOS DAS FORÇAS DE CORTE COM A FERRAMENTA HPMT #951 ENSAIO 5	123
--	-----

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Enquadramento	3
1.2	Objetivos	4
1.3	Metodologia.....	4
1.4	Estrutura.....	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1	Aços Inoxidáveis Duplex.....	9
2.1.1	Composições químicas típicas	10
2.1.2	Propriedades mecânicas típicas	14
2.2	Maquinagem	14
2.2.1	Fresagem	15
2.2.2	Parâmetros para fresagem	18
2.2.3	Porta-ferramentas	20
2.2.3.1	Interface máquina – porta-ferramentas	20
2.2.3.2	Interface porta-ferramentas – ferramenta	21
2.2.3.2.1	Porta pinças.....	21
2.2.3.2.2	Cones hidráulicos	22
2.2.3.2.3	Cones térmicos.....	23
2.2.4	Fluídos de corte	23
2.2.5	Ferramentas de Fresagem.....	24
2.2.5.1	Ferramentas de fresagem – Materiais.....	28
2.2.5.2	Ferramentas de fresagem – Revestimentos	31
2.3	Análise do comportamento de ferramentas.....	36
2.3.1	Desgaste nas arestas das ferramentas	37
2.3.2	Rugosidade de superfície em maquinagem	47
2.3.3	Forças de corte	48

2.4	Maquinagem de aços duplex	50
2.4.1	Recomendações na Maquinagem de aços Inoxidáveis Duplex	51
2.4.2	Ferramentas e parâmetros usuais.....	51
2.4.2.1	Revestimentos AlTiN, AlCrN PVD na maquinagem de inoxidáveis austeníticos	51
2.4.2.2	Estudo comparativo do comportamento de diferentes ferramentas na fresagem de aços duplex52	
2.4.2.3	Maquinagem de GX2CrNiMoN26-7-4 DSS: Análise do desgaste em ferramentas revestidas por TiAlN e TiCN/Al ₂ O ₃ /TiN em desbaste no processo de fresagem.....	53
2.4.3	Problemas usuais na maquinagem.....	54
3	DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS	59
3.1	Materiais e métodos	59
3.1.1	Duplex 2205.....	59
3.1.1.1	Composição química e física	60
3.1.1.2	Resistência à corrosão	60
3.1.1.3	Propriedades mecânicas	63
3.1.2	Análise da rugosidade	64
3.1.3	Análise do desgaste por SEM	64
3.1.4	Análise das forças de corte.....	66
3.1.5	Centro de maquinagem.....	67
3.1.6	Set up de ferramentas e peça.....	68
3.1.6.1	Fixação da peça.....	68
3.1.6.2	Fixação da ferramenta	70
3.1.7	Ferramentas utilizadas	70
3.1.7.1	Dormer S260	71
3.1.7.2	HPMT #951	72
3.1.8	Parâmetros de corte.....	73
3.2	Resultados.....	74
3.2.1	Resultados de Rugosidade.....	74
3.2.2	Resultados de desgaste	81
3.2.3	Resultado das forças de corte	110

4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	129
4.1	Conclusões	129
4.2	Proposta de trabalhos futuros	130
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	133
5.1	Artigos em livros e revistas internacionais	133
5.2	Outras fontes de informação	135

INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

1.2 OBJETIVOS

1.3 METODOLOGIA

1.4 ESTRUTURA

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

A maquinagem é um dos processos de fabrico mais importantes na indústria metalomecânica. Este processo destaca-se pela sua versatilidade na produção de vários tipos de geometrias, mais ou menos complexas, com elevado rigor e repetibilidade, e pode ser aplicado na maioria dos materiais de engenharia. A evolução da maquinagem reflete-se nas cadências e qualidade de produção, que hoje têm um papel fundamental na metalomecânica.

Além da dinâmica dos centros de maquinagem modernos, a evolução deste processo é impulsionada pelos desenvolvimentos nas ferramentas de corte. Um século e meio depois da introdução dos simples aços para ferramenta, temos disponíveis ferramentas produzidas em materiais altamente tecnológicos como os carbonetos, diamante policristalino (PCD) e nitreto cúbico de boro (CBN). De modo a combinar várias propriedades importantes nas ferramentas, são aplicados revestimentos duros, mono ou multicamada, por processos de deposição química ou física em fase de vapor.

Apesar dos progressos tecnológicos, alguns materiais continuam a ser desafiantes no processo de maquinagem, como é o caso dos aços inoxidáveis duplex. Os aços duplex são uma família de ligas que combina a boa resistência à corrosão, característica principal dos aços inoxidáveis austeníticos, e alta resistência mecânica, característica dos aços inoxidáveis ferríticos. A dificuldade na maquinagem destas ligas deve-se essencialmente a:

- Formação de aresta postiça de corte na ferramenta;
- Desgaste excessivo da ferramenta;
- Deformação a quente da superfície maquinada.

Para avaliar, prever e minimizar os efeitos colaterais da maquinagem destes materiais, são utilizados métodos que visam a otimização dos parâmetros de corte, escolha da estratégia e ferramenta de corte.

1.2 Objetivos

Este trabalho teve como principal objetivo proceder à análise comparativa de dois grupos de ferramentas de corte por arranque de apara, utilizando a fresagem de topo. Estas ferramentas funcionam com parâmetros distintos e sob lubrificação por emulsão. Assim, consideram-se objetivos da dissertação o seguinte:

- Analisar a influência da velocidade de avanço e de diferentes revestimentos na:
 - Rugosidade da superfície gerada;
 - Desgaste observado na ferramenta;
 - Forças de corte.
- Identificar mecanismos de desgaste observados na ferramenta;
- Selecionar qual o fabricante que ofereceu melhores soluções para a maquinagem deste material.

1.3 Metodologia

A elaboração desta dissertação seguiu a metodologia seguinte:

- Revisão bibliográfica referente à matéria em causa;
- Estudo do material a ser usado como objeto de maquinagem – Aço inoxidável duplex 2205;
- Determinação dos parâmetros a utilizar nos ensaios;
- Preparação do material a maquinar;
- Estabelecimento das condições práticas para a realização dos ensaios, programação CNC e *setup* dos equipamentos;
- Realização dos testes de maquinagem com registo das forças de corte e binário;
- Análise da rugosidade superficial das superfícies geradas por maquinagem;
- Análise do desgaste da ferramenta por microscopia eletrónica;
- Redação da presente dissertação.

1.4 Estrutura

Após esta Introdução, a estrutura deste trabalho está assente essencialmente em três partes: uma Revisão Bibliográfica inicial, onde se pretende enquadrar o leitor com os temas envolvidos nesta dissertação, passando em revista os desenvolvimentos técnicos e científicos que foram publicados em livros e periódicos científicos dedicados a este tema, o Desenvolvimento e Resultados onde se inclui uma descrição dos ensaios

realizados e resultados obtidos, e por fim as Conclusões, onde se destacam as principais ideias e contribuições trazidas através da realização deste trabalho.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX

2.2 MAQUINAGEM

2.3 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE FERRAMENTAS

2.4 MAQUINAGEM DE AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aços Inoxidáveis Duplex

Os aços inoxidáveis duplex, DSS (*Duplex Stainless Steels*), são caracterizados por uma microestrutura de duas fases em proporções semelhantes, de ferrite e austenite. Estes aços combinam tenacidade e resistência à corrosão promovidas pela austenite, enquanto a fase ferrítica é responsável pelo aumento da resistência mecânica. A junção destas características, torna os DSS muito apropriados para diversas aplicações.

A produção de aços duplex data dos anos 30, na Suécia, com a produção de uma liga forjada que continha cromo, níquel e molibdênio para minimizar a corrosão intergranular dos aços inoxidáveis com elevados teores de carbono, usados na indústria de processamento de papel. Em simultâneo, na Finlândia, a fundição de DSS foi introduzida e patenteada em 1936. Ao longo dos anos, as indústrias do petróleo, papel, alimentar e farmacêuticas, foram os principais consumidores destes materiais.

Nos anos 70 ocorreu uma escassez de níquel, combinada com uma procura crescente de materiais para trabalharem em condições extremas, como nas explorações petrolíferas, e uma melhoria nas condições de produção de aços, o que levou a que a indústria dos DSS sofresse um grande impulso. Desde essa década, têm sido produzidos aços inoxidáveis duplex com adição de azoto e menor teor em carbono. Estas melhorias refletiram-se na estabilidade a altas temperaturas e resistência à corrosão. Contudo, estas melhorias dificultaram os processos de produção de soldadura dos DSS. No início dos anos 80, surgiu uma nova geração de duplex com melhor aptidão para a soldadura.

Atualmente, o Duplex 2205 é o DSS mais utilizado, apresentando o dobro da tensão de cedência dos aços inoxidáveis austeníticos comuns, e maior resistência à corrosão que os AISI 304, 316 e 317, Figura 1. Contudo, a sua utilização pode não ser justificada devido ao elevado preço (Liljas, 2008; TMR Stainless, 2014).

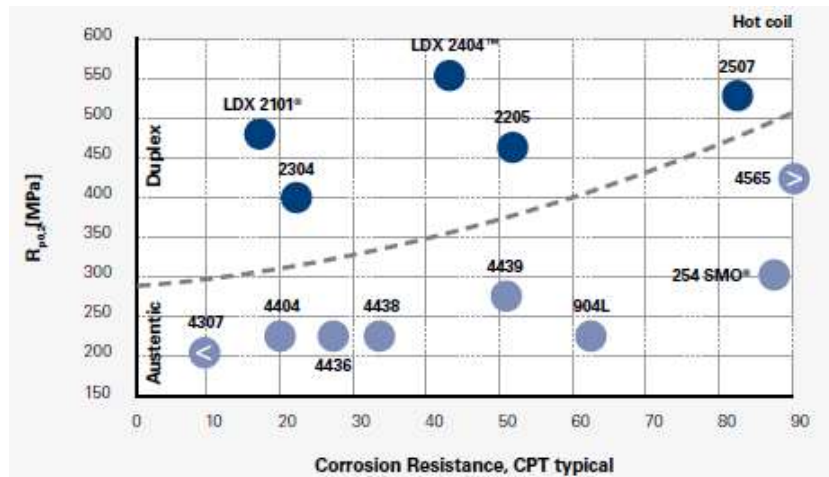


Figura 1 - Resistência à corrosão vs. resistência mecânica dos aços inoxidáveis Austeníticos e Duplex (Outokumpu Group, 2010)

Os aços inoxidáveis duplex atuais dividem-se em cinco grupos (TMR Stainless, 2014):

- *Lean Duplex* – sem adição de Mo (2304)
- *Standard Duplex* – 80% dos Duplex utilizados
- *25 Cr Duplex* – com PREN (*Pitting Resistance Equivalent Number*) inferior a 40
- *Super Duplex* – PREN entre 40 a 45
- *Hyper Duplex* – PREN superior a 45

O PREN – número equivalente à resistência ao *pitting* é calculado pela seguinte equação (TMR Stainless, 2014):

$$PREN = \%Cr + 3,3(\%Mo + 0,5\%W) + 16\%N \quad (1)$$

2.1.1 Composições químicas típicas

Na Tabela 1 e Tabela 2, estão representadas composições químicas de DSS e aços inoxidáveis austeníticos nas condições de forjados e vazados.

Tabela 1 - Composição química de aços inoxidáveis duplex e alguns aços inoxidáveis austeníticos na condição de forjados (TMR Stainless, 2014)

Tipo	Uns	EN	C	Cr	Ni	Mo	N	Mn	Cu	W
Duplex de primeira geração										
329	S32900	1.4460	0.08	23.0- 28.0	2.5- 5.0	1.0- 2.0	-	1.00	-	-
	S31500	1.4424	0.03	18.0- 19.0	4.3- 5.2	2.5- 3.0	0.05- 0.1	-	-	-
	S32404		0.04	20.5- 22.5	5.5- 8.5	2.0- 3.0	0.20	2.00	1.0- 2.0	-
Duplex de segunda geração										

Lean										
	S32001	1.4482	0.03	19.5- 21.5	1.0- 3.0	0.6	0.05- 0.17	4.0- 6.0	1.0	-
	S32101	1.4162	0.04	21.0- 22.0	1.35- 1.7	0.1- 0.8	0.20- 0.25	4.0- 6.0	0.1- 0.8	-
	S32202	1.4062	0.03	21.5- 24.0	1.0- 2.8	0.45	0.18- 0.26	2.00	-	-
	S82011		0.03	20.5- 23.5	1.0- 2.0	0.1- 1.0	0.15- 0.27	2.0- 3.0	0.5	-
2304	S32304	1.4362	0.03	21.5- 24.5	3.0- 5.5	0.05- 0.6	0.05- 0.20	2.50	0.05- 0.60	-
		1.4655	0.03	22.0- 24.0	3.5- 5.5	0.1- 0.6	0.05- 0.20	2.00	1.0- 3.0	-
Standard										
	S32003		0.03	19.5- 22.5	3.0- 4.0	1.5- 2.0	0.14- 0.20	2.00	-	-
2205	S31803	1.4462	0.03	21.0- 23.0	4.5- 6.5	2.5- 3.5	0.08- 0.20	2.00	-	-
2205	S32205	1.4462	0.03	22.0- 23.0	4.5- 6.5	3.0- 3.5	0.14- 0.20	2.00	-	-
25 Cr										
	S31200		0.03	24.0- 26.0	5.5- 6.5	1.2- 2.0	0.14- 0.20	2.00	-	
	S31260		0.03	24.0- 26.0	5.5- 7.5	2.5- 3.5	0.10- 0.30	1.00	0.2- 0.8	0.1- 0.5
	S32506		0.03	24.0- 26.0	5.5- 7.2	3.0- 3.5	0.08- 0.20	1.00	-	0.05- 0.30
	S32520	1.4507	0.03	24.0- 26.0	5.5- 8.0	3.0- 4.0	0.20- 0.35	1.50	0.5- 2.0	-
255	S32550	1.4507	0.04	24.0- 27.0	4.5- 6.5	2.9- 3.9	0.10- 0.25	1.50	1.5- 2.5	-
Super duplex										
2507	S32750	1.4410	0.03	24.0- 26.0	6.0- 8.0	3.0- 5.0	0.24- 0.32	1.20	0.5	-
	S32760	1.4501	0.03	24.0- 26.0	6.0- 8.0	3.0- 4.0	0.20- 0.30	1.00	0.5- 1.0	0.5- 1.0
	S32808		0.03	27.0- 27.9	7.0- 8.2	0.8- 1.2	0.30- 0.40	1.10	-	2.1- 2.5
	S32906		0.03	28.0-	5.8-	1.5-	0.30-	0.80-	0.8	-

				30.0	7.5	2.6	0.40	1.5		
S32950		0.03		26.0- 29.0	3.5- 5.2	1.0- 2.5	0.15- 0.35	2.00	-	-
S39274		0.03		24.0- 26.0	6.8- 8.0	2.5- 3.5	0.24- 0.32	1.0	0.2- 0.8	1.5- 2.5
S39277		0.025		24.0- 26.0	6.5- 8.0	3.0- 4.0	0.23- 0.33	0.80	1.2- 2.0	0.8- 1.2
	1.4477	0.03		28.0- 30.0	5.8- 7.5	1.5- 2.6	0.30- 0.40	0.80- 1.50	≤0.8	-
Hyper Duplex										
S32707		0.03		26.0- 29.0	5.5- 9.5	4.0- 5.0	0.30- 0.50	1.50	1.0	-
S33207		0.03		29.0- 33.0	6.0- 9.0	3.0- 5.0	0.40- 0.60	1.50	1.0	-
Austeníticos										
304L	S30403	1.4307	0.03	17.5- 19.5	8.0- 12.0	-	0.10	2.00	-	-
316L	S31603	1.4404	0.03	16.0- 18.0	10.0- 14.0	2.0- 3.0	0.10	2.00	-	-
317L	S31703	1.4403	0.03	18.0- 20.0	11.0- 15.0	3.0- 4.0	0.10	2.00	-	-
317LMN	S31726	1.4439	0.03	17.0- 20.0	13.5- 17.5	4.0- 5.0	0.10- 0.20	2.00	-	-
904L	N08904	1.4539	0.03	19.0- 23.0	23.0- 28.0	4.0- 5.0	0.10- 2.00	2.00	1.0- 2.0	-

Tabela 2 - Composição química de aços inoxidáveis duplex e alguns aços inoxidáveis austeníticos na condição de vazados (TMR Stainless, 2014)

Tipo	Uns	EN	C	Cr	Ni	Mo	N	Mn	Cu	W
Duplex										
CD4MCu Grau 1A	J93370		0.04	24.5- 26.5	4.75- 6.0	1.75- 2.25		1.00	2.75- 3.25	-
CD4MCuN Grau 1B	J93372		0.04	24.5- 26.5	4.7- 6.0	1.7- 2.3	0.10- 0.25	1.00	2.7- 3.3	-
CD3MCuN Grau 1C	J93373		0.03	24.0- 26.7	5.6- 6.7	2.9- 3.8	0.22- 0.33	1.20	1.4- 1.9	-
CE8MN Grau 2A	J93345		0.08	22.5- 25.5	8.0- 11.0	3.0- 4.5	0.10- 0.30	1.00	-	-
CD6MN	J93371		0.06	24.0-	4.0-	1.75-	0.15-	1.00	-	-

Grau 3A				27.0	6.0	2.5	0.25			
CD3MN										
Cast 2205	J92205		0.03	21.0- 23.5	4.5- 6.5	2.5- 3.5	0.10- 0.30	1.50	-	-
Grau 4A										
CE3MN										
Cast 2507	J93404	1.4463	0.03	24.0- 26.0	6.0- 8.0	4.0- 5.0	0.10- 0.30	1.50	-	-
Grau 5A										
CD3MWCuN										
Grau 6A	J93380		0.03	24.0- 26.0	6.5- 8.5	3.0- 4.0	0.20- 0.30	1.00	0.5- 1.0	0.5- 1.0
Austeníticos										
CF3										
304L Vazado	J92500	1.4306	0.03	17.0- 21.0	8.0- 12.0	-	-	1.50	-	-
CF3M										
316L Vazado	J92800	1.4404	0.03	17.0- 21.0	9.0- 13.0	2.0- 3.0	-	1.50	-	-

Dos elementos químicos presentes na composição dos DSS, destacam-se os seguintes (Alvarez-Armas, 2012; TMR Stainless, 2014):

- Crómio, Cr: este elemento aumenta a resistência à corrosão a altas e baixas temperaturas. Os DSS têm pelo menos 20% de crómio na sua composição, que cria uma película passiva na superfície do metal, protegendo-os da corrosão. Este elemento é formador de ferrite e a sua adição promove uma estrutura cristalina cúbica de faces centradas, CFC, o que implica a adição de níquel à liga para que seja possível obter a estrutura típica dos DSS. Teores elevados promovem a formação de fases intermetálicas, que são prejudiciais para a liga;
- Molibdénio, Mo: Aumenta a resistência à corrosão por *pitting* e intersticial, sendo igualmente um formador de ferrite. A sua aplicação promove a formação de fases intermetálicas. Contudo, a sua percentagem nos DSS costuma ser menor ou igual a 4%;
- Azoto, N; é o elemento mais fortalecedor da liga, aumenta a resistência à corrosão por *pitting* e intersticial, e a resistência mecânica. O azoto atrasa o aparecimento de fases intermetálicas provocadas pelo Cr e Mo, permitindo a produção e processamento dos inoxidáveis duplex. Este elemento é formador de austenite e apresenta baixo custo;
- Níquel, Ni: estabiliza a austenite, promovendo a alteração de estrutura cristalina de cúbica de corpo centrado, CCC para CFC. O níquel atrasa a formação de fases intermetálicas, mas com uma eficácia muito menor que o N. Nos DSS, surgem com percentagens entre 1,5% e 7%.

2.1.2 Propriedades mecânicas típicas

Os DSS são caracterizados por propriedades mecânicas excepcionais na condição de recozido solubilizado. A sua tensão de cedência chega a ser o dobro dos inoxidáveis austeníticos, o que também os torna um material mais difícil de ser trabalhado.

Apresentam boa ductilidade e tenacidade, inclusive para baixas temperaturas.

Comparativamente aos inoxidáveis austeníticos, a tenacidade e ductilidade são ligeiramente menores, mas a transição dúctil-frágil é mais gradual. A menor ductilidade também influencia negativamente a capacidade de conformação do material na quinagem, por exemplo, sendo necessário serem utilizados raios de curvatura maiores na peça, de modo a serem evitadas fissuras, comparativamente a outros aços inoxidáveis. Apresentam maior dureza e endurecimento por deformação a alta velocidade, prejudicando a maquinagem. As propriedades de alongamento conferidas pela austenite, combinadas com a elevada tensão de cedência, característica da ferrite, conferem aos aços inoxidáveis duplex características mecânicas excepcionais (TMR Stainless, 2014).

2.2 Maquinagem

Entende-se como maquinagem o processo ou conjunto de processos de fabrico que conferem formas, dimensões e/ou acabamentos através de arranque de aparas (American Society for Metals, 1989).

Temos como principais processos de maquinagem, os seguintes (Chiaverini, 1986):

- Torneamento – destinado à obtenção de superfícies de revolução. A peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta desloca-se simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o referido eixo;
- Furação – Processo destinado à obtenção de um furo, geralmente cilíndrico, numa peça com recurso a uma ferramenta. A ferramenta ou a peça giram e a ferramenta ou a peça deslocam-se segundo uma trajetória retilínea, coincidente ou paralela ao eixo principal da máquina;
- Roscagem – processo destinado à obtenção de roscas, por meio de abertura de sulcos helicoidais de passo uniforme, em superfícies de revolução. A peça ou a ferramenta gira e desloca-se simultaneamente segundo uma trajetória retilínea coincidente com o eixo de rotação;
- Mandrilagem – processo destinado à obtenção de superfícies de revolução cujas dimensões necessitam de respeitar parâmetros de precisão específicos;

- Fresagem – destinada à obtenção de diversos tipos de superfícies, geralmente, através da utilização de ferramentas com várias lâminas de corte. Existem dois tipos básicos de fresagem a fresagem tangencial e frontal;
- Retificação – processo de maquinagem abrasiva destinado à obtenção de superfícies que respeitam parâmetros dimensionais e de rugosidades específicos. A operação é realizada por uma ferramenta abrasiva de revolução que gira e se desloca, juntamente com a peça, segundo uma determinada trajetória.

2.2.1 Fresagem

A fresagem é definida como uma tecnologia de arranque de apara onde uma ou várias arestas de corte removem material da peça.

Normalmente, numa operação de fresagem, a ferramenta realiza o movimento de corte e a peça o movimento de avanço. As técnicas de fresagem são definidas de acordo com a orientação do eixo da ferramenta relativamente à peça, Figura 2 (Tschätsch, 2009).

- Fresagem periférica (a) – O eixo de rotação da fresa é paralelo à superfície da peça de trabalho. As lâminas encontram-se na circunferência da fresa, cada lâmina efetua um corte individual. As ferramentas utilizadas neste tipo de operação podem ter lâminas retas ou helicoidais, gerando, respetivamente, corte ortogonal ou oblíquo;
- Fresagem facial (b) – A fresa trabalha com uma rotação do eixo perpendicular à superfície da peça de trabalho, a superfície maquinada resulta da ação das arestas de corte localizadas na periferia e face da ferramenta;
- Fresagem de topo (c) – A fresa gira num eixo vertical relativamente à peça. Tal como na fresagem facial as arestas de corte estão localizadas na face e periferia da ferramenta.

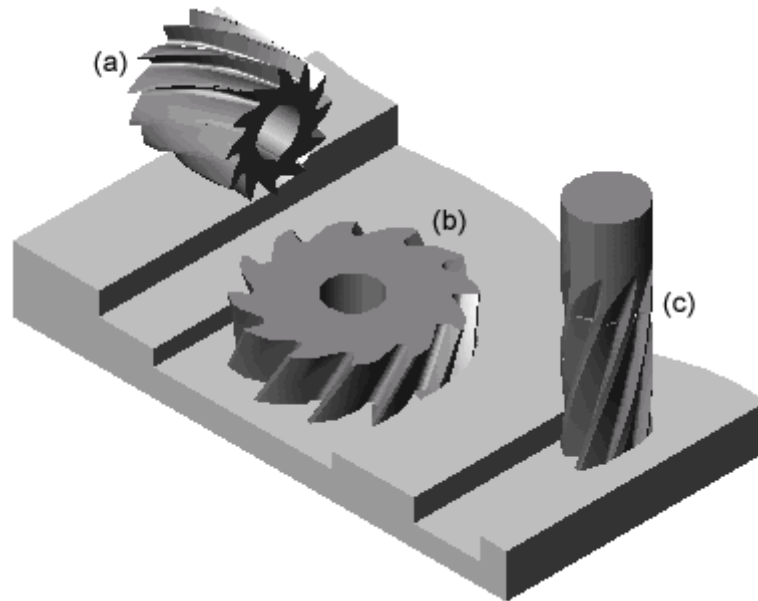


Figura 2 – Técnicas de fresagem relativamente ao eixo da ferramenta (Dormer, 2010)

Segundo a disposição das arestas de corte da fresa, podemos ter fresagem tangencial ou periférica e fresagem frontal (Schneider, 2002).

- Fresagem tangencial ou periférica: as lâminas encontram-se na periferia da ferramenta e paralela à superfície a ser maquinada. As ferramentas que executam estas operações são chamadas fresas cilíndricas ou tangenciais. Este processo confere grande rigidez no corte, contudo não tem grande alcance em profundidade, porque esta é limitada pelo eixo de rotação horizontal da fresadora e diâmetro da ferramenta.
- Fresagem frontal: As lâminas da ferramenta estão na superfície frontal, cujo eixo é perpendicular à superfície da peça de trabalho. Este processo é executado por fresas frontais ou de topo, e permite atingir profundidades de corte elevadas devido à geometria da ferramenta. Em contrapartida, quanto maior for o tamanho da haste da fresa, maior é o esforço e vibração sobre ela.

Na fresagem, e relativamente ao movimento entre a peça e a ferramenta, podemos estar perante fresagem concordante, discordante ou combinada (Dormer, 2010).

- Fresagem concordante/convergente: A peça desloca-se no sentido de movimento da lâmina de corte da ferramenta. O deslocamento do avanço e a rotação da fresa têm a mesma direção.

Vantagens:

- Melhor acabamento superficial – a peça tem menos tendência para ser arrastada pela lâmina;
- Disposição mais fácil das aparas – estas são removidas por trás da ferramenta;

- Menor desgaste – vida da ferramenta aumenta 50%;
- Menos potência necessária – o ângulo de ataque da fresa pode ser maior;
- Esta técnica exerce força para baixo na peça de trabalho, o que torna a fixação mais simples e econômica, ajudando a manter a peça fixa, sobretudo as mais finas.

Desvantagens:

- Devido às altas forças de impacto quando a ferramenta ataca a peça, é necessária uma montagem rígida;
- Este processo não é compatível com peças com superfícies escamosas, como os materiais trabalhados a quente, forjados e de fundição. As escamas são demasiado abrasivas, danificando o corte da ferramenta.
- Fresagem discordante/divergente: O avanço da mesa leva a peça contra o movimento de rotação da lâmina. O movimento de avanço é oposto ao da rotação da ferramenta.

Vantagens:

- Escamas e irregularidades no material de trabalho não prejudicam a vida da ferramenta
- O processo de corte é suave, desde que as lâminas estejam afiadas.

Desvantagens:

- A ferramenta tem tendência a vibrar;
- A peça tem tendência a ser puxada, pelo que é necessária uma boa fixação;
- Desgaste da ferramenta mais intenso do que no processo concordante;
- As aparas depositam-se na frente da fresa – prejudica o acabamento;
- Maior potência necessária, devido ao atrito aumentado pelo começo da apanha na espessura mínima.

Quando a fresa tem o seu eixo de rotação dentro do campo de corte da peça, ocorre movimento combinado, ou seja, parte da maquinagem é feita de modo concordante e a outra de forma discordante.

Um dos problemas mais graves e frequentes na fresagem é a vibração. A vibração pode ser causada pela dificuldade da ferramenta em cortar a peça, ressonância, folgas na fixação da peça e máquina, e má extração de apanha. Para contrariar estes problemas, podem-se utilizar massas adicionais na máquina (aumento da robustez), regular de forma mais eficaz os parâmetros de corte, melhorar a fixação da peça e alterar a estratégia de maquinagem (concordante/discordante) (Schneider, 2002).

2.2.2 Parâmetros para fresagem

Através do Manual Técnico da Sandvik Coromant, publicado 2005, são dados como parâmetros na fresagem os seguintes:

- Velocidade de corte, v_c

$$V_c = \frac{\pi \times DC_{ap} \times n}{1000} \quad (2)$$

Indica a velocidade de contacto na qual a aresta maquina a peça.

- Velocidade do fuso, n

$$n = \frac{V_c \times 1000}{\pi \times DC_{ap}} \quad (3)$$

O número de rotações que a ferramenta realiza por minuto depende da regulação. Este é um valor orientado para a máquina, o qual é calculado a partir do valor da velocidade de corte recomendado para uma operação, ferramenta e material a maquinar. O avanço por dente é calculado da seguinte forma:

- Avanço por lâmina, f_z

$$f_z = \frac{V_f}{n \times Z} \quad (4)$$

Quanto ao cálculo do avanço por rotação da ferramenta, este é dado pela equação abaixo e é um valor muito importante, quando é conhecida a espessura máxima de aparta permitida.

- Avanço por rotação, f_n

$$f_n = \frac{V_f}{n} \quad (5)$$

Este valor indica a distância que a mesa se move relativamente à ferramenta durante uma rotação completa. Este é utilizado especificamente para cálculos do avanço e costuma determinar a capacidade de acabamento de uma fresa. Por sua vez, o valor do avanço da mesa pode ser igualmente calculado, como se mostra abaixo.

- Avanço por minuto, v_f

$$V_f = f_z \times n \times Z \quad (6)$$

É conhecido como avanço da mesa, *feed* ou velocidade de avanço. É o avanço da ferramenta em relação à peça, em distância por unidade de tempo em relação ao avanço por lâmina e ao número de lâminas na fresa. O número de lâminas da fresa disponível na ferramenta varia consideravelmente e é usado para determinar o avanço da mesa, enquanto o número efetivo de lâminas é o número efetivo de lâminas em corte. Avanço por rotação (f_n) em mm/rot, é um valor usado especificamente para calcular o avanço, sendo muitas vezes igualmente utilizado para determinar a capacidade de acabamento de uma fresa.

- Espessura máxima da apara, h_{ex}

Este valor é o resultado da largura fresada e está relacionado com f_z , a_e e k_r , Figura 3. A espessura da apara é uma consideração importante ao decidir o avanço por lâmina, a fim de assegurar que o avanço da mesa é o mais produtivo.

- Espessura média da apara, h_m

Este é um valor útil na determinação da força de corte específica, usada nos cálculos da potência líquida, ver Figura 3.

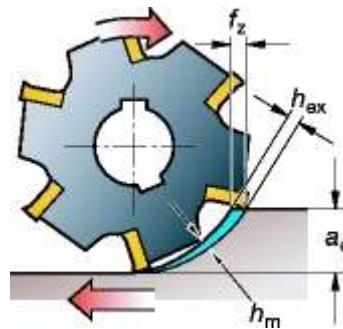


Figura 3 - Determinação da espessura da apara (Sandvik Coromant, 2005)

- Taxa de remoção de material, Q (cm³/min)

$$Q = \frac{AP \times a_e \times V_f}{1000} \quad (7)$$

O volume de material removido em mm³/min, é definido usando os valores de profundidade de corte, largura e avanço.

- Tempo de Maquinagem, T_c (min)

$$T_c = \frac{L}{V_f} \quad (8)$$

Distância total de avanço, L , dividida pelo avanço da mesa v_f .

- Potência líquida, P_c (kW)

$$P_c = \frac{a_e \times AP \times V_f \times k_c}{60 \times 10^6} \quad (9)$$

A potência líquida é um valor que está relacionado com a utilização da máquina-ferramenta, para assegurar que a máquina possa realizar o trabalho com a ferramenta e a operação desejada.

2.2.3 Porta-ferramentas

Os porta-ferramentas possuem duas interfaces, a máquina com o porta-ferramenta e o porta-ferramenta com a ferramenta. A seleção dos mesmos depende do tipo de máquina e parâmetros de corte que irão ser utilizados, encabadouro da ferramenta, operação a realizar, acabamento e tolerância dimensional, tipo de refrigeração disponível e custo.

2.2.3.1 Interface máquina – porta-ferramentas

Os cones tipo SK – Norma DIN69871, Figura 4, e tipo BT – Norma JIS B6339, Figura 5, são as interfaces tradicionais nos centros de maquinagem, pelo seus *designs* extremamente robustos. O seu campo de aplicação varia entre maquinagem fina e grandes desbastes. O porta-ferramentas é puxado pela máquina através do pino de tração e o centramento é garantido pelo contacto cónico. Estas interfaces são adequadas para aplicações com uma velocidade até 12 000 rpm., embora no mercado já existem modelos balanceados que podem ser usados a 25 000 rpm. Estes modelos não garantem muita precisão e são pesados e difíceis de manusear do ponto de vista ergonómico (Haimer, 2013; Sandvik Coromant, 2005).

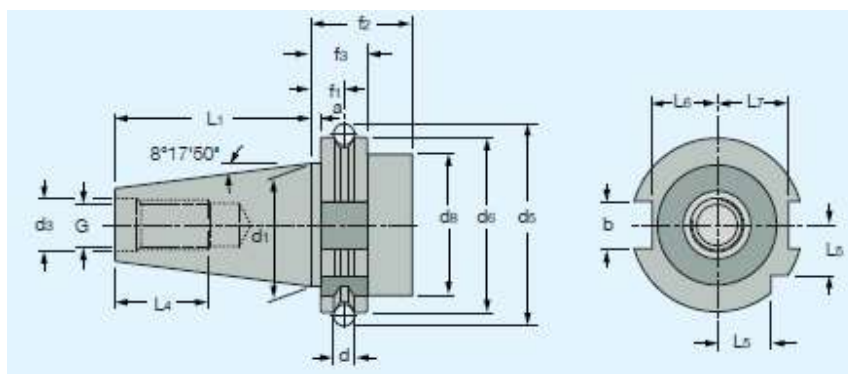


Figura 4 – Cone do tipo SK (Link spa, 2019)

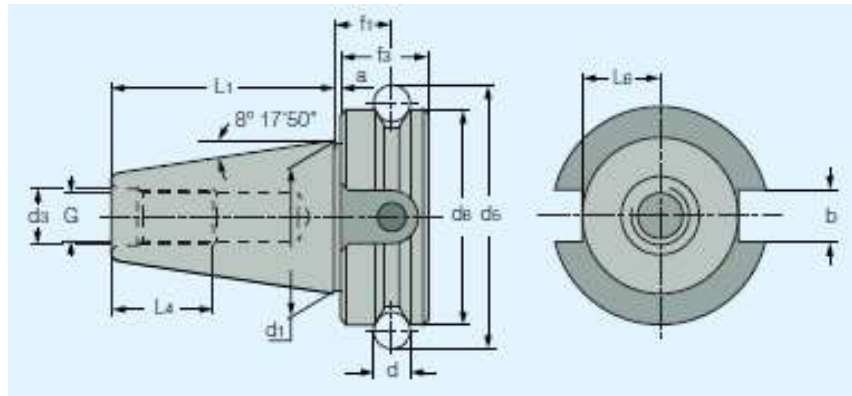


Figura 5 – Cone do tipo BT (Link spa, 2019)

Atualmente, os cones do tipo HSK – Norma DIN 69893, Figura 6, estão a tornar-se o novo padrão de suportes nos centros de maquinagem. A montagem é feita pelo cone com flange, que garante um centramento altamente preciso e uma posição axial entre o suporte e o fuso, garantindo a fixação com elevada repetibilidade durante as trocas de ferramentas. Estes cones são os mais recomendados para maquinagem a alta velocidade (Haimer, 2013).

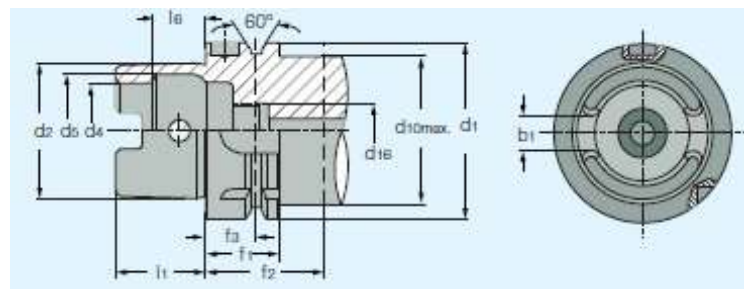


Figura 6 – Cone do tipo HSK (Link spa, 2019)

2.2.3.2 Interface porta-ferramentas – ferramenta

A geometria da ferramenta e o tipo de operação a utilizar são os fatores determinantes na seleção do porta-ferramentas. Para a fresagem de topo, destacam-se os porta-pinças, cones térmicos e cones hidráulicos.

2.2.3.2.1 Porta pinças

O sistema de pinças ER foi desenvolvido e patenteado pela Rego-Fix em 1973 e normalizado pela norma DIN 6499. É o sistema mais utilizado em todo o mundo e disponível em vários fabricantes. Os tamanhos normalizados variam entre o ER-8, aperto mínimo 0,5 mm, e o ER-50, aperto máximo 34 mm. Este equipamento é composto por três partes, conforme Figura 7.

A pinça é escolhida em função do diâmetro do encabadouro da ferramenta, e apertada, juntamente com a porca de bloqueio no porta-pinças. O aperto da porca de bloqueio leva a que os rasgos da pinça encolham, comprimindo assim a ferramenta. Outras empresas também possuem *designs* de pinças patenteadas que permitem batimento radial e aperto melhorados, aperto de ferramentas com diâmetro maior e estanquicidade (essenciais para ferramentas com refrigeração interna) (Stephenson & dan Agapiou, 2016).

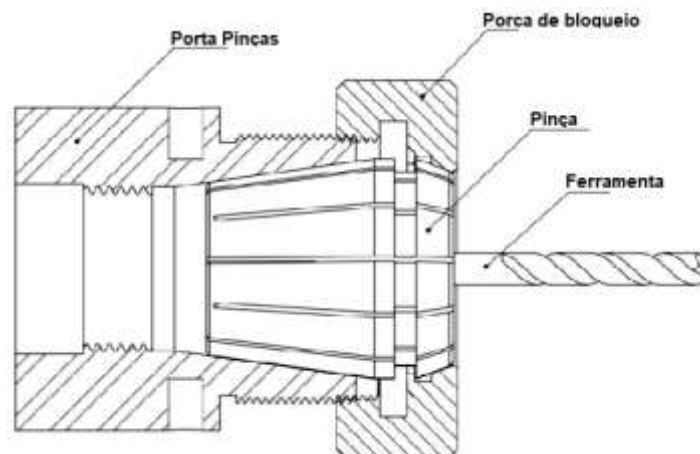


Figura 7 – Esquema de montagem por pinça tipo ER (Stephenson & dan Agapiou, 2016)

2.2.3.2.2 Cones hidráulicos

Nas ferramentas de aperto hidráulico, Figura 8, a parede interior do cone expande e contrai com aplicação de uma pressão hidráulica. A rotação do parafuso atuador no corpo do suporte atua um pistão que força o fluido hidráulico até à manga expansora a pressão de 70-140 MPa. Esta pressão segura a ferramenta de corte de maneira uniforme em toda a área de contacto, permitindo uma concentricidade muito boa (≤ 0.005 mm) e repetibilidade muito alta (≤ 0.0013 mm). Tal como nos Porta-Pinças, uma pinça redutora pode ser utilizada para trabalhar com ferramentas de corte de diferentes diâmetros. A contração nestes suportes é muito baixa. Por exemplo, num cone hidráulico de $\varnothing 25$ mm, a contração é de 0.01-0.03 mm, pelo que é recomendado que os encabadouros das ferramentas de corte apertadas sejam de tolerância dimensional *h6* (Stephenson & dan Agapiou, 2016).

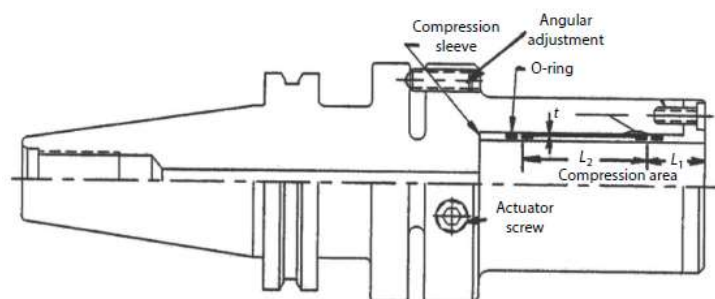


Figura 8 – Cone Hidráulico (Stephenson & dan Agapiou, 2016)

2.2.3.2.3 Cones térmicos

Utilizados essencialmente com ferramentas de metal duro integral, os cones térmicos são uma tecnologia cada vez mais utilizada, principalmente na indústria de maquinagem de moldes. O diâmetro do furo do cone é projetado para que, à temperatura ambiente, tenha um diâmetro ligeiramente inferior ao do encabadouro da ferramenta. Ao ser aquecido por indução, o orifício do cone dilata, permitindo o encaixe da ferramenta de corte. Quando este volta à temperatura ambiente, a interferência dimensional cria uma pressão de contacto que bloqueia a ferramenta no respetivo suporte.

Dos apertos anteriormente mencionados, este é o que consegue garantir menor excentricidades e maior rigidez, cruciais na longevidade da ferramenta (Stephenson & dan Agapiou, 2016).

