



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**ESTUDO COMPARATIVO DO COMPORTAMENTO DE
DIFERENTES FERRAMENTAS NA FRESAGEM DE AÇOS
DUPLEX**

Pedro Jorge Carvalho de Melo Reis



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**ESTUDO COMPARATIVO DO COMPORTAMENTO DE
DIFERENTES FERRAMENTAS NA FRESAGEM DE AÇOS
DUPLEX**

Pedro Jorge Carvalho de Melo Reis

1120162

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor Francisco José Gomes da Silva, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP e Co-Orientado por Jorge Manuel Dores de Castro e Hernâni Miguel Reis Lopes, Professores Adjuntos do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP.

Júri

Presidente	Doutor Alexandre Gonçalves Santos Santiago Sottomayor <i>Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto</i>
Orientador	Doutor Francisco José Gomes da Silva <i>Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto</i>
Vogal	Doutor Manuel Jorge Dores da Castro <i>Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto</i>
Vogal	Doutor Hernâni Miguel Reis Lopes <i>Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto</i>
Vogal	Professor Doutor António Paulo Monteiro Baptista <i>Professor Associado com Agregação, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto</i>

Agradecimentos

São devidos agradecimentos, principalmente, ao meu amigo e orientador, Doutor Francisco Silva, pela orientação deste trabalho, pela “luta” na aquisição de recursos essenciais à realização do mesmo e incansável ajuda na resolução de alguns problemas encontrados ao longo de todo o processo. Um sincero obrigado por ter acreditado em mim e por me ter ajudado a evoluir tanto ao longo de todo o Mestrado de Materiais e Tecnologias de Fabrico.

À empresa F. Reis – Máquinas e Ferramentas, Lda. por ter disponibilizado as fresas e equipamentos, a custo zero, bem como, aconselhamento e orientação, fundamentais à realização dos ensaios de maquinagem.

À Dormer, na pessoa do Sr. Vítor Almeida, por também ter disponibilizado fresas para os ensaios de maquinagem, a custo zero, e ter demonstrado interesse/agrado pelos resultados obtidos.

Ao Eng^o. Victor Moreira, das Oficinas Mecânicas do ISEP, pela disponibilidade, paciência, simpatia e dedicação na fase dos ensaios de maquinagem.

Ao Eng^o. Cláudio Costa, do CENFIM - Ermesinde, pelo apoio, dedicação e companheirismo aquando da realização de alguns ensaios de maquinagem, bem como, ao Eng^o. Joaquim Rocha e à Dra. Cristina Cadete por facilitar a minha ida ao centro de formação.

À Eng^a. Rafaela Casais pela simpatia e paciência na cedência de tempo disponível no CEMUP e ao Dr. Rui Rocha pelo magnífico trabalho realizado nas sessões de SEM.

Aos meus Co-Orientadores, especialmente ao Eng^o. Jorge Dores de Castro pela disponibilidade e grande apoio demonstrados aquando da realização das sessões de análise de rugosidade, e ao Eng^o. Hernâni Lopes por ter facilitado a utilização do Centro de Maquinagem do ISEP, bem como, pela ajuda na correcção/orientação desta tese.

Ao meu colega de Mestrado e grande amigo António Pinho, da Arsopi, por ter cedido o material utilizado nos ensaios de maquinagem.

Um especial obrigado aos meus pais/patrões por todo o apoio, orientação, incentivo, amor, carinho e dedicação, e à minha namorada/cúmplice pela grande ajuda, paciência, amor, dedicação e alento que me deu para continuar a melhorar, não só neste trabalho, mas em todo o meu percurso académico.

A todos os que, directa ou indirectamente, contribuíram para a realização deste trabalho, Obrigado por tudo.

Resumo

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

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

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

Tendo em consideração estes dois factores, o presente trabalho visa, essencialmente avaliar qual a ferramenta mais adequada para trabalhar este tipo de ligas, em função do tipo de maquinagem e condições de corte.

Para tal, foram utilizadas diferentes ferramentas dotadas da mesma geometria, e seleccionados parâmetros que constituíssem um denominador comum entre os valores indicados pelos diferentes fabricantes. Foram consideradas apenas condições de maquinagem com utilização de fluido de corte e realizados percursos de corte previamente determinados na fresagem, utilizando fresas de topo em condições de maquinagem de alta velocidade.

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

Palavras-chave

Maquinagem, Maquinagem de Alta Velocidade, Ferramentas, Desgaste, Vida das Ferramentas, Aços Inoxidáveis Duplex.

Abstract

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

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

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

Considering these two factors, the present work aims essentially to assess the most appropriate tool for working this kind of alloys, taking into consideration certain type of machining and cutting conditions.

Thus, different tools were used with the same geometry and the main parameters were selected constituting a common denominator among the values indicated by the different manufacturers. Only cutting fluid machining conditions were considered and the machining process was performed using cutting routes previously determined, using end mills in high speed machining conditions

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

Keywords

Machining process, High Speed Machining, Tools, Wear, Tool-life, Duplex Stainless Steel

Lista de Símbolos e Abreviaturas

<i>Ae</i>	<i>Largura de desbaste lateral</i>
<i>AIISI</i>	<i>American Iron e Steel Institute</i>
<i>Al</i>	<i>Alumínio</i>
<i>Al₂O₃</i>	<i>Óxido de alumínio</i>
<i>Ap</i>	<i>Profundidade de corte</i>
<i>ASTM</i>	<i>American Society for Testing and Materials</i>
<i>C</i>	<i>Carbono</i>
<i>CAD</i>	<i>Computer Aided Design</i>
<i>CAM</i>	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
<i>CNC</i>	<i>Computer Numeric Control</i>
<i>Co</i>	<i>Cobalto</i>
<i>Cr</i>	<i>Crómio</i>
<i>CrN</i>	<i>Nitreto de Crómio</i>
<i>Cu</i>	<i>Cobre</i>
<i>CVD</i>	<i>Chemical Vapour Deposition</i>
<i>D e D_m</i>	<i>Diâmetro da peça</i>
<i>EDS</i>	<i>Energy-dispersive X-ray spectroscopy</i>
<i>Fe</i>	<i>Ferro</i>
<i>Fn</i>	<i>Componente normal de força de maquinagem</i>
<i>fn</i>	<i>Avanço por rotação</i>
<i>Ff</i>	<i>Componente de atrito</i>
<i>Fz</i>	<i>Avanço por dente</i>

H_2	<i>Hidrogénio</i>
HCl	<i>Cloreto de hidrogénio</i>
h_{ex}	<i>Espessura da apara</i>
HB	<i>Dureza Brinell</i>
HM	<i>Metal duro (Hard Metal)</i>
HPT	<i>Ferramentas de alto desempenho (High Performance Tools)</i>
HRC	<i>Dureza Rockwell C</i>
HSS	<i>Aço rápido (High Speed Steel)</i>
HV	<i>Dureza Vickers</i>
ISO	<i>International Standards Organization</i>
K	<i>Coefficiente de força</i>
k_s	<i>Pressão específica de corte</i>
l	<i>Comprimento maquinado por minuto</i>
L_c	<i>Percurso de corte</i>
λ	<i>Ângulo de inclinação da aresta de corte</i>
M	<i>Nº de revoluções por minuto</i>
MEV	<i>Microscópio Electrónico de Varrimento</i>
$MgCl_2$	<i>Cloreto de magnésio</i>
Mn	<i>Manganês</i>
Mo	<i>Molibdénio</i>
N	<i>Rotação da árvore do torno</i>
N_2	<i>Azoto</i>
Ni	<i>Níquel</i>
p	<i>Pressão de corte exercida na superfície</i>
PCD	<i>Polycrystalline Diamond</i>
PVD	<i>Physical Vapor Deposition</i>
Qtd	<i>Quantidade</i>

<i>Ra</i>	<i>Rugosidade média aritmética</i>
<i>Rm</i>	<i>Resistência à tracção</i>
<i>Rp_{0,2}</i>	<i>Limite de escoamento</i>
<i>Rz</i>	<i>Rugosidade máxima</i>
<i>S₀</i>	<i>Área da secção transversal da apara antes de sua remoção da peça</i>
<i>S</i>	<i>Área de secção da apara</i>
<i>SAF</i>	<i>Sandvik Austenitic Ferritic</i>
<i>SEM</i>	<i>Scanning electron microscope</i>
<i>STD</i>	<i>Standard</i>
<i>SiC</i>	<i>Carboneto de silício</i>
<i>Si</i>	<i>Silício</i>
σ	<i>Tensão</i>
τ	<i>Tensão de corte</i>
<i>T</i>	<i>Temperatura</i>
<i>TAX</i>	<i>Nitreto de titânio-alumínio</i>
<i>TiAlN ou AlTiN</i>	<i>Nitreto de titânio-alumínio</i>
<i>TiC</i>	<i>Carboneto de titânio</i>
<i>TiCl₄</i>	<i>Tetracloro de titânio</i>
<i>TiCN</i>	<i>Nitreto de carboneto de titânio</i>
<i>TiN</i>	<i>Nitreto de titânio</i>
<i>v e Vc</i>	<i>Velocidade de corte</i>
<i>v</i>	<i>Velocidade periférica</i>
<i>Vf</i>	<i>Avanço da mesa</i>
<i>VI</i>	<i>Inspecção visual</i>
<i>W</i>	<i>Tungsténio</i>
<i>WC</i>	<i>Carboneto de tungsténio</i>

γ *Ângulo de ataque*

Zn *Zinco*

Índice de Figuras

Figura 1 – Representação das forças de corte (Chiaverini, 1977)	7
Figura 2 – Relação da quebra da apara com a profundidade e avanço (Tschätsch, 2008).....	11
Figura 3 – Representação da peça de trabalho (1), ferramenta de corte (2); movimentos de rotação (3), movimento de avanço (4) movimento de penetração (5)	13
Figura 4 – Esquema das principais operações de torneamento (Chiaverini, 1977)	14
Figura 5 – Movimentos e cotas de torneamento (Sandvik - Manual Técnico, 2010)	15
Figura 6 - Inclinação (λ) e Ângulo de ataque (γ) (Sandvik - Manual Técnico, 2010)	15
Figura 7 – Posicionamento dos suportes de ferramentas no torneamento (SANDVIK-Coromant)	18
Figura 8 – Ferramentas motorizadas: Axial (à direita) e Radial (à esquerda)	19
Figura 9 – Montagem das cabeças motorizadas na torreta de ferramentas	19
Figura 10 – Componentes do torno mecânico convencional (Borges, 2008)	20
Figura 11 – Torno CNC.....	21
Figura 12 – Principais faces e arestas das ferramentas (ISO, ISO 241, 1994).....	26
Figura 13 – Algumas variações das ferramentas de corte de torneamento (Tschätsch, 2008).....	26
Figura 14 – Ângulos característicos e montagem correcta da ferramenta de corte (CENFIM).....	28
Figura 15 – Propriedades mais relevantes dos insertos consoante a sua geometria (Sandvik - Manual Técnico, 2010).....	30
Figura 16 – Raio de canto da ferramenta e respectivo acabamento (Smith, 2008).....	30
Figura 17 – Torneamento de perfis.....	31
Figura 18 - Fresagem.....	32
Figura 19 – Operações básicas de fresagem (DORMER, 2010)	32
Figura 20 – Fresagem tangencial (Schneider, 2002)	33
Figura 21 – Fresagem frontal (Schneider, 2002)	34
Figura 22 – Fresagem concordante (Schneider, 2002)	34
Figura 23 – Fresagem discordante (Schneider, 2002)	35
Figura 24 – Fresagem combinada (Schneider, 2002)	36
Figura 25 – Principais componentes de uma fresadora horizontal	38
Figura 26 – Algumas operações de fresagem horizontal (Chiaverini, 1977).....	38
Figura 27 – Principais componentes de uma fresadora vertical	39
Figura 28 – Algumas operações de fresagem vertical (Chiaverini, 1977).....	39
Figura 29 – Fresadora universal	40
Figura 30 – Outros tipos de fresadoras especiais (Chiaverini, 1977)	41
Figura 31 – Fresa de topo de 2 lâminas	42
Figura 32 – Principais perfis dos dentes e desenho esquemático de uma fresa	42
Figura 33 – Exemplo de furadora	47
Figura 34 – Furação: a) Movimento de corte; b) Movimento de avanço (Borges, 2008).....	50
Figura 35 – Partes constituintes de uma broca (DORMER, 2010).....	51
Figura 36 – Representação das principais modalidades de furação (Chiaverini, 1977)	52
Figura 37 – Parâmetros envolvidos na furação (Sandvik - Definições na furação).....	52
Figura 38 – Broca de pastilhas intercambiável (Sandvik - Definições na furação)	53
Figura 39 – Brocas de pontas intercambiáveis (Sandvik - Definições na furação)	53
Figura 40 - Conicidade (Sandvik - Definições na furação)	53
Figura 41 - Profundidade do furo (Sandvik - Definições na furação)	53
Figura 42 – Representação esquemática de uma furadora de coluna (Chiaverini, 1977)	55
Figura 43 – Exemplo de operações especiais: facejamento de superfícies de apoio e sangramento de discos (recortar) (Borges, MMBorges - Furação, 2008).....	57
Figura 44 – Diferentes tipos de brocas, tanto sólidas como de pastilha, para operações comuns e especiais (Costa, 2014).....	58
Figura 45 - Broca canhão para furos profundos (Borges, 2008).....	58
Figura 46 – Tipos principais de mandris	59
Figura 47 – Tipos de escareadores (Costa, 2014).....	59
Figura 48 – Operações de escareamento e furação (Costa, 2014)	60
Figura 49 – Processo abrasivo de remoção de material (Senai - Torneamento e Rectificação, 2009)	62
Figura 50 – Tipos de interacção dos grãos abrasivos com o material da peça de trabalho (Senai - Torneamento e Rectificação, 2009).....	62
Figura 51 – Representação esquemática de algumas operações de rectificação (Senai - Torneamento e Rectificação, 2009).....	64

Figura 52 – Rectificadora plana e respectivos movimentos principais (Chiaverini, 1977)	65
Figura 53 – Representação esquemática dos principais componentes e dos movimentos de uma rectificadora de superfícies externas (Chiaverini, 1977)	65
Figura 54 – Rectificadora universal (Chiaverini, 1977)	66
Figura 55 – Rectificação de engrenagens	67
Figura 56 – Formas e aplicações dos rebolos (Senai - Torneamento e Rectificação, 2009).....	69
Figura 57 – Especificação dos rebolos (Senai - Torneamento e Rectificação, 2009).....	70
Figura 58 – Evolução cronológica dos materiais utilizados nas ferramentas de corte (Helmi A. Youssef, 2008).....	73
Figura 59 – Diferentes grupos de materiais (WALTER - Catálogo Geral, 2012)	80
Figura 60 – Tipos de graus existentes para aços (Sandvik - Manual Técnico, 2010).....	81
Figura 61 – Tipos de graus existentes para aços inoxidáveis (Sandvik - Manual Técnico, 2010).....	81
Figura 62 – Tipos de desgaste em ferramentas e variáveis de medição (ISO, ISO 3585, 1993)	87
Figura 63 – Medição do desgaste dos flancos – VB (Silva, 2008).....	88
Figura 64 – Desgaste VB em função da velocidade de corte (Silva, 2008).....	89
Figura 65 – Representação da curva de vida $T = f(V_c)$, para o desgaste VB = 0.2 mm, obtida do gráfico anterior (Silva, 2008).....	89
Figura 66 – Percurso de corte da ferramenta em função da velocidade de corte para um desgaste VB = 0.2 mm obtida do primeiro gráfico (Silva, 2008)	90
Figura 67 – Recta associada à curva de vida da ferramenta (Silva, 2008)	91
Figura 68 – Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte (ISO, ISO 3585, 1993).....	92
Figura 69 – Desgaste de cratera na superfície de uma ferramenta (Kim, 2004).....	93
Figura 70 – Desgaste de entalhe na superfície de saída (Kim, 2004).....	93
Figura 71 - Desgaste de flanco na superfície de saída de uma ferramenta (Kim, 2004).....	94
Figura 72 - Desgaste por deformação plástica (Silva, 2008).....	95
Figura 73 – Desgaste por fissura térmica na ferramenta (Silva, 2008).....	95
Figura 74 – Fractura da ferramenta (Silva, 2008).....	96
Figura 75 – Modos de desgaste no torneamento (Silva, 2008).....	97
Figura 76 – Revestimento multicamada (Silva, 2008)	98
Figura 77 – Microestrutura típica de um aço inoxidável austenítico AISI 316L (x400) e microestrutura típica de um aço inoxidável duplex SAF 2205 (x400)	100
Figura 78 – Resistência ao impacto dos aços inox duplex e 316L. Ensaio Charpy, provetes de secção 10 x 10 x 50 mm ³ e entalhe em V. Os ensaios foram realizados na direcção transversal à direcção de laminação (Charles, 1991)	102
Figura 79 – Expansão térmica $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ (30-100 ^o C) (Gomes, Viñas, & Vatavuk, 1999).....	103
Figura 80 – Maquinabilidade relativa de aço inox duplex comparada com o tipo 316 para ferramentas em metal duro (HM) e aço rápido (HSS) (Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless 2nd Ed., 2009)	104
Figura 81 – Centro de maquinagem HAAS VF-2	110
Figura 82 – Fixação do tarugo na mesa de trabalho do centro de maquinagem	113
Figura 83 – Cone hidráulico WTE, modelo DIN 69871-AD/B, utilizado nos ensaios.....	114
Figura 84 – A: Fresagem lateral (<i>Side Milling</i>); B: Fresagem “em cheio” (<i>Slotting</i>).....	116
Figura 86 - Características e benefícios HPMT SE30 Plunge-Mill	118
Figura 87 – Características e benefícios HPMT SE45 Noviano Standard.....	120
Figura 88 – Temperaturas críticas de <i>pitting</i> em 1M NaCl segundo ao ASTM G 150 usando a <i>Avesta Cell</i> (Sandvik - Material Center Datasheet - LDX2101, 2013).....	129
Figura 89 – Rugosímetro Mahr M2.....	132
Figura 90 – Microscópio Electrónico de Varrimento (MEV) FEI Quanta 400 FEG.....	133
Figura 91 – Orientação da operação de maquinagem.....	134
Figura 92 – Tipo de refrigeração utilizada	136
Figura 93 – Zona de adesão de material no flanco da fresa HPMT 3Z para 8 ciclos, assinalada como Z1	144
Figura 94 – Composição relativa à zona Z1 na ferramenta HPMT 3Z.....	144
Figura 95 – Inclusões de heterogeneidades (fases mais duras) no material, encontradas através da análise das aparas pós-ensaios.....	148
Figura 96 – Diferentes zonas e impurezas detectadas na superfície da fresa da WALTER 4Z.....	154
Figura 97 – Composição relativa à zona Z1 na ferramenta WALTER 4Z	155
Figura 98 – Composição relativa à zona Z2 na ferramenta WALTER 4Z	155
Figura 99 – Composição relativa à zona Z3 na ferramenta WALTER 4Z	156
Figura 100 – Diferentes zonas detectadas na fresa HPMT 4Z em 16 ciclos.....	162
Figura 101 – Composição relativa à zona Z1 na ferramenta HPMT 4Z.....	163
Figura 102 – Composição relativa à zona Z2 na ferramenta HPMT 4Z.....	163
Figura 103 - Resultados de Ra, Rz e Rmax obtidos relativos aos 8 ciclos	169

Figura 104 - Resultados de Ra, Rz e Rmax obtidos relativos aos 16 ciclos	170
Figura 105 – Evolução da rugosidade radial nas 4 fresas em estudo.....	171
Figura 106 – Evolução da rugosidade tangencial nas 4 fresas em estudo	171
Figura 107 – Relevo na zona de fronteira do passo.....	172
Figura 108 – Fenómeno da quebra das extremidades das arestas de corte e desgaste dos flancos	172
Figura 109 – Quebra da ferramenta no final da zona útil de trabalho	173
Figura 110 – Valores de VB das arestas obtidos de cada ferramenta relativos 8 ciclos	173
Figura 111 – Valores de VB das arestas obtidos de cada ferramenta relativos 16 ciclos	174
Figura 112 – Aparas recolhidas após ensaios de 8 ciclos da HPMT 3Z (esquerda) e da DORMER 2Z (direita).....	175
Figura 113 – Aparas da HPMT 3Z em 8 ciclos e pormenor da face de esmagamento.....	175
Figura 114 – Face de corte da apara da HPMT 3Z.....	176
Figura 115 – Aparas da DORMER 2Z em 8 ciclos e pormenor da face de esmagamento.....	176
Figura 116 - Face de corte da apara da DORMER 2Z.....	177

Índice de tabelas

Tabela 1 – Formas de apara e taxa de volume de apara (Tschätsch, 2008)	11
Tabela 2 – Volume de lubrificante utilizado para cada tipo de maquinagem (Tschätsch, 2008)	12
Tabela 3 – Parâmetros geométricos (MMBorges - Torneamento)	16
Tabela 4 – Principais operações de torneamento.....	16
Tabela 5 – Tipos de tornos	23
Tabela 6 – Tipos de operações de torneamento externo	27
Tabela 7 – Tipos de operações de torneamento interno (Smith, 2008).....	28
Tabela 8 – Ângulo de corte positivo e negativo (Smith, 2008).....	29
Tabela 9 – Operações básicas de fresagem e ferramentas de corte ilustrando a variedade de superfícies e combinações de superfícies que podem ser realizadas	44
Tabela 10 – Alguns tipos de fresas mais utilizadas (DORMER, 2010).....	45
Tabela 11 – Comparação de fresas com diferentes números de lâminas (DORMER, 2010)	46
Tabela 12 – Tipos de furadora típicas	56
Tabela 13 – Métodos de rectificação (Senai - Torneamento e Rectificação, 2009).....	61
Tabela 14 – Tipos de rectificadoras.....	67
Tabela 15 – Dados técnicos dos aços ferramenta não ligados (Davis, 1995)	74
Tabela 16 – Aplicações de aços ferramenta não ligados (Davis, 1995)	75
Tabela 17 - Dados técnicos dos aços rápidos (Davis, 1995).....	76
Tabela 18 – Aplicações dos aços rápidos (Davis, 1995)	76
Tabela 19 – Faixas de aplicação dos metais duros (Davis, 1995)	77
Tabela 20 – Parâmetros dos metais duros (Davis, 1995).....	77
Tabela 21 – Parâmetros dos materiais cerâmicos (Davis, 1995)	79
Tabela 22 – Materiais processados com ferramentas diamantadas (Davis, 1995).....	79
Tabela 23 – Especificações dos graus adequados a aços inoxidáveis (Sandvik - Manual Técnico, 2010).82	
Tabela 24 – Composição química dos principais aços inoxidáveis (Fontana & Greene, 1986).....	100
Tabela 25 – Comparação entre as propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis de microestrutura duplex com ligas austeníticas (Fontana & Greene, 1986)	101
Tabela 26 – Propriedades físicas (Gomes, Viñas, & Vatauvuk, 1999).....	102
Tabela 27 – Alguns problemas associados à maquinagem de aços duplex e respectivas soluções (OUTOKUMPU - Machinability of Duplex SS, 2011).....	106
Tabela 28 – Dimensões e algumas características da bucha Bison 3575.....	113
Tabela 29 – Características técnicas do cone hidráulico	114
Tabela 30 – Ferramentas utilizadas	115
Tabela 31 – Características gerais da fresa WALTER Protostar N45 Compact.....	116
Tabela 32 – Fresagem a 90° sem raio de canto com fresa WALTER Protostar N45 Compact	117
Tabela 33 - Dimensões da ferramenta Walter Protostar N45 Compact	117
Tabela 34 – Parâmetros recomendados pelo fabricante.....	117
Tabela 35 – Propriedades da fresa HPMT SE30 Plunge-Mill	118
Tabela 36 – Parâmetros recomendados pelo fabricante.....	119
Tabela 37 – Propriedades da fresa HPMT SE45 Noviano Standard.....	120
Tabela 38 – Parâmetros recomendados pelo fabricante.....	121
Tabela 39 - Propriedades da fresa DORMER S812HA.....	122
Tabela 40 – Parâmetros recomendados pelo fabricante.....	123
Tabela 41 - Propriedades químicas do Duplex CD4MCuN (Arsopi - Certificado 22 - Tarugo Duplex, 2014).....	125
Tabela 42 – Propriedades mecânicas do Aço Duplex CD4MCuN (MatWeb) (CES Edupack 2005).....	126
Tabela 43 – Propriedades de tração a altas temperaturas do Duplex LDX 2101 (Sandvik - Material Center Datasheet - LDX2101, 2013).....	127
Tabela 44 – Resultados dos ensaios de fadiga por vibração do Duplex CD4MCuN.....	128
Tabela 45 – Propriedades físicas do Duplex LDX2101 (Sandvik - Material Center Datasheet - LDX2101, 2013).....	128
Tabela 46 – Resultados do teste de corrosão sob tensão de dobragem em MgCl ² (Sandvik - Material Center Datasheet - LDX2101, 2013).....	130
Tabela 47 – Dados técnicos do rugosímetro.....	132
Tabela 48 – Dados técnicos do microscópio óptico de varrimento	133
Tabela 49 – Parâmetros de maquinagem utilizados.....	135
Tabela 50 – Características gerais e parâmetros dos ensaios.....	137

Tabela 51 – Valores de rugosidade Ra, Rz e Rmax das superfícies maquinadas pela WALTER 4Z – 8 ciclos (Valores em μm)	139
Tabela 52 – Resultados de desgaste obtidos na ferramenta WALTER 4Z para 8 ciclos	139
Tabela 53 - Valores de rugosidade Ra, Rz e Rmax das superfícies maquinadas pela HPMT 3Z – 8 ciclos (Valores em μm).....	142
Tabela 54 - Resultados de desgaste obtidos na ferramenta HPMT 3Z para 8 ciclos	142
Tabela 55 - Valores de rugosidade Ra, Rz e Rmax das superfícies maquinadas pela HPMT 4Z – 8 ciclos (Valores em μm).....	145
Tabela 56 - Resultados de desgaste obtidos na ferramenta HPMT 4Z para 8 ciclos	146
Tabela 57 - Valores de rugosidade Ra, Rz e Rmax das superfícies maquinadas pela fresa DORMER 2Z – 8 ciclos (Valores em μm)	149
Tabela 58 - Resultados de desgaste obtidos na ferramenta DORMER 2Z para 8 ciclos	149
Tabela 59 – Valores de rugosidade Ra, Rz e Rmax das superfícies maquinadas pela WALTER 4Z – 16 ciclos (Valores em μm)	151
Tabela 60 – Resultados de desgaste obtidos na ferramenta WALTER 4Z para 16 ciclos	152
Tabela 61 – Definição das diferentes zonas encontradas na superfície da fresa da WALTER 4Z	154
Tabela 62 - Valores de rugosidade Ra, Rz e Rmax das superfícies maquinadas pela HPMT 3Z – 16 ciclos (Valores em μm).....	157
Tabela 63 - Resultados de desgaste obtidos na ferramenta HPMT 3Z para 16 ciclos	157
Tabela 64 - Valores de rugosidade Ra, Rz e Rmax das superfícies maquinadas pela HPMT 4Z – 16 ciclos (Valores em μm).....	160
Tabela 65 - Resultados de desgaste obtidos na ferramenta HPMT 4Z para 16 ciclos	160
Tabela 66 – Definição das diferentes zonas encontradas na superfície da fresa da HPMT 4Z.....	163
Tabela 67 - Valores de rugosidade Ra, Rz e Rmax das superfícies maquinadas pela DORMER 2Z – 16 ciclos (Valores em μm)	164
Tabela 68 - Resultados de desgaste obtidos na ferramenta DORMER 2Z para 16 ciclos	165
Tabela 69 – Globalidade de valores de rugosidade Ra, Rz e Rmax obtidos das superfícies maquinadas pelas 4 fresas para 8 e 16 ciclos (Valores em μm)	168

Índice

Agradecimentos	vii
Resumo	ix
Abstract.....	xi
Lista de Símbolos e Abreviaturas	xiii
Índice de Figuras	xvii
Índice de tabelas	xxi
Índice.....	xxiv
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objectivos.....	2
1.3. Metodologia	3
1.4. Estrutura.....	3
2. Revisão Bibliográfica.....	5
2.1. Maquinagem: Breve introdução.....	5
2.2. Princípios teóricos ligados à maquinagem	7
2.2.1. Torneamento	13
2.2.1.1. Princípios básicos do torneamento	14
2.2.1.2. Equipamentos para tornear.....	19
2.2.1.3. Ferramentas específicas para torneamento.....	26
2.2.2. Fresagem	32
2.2.2.1. Princípios básicos da fresagem.....	33
2.2.2.2. Fresadoras	37
2.2.2.3. Ferramentas específicas para fresagem	41
2.2.3. Furação	47
2.2.3.1. Princípios básicos da furação.....	49
2.2.3.2. Furadoras.....	54
2.2.3.3. Ferramentas específicas para utilizar em furadoras.....	57
2.2.4. Rectificação.....	60
2.2.4.1. Princípios básicos da rectificação	61
2.2.4.2. Equipamentos para rectificar	64
2.2.4.3. Ferramentas específicas para rectificação.....	68
2.3. Ferramentas	72

2.3.1.	Materiais para ferramentas	74
2.3.1.1.	Aços para ferramenta não ligados	74
2.3.1.2.	Aços rápidos	75
2.3.1.3.	Metal duro	76
2.3.1.4.	Cerâmicos	78
2.3.1.5.	Ferramentas diamantadas	79
2.3.2.	Graus de metal duro	80
2.3.3.	Revestimentos para ferramentas.....	83
2.3.3.1.	Revestimentos disponibilizados comercialmente	84
2.3.3.2.	Investigação ligada a revestimentos para ferramentas	85
2.3.3.2.1.	Métodos de revestimento das ferramentas de corte.....	85
2.3.4.	Desgaste das ferramentas	86
2.3.4.1.	Crítérios de fim de vida de uma ferramenta	86
2.3.4.2.	Vida útil das ferramentas.....	88
2.3.4.3.	Tipos de desgaste encontrados nas ferramentas	92
2.3.4.3.1.	Estrutura das camadas de revestimento	98
2.4.	Aços inoxidáveis Duplex	99
2.4.1.	Composição química típica	99
2.4.1.1.	Microestrutura dos aços inoxidáveis dúplex	100
2.4.2.	Propriedades mecânicas principais	101
2.4.3.	Propriedades físicas	102
2.4.4.	Resistência à corrosão	103
2.4.5.	Maquinabilidade dos aços inoxidáveis Duplex	104
3.	Desenvolvimento.....	109
3.1.	Objectivos do trabalho	109
3.2.	Caracterização do equipamento de maquinaria	110
3.2.1.	Centro de maquinaria utilizado	110
3.2.1.1.	HAAS VF-2 - Resumo do produto.....	110
3.2.1.2.	Especificações técnicas do centro de maquinaria	111
3.2.2.	Dispositivos de fixação das peças.....	112
3.2.3.	Dispositivos de fixação das ferramentas	114
3.3.	Caracterização das ferramentas a utilizar	115
3.3.1.	Ferramenta do tipo A - WALTER Protostar N45 Compact H3014018-4	116
3.3.2.	Ferramenta do tipo B - HPMT SE30 Plunge-Mill G10040005006 (G6110)(Z3)	118
3.3.3.	Ferramenta do tipo C - HPMT SE45 Noviano Standard V47BXZ024GX040001 (G6110)(Z4)	120

3.3.4.	Ferramenta do tipo D - DORMER Spectrum S812HA.....	122
3.4.	Caracterização do material a maquinar	123
3.4.1.	Composição química.....	125
3.4.2.	Propriedades Mecânicas.....	126
3.4.2.1.	A altas temperaturas	127
3.4.2.2.	Fadiga.....	128
3.4.3.	Propriedades Físicas	128
3.4.3.1.	Resistência à corrosão	129
3.4.3.2.	Pitting e corrosão intersticial.....	129
3.4.3.3.	Corrosão atmosférica	130
3.4.3.4.	Corrosão sob tensão.....	130
3.4.3.5.	Corrosão intergranular	130
3.4.3.6.	Soldabilidade	131
3.5.	Caracterização dos meios laboratoriais de análise utilizados	131
3.5.1.	Rugosímetro	132
3.5.2.	Microscópio Electrónico de Varrimento	133
3.5.3.	Condições utilizadas nos ensaios de maquinagem.....	134
3.5.4.	Parâmetros utilizados e respectiva explicação sobre a sua adopção	134
3.5.5.	Realização prática dos ensaios de maquinagem	136
3.6.	Resultados	138
3.6.1.	Resultados para 8 ciclos – percurso de maquinagem de 7,5 metros	138
3.6.1.1.	Fresa WALTER Protostar N45 Compact H30140418-4 para 8 ciclos	138
3.6.1.1.1.	Análise de rugosidade para 8 ciclos - Fresa WALTER 4Z	138
3.6.1.1.2.	Análise de desgaste para 8 ciclos - Fresa WALTER 4Z.....	139
3.6.1.2.	Fresa HPMT SE30 Plunge-Mill G10040005006 3Z para 8 ciclos	141
3.6.1.2.1.	Análise de rugosidade para 8 ciclos - Fresa HPMT 3Z	141
3.6.1.2.2.	Análise de desgaste para 8 ciclos - Fresa HPMT 3Z	142
3.6.1.3.	Fresa HPMT SE45 Noviano Standard V47BXZ024GX040001 4Z para 8 ciclos	144
3.6.1.3.1.	Análise de rugosidade para 8 ciclos - Fresa HPMT 4Z	145
3.6.1.3.2.	Análise de desgaste para 8 ciclos - Fresa HPMT 4Z	145
3.6.1.4.	Fresa DORMER Spectrum S812HA 2Z para 8 ciclos	148
3.6.1.4.1.	Análise de rugosidade para 8 ciclos - Fresa DORMER 2Z.....	148
3.6.1.4.2.	Análise de desgaste para 8 ciclos - Fresa DORMER 2Z	149
3.6.2.	Resultados para 16 ciclos – percurso de maquinagem de 15 metros	151
3.6.2.1.	Fresa WALTER Protostar N45 Compact H30140418-4 para 16 ciclos	151
3.6.2.1.1.	Análise de rugosidade para 16 ciclos - Fresa WALTER 4Z	151

3.6.2.1.2.	Análise de desgaste para 16 ciclos - Fresa WALTER 4Z	152
3.6.2.2.	Fresa HPMT SE30 Plunge-Mill G10040005006 3Z para 16 ciclos	156
3.6.2.2.1.	Análise de rugosidade para 16 ciclos - Fresa HPMT 3Z	156
3.6.2.2.2.	Análise de desgaste para 16 ciclos - Fresa HPMT 3Z	157
3.6.2.3.	Fresa HPMT SE45 Noviano Standard V47BXZ024GX040001 4Z para 16 ciclos	159
3.6.2.3.1.	Análise de rugosidade para 16 ciclos - Fresa HPMT 4Z	159
3.6.2.3.2.	Análise de desgaste para 16 ciclos - Fresa HPMT 4Z	160
3.6.2.4.	Fresa DORMER Spectrum S812HA 2Z para 16 ciclos	163
3.6.2.4.1.	Análise de rugosidade para 16 ciclos - Fresa DORMER 2Z.....	164
3.6.2.4.2.	Análise de desgaste para 16 ciclos - Fresa DORMER 2Z	164
3.6.3.	Análises genéricas.....	167
3.6.3.1.	Análise da rugosidade superficial	167
3.6.4.	Análise do desgaste das ferramentas	171
3.6.5.	Análise das aparas recolhidas.....	175
4.	Conclusões	178
5.	Bibliografia e outras fontes de informação	180
5.1.	Bibliografia	180
5.2.	Outras fontes de informação.....	180

1. Introdução

1.1. Enquadramento

A maquinagem é, actualmente, um dos processos mais usados na indústria metalomecânica, em termos mundiais. Este vem dar resposta à necessidade de se obterem peças com alguma complexidade, através de um processo relativamente fácil e quase independente da dureza do material.

A forte evolução registada nos equipamentos para maquinagem, nomeadamente através de uma maior sofisticação dos sistemas de accionamento e controlo, vieram trazer novos desafios às ferramentas, as quais necessitaram de acompanhar o desempenho conseguido pelos equipamentos, em termos de velocidade e precisão de posicionamento. Neste aspecto, as ferramentas têm evoluído de uma forma notória, através da adição de revestimentos a graus de metal duro cada vez mais versáteis, que permitem adaptar as características da superfície da ferramenta às propriedades e estado de tratamento próprios de cada material. Isso passou a ser conseguido através de um revestimento da superfície das ferramentas em aço rápido ou metal duro, e agora é efectuado através de uma série de finos revestimentos, cada um dos quais com propriedades muito específicas, que conferem óptimas propriedades de transferência de calor, baixo atrito e, fundamentalmente, elevada dureza e resistência ao desgaste.

Por outro lado, o desenvolvimento nas ligas metálicas também não cessou de mostrar óptimos resultados, através do aparecimento de aços de alta resistência, com uma elevada resistência mecânica, e ligas inoxidáveis duplex, que aliam óptimas propriedades de resistência mecânica e resistência ao desgaste, mesmo em meios químicos, com elevada agressividade em termos de oxidação e corrosão.

É neste contexto que surge o interesse pela maquinagem de ligas de aço inoxidável duplex, as quais começam a ser cada vez mais usadas em aplicações ligadas à indústria química e à transformação de polímeros, necessitando, portanto, da maquinagem como um processo praticamente incontornável de atingir as formas necessárias.

1.2. Objectivos

Este trabalho tem como objectivo principal proceder à análise comparativa de diversas ferramentas de corte por arranque de apara, utilizando a fresagem e ferramentas cilíndricas, em condições de maquinagem com utilização de fluido de corte e segundo condições de maquinagem de alta velocidade. Assim, poderá considerar-se que o objectivo principal passa também por:

- Seleccionar as ferramentas mais adequadas para a maquinagem do material considerado;
- Analisar as recomendações dos fabricantes e comprová-las;
- Efectuar ensaios de maquinagem em condições previamente estabelecidas;
- Proceder à análise das superfícies maquinadas e do desgaste provocado em cada uma das ferramentas.

Para a prossecução dos objectivos anteriormente referidos, tornar-se-á necessário:

- Estudar as características do material a maquinar;
- Definir as condições de corte que sejam admitidas por qualquer uma das ferramentas envolvidas no estudo;
- Elaborar um plano de ensaios;
- Cumprir com rigor o plano de ensaios estipulado;
- Analisar com rigor a superfície resultante de cada ensaio, assim como o estado das arestas de corte e da superfície em geral de cada ferramenta.

Os resultados obtidos serão devidamente tratados e tiradas as respectivas ilações.

1.3. Metodologia

A elaboração do presente trabalho seguiu a metodologia que seguidamente se descreve:

- Estudo do estado da arte referente à matéria em causa;
- Estudo do material a ser usado como objecto de maquinagem – Aço Inoxidável Duplex;
- Selecção das ferramentas a usar no trabalho prático;
- Estudo dos parâmetros a utilizar em todos os ensaios a efectuar;
- Estabelecimento das condições práticas para a realização dos testes, nomeadamente, o plano de ensaios e a preparação de trabalho correspondente, em termos de elaboração do programa CNC para a efectivação dos testes de maquinagem;
- Realização dos testes de maquinagem;
- Análise, por perfilometria, do estado superficial da peça resultante da maquinagem;
- Análise do desgaste provocado pela maquinagem na ferramenta;
- Redacção da presente Dissertação.

1.4. Estrutura

A estrutura deste trabalho está assente essencialmente em duas 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, e o Desenvolvimento do Trabalho Prático propriamente dito, com referência à forma como os testes foram efectuados, quais as metodologias de análise utilizadas e quais os resultados efectivamente obtidos.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Maquinagem: Breve introdução

Maquinagem é um termo que cobre vários processos de fabricação desenvolvidos para remover material indesejado, geralmente sob a forma de aparas, da peça de trabalho. A maquinagem é usada para converter peças de fundição, forjamento ou mesmo blocos de metal para a geometria pretendida, com tamanho e acabamento específicos para atender aos requisitos do projecto. Quase todos os produtos fabricados têm componentes que necessitam de maquinagem, muitas vezes com grande rigor dimensional. Portanto, este conjunto de processos são dos mais importantes na fabricação devido ao valor acrescentado que conferem ao produto final (Davis, 1989).

A maioria das aplicações industriais de maquinagem recai sobre os metais. Contudo, o processo de corte de metal tem resistido à análise teórica devido em grande parte à sua grande complexidade. A aplicação destes processos está bastante generalizada no mundo industrial.

Os processos de maquinagem são realizados numa grande variedade de máquinas ferramenta. Alguns exemplos de máquinas ferramenta básicas são as fresadoras (fresagem), tornos (torneamento), furadoras (furação), rectificadoras (rectificação), serrotes mecânicos (corte), entre outros, sendo que cada um destes tipos de máquinas pode apresentar uma série de configurações diferentes. Os tornos, por exemplo, podem ser tornos horizontais, verticais, de placa, de revolver, copiadores, semiautomáticos, automáticos, entre outros. Os tornos seguiram também a tendência de outras máquinas ferramenta e, hoje em dia, é bastante comum encontrar-se máquinas destas com controlo numérico computadorizado. Estes processos podem ser combinados em máquinas multitarefa, conhecidas como centros de maquinagem.

Para cada tipo de máquina ferramenta básica, existe uma grande variedade de ferramentas de corte, suportes das ferramentas e da peça de trabalho, resultando numa enorme lista de equipamento e processos.

Para alguns tipos de peças, outros processos de fabricação convencionais não apresentam as melhores condições de custo e produtividade.

O processo de maquinagem possibilita atingir-se esses e outros objectivos, os quais, em consequência, podem ser assim resumidos (Chiaverini, 1977):

- Acabamento de superfícies de peças fundidas ou conformadas mecanicamente, de modo a se obter melhor aspecto superficial e dimensões mais precisas, de acordo com as especificações de fabricação e com a finalidade;
- Realização de tarefas específicas, impossíveis de conseguir através de outros processos;
- Fabricação em série de peças, a um custo mais baixo, em alguns casos;
- Fabricação de poucas peças, praticamente de qualquer forma, a partir de um bloco de material.

Nas operações de maquinagem, uma porção do material das peças é retirada pela acção de uma ferramenta (ferramenta de corte) produzindo a aparta.

De um modo geral, as operações de maquinagem podem ser classificadas da seguinte forma (Chiaverini, 1977):

- Torneamento, para obtenção de superfícies de revolução, em que a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo determinadas trajectórias. As várias modalidades de torneamento incluem: torneamento linear, cilíndrico, cónico, radial, perfilamento, sangramento, etc.;
- Furação, para obtenção de furos geralmente cilíndricos, em que a peça ou a ferramenta giram e, ao mesmo tempo, a ferramenta ou a peça se deslocam segundo uma trajectória rectilínea, coincidente ou paralela ao eixo principal da máquina. As várias modalidades de furação são: furação em cheio, escareamento, furação escalonada, furação de centros, etc.;
- Mandrilagem, destinada à obtenção de furos ou cavidades que devem atender a parâmetros de precisão específicos. A mandrilagem compreende as seguintes operações: mandrilagem cilíndrica, radial, cónica, etc.;
- Fresagem, destinada à obtenção de superfícies diversas, geralmente, através da utilização de ferramentas com várias lâminas de corte. Existem dois tipos básicos de fresagem: fresagem cilíndrica tangencial e frontal;
- Roscagem, para obtenção de roscas, por meio da abertura de um ou mais sulcos helicoidais de passo uniforme, em superfícies cilíndricas ou cónica. A peça ou a ferramenta gira e uma delas desloca-se ao mesmo tempo, de acordo

com uma trajectória rectilínea paralela ou inclinada em relação ao eixo de rotação. A roscagem pode ser interna ou externa;

- Rectificação, para obtenção de superfícies lisas. É um processo de maquinagem por abrasão, em que uma ferramenta abrasiva de revolução (rebolo, constituído de grãos abrasivos ligados por um aglutinante) gira e se desloca, juntamente com a peça, segundo uma determinada trajectória. A peça pode girar ou não. A rectificação pode ser frontal ou tangencial. Esta última compreende a rectificação cilíndrica, a rectificação cónica, a rectificação de perfis, a rectificação sem centros, etc.

2.2. Princípios teóricos ligados à maquinagem

Muitos estudos têm sido realizados com vista à avaliação das várias forças actuantes na maquinagem, em particular, as forças exercidas pela ferramenta de corte, as forças exercidas na ferramenta e as forças exercidas pelo material da peça sobre a apara.

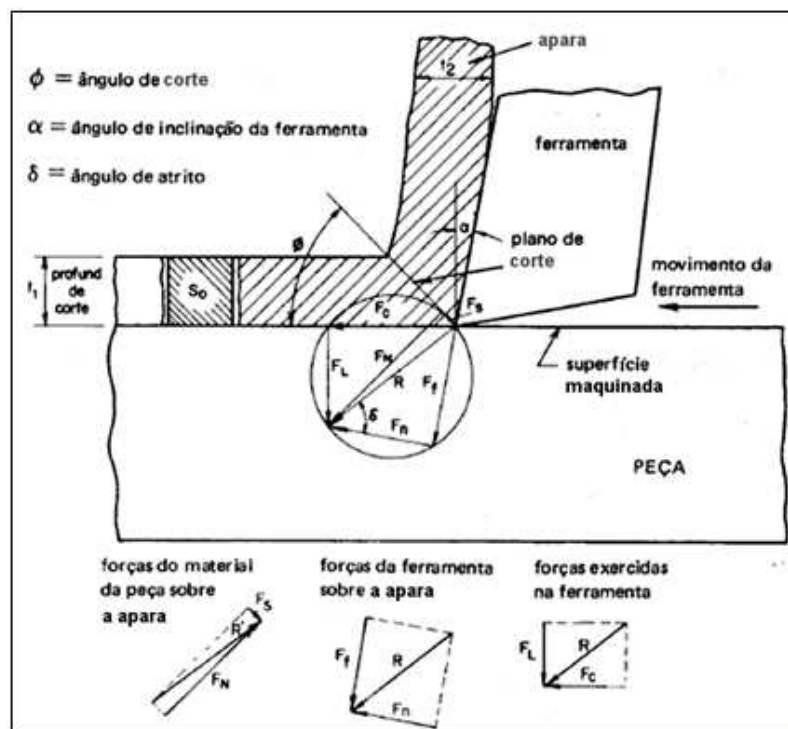


Figura 1 – Representação das forças de corte (Chiaverini, 1977)

Estudos de Ernest e Merchant permitiram estabelecer o diagrama esquemático da Figura 1, a partir de um ângulo ϕ em relação à superfície maquinada, chamado ângulo de

cut. Admite-se a formação de uma aparra continua e o corte superficial paralelo à superfície original.

A ferramenta exerce uma força R sobre a aparra, a qual pode ser decomposta em duas componentes (Chiaverini, 1977):

F_n – componente normal [N];

F_f – força de atrito [N].

Para se ter equilíbrio, a aparra deve ficar sujeita a uma reacção R' , igual e oposta, da peça no plano de corte com componentes F_n , normal, e F_s de corte ao longo do plano de corte. A força R aplicada na ferramenta, expressa em [N] pode ser decomposta nas componentes F_c , na direcção do movimento da ferramenta e F_L , normal. Os diagramas localizados na parte inferior da Figura 1 representam todas as forças que se verificam pela acção da ferramenta de corte. A espessura da aparra t_2 pode ser medida. Conhecidos a profundidade de corte (t_1) e o ângulo de ataque (α), pode-se determinar o valor do ângulo de corte θ .

Admite-se, com boa aproximação (Chiaverini, 1977):

$$\frac{t_1}{t_2} = \sin \theta$$

As componentes F_c e F_L , aplicadas na ferramenta, podem ser medidas por meio de um dinamómetro. A partir dessas forças e dos ângulos conhecidos α e θ , todas as outras quantidades podem ser calculadas, por intermédio de simples relações trigonométricas. Pode-se ainda determinar o coeficiente de atrito μ entre a aparra e a ferramenta, recorrendo à expressão (Chiaverini, 1977):

$$\mu = \frac{F_L + F_c \tan \alpha}{F_c - F_L \tan \alpha}$$

A pressão de corte exercida pode ser calculada pela expressão simples (Chiaverini, 1977):

$$p = \frac{F_c}{S_0}$$

Onde

p – é a pressão de corte exercida na superfície [N/mm²];

S_0 – área da secção transversal da aparra antes de sua remoção da peça, expressa em [mm²].

O movimento principal da máquina produz o movimento de corte na peça. O avanço é o movimento relativo da ferramenta sobre a peça para cada curso da máquina e é expresso em mm por curso (ou revolução).

A velocidade de corte é a velocidade periférica ou superficial da peça em relação à ferramenta e, no caso mais geral do torneamento, é expressa em metros por minuto, sendo esta dada pela equação (Chiaverini, 1977):

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1000}$$

Onde

v – velocidade de corte [m/min];

D – diâmetro da peça [mm];

M – nº de revoluções por minuto [rpm].

A profundidade de corte (p em mm) é a distância entre a superfície não cortada da peça e o fundo do corte, medida numa direcção em ângulo recto à superfície de trabalho da peça.

Se d_1 é o diâmetro da peça a ser maquinada e d_2 é o diâmetro da peça maquinada, a profundidade de corte [mm] é dada por (Chiaverini, 1977):

$$p = \frac{d_1 - d_2}{2}$$

A força principal de corte [N] pode também ser expressa pela relação (Chiaverini, 1977):

$$P = k_s \cdot S$$

Onde

S – área de secção da avara [mm^2];

k_s – pressão específica de corte [N/mm^2], ou seja, a força de corte para uma secção de avara correspondente a 1 mm^2 .