2.2.4 Fluídos de corte

A correta escolha e aplicação dos fluídos de corte na maquinagem é fundamental. Estes permitem redução de custos, através da utilização de maiores velocidades de corte, avanços e profundidades, aumentam a vida da ferramenta, melhoram o acabamento superficial, diminuem o esforço e corrosão da máquina, e contribuem para obtenção de tolerâncias dimensionais mais rigorosas (Fuchs, 2016).

Os fluídos de corte dividem-se em três grupos principais (El Baradie, 1996):

- **Óleos de corte puros** - Óleos utilizados em processos onde, devido às elevadas pressões entre a ferramenta e a peça, é necessária excelente lubrificação, como a furação profunda, mandrilamento e talhagem de engrenagens. São constituídos essencialmente por óleos minerais, óleos vegetais e aditivos. Apesar das suas excelentes capacidades de lubrificação, não permitem um arrefecimento muito eficaz do corte. Estes lubrificantes não carecem de grandes manutenções, apenas filtragens regulares para evitar a perda de capacidades dos mesmos.
- **Emulsões de óleo** - Óleos que se emulsionam em água, devido à adição de agentes na mistura que dispersão o óleo em micro gotículas. Estes fluídos são utilizados para maquinagem a altas velocidades, devido às excelentes capacidades de dissipação térmica, o que leva à minimização de empenos nas peças trabalhadas. A diluição destes óleos é determinada pelos fabricantes em função dos tipos de trabalhos a realizar. O arrefecimento com as emulsões provoca alguma evaporação da água, devido as temperaturas geradas pela maquinagem. Como tal, é necessário o controlo da concentração de óleo, que geralmente é efetuada por refratómetros, de modo a não prejudicar a operação da máquina. Além dos aditivos, também usados nos óleos de corte

puros, as emulsões necessitam de agentes biocidas para eliminar os microrganismos presentes na água e que podem ser propulsores de contaminações perigosas para a máquina e operadores.

- **Gases** - A utilização de gases na maquinagem é importante, sobretudo quando o consumidor final não permite a utilização de óleos no processo produtivo, como por exemplo na indústria alimentar, onde apenas são permitidos óleos *Food Grade*, ou de forma a evitar o choque térmico na ferramenta, em operações onde é gerado muito calor. Tal como nos outros fluídos de corte, os gases promovem o arrefecimento e a remoção das aparas da superfície a ser maquinada. Em casos mais específicos, o ar pode ser substituído por Árgon, Azoto ou Hélio, de modo a evitar a oxidação das peças.

2.2.5 Ferramentas de Fresagem

Antes de se efetuar um trabalho de fresagem, devem ser determinados quais os tipos de ferramenta a utilizar e parâmetros de maquinagem que permitam um curto tempo de fabrico e longevidade da ferramenta.

Para se determinar quais as ferramentas a serem utilizadas, consideram-se (Chiaverini, 1986):

- As especificações da máquina;
- Tipo de fixação da ferramenta;
- Material a ser trabalhado;
- Tipo de operação;
- Acabamento pretendido;
- Utilização ou não de fluido de corte, e tipo de lubrificação;
- Orçamento disponível.

A Figura 9 e Tabela 3 enunciam os parâmetros geométricos a ter em consideração numa fresa de topo.

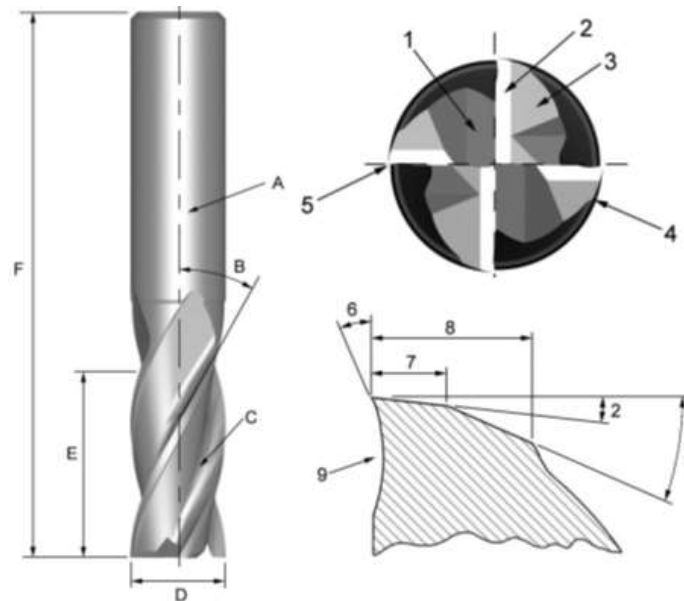










Figura 9 - Parâmetros geométricos e nomenclatura numa fresa de topo (Dormer, 2010)

Tabela 3 - Parâmetros geométricos e nomenclatura numa fresa de topo (Dormer, 2010)

Ref	Descrição	Ref	Descrição
A	Encabadouro	1	Folga da aresta de corte
B	Ângulo da lâmina	2	Ângulo de folga primário
C	Lâmina de corte	3	Ângulo de folga secundário
D	Diâmetro de corte	4	Face de folga lateral
E	Comprimento útil	5	Aresta de corte
F	Comprimento total	6	Ângulo de ataque
		7	Largura da folga primário
		8	Largura da folga secundário
		9	Flanco de corte

As ferramentas de fresagem estão disponíveis em diversas formas, Tabela 4, e tamanhos. Existem também diversos tipos de revestimentos, bem como, ângulos de ataque e número de lâminas.

Tabela 4 - Geometrias de fresas mais comuns (Dormer, 2010)

Fresas periféricas e faciais			
Fresas de Topo e Radial	Fresas de Disco	Fresas de Perfil	
			
Possuem arestas cortantes periféricas e mais arestas cortantes numa face, com rasgo de chaveta para fixação no suporte.	Possuem arestas de corte nos lados e também na periferia. As arestas de corte são alternadas, de modo a que cada uma corte alternadamente um lado do rasgo. Isto permite que sejam feitos cortes profundos e pesados.	Nas fresas de perfil, as arestas de corte periféricas localizam-se num cone e não num cilindro. Pode ser originado um ângulo simples ou duplo.	
Fresas de Topo			
Fresas de Topo	Fresas Esféricas	Fresas Cilíndricas	Micro-Fresas
			
Fresas de topo, têm um ângulo reto na extremidade da fresa.	A forma nos extremos das fresas é uma semiesfera.	Fresas de topo que possuem um pequeno raio na extremidade.	Fresas de topo com diâmetro de corte de até 1 mm.

Atualmente, as ferramentas utilizadas na fresagem são, na sua maioria, construídas em Metal Duro (HM) ou Aço Rápido (HSS), podendo depois serem aplicados revestimentos sobre os mesmos. Os requisitos desejados das ferramentas de corte são (Silva, 2008a):

- Resistência à compressão;
- Dureza;

- Tenacidade;
- Resistência à flexão;
- Resistência do gume cortante;
- Resistência interna de ligação;
- Resistência a quente;
- Resistência à oxidação;
- Baixa tendência à fusão e caldeamento à temperatura de serviço;
- Resistência à abrasão;
- Boa condutividade térmica e baixa expansão térmica.

A seleção do material, da classe da ferramenta de corte e o seu desempenho, é importante para a seleção correta de cada aplicação. As considerações incluem o material a ser maquinado, tipo de peça e estado de fornecimento, condições de maquinagem e qualidade superficial (Sandvik Coromant, 2010).

Tabela 5 - Classes de ferramentas de corte ISO (MachiningCloud, 2016)

Classe ISO	Material a maquinar	Notas
P	Aço	Aço é o grupo de material mais comum, abrangendo aços não ligados, de alta liga e de fundição. A sua maquinabilidade por norma é boa, mas difere de acordo com a dureza e composição do material.
M	Aço Inoxidável	Aços inoxidáveis são materiais cuja liga tem um teor mínimo de Cr de 12% e contêm outros elementos como Ni e Mo. Este grupo é caracterizado por condições de corte muito diferentes. Todas elas expõem as arestas de corte a elevadas temperaturas, desgaste notável e acumulação de aparas nas arestas.
K	Ferro Fundido (FF)	Ferros Fundidos (FF) é um grupo de matérias caracterizado por gerar aparas curtas. FF Cinzento e FF Maleável apresentam boa maquinabilidade, enquanto outros FF não. Todos os FF contêm Si, que é muito abrasivo para as ferramentas.
N	Não Ferroso	Metais não ferrosos são materiais mais macios como o Alumínio, Cobre, Latão, etc. Alumínio com teores de 13% Si são muito abrasivos. Geralmente, neste grupo são utilizadas elevadas velocidades de corte e é esperada boa duração das ferramentas.
S	Ligas resistentes ao calor e Titânio	Ligas resistentes ao calor incluem um vasto número de materiais baseados em Aços de alta liga, Níquel, Cobalto e Titânio. São de difícil maquinagem, aderem na aresta de corte da ferramenta, geram muito calor e endurecem com o corte, condições estas que conferem às ferramentas pouco tempo de serviço.

H	Aço Endurecido	Este grupo engloba aços com durezas entre os 45 e 65 HRC e FF com durezas entre 400 e 600 HB. A dureza destes materiais torna-os difíceis de maquinar, geram calor no corte e são abrasivos para a ferramenta.
----------	-----------------------	--

2.2.5.1 Ferramentas de fresagem – Materiais

Os materiais utilizados nas ferramentas de corte foram evoluindo ao longo do tempo e, cronologicamente, temos (Sandvik Coromant, 2010; Silva, 2008a):

- **Aço Ferramenta (1868)**
 - Aços com 0.8 – 1.5% C e ligeiros teores de elementos de liga;
 - Baixo custo;
 - Facilidade de afiação;
 - Tratamento térmico relativamente simples;
 - Resistem a temperaturas até 250°C;
 - Usado na maquinagem de aços macios, com velocidade de corte inferior ou igual a 25 m/min;
 - Usado atualmente em brocas para uso doméstico e em ferramentas para carpintaria.
- **Aço Rápido, HSS (1905)**
 - Aços rápidos que contêm combinações com mais de 7% de W, Mo, V e teor de C superior a 0,6%
 - Apresentam melhores capacidades de corte que os Aços Ferramenta
 - Necessitam de Tratamento Térmico complexo;
 - Apresentam dureza compreendida entre 60 e 67 HRC;
 - Atualmente usados nas mais diversas situações:
 - Ferramentas para desbaste e acabamento;
 - Machos e caçonetes;
 - Brocas;
 - Mandris e escareadores;
 - A nomenclatura do HSS está descrita na Tabela 6.

Tabela 6 - Nomenclatura dos Aços Rápidos segundo a ISO 11054 (ISO, 2006)

Processo de produção	Designação	Classe de composição química
Aços Rápidos convencionais	HSS	Aço Rápido contendo menos de 4,5% Co e menos de 2,6% V
	HSS-E	Aço Rápido contendo pelo menos 4,5% Co e pelo menos 2,6% V
Aços Rápidos de pulverometalurgia	HSS-PM	Aço Rápido contendo menos de 4,5% Co e menos de 2,6%V

HSS-E-PM

Aço Rápido contendo pelo menos 4,5%
Co e pelo menos 2,6% V

- *Stellite*, ligas fundidas (1910)
 - Composição típica: 3% Fe + 17% W + 33% Cr e 44% Co;
 - Raramente utilizado em ferramentas com geometria perfeitamente definida;
 - Muito utilizado como abrasivo;
 - Resistem a temperaturas até 700 – 800°C;
- Metal Duro (1927)
 - Composição típica: 81% W + 6% C + 13% Co;
 - Resistem a cerca de 1000°C;
 - Possuem dureza equivalente à apresentada pelos aços rápidos, à temperatura ambiente;
 - Possibilita maiores velocidades de corte do que as ferramentas de aço rápido ou de ligas fundidas;
 - Possibilita um ganho, em termos de vida da ferramenta, na ordem dos 200% a 400%, relativamente às ferramentas de aço rápido;
 - Alta resistência de ligação interna (gume cortante);
 - Possibilidade de difusão a altas temperaturas (<Vc).

O Metal duro é obtido através da metalurgia em pó de um composto de carboneto e metal ligante, geralmente o Co, que são misturados e sinterizados. O carboneto mais utilizado é o carboneto de tungstênio (WC), que contribui para o endurecimento do material. A adição de carboneto de tântalo (TaC), carboneto de titânio (TiC) e carboneto de nióbio (NbC), complementam o WC e ajustam as propriedades do material. O metal duro é assim caracterizado pela alta dureza, alta resistência à abrasão, alta resistência à compressão, mas resistência à flexão e tenacidade limitadas (Mitsubishi Materials, 2001). A Tabela 7 compara especificações do HM e HSS.

Tabela 7 - Propriedades HSS e HM (Dormer, 2010)

Propriedades	HSS	HM
Dureza (HV30)	800-950	1300-1800
Densidade (g/cm ³)	8,0-9,0	7,2-15
Resistência à compressão (MPa)	3000-4000	3000-8000
Resistência à flexão (MPa)	2500-4000	1000-4700
Temperatura limite de trabalho (°C)	550	1000
Modulo de elasticidade (GPa)	260-300	460-630
Tamanho de grão (µm)	-	0,2-10

- Cerâmicas (1938)
 - Cerâmicas com base em Óxidos
 - Tradicional - cerâmica óxido branca;
 - Al_2O_3 + Óxido de Zircônio finamente distribuído;
 - Torneamento de desbaste e acabamento de Ferro Fundido Cinzento, Aços cementados, Aços temperados e extrudidos.
 - Cerâmicas Reforçadas
 - Base de Al_2O_3 + 20 a 40 % de *whiskers* de SiC;
 - Whiskers - cristais unitários em formas de agulhas com alta resistência mecânica;
 - Melhora a tenacidade (60% maior que cerâmicas mistas) ;
 - Boa resistência a choques térmicos - corte com fluidos.
 - Cerâmicas Mistas
 - Base de Al_2O_3 + 5 a 40% de componentes não óxidos (TiC/ TiN) ;
 - Grãos finos \Rightarrow melhor tenacidade, resistência ao desgaste e resistência do gume cortante;
 - Maior dureza que as cerâmicas óxidas, maior resistência a choques térmicos;
 - Torneamento e fresagem leves de Ferro Fundido cinzento;
 - Maquinagem de aços cementados e temperados.
 - Cerâmicas sem Óxidos - Cerâmicas de Nitreto de Silício
 - Si_3N_4 + Aditivos Sinterizados;
 - Si_3N_4 + Sialon + Aditivos Sinterizados;
 - Si_3N_4 + Metal Duro + Aditivos Sinterizados.

As ferramentas cerâmicas são ferramentas de corte que possuem excelente resistência ao desgaste mesmo utilizando altas velocidades de corte e temperaturas, resultantes do atrito, conforme pode ser visto na Figura 10. Este material é obtido através da sinterização de carbonetos em pó. Por norma, estes materiais só são utilizados sob a forma de insertos.

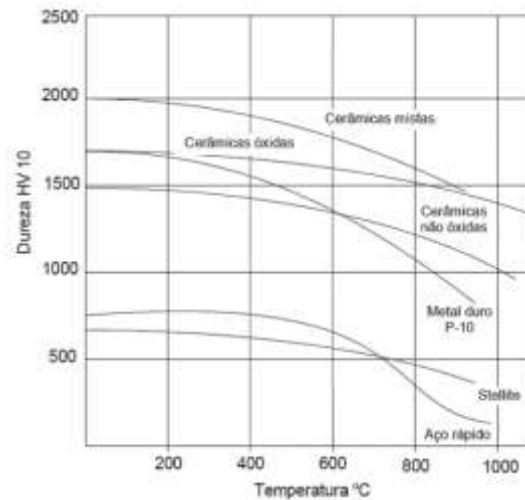


Figura 10 - Variação da dureza em função da temperatura de materiais para ferramentas (Silva, 2008a)

- Nitreto Cúbico de Boro (anos 50)
 - Excelente dureza a quente e pode ser utilizado com Vc muito altas;
 - Boa tenacidade e resistência a choques térmicos;
 - As classes modernas são compósitos cerâmicos que apresentam um teor de Nitreto Cúbico de Boro (CBN) 40-65%. O ligante cerâmico é que confere a resistência ao desgaste químico do CBN;
 - Outras classes com teores de CBN entre 85-100% podem apresentar um ligante metálico para melhorar a tenacidade.
- Diamante Mono e Policristalino (anos 70)
 - O Diamante Policristalino (PCD) é um compósito de partículas de diamante sintetizado com um ligante metálico;
 - O diamante é o mais duro e, portanto, o mais resistente à abrasão dos materiais;
 - Tem boa resistência ao desgaste, porém falta de estabilidade química a altas temperaturas;
 - As ferramentas PCD são limitadas a materiais não ferrosos, porque estes se difundem-se com o ferro a altas temperaturas.

2.2.5.2 Ferramentas de fresagem – Revestimentos

A aplicação de revestimentos duros na indústria metalomecânica tem um papel fundamental na redução de desgaste de ferramentas de corte, conformação, injeção, entre outras. Estes revestimentos podem ser aplicados por processos de Deposição por Vapor Químico, CVD, e Deposição Física de Vapor, PVD (Baptista *et al.*, 2018a).

Os revestimentos CVD foram aplicados pela primeira vez em 1969 sob a forma de TiC. Este revestimento é gerado por reações químicas a temperaturas de 700-1050°C. Esta

técnica evoluiu para os revestimentos multicamada, onde cada camada desempenha uma função específica, Figura 11.

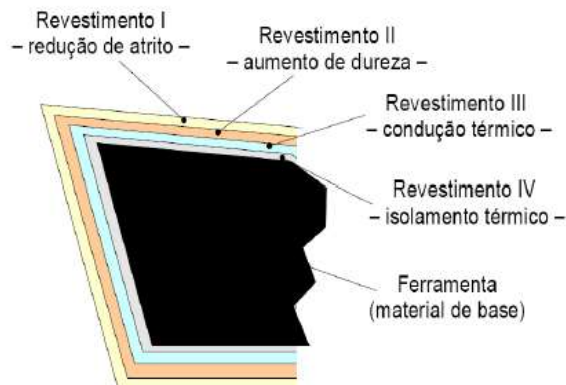


Figura 11 - Exemplo de revestimento multicamada (Silva, 2008b)

As modernas coberturas CVD combinam TiC, Al₂O₃ e TiN. As propriedades da cobertura foram melhoradas continuamente quanto à adesão, tenacidade e desgaste, em virtude de otimizações e posteriores tratamentos microestruturais. As ferramentas com revestimento CVD são a primeira escolha numa ampla variedade de aplicações, onde é importante a resistência ao desgaste. Tais aplicações são encontradas nas classes ISO P, ISO M e ISO K (Sandvik Coromant, 2010).

Os revestimentos realizados por deposição física em fase de vapor, PVD, são obtidos a temperaturas mais baixas, 400-600°C. A sua aplicação data dos anos 80, e o processo envolve a evaporação de um metal que reage com um gás para formar uma cobertura dura na superfície da ferramenta de corte. Estes revestimentos possuem elevada resistência ao desgaste, devido à sua elevada dureza e as tensões de compressão nesse revestimento agregam tenacidade à aresta e resistência contra a fissuração térmica. As ferramentas com revestimento PVD são recomendadas para arestas de corte tenazes e afiadas, bem como para materiais com tendência à abrasão (Sandvik Coromant, 2010).

Os métodos mais comuns para aplicação de revestimentos PVD em ferramenta são (Baptista *et al.*, 2018b):

- Evaporação, Figura 12(a) – O reator utilizado necessita de alto vácuo. Por norma, esta técnica apresenta menor energia atômica e menor absorção de gases na deposição do revestimento. Como resultado, a transferência de partículas com grãos maiores provoca menor adesão das mesmas ao substrato, comparativamente ao *Sputtering*. Durante a deposição, alguns contaminantes são libertados do revestimento, que poderiam aderir ao substrato, prejudicando a pureza do revestimento. Este tipo de aplicação é preferido para filmes mais espessos e revestimentos de menor rigor morfológico. A técnica apresenta taxas de deposição mais elevadas que as do *Sputtering*;

- *Sputtering*, Figura 12(b) - Alternativa para aplicações onde a elevada qualidade morfológica, tamanho de grão, estequiometria, rugosidade e outros requisitos, prevalecem sobre a taxa de deposição. O *stress* induzido pelo arrefecimento condiciona a aplicação deste processo.

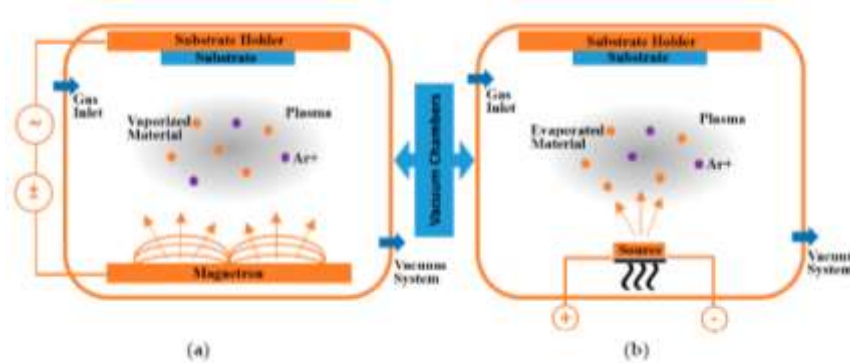


Figura 12 - Esquema de deposição PVD, (a) sputtering, (b) evaporação (Baptista *et al.*, 2018)

Os revestimentos mais comuns são (Daggett, 2005):

- Nitreto de titânio (TiN) – revestimento monocamada, aplicado por PVD, de uso geral, que aumenta a dureza e tem uma alta temperatura de oxidação. Geralmente é aplicado a ferramentas HSS, apresentando boa capacidade de corte;
- Carbonitreto de titânio (TiCN) – a adição de carbono proporciona mais dureza e melhor lubrificidade superficial. Este revestimento multicamada é ideal para ferramentas em HSS;
- Nitreto de titânio-alumínio (AlTiN) – a camada formada de óxido de alumínio garante maior resistência em aplicações de alta temperatura. Este revestimento é escolhido principalmente para ferramentas de HM, onde pouco ou nenhum lubrificante é usado.
- Nitreto de Crómio (CrN) – As propriedades anti-gripagem deste revestimento, fazem dele a escolha ideal em situações onde é comum a adesão de material nas arestas. Ferramentas de HSS e HM apresentam-se, muitas vezes, com este revestimento;
- Diamante – é o revestimento, aplicado através de CVD, que apresenta o melhor desempenho no mercado, em materiais não ferrosos. É ideal para corte de grafite, compósitos de matriz metálica, alumínio com elevado teor de Si e muitos outros materiais abrasivos.

Um exemplo da aplicação de revestimentos na conformação metálica é o caso da estampagem. No estudo *Increasing the stamping tools lifespan by using Mo and B₄C PVD coatings* (Fernandes *et al.*, 2017), foram aplicados sobre ferramentas que efetuavam estampagens, revestimentos de Mo e B₄C por PVD. O material de base da

ferramenta era AISI D2 e o material estampado folha de Flandres. Estes revestimentos mostraram ser eficazes na minimização do desgaste e adesão do estanho à ferramenta. Contudo, destaca-se o revestimento por Mo, que, embora tendo uma dureza inferior ao B₄C, é menos frágil e apresenta menor coeficiente de atrito (Fernandes *et al.*, 2017).

Também na indústria dos polímeros os revestimentos têm proporcionado melhorias nos processos de injeção. A adição de reforços ao plástico, por exemplo, a fibra de vidro, causa elevado desgaste nos moldes, o que tem levado ao estudo e aplicação de novas tecnologias neste setor. O trabalho *Improving the Wear Resistance of Moulds for the Injection of Glass Fibre-Reinforced Plastics Using PVD Coatings: A Comparative Study* (Silva *et al.*, 2017), compara quatro revestimentos diferentes, aplicados em moldes maquinados em AISI P20. Os resultados deste estudo estão apresentados na Tabela 8. O revestimento CrN/TiAlCrSiN provou ser o mais eficaz no molde de injeção, uma vez que aumentou a vida útil da ferramenta em 65,5 vezes face ao molde não revestido.

Tabela 8 - Resultados de *Improving the Wear Resistance of Moulds for the Injection of Glass Fibre-Reinforced Plastics Using PVD Coatings: A Comparative Study* (Silva *et al.*, 2017)

Revestimento	Dureza (GPa)	Revestido vs. Não revestido
TiAlN	22,7 ± 1,2	30,8 x
TiAlSiN	21,8 ± 1,8	25,0 x
CrN/ TiAlCrSiN	30,9 ± 2,1	65,5 x
CrN/CrCN/DLC	19,2 ± 1,1	58,2 x

O foco no desenvolvimento e aplicação de revestimentos em ferramentas de corte é a proteção contra o desgaste por abrasão e adesão, mesmo a altas temperaturas. As solicitações ao composto (material + revestimento) são especialmente intensificadas pelas cargas cíclicas que ocorrem com o corte interrompido, que podem levar ao surgimento de fissuras de origem mecânica ou térmica (Baptista *et al.*, 2018a).

Resumindo, as principais funções dos revestimentos nas ferramentas são (Silva, 2008b):

- Proteção do material de base da ferramenta;
- Redução de atrito na interface apara/ferramenta;
- Aumento da dureza na interface apara/ferramenta;
- Condução rápida de calor para longe da região de corte;
- Isolamento térmico do material de base da ferramenta.

De modo a atingir elevadas produtividades e precisão, 80% das ferramentas de corte utilizadas atualmente são revestidas (Sokovic 2007; Dobranzanski *et al.* 2009). Num

estudo publicado na revista *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Comparative study of PVD and CVD cutting tools performance in milling of duplex stainless steel*, foi concluído que na maquinagem de um inoxidável duplex, a escolha de um revestimento CVD multicamada (TiN/TiCN/Al₂O₃) apresenta maior resistência ao desgaste em relação a um revestimento PVD monocamada (AlTiN). As ferramentas revestidas por PVD produzem superfícies maquinadas com menor rugosidade, sendo estas preferidas para operações de acabamento (Martinho *et al.*, 2019).

Outro trabalho, publicado em 2013, *Study of PVD AlCrN Coating for Reducing Carbide Cutting Tool Deterioration in the Machining of Titanium Alloys*, referencia a influência de um tratamento térmico no revestimento de uma ferramenta para otimização das suas propriedades. Nesse estudo, ferramentas de HM revestidas por PVD com AlCrN-T (AlCrN tratado termicamente) foram sujeitas a uma temperatura de 500 °C durante 4 horas numa atmosfera inerte. A finalidade deste tratamento foi a formação e crescimento dos precipitados de AlN e eliminação de fases amorfas formadas durante o revestimento, melhorando também a adesão do revestimento ao substrato da ferramenta. Uma das vantagens obtidas é a notável redução do coeficiente de atrito do revestimento, conforme os valores visíveis na Figura 13 (Cadena *et al.*, 2013).

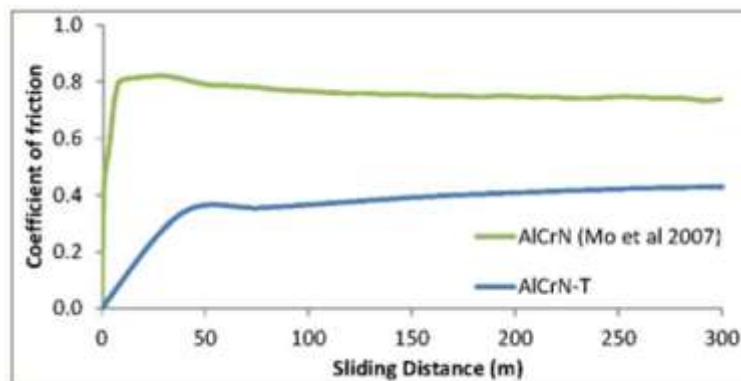


Figura 13 - Coeficiente de atrito de AlCrN e AlCrN-T aplicando uma carga de 1N (Cadena *et al.*, 2013)

Os comuns revestimentos TiN, TiCN e TiAlN, são baseados em titânio. A presença de alumínio protege os revestimentos do calor gerado no corte, enquanto o AlTiN consegue manter a resistência ao desgaste, baixo atrito e condutividade térmica a altas temperaturas. Noutros revestimentos, estas propriedades degradam-se. As propriedades conferidas pelo alumínio levaram a que os investigadores aumentassem o seu conteúdo nos revestimentos, só que tal é impossível nos revestimentos baseados em titânio, uma vez que a sua estrutura cristalina pode alterar-se. Os revestimentos baseados em cromo como o AlCrN, conseguem suportar mais alumínio sem que a estrutura seja modificada, tornando este mais favorável na maquinagem de ligas de baixa maquinabilidade e mais tenazes, como é o caso do Duplex 2205 (Kumar *et al.*, 2014).

2.3 Análise do comportamento de ferramentas

Os mecanismos de desgaste e falha de uma ferramenta têm um elevado interesse prático, por afetarem os custos e qualidades da maquinagem. Ferramentas que apresentam um desgaste lento, têm uma vida útil mais longa e previsível, resultando em menos custos de produção e qualidades dimensionais e superficiais mais consistentes. Ferramentas que apresentam desgaste rápido e imprevisível, aumentam os custos e desperdícios de maquinagem. Por estes motivos, a vida útil de uma ferramenta, é o critério mais utilizado para classificar a *performance* do corte e maquinabilidade do material (Stephenson & Agapiou, 2016).

A vida de uma ferramenta pode ser definida como o tempo efetivo de trabalho sem perder a capacidade corte, ou até que a mesma atinja o critério de fim de vida.

São vários os critérios de fim de vida, dentre eles podem citar-se os seguintes (Silva, 2008c):

- Tempo total de trabalho;
- Percurso de corte;
- Percurso de avanço;
- Volume de material removido;
- Número de peças produzidas;
- Desgaste da ferramenta.

O percurso de corte estabelecido através da vida útil da ferramenta (t), em minutos, pode ser expresso pela equação (ISO, 1989):

$$L_c = V_c \times \frac{t}{1000} \quad (10)$$

Onde L_c – Percurso de corte (mm) e V_c – Velocidade de corte (m/min) (ISO, 1989).

O percurso de avanço para uma vida da ferramenta, pode ser expresso por:

$$L_f = f \times n \times t \quad (11)$$

Onde n – rotação da ferramenta (rpm), t – tempo (s) e f – avanço por rotação (mm/rot).

A avaliação do desgaste da ferramenta pode ser feita através de:

- Métodos diretos – a geometria da ferramenta é verificada e medida por inspeção visual, a olho nu ou com recurso a lupas óticas ou microscopia;

- Métodos indiretos – utiliza-se a aquisição de valores medidos durante a maquinagem, como vibrações, ruído, forças de corte, cor da apara e diminuição da qualidade superficial e dimensional.

2.3.1 Desgaste nas arestas das ferramentas

Os principais tipos de desgaste, classificados de acordo com a zona que afetam, podem ser observados e descritos na Figura 14 e Tabela 9 respetivamente. Os fenómenos de desgaste ocorrem tanto na face de ataque da ferramenta, como nas zonas de folga (Stephenson & Agapiou, 2016).

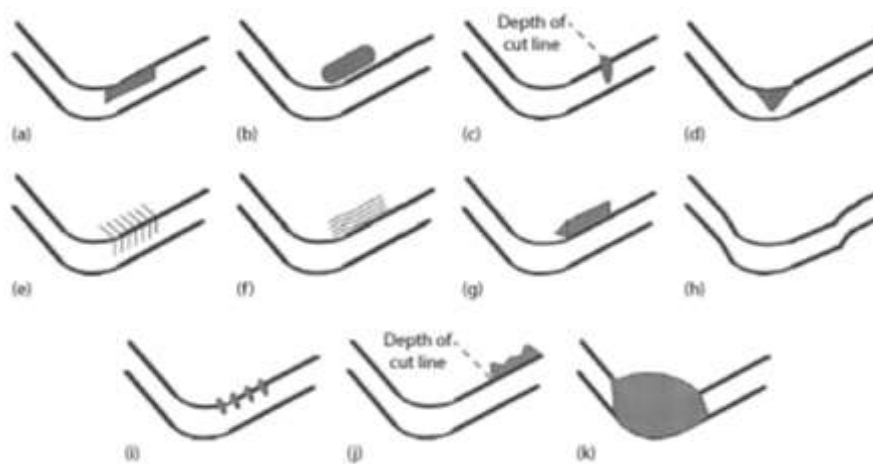


Figura 14 - Tipos de desgaste em ferramentas (Stephenson & Agapiou, 2016)

Tabela 9 - Tipos de desgaste, mecanismos, características e possíveis soluções em ferramentas
(Stephenson & Agapiou, 2016)

Tipo de desgaste	Mecanismo	Características	Possíveis soluções
Desgaste de flanco (a)	Abrasão	Marca de desgaste uniforme	Utilizar substrato de ferramenta mais duro
			Utilizar ferramentas revestidas
			Filtrar o fluido de corte
			Limpar a peça
			Alterar a microestrutura da peça
			Reduzir avanço
	Amolecimento térmico		Reduzir velocidade de corte
	Corte fora de centro	Fraco acabamento	Calibrar altura da ferramenta (torneamento)
	Deformação da aresta	Aresta deformada	Mencionado abaixo "Tipo de desgaste – deformação plástica"
	Avanço demasiado lento	Fraco acabamento	Aumentar avanço
Desgaste em cratera (b)	Difusão	Desgaste prematuro	Reduzir velocidade de corte
			Melhorar as condições de lubrificação do corte (direcionar o fluido, aumentar o volume e pressão, se aplicável), verificar a concentração de óleo na emulsão.
			Alterar ferramenta, revestimento ou fluido de corte
			Aumentar avanço
Desgaste por entalhe (c)	Abrasão	Ocorre na superfície de saída da ferramenta	Variar a profundidade de corte
			Utilizar ferramenta mais dura
			Aumentar ângulo de ataque

	Oxidação	Descoloração	Trocar fluido de corte Reduzir velocidade de corte
			Trocar de material da ferramenta ou revestimento
Desgaste no raio de ponta (d)	Abrasão	Marca de desgaste grosseira, não uniforme	Reduzir avanço Utilizar ferramenta mais dura Aumentar raio de ponta
Fissura da aresta	Fadiga térmica (e)	Fissuras perpendiculares à aresta	Reduzir velocidade de corte Maquinar a seco Utilizar ferramenta mais robusta
	Fadiga mecânica (f)	Fissuras paralelas à aresta	Reduzir avanço Utilizar ferramenta mais robusta
Aresta postiça (g)	Adesão	Mau acabamento superficial	Aumentar velocidade de corte Aumentar ângulo de ataque Melhorar as capacidades de lubrificação do corte
Deformação plástica (h)	Sobrecarga Amolecimento térmico	Ocorre precocemente	Reduzir avanço Utilizar uma ferramenta de substrato mais duro Reduzir velocidade de corte Utilizar ferramentas com revestimentos de baixo atrito Aumentar volume e pressão do fluido de corte
Quebra da aresta (i)	Abrasão		Inspeccionar o material da peça (presença de impurezas) Reduzir avanço Usar gumes robustos

			Utilizar ferramenta mais robusta
	Quebra apara não apropriado		Aumentar a largura de suporte do quebra apara
	Vibração	Ruído intenso	Melhorar o aperto do material e ferramenta
			Utilizar ferramenta mais robusta
			Usar gumes robustos
			Reduzir profundidade de corte
	Fluído de corte intermitente		Aumentar caudal do fluído de corte ou trabalhar a seco
	Mau apoio da ferramenta		Verificar o estado do porta ferramenta e se necessário substituí-lo
	Adesão	Formação de aresta postiça	Mencionado acima "Tipo de desgaste – Aresta postiça"
Encravamento da apara (j)	Saída da apara incorreta	Danos causados longe da aresta de corte	Modificar o ângulo de ataque e quebra apara
			Alterar o raio de ponta da ferramenta
Fratura da ferramenta (k)	Sobrecarga	Ocorre precocemente	Usar ferramenta mais robusta
			Aumentar o raio de ponta
			Reduzir avanço
			Usar gumes robustos
			Reduzir profundidade de corte
	Vibração	Ruído intenso	Melhorar o aperto do material e ferramenta
			Utilizar ferramenta mais robusta
			Reduzir profundidade de corte
			Usar gumes robustos
			Diminuir o raio de ponta

O desgaste dos flancos, Figura 15, é o tipo de desgaste mais comum nas ferramentas de corte. Este incide sobretudo nos flancos da ferramenta, causando ainda um ligeiro arredondamento do raio da aresta de corte. Este tipo de desgaste resulta da fricção entre a ferramenta e o material da peça, antes e depois da formação da apana, conduz a um decréscimo da qualidade superficial e precisão dimensional obtida na maquinagem. O desgaste dos flancos também provoca um aumento das forças de corte (Silva, 2008b).



Figura 15 - Desgaste de flanco (Sandvik Coromant, 2012)

Em condições normais de funcionamento, o elemento controlador do desgaste da ferramenta, ou o fator que define a vida útil da ferramenta, é o desgaste na face de saída (VB), Figura 16. A Tabela 10 exprime valores limite VB em mm para desgaste de flanco de diferentes ferramentas.

Tabela 10 - Valores limite (VB) recomendados na prática para diferentes materiais de ferramenta. Silva, 2008b)

Operação	Material da ferramenta				
	HSS	HM	HM revestido	Cerâmicos	
				Al ₂ O ₃	Si ₃ N ₄
Desbaste	0,35-1,0	0,3-0,5	0,3-0,5	0,25-0,3	0,25-0,5
VBmáx	0,4-1,4	0,5-0,8	0,4-0,7	-	-
Acabamento	0,2-0,3	0,1-0,25	0,1-0,25	0,1-0,2	0,1-0,2

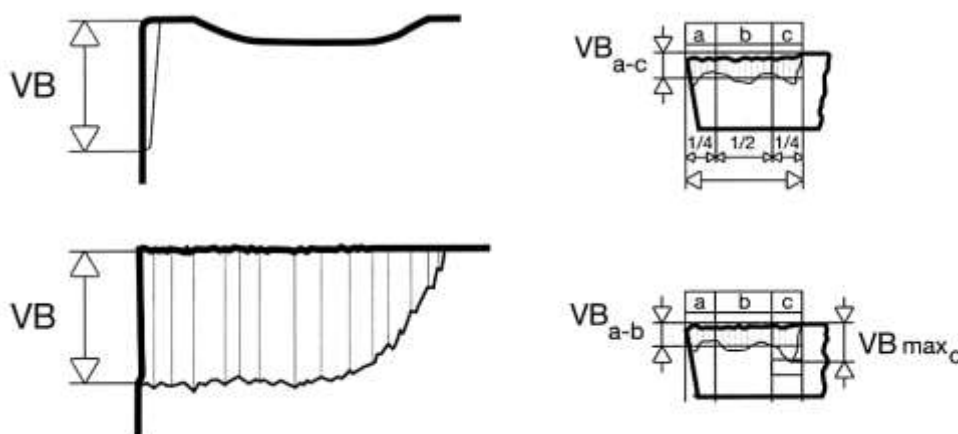


Figura 16 - Medição do desgaste dos flancos – VB (Silva, 2008b)

O desgaste em cratera acontece essencialmente na face de ataque da ferramenta. A cratera, visível na Figura 17, é gerada devido ao desprendimento de material da ferramenta. A alteração da morfologia da ferramenta pode alterar o sistema das forças de corte (Silva, 2008b).



Figura 17 - Desgaste em cratera (Sandvik Coromant, 2012)

O volume aproximado da cratera (v_{cr}), Figura 18, pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$v_{cr} = \frac{2b(KB - KF) \times KT}{3}$$

Em que KB – largura da cratera, KF – distância da aresta à borda da cratera, KT – Profundidade da cratera e b largura de maquinagem (ISO, 1993).

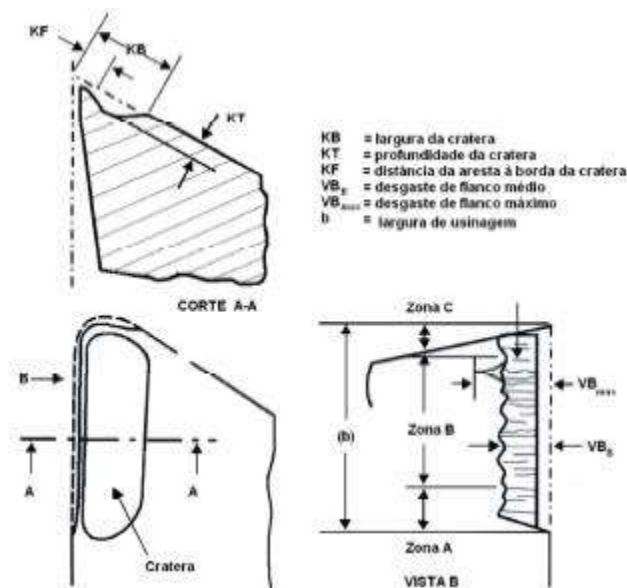


Figura 18 – Medição do desgaste por cratera (ISO, 1993)

O desgaste por entalhe, Figura 19, é um defeito causado por abrasão e oxidação. A profundidade do entalhe corresponde normalmente à profundidade de corte, onde o ar entra em contacto com a face de folga da ferramenta e pode estender-se à restante aresta de corte. Dependendo das dimensões da fratura, esta poderá causar deficiências no acabamento da peça e tirar resistência à ferramenta (Silva, 2008b).



Figura 19 - Desgaste por entalhe (Sandvik Coromant, 2012)

A deformação plástica da aresta de corte, Figura 20, é o resultado da combinação de altas velocidades de corte com elevadas pressões exercidas sobre o gume cortante da ferramenta. Este tipo de desgaste é mais comum na maquinagem de ligas resistentes ao calor e tratadas termicamente, cuja maquinagem gera muito calor e compressão elevada. As alterações morfológicas na ferramenta causadas pela deformação plástica criam por sua vez mais calor no corte, desvio do fluxo da apara e, quando não são detetadas atempadamente, originam falhas catastróficas na ferramenta e, por vezes, no suporte da mesma (Silva, 2008b).