Por seu turno, a pressão específica k_s [N/mm^2] é dada pela equação (Chiaverini, 1977):

$$k_s = K \cdot S^\alpha$$

Onde K é uma constante que depende das condições de corte (geometria da ferramenta, ângulos de trabalho, propriedades mecânicas da peça sob maquinagem, área da

secção da apara, etc.) e α é uma constante que depende do tipo de material sob maquinação (aço, ferro fundido, etc.) e é independente das suas propriedades mecânicas. A determinação dos valores das variáveis citadas depende de muitos factores, entre os quais podem ser citados os seguintes (Chiaverini, 1977):

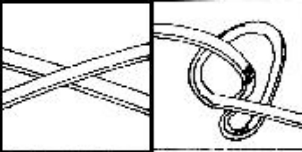
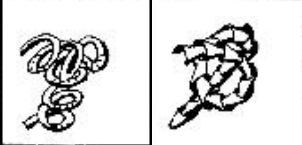
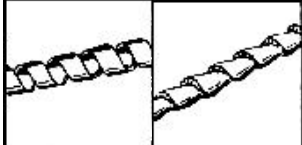
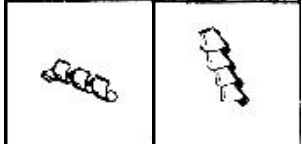
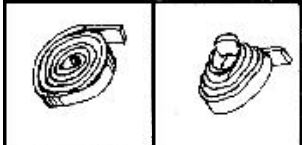

- Operação de corte: torneamento, fresagem, etc.;
- Condições da máquina;
- Condições de ferramenta de corte, em função das suas características geométricas e da sua qualidade;
- Tipo de corte: contínuo ou interrompido;
- Material sob maquinação, no que diz respeito ao tipo de liga, condição (fundida, forjada, encruada, etc.) e às condições da superfície de trabalho;
- Condições de refrigeração.

O tipo de apara gerada durante a maquinação pode sofrer variações, dependendo das condições e parâmetros utilizados. A formação das aparas é causada principalmente pela deformação plástica. Este processo, devido ao atrito gerado durante a maquinação, produz calor. O calor tem o efeito positivo de aumentar a plasticidade do material da peça de trabalho, porém, também apresenta o efeito negativo de aumentar o desgaste da ferramenta. Quando o material da peça de trabalho atinge o seu ponto de rotura, a apara é produzida. A sua forma e desenvolvimento dependem de diversos factores, tais como (DORMER, 2010):

- Compatibilidade química e física entre os materiais da ferramenta e da peça de trabalho;
- Operação de corte;
- Condições de corte (velocidade, avanço, taxa de remoção de material);
- Geometria da ferramenta;
- Coeficiente de atrito (com ou sem revestimento);
- Teores de fosforo e enxofre no material a maquinar;
- Lubrificação.

Dependendo das diversas combinações destes factores, as aparas podem apresentar diversas formas. A tabela seguinte sumariza as formas mais importantes de apara. A cada forma de apara é atribuída uma taxa de volume de apara R:

Tabela 1 – Formas de apra e taxa de volume de apra (Tschätsch, 2008)

	Forma da apra	Taxa de volume de apra <i>R</i>
Fita		>100
Emaranhado		>100
Hélice		60
Hélice curta		30
Espiral		10
Partículas pequenas		3
<p>$R \leq 3$ facilmente utilizável, $R = 31-60$ Utilizável com limitações,</p>		<p>$R = 4-30$ Ok $R > 100$ indesejável</p>

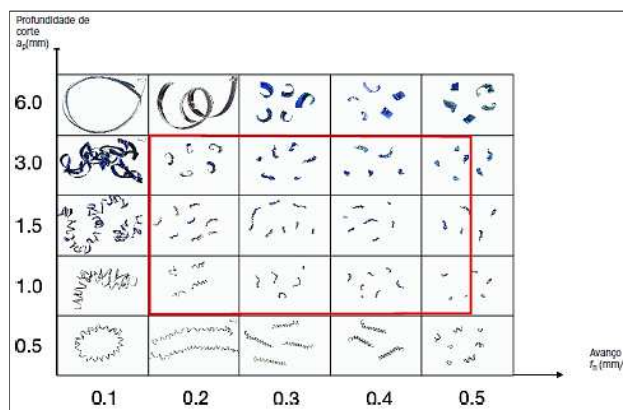


Figura 2 – Relação da quebra da apra com a profundidade e avanço (Tschätsch, 2008)

A análise da forma da apara envolve dois critérios: segurança do operador e transportabilidade. De acordo com esta abordagem, a apara de fita, a emaranhada e a de hélice não são as desejáveis. As formas idealmente pretendidas são as aparas em hélice curta, as de espiral e as partículas pequenas.

A energia usada nos processos de maquinagem é, quase exclusivamente, transformada em calor, o que significa que, dependendo do método, esta energia térmica é detectada na peça de trabalho, ferramenta e apara, com intensidades diferentes. Durante a maquinagem de alta velocidade, é possível dissipar quase toda a energia com a apara.

No planeamento dos processos de maquinagem, é essencial que esta energia térmica tenha ligeiro ou nenhum impacto negativo na peça, ferramenta e máquina. Consequentemente, durante o processo, são frequentemente usados refrigerantes e lubrificantes que têm como objectivos os seguintes pontos:

- Diminuir o desgaste da ferramenta (vida útil mais longa);
- Produzir peças com rigor dimensional (reduz a expansão térmica);
- Produzir peças com acabamento superficial satisfatório;
- Promover a extracção da apara da zona de trabalho;
- Reduzir a influência térmica na máquina ferramenta.

Hoje em dia, o elevado aumento de custos do uso, separação e descarte destes fluidos de corte, em conjunto com as novas legislações ambientais e protecção para a saúde, que é esperado que fiquem ainda mais rígidas no futuro, levaram à necessidade de realizar estudos científicos nesta área de forma a encontrar outras soluções. Neste contexto, a maquinagem a seco (sem lubrificação), que se tornou possível conjuntamente com a maquinagem de alta velocidade, é cada vez mais utilizada e oferece ainda melhores resultados. Por outro lado, promove o desgaste mais rápido das ferramentas e gera-se mais calor na superfície e no interior da peça de trabalho. Como alternativa ao convencional uso de fluidos de corte e maquinagem a seco, são utilizadas técnicas que usam uma quantidade mínima de lubrificante, pulverizado na zona útil de trabalho, para arrefecer e reduzir o atrito da ferramenta (Tschätsch, 2008).

Tabela 2 – Volume de lubrificante utilizado para cada tipo de maquinagem (Tschätsch, 2008)

Tipo de lubrificação	Volume usado
Maquinagem com fluído	10 até 100 l/min
Lubrificação reduzida	50 ml/h até 1-2 l/h
A seco	-

2.2.1. Torneamento

O torneamento é definido pela tecnologia de corte de metal, onde o movimento de corte é efectuado pela peça de trabalho, enquanto a ferramenta realiza o movimento de avanço axial e radial. No torneamento de peças de espessura pequena, é comum a peça ser suportada perto da zona de processamento (por um bucha ou contraponto), e o movimento de avanço ser levado a cabo pelo cabeçote.

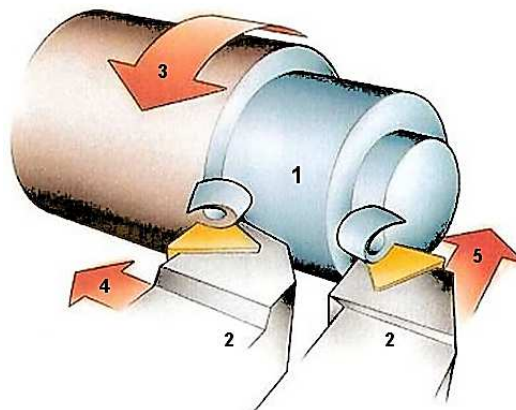


Figura 3 – Representação da peça de trabalho (1), ferramenta de corte (2); movimentos de rotação (3), movimento de avanço (4) movimento de penetração (5)

No torneamento cilíndrico, a ferramenta de corte move-se paralelamente ao eixo da peça de trabalho, regra geral, da direita para a esquerda (Figura 3). Este método é aplicado ao corte de uma peça cilíndrica, até um certo diâmetro. As ferramentas utilizadas no torneamento geralmente possuem uma aresta de corte principal (Tschätsch, 2008).

Peças de trabalho de torneamento simples são processadas pelo movimento de avanço, na direcção do eixo de rotação. Os métodos associados são designados de acordo com a direcção do movimento de avanço, durante a maquinagem. O perfil final da peça é geralmente criado a partir de vários cortes (Tschätsch, 2008).

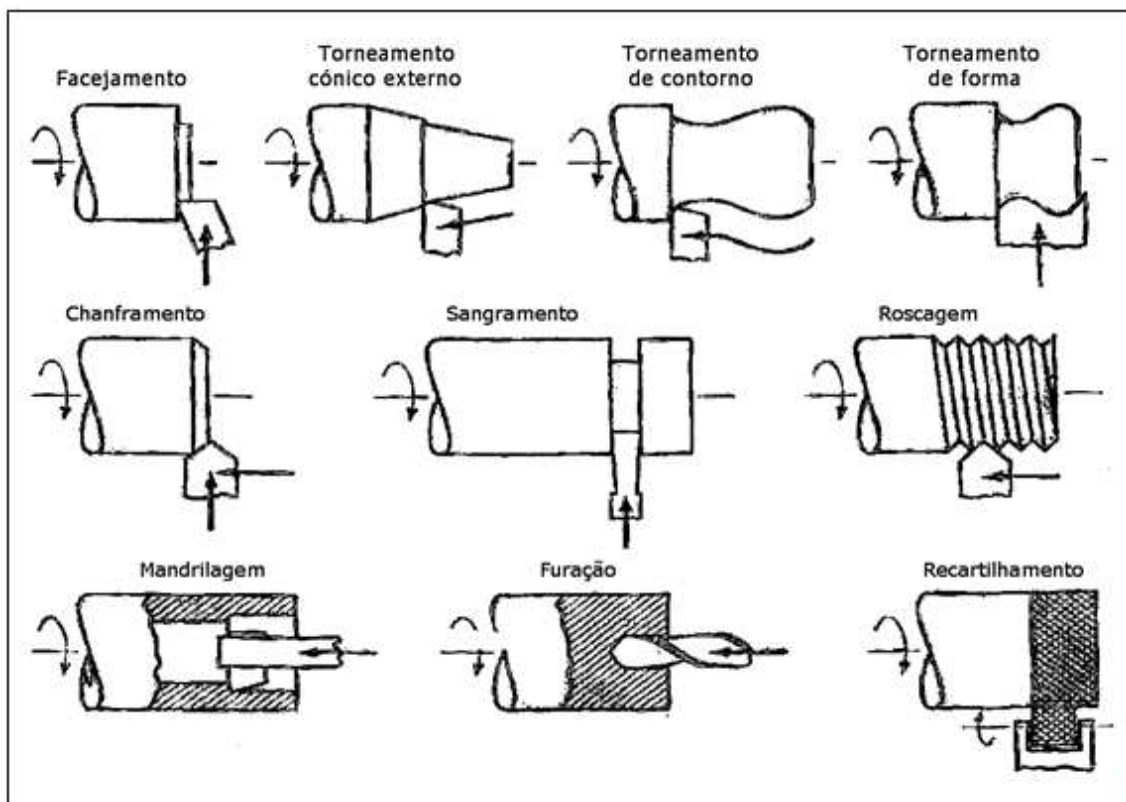


Figura 4 – Esquema das principais operações de torneamento (Chiaverini, 1977)

2.2.1.1. Princípios básicos do torneamento

Os parâmetros utilizados no torneamento são (Sandvik - Manual Técnico, 2010):

- **Velocidade de corte (V_c) [m/min]** – a peça gira a um certo número de rotações por minuto. Isso proporciona uma velocidade de corte específica V_c , medida em m/min na aresta de corte (Figura 5);

$$V_c = \frac{D_m \cdot \pi \cdot n}{1000}$$

Onde

D_m – diâmetro da peça de trabalho [mm]

n – rotação da árvore do torno [rpm]

- **Profundidade de corte (a_p) [mm]** – é a diferença entre a superfície cortada e a bruta. A profundidade de corte é medida perpendicularmente à direcção de avanço axial (Figura 5);
- **Avanço por rotação (f_n) [mm/rot]** – é o movimento axial da ferramenta ou radial no torneamento de face. Quando o avanço é radial, em direcção ao centro da peça, a rotação vai aumentar até chegar ao limite de velocidade do fuso da máquina.

Quando se ultrapassa essa limitação, a velocidade de corte V_c irá diminuir até parar no centro da peça (Figura 5);

$$f_n = \frac{l}{n}$$

Onde

l – comprimento maquinado por minuto [mm].

- **Espessura da avara (h_{ex}) [mm]** – é igual a f_n quando se usa um porta-ferramentas com um ângulo de posição a 90° . Ao usar um ângulo de posição menor h_{ex} é reduzido (Figura 5);
- **Inclinação (λ) [$^\circ$]** – é uma medida do ângulo em que a pastilha é montada no suporte (Figura 6);
- **Ângulo de ataque (γ) [$^\circ$]** - o ângulo de ataque é a medida da aresta em relação ao corte (Figura 6).

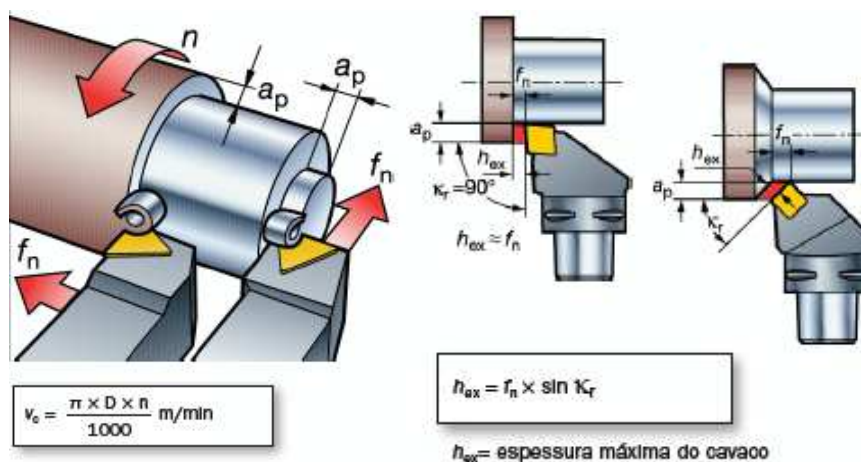


Figura 5 – Movimentos e cotas de torneamento (Sandvik - Manual Técnico, 2010)

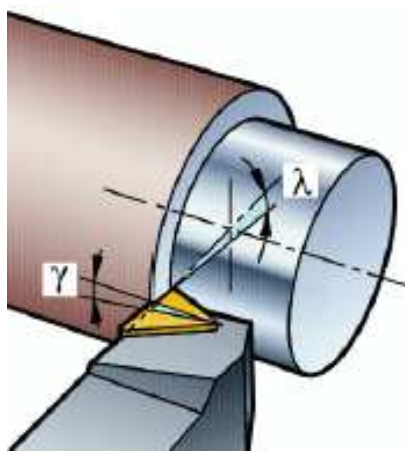
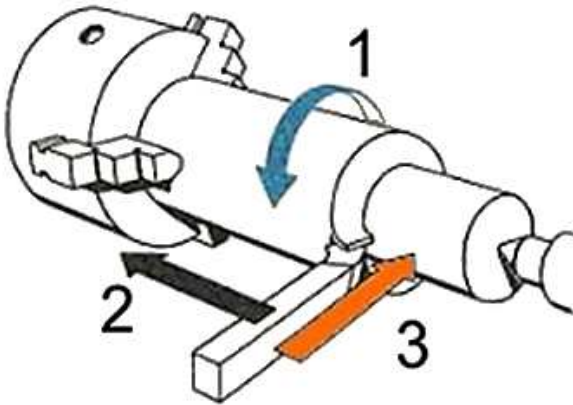






Figura 6 - Inclinação (λ) e Ângulo de ataque (γ) (Sandvik - Manual Técnico, 2010)

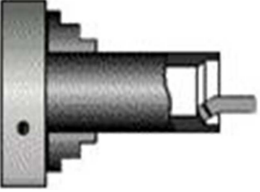

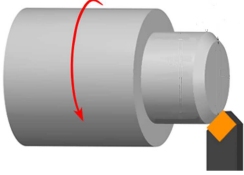
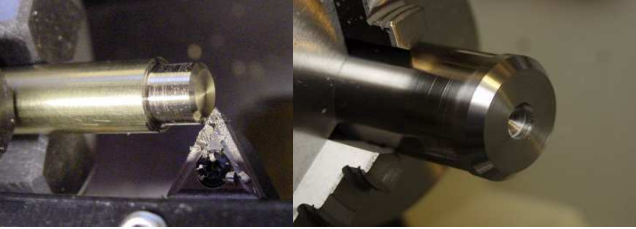
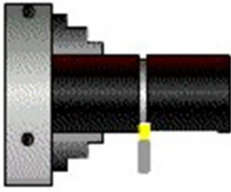

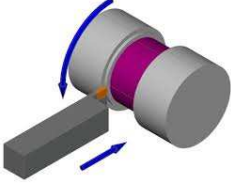
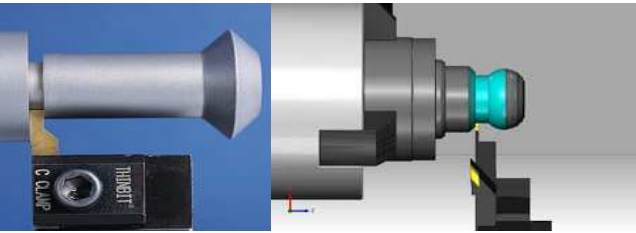
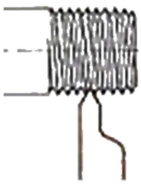
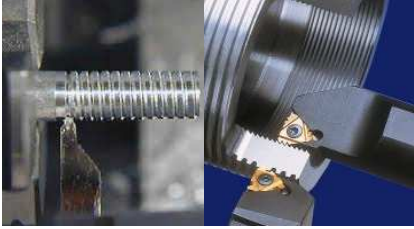
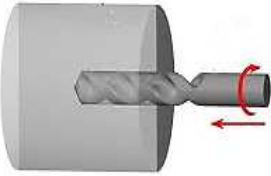

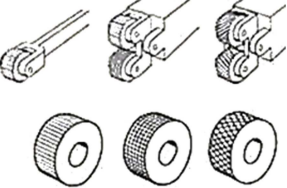

Tabela 3 – Parâmetros geométricos (MMBorges - Torneamento)

Principais movimentos

<p>1. Rotação da peça (corte) [rpm]: é o movimento entre a ferramenta e a peça, que, sem o movimento de avanço, gera apenas uma remoção de aparas durante um curso.</p>
<p>2. Translação da ferramenta (avanço) [m/min]: é o movimento entre a peça e a ferramenta, que, junto com o movimento de corte, gera um levantamento repetido ou contínuo de aparas durante vários cursos ou voltas.</p>
<p>3. Transversal da ferramenta (profundidade): é o movimento entre a peça e a ferramenta no qual a espessura da camada de material a ser retirada é determinada de antemão.</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Movimento Efectivo de Corte: é o resultado dos movimentos de corte e avanço realizados de maneira simultânea.

As principais operações executáveis através de torneamento são descritas na forma de diagrama, os quais se encontram representados na Tabela 4.

Tabela 4 – Principais operações de torneamento

<p>Facejamento</p> 	
<p>Torneamento externo</p> 	

<p>Torneamento interno</p> 	
<p>Chanframento</p> <p>Workpiece rotation</p> 	
<p>Sangramento</p> 	
<p>Ranhurar</p> 	
<p>Roscagem</p> 	
<p>Furação</p> 	
<p>Recartilamento</p> 	

Como se pode constatar na tabela anterior, as ferramentas de torneamento podem adotar posicionamentos completamente distintos consoante o tipo de operação. No caso do torneamento interno, os suportes de pastilhas/ferramentas são montados no torno de forma transversal em relação à peça (Figura 7). No torneamento interno, os suportes de pastilhas/ferramentas são montados de forma longitudinal e beneficiar da maior penetração da ferramenta na peça (Figura 7).

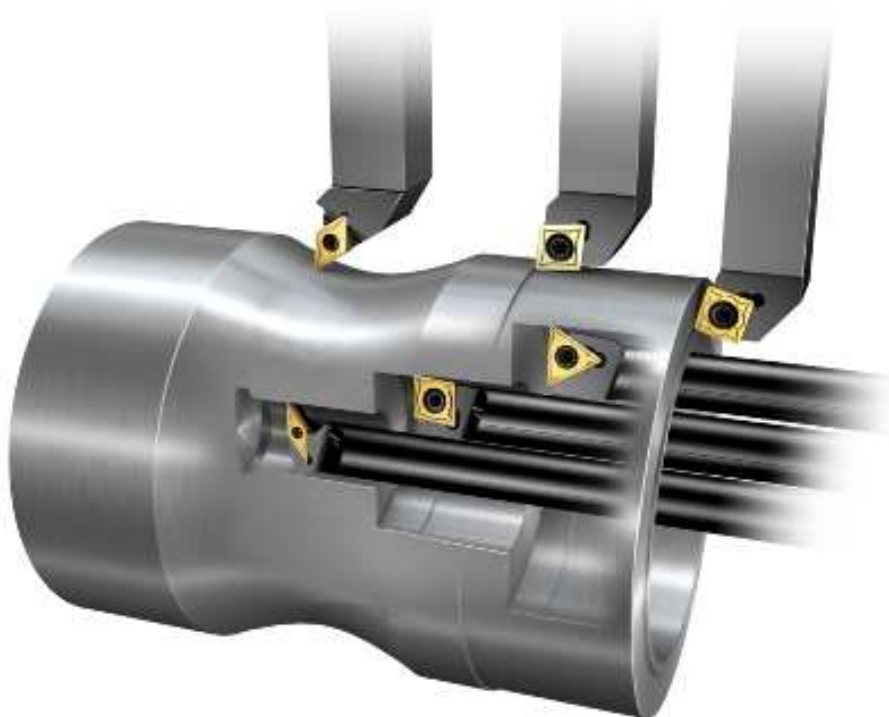


Figura 7 – Posicionamento dos suportes de ferramentas no torneamento (SANDVIK-Coromant)

Esta abordagem aplica-se para qualquer tipo de operação (facejamento, torneamento exterior e interior, roscagem, furação, sangramento, etc.), salvo algumas operações especiais em que não seja possível a adopção de um posicionamento convencional. Dependendo da tarefa, um dos aspectos mais importantes é o ângulo de ataque da pastilha, consoante o ponto de entrada desejado e de modo a evitar colisões do suporte com a peça.

Existem também as cabeças motorizadas que consistem, basicamente, em porta-ferramentas dotados de movimento de rotação. As cabeças motorizadas dividem-se entre axiais e radiais (Figura 8).



Figura 8 – Ferramentas motorizadas: Axial (à direita) e Radial (à esquerda)

Estas ferramentas garantem uma enorme polivalência ao torno, permitindo realizar operações como por exemplo furação e/ou roscagem de excêntricos na zona frontal da peça de trabalho, ou na zona lateral cilíndrica da mesma (furos transversais). Na realização destas tarefas, a bucha que prende a peça tem de estar, naturalmente, desprovida de movimento.

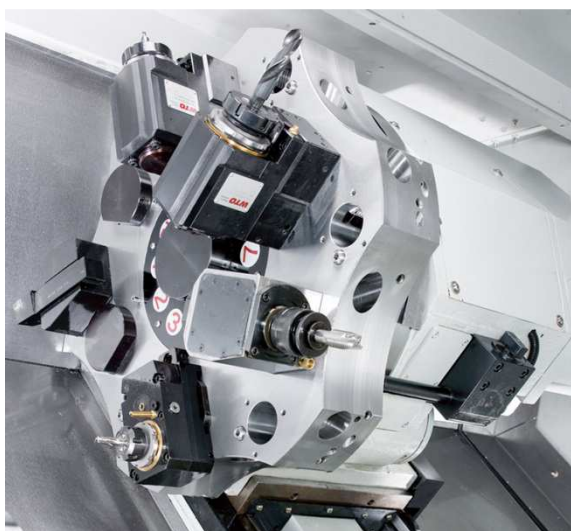


Figura 9 – Montagem das cabeças motorizadas na torreta de ferramentas

2.2.1.2. Equipamentos para torneiar

A máquina que faz o torneamento é designada por torno. É uma máquina bastante versátil pois, além das operações de torneamento, pode executar operações que normalmente são feitas por outras máquinas, como furação, fresagem e rectificação, com adaptações relativamente simples.

O torno mais simples é o torno universal. Possui um eixo e barramento horizontal e tem a capacidade de realizar todas as operações referidas anteriormente.