Figura 20 - Deformação plástica numa ferramenta (Sandvik Coromant, 2012)

A fissuração da aresta de corte pode dever-se a fadiga térmica ou fadiga mecânica. Este desgaste é característico de operações de corte interrompido. Na fadiga térmica, o desprendimento das partículas da ferramenta pode originar a destruição do gume e a má utilização de fluído de corte pode ampliar este problema, uma vez que o mesmo vai originar choque térmico na ferramenta. As fissuras causadas por fadiga térmica, Figura 21, têm orientação perpendicular ao longo das arestas de corte. A fadiga mecânica, Figura 22, é característica de utilização de forças de corte excessivas, sendo provocada pela contante variação de carga sobre a ferramenta, não sendo esta suficiente para promover a sua fratura direta. As fissuras causadas pela fadiga mecânica produzem-se principalmente numa direção paralela à aresta de corte (Sandvik Coromant, 2012; Silva, 2008b).



Figura 21 - Fissura por fadiga térmica (Sandvik Coromant, 2012)



Figura 22 - Fissura por fadiga mecânica (Silva, 2008b)

A quebra da aresta de corte, Figura 23, está associada também ao corte interrompido e fenômenos de fadiga, originando a perda de partículas de dimensões consideráveis na aresta de corte. Este desgaste dá-se essencialmente quando a aresta de corte quebra, ao invés de se desgastar. Este fenómeno tem como variantes a microfratura e fratura localizada (Sandvik Coromant, 2012; Silva, 2008b).



Figura 23 - Quebra da aresta (Sandvik Coromant, 2012)

A formação de arestas postiças, Figura 24, está relacionada com a temperatura, velocidade de corte e plasticidade do material da peça a maquinar. Este fenómeno pode ser causado por material da peça que fundiu durante o corte e solidifica na ferramenta ou, no caso de existirem pressões de corte elevadas e temperaturas baixas, a apara pode soldar na face da ferramenta. A maior complicação deste tipo de desgaste é a deterioração do acabamento superficial da peça (Silva, 2008b).



Figura 24 - Formação de aresta postiça (Sandvik Coromant, 2012)

A deterioração excessiva da aresta de corte causada pelos fenômenos de desgaste anteriormente referidos, leva a uma fratura da ferramenta, Figura 25. Este tipo de deterioração excessiva deve ser evitado sempre que possível, uma vez que quase sempre produz consequências nefastas para a ferramenta, suporte e peça. A fratura da ferramenta também pode ser causada por erro humano, mau aperto da peça/ferramenta, erro de cálculos de velocidades e programação (Silva, 2008b).



Figura 25 - Fratura em ferramenta (Silva, 2008b)

Conforme mencionado anteriormente na Tabela 9, os mecanismos de desgaste nas ferramentas são principalmente os seguintes (Silva, 2008b):

- Desgaste por adesão - É caracterizado pela transferência de material da superfície da peça para a ferramenta ou, o inverso, da superfície da ferramenta para a peça. É predominante na face de saída da ferramenta, entre esta e a peça maquinada (quando não ocorre a formação de aresta postiça). Este desgaste, mais comum para velocidades de corte médias e baixas, e a sua intensidade depende da pressão de corte, da afinidade metalúrgica dos materiais em contacto, e da diferença de dureza entre a ferramenta e peça;
- Desgaste por difusão – caracterizado pela transferência de elementos químicos entre as superfícies em contacto no momento do corte. Acontece essencialmente a elevadas velocidades de corte, e a velocidade de difusão cresce exponencialmente com o incremento da temperatura. Afeta sobretudo a face de ataque da ferramenta, criando crateras e, a altas velocidades de corte, também contribui para o desgaste da face de saída da ferramenta;

- Desgaste por abrasão – Resulta da presença e ação de partículas duras entre as duas superfícies, provocando riscos por arrancamento de material. As partículas duras poderão ter origem na libertação de partículas da própria ferramenta, inclusões no material da peça e fragmentos da aresta postiça de corte. Quanto menor for a dureza a quente da ferramenta, maior será o desgaste abrasivo;
- Desgaste por oxidação – Resulta de elevadas temperaturas desenvolvidas durante o processo, e do meio em que decorre a maquinagem. Os óxidos que se formam na superfície são removidos durante o próprio processo de corte. Este fenómeno é observável em locais afastados da zona de corte, e é mais significativo em ferramentas de HSS, embora também possa ocorrer em ferramentas de HM.

A localização dos mecanismos na zona de corte, e a sua ocorrência conforme as velocidades de corte estão, respetivamente, representados na Figura 26 e Figura 27.

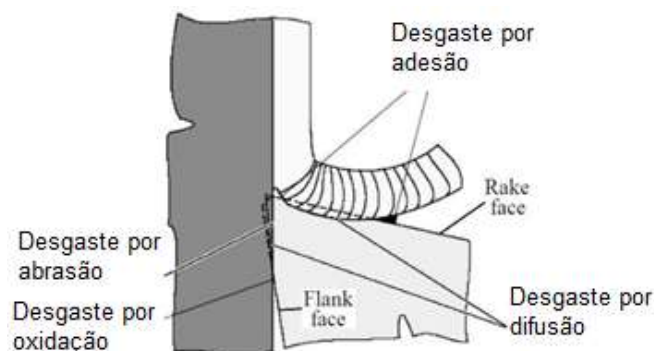


Figura 26 - Localização dos mecanismos de desgaste no corte (Dadic, 2016)

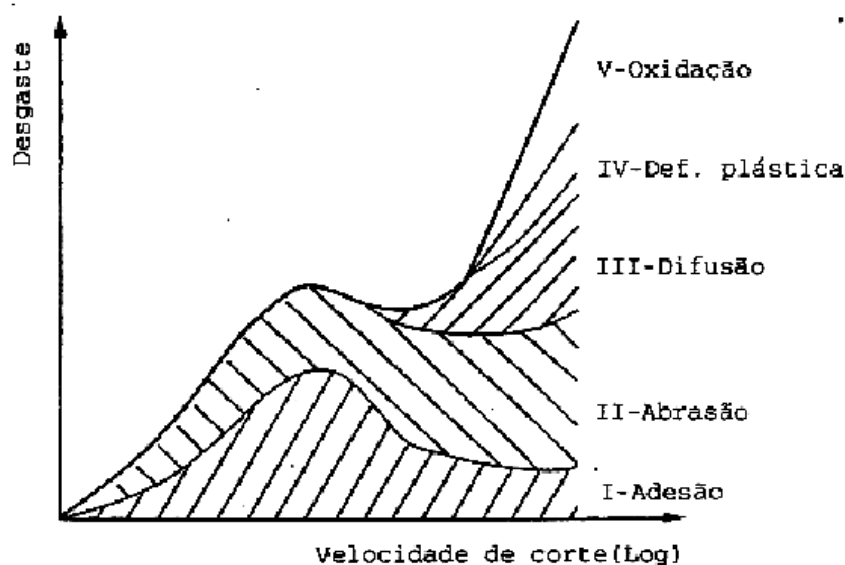


Figura 27 - Mecanismos de desgaste em função da velocidade (Silva, 2008a)

2.3.2 Rugosidade de superfície em maquinagem

Na fresagem, o controlo do acabamento superficial pode ser utilizado como um método indireto de verificação do desgaste da ferramenta. Quando a superfície maquinada se torna mais rugosa e inconsistente, existe alta probabilidade de a ferramenta estar em fim de vida, influenciando a qualidade e custo da maquinagem.

Existem duas formas de acabamento a serem consideradas nas operações de maquinagem. A primeira consiste no acabamento requisitado pelo projeto da peça. Esse acabamento é possível de se obter com recurso a cálculos de velocidade e avanço tendo em consideração o raio de ponta, número de lâminas e ângulos de ataque e folga da ferramenta. O segundo resulta do acabamento natural da ferramenta, quando este não é tido como importante na peça final, por exemplo, acabamento deixado pelas ferramentas de desbaste e furação. Este segundo é muito importante no controlo de desgaste da ferramenta, uma vez que resulta diretamente das condições da ferramenta, dinâmica do corte e condições do material da peça, tais como, impurezas, tensões residuais e formação de rebarbas e arestas postiças (Stephenson & dan Agapiou, 2016).

O acabamento superficial é normalmente medido com recurso a um rugosímetro. O rugosímetro funciona como fonógrafo, uma agulha percorre um segmento reto, predefinido pelo utilizador, sobre a superfície da peça, registando as variações de altura nesse percurso. Muitos parâmetros podem ser obtidos através desta leitura, mas para este estudo destacamos (Morais, 2006):

- Ra – Desvio médio aritmético do perfil de rugosidade, também designado por rugosidade média aritmética, é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas $Z(x)$ num comprimento de base. Este critério é relativamente pouco sensível aos valores acidentais de amplitude máxima, que não têm nenhuma ação funcional, e também a um pico ou vale atípico, ocultando o defeito, mas permite diferenciar diversos perfis de rugosidade característicos. O parâmetro Ra é o mais utilizado em todo o mundo, fundamentalmente:
 - No controlo de um processo produtivo onde podem ocorrer mudanças graduais no acabamento superficial, resultantes do desgaste da ferramenta de corte;
 - Em superfícies em que o acabamento apresenta sulcos das operações de maquinagem bem orientados.
- Rz – Média das alturas máximas do perfil de rugosidade, é a média aritmética das alturas máximas do perfil Z_i , medidas em cinco comprimentos de base consecutivos. O Rz é geralmente mais sensível às mudanças no acabamento superficial do que Ra, sendo um critério útil no controlo de um processo produtivo. Este parâmetro é habitualmente utilizado em:

- Superfícies onde defeitos isolados não têm influência na função da peça a ser controlada;
- Superfícies onde o perfil é periódico e conhecido.
- Rmax - Maior das alturas máximas de perfil verificada no interior de um comprimento de avaliação.

2.3.3 Forças de corte

A força de corte é um parâmetro importante durante a operação de maquinagem. Um conhecimento prévio das forças de corte, esperadas num tipo de operação é crucial, uma vez que permite determinar o tipo de máquina (potência do fuso, binário, energia consumida e tempo de operação) e selecionar o tipo de ferramenta.

O uso de um dinamómetro para obter forças de corte é importante para a garantia de precisão e fiabilidade dos dados obtidos. Os processos de corte são bastante dinâmicos, especialmente em cortes interrompidos. A melhor forma de minimizar os efeitos negativos causados pela estimulação interrompida do dinamómetro é a utilização de piezómetros de alta sensibilidade, que permitem a operação a altas frequências. A utilização destes equipamentos dotados de altas frequências, tornou-se ainda mais importante com os processos de fresagem em alta velocidade. Estas características são fundamentais para um correto ajuste do processo e monitorização do desgaste da ferramenta (Daniyan et al., 2020).

Fenómenos como o desgaste da ferramenta têm efeito direto nas forças de corte. A Figura 28 demonstra duas medições de forças, permitindo concluir que uma ferramenta desgastada aumenta as forças de corte significativamente. A Figura 29 demonstra o quão precisos estes equipamentos conseguem ser. É possível identificar que numa ferramenta de duas arestas cortantes, uma apresenta um desgaste mais significativo, visto que sempre que esta corta o valor da força registado é superior (Blattner, 2016).

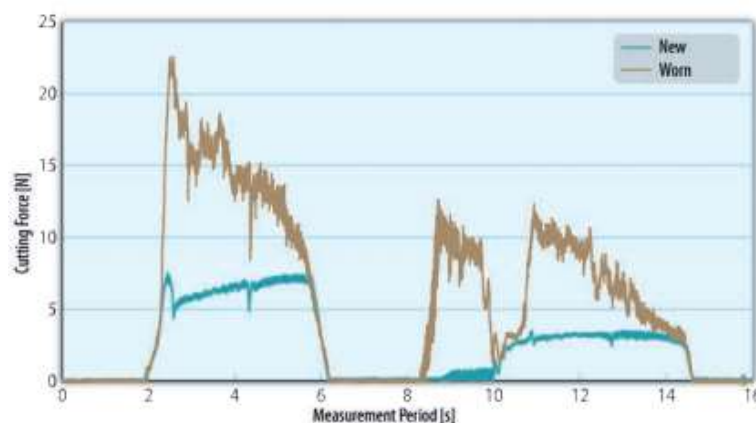


Figura 28 - Registro de forças de corte entre ferramenta nova e ferramenta usada (Blattner, 2016)

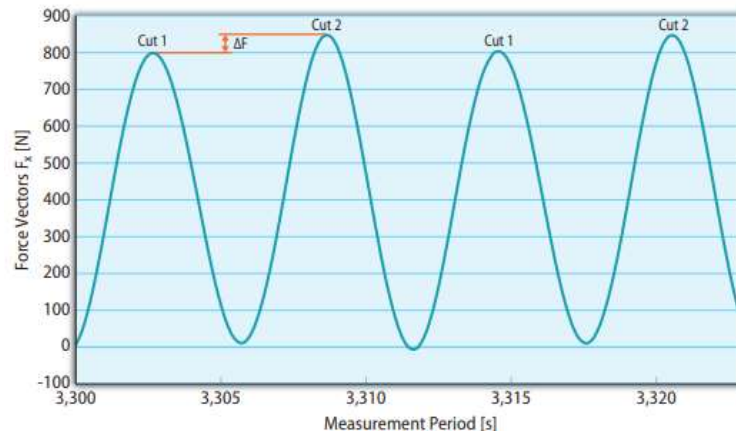


Figura 29 - Medição da força de corte numa ferramenta com duas lâminas (Blattner, 2016)

No mercado, destacam-se dois tipos de dinamómetros, os estacionários e os dinâmicos (Blattner, 2016):

- Dinamómetros estacionários, Figura 30 B – são versáteis e excepcionalmente robustos. Podem ser facilmente montados na mesa do centro de maquinagem, sem que sejam necessárias alterações na mesma. O material é montado diretamente sobre a célula de carga e também podem ser utilizados em torneamento. Fazem leitura das forças nas três direções, F_x , F_y e F_z ;
- Dinamómetros rotacionais, Figura 30 A – medem as forças geradas pela ferramenta e fazem uma leitura imediata e precisa. O dinamómetro é montado diretamente sobre o fuso, e roda juntamente com este. O dinamómetro rotacional possui interface para aperto da ferramenta *standard*, por exemplo, pinças ER ou aperto hidráulico. Além da medição das forças nos três vetores, este equipamento também faz a leitura do binário M_z diretamente.



Figura 30 - A: Dinamómetro rotacional; B: Dinamómetro estacionário

Sendo a velocidade de avanço uma variável a analisar nesta dissertação, é importante referir que o aumento do avanço traduz-se quase sempre numa força de corte superior, uma vez que é removida uma espessura de apara maior. A velocidade de corte

também tem um efeito semelhante nas forças de corte, embora menos significativa (Martinho *et al.*, 2008).

2.4 Maquinagem de aços duplex

Os DSS são, por norma, mais difíceis de maquinar que os austeníticos da série AISI 3XX com resistência à corrosão similar. É necessária maior potência no corte e o desgaste da ferramenta é mais rápido. Esta dificuldade de maquinagem é mais notória nas ferramentas de metal duro. O mesmo está ilustrado no gráfico da Figura 31, onde é comparada a maquinabilidade entre ferramentas de metal duro e aço rápido na maquinagem de aços inoxidáveis duplex e austenítico AISI316. Na Tabela 11, a maquinabilidade dos aços inoxidáveis é comparada com base no aço ao carbono de corte fácil.

Tabela 11 - Índices de maquinabilidade de Aços Inox com base no Aço ao Carbono (British Stainless Steel Association, 2018)

Tipo de aço		Índice de maquinabilidade
Aço Carbono	Corte fácil 1.0736	1.00
Inoxidável Ferrítico	<i>Standard</i> 1.4016 (430)	0.60
Inoxidável Martensítico	Corte fácil 1.4005 (416)	0.95
	<i>Standard</i> 1.4006 (410)	0.50
Inoxidável Duplex	<i>Standard</i> 1.4462 (2205)	0.50
Inoxidável Austenítico	Corte fácil 1.4305 (303)	0.85
	<i>Standard</i> 1.4301 (304)	0.52

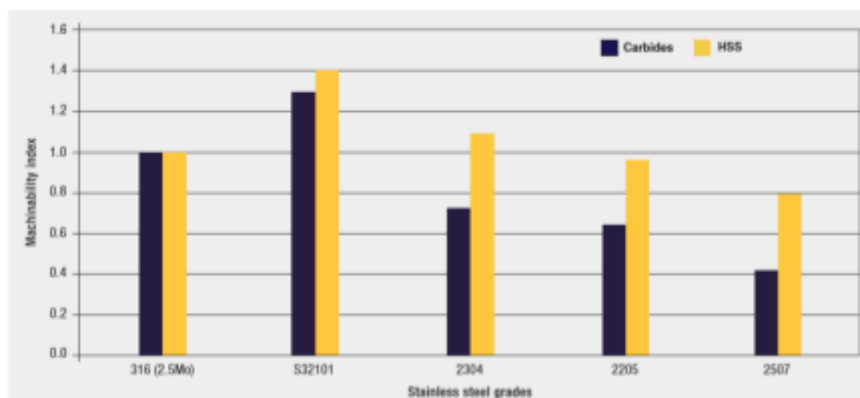


Figura 31 - Índices de maquinabilidade para ferramentas HM e HSS em Aços Inoxidáveis, tendo por base AISI 316 (TMR Stainless, 2014)

2.4.1 Recomendações na Maquinagem de aços Inoxidáveis Duplex

Segundo o livro, *Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless Steels* do IMOA, é importante ter em consideração o seguinte quando se maquinam aços inoxidáveis duplex:

- Utilização de máquinas potentes e rígidas, com montagem extremamente forte e robusta das ferramentas e da peça. As forças de corte são mais altas que nos austeníticos similares;
- Minimizar a vibração, utilizando a menor extensão de ferramenta possível e raios de ponta nunca maiores que o necessário;
- Favorecer a geometria da ferramenta para promover uma aresta de corte afiada, sem que a robustez seja comprometida. Privilegiar ferramentas de metal duro com quebra apara positivos;
- Projetar cortes em que o a_p esteja abaixo da camada endurecida pela deformação causada pelos cortes nas passagens anteriores;
- Usar velocidade adequada, mas não excessiva, para evitar arestas postiças e desgaste rápido. As arestas postiças são um tipo de desgaste causado pela soldadura por pressão da apara na ferramenta e, como se trata de um material macio, é mais provável a sua ocorrência. A baixa velocidade de corte também aumenta o risco de formação de aresta postiça;
- Manter as arestas de corte em bom estado, substituindo a ferramenta ou pastilhas, e, quando aplicável, afiar e revestir a ferramenta;
- Usar fluido de corte abundante, com pressão elevada, para que as aparas sejam evacuadas do corte e a ferramenta e peça não aqueçam demasiado.

2.4.2 Ferramentas e parâmetros usuais

Neste subcapítulo são descritos estudos de maquinabilidade semelhantes ao desta dissertação.

2.4.2.1 Revestimentos AlTiN, AlCrN PVD na maquinagem de inoxidáveis austeníticos

Nos inoxidáveis austeníticos AISI 316, e naquele estudo em concreto, a maquinabilidade também é difícil como nos Aços Duplex. Isto deve-se essencialmente ao facto de o material apresentar elevada plasticidade e tendência ao encruamento, a condutividade térmica é inferior comparativamente aos aços ao carbono estruturais, o que condiciona maior impacto térmico onde o corte está a ser efetuado.

A maquinabilidade pode ser melhorada com a utilização de ferramentas revestidas por PVD, uma vez que estas melhoram a superfície da ferramenta, reduzindo a condutividade térmica e atrito entre a ferramenta e a peça, proporcionando uma evacuação mais eficaz das aparas.

Neste estudo, levado a cabo por J.L. Endrino, G.S. Fox-Rabinovich, C. Gey em 2006, utilizaram-se fresas de topo, diâmetro 8 mm e substrato HM, que foram revestidas por PVD com AlCrN, AlCrNbN, AlTiN refinado e AlTiN nano-cristalino. Após revestimento, algumas ferramentas também foram tratadas superficialmente de modo a minimizar as macro partículas presentes na superfície do revestimento, e que condicionam a vida útil da ferramenta. O material das peças do ensaio era AISI 316, com dureza 160 HB e tensão de rotura de 550 MPa.

Parâmetros de corte utilizados:

- $V_c = 120$ m/min
- $f_z = 0,05$ mm/dente
- $a_p = 10$ mm
- $a_e = 0,5$ mm

Este estudo denotou a importância da correta escolha do revestimento da ferramenta utilizada no corte de aços inoxidáveis, tendo como resultados o seguinte:

- O revestimento AlTiN nano-cristalino supera o AlTiN refinado, quase duplicando a vida útil da ferramenta;
- O revestimento AlCrNbN tem um desempenho melhor que o AlCrN.

2.4.2.2 Estudo comparativo do comportamento de diferentes ferramentas na fresagem de aços duplex

Nesta dissertação elaborada por P. M. Reis e orientada por F. G. Silva em 2014, foi analisado o comportamento de quatro fresas de topo distintas na maquinagem de aço inoxidável duplex, 1.4517. Todas as ferramentas utilizadas nos ensaios tiveram os seguintes critérios de seleção em comum:

- Diâmetro de 4 mm, para desta forma não se desperdiçar material em excesso, maximizando assim o percurso de maquinagem;
- Fresas em metal duro (HM) revestido, apropriado para maquinagem de aço inoxidável duplex, de forma a garantir maior longevidade da ferramenta e prevenir que o material adira às lâminas e forme arestas postiças, facilitando a extração de aparas e permitindo manter a eficiência de corte, não comprometendo o acabamento;
- Encabadouro de 6 mm, para evitar o mais possível as vibrações. Foram realizadas experiências-teste com encabadouros de 4 mm, que provaram ser ineficientes nesta tarefa, partindo prematuramente pela zona imediatamente adjacente à zona útil de trabalho, sinal claro de excesso de esforço imposto na ferramenta.

As características que variaram foram:

- Número de lâminas – 2, 3 e 4;
- Tipos de revestimento – AlCrN e AlTiN;
- Altura da zona útil de trabalho

Os parâmetros de corte utilizados estão descritos na Tabela 12

Tabela 12 - Parâmetros de corte utilizados por P. M. Reis e F. G. Silva

Ferramenta	Nº laminas	Revestimento	Rotação (rpm)	Vel. Corte (m/min)	Avanço (mm/min)	Ae (mm)	Ap (mm)
Walter H30140418-4	4	AlTiN	4000	50,27	250	3	0,5
HPMT G10040005006 Plunge-Mill	3	AlCrN	4000	50,27	190	3	0,5
HPMT V47BXZ024GX0 40001 Noviano	4	AlCrN	4000	50,27	180	3	0,5
Dormer S812HA	2	AlCrN	4000	50,27	125	3	0,5

Para análise dos resultados, foram realizadas medições de rugosidade nas peças e as ferramentas inspecionadas por microscopia eletrônica.

Neste estudo, conclui-se que:

- As ferramentas de 4 navalhas apresentam melhores resultados no que toca à rugosidade, sendo estas as mais apropriadas para desbastes laterais.
- A ferramenta Walter cujo revestimento era AlTiN obteve melhor durabilidade ao desgaste do que as ferramentas revestidas por AlCrN.

2.4.2.3 Maquinagem de GX2CrNiMoN26-7-4 DSS: Análise do desgaste em ferramentas revestidas por TiAlN e TiCN/Al₂O₃/TiN em desbaste no processo de fresagem.

Este artigo publicado na revista *Coatings* em 2019 pelos autores Silva et al. (2019), relata um estudo de maquinagem da liga 1.4501, utilizando uma ferramenta de pastilhas redondas, no que respeita às vibrações durante o corte, à rugosidade deixada na peça e ao desgaste das ferramentas analisado por microscopia eletrônica.

O suporte da ferramenta utilizado foi um Taugetc diâmetro 16 mm, provido de duas pastilhas redondas, geometria RHDT07.

No ensaio, foram mantidos os parâmetros de corte, a_p 1 mm, a_e 12 mm, V_c 76,2 m/min, rotação de 1516 rpm e avanço de 0,15 mm/rot. Variaram-se os comprimentos

de corte entre 3,94 metros e 7,87 metros e o revestimento da pastilha usada, sendo que metade dos ensaios foram realizados com insertos PH7930 (fornecidos pela Palbit, revestido por PVD a AlTiN com uma espessura de 7 μm), e a outra metade com insertos PH5740 (fornecidos pela Palbit, revestidos por CVD a TiN/TiCN/ Al_2O_3 com espessura de 15 μm). Deste estudo, concluiu-se que:

- O revestimento CVD degradou-se com mais facilidade que o de PVD, embora tal não seja muito significativo na superfície da peça, o que demonstra que embora se degrade com maior facilidade, o revestimento CVD tem um desgaste homogêneo;
- Após a degradação do revestimento, o substrato da ferramenta apresenta um desgaste muito precoce em contacto com a peça, pelo que, quanto maior for o tempo em que o revestimento fique em operação, menor será a degradação do substrato e melhor o acabamento superficial da peça maquinada.
- As áreas de desgaste observadas nos insertos revestidos por PVD a AlTiN são claramente inferiores às dos que foram revestidos por CVD a TiN/TiCN/ Al_2O_3 , podendo assim afirmar-se o anterior como mais indicado na maquinagem de DSS.

2.4.3 Problemas usuais na maquinagem

Como já fora mencionado em subcapítulos anteriores, os inoxidáveis duplex apresentam muitas dificuldades na maquinagem. Na lista seguinte, estão descritos os problemas mais comuns identificados em processos de maquinagem destes materiais.

- Desgaste da ferramenta - Os DSS são muito suscetíveis ao endurecimento pelo corte. A combinação de altas forças de corte e temperaturas, são propícias à adesão de material na ferramenta. O desgaste por adesão, estimulado pela criação de arestas postizas, é considerado o processo líder de desgaste na maquinagem de DSS. O encruamento é muito comum e difícil de evitar, uma vez que o material apresenta uma taxa de deformação muito elevada a altas temperaturas. Este fenómeno leva ao incumprimento das tolerâncias dimensionais, mau acabamento superficial e desgaste de ferramenta precoce (Ahmed *et al.*, 2018; Philip *et al.*, 2015).
- Formação de apara - O aparecimento de apara é afetado pela instabilidade do produto. No fabrico de produtos longos, como varões, o conteúdo de enxofre é melhorado, que por sua vez leva ao surgimento de sulfatos de manganês que facilitam a maquinagem destes materiais por existir uma quebra de apara mais eficaz e um corte tribologicamente mais eficaz. O desgaste da ferramenta de corte também é um grande causador de rebarbas, pelo que as arestas de corte devem ser mantidas em bom estado. Nos DSS, a fase Austenite é mais dura do que a Ferrite, que tem mais tendência à deformação e a depositar-se na aresta

da ferramenta. A combinação de baixo avanço e elevadas profundidades de corte são satisfatórias para a obtenção de melhores acabamentos superficiais e micro durezas (Gowthaman *et al.*, 2019).

- Deformação plástica - Os DSS deformam-se entre os 1280-850°C. A deformação a quente deve-se à menor percentagem de C, Ni e S na interface ferrítica. Velocidades de corte elevadas, tendem a criar deformação plástica combinada com entalhes na ferramenta e delaminação dos revestimentos. Maior resistência mecânica da liga, força de corte e temperatura, elevam o risco da ocorrência de deformação a quente (Gowthaman *et al.*, 2019).
- Temperatura de corte - Materiais trabalhados a elevada temperatura tendem a sofrer de fluência, erosão, corrosão a quente e mudanças de fase, que afetam a tenacidade e capacidade de carga do material. A geração de altas temperaturas durante a maquinagem, é responsável por induzir tensões residuais e dilatação térmica na peça. Estes fatores afetam a precisão da peça e condicionam muito o aparecimento de empenos no material trabalhado (Pohl *et al.*, 2007).
- O acabamento superficial é um espelho da maquinabilidade do material. A correta escolha de parâmetros de corte é a maior condicionante na obtenção de um bom acabamento. Velocidades de corte muito baixas, tendem a formar rebarbas nas peças (Jiang *et al.*, 1996). O mau acabamento superficial dos DSS face a aços inoxidáveis como o AISI 316, leva a que, por vezes, estes sejam rejeitados para aplicações marítimas, uma vez que o seu polimento é muito dispendioso e o mau acabamento leva a uma degradação precoce das superfícies (Vinoth Jebaraj *et al.*, 2017).

DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS

3.1 MATERIAIS E MÉTODOS

3.2 RESULTADOS

3 Desenvolvimento e Resultados

3.1 Materiais e métodos

Neste trabalho, pretende-se obter dados comparativos de doze ferramentas de corte, dois conjuntos de seis fresas, de dois fabricantes distintos. Em cada conjunto, foram realizados ensaios de maquinagem nos quais foi variado o avanço da ferramenta e comprimento total de corte. Durante a maquinagem, foram avaliadas as forças de corte, nos vetores X, Y e Z, e o binário M_z , com recurso a um dinamómetro rotativo. Posteriormente à maquinagem, foi analisada a rugosidade superficial, R_a , R_z e R_{max} , do material trabalhado. Também as ferramentas de corte foram analisadas, embora com recurso a microscopia eletrónica (SEM – *Scanning Electron Microscopy*), de modo a avaliar o tipo e quantidade de desgaste no gume e flancos da ferramenta. A ordem de realização das tarefas foi a seguinte:

- Preparação do tarugo de material, torneamento exterior, corte das peças a maquinar por serra, e facejamento do material;
- Montagem de ferramentas e material;
- Maquinagem das peças, com registo das forças e binário para condições de corte diferentes;
- Determinação da rugosidade superficial das peças com recurso a rugosímetro;
- Análise por SEM das ferramentas de corte, com medição do desgaste e quando necessário, avaliação da composição química das superfícies da ferramenta através EDS, espectroscopia de energia dispersiva;
- Análise crítica dos resultados obtidos.

3.1.1 Duplex 2205

O material utilizado na realização deste estudo foi o aço inoxidável duplex com a designação comercial SAF 2205 ou EN 1.4462 - X2CrNiMoN 22-5-3, o qual foi fornecido na forma de varão redondo vazado $d = 60 \text{ mm} \times l = 300 \text{ mm}$, pela ARSOPI – Indústrias Metalúrgicas Arlindo S. Pinho Lda. de Vila Chã, Vale de Cambra.

Devido à sua excelente resistência à corrosão, é um material muito aplicado em ambientes com cloretos e sulfuretos de hidrogénio, como nas extrações de petróleo e gás, refinarias e ambientes contaminados com cloretos, como é o caso de permutadores de calor que funcionam com água salgada. O 2205 também é aplicado

nas indústrias de processamento de ácidos, por exemplo, na diluição de ácido sulfúrico.

A combinação das excelentes propriedades mecânicas e de resistência à corrosão, tornam o 2205 uma alternativa atrativa e econômica aos aços inoxidáveis austeníticos sujeitos a grandes cargas e ambientes agrestes.

3.1.1.1 Composição química e física

A Tabela 13 e Tabela 14 expressam as propriedades químicas e físicas do material trabalhado.

Tabela 13 - Composição química SAF 2205 (Arsopi, 2013)

SAF 2205/EN.: 1.4462 - X2CrNiMoN 22-5-3							
C	Cr	Ni	Mo	N	Si	Mn	S
0,03	21,0-23,0	4,5-6,5	2,5-3,5	0,12-0,20	≤1,0	≤2,0	≤0,015
$PREN = \%Cr + 3,3(\%Mo + 0,5\%W) + 16\%N \approx 35$							

Tabela 14 – Propriedades físicas SAF 2205 (Arsopi, 2013; Sandvik Coromant, 2020)

SAF 2205/EN 1.4462 - X2CrNiMoN 22-5-3					
Densidade g/cm ³	7,8				
Temperatura, °C	20	100	200	300	400
Cond. Térmica, W/(m °C)	14	16	17	19	20
Calor específico, J/(kg °C)	480	500	530	550	590
Resistência elétrica, μΩm	0,74	0,85	0,96	1,00	1,10
Módulo de elasticidade, MPa	200	194	186	180	--
Temperatura, °C	Por °C	30 - 100	30 - 200	30 - 300	30 - 400
Expansão térmica x10 ⁻⁶		13,0	13,5	14,0	14,5

3.1.1.2 Resistência à corrosão

Na maioria dos meios, o 2205 apresenta uma maior resistência à corrosão que os concorrentes austeníticos, AISI 316 e AISI 317. O diagrama da Figura 32 mostra a corrosão do SAF 2205, AISI 316 e AISI 317 a uma taxa de 0,1 mm/ano num meio que contém ácido sulfúrico estagnado.

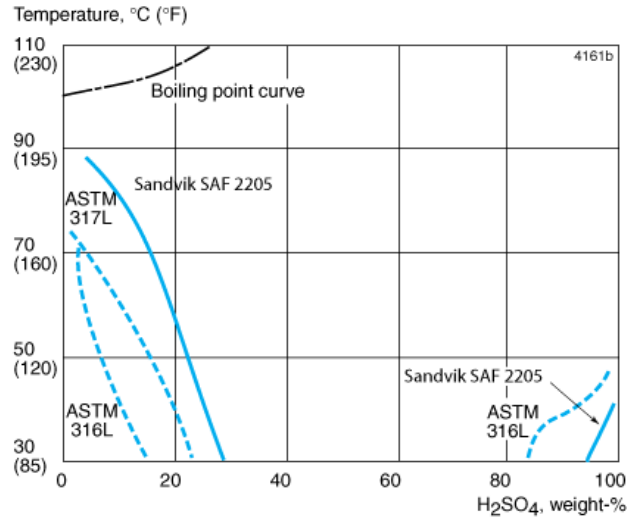


Figura 32 - Diagrama de iso corrosão em ácido sulfúrico (Sandvik Coromant, 2020)

O diagrama da Figura 33 representa a taxa de corrosão do SAF 2205, AISI 316 e AISI 317 em mistura, em ebulição, de 50% de ácido acético com proporções variáveis de ácido fórmico.

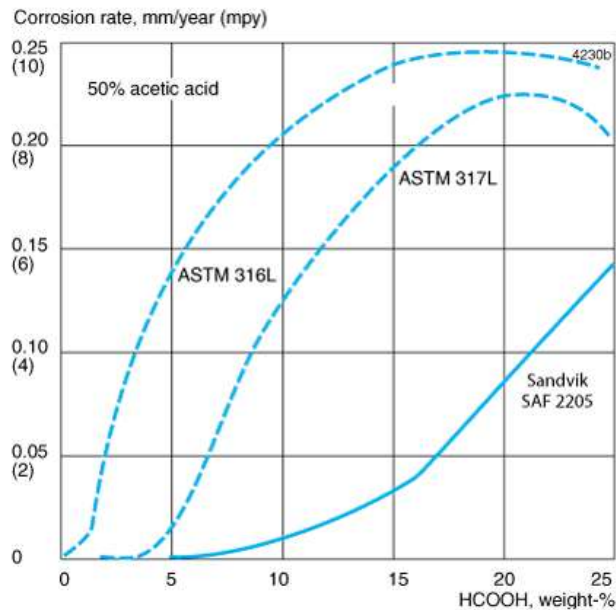


Figura 33 - Taxas de corrosão em meio com ácidos acéticos e fórmicos (Sandvik Coromant, 2020)

As curvas do diagrama da Figura 34 representam a corrosão do SAF 2205 e AISI316 em meio de ácido clorídrico estagnado, a uma taxa de corrosão de 0,1 mm/ano.

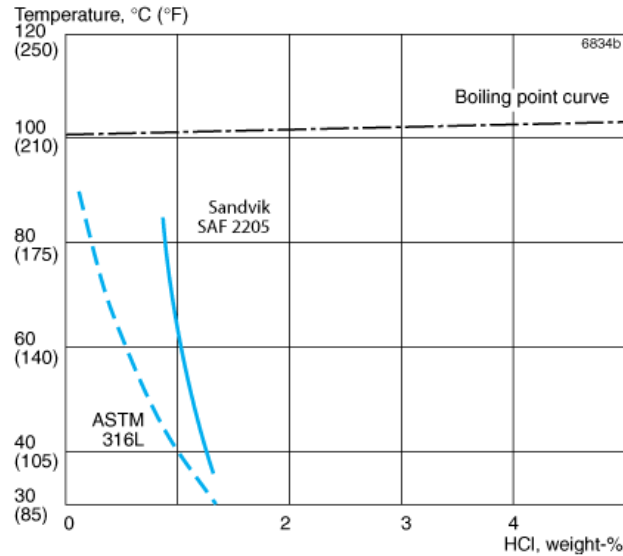


Figura 34 - Diagrama de iso corrosão em ácido clorídrico (Sandvik Coromant, 2020)

Conforme a equação demonstrada no capítulo 2.1, o PREN do SAF 2205 é aproximadamente 35. Este número pode ser utilizado para prever o comportamento do material em ambientes que contêm cloretos. No diagrama da Figura 35, é possível conhecer, para diferentes concentrações de cloretos, qual a temperatura a que o SAF 2205, AISI 316 e AISI 304 começam a sofrer corrosão por *pitting*.

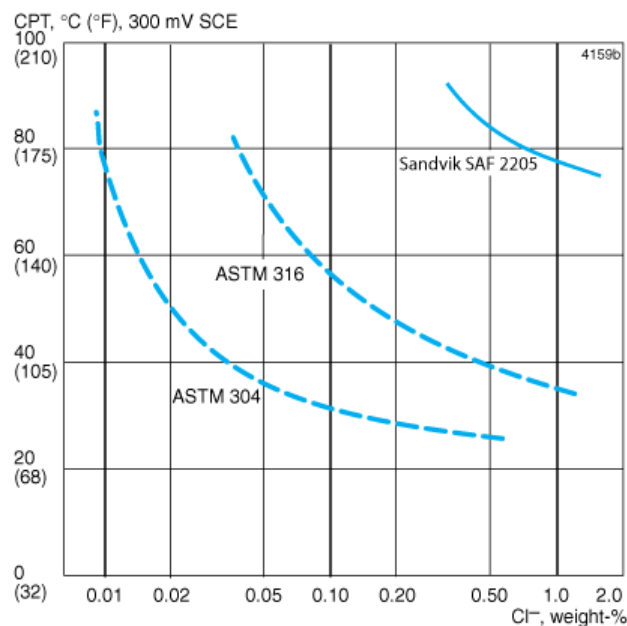


Figura 35 - Temperatura crítica para a formação de corrosão por pites (Sandvik Coromant, 2020)

Do mesmo modo que a resistência à corrosão por *pitting* está relacionada com o conteúdo de Crômio, Molibdênio e Azoto, também a resistência à corrosão intersticial o está. Assim, o SAF 2205 apresenta melhor *performance* a este tipo de desgaste que os aços inoxidáveis austeníticos.

Os DSS são menos propícios a corrosão sob tensão que os aços inoxidáveis austeníticos. Em meios aquosos com presença de sulfuretos de hidrogénio e cloretos, a corrosão sob tensão pode ocorrer a temperaturas abaixo dos 60°C, Figura 36. Nestas soluções, a corrosão é afetada pela acidez e quantidade de cloretos.

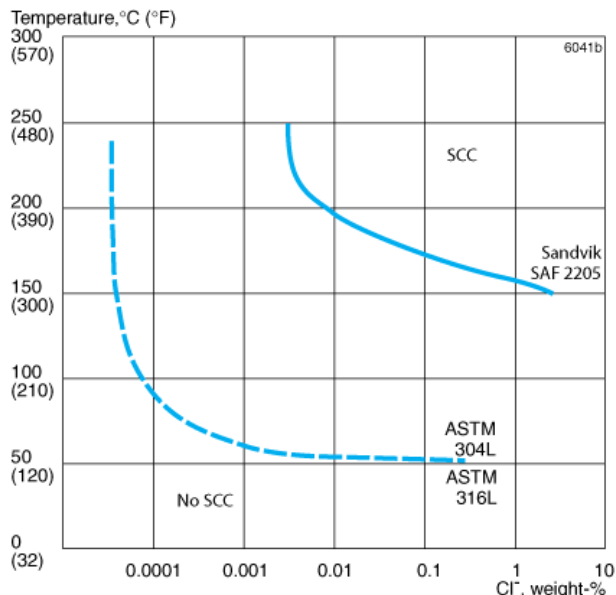


Figura 36 - Resistência à corrosão sob tensão numa solução com cloretos (Sandvik Coromant, 2020)

Sendo o SAF 2205 um duplex de formulação moderna, com composição química equilibrada, a reposição de austenite na ZTA (zona termicamente afetada) adjacente à soldadura, é feita quase de imediato durante o arrefecimento. Assim, a resistência à corrosão intergranular e resistência mecânica da ZTA, é praticamente igual à do restante metal da peça.

Devido à dureza e resistência à corrosão, o SAF 2205 é uma boa alternativa aos aços inoxidáveis austeníticos em meios onde ocorre corrosão por erosão. Estes meios contêm partículas sólidas, altamente abrasivas, como por exemplo, areia, ou são meios onde existem produtos a fluir a elevadas velocidades (Sandvik Coromant, 2020).

3.1.1.3 Propriedades mecânicas

A Tabela 15 exprime valores de propriedades mecânicas que foram possíveis de obter no fornecedor do material, ARSOPI.

Tabela 15 - Propriedades mecânicas SAF 2205 (Arsopi, 2013)

SAF 2205/EN.: 1.4462 - X2CrNiMoN 22-5-3				
Modulo elasticidade 0,2%, MPa	Tensão de Ruptura, MPa	Alongamento, %	Resiliência ISO-V, Joule	Dureza Brinell, HB
420	620	25	30	293

3.1.2 Análise da rugosidade

Foi utilizado um rugosímetro para medição do estado superficial das peças, após os ensaios de maquinagem, da marca Mahr, modelo M2. Os dados técnicos do equipamento estão descritos na Tabela 16.

Tabela 16 - Especificações Mahr M2

Mahr M2	
Princípio de medição	Método <i>Stylus</i>
Alcance de medições	Até 150 μm
Filtro	Seleção Automática
<i>Cutoffs</i>	0,25/0,8/2,5 mm
Comprimento de análise conforme DIN EN ISO 4288/ASME B461:	1,75/5,6/17,5; 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/JIS/CNOMO (Motif) seleccionável
Parâmetros conforme DIN/ISO/SEP	Ra, Rz, Rmax, Rp, Rq, Rt, R3z, Rk, Rvk, Rpk, Mr1, Mr2, Sm, RPc, as per JIS: Ra, Rz, Ry, Sm, S, tp
Tipo de impressão	Perfil-R (ISO/JIS), perfil-P (MOTIF), curva de relação do material, registo de medição.



3.1.3 Análise do desgaste por SEM

Para a obtenção das imagens de desgaste nas ferramentas, foi utilizada a tecnologia de microscopia eletrónica de varrimento. Estas análises foram realizadas no CEMUP –

Centro de Materiais da Universidade do Porto, num equipamento da marca FEI, modelo Quanta 400FEG ESEM, cujas especificações estão descritas na Tabela 17, equipado com microanálise por Raios X EDAX, Genesis X4M.

Tabela 17 - Especificações FEI Quanta 400FEG ESEM

FEI Quanta 400FEG ESEM

Ótica eletrónica:

- Emissão de campo de alta resolução
- SEM coluna otimizada para alto brilho / alta corrente;
- Lente objetiva de 45° de geometria com bombeamento diferencial através da lente e aberturas das objetivas aquecidas.

Resolução:

- Alto vácuo: 0,8 nm a 30kV (STEM); 1,2 nm em 30kV (SE); 2,5 nm a 30 kV (BSE); 3.0 nm a 1 kV (SE);
- Baixo vácuo: 1,5 nm a 30 kV (SE); 2,5 nm a 30 kV (BSE); 3.0 nm em 3 kV (SE).
- Modo de vácuo estendido (ESEM): 1,5 nm a 30 kV (SE).
- Voltagem de aceleração: 200 V – 30 kV.
- Corrente da sonda: até 100 nA, continuamente ajustável.

Detetores:

- Everhardt-Thornley SED;
- Baixo vácuo SED (LFD);
- Gasoso SED (GSED);
- IR-CCD;
- Estado sólido BSED.

Câmara de vácuo:

- Alto vácuo: $< 6e^{-4}$ Pa;
- Baixo vácuo: 10 a 130 Pa;
- ESEM-vácuo: 10 a 4000 Pa.

Sistema de vácuo:

- 1 x 240 l/s TMP, PVP 2x;
- Patentado através da lente diferencial de bombeamento;
- Comprimento do caminho de gás 2 ou 10 mm.

Câmara:

- 379 mm esquerda para a direita;
- 10 mm WD analítica;
- 10 portas;
- Ângulo de saída: 35°.

5 Eixos motorizados etapa:

- X, Y = 100 mm;
- Z = 100 mm;
- T = -5° a +70° (WD dependente);
- R = 360° contínuos.



3.1.4 Análise das forças de corte

Durante os ensaios de maquinagem, para o registo das forças nos vetores X, Y e Z, e do binário exercido pela ferramenta durante o corte, foi utilizado um dinamómetro Kistler modelo 9171A, caracterizado pela especificações da Tabela 18. A aquisição de dados foi feita pelo equipamento Kistler modelo 5697A, que posteriormente foram tratados pelo *software* da Kistler, DynoWare.

Tabela 18 - Especificações Kistler - 9171A

Kistler 9171A	
Velocidade Max, rpm	12000
Espetro de medição Fx e Fy, N	-20000 até 20000
Espetro de medição Fz, N	-30000 até 30000
Espetro de medição Mz, N·m	-1000 até 1000
Sensibilidade Intervalo 1 Fx e Fy, mV/N	0,48
Sensibilidade Intervalo 1 Fz, mV/N	0,3
Sensibilidade Intervalo 1 Mz, mV/N·m	8,75
Sensibilidade Intervalo 2 Fx e Fy, mV/N	1,2
Sensibilidade Intervalo 2 Fz, mV/N	1,2
Sensibilidade Intervalo 2 Mz, mV/N·m	24
Sensibilidade Intervalo 3 Fx e Fy, mV/N	4,8
Sensibilidade Intervalo 3 Fz, mV/N	4,8
Sensibilidade Intervalo 3 Mz, mV/N·m	96
Classe de balanceamento, G	≤2,5
Peso acoplamento completo, kg	7,2
Compatibilidade com a maioria de interfaces porta ferramenta - máquina (HSK, BT, Capto, etc)	Interface porta ferramenta – ferramenta por pinça ER32, ER40 ou powRgrip®
Permite a utilização de refrigeração interna com pressão até 70 bar	



3.1.5 Centro de maquinagem

Os ensaios de maquinagem foram efetuados num centro CNC vertical, marca HAAS, modelo VF-2 SS, Figura 37. Este equipamento é caracterizado pelo seguinte:



Figura 37 – Haas VF-2 SS (Haas Automation inc., 2017)

Tabela 19 - Haas VF-2 SS Cursos dos eixos (Haas Automation inc., 2017)

Cursos	
Eixo X	762 mm
Eixo Y	406 mm
Eixo Z	508 mm

Tabela 20 - Haas VF-2 SS Características Fuso (Haas Automation inc., 2017)

Fuso	
Potência max	20.0 kW
rpm max	12000 rpm
Torque max	122 Nm @ 2000 rpm
Sistema de comando	Transmissão direta em linha
Cone	CT ou BT 40
Lubrificação	Injeção de óleo pneumática
Refrigeração	Refrigeração líquida

Tabela 21 - Haas VF-2 SS Características mesa (Haas Automation inc., 2017)

Mesa	
Comprimento	914 mm
Largura	356 mm
Fixação à mesa	3 Ranhuras T de 16 mm
Distância entre ranhuras	125 mm (entre centros)
Peso máx sobre a mesa	680 kg, distribuídos uniformemente

Tabela 22 - Haas VF-2 SS Velocidades de avanço (Haas Automation inc., 2017)

Avanços	
Corte máximo	21,2 m/min
Rápidos (G00)	35,6 m/min

Tabela 23 - Haas VF-2 SS Impulsos de Motores (Haas Automation inc., 2017)

Motores dos eixos	
Impulso máximo X	8874 N
Impulso máximo Y	8874 N
Impulso máximo Z	13723 N

Tabela 24 - Haas VF-2 SS Características porta ferramentas (Haas Automation inc., 2017)

Troca de ferramentas	
Tipo	SMTC (Sistema de troca de ferramenta lateral)
Capacidade	30+1
Diâmetro máximo da ferramenta (adjacente preenchido)	64 mm
Diâmetro máximo da ferramenta (adjacente vazio)	127 mm
Peso máximo da ferramenta	5,4 kg
Comprimento máximo da ferramenta	279 mm
Tempo de troca	1,8 s

3.1.6 Set up de ferramentas e peça

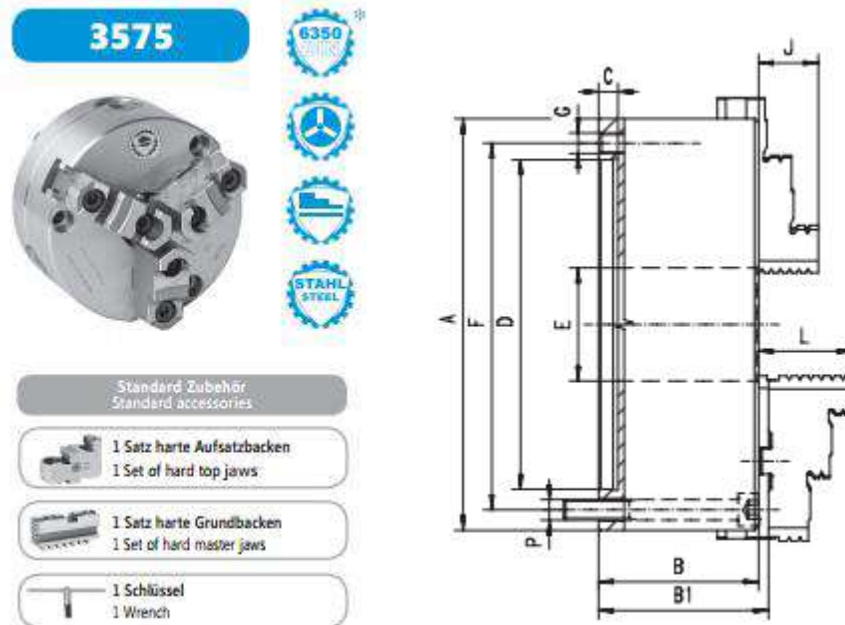
Os próximos subcapítulos enunciam como foi feito o aperto da peça e ferramenta, e quais as fresas utilizadas.

3.1.6.1 Fixação da peça

Para a fixação das peças ensaiadas, foi utilizada uma bucha de três mordentes, concêntrica, de corpo em aço. Esta bucha, Bison modelo 3575, aperta as peças e

centra-as em simultâneo. As especificações do dispositivo de fixação estão descritas na Tabela 25.

Tabela 25 - Características Bison 3575 (Link spa, 2019)



- Superfícies de trabalho temperadas e retificadas;
 - Prato equilibrado;
- Sistema de montagem flexível, montagem frontal ou traseira com recurso a prato adaptador.

A	B	B1	C	D H7	E	F	G	J	L	P	Kg
160	68,0	72,8	4	125	42,0	140	6xM10	32	43,0	6xM10	10,0



Figura 38 - Fixação da peça na bucha autocentrante

3.1.6.2 Fixação da ferramenta

As ferramentas foram montadas no dinamómetro Kistler 9171A, através de sistema de aperto por pinça DIN 6499, tipo ER 40. Inicialmente, estava programado ser utilizado um cone hidráulico para a fixação das ferramentas, mas a geometria do dinamómetro não o permitiu. Na interface com a máquina, o dinamómetro é montado com um cone do tipo BT 40. A montagem da ferramenta e dinamómetro está documentada na Figura 39.

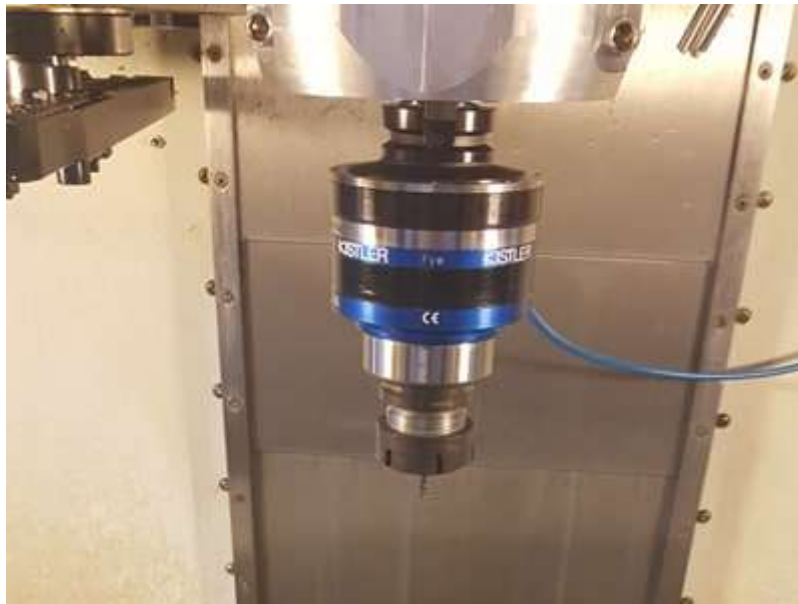


Figura 39 - Montagem do dinamómetro e ferramenta de corte

3.1.7 Ferramentas utilizadas

Na realização dos ensaios de maquinagem, foram utilizados dois grupos de fresas de topo de 4 navalhas, produzidas por dois fabricantes distintos, com diâmetro de corte 4 mm e encabadouro 6 mm, para minimizar vibrações e aumentar a robustez da ferramenta.

As ferramentas seleccionadas são revestidas por PVD com o composto AlCrN. As espessuras dos revestimentos foram, experimentalmente, verificadas através da análise SEM de duas ferramentas decepadas com disco de diamante.

Conforme a Figura 40 a espessura dos revestimentos é de aproximadamente 2 μm .

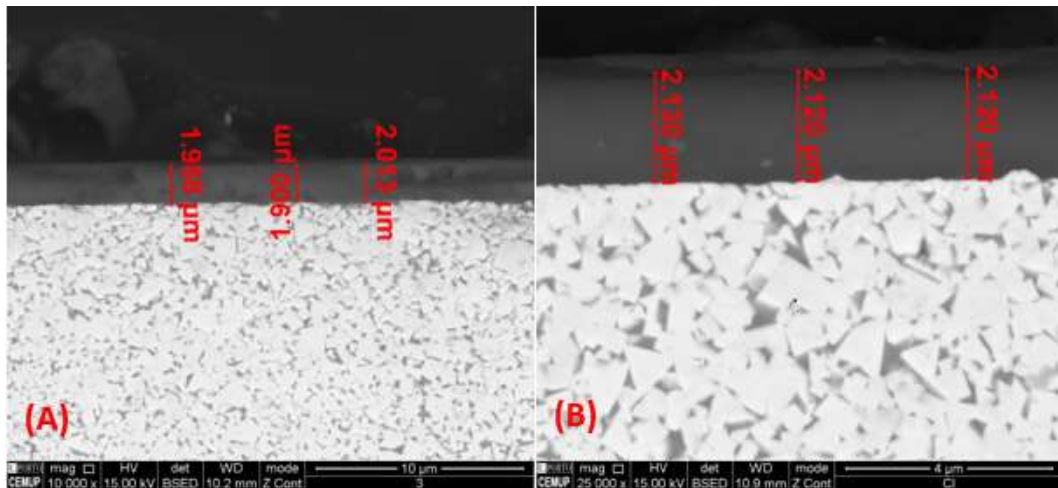


Figura 40 - Espessura dos revestimentos (A) HPMT #951; (B) Dormer S260

3.1.7.1 Dormer S260

As fresas de topo Dormer S260, são ferramentas desenvolvidas para o corte de aços inoxidáveis e superligas. Possuem ângulo entre as lâminas variável, o que reduz as vibrações induzidas pelo corte, minimiza as correções de *offset* da ferramenta e promove uma evacuação de aparas mais eficaz em alto avanço.

Estas ferramentas são de substrato HM com revestimento PVD AlCrN, que melhora a resistência ao desgaste e oxidação a alta temperatura.

Tabela 26 - Características Dormer S260

Dormer S260			Ref: S2604.0			
Número de lâminas	Ângulo da hélice	Ângulo de ataque	D	L1	L2	D2 (h6)
4	40 °	4 °	4 mm	57 mm	12 mm	6 mm



DORMER Product Selector



Data sheet

S2604.0



General

Application	Milling Cutters	Material Group	2.3
Operation	Shank Cutter Finishing	Material	SAF2205 DUPLEX
Customer	Standard		STAINLESS STEEL
Price List	GB_GBP	Product Sub Family (PSF)	SANDVIK
			all cutters

Cutting Data

e-Code	Ap / cut mm	Ae / cut mm	Vc m/min	RPM 1/min	fz mm/z	Vf mm/min	P kW	Q cm ³ /min	L m	Time / Cut s	Cost / cut GBP
S2604.0	0,080	3,00	42,0	3342	0,058	774	0,030	0,186	34,8	77,5	3,66


3.1.7.2 HPMT #951

As fresas de topo HPMT #951, são ferramentas de corte com 4 navalhas, com *design* otimizado para um corte eficaz sem sobrecarregar o *fuso*. Possuem ângulo de ataque positivo para permitir uma evacuação suave das aparas, que têm tendência a ser muito pequenas. O ângulo entre as lâminas é variável, o que reduz as vibrações induzidas pelo corte, que por sua vez leva a maior durabilidade da aresta de corte e melhor acabamento superficial na peça.

Estas ferramentas são de substrato HM com revestimento PVD monocamada AlCrN.

Tabela 27 - Características HPMT#951

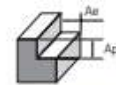
NiTiCo 30 – DP standard endmills			HPMT #951		Ref: 0400 57 06	
Número de lâminas	Ângulo da hélice	Ângulo de ataque	D	L	L1	D2 (h6)
4	40 °	10 °	4 mm	57 mm	12 mm	6 mm



NiTiCo 30 Recommended Cutting Data



Standard Endmills 4 Flutes



Side Milling	P						M				K				S	
	Carbon Steel		Alloy Steel		Prehardened Steel		Stainless Steel		Stainless Steel		Grey Cast Iron		Ductile Cast Iron		Titanium	
Working Material			S20 - Rm < 1200		35 ± HRC = 45		High Machinability		Low Machinability							
Properties																
Cutting Depth, Ap (mm)	0.80 × D		0.80 × D		0.75 × D		0.70 × D		0.65 × D		0.80 × D		0.65 × D		0.65 × D	
Cutting Width, Ae (mm)	0.45 × D		0.45 × D		0.45 × D		0.45 × D		0.45 × D		0.45 × D		0.45 × D		0.45 × D	
D (mm)	Vc (m/min)	Fz (mm)	Vc (m/min)	Fz (mm)	Vc (m/min)	Fz (mm)	Vc (m/min)	Fz (mm)	Vc (m/min)	Fz (mm)	Vc (m/min)	Fz (mm)	Vc (m/min)	Fz (mm)	Vc (m/min)	Fz (mm)
4	140	0.026	130	0.031	120	0.026	100	0.026	60	0.029	140	0.026	90	0.020	70	0.029

3.1.8 Parâmetros de corte

Na realização deste estudo, a determinação dos parâmetros de corte originais foi feita com base nos parâmetros fornecidos pelo fabricante da ferramenta. Esta escolha dos valores de a_e e a_p foi tida em consideração com base numa operação de acabamento.

Entre ensaios, foram mantidos todos os parâmetros com exceção do avanço, que foi variado para -25% e +25% do valor original, e do comprimento de corte, que para percursos curtos era 2471,05 mm e nos longos 4118,42 mm.

Os parâmetros utilizados estão sumarizados na Tabela 28.

Tabela 28 - Parâmetros de cortes utilizados nos ensaios de maquinagem

Ensaio nº	Rotação	Vel. Corte	Avanço	Avanço/dente	a_e	a_p	Comprimento de corte
	rpm	m/min	mm/min	mm/dente	mm	mm	mm
Dormer S260							
1	3183	40	738	0,058	3	0,08	4118,42
2	3183	40	738	0,058	3	0,08	2471,05
3	3183	40	923	0,073	3	0,08	2471,05
4	3183	40	554	0,044	3	0,08	2471,05
5	3183	40	554	0,044	3	0,08	4118,42
HPMT #951							
1	4775	60	554	0,029	3	0,08	4118,42
2	4775	60	554	0,029	3	0,08	2471,05
3	4775	60	693	0,036	3	0,08	2471,05
4	4775	60	416	0,022	3	0,08	2471,05
5	4775	60	416	0,022	3	0,08	4118,42

Todos os ensaios foram realizados com recurso a lubrificação por emulsão, exterior à ferramenta. Esta condição foi escolhida, pois era recomendada pelos fabricantes das ferramentas.

3.2 Resultados

3.2.1 Resultados de Rugosidade

Os resultados de rugosidade obtidos nos sentidos tangenciais e radiais estão descritos da Tabela 29 à Tabela 38. Os gráficos da Figura 41 e Figura 42 resumem as médias registadas.

Tabela 29 - Avaliação da rugosidade Dormer S260, Ensaio 1

Ferramenta	Dormer S260			Condição de corte	Ensaio 1		
Medição	Tangencial				Radial		
	Ra	Rz	Rmax		Ra	Rz	Rmax
1	0,423	3,308	4,050		0,485	2,743	3,890
2	0,407	3,045	3,700		0,485	3,138	5,780
3	0,383	2,802	3,210		0,441	2,392	4,040
4	0,371	2,409	2,940		0,497	2,775	4,050
5	0,370	2,626	3,200		0,388	2,637	3,410
Média	0,391	2,838	3,420		0,459	2,737	4,234
Desvio Padrão	0,021	0,314	0,400		0,040	0,241	0,807

Tabela 30 - Avaliação da rugosidade Dormer S260, Ensaio 2

Ferramenta	Dormer S260			Condição de corte	Ensaio 2		
Medição	Tangencial				Radial		
	Ra	Rz	Rmax		Ra	Rz	Rmax
1	0,570	2,892	3,430		0,555	3,034	4,810
2	0,381	2,103	2,300		0,531	3,123	4,490
3	0,402	2,573	2,860		0,532	3,294	4,720
4	0,412	2,239	2,550		0,469	2,834	4,860
5	0,609	3,235	3,620		0,470	2,470	4,120
Média	0,475	2,608	2,952		0,511	2,951	4,600
Desvio Padrão	0,095	0,416	0,504		0,035	0,283	0,272

Tabela 31 - Avaliação da rugosidade Dormer S260, Ensaio 3

Ferramenta	Dormer S260			Condição de corte	Ensaio 3		
Medição	Tangencial				Radial		
	Ra	Rz	Rmax		Ra	Rz	Rmax
1	0,911	4,876	6,140		0,785	4,943	7,610
2	1,169	5,969	6,790		0,724	4,182	6,780
3	1,391	6,809	7,470		0,851	4,709	7,710
4	1,210	5,333	6,040		1,001	4,750	5,560
5	1,145	6,095	7,310		0,791	4,652	7,210
Média	1,165	5,816	6,750		0,830	4,647	6,974
Desvio Padrão	0,154	0,664	0,585		0,094	0,252	0,780

Tabela 32 - Avaliação da rugosidade Dormer S260, Ensaio 4

Ferramenta	Dormer S260			Condição de corte	Ensaio 4		
Medição	Tangencial				Radial		
	Ra	Rz	Rmax		Ra	Rz	Rmax
1	0,440	2,637	3,070		0,474	2,709	4,100
2	0,293	1,826	2,840		0,477	3,032	4,680
3	0,246	1,652	1,780		0,600	3,155	5,200
4	0,312	1,988	2,130		0,376	2,310	3,460
5	0,419	2,298	2,730		0,414	2,766	4,000
Média	0,342	2,080	2,510		0,468	2,794	4,288
Desvio Padrão	0,075	0,350	0,479		0,076	0,293	0,598

Tabela 33 - Avaliação da rugosidade Dormer S260, Ensaio 5

Ferramenta	Dormer S260			Condição de corte	Ensaio 5		
Medição	Tangencial				Radial		
	Ra	Rz	Rmax		Ra	Rz	Rmax
1	0,352	2,52	3,43		0,578	3,294	4,78
2	0,384	2,946	3,110		0,456	2,689	4,500
3	0,292	2,172	2,810		0,491	3,035	4,780
4	0,432	2,504	2,990		0,624	3,756	6,170
5	0,299	2,070	2,640		0,482	2,904	3,800
Média	0,352	2,442	2,996		0,526	3,136	4,806
Desvio Padrão	0,053	0,308	0,269		0,064	0,367	0,770

Tabela 34 - Avaliação da rugosidade HPMT 951, Ensaio 1

Ferramenta	HPMT 951			Condição de corte	Ensaio 1		
Medição	Tangencial				Radial		
	Ra	Rz	Rmax		Ra	Rz	Rmax
1	0,312	2,023	2,460		0,449	2,743	3,760
2	0,305	2,117	2,310		0,379	2,322	3,740
3	0,379	2,419	3,030		0,395	2,444	3,920
4	0,349	2,133	2,320		0,385	2,301	3,460
5	0,376	2,260	2,660		0,468	2,853	3,370
Média	0,344	2,190	2,556		0,415	2,533	3,650
Desvio Padrão	0,031	0,137	0,269		0,036	0,225	0,204

Tabela 35 - Avaliação da rugosidade HPMT 951, Ensaio 2

Ferramenta	HPMT 951			Condição de corte	Ensaio 2		
Medição	Tangencial				Radial		
	Ra	Rz	Rmax		Ra	Rz	Rmax
1	0,399	2,608	2,840		0,435	2,505	3,260
2	0,394	2,686	2,890		0,415	2,379	2,980
3	0,401	2,821	3,150		0,417	2,883	3,980
4	0,423	2,706	3,180		0,436	2,697	3,660
5	0,437	2,736	2,970		0,519	2,942	4,180
Média	0,411	2,711	3,006		0,444	2,681	3,612
Desvio Padrão	0,016	0,069	0,137		0,038	0,215	0,444

Tabela 36 - Avaliação da rugosidade HPMT 951, Ensaio 3

Ferramenta	HPMT 951			Condição de corte	Ensaio 3		
Medição	Tangencial				Radial		
	Ra	Rz	Rmax		Ra	Rz	Rmax
1	0,469	3,355	3,590		0,514	3,303	4,070
2	0,469	3,355	3,590		0,480	3,263	4,380
3	0,461	3,409	3,590		0,508	3,286	4,640
4	0,452	3,342	3,890		0,513	3,372	4,490
5	0,469	3,154	3,400		0,422	3,220	4,780
Média	0,464	3,323	3,612		0,487	3,289	4,472
Desvio Padrão	0,007	0,088	0,157		0,035	0,050	0,242

Tabela 37 - Avaliação da rugosidade HPMT 951, Ensaio 4

Ferramenta	HPMT 951	Condição de corte			Ensaio 4		
Medição	Tangencial			Radial			
	Ra	Rz	Rmax	Ra	Rz	Rmax	
1	0,229	1,707	1,800	0,300	1,963	2,730	
2	0,255	1,758	2,190	0,324	2,031	3,050	
3	0,248	2,076	2,710	0,282	1,832	2,880	
4	0,269	1,971	2,310	0,288	2,003	3,670	
5	0,283	1,846	2,080	0,275	1,886	3,010	
Média	0,257	1,872	2,218	0,294	1,943	3,068	
Desvio Padrão	0,018	0,136	0,298	0,017	0,074	0,321	

Tabela 38 - Avaliação da rugosidade HPMT 951, Ensaio 5

Ferramenta	HPMT 951	Condição de corte			Ensaio 5		
Medição	Tangencial			Radial			
	Ra	Rz	Rmax	Ra	Rz	Rmax	
1	0,29	2,069	2,2	0,312	2,226	2,850	
2	0,267	2,135	3,200	0,292	2,149	2,710	
3	0,455	3,077	3,750	0,294	2,030	2,530	
4	0,332	2,330	2,800	0,288	2,433	3,440	
5	0,368	2,567	2,720	0,357	2,042	2,720	
Média	0,342	2,436	2,934	0,309	2,176	2,850	
Desvio Padrão	0,066	0,365	0,518	0,026	0,147	0,312	

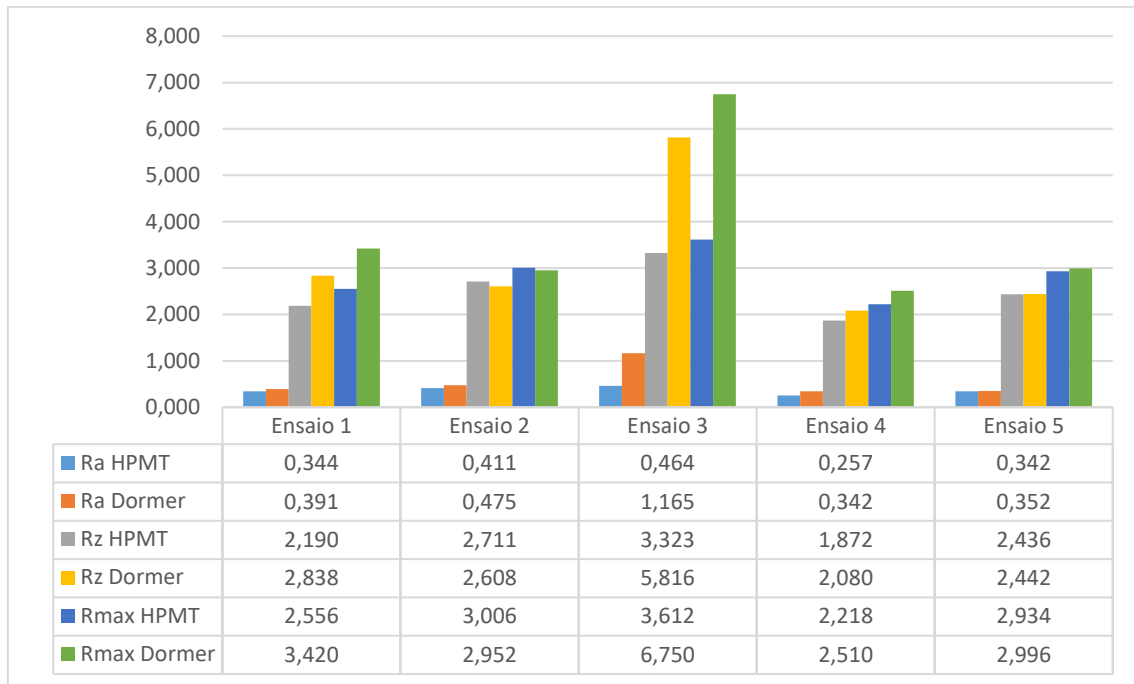


Figura 41 - Média de rugosidades tangenciais (valores em μm)

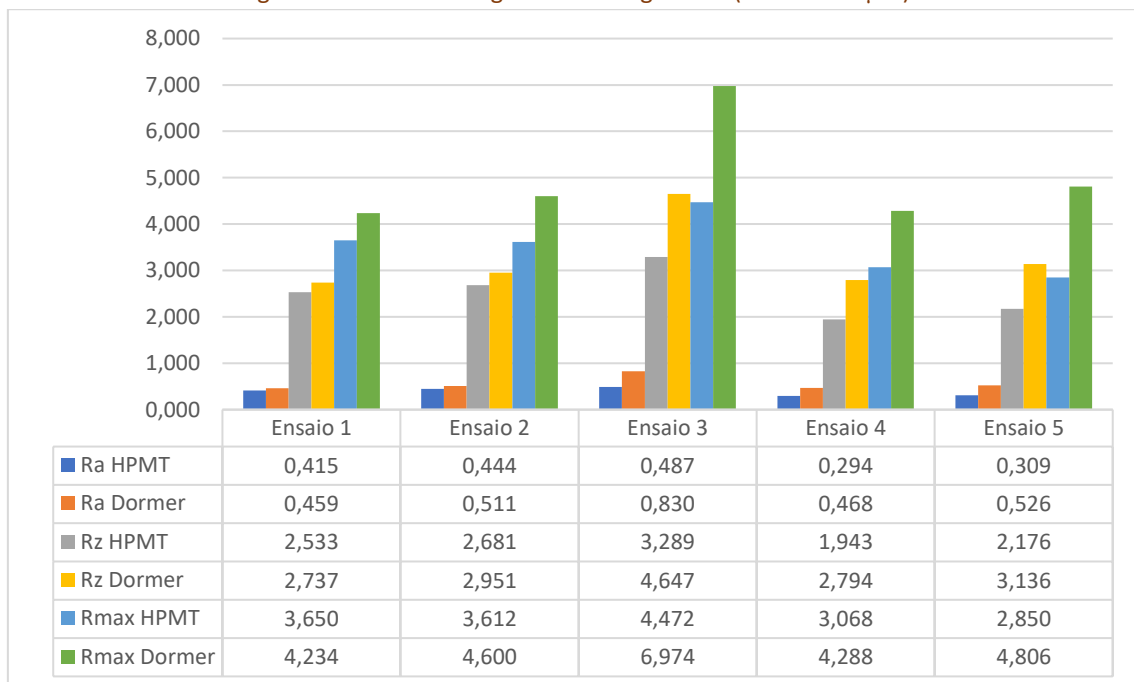


Figura 42 - Média de rugosidades radiais (valores em μm)

Os resultados dos ensaios de rugosidade encontram-se em linha com o expectável. Os valores da rugosidade para os percursos curtos e longos foram muito semelhantes, o que evidencia que para estes comprimentos de corte não existe um desgaste significativo da ferramenta. A influência do avanço na rugosidade é perceptível no ensaio, o incremento do avanço para 125% leva um aumento acentuado da rugosidade, enquanto que a redução do avanço para 75% do valor original se traduz

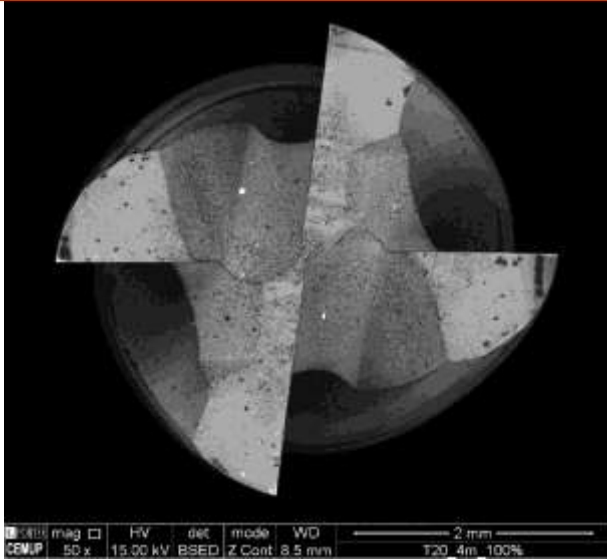
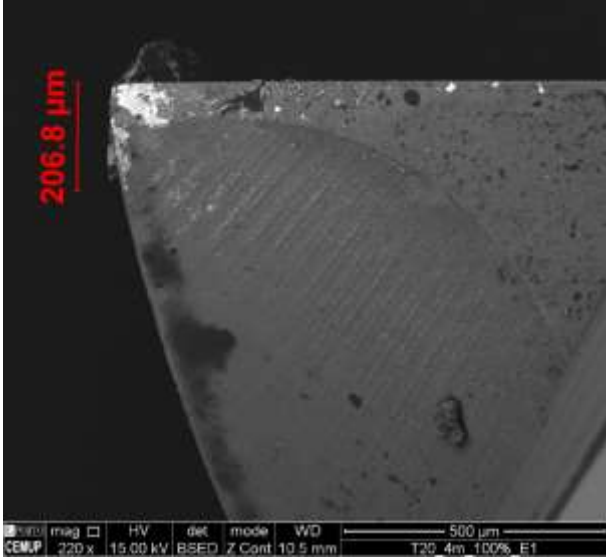
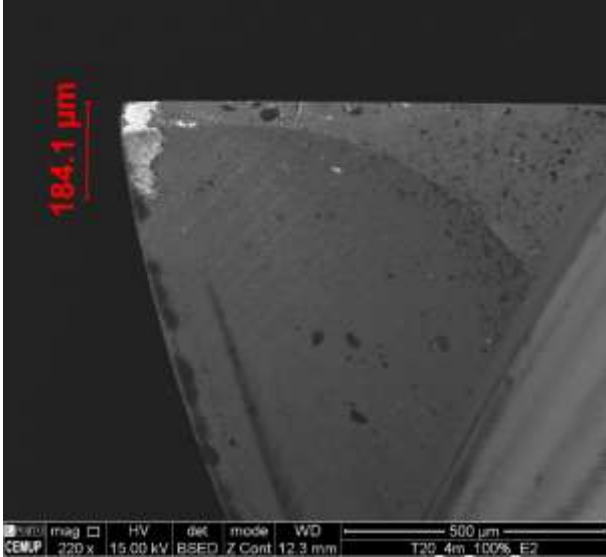
numa redução da rugosidade superficial, sendo esta preferível em operações de acabamento.

No geral dos ensaios, as fresas HPMT #951 apresentaram valores de Ra, Rz e Rmax mais favoráveis que as concorrentes Dormer S260.

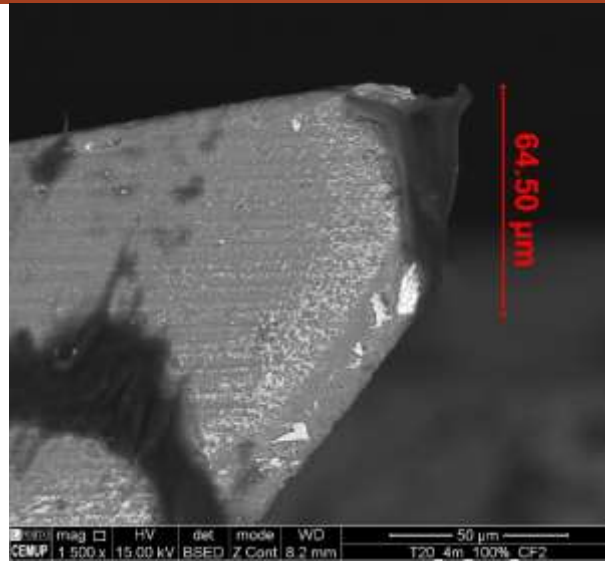
3.2.2 Resultados de desgaste

Os resultados de desgaste estão descritos entre a Tabela 39 e a Tabela 47. Nestas são apresentadas imagens e medições do desgaste das faces de corte e alívio da ferramenta. Simultaneamente são exibidas as imagens correspondentes às análises EDS, fundamentais na identificação de fenómenos de adesão e abrasão.