Assim, basicamente, todos os tornos convencionais, respeitando as suas variações de dispositivos ou dimensões exigidas em cada caso, são constituídos pelas partes seguintes (Vieira, 2014):

- **Corpo** – barramento, cabeçote fixo e móvel, e caixa Norton;
- **Sistema de transmissão de movimento de eixos** – motor, polia, engrenagens e redutores;
- **Sistema de deslocamento da ferramenta e da peça em diferentes velocidades** – engrenagens, caixa de velocidades, inversores de marcha, fusos, vara, etc.;
- **Sistema de fixação da ferramenta** – torre, carro porta-ferramenta, carro transversal, carro principal ou longitudinal e da peça (placas, cabeçote móvel);
- **Comandos dos movimentos e velocidades** – manivelas e alavancas;

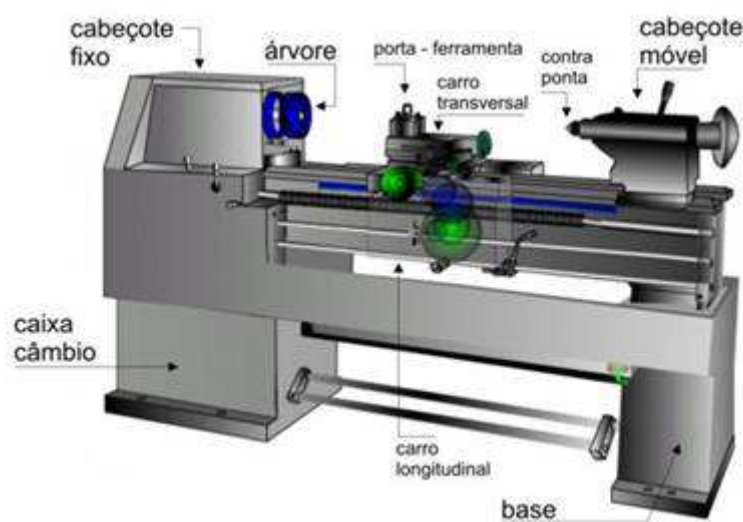


Figura 10 – Componentes do torno mecânico convencional (Borges, 2008)

O que diferencia uns dos outros é a capacidade de produção: se é automático ou não e o tipo de comando (manual, hidráulico, electrónico, por computador, etc). Neste grupo enquadram-se os tornos revolver, copiadores, automáticos, por comando numérico ou por comando numérico computadorizado.

Actualmente, os tornos mais utilizados são os que estão providos de comando numérico, sendo a constituição destes ligeiramente diferente da convencional.



Figura 11 – Torno CNC

O comando numérico computadorizado (sigla CNC, do inglês *Computer Numeric Control*) é um sistema que permite o controlo de máquinas, sendo utilizado principalmente em tornos e centros de maquinagem. Permite o controlo em simultâneo de vários eixos, através de uma lista de movimentos escrita num código específico – o código G. O "Comando" funciona como um meio de comunicação do operador/programador com a máquina.

A introdução do CNC na indústria mudou radicalmente os processos industriais. Curvas são facilmente executadas, complexas estruturas com 3 dimensões tornam-se relativamente fáceis de produzir e o número de passos no processo com intervenção humana é drasticamente reduzido, reduzindo também erros humanos (o que aumenta a qualidade dos produtos e diminui o desperdício), agilizou as linhas de montagens e tornou-as mais flexíveis, pois a mesma linha de montagem pode agora ser adaptada para produzir outro produto num tempo muito mais curto do que com os processos tradicionais de produção. Acompanhando o desenvolvimento tecnológico da informática e a tendência por uma interactividade cada vez maior com o utilizador, o código e linguagem de máquina também evoluiu.

O sistema CNC permite agora realizar peças extremamente complexas e de grande precisão, especialmente quando associado a programas de CAD/CAM, ou seja, desenho e fabricação assistida por computador.

O desenho assistido por computador ou CAD (*Computer Aided Design*) é um *software* utilizado para desenvolver projectos e desenhos técnicos.

A fabricação auxiliada por computador ou CAM (*Computer Aided Manufacturing*), está associada ao processo de produção. Qualquer processo auxiliado por microcontroladores ou controladores numéricos pode ser considerado um CNC.

Os sistemas CAM trabalham tendo como base modelos matemáticos provenientes do sistema CAD. Através desses modelos, os sistemas geram um código de percurso da ferramenta que, através do pós-processador (*software*), gera o programa do comando

específico para a máquina. Através dos sistemas de CAM é possível transferir todas as coordenadas para que as máquinas efectuem a maquinação da peça. Quanto maior a precisão do desenho gerado no CAD, maior será a precisão dos caminhos de ferramenta gerados pelo CAM e, conseqüentemente, conseguir-se-ão obter peças com maior qualidade.

Os componentes típicos de uma máquina CNC incluem:

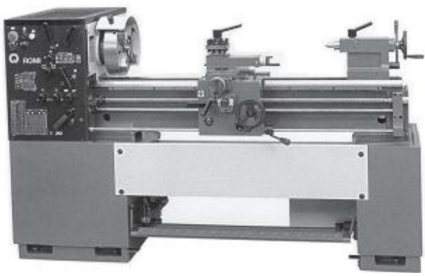


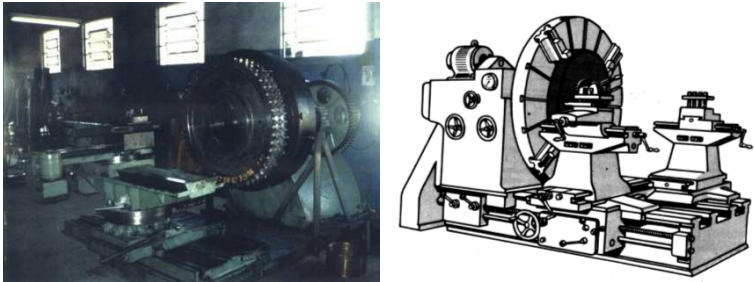

- Computador – realiza todos os cálculos e operações lógicas de controlo;
- Eixo de deslocamento;
- Transmissões;
- *Encoders* – Dispositivos de medida de posição e de deslocamento;
- Cabeça ou árvore – Ferramenta principal;
- Sistemas de aperto de peças;
- Sistemas de mudança de ferramentas – carrocel de ferramentas;
- Armazém de ferramentas;
- Eixos complementares de rotação e de deslocamento.






A interface com o utilizador é feita através de um painel de controlo e vários dispositivos a ele ligados, geralmente relacionados com o armazenamento. O aspecto do painel de controlo pode variar consideravelmente em função do fabricante, no entanto, os componentes que nele aparecem podem-se agrupar de forma genérica em: monitor, comandos para controlo da máquina e controlos de programação. Para garantir o funcionamento correcto da máquina de comando numérico e a aceitação das instruções para o computador, o painel de controlo apresenta um comutador do modo de operação. Os principais modos de operação possíveis são: programação (edição e gestão), modificação dos dados da ferramenta, funcionamento manual e funcionamento automático.

A interface de controlo da máquina está subdividida em múltiplas conexões de controlo, a qual afecta os atuadores dos eixos, da árvore principal, etc., até chegar ao sistema auxiliar de potência.

Seguidamente (Tabela 5) são apresentados os tipos de tornos mais relevantes.

Tabela 5 – Tipos de tornos

<p>Universal</p>	
<p>Horizontais</p>	
<p>Verticais</p>	
<p>De placa</p>	
<p>Revolver</p>	

Produção	
Semiautomáticos	
Automáticos	
Copiadores	
CNC	

Com o desenvolvimento do Comando Numérico, começou uma etapa importante no âmbito da automação da maquinação dos metais.

Embora seja já nos anos sessenta que esta nova técnica tenha surgido nos meios industriais, ainda que de forma incipiente, foi anteriormente nos Estados Unidos que surgiu a primeira experiência, conforme se descreve:

- 1947 – O americano John Parsons, construtor de hélices de helicóptero, concebeu um sistema de comando automático com entrada de informações numéricas que gerava uma curva por três eixos, e usava aqueles dados para controlar os movimentos de máquinas-ferramenta;
- 1949 – A U.S. Air Force concedeu um contrato à Empresa Parsons, para desenvolver um método de produção rápido, de estruturas de difícil maquinação;
- 1952 – O MIT (Laboratório de Servomecanismos) concedeu um contrato e apoiou o sucesso deste modelo de máquina. O Governo americano apoiou a iniciativa para o desenvolvimento de uma fresadora de três eixos que executasse movimentos simultâneos, comandada por controlo digital;
- 1953 - Foi admitido pelo MIT o termo "Numerical Control"/NC (Comando Numérico);
- 1956 – A U.S.A.F. faz um pedido de 170 máquinas de CN a três grandes construtores americanos. Paralelamente a esta evolução, certos construtores interessaram-se pelo desenvolvimento de outros tipos de máquinas mais simples (engenhos de furar), que não requerem movimento contínuo, mas posicionamento preciso;
- 1957 – O NC foi aceite pela indústria e inicia-se a sua utilização.

No Reino Unido, a aplicação prática do Comando Numérico em máquinas ferramentas apareceu em 1958, tal como na Alemanha. A Itália tem tido um grande desenvolvimento, produzindo actualmente máquinas-ferramenta de elevado nível. O Japão tem-se imposto neste campo de uma forma aguerrida, tendo, neste momento, índices de produção bastante elevados.

2.2.1.3. Ferramentas específicas para torneamento

Uma ferramenta de torneamento consiste num suporte e uma ponta de corte.

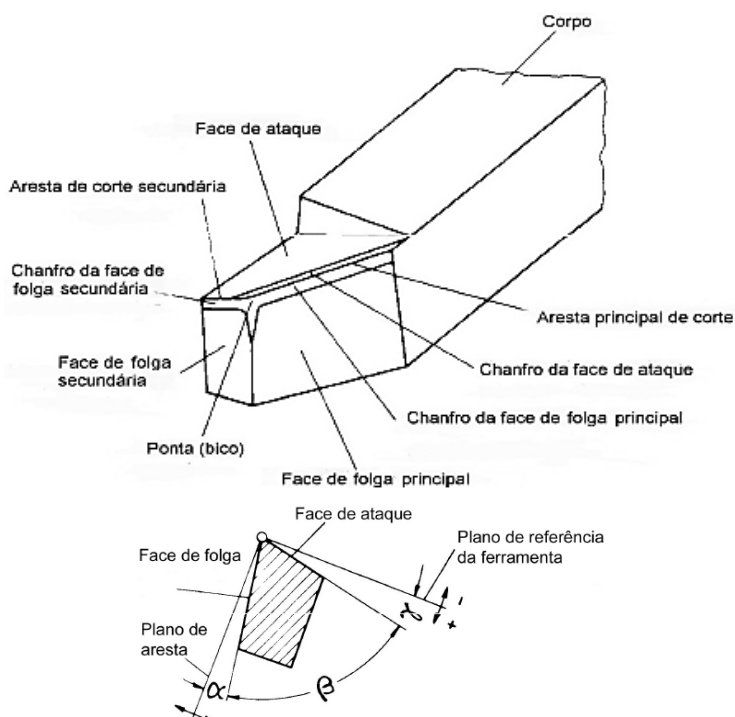


Figura 12 – Principais faces e arestas das ferramentas (ISO, ISO 241, 1994)

Uma característica que diferencia estas ferramentas é a orientação da ferramenta. Uma ferramenta que corte da direita para a esquerda é designada por ferramenta direita, enquanto, inversamente, se uma ferramenta cortar da esquerda para a direita, é designada por ferramenta esquerda.

A Figura 13 demonstra as formas de ferramentas mais relevantes no torneamento.

As secções transversais dos suportes de pastilhas estão definidas na norma DIN 770. Este suporte tem secção transversal quadrada ou rectangular. No corte interior são cilíndricos e possuem duas superfícies de apoio.

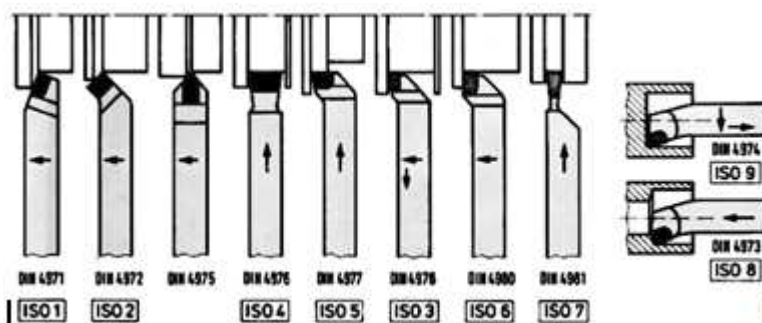


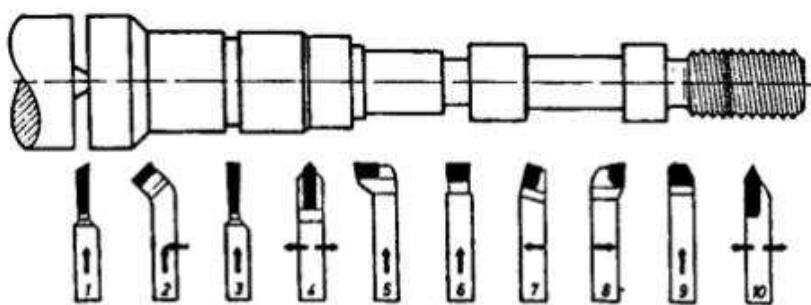
Figura 13 – Algumas variações das ferramentas de corte de torneamento (Tschätsch, 2008)

Para as ferramentas demonstradas na figura anterior, a ponta de corte em metal duro é soldada no suporte/haste. Para este tipo de ferramentas, se for necessário afiar repetidamente e mudar a ponta em metal duro, o seu uso é muito dispendioso e demorado. A demanda por meios mais económicos de recuperação destas ferramentas levou ao desenvolvimento de suportes de aperto de pastilhas.

Nestes suportes de aperto, a pastilha em metal duro é presa a partir de um sistema de fixação. As pastilhas intercambiáveis estão disponíveis numa ampla variedade de formas e tamanhos, diferentes ângulos de ataque, etc. Assim, por exemplo, uma ponta de corte quadrada com um ângulo de ataque de 0° tem oito arestas de corte. Ao rodar a pastilha no suporte de aperto ou mesmo invertendo-a, é possível fazer um acoplamento de oito arestas de corte em torneamento.

As ferramentas de torneamento podem ser classificadas em ferramentas de desbastar, facejar, sangrar, torneiar interno, alisar, formar e roscar. São basicamente as mesmas, tanto para torneamento externo como para interno.

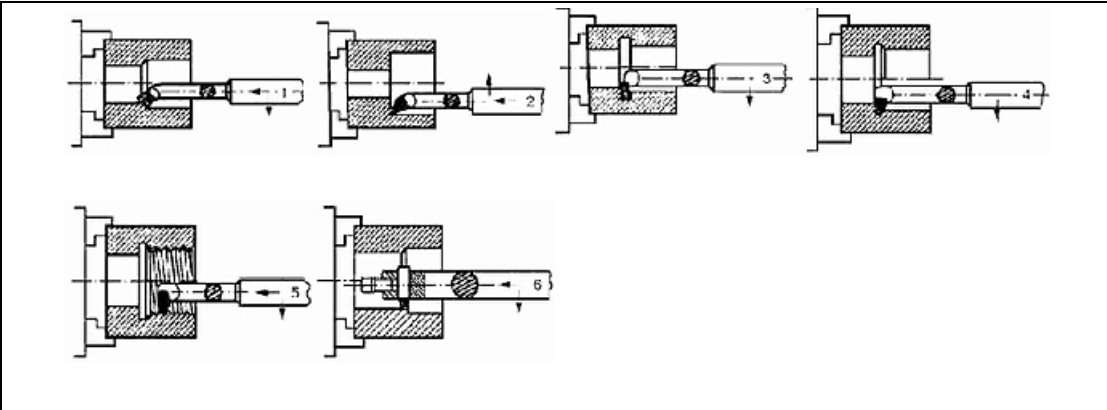
Tabela 6 – Tipos de operações de torneamento externo



1. Sangrar	6. Sangrar com grande dimensão
2. Torneiar à direita	7. Desbastar à direita
3. Ranhurar	8. Torneiar e facejar à esquerda
4. Alisar	9. Formar
5. Facejar à direita	10. Roscar

As ferramentas para torneiar internamente podem ser de corpo único ou com pastilhas. Podem ser utilizadas nas operações de desbaste ou de acabamento, variando os ângulos de corte e a forma da ponta.

Tabela 7 – Tipos de operações de torneamento interno (Smith, 2008)



1. Desbastar	4. Formar
2. Rectificar	5. Roscar
3. Ranhurar	6. Torneamento com haste

No facejamento, o movimento de avanço da ferramenta é feito no sentido normal ao eixo de rotação da peça. Tem por finalidade obter uma superfície frontal plana. Nesta operação, bem como, em qualquer operação de torneamento, seja exterior ou interior, a ferramenta de corte deve estar sempre centrada com o material a trabalhar.

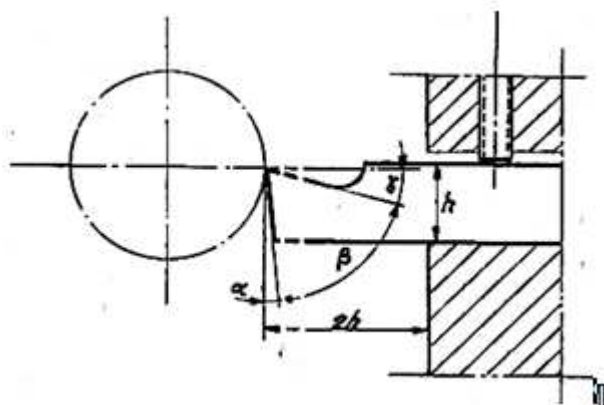


Figura 14 – Ângulos característicos e montagem correcta da ferramenta de corte (CENFIM)

O sangramento trata-se de um movimento transversal como o facejamento. É utilizado para cortar a peça do resto do varão, quando esta é acabada.

A roscagem é uma operação que pode ser realizada no exterior ou no interior da peça. As particularidades desta operação são:

- O movimento de avanço deve ser igual ao passo da rosca;
- Deve-se escolher um número de passagens para o corte de rosca e profundidade de corte adequados;
- Promover a formação de aparas para evitar que elas fiquem presas ao redor da ferramenta;
- Escoamento de aparas – especialmente para roscagem interna;
- Evitar vibrações causadas por longos balanços da ferramenta;
- Alinhamento da ferramenta e altura de centro.

Tabela 8 - Ângulo de corte positivo e negativo (Smith, 2008)

Características	
Positivas	Negativas
<ul style="list-style-type: none"> • Mais comuns • Próprias para materiais dúcteis, como aço ao carbono • Também úteis para materiais que endurecem no corte • Adequadas para alta temperatura 	<ul style="list-style-type: none"> • Dobro de superfície de corte e maior resistência • Avanço e profundidade de corte maiores • Gera um aumento nas forças de corte • Exigem maior potência e rigidez do torno

Existem diferentes tipos de pastilhas e sistemas de fixação. As pastilhas podem assumir diferentes formas geométricas. Elas podem também ser classificadas por tipo: face simples, dupla face e com ou sem quebra aparta.

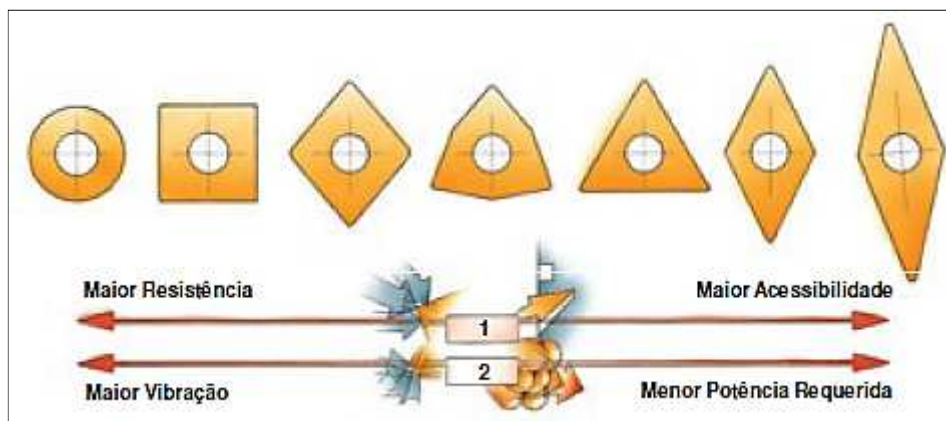


Figura 15 – Propriedades mais relevantes dos insertos consoante a sua geometria (Sandvik - Manual Técnico, 2010)

Também o raio de curvatura da ponta do inserto é muito importante, depende da configuração da peça a ser trabalhada e dos requisitos de qualidade superficial exigidos pelo cliente. Raios de curvatura muito pequenos apresentam pontas fracas, muito sujeitas a fracturas e fissuras, no entanto, garantem um maior controlo das aparas (tipo e tamanho) e menor ruído. É mais utilizado em acabamento, pois permitem obter superfícies menos rugosas. Os raios de curvatura muito grandes originam ruído e vibrações excessivos (pequena espessura de avara e aumento da força passiva). Exigem a utilização de máquinas robustas. Esta configuração é mais utilizada quando se pretende realizar grandes desbastes, permitindo grandes avanços por rotação por pastilha.

A correta selecção do tamanho do raio de curvatura é um dos factores mais importantes no que diz respeito ao nível de suavidade superficial desejada (Figura 16).

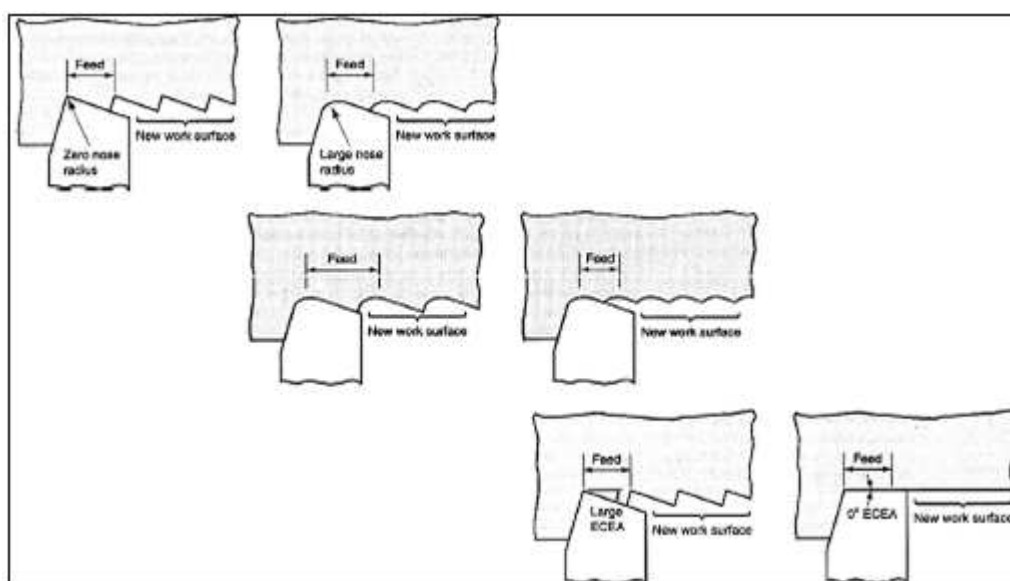


Figura 16 – Raio de canto da ferramenta e respectivo acabamento (Smith, 2008)

As ferramentas usadas para torneamento de perfis estão sujeitas a grandes variações quanto às tensões e profundidades de corte, devido às diferentes direcções de maquinagem e mudanças de diâmetro. Uma das propriedades mais importantes de uma ferramenta de perfilamento é a acessibilidade. As pastilhas com um ângulo de ponta de 35° ou 55° permitem uma boa acessibilidade.

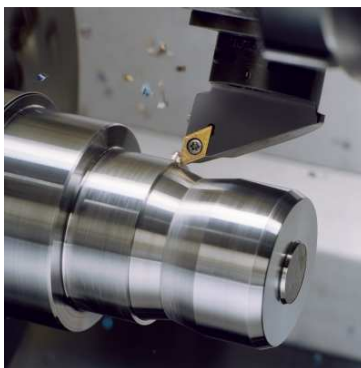


Figura 17 – Torneamento de perfis

O ângulo de posição e a ponta da pastilha são factores importantes para a acessibilidade. O perfil da peça deve ser analisado para seleccionar o ângulo de cópia mais adequado. Deve-se considerar um ângulo de corte livre de pelo menos 2° entre a peça e a pastilha. Porém, por questões de superfície e vida útil da ferramenta, recomenda-se um ângulo de pelo menos 7°. Para optimização e acessibilidade, deve-se optar por um suporte com um formato de pastilha de 55° e um ângulo de posição 107°. Para multifunção, escolha um suporte com um formato de pastilha de 55° e um ângulo de posição de 93° (Sandvik - Torneamento de perfis).

As vibrações são um problema comum nos processos de maquinagem. Correspondem a um movimento relativo entre a peça de trabalho e a ferramenta de corte. As consequências deste fenómeno traduzem-se em vibratos na superfície da peça e acabamentos não tão satisfatórios. É difícil contornar este problema, mas existem acções preventivas que se devem adoptar, tais como:

- Estabilizar ao máximo a peça, a ferramenta e a máquina;
- Escolher a ferramenta mais indicada para cada situação, em termos de ângulos, dimensões, acabamento superficial desejado, etc.;
- Seleccionar suportes com sistemas anti-vibração (se necessário);
- Definir condições de maquinagem que minimizem as vibrações, tais como a rotação da árvore, número de dentes da ferramenta e posições relativas, etc.