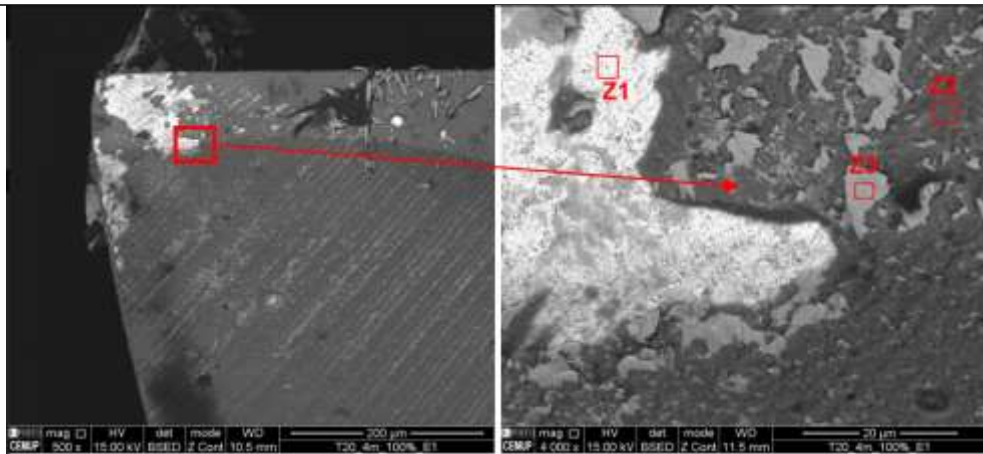
Tabela 39 - Desgaste Dormer S260 Ensaio 1

Ferramenta	Dormer S260	Condição de corte	Ensaio 1
Aresta cortante 1			
			
			

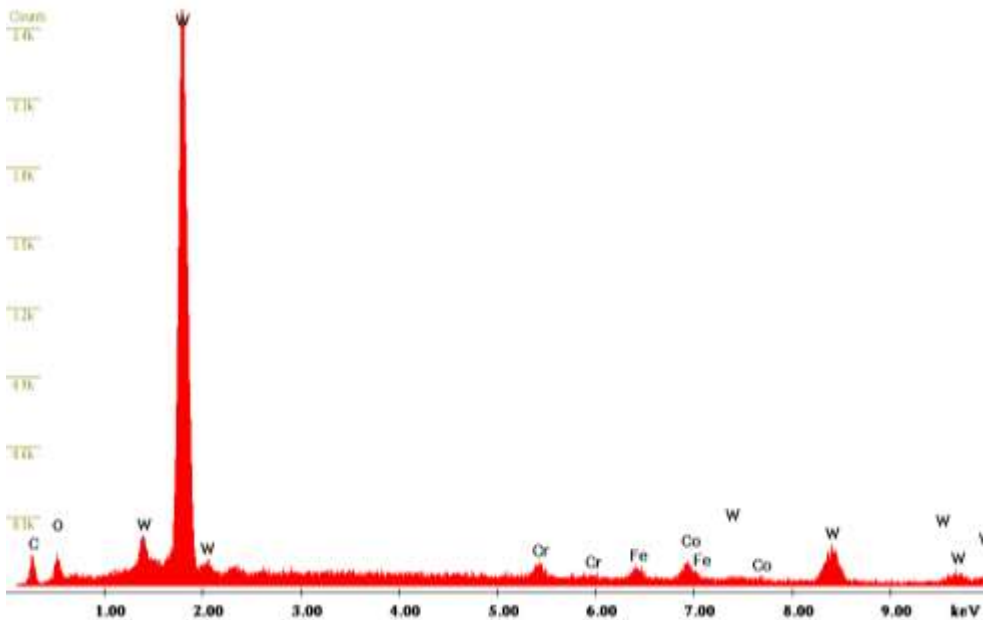
Alívio aresta cortante 2



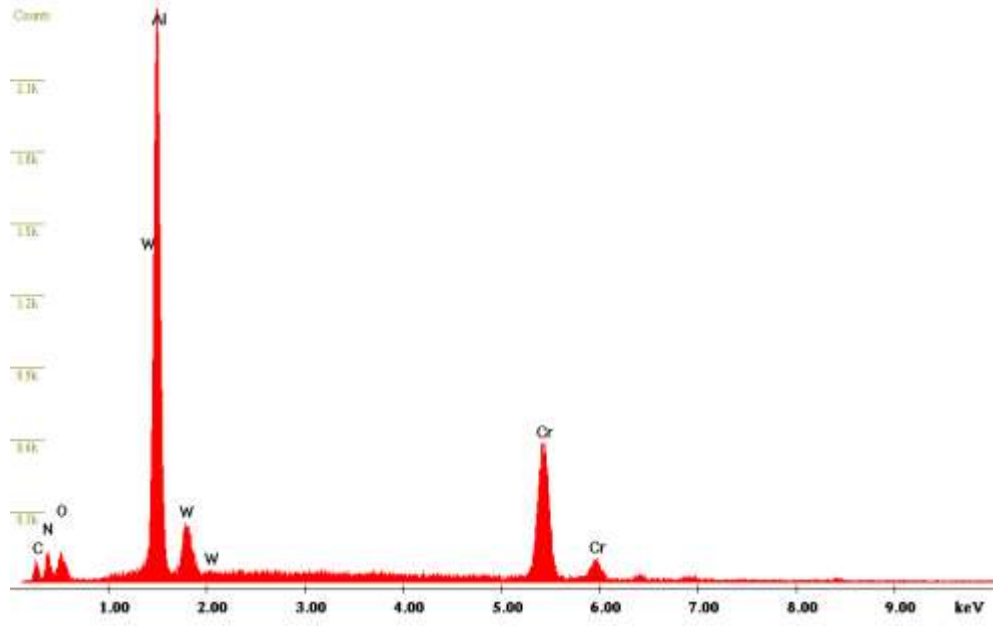
Análise EDS da aresta cortante 1



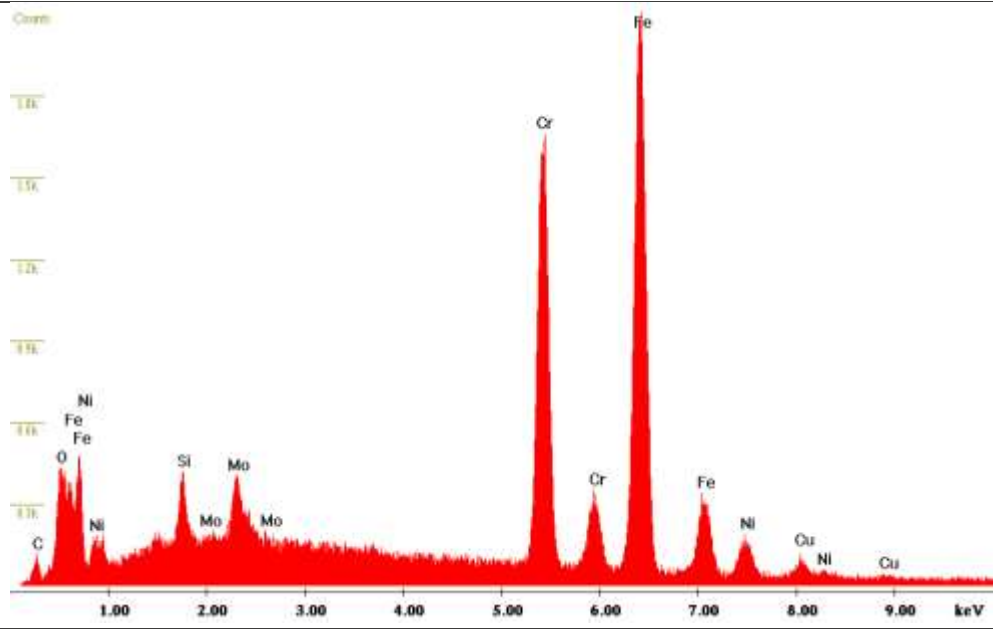
Análise EDS da aresta cortante 1, Z1



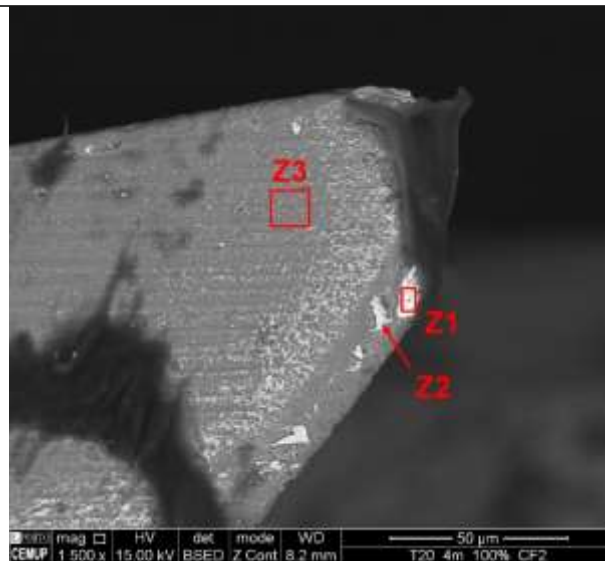
Análise EDS da aresta cortante 1, Z2



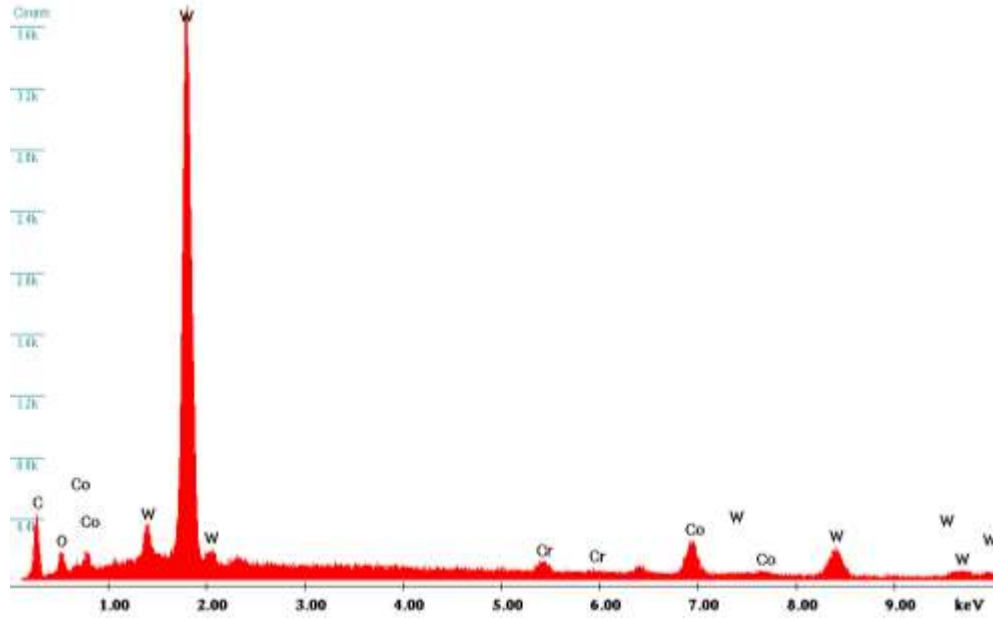
Análise EDS da aresta cortante 1, Z3



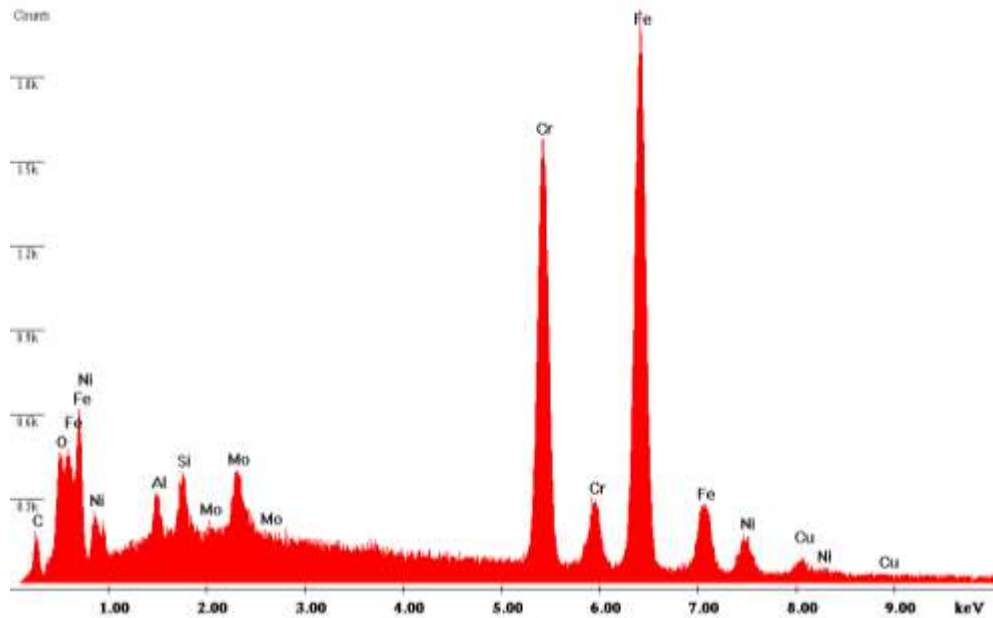
Análise EDS do alívio aresta cortante 2

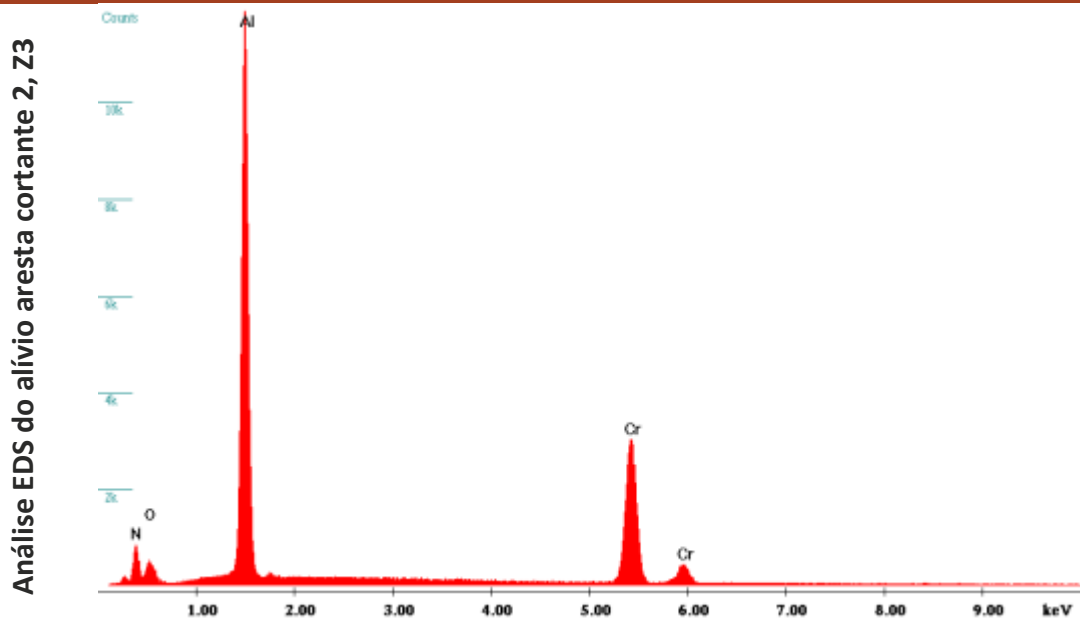


Análise EDS do alívio aresta cortante 2, Z1



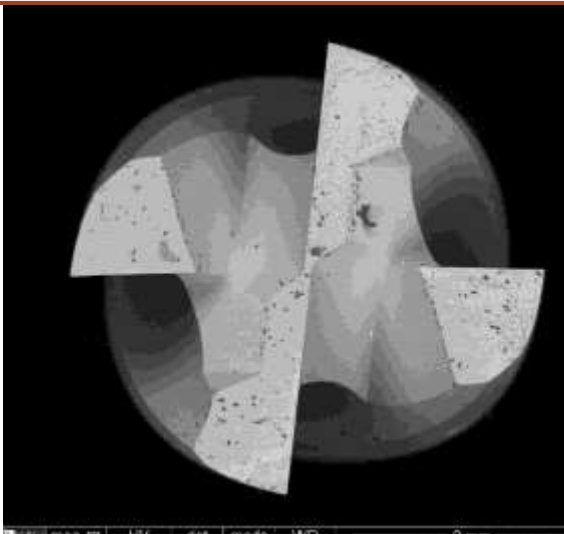
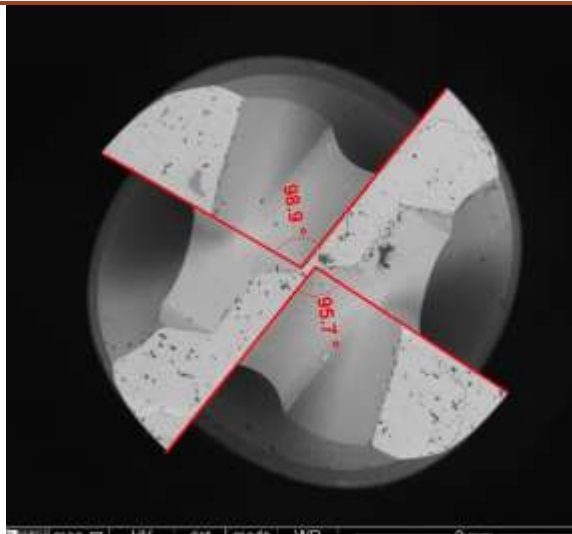
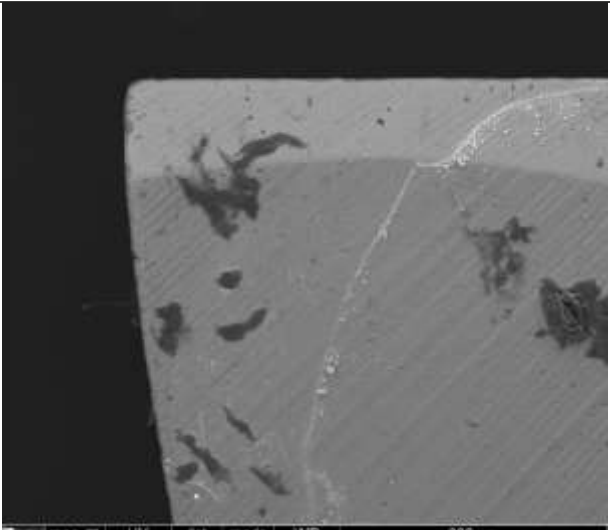
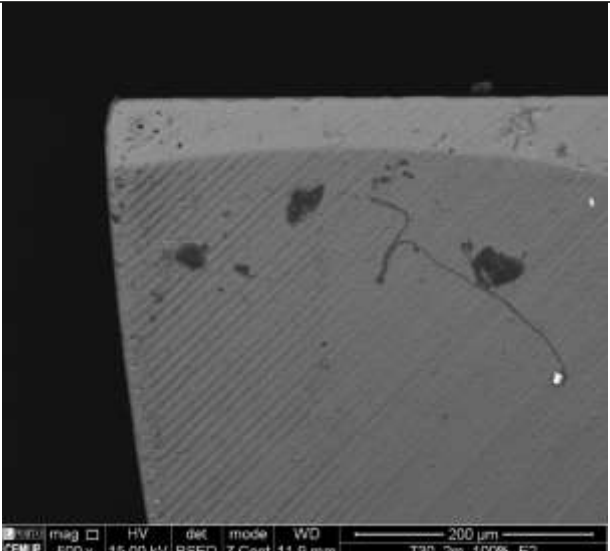
Análise EDS do alívio aresta cortante 2, Z2



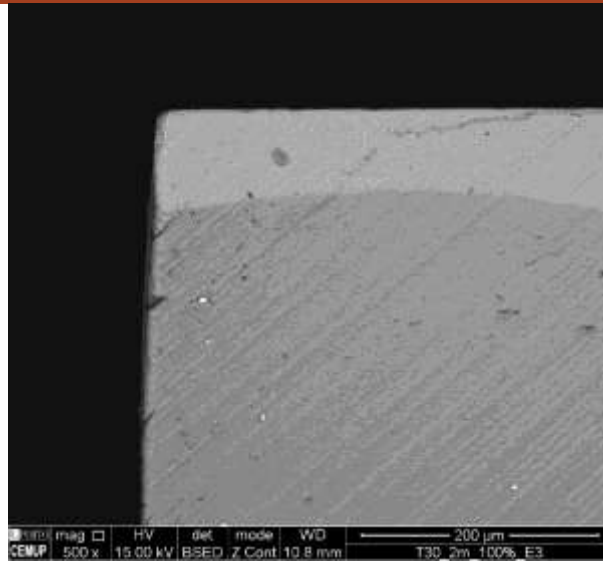


Neste ensaio, foi evidenciado desgaste de flanco com um $VB_{\text{máx}}$ de 0,206 mm na aresta de corte 1, embora, segundo a Tabela 10 - Valores limite (VB) recomendados na prática para diferentes materiais de ferramenta. Silva, 2008b) a ferramenta ainda não se encontre numa situação de fim de vida. As análises EDS da E1 e CF2 comprovam que ocorreu adesão e perda do revestimento da ferramenta, uma vez que são possíveis identificar zonas contendo Fe, Cr, Ni e Mo, elementos químicos presentes no material maquinado, e zonas com W e Co que são os constituintes do HM.

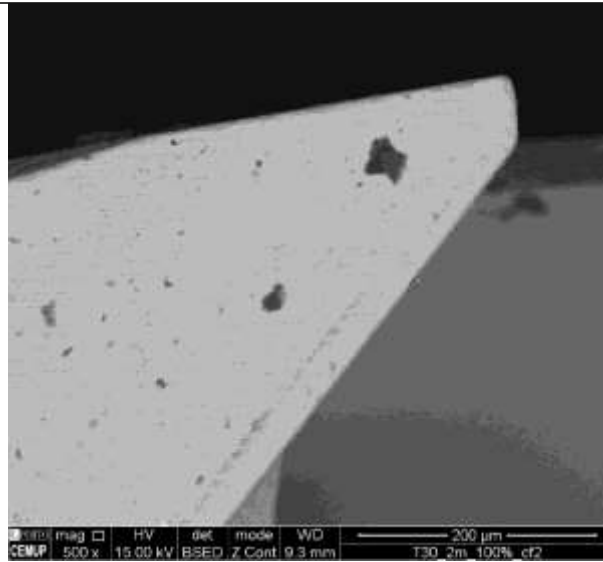
Tabela 40 - Desgaste Dormer S260 Ensaio 2

Ferramenta	Dormer S260	Condição de corte	Ensaio 2
			
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Aresta cortante 1</p>			
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Aresta cortante 2</p>			

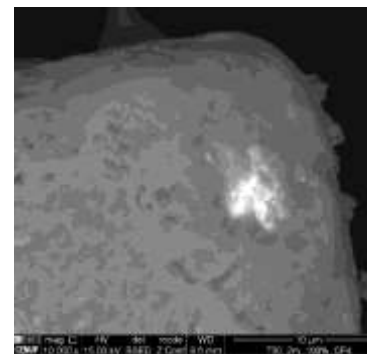
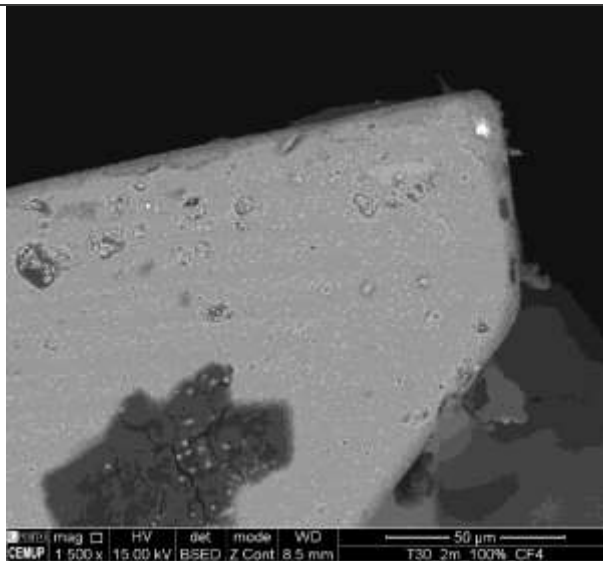
Aresta cortante 3



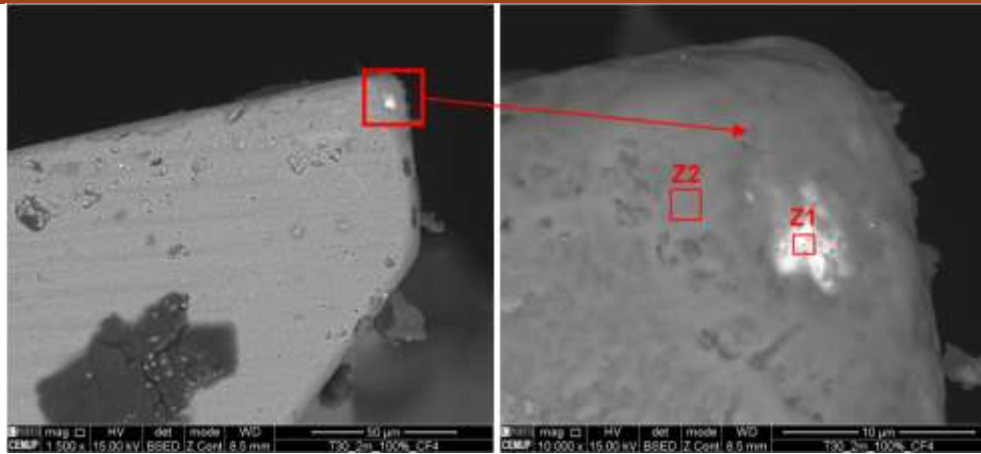
Alívio aresta cortante 2



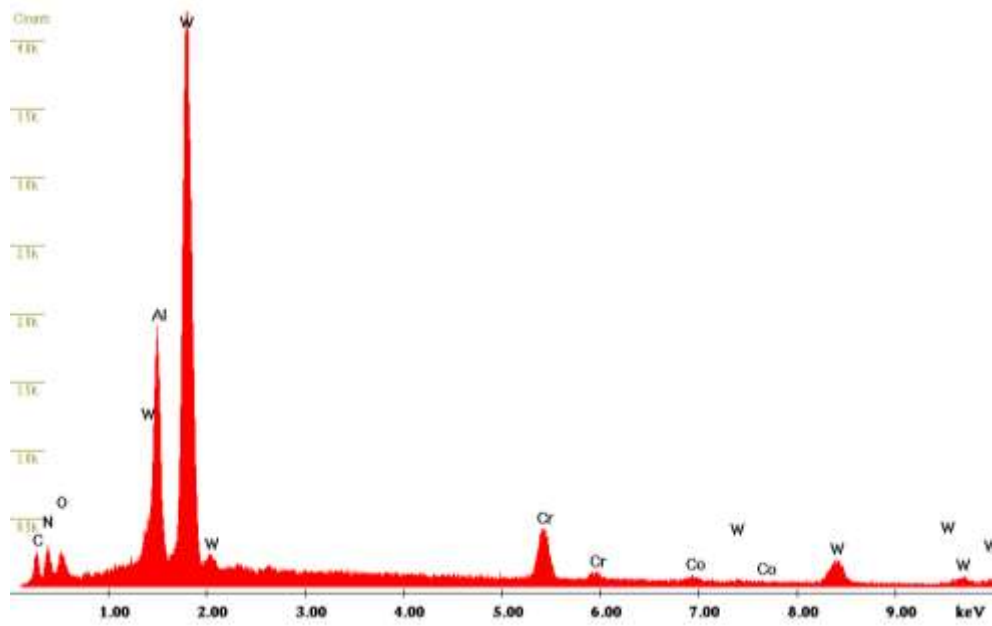
Alívio aresta cortante 4



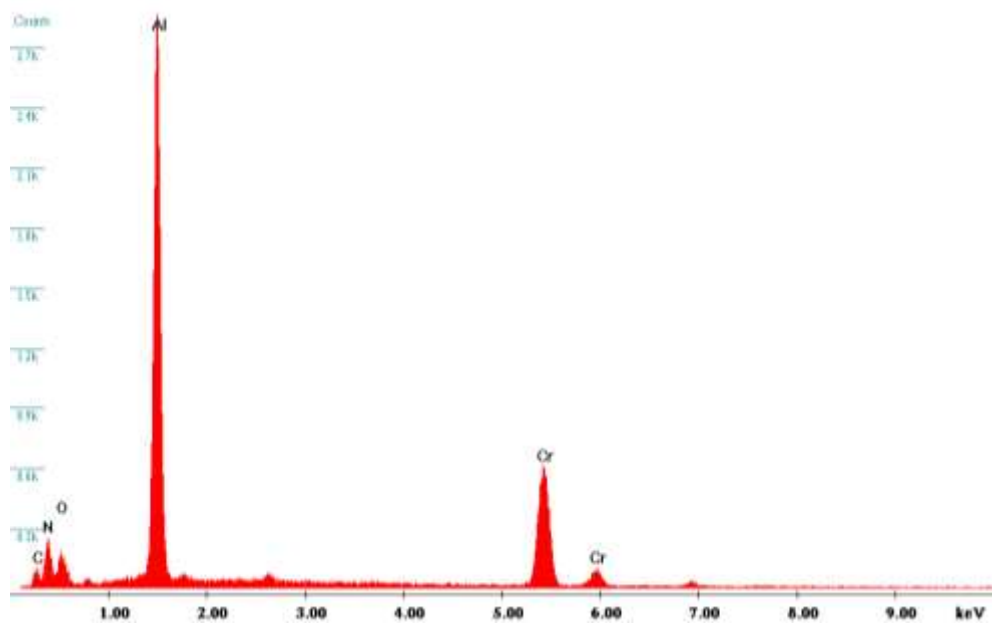
Análise EDS do alívio aresta cortante 4



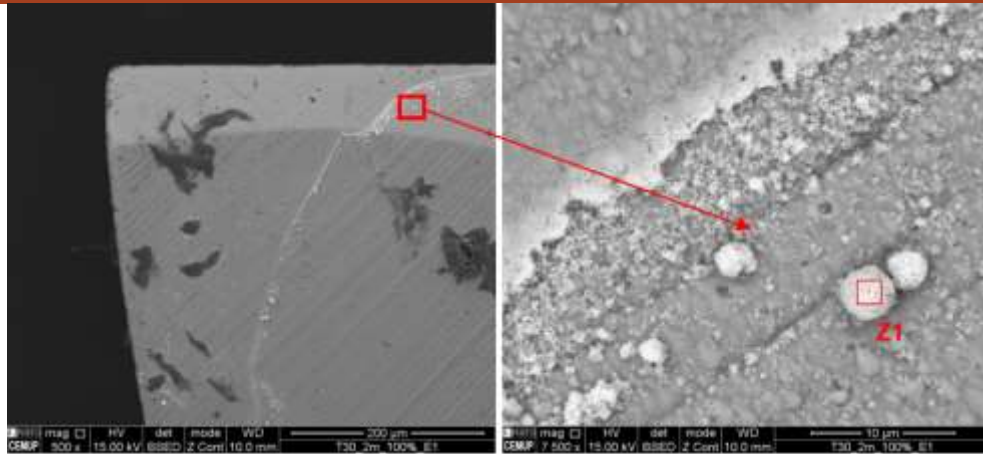
Análise EDS do alívio aresta cortante 4, Z1



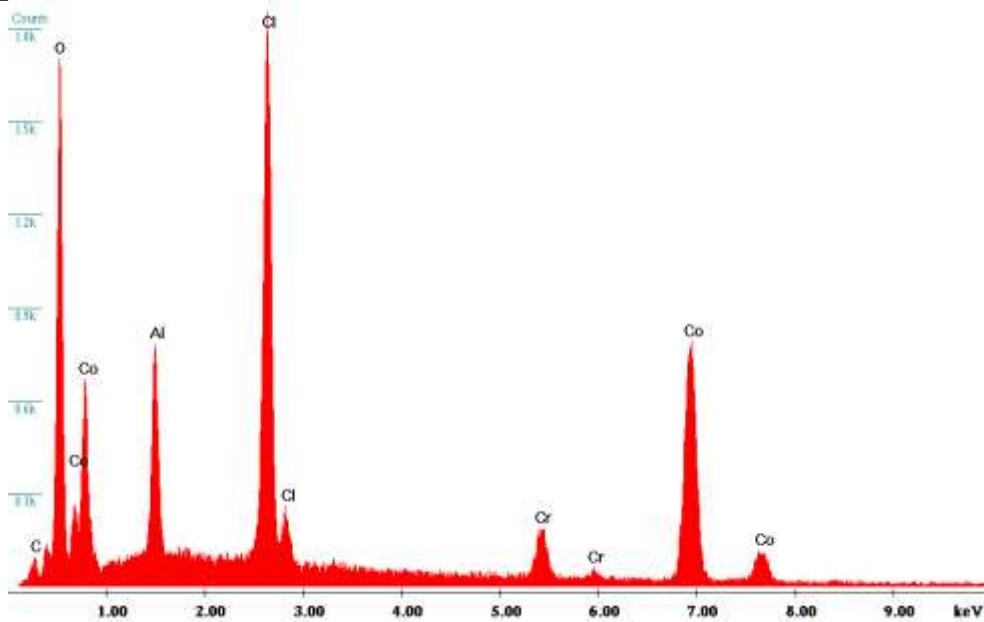
Análise EDS do alívio aresta cortante 4, Z2



Análise EDS da aresta cortante
1



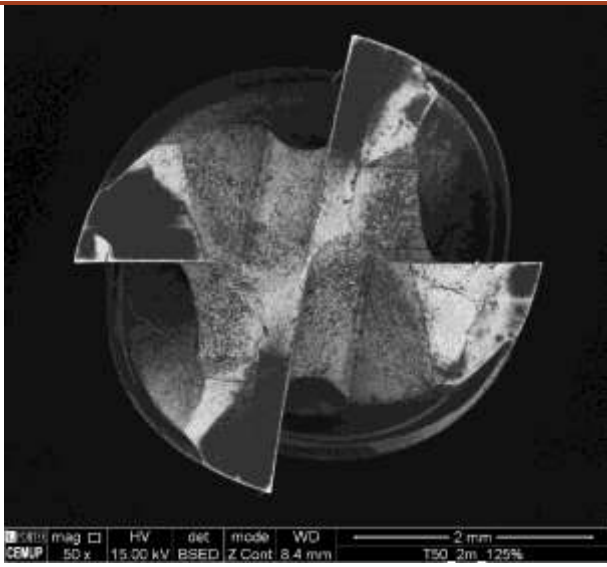
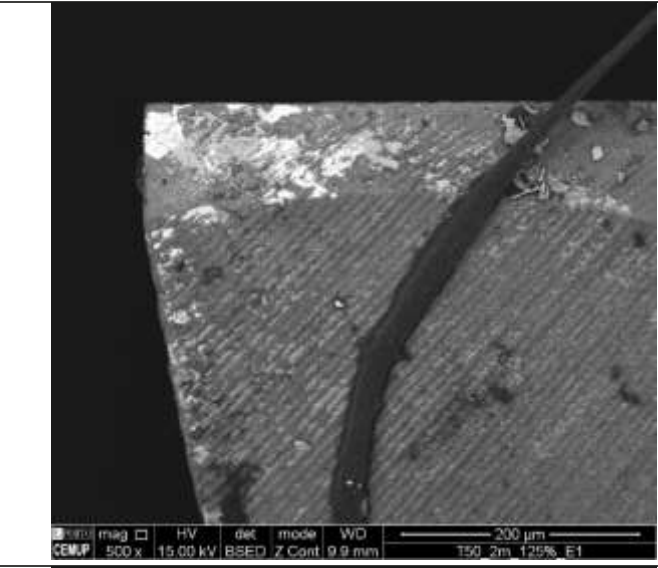
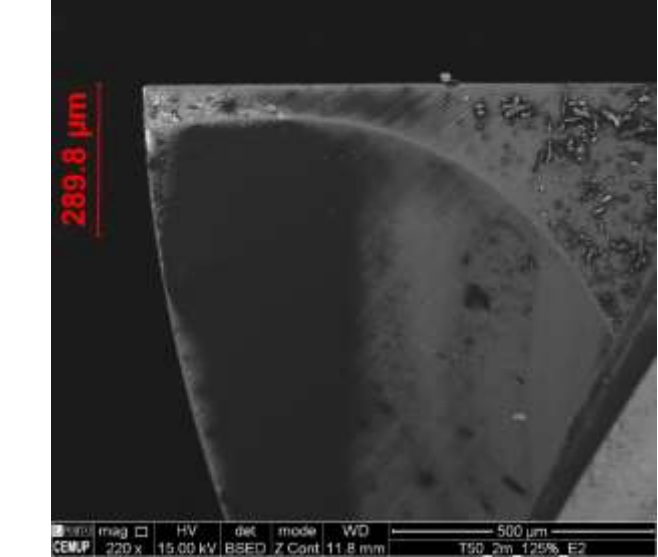
Análise EDS da aresta cortante 1, Z1



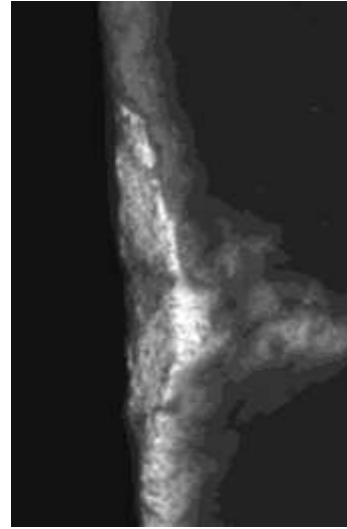
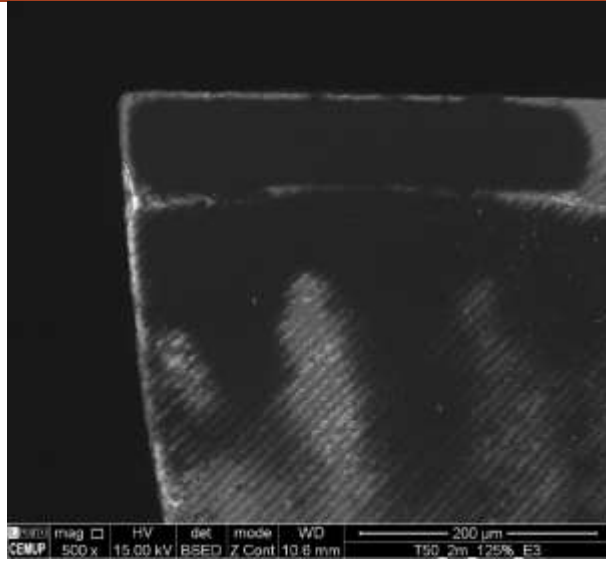
Para esta condição de ensaio, não foi verificado nenhum desgaste significativo, apenas na face de folga primária da aresta de corte 4 foi possível identificar uma pequena zona sem revestimento da ferramenta.

Comparativamente ao Ensaio 1, a redução do comprimento de corte, tal como esperado, traduziu-se num menor desgaste da superfície da ferramenta.

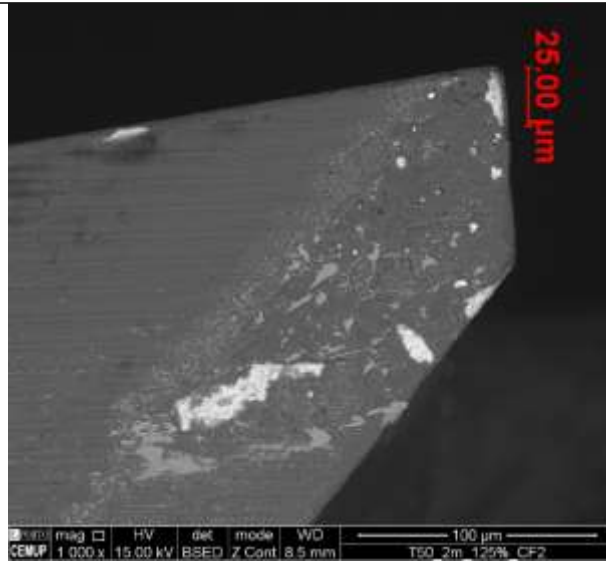
Tabela 41 - Desgaste Dormer S260 Ensaio 3

Ferramenta	Dormer S260	Condição de corte	Ensaio 3
			
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Aresta cortante 1</p>			
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Aresta cortante 2</p>			

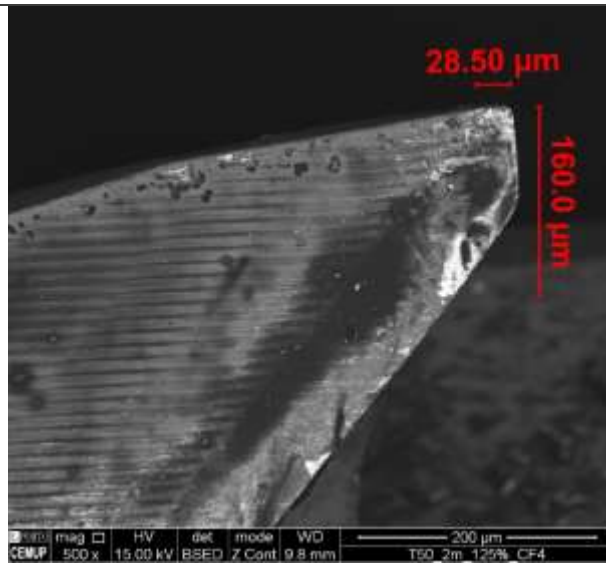
Aresta cortante 3



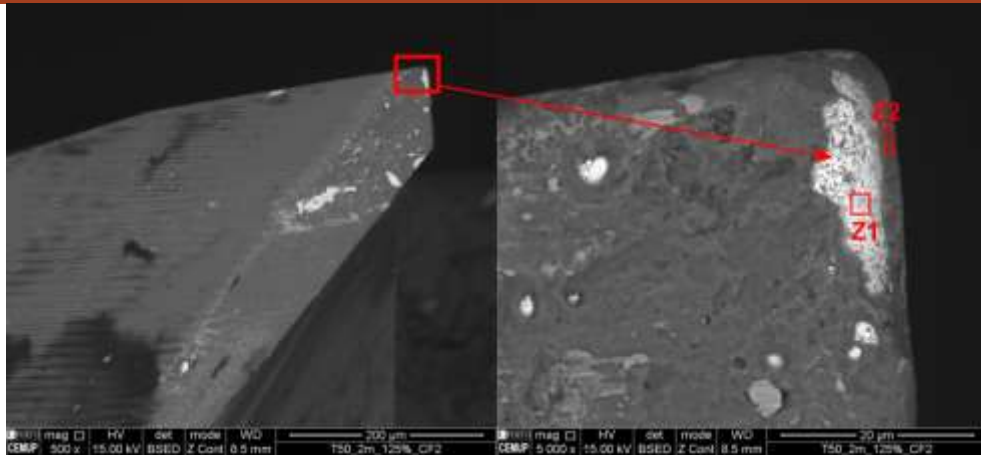
Alívio aresta cortante 2



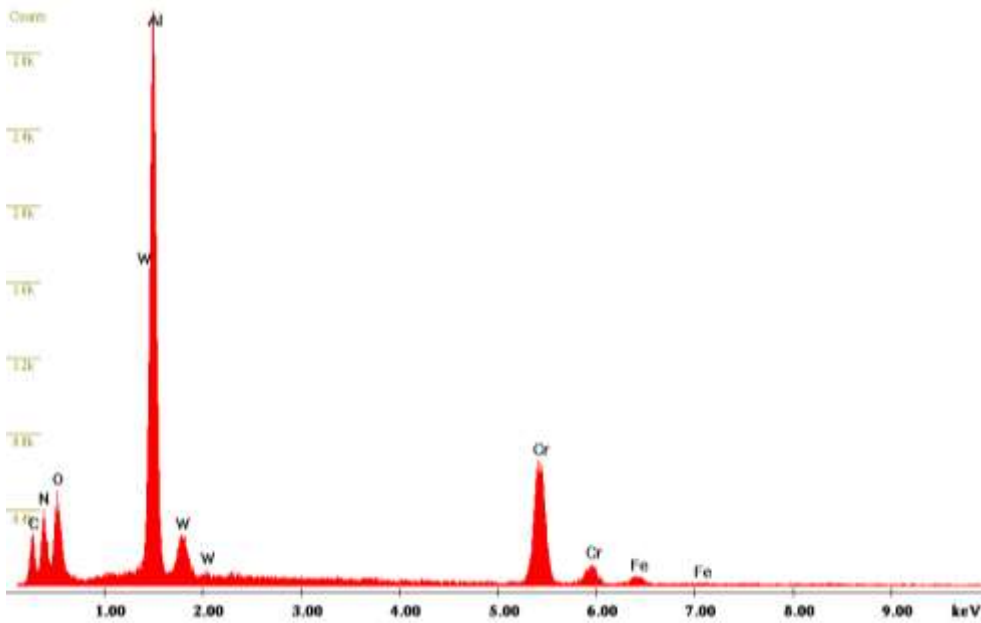
Alívio aresta cortante 4



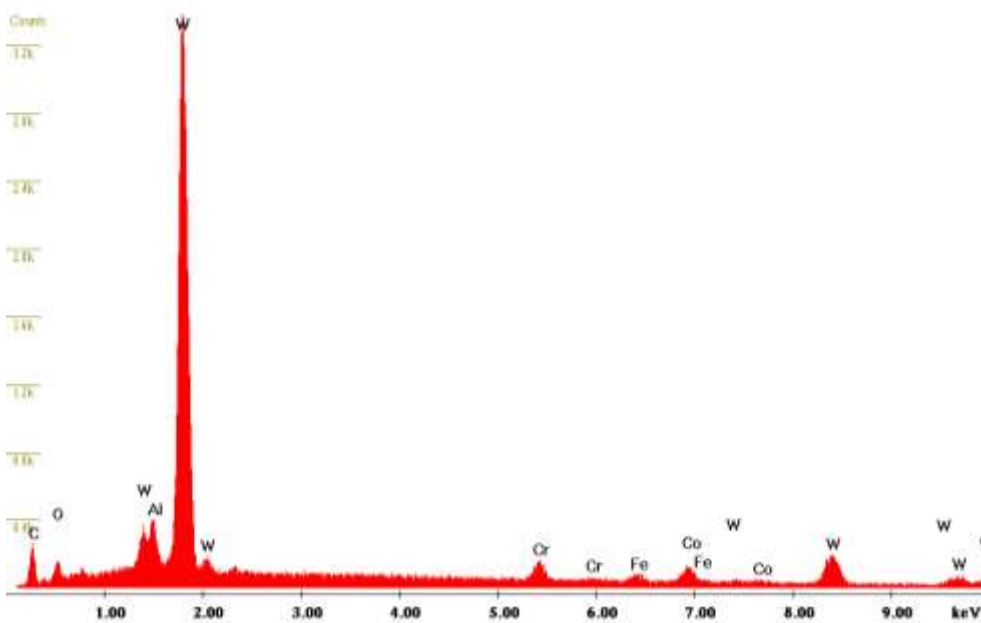
Análise EDS do alívio aresta cortante 2



Análise EDS do alívio aresta cortante 2, Z1

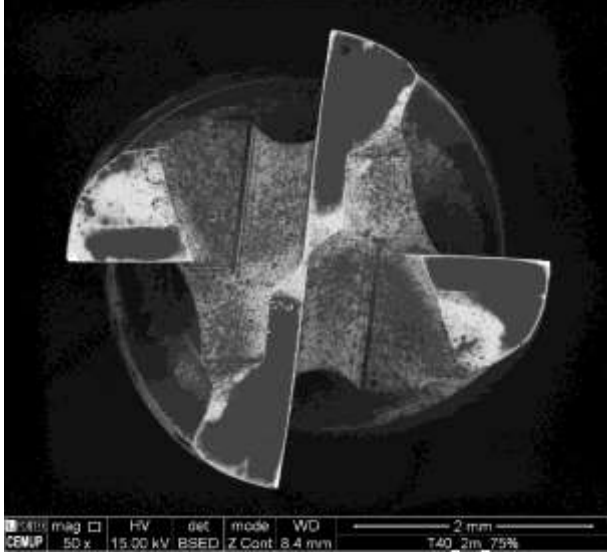
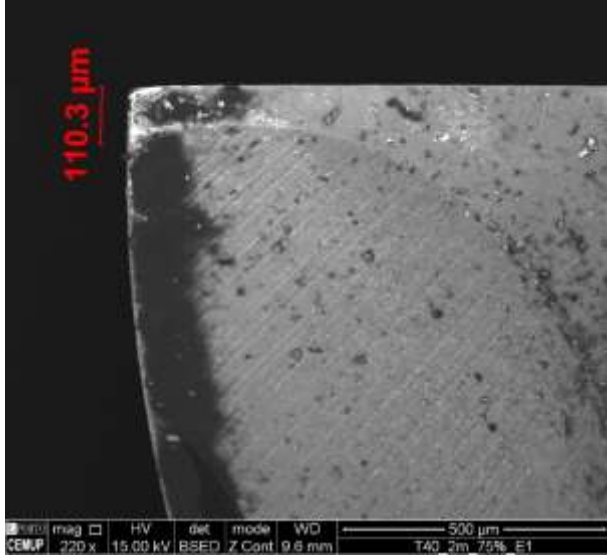


Análise EDS do alívio aresta cortante 2, Z2

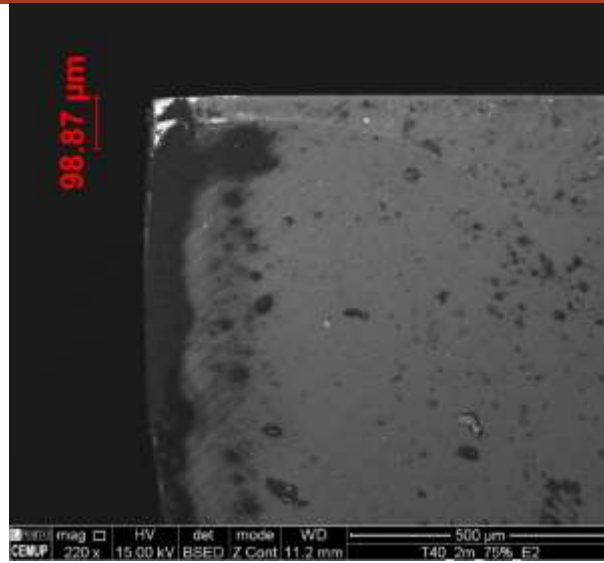


No ensaio 3, foi observado desgaste nos flancos e nas zonas de folga. O aumento do avanço provou ser eficaz no desgaste por adesão, uma vez que nesta análise não foram identificadas partículas de SAF 2205. Na E3, foi possível observar desgaste por entalhe com 0,05 mm de comprimento. Este tipo de desgaste é caracterizado por velocidades de corte e avanços excessivos.