2.2.2. Fresagem

A fresagem é um processo de gerar superfícies maquinadas pela remoção progressiva de uma quantidade pré-determinada de material da peça de trabalho a uma taxa de movimento ou avanço relativamente baixa mediante uma fresa que gira a uma velocidade comparativamente alta. A característica principal do processo de fresagem é que cada aresta de corte da fresa remove a sua parcela do material na forma de aparas individuais pequenas (DORMER, 2010).

Durante a fresagem, a ferramenta realiza o movimento de corte, enquanto a peça de trabalho (a mesa da máquina onde a peça de trabalho está montada) executa o movimento de avanço. As técnicas de fresagem são definidas de acordo com a orientação do eixo da ferramenta relativamente à peça e forma da mesma (Tschätsch, 2008).

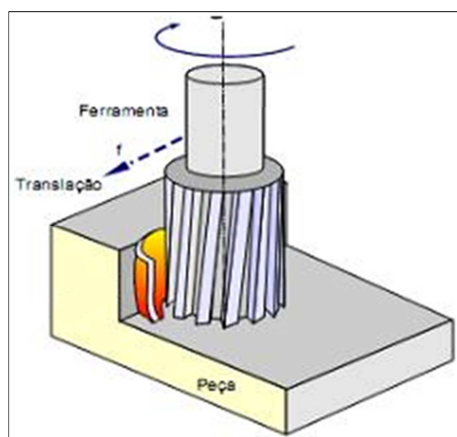


Figura 18 - Fresagem

As três operações básicas de fresagem são mostradas abaixo: (A) fresagem lateral (B) fresagem facial e (C) fresagem de topo.

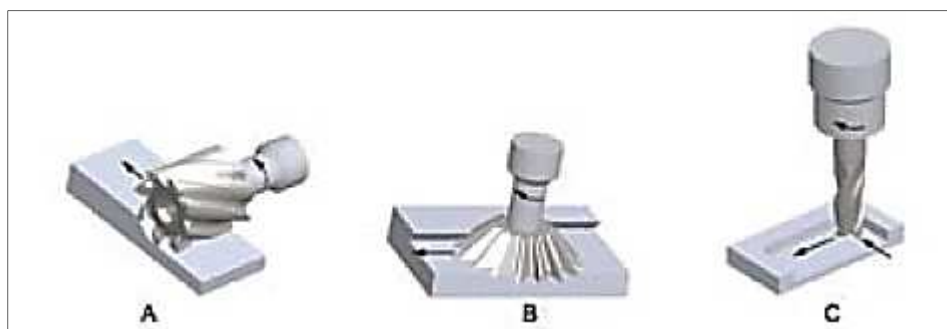


Figura 19 – Operações básicas de fresagem (DORMER, 2010)

Na fresagem periférica, o eixo de rotação da fresa está paralelo à superfície da peça de trabalho. A fresa tem um número de lâminas na sua circunferência, cada uma actuando como uma ferramenta de corte individual para fresagem plana. As fresas utilizadas em fresagem periférica podem ter lâminas rectas ou helicoidais, gerando uma acção de corte ortogonal ou oblíqua.

Na fresagem facial, a fresa está montada num fuso com uma rotação do eixo perpendicular à superfície da peça de trabalho. A superfície maquinada resulta da acção de arestas de corte localizadas na periferia e na face da fresa.

Na fresagem de topo, a fresa geralmente gira num eixo vertical com relação à peça de trabalho. Pode ser inclinada para maquinar superfícies cónicas. As arestas cortantes estão localizadas tanto na face terminal da fresa quanto na periferia do corpo da fresa.

2.2.2.1. Princípios básicos da fresagem

Segundo a disposição das lâminas de corte da fresa, classifica-se a operação nos seguintes tipos de fresagem: fresagem tangencial ou periférica e fresagem frontal.

Na fresagem tangencial as lâminas encontram-se na periferia (superfície cilíndrica) da ferramenta e o eixo da ferramenta é paralelo à superfície a ser maquinada. As ferramentas usadas neste tipo de fresagem são chamadas fresas cilíndricas ou tangenciais. Apesar da sua grande rigidez de corte, as fresas utilizadas nesta técnica não têm grande alcance em termos de profundidade de corte, pois estão limitadas pelo eixo de rotação horizontal da fresadora.

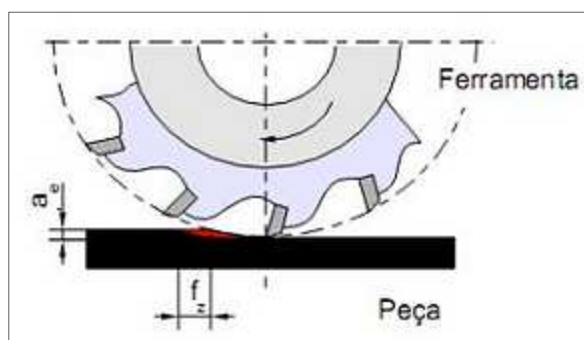


Figura 20 – Fresagem tangencial (Schneider, 2002)

Na frontal, as lâminas de corte estão na superfície frontal da ferramenta, cujo eixo é perpendicular à superfície a ser maquinada. As ferramentas usadas na fresagem frontal são

chamadas fresas frontais ou de topo. Esta técnica permite atingir profundidades de corte elevadas devido à configuração destas fresas, estando somente limitadas em relação à profundidade máxima para cada diâmetro. Quanto maior a haste da fresa, maior o esforço e vibração exercidos sobre ela.

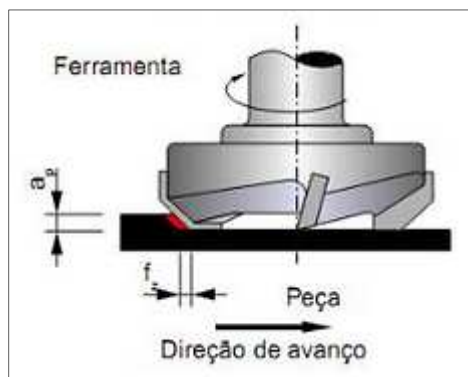


Figura 21 – Fresagem frontal (Schneider, 2002)

Dentro da fresagem existem também variações de maquinação quanto ao movimento relativo entre a peça e a ferramenta, que pode ser concordante, discordante ou combinado.

Designa-se por movimento concordante quando a peça se desloca no sentido de movimento da lâmina de corte da fresa. O corte inicia-se na localização mais grossa da aparta. O deslocamento do avanço e a rotação da ferramenta têm a mesma direcção.

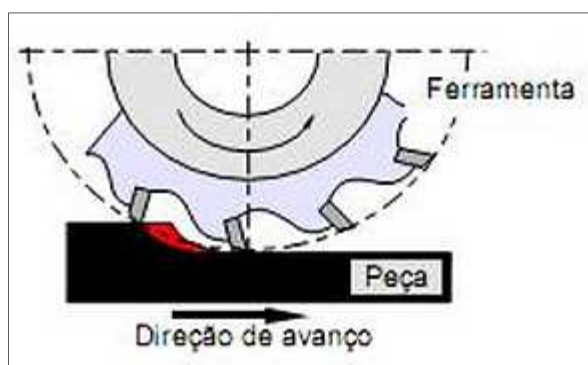


Figura 22 – Fresagem concordante (Schneider, 2002)

Como vantagens da fresagem concordante temos (DORMER, 2010):

- O componente para baixo da força de corte mantém a peça de trabalho no seu lugar, especialmente para peças finas;
- Disposição das aparas mais fácil – estas são removidas por trás da fresa;
- Menor desgaste – a vida da ferramenta aumenta até 50%;

- Melhor acabamento da superfície – é menos provável que as aparas sejam carregadas pelas lâminas;
- É necessário uma potência menor – pode ser utilizada uma fresa com ângulo de incidência elevado;
- Esta técnica exerce uma força para baixo na peça de trabalho, exigindo dispositivos de fixação mais simples e mais económicos.

As desvantagens da fresagem concordante são as seguintes (DORMER, 2010):

- Devido às elevadas forças de impacto que resultam quando as facas atingem a peça de trabalho, esta operação exige uma montagem rígida, pelo que se deve eliminar o contragolpe do mecanismo de avanço da mesa;
- Esta fresagem não é adequada para maquinar peças que tenham estrias superficiais, tais como os metais trabalhados a quente, forjados e fundidos. As escamas são duras e abrasivas, e causam desgaste excessivo e danos às lâminas da fresa, reduzindo assim a vida da ferramenta.

Na fresagem discordante, o movimento de avanço da mesa leva a peça contra o movimento de rotação da lâmina da fresa. A maior espessura da apra é no final do corte. O movimento de avanço é oposto ao da rotação da ferramenta.



Figura 23 – Fresagem discordante (Schneider, 2002)

A maioria das fresadoras trabalha com o movimento de avanço da mesa baseado numa fusão. Com o tempo e desgaste da máquina, ocorre uma folga entre eles. No movimento concordante a folga é empurrada pela lâmina da fresa no mesmo sentido de deslocamento da mesa. Esta situação faz com que a mesa execute movimentos irregulares, que prejudicam o acabamento da peça e podem até quebrar a lâmina da fresa. No movimento discordante, a folga não influi no deslocamento da mesa. Por isso, a mesa tem um movimento de avanço mais uniforme, gerando um melhor acabamento da peça.

Quando a forma construtiva da mesa é através de porca e parafuso, é melhor o movimento discordante. Basta observar o sentido de rotação da fresa e fazer a peça avançar contra o dente da fresa.

As principais vantagens da fresagem discordante são (DORMER, 2010):

- A operação da lâmina de corte não é função das características da superfície da peça de trabalho, pois a lâmina começa o corte numa zona já previamente cortada;
- Contaminações ou escamas na superfície não afectam a vida da ferramenta;
- O processo de corte é suave, desde que as lâminas da fresa estejam bem afiadas.

Quanto às desvantagens (DORMER, 2010):

- A ferramenta tem tendência a vibrar;
- A peça de trabalho tem a tendência de ser puxada para cima, sendo importante uma fixação adequada;
- Desgaste mais rápido da ferramenta do que na fresagem ascendente.
- As aparas caem na frente da fresa – disposição das aparas é difícil;
- É necessária uma potência maior devido ao atrito aumentado provocado pelo começo da apara na espessura mínima;
- O acabamento da superfície é prejudicado devido às aparas serem transportadas para cima pela aresta de corte.

O movimento combinado ocorre, portanto, quando a fresa tem o seu eixo dentro do campo de corte da peça. Assim, uma parte do corte é realizada em fresagem concordante e outra em discordante (Schneider, 2002).

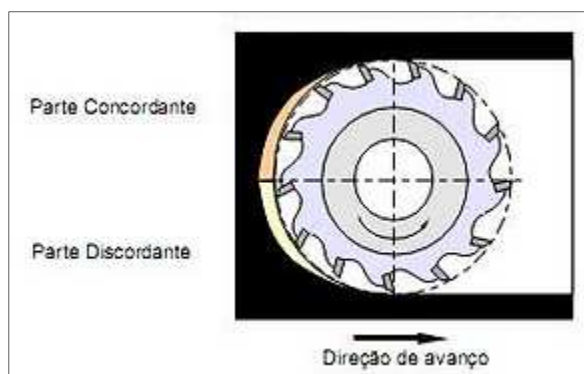


Figura 24 – Fresagem combinada (Schneider, 2002)

Um dos grandes problemas na fresagem é a vibração. As causas são várias (Schneider, 2002):

- Resistência que a peça faz na ferramenta;
- Frequência de contacto do dente da fresa;
- Ressonâncias surgidas no processo;
- Folgas na fixação da peça;
- Deficiente formação/extracção de aparas.

As soluções para este problema são (Schneider, 2002):

- Massas adicionais na máquina;
- Alteração da velocidade de corte (V_c), profundidade (A_p) ou rotação (n);
- Mudança de estratégia – concordante/discordante;
- Melhorar a fixação.

2.2.2.2. Fresadoras

A máquina que realiza a operação de fresagem é a fresadora. Estas máquinas são classificadas, geralmente, de acordo com a posição do seu eixo-árvore (fixação da fresa) em relação à mesa de trabalho (fixação da peça). Em relação ao eixo-árvore são classificadas em fresadoras horizontais (paralelo à mesa), verticais (perpendicular à mesa) e universais (com dois eixos-árvore: horizontal e vertical).

A Figura 25 representa, esquematicamente, uma fresadora horizontal com os respectivos componentes principais e movimentos. Estes equipamentos são compostos por uma base que suporta os outros componentes: a coluna que contém a árvore e o seu mecanismo motor e o eixo porta-ferramenta, o suporte que se move verticalmente, o carro fixado no suporte que se move horizontalmente, a 90° em relação ao movimento do carro.



Figura 25 – Principais componentes de uma fresadora horizontal

Tem-se assim a possibilidade de dotar a peça a maquinar de três movimentos: movimento vertical, devido ao suporte, e dois movimentos horizontais, perpendiculares entre si, devido ao carro e à mesa.

Na Figura 26 é possível visualizar algumas operações de fresagem horizontal.

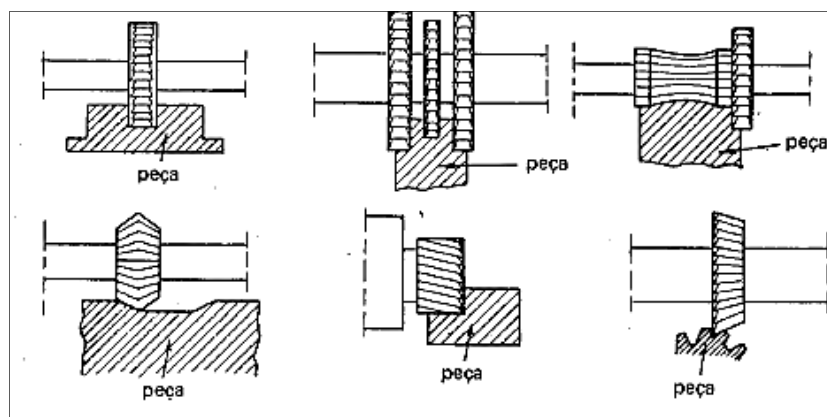


Figura 26 – Algumas operações de fresagem horizontal (Chiaverini, 1977)

As fresadoras verticais são aplicadas em certos tipos de serviço, quando é necessário girar a fresa segundo um eixo vertical. Estas máquinas são constituídas por uma base, à qual está ligado o suporte que se movimenta verticalmente. Sobre este suporte situa-se o carro transversal e a mesa, ambos com movimento no plano horizontal, e sobre este a mesa, na qual as peças a maquinar são fixadas. Fazendo parte integrante da base, situa-se um conjunto na parte superior onde se localiza o cabeçote, que contém os órgãos de transmissão que accionam o porta-ferramenta, segundo um eixo vertical.

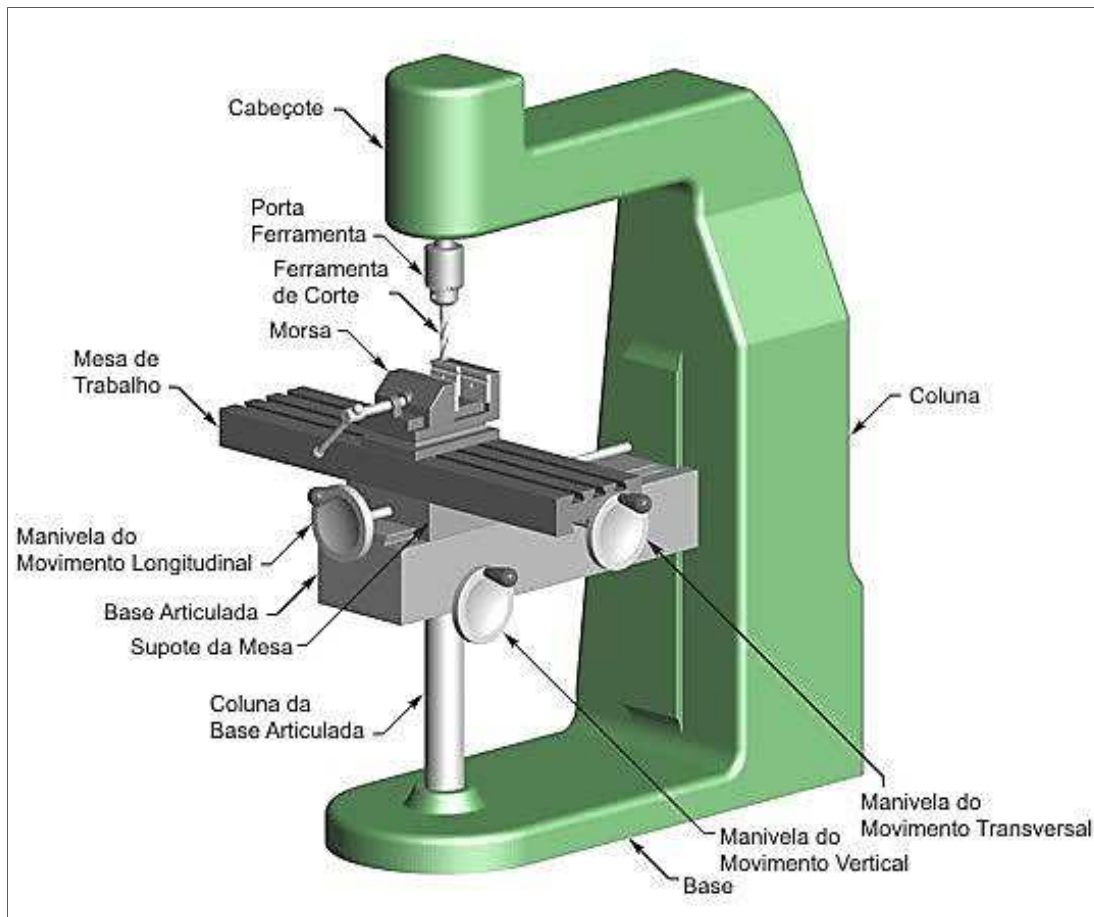


Figura 27 – Principais componentes de uma fresadora vertical

Na Figura 28 poderão ser observadas, em representação esquemática, algumas operações de fresagem vertical.

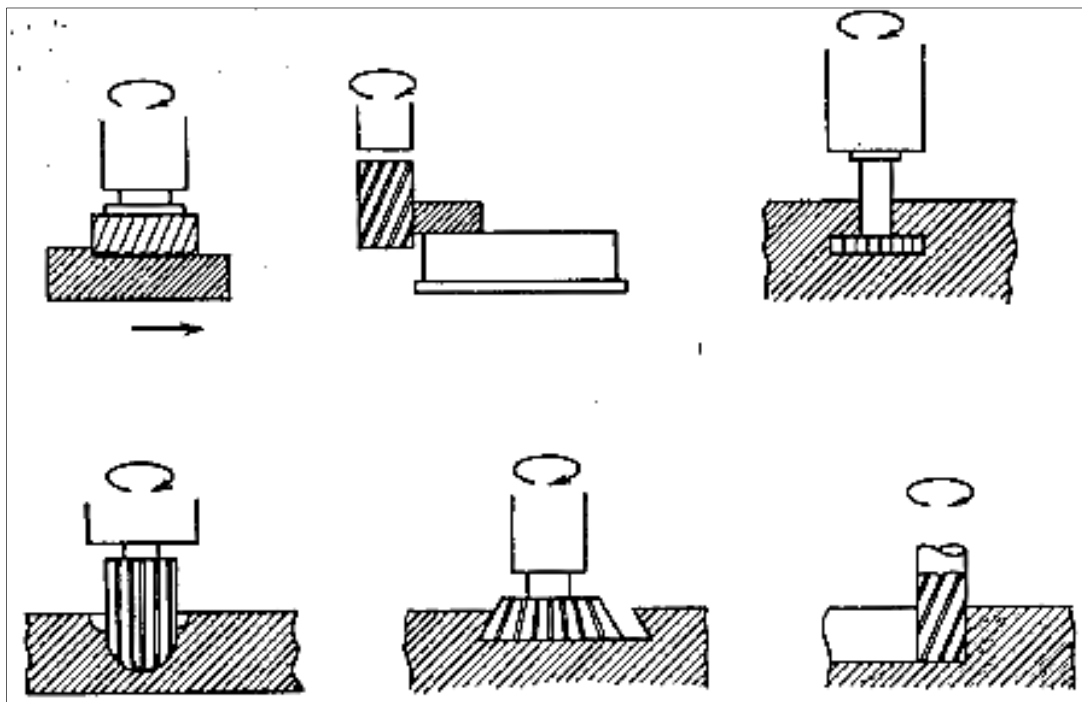


Figura 28 – Algumas operações de fresagem vertical (Chiaverini, 1977)

As fresadoras universais são máquinas que permitem o posicionamento da ferramenta segundo um dos dois eixos, horizontal e vertical, ou segundo um eixo inclinado ou oblíquo qualquer. Esta máquina satisfaz, portanto, todas as condições de fresagem, podendo executar formas e perfis variados. Contudo, não são máquinas aconselhadas para produção em série. Uma característica importante destas fresadoras é a possibilidade de aplicar-se sobre a mesa um dispositivo chamado divisor universal, que permite realizar um determinado número de operações de fresagem equiangulares, ao redor de uma circunferência, e executar ranhuras helicoidais ao longo de uma superfície cilíndrica.



Figura 29 – Fresadora universal

Para além destas fresadoras, existem também outras para utilizações especiais, as quais se podem visualizar na Figura 30.

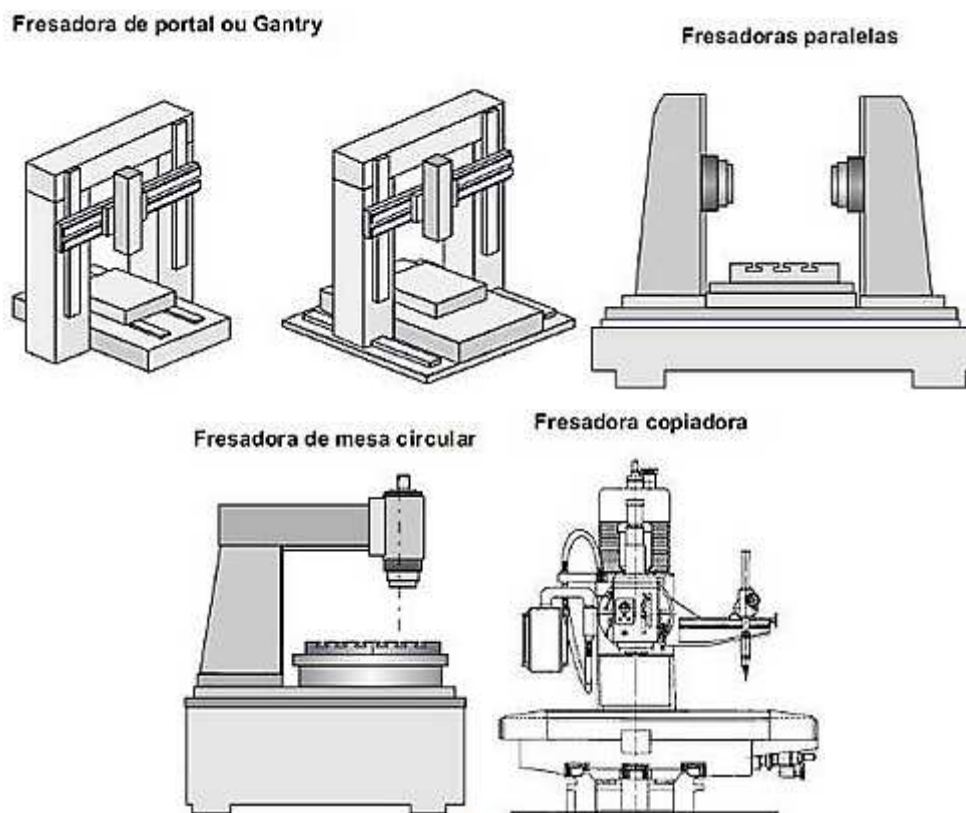


Figura 30 – Outros tipos de fresadoras especiais (Chiaverini, 1977)

2.2.2.3. Ferramentas específicas para fresagem

Muitos tipos de ferramentas de corte são usados no processo de fresagem. Um exemplo dessas ferramentas são as fresas, que podem ter arestas de corte ao longo de toda a sua superfície frontal (topo), como também podem ter lâminas de corte numa parte da sua extensão lateral, o que permite realizar desbaste periférico. Ferramentas otimizadas para facejar, geralmente possuem arestas de corte nos cantos de topo.

As faces de corte de uma ferramenta de fresagem são normalmente constituídas por um material duro e resistente à temperatura, para que haja menos desgaste, mas por uma questão económica, é frequente encontrar-se estas ferramentas em aço rápido. Finas camadas de revestimento podem ser aplicadas, por forma a diminuir o atrito ou aumentar mais a dureza da ferramenta.