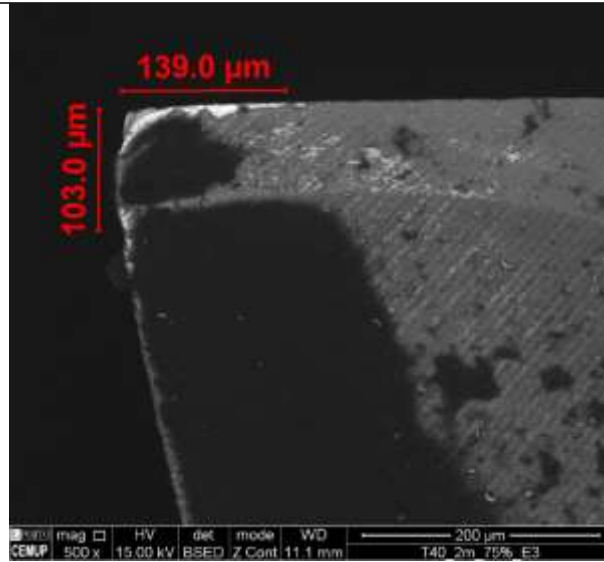
Tabela 42 - Desgaste Dormer S260 Ensaio 4

Ferramenta	Dormer S260	Condição de corte	Ensaio 4
			
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Aresta cortante 1</p>			

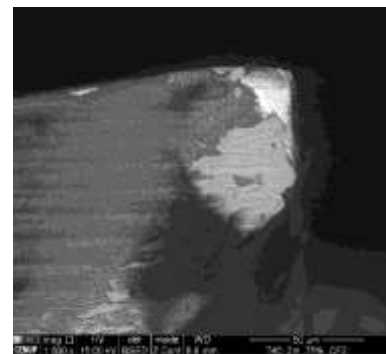
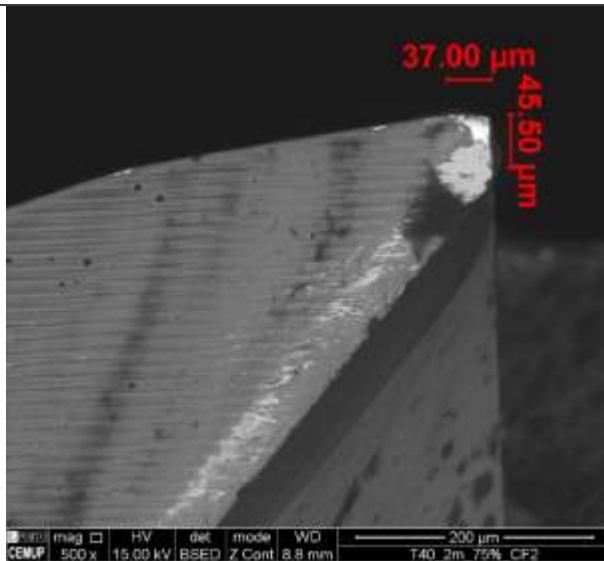
Aresta cortante 2



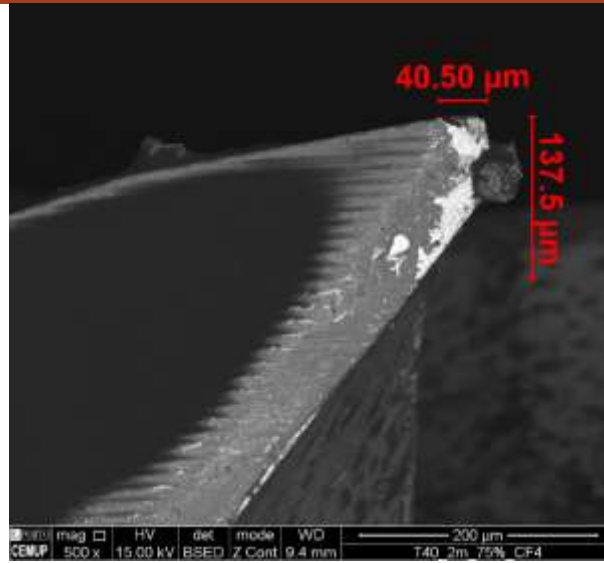
Aresta cortante 3



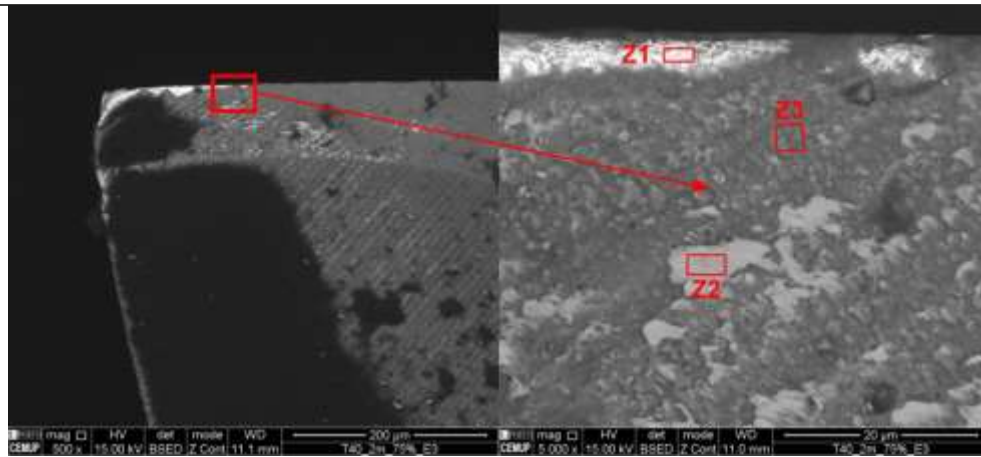
Alívio aresta cortante 2



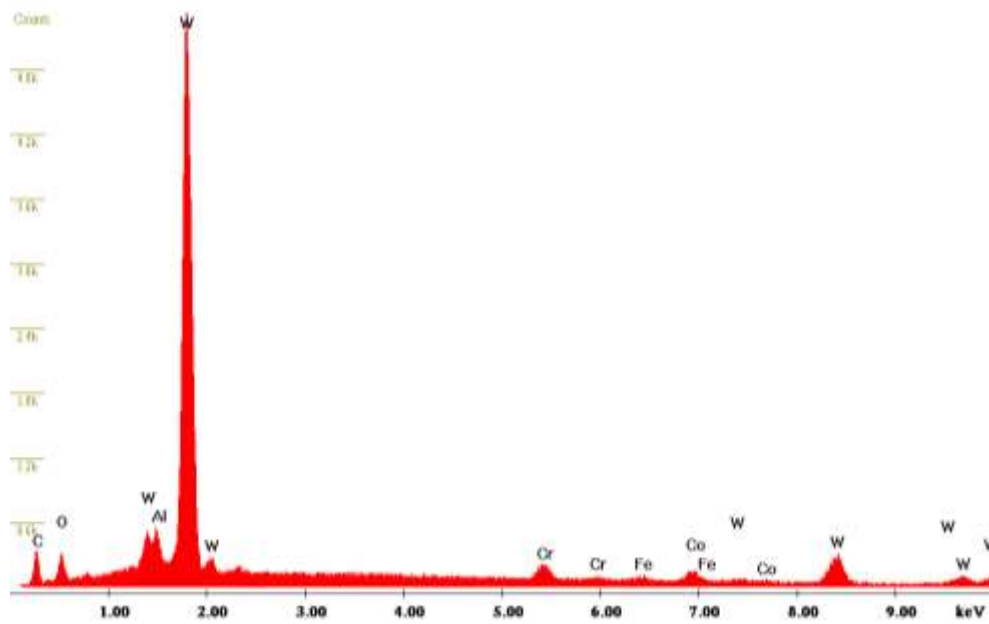
Alívio aresta cortante 4



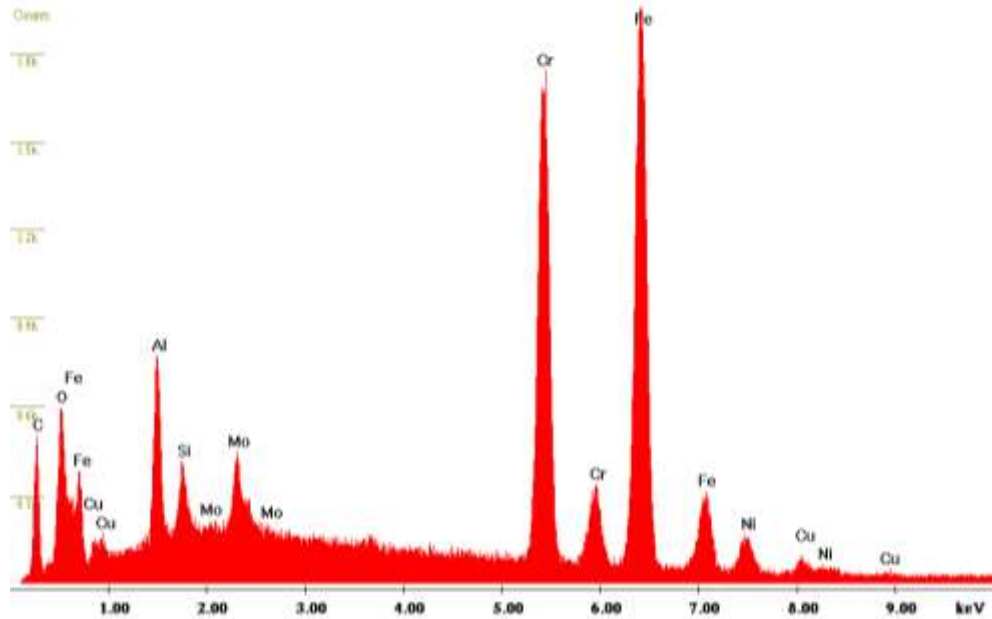
Análise EDS da aresta cortante 3



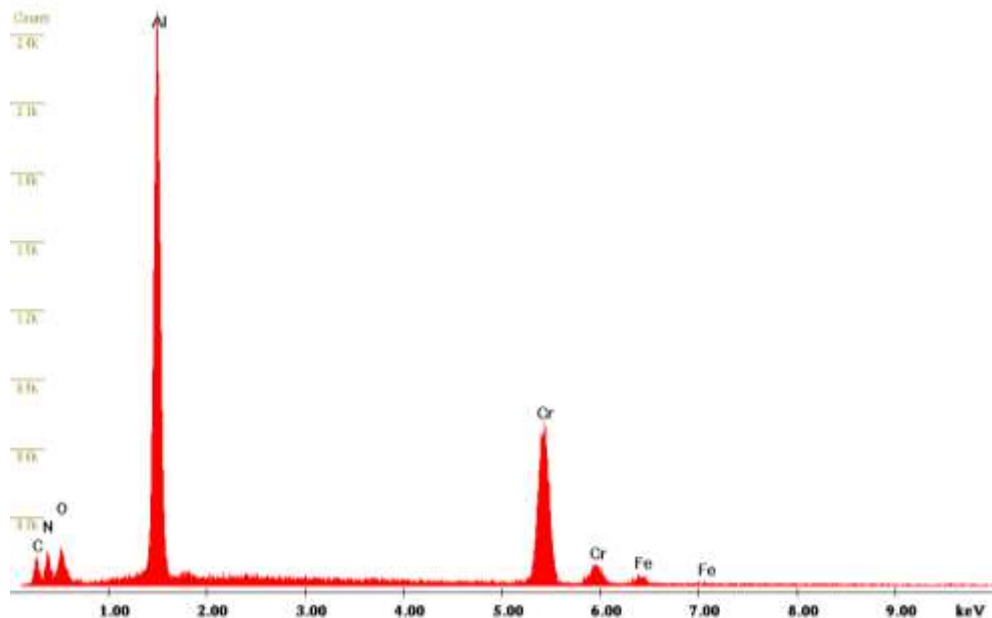
Análise EDS da aresta cortante 3, Z1



Análise EDS da aresta cortante 3, Z2



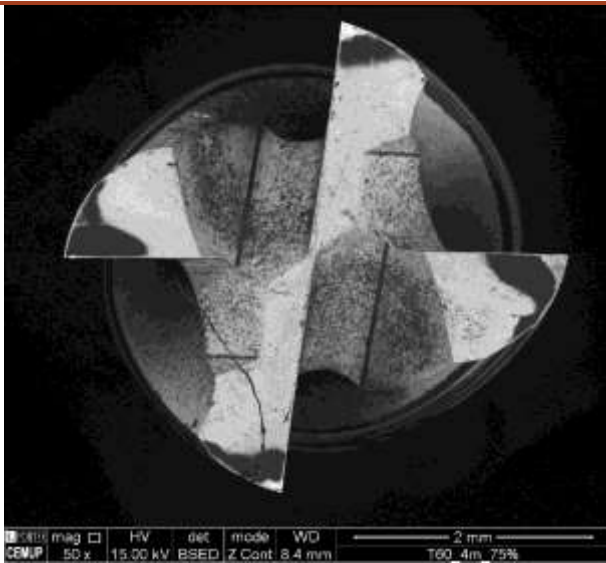
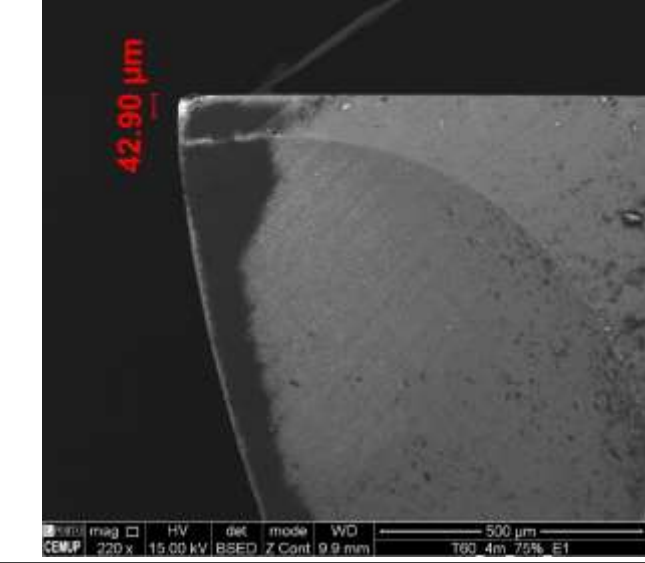
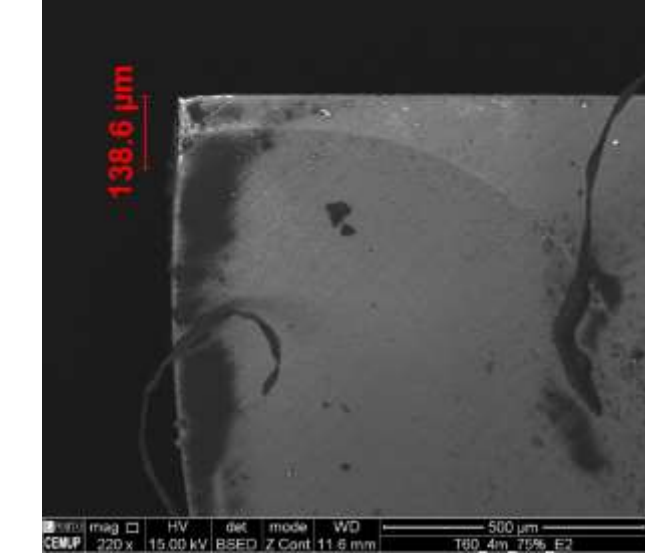
Análise EDS da aresta cortante 3, Z3



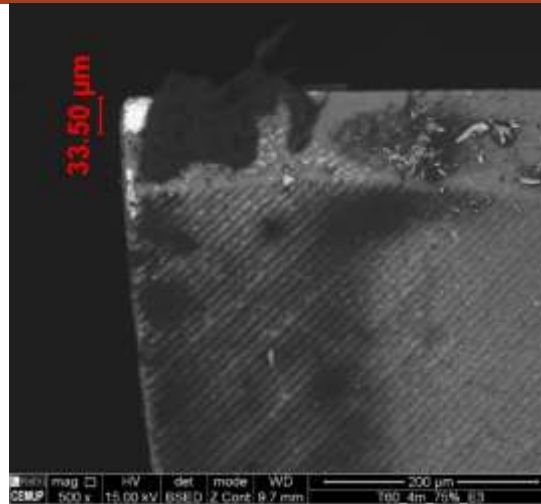
Neste ensaio, a redução do avanço trouxe impacto negativo para a ferramenta. Foram observados fenômenos de adesão significativos, desgaste nos flancos e face de folga.

Na CF2, é possível observar uma grande partícula de material aderido. O aumento significativo da adesão na ferramenta é também provado pelas quebras na zona do raio de ponta da ferramenta, evidentes na E3 e E4.

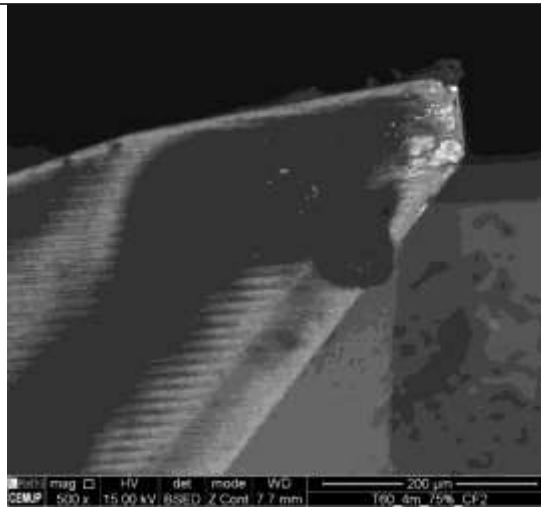
Tabela 43 - Desgaste Dormer S260 Ensaio 5

Ferramenta	Dormer S260	Condição de corte	Ensaio 5
			
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Aresta cortante 1</p>			
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Aresta cortante 2</p>			

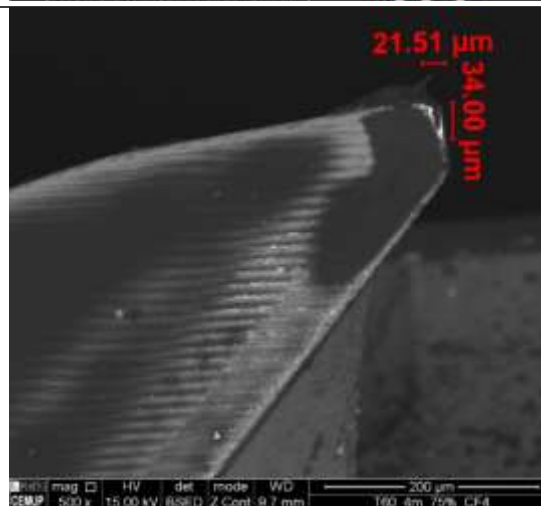
Aresta cortante 3



Alívio aresta cortante 2



Alívio aresta cortante 2

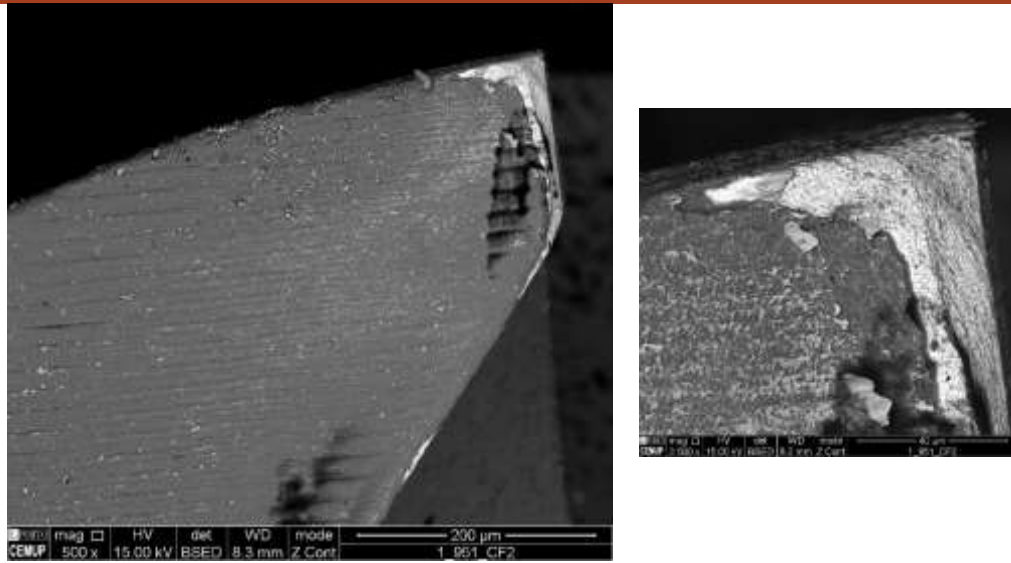


Neste ensaio, era esperado um desgaste superior ao verificado nas condições do ensaio 4, mas tal não ocorreu. A análise das forças de corte no subcapítulo 3.2.3 permitem esclarecer o porquê de não se ter identificado um desgaste maior na ferramenta.

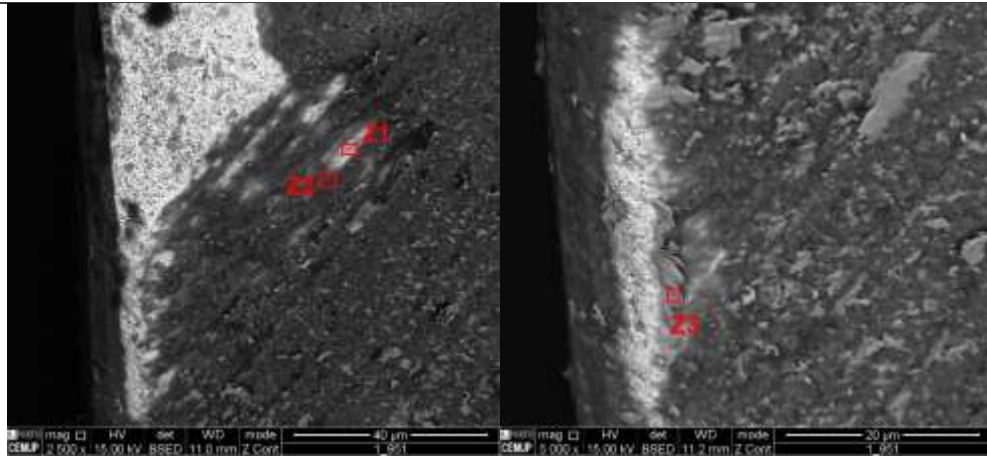
Tabela 44 - Desgaste HPMT #951 Ensaio 1

Ferramenta	HPMT #951	Condição de corte	Ensaio 1
Aresta cortante 1			
Aresta cortante 2			
Alívio aresta cortante 1			

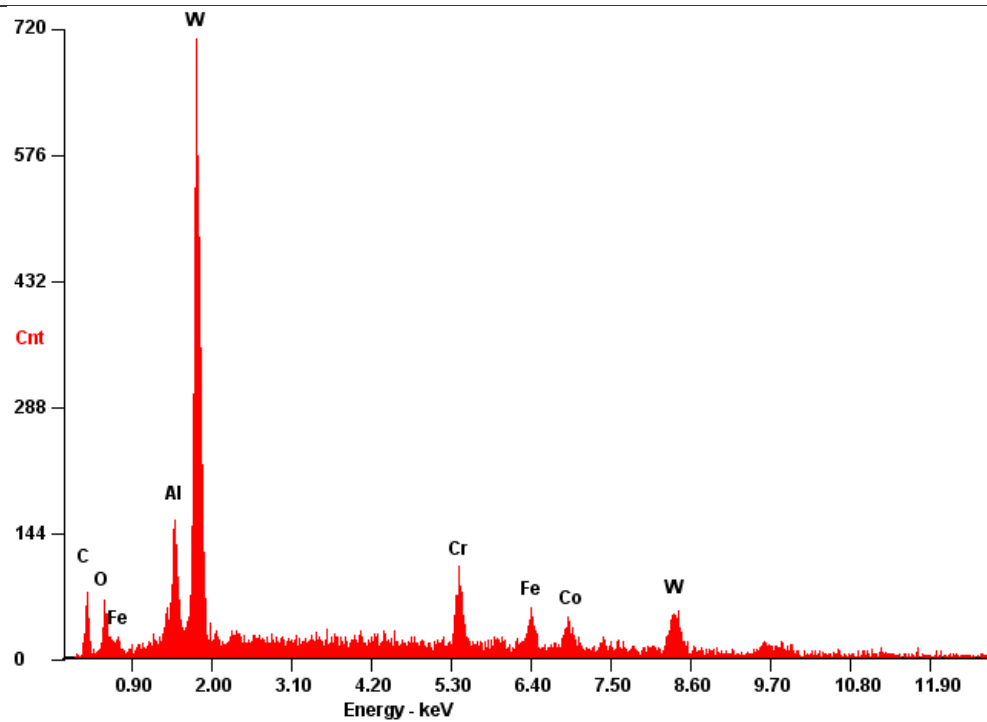
Alívio aresta cortante 2

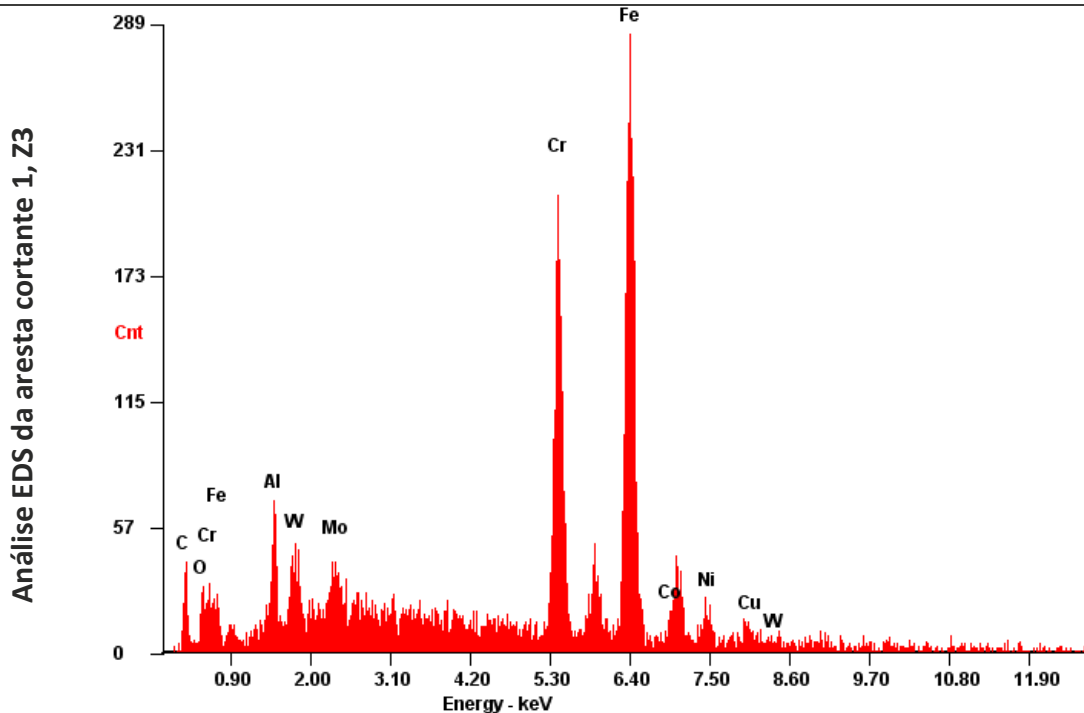
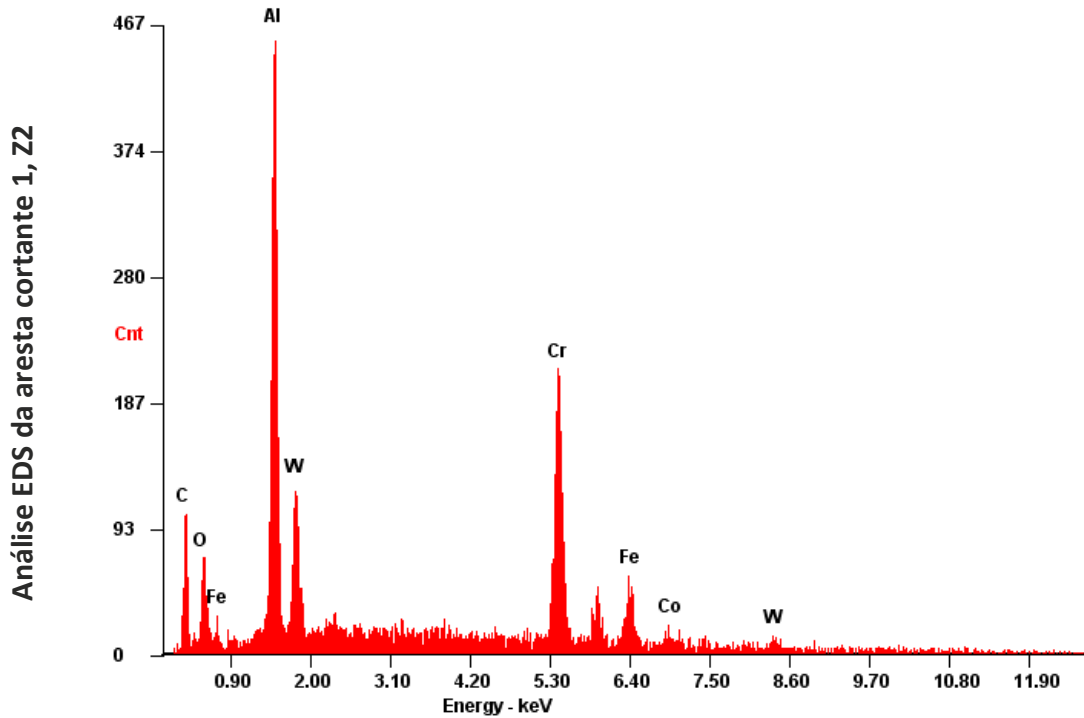


Análise EDS da aresta cortante 1



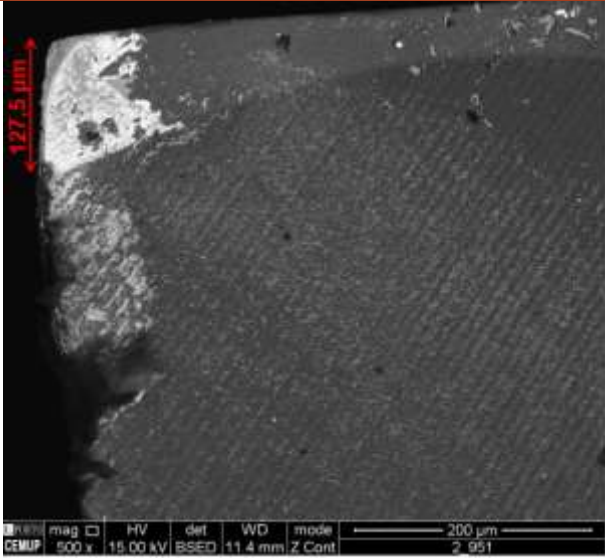
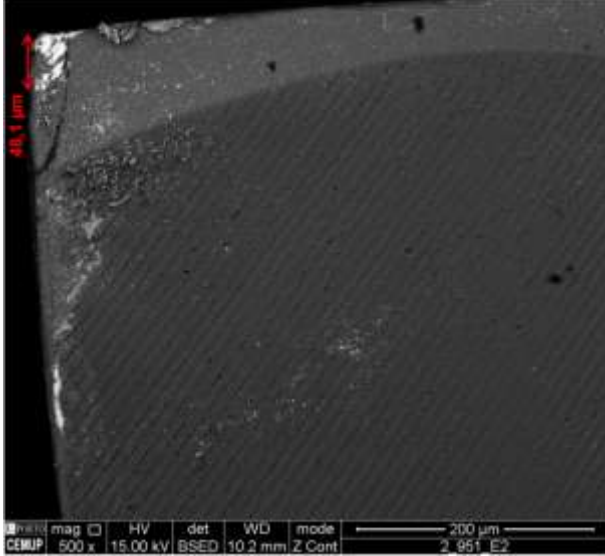
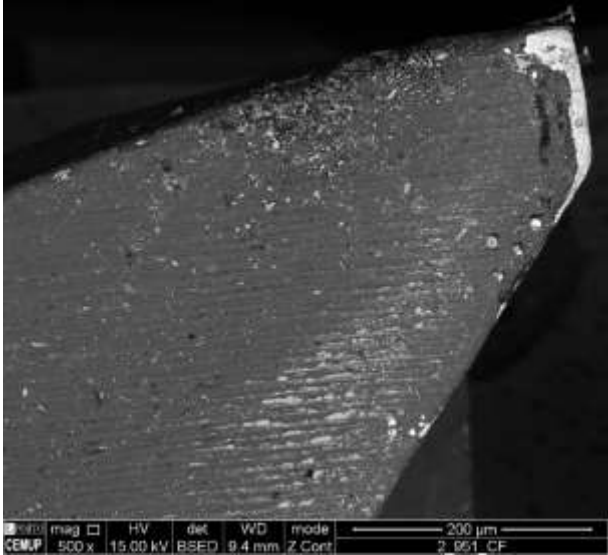
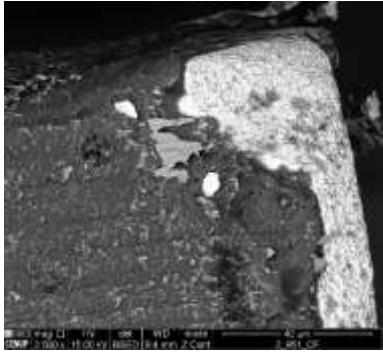
Análise EDS da aresta cortante 1, Z1



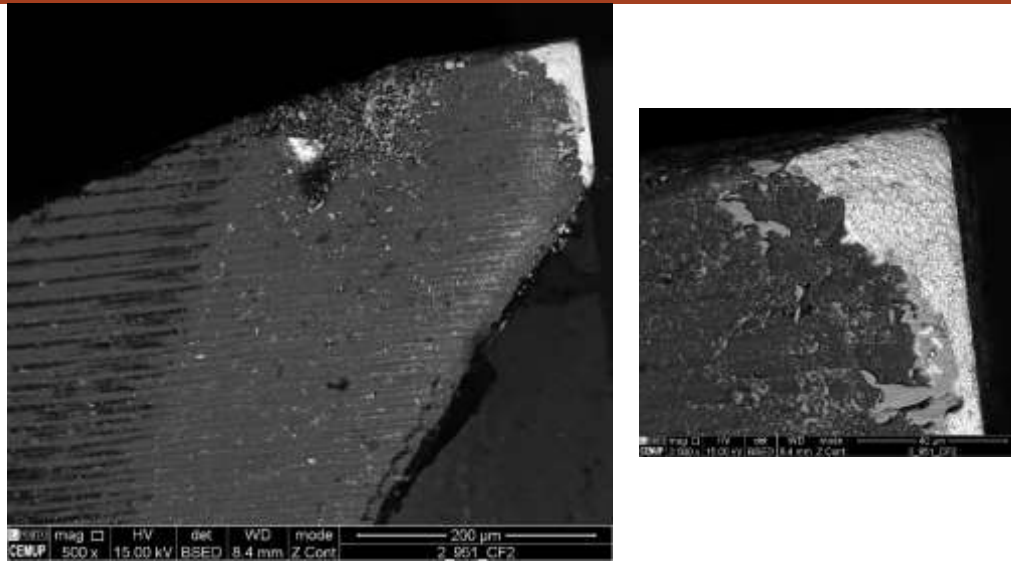


Ao contrário do revestimento da Dormer S260, o da HPMT #951 aparenta ser mais coeso com o substrato da ferramenta, ao invés de quebrar/lascar, este aparenta sofrer um desgaste mais uniforme, sendo possível identificar zonas com revestimento, outras sem revestimento e entre ambas uma zona de transição onde o revestimento sofreu abrasão e está mais fino. Nestas condições de corte, também foi observada bastante adesão. Na imagem da CF2 é possível observar uma fratura lateral na lâmina.

Tabela 45 - Desgaste HPMT #951 Ensaio 2

Ferramenta	HPMT #951	Condição de corte	Ensaio 2
Aresta cortante 1			
			
Alívio aresta cortante 1			
			

Alívio aresta cortante 2

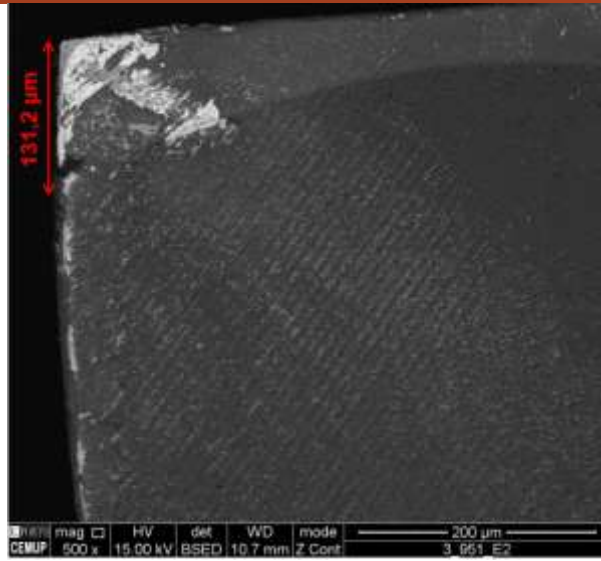


A redução do comprimento de corte beneficia a condição da ferramenta. Neste ensaio, verificou-se menor desgaste no revestimento, menor quantidade de material aderido e não são visíveis fraturas na ferramenta.