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

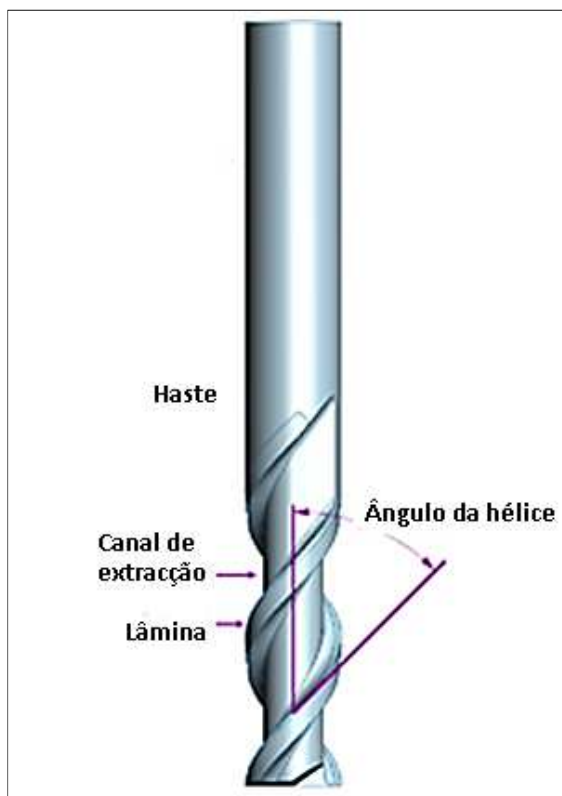


Figura 31 – Fresa de topo de 2 lâminas

As lâminas de corte não actuam em simultâneo, mas sim alternadamente, durante a trajectória circular.

A Figura 32 mostra os principais perfis de lâminas de fresas e um tipo de fresa cilíndrica com lâminas helicoidais (1). A figura (a) mostra o perfil “dente de serra”, a figura (b), o perfil “dente reforçado” e a figura (c), o perfil “dente curvilíneo”.

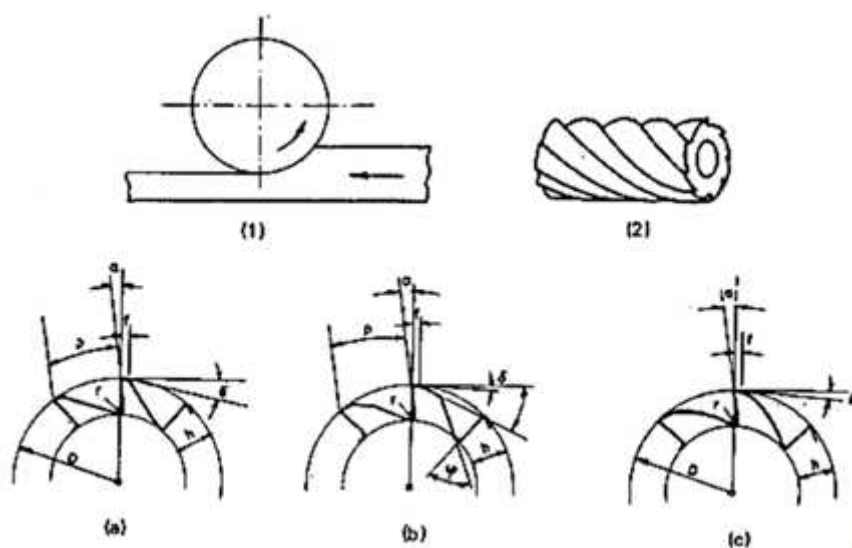


Figura 32 – Principais perfis dos dentes e desenho esquemático de uma fresa

Os valores dos ângulos e outros elementos representados na Figura 32 dependem, sobretudo, do tipo de material de que são feitas as fresas. O ângulo α equivale ao ângulo de ataque, enquanto o ângulo δ se refere ao ângulo de incidência. Não está indicado nas figuras o ângulo de corte β , que se situa entre α e δ , de modo que a soma de α mais β mais δ corresponda sempre a 90° .

A haste de uma fresa é normalmente cilíndrica ou cônica e não possui aresta de corte. Esta zona é simplesmente usada para instalação e fixação da ferramenta no porta-ferramenta. A haste pode ser perfeitamente cilíndrica, e segura por força de atrito, ou pode ter um rebaixo plano, sistema designado por haste *Weldon*, onde um parafuso é apertado contra essa superfície plana de maneira à ferramenta aguentar maior binário sem escorregar. O diâmetro da haste pode variar consoante o diâmetro da zona de trabalho (zona com arestas de corte), para deste modo poder ser segura por um porta-ferramentas normalizado.

Existem muitos tipos de fresas, em função do tipo de maquinagem a ser executada.

A Figura 32 (2) representa um tipo de fresa cilíndrica com lâminas helicoidais. As fresas cilíndricas podem também apresentar as lâminas paralelas ao eixo. As lâminas helicoidais garantem uma operação mais segura porque, como trabalham simultaneamente, não são tão susceptíveis a vibrações.

Segundo a disposição das lâminas, as fresas podem ser tangenciais ou de topo. Quando a espessura da ferramenta é relativamente pequena em relação ao diâmetro, as fresas são chamadas de disco.

As fresas cónicas são utilizadas, quase exclusivamente, para executar ranhuras prismáticas, para mesas de trabalho, corrediças, ou de outros tipos, ou para a produção de ferramentas, como as próprias fresas (Chiaverini, 1977).

Tabela 9 – Operações básicas de fresagem e ferramentas de corte ilustrando a variedade de superfícies e combinações de superfícies que podem ser realizadas

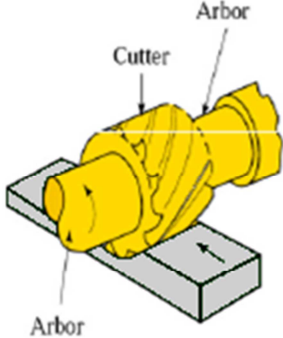
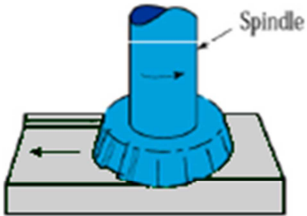
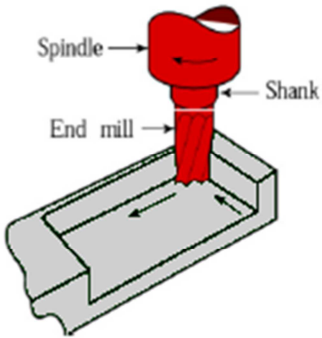

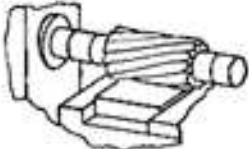
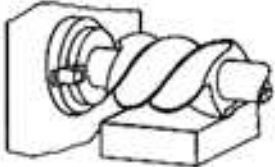

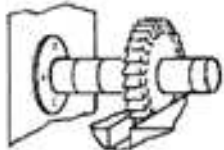




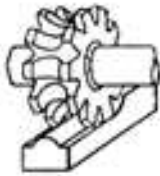




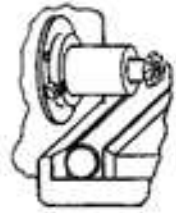

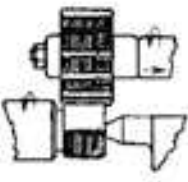
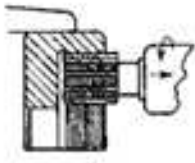








Principais operações			
 <p>Arbor Cutter Arbor</p>	 <p>Spindle</p>	 <p>Spindle Shank End mill</p>	
Fresagem de placas	Facejamento	Fresagem de topo	
Outras Operações			
 <p>(a) Saw, slitting</p>	 <p>(b) Plain</p>	 <p>(c) Helical, plain</p>	
 <p>(d) Saw, slotting</p>	 <p>(e) Side mill, slotting</p>	 <p>(f) Half-side, straddle</p>	
 <p>(g) Single angle</p>	 <p>(h) Single angle</p>	 <p>(i) Double angle</p>	 <p>(j) Concave</p>
 <p>(k) Convex</p>	 <p>(l) Corner rounding</p>	 <p>(m) Shell end</p>	 <p>(n) End</p>
 <p>(o) Key seat</p>	 <p>(p) T-slot</p>	 <p>(q) Male thread</p>	 <p>(r) Female thread</p>

Tabela 10 – Alguns tipos de fresas mais utilizadas (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 fuso.	Possuem arestas de corte nos lados e também na periferia. As facas estão em zig-zag de modo que cada faca alternada corta num lado determinado 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 boleadas	Fresas com raio de canto	Mini-Fresas
			
Estas fresas de topo têm um ângulo recto na extremidade da fresa.	A forma nos extremos das fresas é uma semiesfera.	Estas fresas de topo possuem um pequeno raio na extremidade.	Fresas de topo com diâmetro de corte de até 1 mm.

Algumas fresas têm como característica, poderem desbastar em mergulho (directamente para baixo como uma broca). Isto deve-se ao facto de algumas lâminas constituintes das fresas não se estendem até ao centro da face de topo. Contudo, estas ferramentas de corte podem cortar para baixo com um ângulo de 45° ou semelhante. As que possuem corte ao centro podem funcionar quase como uma broca, tendo a capacidade de “mergulhar” no material.

Para além das ferramentas sólidas, temos também as ferramentas de pastilhas intercambiáveis, onde a aresta de corte consiste numa peça separada da haste/suporte e que pode estar brasada, soldada ou fixa por parafuso ou alavanca. As pastilhas são normalmente constituídas por metal duro, diamante policristalino ou nitreto de boro cúbico.

As vantagens dos insertos são:

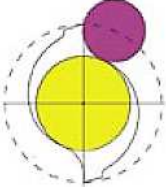
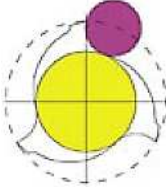
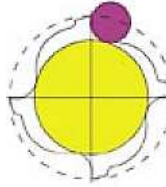
- Só uma pequena porção da ferramenta é necessária para realizar o corte;
- Devido ao pequeno tamanho do inserto/pastilha, a sua fabricação é mais fácil do que uma ferramenta sólida do mesmo material, o que reduz os custos devido ao suporte poder ser constituído por um material mais barato e tenaz;
- Em algumas situações, as pastilhas são melhores do que as ferramentas inteiriças, porque combinam a robustez do suporte com a dureza da pastilha.

Como desvantagens temos:

- A junção do suporte e pastilha reduz a rigidez.

É muito importante ter em atenção o número de lâminas da fresa utilizada para cada situação. Esta escolha deve ser feita tendo em atenção o material a ser maquinado, dimensão da peça de trabalho e condições de maquinagem. A Tabela 11 demonstra as particularidades de fresas de duas, três e quatro lâminas.

Tabela 11 – Comparação de fresas com diferentes números de lâminas (DORMER, 2010)

2 Lâminas	3 Lâminas	4 Lâminas
		
Resistência à flexão Baixa ← → Alta		
Espaço para extração de aparas Grande ← → Pequeno		
<ul style="list-style-type: none"> • Espaço grande para aparas; • Extração fácil de aparas; • Boa para fresar rasgos; • Boa para fresagem pesada; • Menor rigidez devido à pequena área transversal; • Acabamento da superfície de qualidade inferior. 	<ul style="list-style-type: none"> • Espaço para aparas quase tão grande como para 2 lâminas; • Área transversal maior – maior rigidez que com 2 lâminas; • Melhor acabamento da superfície. 	<ul style="list-style-type: none"> • Rigidez mais elevada; • Maior área transversal – pequeno espaço para aparas; • Produz melhor acabamento da superfície; • Recomendada para perfilar, fresagem lateral e rasgos pouco profundos.

2.2.3. Furação

A furação é um dos processos mais utilizados na maquinagem. Esta operação tem por objectivo abrir, alargar ou acabar furos de peças. Os furos podem ser produzidos em dimensões que variam desde poucos milímetros, até vários centímetros de diâmetro.

A ferramenta utilizada no processo chama-se broca. A broca tem um movimento de rotação contínuo (velocidade regulada consoante as características do trabalho) e um movimento rectilíneo de avanço segundo o eixo de perfuração (movimento manual ou automático). Actualmente existem brocas de pastilhas intercambiáveis, com canais de refrigeração e de materiais mais resistentes que o tradicional aço rápido.

A furação é efectuada em máquinas-ferramentas designadas por furadoras. Estas máquinas têm como função principal a execução de furos, mas outras operações, tais como mandrilagem (alargamento) e rebaixamento, também podem ser realizadas. As furadoras possuem um motor que aplica uma rotação a uma ou mais brocas que são responsáveis pela remoção do material.



Figura 33 – Exemplo de furadora

As regras gerais para furação são as seguintes (DORMER, 2010):

- Seleccionar a broca mais adequada para a aplicação, lembrando o material a ser maquinado, a capacidade da máquina-ferramenta e o fluido refrigerante a ser usado;

- A flexibilidade entre o componente e o fuso da máquina pode provocar danos na broca, no componente e na máquina – assegurar sempre uma estabilidade máxima. Isto pode ser melhorado seleccionando a broca mais curta viável para a aplicação;
- A fixação da ferramenta é um factor importante na operação de furação e não deve permitir-se o escorregamento ou o movimento da broca no porta-ferramentas;
- O uso correto das brocas com haste cónica Morse depende de um ajuste eficiente entre as superfícies cónicas da ferramenta e do porta-ferramenta. Deverá ser utilizado um martelo de borracha para prender a broca no porta-ferramenta;
- Recomenda-se o uso de fluidos refrigerantes e lubrificantes adequados, conforme exigido pela operação específica de furação. Quando do uso de fluidos e lubrificantes, assegurar um abastecimento abundante, especialmente na ponta da broca;
- É essencial a evacuação das aparas durante a furação para garantir o procedimento correto de furação. É desaconselhado que as aparas permaneçam presas nos canais;
- Aquando do afiamento de uma broca, deve-se verificar sempre que seja produzida a correta geometria da ponta e que qualquer marca de desgaste tenha sido removida.

Os critérios de selecção de uma broca são (DORMER, 2010):

- Material a ser furado;
- Profundidade do furo;
- Capacidade da máquina;
- Fluido refrigerante usado;
- Condições da máquina;
- Exigências de produtividade;
- Escolha do porta-ferramentas;
- Estabilidade da fixação da peça de trabalho;
- Furação horizontal ou vertical;
- Broca estacionária ou giratória;
- Controlo das aparas;
- Exigências dimensionais do furo.

O processo de furação é basicamente um processo de desbaste, que gera peças com tolerâncias relativamente imprecisas (ISO IT11 – IT14). Quando são necessários melhores acabamentos superficiais ou tolerâncias mais apertadas, é necessário o uso de ferramentas

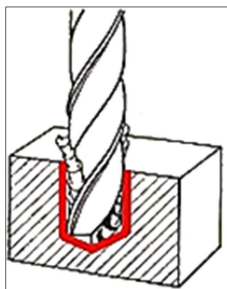
que o permitam. O uso de mandris (alargadores) serve para alargar furos já existentes, melhorando a tolerância dimensional e o acabamento superficial desejado. Mandris são ferramentas de múltiplas arestas de corte que, através dos movimentos de corte e avanço, servem para alargar e acabar furos. Os mandris são divididos em multicortantes e monocortantes.

Também dentro dos processos de furação temos o escareamento. O escareamento é um processo de maquinagem destinado a fazer um alargamento, cônico ou cilíndrico, na entrada de um furo. É usado para embutir a cabeça do parafuso na peça (por exemplo). Este alargamento, quando cilíndrico, pode também ser chamado de rebaixamento.

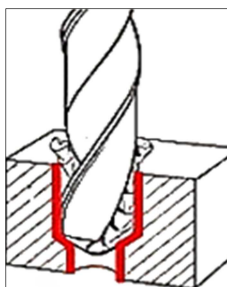
2.2.3.1. *Princípios básicos da furação*

Existem vários tipos de furação:

- **Furação em cheio** – sem furo prévio, também designado por furo passante ou vazado, é um processo de furação destinado à abertura de um furo cilíndrico numa peça removendo todo o material compreendido no volume do furo final, na forma de aparas;



- **Furação com pré-furação** – processo onde é realizado um furo anterior, com um determinado diâmetro, para posterior utilização de uma broca de maior diâmetro, num furo já existente;



- **Furação escalonada** – processo de furação destinado à obtenção de um furo com, simultaneamente, dois ou mais diâmetros. Também é utilizado na abertura de caixas para cabeças de parafusos;
- **Furação de centros (pontear)** – processo de furação destinado à obtenção de furos de centro para preparação de futura operação na peça.

Os principais movimentos da furação são o movimento de corte e o movimento de avanço.

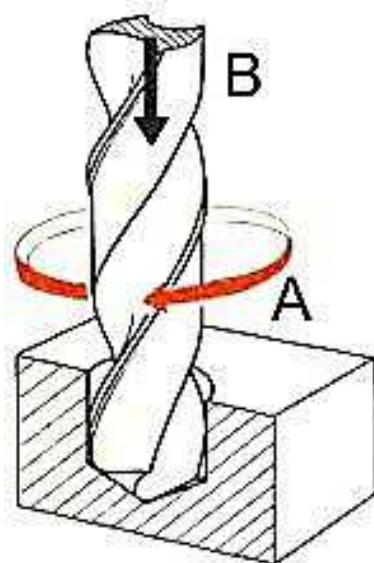


Figura 34 – Furação: a) Movimento de corte; b) Movimento de avanço (Borges, 2008)

A ferramenta mais utilizada no processo chama-se broca, representada esquematicamente na Figura 35 que mostra, igualmente, a nomenclatura usual para designar as partes e os ângulos da ferramenta.

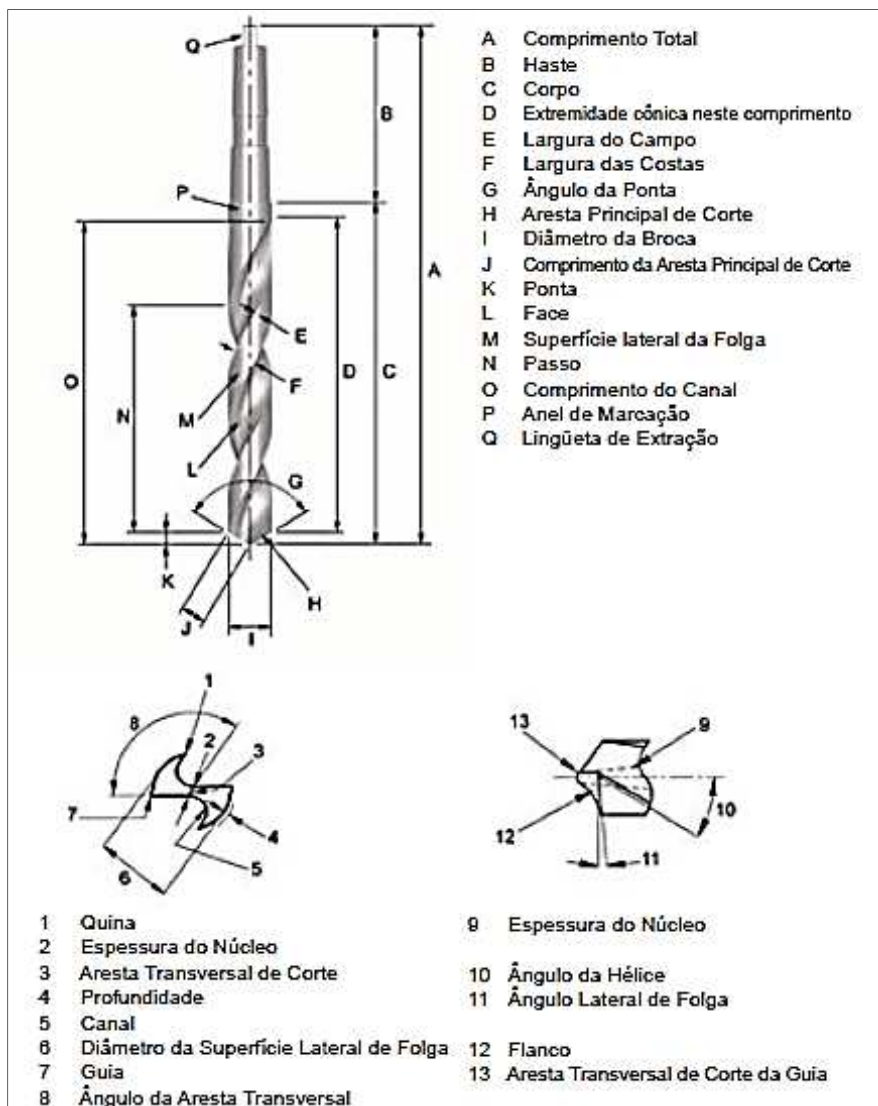


Figura 35 – Partes constituintes de uma broca (DORMER, 2010)

A broca é dotada de um movimento giratório contínuo e de um movimento rectilíneo de avanço, segundo o eixo de perfuração. As lâminas da ferramenta arrancam material e a aparado resultante, à medida que é retirada, enrola-se em forma de espiral cilíndrica, deslizando pelos canais helicoidais de extração.

A ferramenta recebe os movimentos fundamentais de rotação e de avanço por intermédio de máquinas, chamadas furadoras.

A Figura 36 representa, esquematicamente, as várias modalidades de furação.

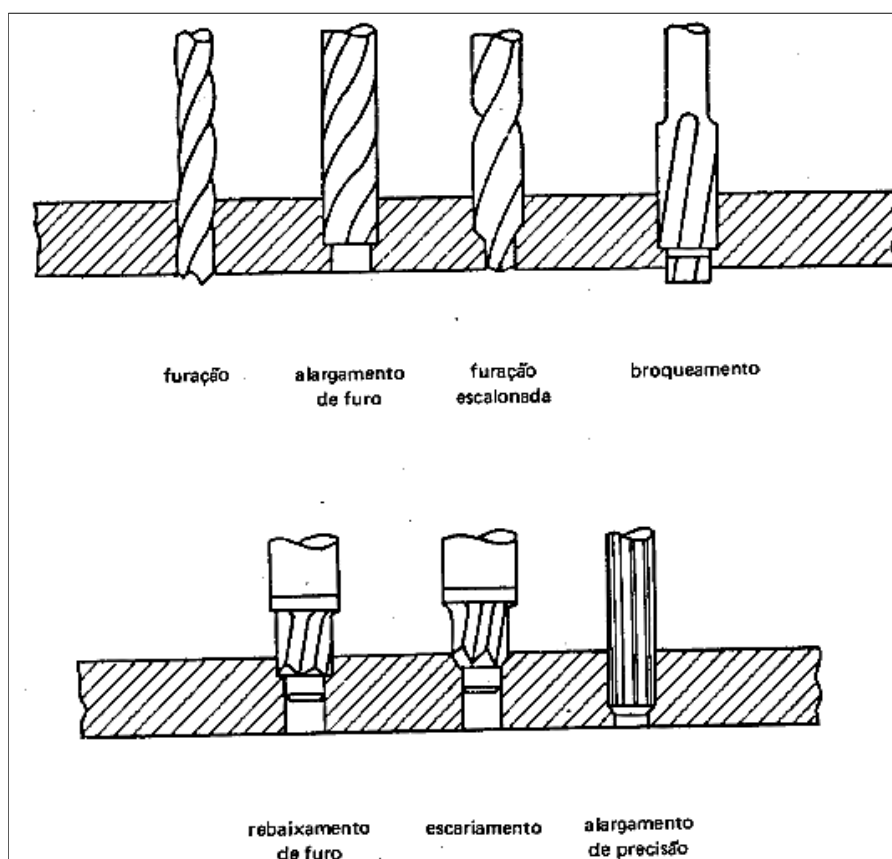


Figura 36 – Representação das principais modalidades de furação (Chiaverini, 1977)

A produtividade na furação está fortemente relacionada com a taxa de penetração, v_f .

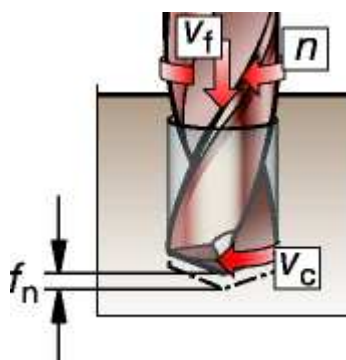


Figura 37 – Parâmetros envolvidos na furação (Sandvik - Definições na furação)

No caso das brocas de pastilhas intercambiáveis (uma pastilha central e uma periférica), a pastilha central trabalha com a velocidade de corte zero até 50% de V_c máxima, e a pastilha periférica de 50% V_c máxima até V_c máxima. A pastilha central forma uma apara cônica, enquanto a periférica forma uma apara semelhante à obtida em torneamento interno, com uma grande profundidade de corte.

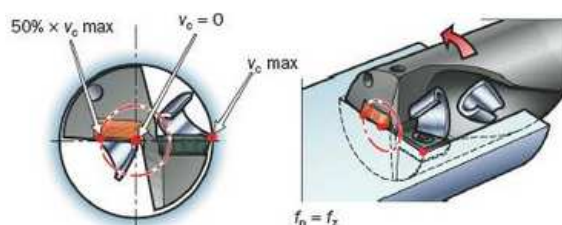


Figura 38 – Broca de pastilhas intercambiável (Sandvik - Definições na furação)

As brocas sólidas de metal duro e as de pontas intercambiáveis, possuem normalmente duas arestas do centro até à periferia.

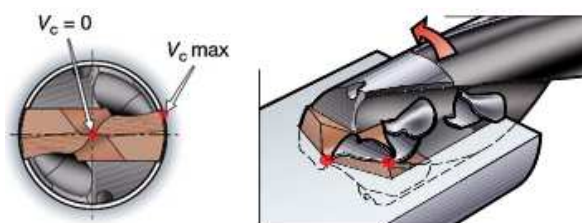


Figura 39 – Brocas de pontas intercambiáveis (Sandvik - Definições na furação)

Uma broca sólida de metal duro ou soldada, é rectificada e ligeiramente cónica no seu diâmetro externo, para proporcionar folga, evitando que a broca fique presa no furo.

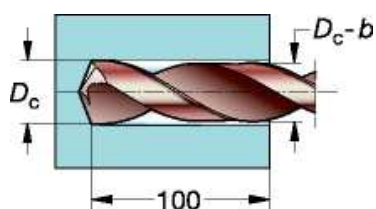


Figura 40 - Conicidade (Sandvik - Definições na furação)

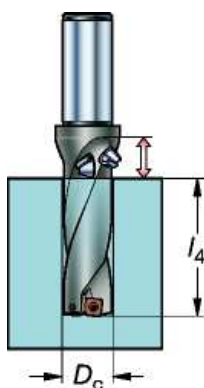


Figura 41 - Profundidade do furo (Sandvik - Definições na furação)

A utilização de fluido refrigerante através da ferramenta é recomendada na operação de furação. Serve para manter um fluxo abundante de refrigerante directamente na ponta da broca, assim reduzindo a quantidade de calor gerada e, conseqüentemente, aumentando a vida útil da ferramenta. As brocas de elevado desempenho exigem um aumento na pressão do refrigerante, pois o seu fluxo não só arrefece a área de corte, mas também promove uma eficiente evacuação das aparas com altas taxas de penetração. Resumindo, quanto maior a pressão do refrigerante, mais eficiente serão os processos de arrefecimento e de evacuação das aparas. Para elevados desempenhos e produtividade aumentada, a pressão do fluido refrigerante deverá ser, no mínimo, de 20 bar (DORMER, 2010).

2.2.3.2. Furadoras

Existem diversos tipos de furadoras, construídas em função da forma e dimensões das peças a furar, do número de furos a realizar, do seu diâmetro, da precisão exigida, etc.

Na escolha da furadora mais adequada para cada trabalho a ser realizado devem ser avaliados os seguintes aspectos:

- Forma da peça;
- Dimensões da peça;
- Número de furos a serem abertos;
- Quantidade de peças a serem produzidas;
- Diversidade no diâmetro dos furos de uma mesma peça;
- Tolerâncias requeridas para o furo.

O tipo mais usualmente utilizado é o de coluna, representado esquematicamente na Figura 42, a qual indica também os seus principais movimentos.

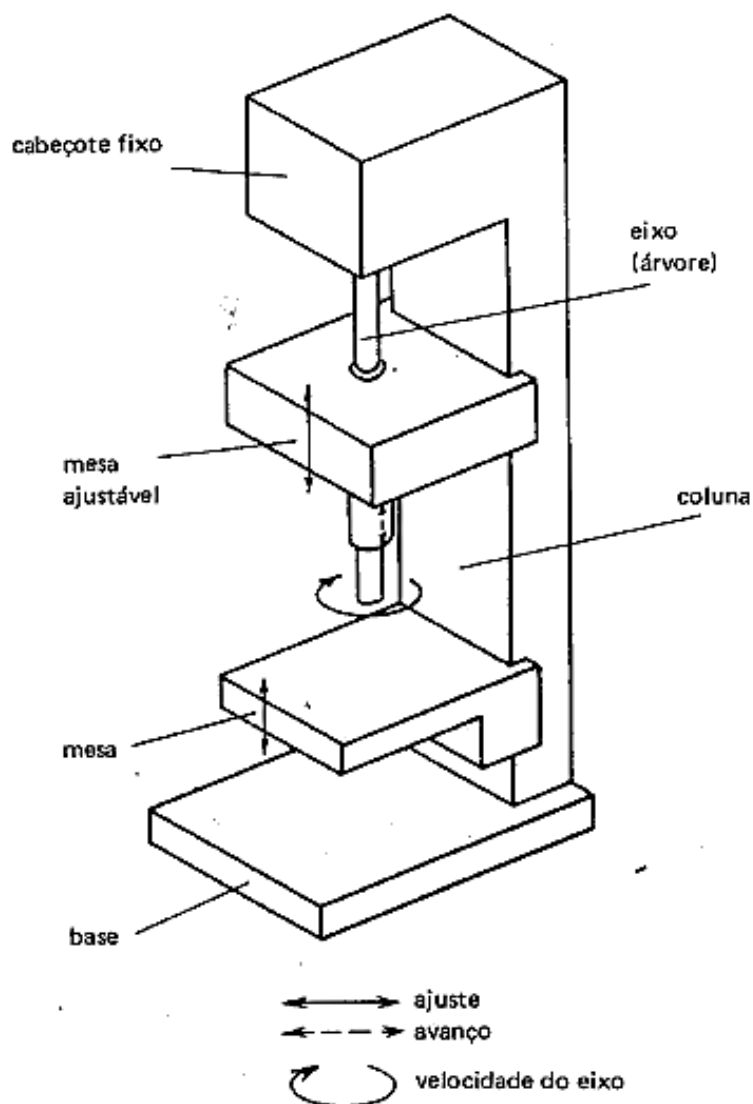


Figura 42 – Representação esquemática de uma furadora de coluna (Chiaverini, 1977)

Uma furadora de coluna consta essencialmente de base fixa, da coluna, que pode ser de forma cilíndrica ou prismática. Esta última proporcionando uma construção mais robusta e sólida, de modo a evitar vibrações durante a operação de maquinagem. Este tipo de furadora é muito versátil, realizando operações de furação comuns, ou trabalhos em série, mediante a utilização de gabaritos.

Os tipos de furadoras mais comuns estão representados na Tabela 12.

Tabela 12 – Tipos de furadora típicas

De bancada	
De coluna	
Radial	
De furos múltiplos	
CNC (ponto a ponto)	

As furadoras CNC são, normalmente, implementadas na produção em massa. As suas principais vantagens são:

- Poupança de tempo de troca de ferramenta;
- Maior velocidade de execução;
- Minimização da variação do diâmetro dos furos realizados (maior precisão).

2.2.3.3. Ferramentas específicas para utilizar em furadoras

As ferramentas mais utilizadas nas operações de furação são:

- **Broca** – para realizar furos;
- **Mandril (alargador)** – utilizado para mandrilar ou seja rectificar/alargar furos já existentes. Podem realizar acabamentos na ordem de $0.8 \mu\text{m}$ de tolerância radial;
- **Broca de escarear ou Escareadores** – dar forma cônica a superfície que rodeia a entrada do furo, para acomodar a cabeça do parafuso. A esta operação também se dá o nome de chanfrar;
- **Fresa de rebaixar** – dar forma cilíndrica à superfície que rodeia a entrada de um furo escalonado;
- **Brocas de ponto** – obter furos de centro (guias) para posterior furação. Esta ferramenta evita que o furo saia fora de esquadria.

Existem ainda brocas especializadas para materiais como vidro, cerâmica vidrada, etc., bem como para abertura de sulcos ou outras operações, além da perfuração (semelhantes a fresas).

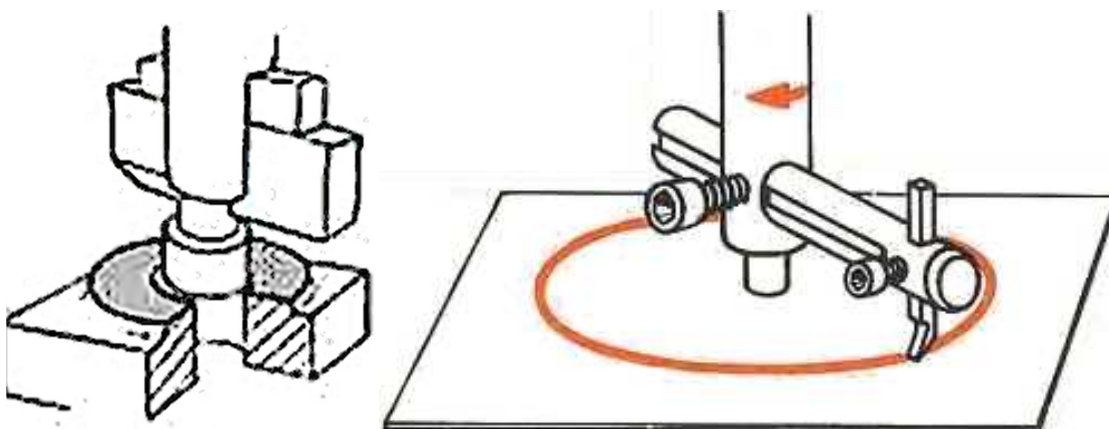


Figura 43 – Exemplo de operações especiais: facejamento de superfícies de apoio e sangramento de discos (recortar) (Borges, MMBorges - Furação, 2008)

Para além da broca comum, são utilizados outros tipos de ferramentas e brocas especiais.

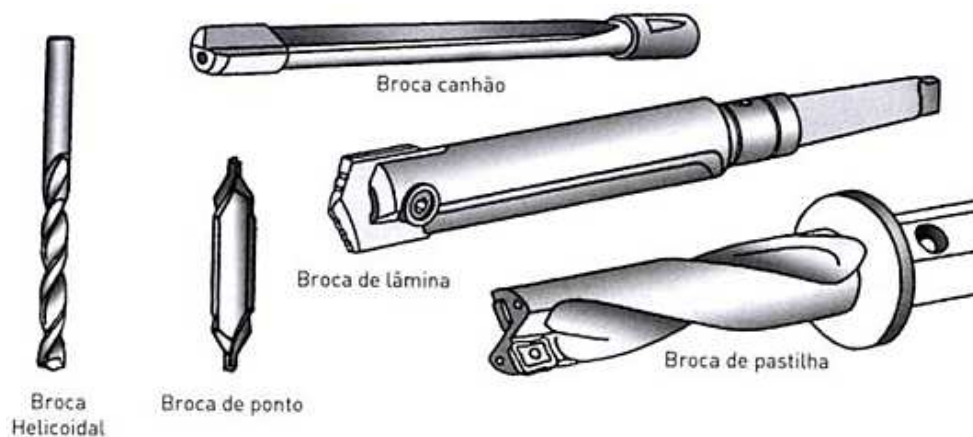


Figura 44 – Diferentes tipos de brocas, tanto sólidas como de pastilha, para operações comuns e especiais (Costa, 2014)

A “broca canhão” é um tipo de broca utilizada para abertura de orifícios de 75 a 750 mm de profundidade. O diâmetro desta broca varia de 2 a 50 mm e possui uma única lâmina de corte, podendo também possuir um canal a toda a sua extensão, que permite a passagem de fluido de corte.

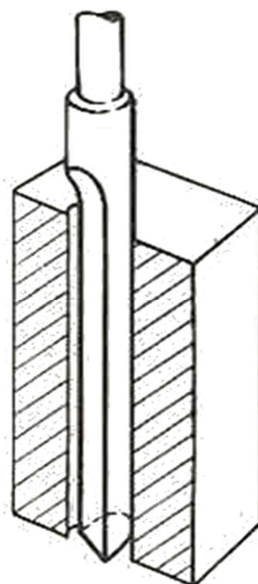


Figura 45 - Broca canhão para furos profundos (Borges, 2008)

Dentro dos mandris temos dois tipos principais: multicortantes e monocortantes, conforme ilustrado na Figura 47.

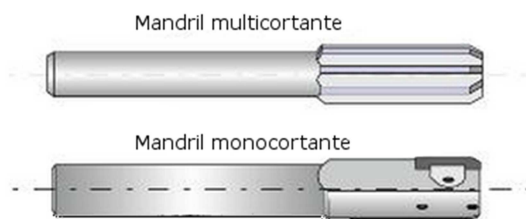


Figura 46 – Tipos principais de mandris

Os mandris multicortantes possuem lâminas que estão dispostas num único conjunto e encontram-se simultaneamente em contacto com a peça. Normalmente, a vida útil desses mandris é determinada pelo aumento da rugosidade acima do limite permitido, ou por ter atingido a tolerância mais baixa, semelhante aos principais critérios que determinam a vida útil das brocas. Geralmente utilizam-se mandris de desbaste e de acabamento para se alcançar a melhor qualidade de acabamento e menores desvios geométricos e dimensionais. O resultado desta operação depende de vários factores de extrema importância aquando da determinação e construção da ferramenta: aplicação manual ou mecânica, tipo, profundidade e qualidade do furo, (se o furo é passante ou não, espessura da parede da peça a ser maquinada), acabamento da superfície, dimensões e tolerâncias do furo, resistência e maquinabilidade do material.

A operação de escarear é utilizada em praticamente todos os componentes que maquinados. Escareadores são utilizados na maioria dos casos para furos de conexão com rosca, operações de desbaste para alargador ou para remoção de rebarbas. Alguns tipos de escareadores podem ser visualizados na Figura 47.



Figura 47 – Tipos de escareadores (Costa, 2014)

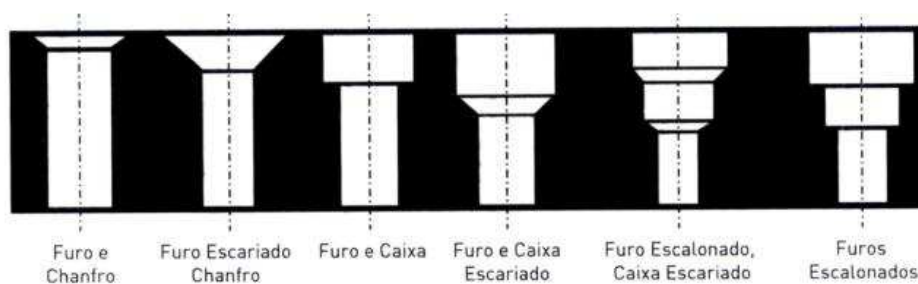


Figura 48 – Operações de escareamento e furação (Costa, 2014)

A execução dos furos pode ser realizada com as ferramentas anteriormente descritas, mas também é possível através da utilização de fresas apropriadas para esta aplicação, ou seja, fresas providas de corte de topo (corte ao centro), não tendo, naturalmente, o mesmo desempenho das brocas, mas, por outro lado, permitem obter superfícies planas (a 90°) no fundo do furo. As fresas normalmente são utilizadas como complemento na operação de furação.

2.2.4. Rectificação

A rectificação tem como objectivo corrigir as irregularidades de carácter geométrico produzidas por operações de maquinagem, reduzir rugosidades ou saliências de superfícies maquinadas noutras máquinas-ferramenta, dar exactidão dimensional à superfície da peça, corrigir peças que tenham sido deformadas num tratamento térmico, remover camadas finas de material endurecido por têmpera, cementação, etc. As máquinas utilizadas são as rectificadoras, as quais utilizam como ferramentas os rebolos, constituídos de material abrasivo. Os rebolos são sólidos de revolução. Compreendem uma grande variedade de formas e dimensões, tendo em vista a grande variedade de serviços que podem ser realizados por intermédio da rectificação. Os vários tipos de rebolos distinguem-se também pela natureza do abrasivo, tipo de grão, dureza, etc.

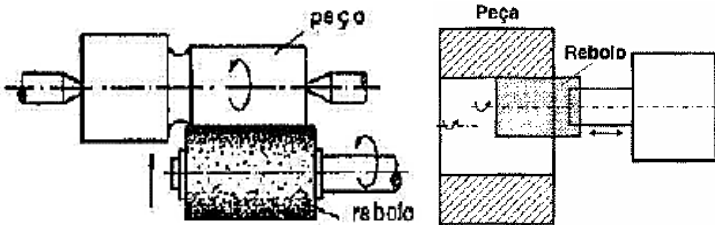
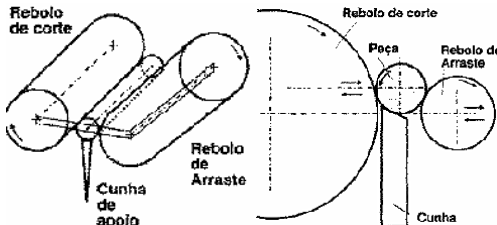
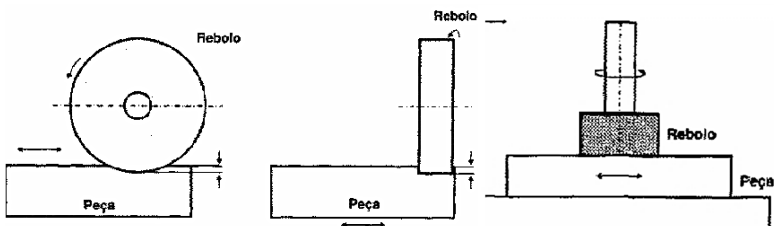
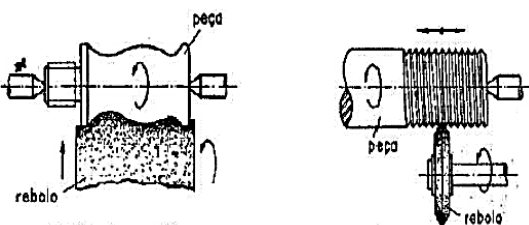
Os principais objectivos desta operação são (Senai - Torneamento e Rectificação, 2009):

- Reduzir rugosidades ou saliências e rebaixos de superfícies através de operações produzidas por máquinas-ferramenta, tais como: furadoras, tornos, plainas, fresadoras, entre outras;
- Obter um acabamento adequado (entre IT4 e IT6);
- Gerar peças com maior exactidão dimensional;
- Corrigir pequenas deformações causadas por tratamentos térmicos;

- Remover finas camadas de material endurecido por têmpera, cementação ou nitruração.

Os tipos de rectificação mais comuns são os seguintes:

Tabela 13 – Métodos de rectificação (Senai - Torneamento e Rectificação, 2009)

<p>Cilíndrica</p>	
<p>Sem centros</p>	
<p>Plana</p>	
<p>De perfis</p>	

2.2.4.1. Princípios básicos da rectificação

A rectificação é um processo de maquinagem de acabamento por abrasão, destinado à obtenção de superfícies lisas com auxílio de uma ferramenta abrasiva de revolução. Para isso, a ferramenta gira e a peça ou a ferramenta desloca-se segundo uma trajectória determinada, podendo, a peça girar ou não. As variantes de rectificação são: a frontal, a tangencial, plana e cilíndrica.

A ferramenta utilizada no processo de rectificação é o rebolo, formado a partir de grãos abrasivos e um aglutinante ou ligante. As figuras a seguir demonstram o processo de

remoção de material através do abrasivo, e o princípio de acção dos grãos abrasivos em operações de acabamento.

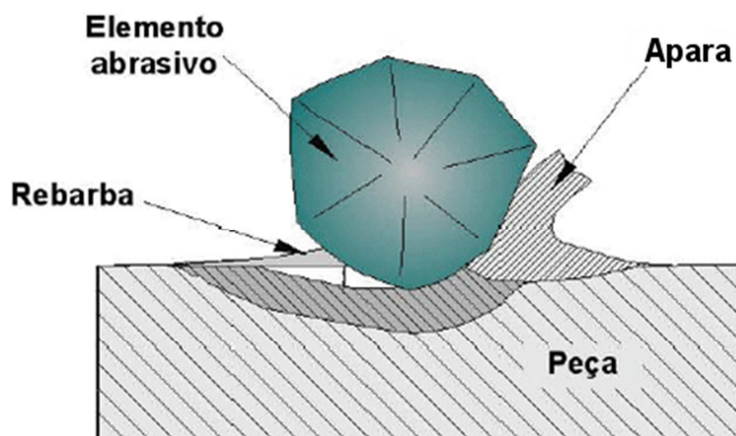


Figura 49 – Processo abrasivo de remoção de material (Senai - Torneamento e Rectificação, 2009)

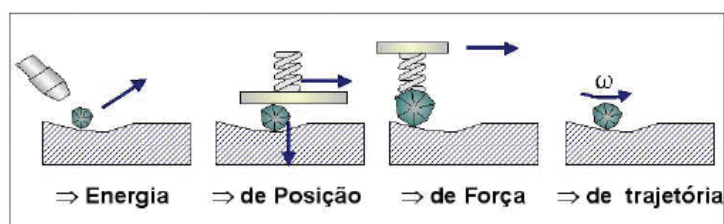


Figura 50 – Tipos de interação dos grãos abrasivos com o material da peça de trabalho (Senai - Torneamento e Rectificação, 2009)

Para que a superfície rectificada apresente exactidão dimensional e bom acabamento, é necessário levar em conta o tipo de material a maquinar, o tipo de trabalho a ser feito, o tipo de granulação e o aglomerante do rebolo.

Quanto à velocidade da mesa, existem as seguintes relações:

- Material macio – maior velocidade da mesa;
- Material duro – menor velocidade da mesa;
- Rebolo de liga vitrificada – baixa velocidade (até 33 m/s);
- Rebolo de liga resinóide – alta velocidade (até 45 m/s).

Quanto a dureza do rebolo:

- Material macio – rebolo duro;
- Material duro – rebolo macio.

Quanto a estrutura:

- Desbaste – estrutura aberta;
- Acabamento – estrutura fechada.

À semelhança do torneamento, fresagem e furação, pode-se calcular a velocidade de corte, para rectificações cilíndricas, através da expressão:

$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000}$$

Onde:

V_c – velocidade de corte [m/min]

d – diâmetro da peça [mm]

n – número de rotações por minuto [rpm]

As velocidades de corte de cada material são determinadas de acordo com a quantidade de material a ser removido, a qualidade do acabamento exigido e as propriedades do material a ser rectificado.

A profundidade de corte poderá variar em operações de desbaste em torno de 0.025 mm a 0.1 mm, e para acabamentos de 0.006 mm a 0.01 mm.

Também como parâmetro importante temos a velocidade periférica do rebolo, que é a relação entre o diâmetro do mesmo e o número de rotações (Senai - Torneamento e Rectificação, 2009):

$$V = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{60000}$$

Onde:

V – velocidade periférica (m/s)

d – diâmetro da peça (mm)

n – número de revoluções (de 5000 a 15000)

2.2.4.2. Equipamentos para rectificar

As rectificadoras podem ser divididas nos seguintes tipos:

- De superfícies externas;
- De superfícies internas;
- Universais;
- “Sem centro”;
- Verticais;
- Horizontais;
- Especiais.

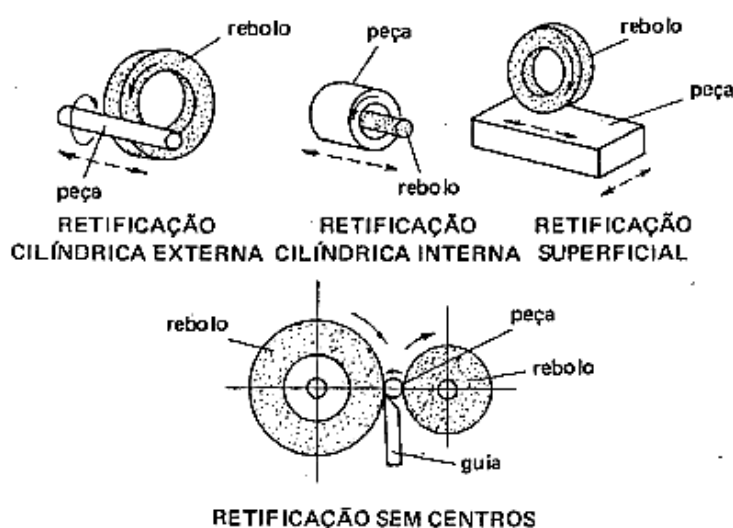


Figura 51 – Representação esquemática de algumas operações de rectificação (Senai - Torneamento e Rectificação, 2009)

A Figura 51 apresenta algumas das operações mais comuns de rectificação.

A Figura 52 representa uma rectificadora de superfícies externas, também chamada rectificadora plana, e os seus principais movimentos. Como se vê, ela é constituída basicamente pela base, sobre a qual corre a mesa dotada de movimento longitudinal. Na mesa é fixada uma placa magnética, para fixar a peça a ser rectificada. Na coluna está ligado o rebolo, dotado de movimento de rotação e que pode ser movimentado para cima e para baixo, de modo a aproximar-se ou afastar-se da peça.