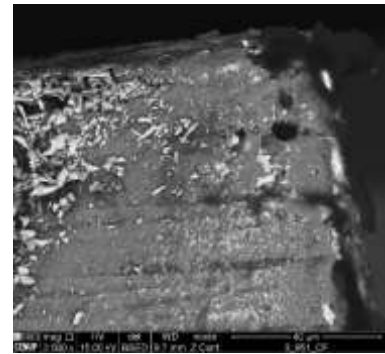
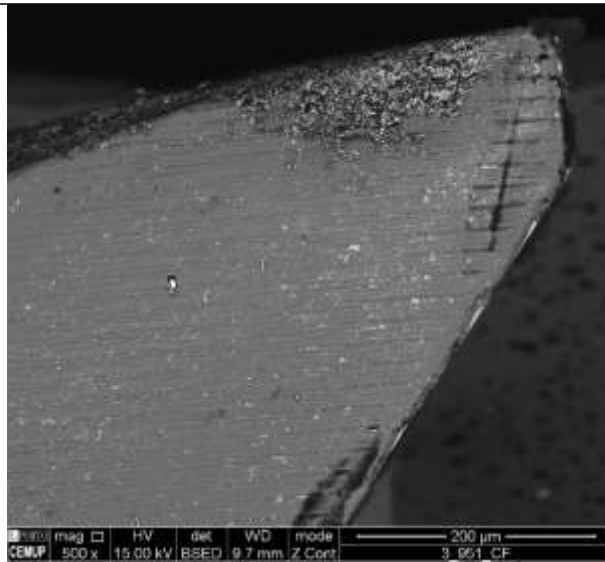
Tabela 46 - Desgaste HPMT #951 Ensaio 3

Ferramenta	HPMT #951	Condição de corte	Ensaio 3
Aresta cortante 1			

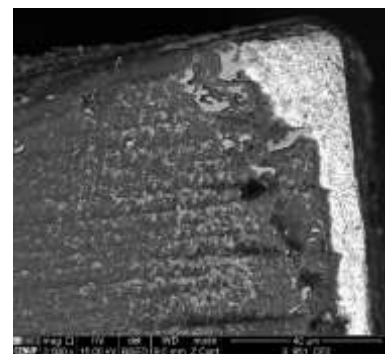
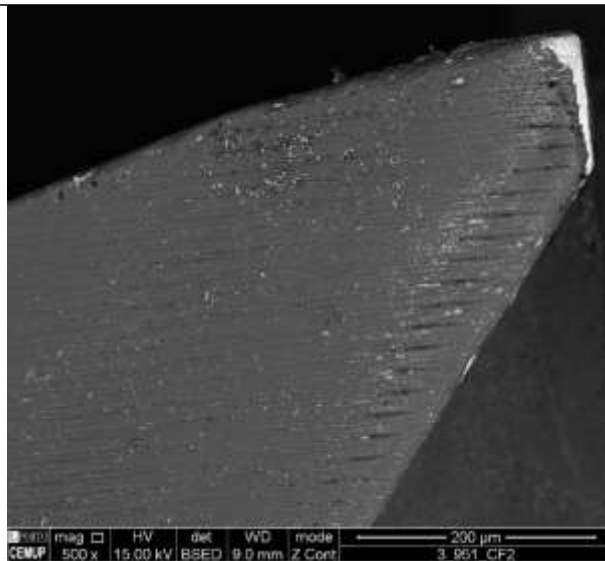
Aresta cortante 2



Alívio aresta cortante 1

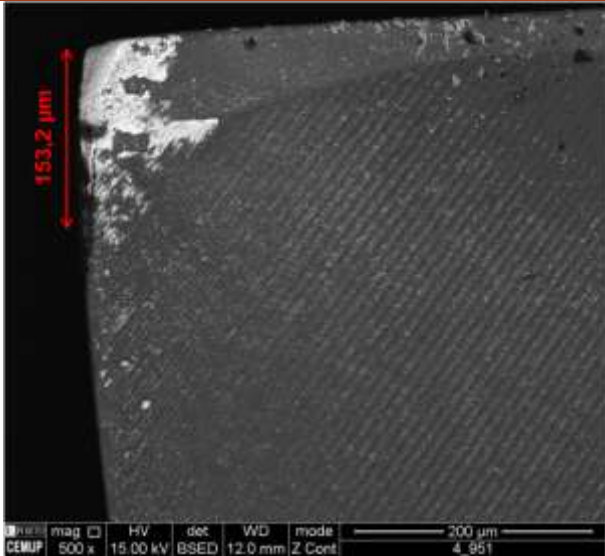
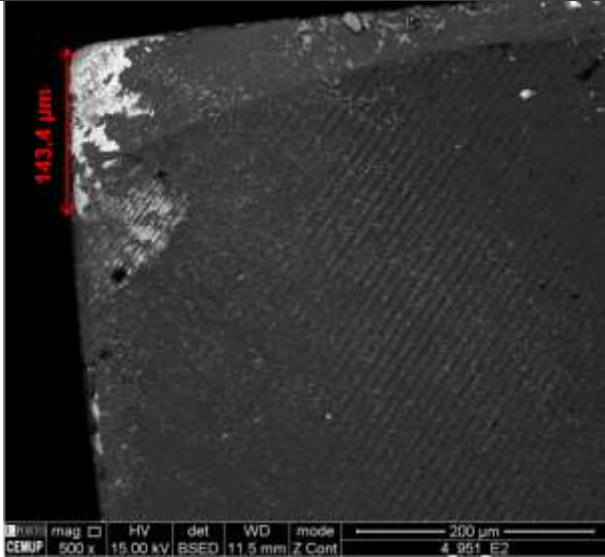


Alívio aresta cortante 2

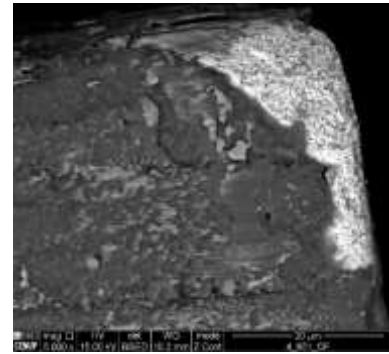
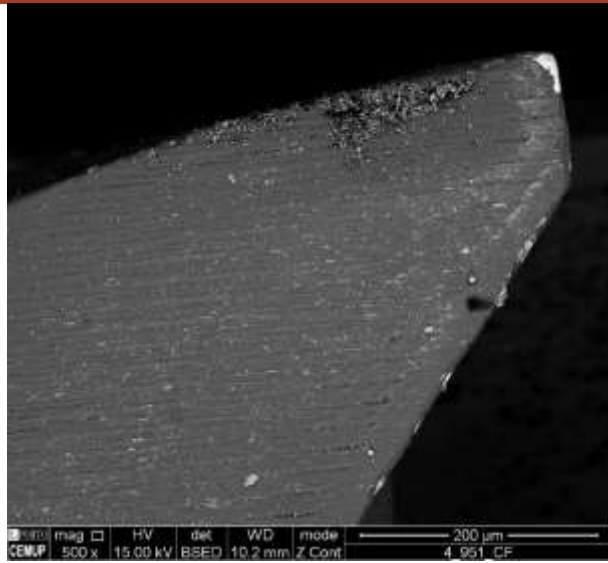


Nestas condições de ensaio, verificou-se um desgaste ligeiramente inferior ao ensaio com avanço a 100%. A adesão de material na ferramenta foi muito baixa. A presença de contaminantes na face de folga das arestas, torna possível observar sulcos provocados, talvez, pelo rebolo que faz a retificação da ferramenta. Estas marcas de maquinagem, indicam que a preparação da ferramenta pelo fabricante pode não ser a mais cuidada.

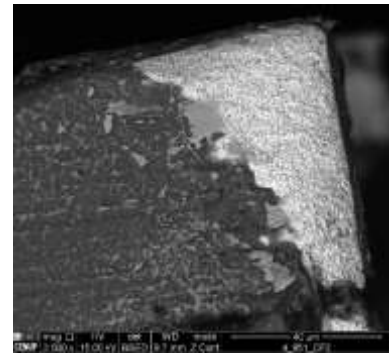
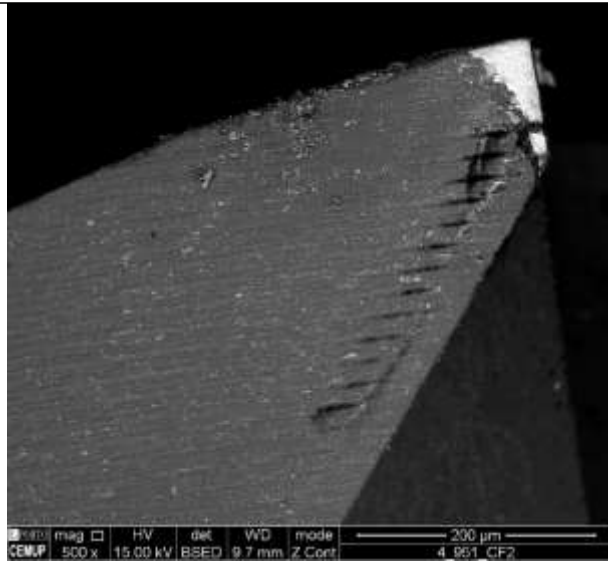
Tabela 47 - Desgaste HPMT #951 Ensaio 4

Ferramenta	HPMT #951	Condição de corte	Ensaio 4
Aresta cortante 1			
Aresta cortante 2			

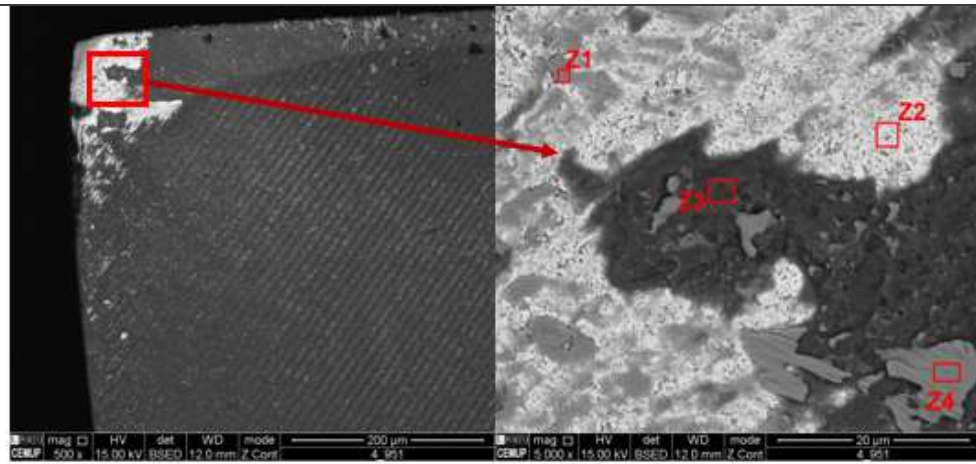
Alívio aresta cortante 1



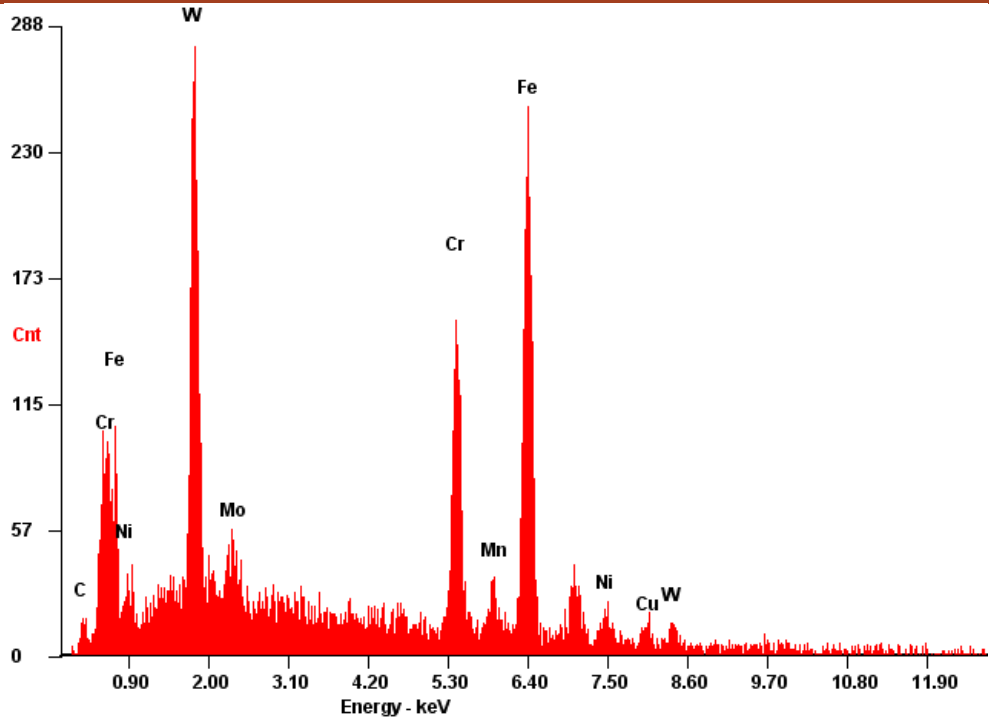
Alívio aresta cortante 2



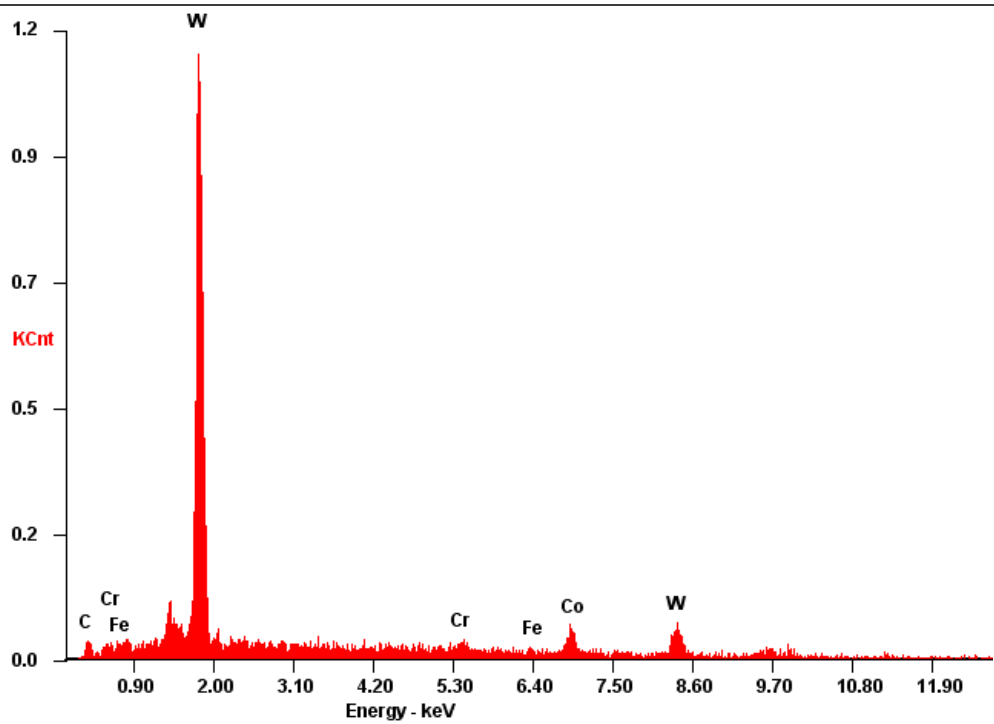
Análise EDS da aresta cortante 1

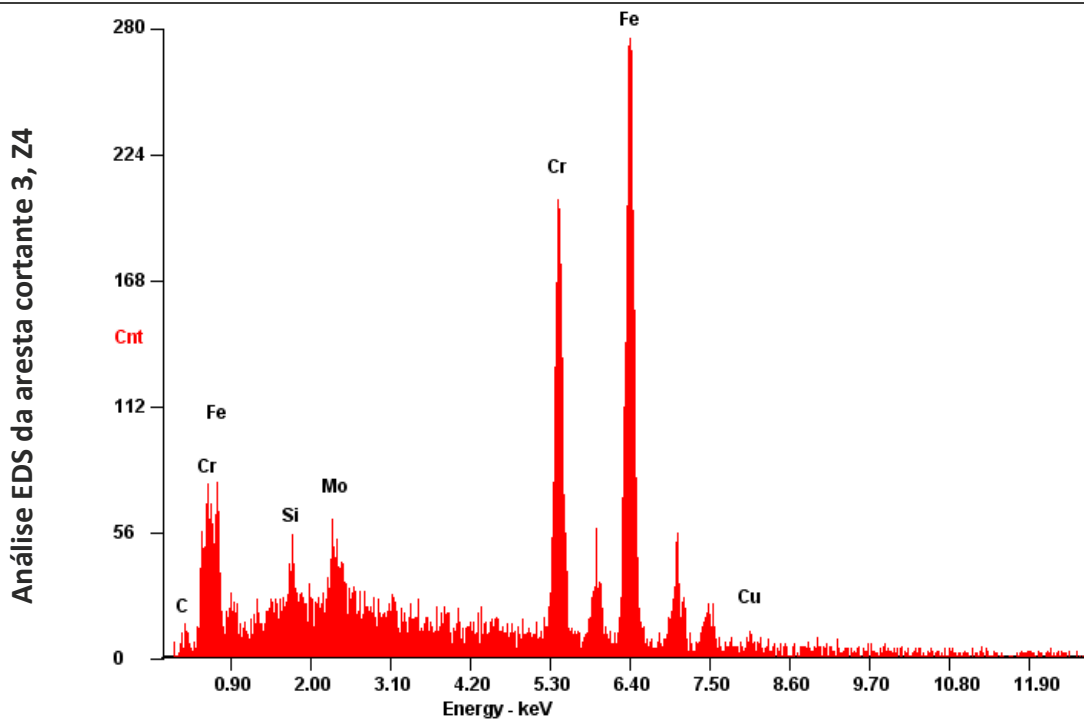
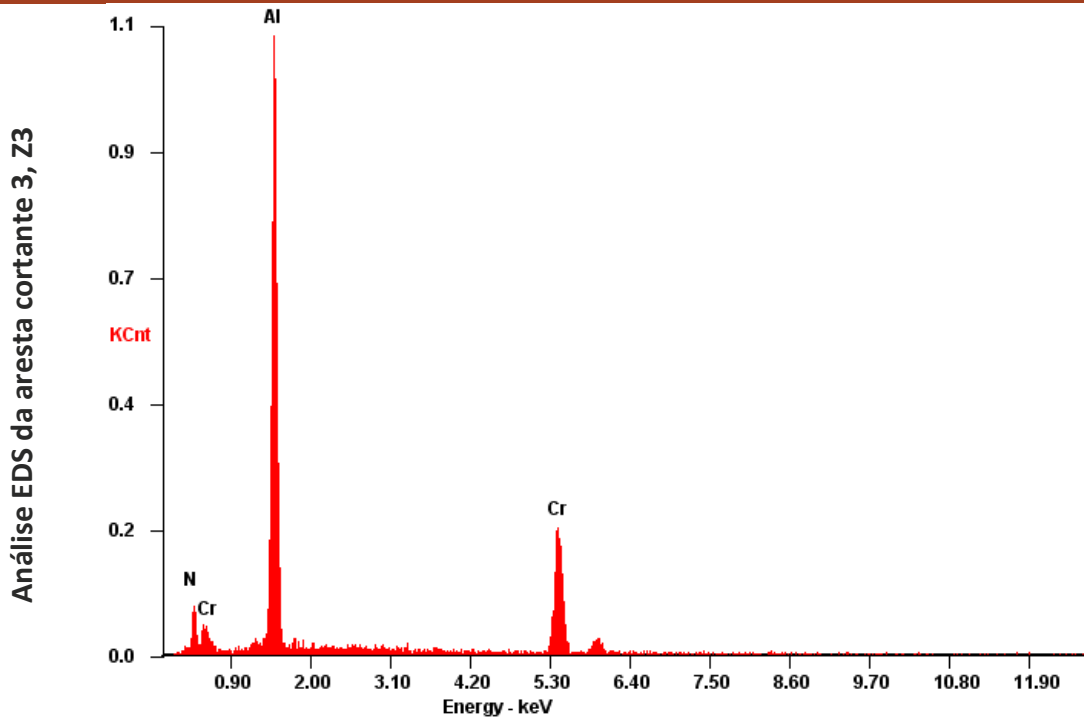


Análise EDS da aresta cortante 1, Z1



Análise EDS da aresta cortante 3, Z2





A redução da velocidade de avanço para 75% do valor originalmente recomendado, resultou em muita adesão. Através da análise EDS, foram observadas partículas de SAF 2205 aderidas ao substrato e revestimento da ferramenta. O desgaste dos flancos foi superior aos restantes ensaios de percursos curtos e o desgaste na face de folga foi semelhante.

Os resultados das análises por SEM, e complemento EDS, comprovam o seguinte:

- Nas ferramentas DORMER S260, o principal mecanismo de desgaste é a adesão. O material adere à ferramenta e, por consequência, ocorre o rompimento do revestimento;
- Nas ferramentas HPMT #951, o principal mecanismo de desgaste é a adesão, mas também foram identificados fenômenos de abrasão. O material adere ao revestimento, mas, ao invés de provocar a quebra do mesmo, é provocada abrasão e, consequente, desgaste do AlCrN. Na imagem da E1 (EDS), Tabela 44, este mecanismo de desgaste é visível, ou seja, a identificação de W, Co, Al, Cr na mesma imagem, mostra que a película de revestimento está mais fina e já é possível identificar os elementos característicos do substrato;
- O revestimento das HPMT é mais coeso que os das Dormer, mas menos resistente;
- A redução do avanço para 75% é prejudicial para a ferramenta, pois potencia o desgaste por adesão e, no caso da Dormer S260, Tabela 42, levou a que pontas da ferramenta lascassem;
- Para os ensaios a 125% a adesão foi mínima, contudo o aumento do esforço na ferramenta levou, no caso da Dormer S260, ao surgimento de um entalhe, Tabela 41, característico de velocidade de avanço excessiva;
- O aumento do comprimento de corte leva ao surgimento de maior desgaste da ferramenta, incluindo no seu substrato. No ensaio de 4 metros, 100% de avanço da ferramenta HPMT, Tabela 44; uma das arestas fraturou na zona onde o revestimento tinha desaparecido. Este fenômeno mostra a vulnerabilidade do metal duro da ferramenta, quando desprovido de revestimento.

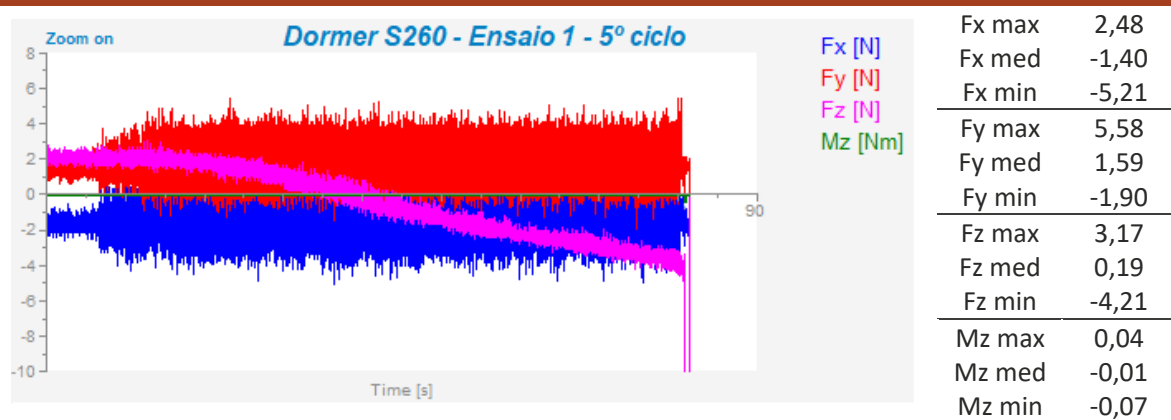
No geral, as ferramentas Dormer S260 apresentaram melhores prestações no que toca ao desgaste.

3.2.3 Resultado das forças de corte

Os resultados das forças de corte para as ferramentas utilizadas estão apresentados entre a Tabela 48 e a Tabela 56. Nestas tabelas são apresentadas as forças de corte F_x , F_y e F_z , e o binário M_z registados na maquinação. Cada ciclo corresponde a uma passagem por toda a face da peça. Na comparação entre as forças registadas nos diferentes ensaios são utilizadas as amplitudes F_x e F_y

Tabela 48 - Resultados das forças de corte com a ferramenta Dormer S260 Ensaio 1

Gráfico de forças		Resultados
<p><i>Dormer S260 - Ensaio 1 - 1º ciclo</i></p>	<p>Fx [N] Fy [N] Fz [N] Mz [Nm]</p>	<p>Fx max 2,35 Fx med -1,78 Fx min -6,68 Fy max 7,11 Fy med 1,65 Fy min -2,16 Fz max 2,78 Fz med -3,23 Fz min -8,73 Mz max 0,05 Mz med -0,01 Mz min -0,07</p>
<p><i>Dormer S260 - Ensaio 1 - 2º ciclo</i></p>	<p>Fx [N] Fy [N] Fz [N] Mz [Nm]</p>	<p>Fx max 1,65 Fx med -1,91 Fx min -5,59 Fy max 5,39 Fy med 1,59 Fy min -1,90 Fz max 2,78 Fz med -2,33 Fz min -7,18 Mz max 0,05 Mz med -0,01 Mz min -0,18</p>
<p><i>Dormer S260 - Ensaio 1 - 3º ciclo</i></p>	<p>Fx [N] Fy [N] Fz [N] Mz [Nm]</p>	<p>Fx max 2,03 Fx med -1,65 Fx min -5,59 Fy max 5,14 Fy med 1,27 Fy min -2,03 Fz max 3,04 Fz med -0,13 Fz min -4,59 Mz max 0,06 Mz med -0,01 Mz min -0,07</p>
<p><i>Dormer S260 - Ensaio 1 - 4º ciclo</i></p>	<p>Fx [N] Fy [N] Fz [N] Mz [Nm]</p>	<p>Fx max 2,10 Fx med -1,53 Fx min -5,53 Fy max 5,46 Fy med 1,59 Fy min -1,84 Fz max 2,72 Fz med -1,04 Fz min -5,24 Mz max 0,05 Mz med -0,01 Mz min -0,06</p>



A ligeira ondulação de Fx e Fy no primeiro ciclo indica que a face a maquinar não estaria totalmente perpendicular à ferramenta. A média das amplitudes das forças de corte foram Fx – 7,55 N e Fy – 7,29 N.

Tabela 49 - Resultados das forças de corte com a ferramenta Dormer S260 Ensaio 2

Gráfico de forças		Resultados																								
		<table border="1"> <tr><td>Fx max</td><td>2,86</td></tr> <tr><td>Fx med</td><td>-1,72</td></tr> <tr><td>Fx min</td><td>-5,85</td></tr> <tr><td>Fy max</td><td>6,41</td></tr> <tr><td>Fy med</td><td>1,52</td></tr> <tr><td>Fy min</td><td>-2,60</td></tr> <tr><td>Fz max</td><td>2,72</td></tr> <tr><td>Fz med</td><td>-0,58</td></tr> <tr><td>Fz min</td><td>-4,01</td></tr> <tr><td>Mz max</td><td>0,05</td></tr> <tr><td>Mz med</td><td>-0,01</td></tr> <tr><td>Mz min</td><td>-0,06</td></tr> </table>	Fx max	2,86	Fx med	-1,72	Fx min	-5,85	Fy max	6,41	Fy med	1,52	Fy min	-2,60	Fz max	2,72	Fz med	-0,58	Fz min	-4,01	Mz max	0,05	Mz med	-0,01	Mz min	-0,06
Fx max	2,86																									
Fx med	-1,72																									
Fx min	-5,85																									
Fy max	6,41																									
Fy med	1,52																									
Fy min	-2,60																									
Fz max	2,72																									
Fz med	-0,58																									
Fz min	-4,01																									
Mz max	0,05																									
Mz med	-0,01																									
Mz min	-0,06																									
		<table border="1"> <tr><td>Fx max</td><td>2,16</td></tr> <tr><td>Fx med</td><td>-1,72</td></tr> <tr><td>Fx min</td><td>-5,09</td></tr> <tr><td>Fy max</td><td>5,39</td></tr> <tr><td>Fy med</td><td>1,46</td></tr> <tr><td>Fy min</td><td>-2,28</td></tr> <tr><td>Fz max</td><td>4,01</td></tr> <tr><td>Fz med</td><td>2,20</td></tr> <tr><td>Fz min</td><td>-0,19</td></tr> <tr><td>Mz max</td><td>0,06</td></tr> <tr><td>Mz med</td><td>0,00</td></tr> <tr><td>Mz min</td><td>-0,05</td></tr> </table>	Fx max	2,16	Fx med	-1,72	Fx min	-5,09	Fy max	5,39	Fy med	1,46	Fy min	-2,28	Fz max	4,01	Fz med	2,20	Fz min	-0,19	Mz max	0,06	Mz med	0,00	Mz min	-0,05
Fx max	2,16																									
Fx med	-1,72																									
Fx min	-5,09																									
Fy max	5,39																									
Fy med	1,46																									
Fy min	-2,28																									
Fz max	4,01																									
Fz med	2,20																									
Fz min	-0,19																									
Mz max	0,06																									
Mz med	0,00																									
Mz min	-0,05																									
		<table border="1"> <tr><td>Fx max</td><td>1,91</td></tr> <tr><td>Fx med</td><td>-2,03</td></tr> <tr><td>Fx min</td><td>-5,53</td></tr> <tr><td>Fy max</td><td>5,77</td></tr> <tr><td>Fy med</td><td>1,59</td></tr> <tr><td>Fy min</td><td>-2,16</td></tr> <tr><td>Fz max</td><td>3,49</td></tr> <tr><td>Fz med</td><td>2,07</td></tr> <tr><td>Fz min</td><td>0,13</td></tr> <tr><td>Mz max</td><td>0,04</td></tr> <tr><td>Mz med</td><td>-0,01</td></tr> <tr><td>Mz min</td><td>-0,07</td></tr> </table>	Fx max	1,91	Fx med	-2,03	Fx min	-5,53	Fy max	5,77	Fy med	1,59	Fy min	-2,16	Fz max	3,49	Fz med	2,07	Fz min	0,13	Mz max	0,04	Mz med	-0,01	Mz min	-0,07
Fx max	1,91																									
Fx med	-2,03																									
Fx min	-5,53																									
Fy max	5,77																									
Fy med	1,59																									
Fy min	-2,16																									
Fz max	3,49																									
Fz med	2,07																									
Fz min	0,13																									
Mz max	0,04																									
Mz med	-0,01																									
Mz min	-0,07																									

Tal como no Ensaio 1, há um ligeiro desgalgamento da peça. A médias das amplitudes das forças de corte foram $F_x = 7,35$ N e $F_y = 7,81$ N. Estes valores são muito semelhantes aos registados no ensaio de 4 metros com o mesmo avanço.

Tabela 50 - Resultados das forças de corte com a ferramenta Dormer S260 Ensaio 3

Gráfico de forças		Resultados	
	Dormer S260 - Ensaio 3 - 1º ciclo	Fx [N]	Fx max 11,57
		Fy [N]	Fx med -1,84
		Fz [N]	Fx min -11,76
		Mz [Nm]	Fy max 10,02
			Fy med 0,95
			Fy min -12,18
			Fz max 3,17
			Fz med 0,84
			Fz min -3,36
			Mz max 0,05
			Mz med 0,00
			Mz min -0,06
	Dormer S260 - Ensaio 3 - 2º ciclo	Fx [N]	Fx max 2,42
		Fy [N]	Fx med -2,10
		Fz [N]	Fx min -5,66
		Mz [Nm]	Fy max 4,70
			Fy med 1,33
			Fy min -3,87
			Fz max 2,85
			Fz med 1,55
			Fz min -1,10
			Mz max 0,05
			Mz med -0,01
			Mz min -0,05
	Dormer S260 - Ensaio 3 - 3º ciclo	Fx [N]	Fx max 2,54
		Fy [N]	Fx med -2,16
		Fz [N]	Fx min -6,36
		Mz [Nm]	Fy max 5,01
			Fy med 1,40
			Fy min -4,25
			Fz max 3,43
			Fz med 2,14
			Fz min 0,91
			Mz max 0,05
			Mz med -0,01
			Mz min -0,06

As forças de corte do 1º ciclo foram, provavelmente, causadas pela peça estar ligeiramente mais subida face ao zero em Z. A média das amplitudes das forças de corte foram Fx – 8,49 N e Fy – 8,92 N. O aumento da velocidade de avanço traduziu-se num aumento das forças de corte.

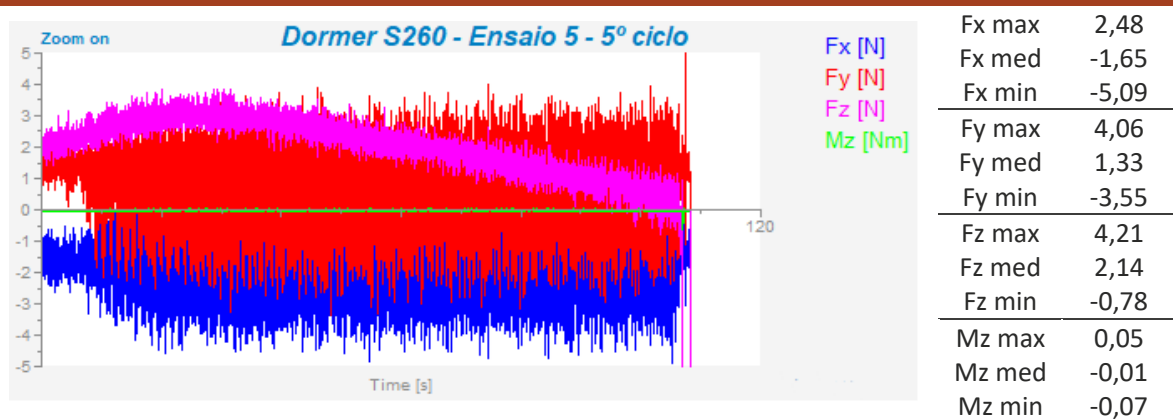
Tabela 51 - Resultados das forças de corte com a ferramenta Dormer S260 Ensaio 4

Gráfico de forças		Resultados																								
		<table border="1"> <tr><td>Fx max</td><td>6,99</td></tr> <tr><td>Fx med</td><td>-1,78</td></tr> <tr><td>Fx min</td><td>-7,88</td></tr> <tr><td>Fy max</td><td>6,73</td></tr> <tr><td>Fy med</td><td>0,95</td></tr> <tr><td>Fy min</td><td>-7,55</td></tr> <tr><td>Fz max</td><td>4,21</td></tr> <tr><td>Fz med</td><td>-6,47</td></tr> <tr><td>Fz min</td><td>-13,13</td></tr> <tr><td>Mz max</td><td>0,05</td></tr> <tr><td>Mz med</td><td>-0,01</td></tr> <tr><td>Mz min</td><td>-0,06</td></tr> </table>	Fx max	6,99	Fx med	-1,78	Fx min	-7,88	Fy max	6,73	Fy med	0,95	Fy min	-7,55	Fz max	4,21	Fz med	-6,47	Fz min	-13,13	Mz max	0,05	Mz med	-0,01	Mz min	-0,06
Fx max	6,99																									
Fx med	-1,78																									
Fx min	-7,88																									
Fy max	6,73																									
Fy med	0,95																									
Fy min	-7,55																									
Fz max	4,21																									
Fz med	-6,47																									
Fz min	-13,13																									
Mz max	0,05																									
Mz med	-0,01																									
Mz min	-0,06																									
		<table border="1"> <tr><td>Fx max</td><td>2,23</td></tr> <tr><td>Fx med</td><td>-2,03</td></tr> <tr><td>Fx min</td><td>-5,09</td></tr> <tr><td>Fy max</td><td>4,06</td></tr> <tr><td>Fy med</td><td>1,21</td></tr> <tr><td>Fy min</td><td>-3,05</td></tr> <tr><td>Fz max</td><td>3,30</td></tr> <tr><td>Fz med</td><td>-1,23</td></tr> <tr><td>Fz min</td><td>-6,60</td></tr> <tr><td>Mz max</td><td>0,04</td></tr> <tr><td>Mz med</td><td>-0,01</td></tr> <tr><td>Mz min</td><td>-0,06</td></tr> </table>	Fx max	2,23	Fx med	-2,03	Fx min	-5,09	Fy max	4,06	Fy med	1,21	Fy min	-3,05	Fz max	3,30	Fz med	-1,23	Fz min	-6,60	Mz max	0,04	Mz med	-0,01	Mz min	-0,06
Fx max	2,23																									
Fx med	-2,03																									
Fx min	-5,09																									
Fy max	4,06																									
Fy med	1,21																									
Fy min	-3,05																									
Fz max	3,30																									
Fz med	-1,23																									
Fz min	-6,60																									
Mz max	0,04																									
Mz med	-0,01																									
Mz min	-0,06																									
		<table border="1"> <tr><td>Fx max</td><td>2,42</td></tr> <tr><td>Fx med</td><td>-2,10</td></tr> <tr><td>Fx min</td><td>-5,34</td></tr> <tr><td>Fy max</td><td>4,12</td></tr> <tr><td>Fy med</td><td>1,27</td></tr> <tr><td>Fy min</td><td>-3,30</td></tr> <tr><td>Fz max</td><td>3,75</td></tr> <tr><td>Fz med</td><td>1,94</td></tr> <tr><td>Fz min</td><td>-1,81</td></tr> <tr><td>Mz max</td><td>0,05</td></tr> <tr><td>Mz med</td><td>-0,01</td></tr> <tr><td>Mz min</td><td>-0,13</td></tr> </table>	Fx max	2,42	Fx med	-2,10	Fx min	-5,34	Fy max	4,12	Fy med	1,27	Fy min	-3,30	Fz max	3,75	Fz med	1,94	Fz min	-1,81	Mz max	0,05	Mz med	-0,01	Mz min	-0,13
Fx max	2,42																									
Fx med	-2,10																									
Fx min	-5,34																									
Fy max	4,12																									
Fy med	1,27																									
Fy min	-3,30																									
Fz max	3,75																									
Fz med	1,94																									
Fz min	-1,81																									
Mz max	0,05																									
Mz med	-0,01																									
Mz min	-0,13																									

As forças de corte do 1º ciclo foram, provavelmente, causadas pela peça estar ligeiramente mais subida face ao zero em Z. A média das amplitudes das forças de corte foram $F_x - 7,54$ N e $F_y - 7,27$ N. A redução da velocidade de avanço não gerou valores de forças de corte muito diferentes dos ensaios com o avanço a 100%.

Tabela 52 - Resultados das forças de corte com a ferramenta Dormer S260 Ensaio 5

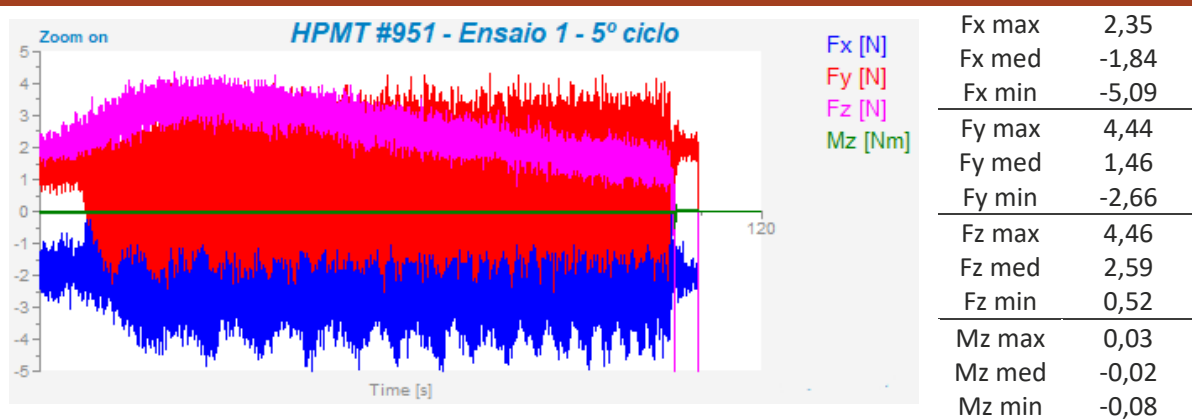
Gráfico de forças	Resultados																								
<p>Dormer S260 - Ensaio 5 - 1º ciclo</p> <p>Zoom on</p> <p>Time [s]</p> <p> Fx [N] Fy [N] Fz [N] Mz [Nm] </p>	<table border="1"> <tr><td>Fx max</td><td>-0,06</td></tr> <tr><td>Fx med</td><td>-1,65</td></tr> <tr><td>Fx min</td><td>-3,24</td></tr> <tr><td>Fy max</td><td>2,66</td></tr> <tr><td>Fy med</td><td>1,40</td></tr> <tr><td>Fy min</td><td>0,06</td></tr> <tr><td>Fz max</td><td>2,85</td></tr> <tr><td>Fz med</td><td>-0,52</td></tr> <tr><td>Fz min</td><td>-4,85</td></tr> <tr><td>Mz max</td><td>0,05</td></tr> <tr><td>Mz med</td><td>-0,01</td></tr> <tr><td>Mz min</td><td>-0,18</td></tr> </table>	Fx max	-0,06	Fx med	-1,65	Fx min	-3,24	Fy max	2,66	Fy med	1,40	Fy min	0,06	Fz max	2,85	Fz med	-0,52	Fz min	-4,85	Mz max	0,05	Mz med	-0,01	Mz min	-0,18
Fx max	-0,06																								
Fx med	-1,65																								
Fx min	-3,24																								
Fy max	2,66																								
Fy med	1,40																								
Fy min	0,06																								
Fz max	2,85																								
Fz med	-0,52																								
Fz min	-4,85																								
Mz max	0,05																								
Mz med	-0,01																								
Mz min	-0,18																								
<p>Dormer S260 - Ensaio 5 - 2º ciclo</p> <p>Zoom on</p> <p>Time [s]</p> <p> Fx [N] Fy [N] Fz [N] Mz [Nm] </p>	<table border="1"> <tr><td>Fx max</td><td>-0,57</td></tr> <tr><td>Fx med</td><td>-2,03</td></tr> <tr><td>Fx min</td><td>-3,50</td></tr> <tr><td>Fy max</td><td>2,66</td></tr> <tr><td>Fy med</td><td>1,52</td></tr> <tr><td>Fy min</td><td>0,06</td></tr> <tr><td>Fz max</td><td>2,98</td></tr> <tr><td>Fz med</td><td>-1,16</td></tr> <tr><td>Fz min</td><td>-5,18</td></tr> <tr><td>Mz max</td><td>0,04</td></tr> <tr><td>Mz med</td><td>-0,01</td></tr> <tr><td>Mz min</td><td>-0,07</td></tr> </table>	Fx max	-0,57	Fx med	-2,03	Fx min	-3,50	Fy max	2,66	Fy med	1,52	Fy min	0,06	Fz max	2,98	Fz med	-1,16	Fz min	-5,18	Mz max	0,04	Mz med	-0,01	Mz min	-0,07
Fx max	-0,57																								
Fx med	-2,03																								
Fx min	-3,50																								
Fy max	2,66																								
Fy med	1,52																								
Fy min	0,06																								
Fz max	2,98																								
Fz med	-1,16																								
Fz min	-5,18																								
Mz max	0,04																								
Mz med	-0,01																								
Mz min	-0,07																								
<p>Dormer S260 - Ensaio 5 - 3º ciclo</p> <p>Zoom on</p> <p>Time [s]</p> <p> Fx [N] Fy [N] Fz [N] Mz [Nm] </p>	<table border="1"> <tr><td>Fx max</td><td>1,84</td></tr> <tr><td>Fx med</td><td>-1,97</td></tr> <tr><td>Fx min</td><td>-5,28</td></tr> <tr><td>Fy max</td><td>4,00</td></tr> <tr><td>Fy med</td><td>1,33</td></tr> <tr><td>Fy min</td><td>-2,98</td></tr> <tr><td>Fz max</td><td>3,75</td></tr> <tr><td>Fz med</td><td>2,20</td></tr> <tr><td>Fz min</td><td>0,52</td></tr> <tr><td>Mz max</td><td>0,06</td></tr> <tr><td>Mz med</td><td>0,01</td></tr> <tr><td>Mz min</td><td>-0,05</td></tr> </table>	Fx max	1,84	Fx med	-1,97	Fx min	-5,28	Fy max	4,00	Fy med	1,33	Fy min	-2,98	Fz max	3,75	Fz med	2,20	Fz min	0,52	Mz max	0,06	Mz med	0,01	Mz min	-0,05
Fx max	1,84																								
Fx med	-1,97																								
Fx min	-5,28																								
Fy max	4,00																								
Fy med	1,33																								
Fy min	-2,98																								
Fz max	3,75																								
Fz med	2,20																								
Fz min	0,52																								
Mz max	0,06																								
Mz med	0,01																								
Mz min	-0,05																								
<p>Dormer S260 - Ensaio 5 - 4º ciclo</p> <p>Zoom on</p> <p>Time [s]</p> <p> Fx [N] Fy [N] Fz [N] Mz [Nm] </p>	<table border="1"> <tr><td>Fx max</td><td>2,10</td></tr> <tr><td>Fx med</td><td>-2,03</td></tr> <tr><td>Fx min</td><td>-5,53</td></tr> <tr><td>Fy max</td><td>4,19</td></tr> <tr><td>Fy med</td><td>1,40</td></tr> <tr><td>Fy min</td><td>-3,30</td></tr> <tr><td>Fz max</td><td>3,43</td></tr> <tr><td>Fz med</td><td>-0,32</td></tr> <tr><td>Fz min</td><td>-5,05</td></tr> <tr><td>Mz max</td><td>0,05</td></tr> <tr><td>Mz med</td><td>-0,01</td></tr> <tr><td>Mz min</td><td>-0,07</td></tr> </table>	Fx max	2,10	Fx med	-2,03	Fx min	-5,53	Fy max	4,19	Fy med	1,40	Fy min	-3,30	Fz max	3,43	Fz med	-0,32	Fz min	-5,05	Mz max	0,05	Mz med	-0,01	Mz min	-0,07
Fx max	2,10																								
Fx med	-2,03																								
Fx min	-5,53																								
Fy max	4,19																								
Fy med	1,40																								
Fy min	-3,30																								
Fz max	3,43																								
Fz med	-0,32																								
Fz min	-5,05																								
Mz max	0,05																								
Mz med	-0,01																								
Mz min	-0,07																								



A ausência de forças provocadas pelo corte nos gráficos do 1º e 2º ciclo mostram que a ferramenta não estaria a tocar na peça, causa de a peça estar mais baixa que o seu zero no eixo Z. Também no 3º gráfico os valores não podem ser usados para comparação, uma vez que a face a maquinar ainda não estava perpendicular com a ferramenta. Posto tal, este ensaio não permite fazer conclusões acerca do aumento do comprimento de corte, mas, mais uma vez, é notório que a redução do avanço não alterou as forças de corte registadas, a média das amplitudes das forças de corte foram $F_x - 7,44$ N e $F_y - 7,36$ N

Tabela 53 - Resultados das forças de corte com a ferramenta HPMT #951 Ensaio 1

Gráfico de forças		Resultados																																				
<p>HPMT #951 - Ensaio 1 - 1º ciclo</p>		<table border="1"> <tr><td>Fx [N]</td><td>Fx max</td><td>-0,19</td></tr> <tr><td>Fy [N]</td><td>Fx med</td><td>-1,65</td></tr> <tr><td>Fz [N]</td><td>Fx min</td><td>-3,24</td></tr> <tr><td>Mz [Nm]</td><td>Fy max</td><td>2,47</td></tr> <tr><td></td><td>Fy med</td><td>1,40</td></tr> <tr><td></td><td>Fy min</td><td>0,06</td></tr> <tr><td></td><td>Fz max</td><td>3,49</td></tr> <tr><td></td><td>Fz med</td><td>1,10</td></tr> <tr><td></td><td>Fz min</td><td>-2,52</td></tr> <tr><td></td><td>Mz max</td><td>0,03</td></tr> <tr><td></td><td>Mz med</td><td>-0,03</td></tr> <tr><td></td><td>Mz min</td><td>-0,07</td></tr> </table>	Fx [N]	Fx max	-0,19	Fy [N]	Fx med	-1,65	Fz [N]	Fx min	-3,24	Mz [Nm]	Fy max	2,47		Fy med	1,40		Fy min	0,06		Fz max	3,49		Fz med	1,10		Fz min	-2,52		Mz max	0,03		Mz med	-0,03		Mz min	-0,07
Fx [N]	Fx max	-0,19																																				
Fy [N]	Fx med	-1,65																																				
Fz [N]	Fx min	-3,24																																				
Mz [Nm]	Fy max	2,47																																				
	Fy med	1,40																																				
	Fy min	0,06																																				
	Fz max	3,49																																				
	Fz med	1,10																																				
	Fz min	-2,52																																				
	Mz max	0,03																																				
	Mz med	-0,03																																				
	Mz min	-0,07																																				
<p>HPMT #951 - Ensaio 1 - 2º ciclo</p>		<table border="1"> <tr><td>Fx [N]</td><td>Fx max</td><td>-0,51</td></tr> <tr><td>Fy [N]</td><td>Fx med</td><td>-2,03</td></tr> <tr><td>Fz [N]</td><td>Fx min</td><td>-3,31</td></tr> <tr><td>Mz [Nm]</td><td>Fy max</td><td>2,16</td></tr> <tr><td></td><td>Fy med</td><td>1,02</td></tr> <tr><td></td><td>Fy min</td><td>-0,38</td></tr> <tr><td></td><td>Fz max</td><td>2,85</td></tr> <tr><td></td><td>Fz med</td><td>0,13</td></tr> <tr><td></td><td>Fz min</td><td>-2,65</td></tr> <tr><td></td><td>Mz max</td><td>0,04</td></tr> <tr><td></td><td>Mz med</td><td>-0,02</td></tr> <tr><td></td><td>Mz min</td><td>-0,06</td></tr> </table>	Fx [N]	Fx max	-0,51	Fy [N]	Fx med	-2,03	Fz [N]	Fx min	-3,31	Mz [Nm]	Fy max	2,16		Fy med	1,02		Fy min	-0,38		Fz max	2,85		Fz med	0,13		Fz min	-2,65		Mz max	0,04		Mz med	-0,02		Mz min	-0,06
Fx [N]	Fx max	-0,51																																				
Fy [N]	Fx med	-2,03																																				
Fz [N]	Fx min	-3,31																																				
Mz [Nm]	Fy max	2,16																																				
	Fy med	1,02																																				
	Fy min	-0,38																																				
	Fz max	2,85																																				
	Fz med	0,13																																				
	Fz min	-2,65																																				
	Mz max	0,04																																				
	Mz med	-0,02																																				
	Mz min	-0,06																																				
<p>HPMT #951 - Ensaio 1 - 3º ciclo</p>		<table border="1"> <tr><td>Fx [N]</td><td>Fx max</td><td>1,59</td></tr> <tr><td>Fy [N]</td><td>Fx med</td><td>-2,03</td></tr> <tr><td>Fz [N]</td><td>Fx min</td><td>-4,64</td></tr> <tr><td>Mz [Nm]</td><td>Fy max</td><td>4,06</td></tr> <tr><td></td><td>Fy med</td><td>1,59</td></tr> <tr><td></td><td>Fy min</td><td>-2,28</td></tr> <tr><td></td><td>Fz max</td><td>3,95</td></tr> <tr><td></td><td>Fz med</td><td>2,01</td></tr> <tr><td></td><td>Fz min</td><td>-1,36</td></tr> <tr><td></td><td>Mz max</td><td>0,03</td></tr> <tr><td></td><td>Mz med</td><td>-0,02</td></tr> <tr><td></td><td>Mz min</td><td>-0,06</td></tr> </table>	Fx [N]	Fx max	1,59	Fy [N]	Fx med	-2,03	Fz [N]	Fx min	-4,64	Mz [Nm]	Fy max	4,06		Fy med	1,59		Fy min	-2,28		Fz max	3,95		Fz med	2,01		Fz min	-1,36		Mz max	0,03		Mz med	-0,02		Mz min	-0,06
Fx [N]	Fx max	1,59																																				
Fy [N]	Fx med	-2,03																																				
Fz [N]	Fx min	-4,64																																				
Mz [Nm]	Fy max	4,06																																				
	Fy med	1,59																																				
	Fy min	-2,28																																				
	Fz max	3,95																																				
	Fz med	2,01																																				
	Fz min	-1,36																																				
	Mz max	0,03																																				
	Mz med	-0,02																																				
	Mz min	-0,06																																				
<p>HPMT #951 - Ensaio 1 - 4º ciclo</p>		<table border="1"> <tr><td>Fx [N]</td><td>Fx max</td><td>2,67</td></tr> <tr><td>Fy [N]</td><td>Fx med</td><td>-1,91</td></tr> <tr><td>Fz [N]</td><td>Fx min</td><td>-5,15</td></tr> <tr><td>Mz [Nm]</td><td>Fy max</td><td>4,06</td></tr> <tr><td></td><td>Fy med</td><td>1,02</td></tr> <tr><td></td><td>Fy min</td><td>-3,05</td></tr> <tr><td></td><td>Fz max</td><td>4,59</td></tr> <tr><td></td><td>Fz med</td><td>2,26</td></tr> <tr><td></td><td>Fz min</td><td>0,00</td></tr> <tr><td></td><td>Mz max</td><td>0,04</td></tr> <tr><td></td><td>Mz med</td><td>-0,01</td></tr> <tr><td></td><td>Mz min</td><td>-0,18</td></tr> </table>	Fx [N]	Fx max	2,67	Fy [N]	Fx med	-1,91	Fz [N]	Fx min	-5,15	Mz [Nm]	Fy max	4,06		Fy med	1,02		Fy min	-3,05		Fz max	4,59		Fz med	2,26		Fz min	0,00		Mz max	0,04		Mz med	-0,01		Mz min	-0,18
Fx [N]	Fx max	2,67																																				
Fy [N]	Fx med	-1,91																																				
Fz [N]	Fx min	-5,15																																				
Mz [Nm]	Fy max	4,06																																				
	Fy med	1,02																																				
	Fy min	-3,05																																				
	Fz max	4,59																																				
	Fz med	2,26																																				
	Fz min	0,00																																				
	Mz max	0,04																																				
	Mz med	-0,01																																				
	Mz min	-0,18																																				



A ausência de forças provocadas pelo corte nos gráficos do 1º e 2º ciclo mostram que a ferramenta não estaria a tocar na peça, causa de a peça estar mais baixa que o seu zero no eixo Z. A médias das amplitudes das forças de corte foram $F_x - 7,16$ N e $F_y - 6,85$ N.

Tabela 54 - Resultados das forças de corte com a ferramenta HPMT #951 Ensaio 2

Gráfico de forças		Resultados																								
<p>HPMT #951 - Ensaio 2 - 1º ciclo</p> <p>Zoom on</p> <p>Time [s]</p> <p> F_x [N] F_y [N] F_z [N] M_z [Nm] </p>		<table border="1"> <tr><td>F_x max</td><td>3,37</td></tr> <tr><td>F_x med</td><td>-1,14</td></tr> <tr><td>F_x min</td><td>-4,58</td></tr> <tr><td>F_y max</td><td>7,61</td></tr> <tr><td>F_y med</td><td>1,46</td></tr> <tr><td>F_y min</td><td>-3,93</td></tr> <tr><td>F_z max</td><td>2,52</td></tr> <tr><td>F_z med</td><td>-11,06</td></tr> <tr><td>F_z min</td><td>-23,42</td></tr> <tr><td>M_z max</td><td>0,04</td></tr> <tr><td>M_z med</td><td>-0,02</td></tr> <tr><td>M_z min</td><td>-0,07</td></tr> </table>	F _x max	3,37	F _x med	-1,14	F _x min	-4,58	F _y max	7,61	F _y med	1,46	F _y min	-3,93	F _z max	2,52	F _z med	-11,06	F _z min	-23,42	M _z max	0,04	M _z med	-0,02	M _z min	-0,07
F _x max	3,37																									
F _x med	-1,14																									
F _x min	-4,58																									
F _y max	7,61																									
F _y med	1,46																									
F _y min	-3,93																									
F _z max	2,52																									
F _z med	-11,06																									
F _z min	-23,42																									
M _z max	0,04																									
M _z med	-0,02																									
M _z min	-0,07																									
<p>HPMT #951 - Ensaio 2 - 2º ciclo</p> <p>Zoom on</p> <p>Time [s]</p> <p> F_x [N] F_y [N] F_z [N] M_z [Nm] </p>		<table border="1"> <tr><td>F_x max</td><td>1,72</td></tr> <tr><td>F_x med</td><td>-1,59</td></tr> <tr><td>F_x min</td><td>-4,39</td></tr> <tr><td>F_y max</td><td>4,89</td></tr> <tr><td>F_y med</td><td>1,14</td></tr> <tr><td>F_y min</td><td>-2,16</td></tr> <tr><td>F_z max</td><td>4,08</td></tr> <tr><td>F_z med</td><td>0,58</td></tr> <tr><td>F_z min</td><td>-4,46</td></tr> <tr><td>M_z max</td><td>0,04</td></tr> <tr><td>M_z med</td><td>-0,01</td></tr> <tr><td>M_z min</td><td>-0,06</td></tr> </table>	F _x max	1,72	F _x med	-1,59	F _x min	-4,39	F _y max	4,89	F _y med	1,14	F _y min	-2,16	F _z max	4,08	F _z med	0,58	F _z min	-4,46	M _z max	0,04	M _z med	-0,01	M _z min	-0,06
F _x max	1,72																									
F _x med	-1,59																									
F _x min	-4,39																									
F _y max	4,89																									
F _y med	1,14																									
F _y min	-2,16																									
F _z max	4,08																									
F _z med	0,58																									
F _z min	-4,46																									
M _z max	0,04																									
M _z med	-0,01																									
M _z min	-0,06																									
<p>HPMT #951 - Ensaio 2 - 3º ciclo</p> <p>Zoom on</p> <p>Time [s]</p> <p> F_x [N] F_y [N] F_z [N] M_z [Nm] </p>		<table border="1"> <tr><td>F_x max</td><td>1,65</td></tr> <tr><td>F_x med</td><td>-1,72</td></tr> <tr><td>F_x min</td><td>-4,32</td></tr> <tr><td>F_y max</td><td>5,20</td></tr> <tr><td>F_y med</td><td>1,33</td></tr> <tr><td>F_y min</td><td>-1,97</td></tr> <tr><td>F_z max</td><td>4,40</td></tr> <tr><td>F_z med</td><td>1,81</td></tr> <tr><td>F_z min</td><td>-2,46</td></tr> <tr><td>M_z max</td><td>0,04</td></tr> <tr><td>M_z med</td><td>-0,01</td></tr> <tr><td>M_z min</td><td>-0,07</td></tr> </table>	F _x max	1,65	F _x med	-1,72	F _x min	-4,32	F _y max	5,20	F _y med	1,33	F _y min	-1,97	F _z max	4,40	F _z med	1,81	F _z min	-2,46	M _z max	0,04	M _z med	-0,01	M _z min	-0,07
F _x max	1,65																									
F _x med	-1,72																									
F _x min	-4,32																									
F _y max	5,20																									
F _y med	1,33																									
F _y min	-1,97																									
F _z max	4,40																									
F _z med	1,81																									
F _z min	-2,46																									
M _z max	0,04																									
M _z med	-0,01																									
M _z min	-0,07																									

Neste ensaio, as médias das amplitudes das forças de corte foram $F_x - 6,67$ N e $F_y - 6,96$ N. O facto da força de corte ter sido ligeiramente inferior neste ensaio, pode estar relacionada com a quebra verificada na E2 do 1º ensaio, Tabela 44. A modificação da geometria de uma aresta de corte, com base numa fratura, é uma forte razão para a alteração das forças de corte.

Tabela 55 - Resultados das forças de corte com a ferramenta HPMT #951 Ensaio 3

Gráfico de forças		Resultados	
		Fx [N] Fy [N] Fz [N] Mz [Nm]	Fx max 2,35 Fx med -1,46 Fx min -4,83 Fy max 5,27 Fy med 1,46 Fy min -1,14 Fz max 2,65 Fz med -6,92 Fz min -18,05 Mz max 0,04 Mz med -0,01 Mz min -0,06
		Fx [N] Fy [N] Fz [N] Mz [Nm]	Fx max 1,91 Fx med -1,78 Fx min -5,34 Fy max 4,89 Fy med 1,21 Fy min -1,78 Fz max 3,95 Fz med 1,04 Fz min -4,40 Mz max 0,04 Mz med -0,01 Mz min -0,06
		Fx [N] Fy [N] Fz [N] Mz [Nm]	Fx max 1,97 Fx med -1,84 Fx min -5,72 Fy max 5,46 Fy med 1,59 Fy min -1,52 Fz max 4,40 Fz med 2,20 Fz min -1,16 Mz max 0,05 Mz med -0,01 Mz min -0,06

A ondulação de F_x e F_y no primeiro ciclo indica que a face a maquinar não estaria totalmente perpendicular com a ferramenta. A média das amplitudes das forças de corte foram $F_x - 7,37$ N e $F_y - 7,25$ N. O aumento da velocidade de avanço traduziu-se num aumento das forças de corte.

Tabela 56 - Resultados das forças de corte com a ferramenta HPMT #951 Ensaio 4

Gráfico de forças		Resultados	
<p>HPMT #951 - Ensaio 4 - 1º ciclo</p>		Fx [N] Fy [N] Fz [N] Mz [Nm]	Fx max 1,21 Fx med -2,16 Fx min -5,09 Fy max 3,17 Fy med 1,08 Fy min -2,16 Fz max 2,72 Fz med -8,48 Fz min -16,63 Mz max 0,04 Mz med -0,01 Mz min -0,06
<p>HPMT #951 - Ensaio 4 - 2º ciclo</p>		Fx [N] Fy [N] Fz [N] Mz [Nm]	Fx max 0,83 Fx med -2,35 Fx min -5,15 Fy max 2,92 Fy med 0,82 Fy min -2,47 Fz max 4,46 Fz med 1,68 Fz min -1,88 Mz max 0,04 Mz med -0,02 Mz min -0,18
<p>HPMT #951 - Ensaio 4 - 3º ciclo</p>		Fx [N] Fy [N] Fz [N] Mz [Nm]	Fx max 1,14 Fx med -2,03 Fx min -5,15 Fy max 3,24 Fy med 1,14 Fy min -2,28 Fz max 4,66 Fz med 2,98 Fz min 1,42 Mz max 0,04 Mz med -0,01 Mz min -0,05

As forças de corte do 1º ciclo foram, provavelmente, causadas pela peça estar ligeiramente mais subida face ao zero em Z. A médias das amplitudes das forças de corte foram $F_x - 6,18$ N e $F_y - 5,41$ N. A redução da velocidade de avanço gerou valores de forças de corte ligeiramente inferiores aos ensaios com a avanço a 100%.

Tabela 57 - Resultados das forças de corte com a ferramenta HPMT #951 Ensaio 5

Gráfico de forças		Resultados	
		Fx max	2,35
		Fx med	-2,23
		Fx min	-5,21
		Fy max	3,68
		Fy med	1,52
		Fy min	-2,79
		Fz max	2,72
		Fz med	-1,16
		Fz min	-2,78
		Mz max	0,03
		Mz med	-0,02
		Mz min	-0,07
		Fx max	1,97
		Fx med	-1,72
		Fx min	-4,26
		Fy max	3,62
		Fy med	1,59
		Fy min	-1,97
		Fz max	2,98
		Fz med	-1,55
		Fz min	-4,79
		Mz max	0,03
		Mz med	-0,02
		Mz min	-0,17
		Fx max	2,16
		Fx med	-2,03
		Fx min	-4,64
		Fy max	2,79
		Fy med	0,95
		Fy min	-2,66
		Fz max	4,01
		Fz med	2,20
		Fz min	0,58
		Mz max	0,03
		Mz med	-0,02
		Mz min	-0,07
		Fx max	1,84
		Fx med	-2,03
		Fx min	-4,58
		Fy max	3,05
		Fy med	1,08
		Fy min	-2,47
		Fz max	3,04
		Fz med	-0,84
		Fz min	-3,49
		Mz max	0,03
		Mz med	-0,02
		Mz min	-0,07

A média das amplitudes das forças de corte foram Fx – 6,75 N e Fy – 5,76 N. A redução

da velocidade de avanço gerou valores de forças de corte inferiores aos ensaios com a avanço a 100%. Mas, estas foram superiores às do ensaio de 2,5 m e avanço 75%, Tabela 56. Tal deve-se ao facto de a redução de avanço ser causadora de maior desgaste, e com o aumento do percurso, esse desgaste ser ainda mais evidente, aumentando assim as forças de corte.

Os resultados das forças de corte são muito úteis para justificar os desgastes observados pela microscopia eletrónica. Numa vista geral, as ferramentas Dormer S260 apresentaram forças de corte superiores às HPMT #951 para as mesmas condições de corte. Para os comprimentos de ensaio utilizados, não foi observado nenhum desgaste muito severo, pelo que os gráficos das forças foram constantes ao longo dos ciclos. As forças de corte excessivas ou diminutas na primeira passagem estão relacionadas com inconsistências na montagem do material a trabalhar. Em algumas situações terá sido removido muito material na primeira passagem, Figura 43(A), noutras a ferramenta não terá tocado na peça, sendo as forças apresentadas apenas relativas ao esforço imposto pela rotação da máquina. Figura 43(B), e em outras situações a peça estaria desgalgada, o que levou a que não fosse removido material em todo o percurso da passagem, Figura 43(C).

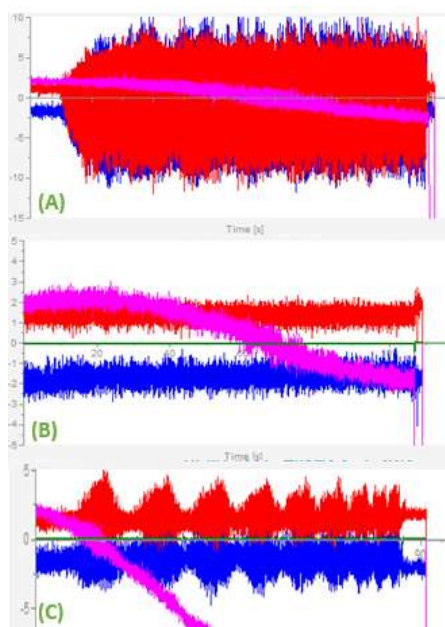


Figura 43 - Identificação de problemas na montagem da peça: (A) – Remoção excessiva de material; (B) – Ferramenta não remove material; (C) – Corte interrompido

A Figura 44 sumariza as amplitudes dos valores F_x max e F_y max registados nos ensaios com o dinamómetro. Foram filtradas as situações referidas na Figura 43 - Identificação de problemas na montagem da peça: (A) – Remoção excessiva de material; (B) – Ferramenta não remove material; (C) – Corte interrompido

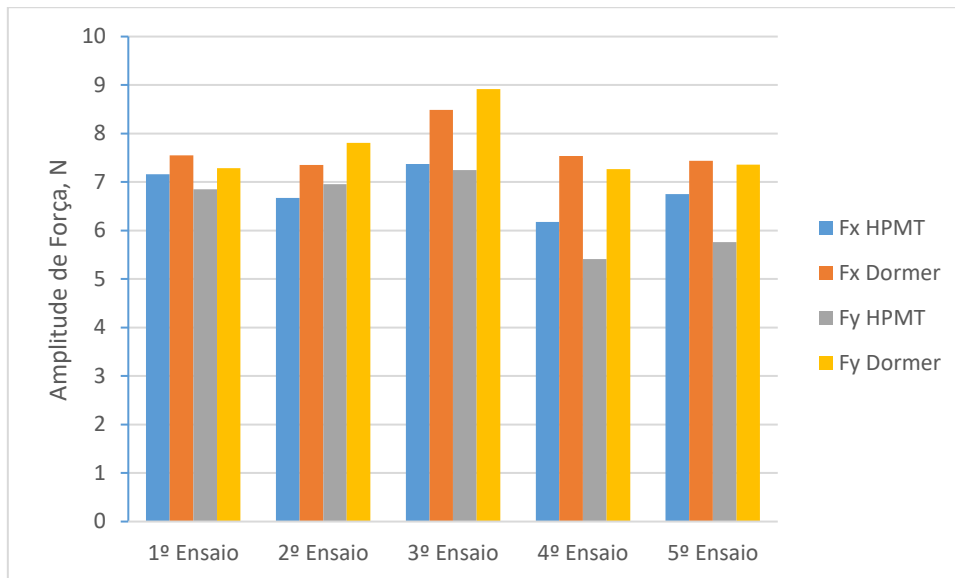


Figura 44 - Resumos das amplitudes das forças F_x e F_y registadas nos ensaios

Em suma, relativamente à análise das forças de corte, pode concluir-se que:

- As ferramentas HPMT #951 apresentaram forças de corte 14% inferiores às Dormer S260. Tal poderá justificar-se pelo facto de estas trabalharem com uma velocidade de corte e velocidade de avanço inferiores às rivais, Tabela 28;
- A redução do avanço para 75% pouco alterou a amplitude das forças de corte, embora o esperado fosse que estas reduzissem. A explicação para tal baseia-se no já observado nas análises SEM: a redução do avanço é prejudicial para a ferramenta, pois ocorrem mais fenómenos de desgaste, principalmente por adesão do aço inoxidável trabalhado à ferramenta;
- Para ambas as ferramentas, o aumento da velocidade de avanço para 125% do valor indicado pelo fabricante, traduziu-se num aumento das forças de corte registadas, o que era expectável, uma vez que para o mesmo intervalo de tempo as lâminas removem mais material;
- O aumento do percurso de corte leva a um ligeiro aumento da média das forças de corte, especialmente em condições de corte onde existe mais desgaste, Tabela 44) como ficou evidente com uma quebra na aresta 2 da ferramenta HPMT. Essa alteração da geometria de corte pode justificar o aumento de

forças de corte entre o 1º ensaio, 4 m e 100% avanço face ao 2º ensaio 2,5 m e 100% avanço;

- A entrada muito abrupta da ferramenta Dormer no 3º ensaio, identificada na Tabela 50, justifica também o surgimento do entalhe mencionado na Tabela 41.

CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

4.1 CONCLUSÕES

4.2 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

4.1 Conclusões

O aço inoxidável duplex SAF 2205 utilizado neste trabalho, demonstrou ser severo para as ferramentas, uma vez que, apesar do desgaste apresentado não ser muito significativo, este foi muito elevado se tivermos em consideração o volume de material removido.

Os parâmetros de corte definidos pelos fornecedores mostraram ser eficazes no equilíbrio entre desgaste e forças de corte. A variação da velocidade de avanço para 75% beneficiou o acabamento superficial da peça, o que faz sentido uma vez que o incremento lateral também é reduzido. Contudo esta opção de avanço deverá ser limitada a operações onde é necessário acabamentos com rugosidades muito baixas, já que o desgaste nestas condições é maior. A 75% de avanço, existe maior adesão do material à ferramenta, conforme o observado pelas análises SEM e corroborado pelos dados de forças de corte registados nos ensaios, uma vez que a redução de forças é praticamente nula. Quando o avanço foi incrementado para 125%, foram obtidos os piores valores de rugosidade, algo expectável, já que o incremento lateral foi superior aos dos ensaios com avanço a 100%. Pela mesma razão, a amplitude das forças de corte também foi superior. O aumento do avanço foi pouco prejudicial em termos de desgaste da ferramenta, sendo esta uma opção viável para reduzir custos e tempos de maquinagem.

O principal mecanismo de desgaste identificado nas análises SEM foi a adesão. Nas ferramentas Dormer, o revestimento mostrou ser menos coeso, uma vez que após a adesão este quebrava. No caso das HPMT, o revestimento desgastava-se, sendo até visíveis marcas de desgaste abrasivo.

De um modo geral, as ferramentas Dormer S260 apresentaram melhores resultados do que as HPMT #951. Apesar dos resultados de rugosidade e forças de corte terem sido favoráveis à HPMT, o fabricante da Dormer recomenda um avanço por dente que é o dobro da rival, o que justifica os valores anteriores. Pelo facto de trabalharem com uma velocidade de avanço maior, as Dormer S260 completam os ciclos de maquinagem num tempo 25% inferior ao das HPMT #951, favorecendo assim a escolha desta ferramenta, uma vez que permitem reduzir os tempos e custo de maquinagem.

4.2 Proposta de trabalhos futuros

Para a obtenção de resultados mais coesos futuramente os ensaios de maquinagem poderiam ser repetidos sob uma das seguintes alterações:

- Comparar a superfície da peça a maquinar de cada vez que a mesma é apertada na bucha, de modo a garantir que a primeira passagem é eficaz e é sempre removida a mesma quantidade de material por ciclo;
- Efetuar um facejamento do material a maquinar de cada vez que um ensaio é realizado, utilizar, por exemplo, fresa de pastilhas \varnothing 63 mm, de modo a que o tarugo seja facejado numa só passagem. Deste modo quando o ciclo da ferramenta em teste se iniciasse a perpendicularidade com a superfícies estava garantida.

De modo a facilitar a interpretação e tornar os resultados mais expressivos os valores referentes ao binário, Mz, deveriam ser obtidos em Ncm. A utilização desta escala em detrimento de Nm facilita a identificação de possíveis falhas que podem ocorrer na ferramenta e são expressas por aumento do binário registado.

BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

5.1 ARTIGOS EM LIVROS E REVISTAS INTERNACIONAIS

5.2 OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

5.1 Artigos em livros e revistas internacionais

- Ahmed, Y., Youssef, H., El-Hofy, H., & Ahmed, M. (2018). Prediction and Optimization of Drilling Parameters in Drilling of AISI 304 and AISI 2205 Steels with PVD Monolayer and Multilayer Coated Drills. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2(1), 16. <https://doi.org/10.3390/jmmp2010016>
- Alvarez-Armas, I. (2012). Duplex Stainless Steels: Brief History and Some Recent Alloys. *Recent Patents on Mechanical Engineering*, 1(1), 51–57. <https://doi.org/10.2174/2212797610801010051>
- American Society for Metals. (1989). *ASM Handbook - Machining Processes - Volume 16*. ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v16.9781627081887>
- Baptista, A., Silva, F., Porteiro, J., Míguez, J., & Pinto, G. (2018a). On the Physical Vapour Deposition: Evolution of Magnetron Sputtering Processes for Industrial Applications. *Procedia Manufacturing*, 17, 146-157. <https://doi.org/10.3390/COATINGS8110402>
- Baptista, A., Silva, F., Porteiro, J., Míguez, J., & Pinto, G. (2018b). Sputtering physical vapour deposition (PVD) coatings: A critical review on process improvement and market trend demands. *Coatings*, 8(11). <https://doi.org/10.3390/COATINGS8110402>
- Cadena, N. L., Cue-Sampedro, R., Siller, H. R., Arizmendi-Morquecho, A. M., Rivera-Solorio, C. I., & Di-Nardo, S. (2013). Study of PVD AlCrN coating for reducing carbide cutting tool deterioration in the machining of titanium alloys. *Materials*, 6(6), 2143–2154. <https://doi.org/10.3390/ma6062143>
- Chiaverini, V. (1986). *Tecnologia Mecânica - Processos de Fabricação e Tratamento* (2nd ed.). McGraw-Hill. ISBN: 978-0074500903
- Daniyan, I. A., Tlhabadira, I., Daramola, O. O., Phokobye, S. N., Siviwe, M., & Mpofu, K. (2020). Measurement and optimization of cutting forces during M200 TS milling process using the response surface methodology and dynamometer. *Procedia CIRP*, 88, 288–293. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.050>
- El Baradie, M. A. (1996). Cutting fluids: Part I. Characterisation. *Journal of Materials Processing Technology*, 56(1–4), 786–797. [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(95\)01892-1](https://doi.org/10.1016/0924-0136(95)01892-1)

- Endrino, J. L., Fox-Rabinovich, G. S., & Gey, C. (2006). Hard AlTiN, AlCrN PVD coatings for machining of austenitic stainless steel. *Surface and Coatings Technology*, 200(24), 6840–6845. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.10.030>
- Fernandes, L., Silva, F. J. G., Andrade, M. F., Alexandre, R., Baptista, A. P. M., & Rodrigues, C. (2017). Increasing the stamping tools lifespan by using Mo and B4C PVD coatings. *Surface and Coatings Technology*, 325, 107–119. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.06.043>
- Gouveia, R., Silva, F., Reis, P., & Baptista, A. (2016). Machining Duplex Stainless Steel: Comparative Study Regarding End Mill Coated Tools. *Coatings*, 6(4), 51. <https://doi.org/10.3390/coatings6040051>
- Gowthaman, P. S., Jeyakumar, S., & Saravanan, B. A. (2019). Machinability and tool wear mechanism of Duplex stainless steel - a review. *Materials Today: Proceedings*, 26, 1423–1429. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.295>
- ISO. (1989). *ISO 8688-1 : Tool Life Testing in Milling. Part 1 : Face Milling*.
- ISO. (1993). *ISO 3685:1993*.
- ISO. (2006). *ISO 11054:2006* (Vol. 2006, p. 13).
- Jiang, L., Paro, J., Hänninen, H., Kauppinen, V., & Oraskari, R. (1996). Comparison of grindability of HIPped austenitic 316L, duplex 2205 and super duplex 2507 and as-cast 304 stainless steels using alumina wheels. *Journal of Materials Processing Technology*, 62(1–3), 1–9. [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(95\)02199-X](https://doi.org/10.1016/0924-0136(95)02199-X)
- Kumar, T. Sampath, Balasivanandha Prabu, S., Manivasagam, G., & Padmanabhan, K. A. (2014). Comparison of TiAlN, AlCrN, and AlCrN/TiAlN coatings for cutting-tool applications. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 21(8), 796–805. <https://doi.org/10.1007/s12613-014-0973-y>
- Liljas, M. (2008). 80 Years With Duplex Steels, a Historic Review and Prospects for the Future. *6th European Stainless Steel Conference*, 535–560. http://fdp.nl/fil/Duplex_Stainless_Steel_1.1.pdf
- MachiningCloud, I. (2016). Introduction to Selecting Milling Tools. *MachiningCloud, Inc*, 1–33. https://www.machiningcloud.com/wp-content/uploads/2016/05/MachiningCloud_SelectingMillingTools.pdf
- Martinho, R. P., Silva, F. J. G., & Baptista, A. P. M. (2008). Cutting forces and wear analysis of Si3N4 diamond coated tools in high speed machining. *Vacuum*, 82(12), 1415–1420. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2008.03.065>
- Martinho, R. P., Silva, F. J. G., Martins, C., & Lopes, H. (2019). Comparative study of PVD and CVD cutting tools performance in milling of duplex stainless steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102(5–8), 2423–2439. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03351-8>
- Morais, S. (2006). *Desenho técnico básico* (3rd ed.). Porto Editora. ISBN - 972-96525-2-

X

- Philip, S. D., Chandramohan, P., & Rajesh, P. K. (2015). Prediction of surface roughness in end milling operation of duplex stainless steel using response surface methodology. *Journal of Engineering Science and Technology*, 10(3), 340–352.
- Pohl, M., Storz, O., & Glogowski, T. (2007). Effect of intermetallic precipitations on the properties of duplex stainless steel. *Materials Characterization*, 58(1), 65–71. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2006.03.015>
- Silva, F., Martinho, R., Andrade, M., Baptista, A., & Alexandre, R. (2017). Improving the wear resistance of moulds for the injection of glass fibre-reinforced plastics using PVD coatings: A comparative study. *Coatings*, 7(2). <https://doi.org/10.3390/coatings7020028>
- Stephenson, D. ., & dan Agapiou, J. . (2016). *Metal Cutting theory and practice* (3rd ed.). CRC Press.
- Tschätsch, H. (2009). Applied Machining Technology. In *Applied Machining Technology*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01007-1>
- Vinoth Jebaraj, A., Ajaykumar, L., Deepak, C. R., & Aditya, K. V. V. (2017). Weldability, machinability and surfacing of commercial duplex stainless steel AISI2205 for marine applications – A recent review. *Journal of Advanced Research*, 8(3), 183–199. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2017.01.002>

5.2 Outras fontes de informação

- Arsopi. (2013). *Fundição - Materiais*. <http://www.arsopi.pt/pt/fundicao/materiais/>
- Blattner, M. (2016). *Effects revealed by Analysis of Force Signals*. Kistler.
- British Stainless Steel Association. (2018). *Influence of steel family (type) on machinability*. <https://www.bssa.org.uk/topics.php?article=191>
- Dadic, Z. (2016). Tribological principles and measures to reduce cutting tools wear. *Mechanical Technologies and Structural Materials*, SEPTEMBER 2013.
- Daggett, S. A. (2005). *How to Choose the Right Tool Coating for Your Machining Application*. <https://www.moldmakingtechnology.com/articles/how-to-choose-the-right-tool-coating-for-your-machining-application>
- Dormer. (2010). *DORMER Technical Handbook*. https://set.is/wp-content/uploads/2017/02/Thb_en_net_2017-compressed.pdf
- Fuchs. (2016). *Cutting Fluids Manual - Collected Knowledge on Cutting Fluids for Metalworking*.

- Haas Automation inc. (2017). VF-2 SS. <https://www.haascnc.com/machines/vertical-mills/vf-series/models/small/vf-2ss.html>
- Haimer. (2013). *The right tool clamping technology for every kind of machining operation*. <https://www.haimer.biz/products/tool-holders.html>
- Link spa. (2019). *Catálogo Geral 19-20*.
- MachiningCloud, I. (2016). Introduction to Selecting Milling Tools. *MachiningCloud, Inc*, 1–33. https://www.machiningcloud.com/wp-content/uploads/2016/05/MachiningCloud_SelectingMillingTools.pdf
- Mitsubishi Materials. (2001). *What is Carbide?* http://www.mitsubishicarbide.com/en/technical_information/tec_guide/tec_guide_carbide
- Outokumpu Group. (2010). *Material for Winning Ideas - Outokumpu Duplex Stainless Steels*.
- Sandvik Coromant. (2005). *Manual Técnico*.
- Sandvik Coromant. (2010). *Cutting tool materials*. <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/pages/cutting-tool-materials.aspx>
- Sandvik Coromant. (2012). *Wear on cutting edges*. <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/materials/pages/wear-on-cutting-edges.aspx>
- Sandvik Coromant. (2020). *SANDVIK SAF 2205™*. <https://www.materials.sandvik/pt/centro-de-materiais/datasheets-do-material/tube-and-pipe-seamless/sandvik-saf-2205/>
- Schneider, G. (2002). *Cutting Tools Application*.
- Silva, F. J. G. (2008a). *Materiais para ferramentas*. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Silva, F. J. G. (2008b). *Desgaste e Avarias nas Ferramentas*. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Silva, F. J. G. (2008c). *Vida das Ferramentas & Custos de Maquinagem*. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- TMR Stainless. (2014). Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless Steels. In *International Molybdenum Association*.