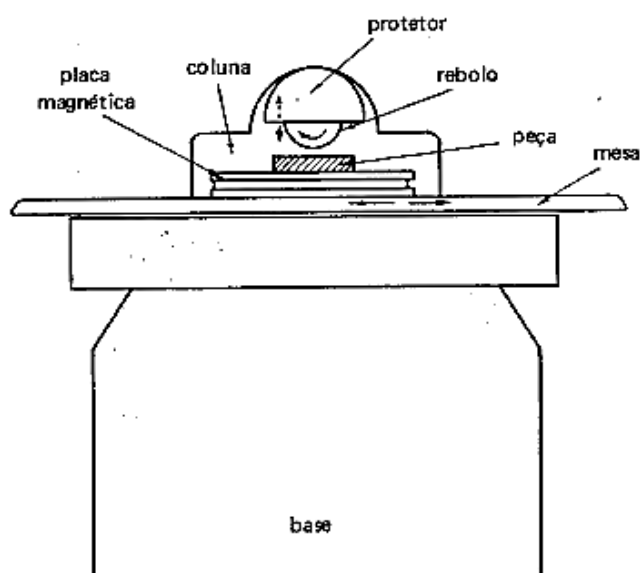


Figura 52 – Rectificadora plana e respectivos movimentos principais (Chiaverini, 1977)

Nesta máquina, o eixo do rebolo é paralelo à mesa ou à superfície de trabalho. Se o eixo for perpendicular à mesa, a rectificadora é chamada plana vertical.

Na Figura 53 mostra, com maiores detalhes, os componentes e os movimentos de uma rectificadora plana ou de superfície.

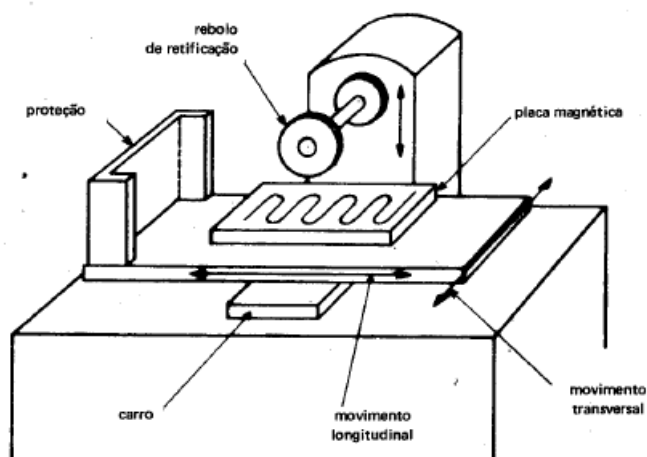


Figura 53 – Representação esquemática dos principais componentes e dos movimentos de uma rectificadora de superfícies externas (Chiaverini, 1977)

A Figura 54 representa uma rectificadora do tipo universal, com a qual se podem realizar rectificações externas de superfícies cilíndricas, rectificações externas de superfícies cónicas, rectificações internas de superfícies cilíndricas e rectificações internas de superfícies cónicas.

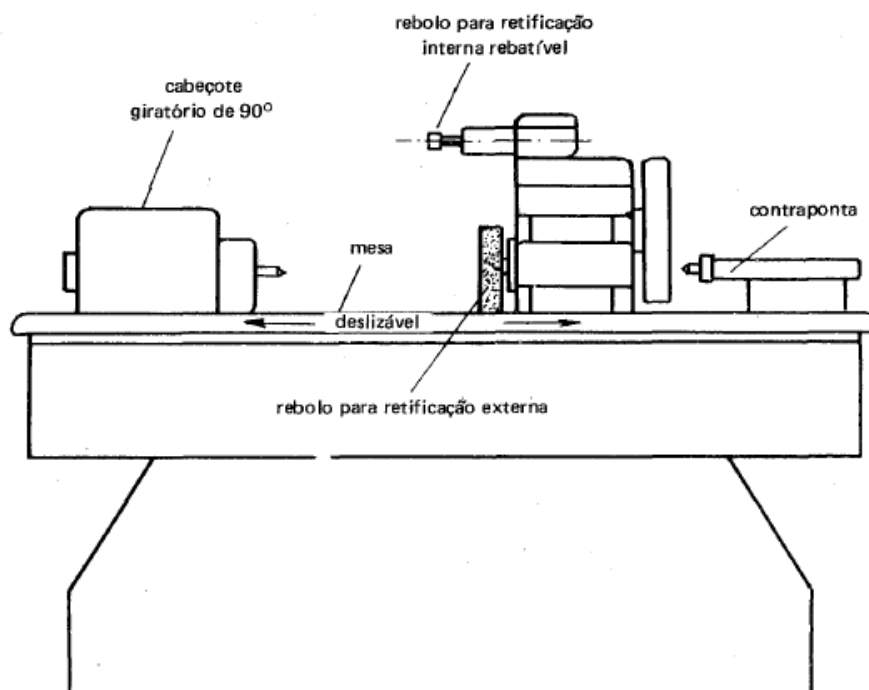





Figura 54 – Rectificadora universal (Chiaverini, 1977)

Nestas máquinas, as partes fundamentais são: a mesa, que desliza longitudinalmente, geralmente por comando numérico (CNC), o cabeçote giratório porta-peças, o contraponto, para segurar a peça, o suporte porta-reolos, que pode afastar-se ou aproximar-se rapidamente da peça, mediante acção hidráulica. Esse suporte apresenta ainda um sistema rebatível para rectificação interna.

As rectificadoras sem centro apresentam como principio básico de operação, como se pode visualizar na Figura 51, sujeitar a peça à rectificação através da acção de um reolo de maior diâmetro, garantindo a fixação da peça a ser rectificada mediante um reolo de apoio, que gira a grande velocidade e comprime a peça, fazendo-a girar sobre si mesma devido ao atrito provocado pelo reolo menor, o qual gira no sentido indicado na seta.

Os eixos dos reolos não são paralelos, mas formam entre si um ângulo que pode ser definido de 1° e 3° .

Tabela 14 – Tipos de rectificadoras

Cilíndrica plana	
Cilíndrica universal	
Sem centro	

A rectificação é bastante utilizada no alinhamento de engrenagens, árvores de cames cambotas, superfícies de deslizamento (barramentos), etc.

No caso das engrenagens, é utilizada para dar acabamento ao dente das mesmas após o tratamento térmico, ou seja, com este processo é possível corrigir as deformações no dente decorrentes do tratamento térmico, tal como indicado. No processo de rectificação após o tratamento térmico, uma ferramenta diamantada de *dressing* (rectificação da superfície), afia o rebolo da rectificadora. Este, por sua vez, faz o acabamento da engrenagem. Neste processo, tanto o flanco como a raiz do dente podem ser maquinados, mas normalmente maquina-se somente o flanco.



Figura 55 – Rectificação de engrenagens

2.2.4.3. Ferramentas específicas para rectificação

O rebolo, ou mó, é a ferramenta de corte utilizada na operação de rectificação. Esta possui uma superfície abrasiva, pois, geralmente, é formada por grãos de óxido de alumínio ou carboneto de silício.

O desgaste do material a ser maquinado é muito pequeno, porque o rebolo arranca partículas muito pequenas durante a operação de corte, quando a aresta dos grãos abrasivos incide sobre a peça. O ângulo de ataque desses grãos é geralmente negativo.

O rebolo apresenta cinco elementos a ser considerados:

- Abrasivo – material que compõe os grãos do rebolo;
- Granulometria – tamanho dos grãos abrasivos;
- Aglomerante – material que une os grãos abrasivos;
- Grau de dureza – resistência do aglomerante;
- Estrutura – porosidade do disco abrasivo.

Existem vários tipos e formas de rebolo, adequados ao trabalho de rectificação que se deseja fazer e, principalmente, à natureza do material a ser rectificado.

Vários perfis e secções transversais estão disponíveis, dependendo do uso pretendido. As formas e aplicações que estas ferramentas podem adoptar, podem ser visualizadas na Figura 56.


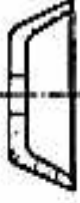



Forma	Aplicação	Forma	Aplicação
 disco reto	Afição de brocas e ferramentas diversas	 copo reto	Afição de fresas frontais, fresas de topo, fresas cilíndricas, machos, cabeçotes porta-bits.
 perfilado	Peças perfiladas	 copo cônico	Afição de fresas angulares, rebaixadores, broca de 3 e 4 arestas cortantes, fresas frontais, fresas de topo.
 disco	Afição de machos, brocas	 segmentos	Retificação plana de ataque frontal no faceamento de superfícies.
 prato	Afição de fresas de forma, fresas detalonadas, fresas cilíndricas, fresas frontais, fresas de disco.	 pontas montadas	Ferramenta de corte e estampos em geral.

Figura 56 – Formas e aplicações dos rebolos (Senai - Torneamento e Rectificação, 2009)

Os rebolos têm uma especificação comum impressa numa etiqueta do próprio disco abrasivo, que indica as suas particularidades (Figura 57).

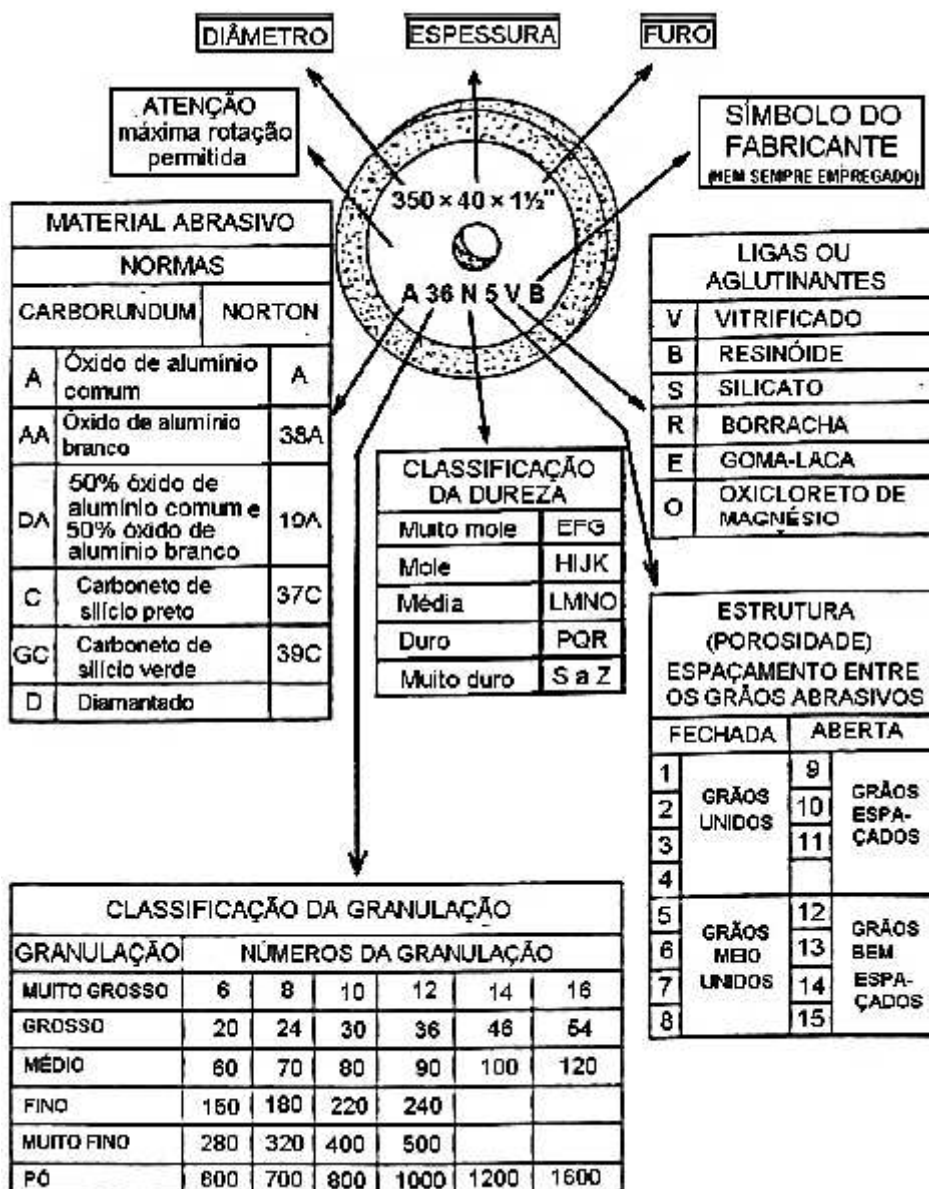


Figura 57 – Especificação dos rebolos (Senai - Torneamento e Rectificação, 2009)

A maioria das mós de rectificação contém óxido de alumínio, uma combinação de óxido de alumínio e óxido de alumínio cerâmico ou carboneto de silício. Mós com óxido de alumínio e óxido de alumínio cerâmico são identificadas pela letra A e as de carboneto de silício pela letra C. Diferentes variedades de cada tipo de abrasivo poderá conter outras letras. As diferentes variedades têm vários níveis de friabilidade. A friabilidade é a capacidade dos grãos abrasivos individuais fracturarem durante a rectificação para criar novas e mais afiadas arestas de corte. Mós que são mais friáveis produzem menos calor na rectificação e são geralmente usadas na rectificação de materiais duros. Mós menos friáveis são mais tenazes, mantêm a sua forma melhor e são geralmente usadas na rectificação de materiais macios (Hoffman, Hopewell, & Janes, 2012).

As particularidades dos materiais constituintes dos rebolos são as seguintes (Hoffman, Hopewell, & Janes, 2012):

- **Óxido de alumínio** – mós de óxido de alumínio são usadas para a rectificação de aços. Existem diferentes cores atribuídas às mós de óxido de alumínio como o branco, cor-de-rosa e castanho. Estas cores, em conjunto com qualquer prefixo antes da designação “A”, indicam a classe do óxido de alumínio. Mós de cor branca contêm a mais pura forma de óxido de alumínio e são das mais friáveis. Mós cor-de-rosa contêm algum óxido de cromo e são mais tenazes e menos friáveis. Mós castanhas contêm óxido de titânio e são menos friáveis do que as de cor-de-rosa.
- **Óxido de alumínio sintético** – mós produzidas inteiramente de óxido de alumínio sintético são muito duráveis, mas não são adequadas para a rectificação de precisão porque não produzem bons acabamentos. Quando se combina óxido de alumínio cerâmico e óxido de alumínio, o resultado é uma mó durável que pode produzir superfícies com bom acabamento e que é adequada para a rectificação de precisão de metais ferrosos.
- **Carboneto de silício** – é um abrasivo mais duro do que o óxido de alumínio e está disponível em duas classes. Mós verdes, contêm a mais pura forma de carboneto de silício, são as mais fiáveis e são principalmente usadas para a rectificação de metal duro. Mós pretas, são menos fiáveis e são geralmente usadas na rectificação de ferros fundidos, aços inoxidáveis e metais não ferrosos.

O tamanho de grão está listado após o tipo de abrasivo. Quanto menor o número, mais grosseiro é o grão e quanto menor, mais fino o grão se torna. Grãos mais grosseiros removem material mais rapidamente e deixam as superfícies mais rugosas, enquanto grãos mais finos irão remover material mais lentamente, mas produzem acabamentos superficiais melhores. Mós com grãos mais grosseiros também cortam melhor metais macios, porque grãos maiores podem penetrar na peça mais facilmente. Na rectificação de metais mais duros, mós com um grão mais fino e com mais grãos numa dada área da mó irão proporcionar mais pontos de corte que poderão remover material mais rapidamente do que uma mó com grãos mais grosseiros, que nunca poderá ter a mesma quantidade de grãos por unidade de área. O uso de mós com grãos grosseiros, para a rectificação de materiais duros, irá resultar na fractura dos grãos para fora da mó e um excessivo desgaste da mesma. Tamanhos de grão de 46 a 60 são normalmente usados para operações de rectificação de uso geral (Hoffman, Hopewell, & Janes, 2012).

2.3. Ferramentas

As ferramentas de corte são utilizadas para remoção de material da peça a desbastar. Este desbaste pode ser realizado através de ferramentas de uma só lâmina ou multi-lâmina. As de uma lâmina são usadas geralmente em torneamento, entre outras operações semelhantes. Ferramentas de fresagem e furação são geralmente ferramentas multi-lâmina. Ferramentas de rectificação (ex.: mós abrasivas) são também consideradas ferramentas multi-lâmina. Cada grão abrasivo é considerado uma aresta de corte microscópica (embora de alto ângulo de inclinação negativa). As ferramentas de corte têm de ser fabricadas em materiais mais duros que o material que está a ser cortado, e têm de ser capazes de suportar o calor gerado no processo de corte de metal. Além disso, a ferramenta deve ter uma geometria específica, com ângulos de saída concebidos de modo a otimizar a extração da aparas. O ângulo da aresta de corte é também muito importante, como é a largura da lâmina e número de lâminas ou dentes. De maneira a ter uma maior vida útil de trabalho, todas as condições acima descritas devem ser optimizadas, bem como, as velocidades e avanços de operação (parâmetros de corte) a que a ferramenta vai ser sujeita. É frequente o uso de ferramentas de corte de pastilhas ou insertos. Nestes casos, a aresta de corte consiste numa peça separada de material, ou soldada, ou fixada ao corpo da ferramenta (suporte/haste). Os materiais mais comuns utilizados nestas pastilhas são o metal duro, diamante policristalino e nitreto de boro cúbico. As ferramentas de pastilhas podem ser fresas, cintas de serra, brocas, entre muitas outras. As ferramentas pequenas não devem ser projectadas com pastilhas intercambiáveis, muito por causa das vibrações que são produzidas. No caso das ferramentas sólidas, a aresta de corte e o suporte são uma unidade inteira e do mesmo material (Schneider Jr., 2009). Para produzir produtos de qualidade, uma ferramenta de corte deve ter três características essenciais (Silva, 2008):

- Dureza e resistência a altas temperaturas;
- Robustez suficiente para que as ferramentas não fissurem nem quebrem;
- Resistência ao desgaste para uma vida útil de trabalho aceitável antes de ser necessária a sua substituição;
- Resistência à compressão;
- Tenacidade;
- Resistência à flexão;
- Resistência do gume cortante;
- Resistência interna de ligação;
- Resistência a quente;
- Resistência à oxidação;

- Baixa tendência à fusão e caldeamento;
- Resistência à abrasão;
- Condutividade térmica, calor específico e expansão térmica.

Relativamente ao material utilizado na fabricação das ferramentas de corte, tem havido grandes evoluções ao longo do tempo. Cronologicamente, temos (Silva, 2008):

- Aço ferramenta (1868);
- Aço rápido – HSS (1905);
- Stellite (1910);
- Metal duro (1926);
- Cerâmicas (1960);
- Metal duro revestido (1970);
- Diamante mono e policristalino (1950);
- Nitreto de boro cúbico, HSS revestido (1980);
- Cerâmica de alta performance (1986).

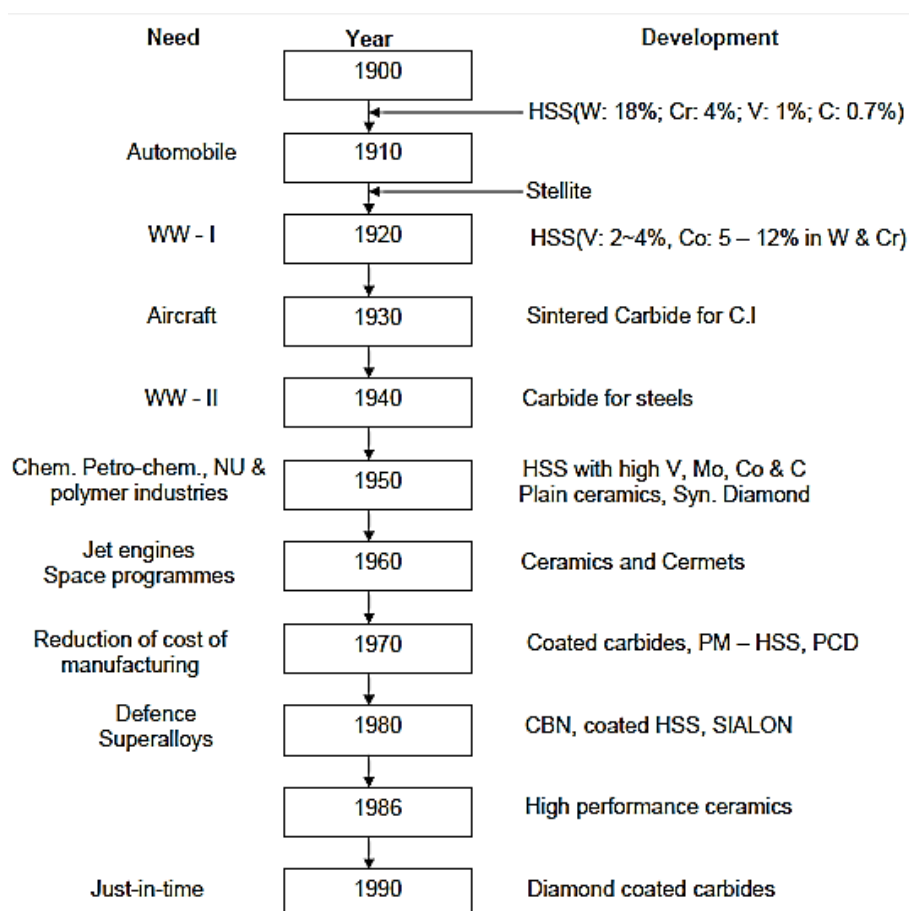


Figura 58 – Evolução cronológica dos materiais utilizados nas ferramentas de corte (Helmi A. Youssef, 2008)

2.3.1. *Materiais para ferramentas*

As ferramentas de corte estão sujeitas a enormes esforços. As suas características de corte dependem do material de corte seleccionado. Devido a esta interacção entre o material a ser removido e material de corte, são utilizados diferentes materiais dependendo do tipo de operação, método de corte, longevidade de ferramenta aceitável, resistência térmica, etc.

Os materiais para ferramentas de corte podem ser distinguidos pelas seguintes classes (Silva, 2008):

- Aços ao Carbono;
- Aços rápidos;
- Carbonetos WC-Co;
- Carbonetos Ti/Ta/W;
- Cerâmicos (Si_3N_4 , ...);
- Carbonetos revestidos a TiC ou TiN;
- Carbonetos revestidos a Al_2O_3 ou TiC/ Al_2O_3 ;
- Carbonetos revestidos a TiC/ Al_2O_3 /TiN.

2.3.1.1. *Aços para ferramenta não ligados*

Como estes materiais têm baixa resistência térmica, o que por outro lado resulta em baixas velocidades de corte, são materiais de menor importância na indústria. Estão, francamente, em desuso, principalmente em operações sujeitas a elevada pressão de preço e produtividade. São actualmente usadas apenas em casos pontuais.

As principais características destes materiais são apresentadas em baixo.

Tabela 15 – Dados técnicos dos aços ferramenta não ligados (Davis, 1995)

Tipo de aço	Aço ao carbono
Teor em carbono [C%]	0.6-1.5
Resistência térmica [°C]	Até 300
Dureza operacional [HRC]	62-66
Vel. Corte admissível [m/min]	5-10

Tabela 16 – Aplicações de aços ferramenta não ligados (Davis, 1995)

Denominação		Aplicação
Numero de material	DIN	
1.1540	C100W1	Ferramentas de roscagem
1.1550	C110W1	Brocas, Ferramentas de brochagem
1.1560	C125W1	Fresas
1.1750	C75W3	Corpo de serras circulares, pinças

Benefícios e informação geral (Silva, 2008):

- Usado principalmente até 1900;
- 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 actualmente em brocas para uso doméstico e em ferramentas para carpintaria.

2.3.1.2. Aços rápidos

Graças à adição de elementos de liga, que formam carbonetos, como o crómio, molibdénio, tungsténio e vanádio, estes têm maior dureza a quente, substancialmente melhores características em termos de resistência ao desgaste e elevada retenção de dureza. Consequentemente, os aços rápidos são muito mais eficientes que os aços ferramenta.

É possível melhorar o desempenho destes materiais ao depositar crómio duro, ou efectuar uma nitruração ou cementação. Quando se deposita crómio na ferramenta, introduz-se uma camada muito fina (0.05-0.3 mm), na superfície, mas também muito dura. Ao introduzir azoto, é possível aumentar muito a dureza na zona superficial e melhorar a resistência ao desgaste.

A cementação é um tratamento térmico-químico (950°C) do aço rápido e é realizada através de um processo de difusão de cimentos no estado sólido.

Tabela 17 - Dados técnicos dos aços rápidos (Davis, 1995)

Tipo de aço	Aço ao carbono
Teor em carbono [C%]	0.6-1.6
Elementos de liga mais importantes [m%]	Co 2-16 / Cr 4 / Mo 0.7-10 / V 1.4-5 / W 1.2-19
Resistência térmica [°C]	Até 600
Dureza operacional [HRC]	62-65
Vel. Corte admissível [m/min]	30-40

Tabela 18 – Aplicações dos aços rápidos (Davis, 1995)

Aplicações
<ul style="list-style-type: none"> • Ferramentas de torneamento e aplainamento; • Ferramentas modulares; • Ferramentas de afiamento; • Brocas convencionais; • Brocas de alta qualidade com núcleo reforçado; • Machos (roscagem); • Fresas; • Corpos de serras circulares e serrotes; • Escareadores.

Benefícios e informação (Silva, 2008):

- Aços cujos principais elementos de liga são o W, Mo, V e Co:
 - Típico: 18% W + 4% Cr + 1% V;
 - Aço Super-Rápido tem adição de Co;
 - Necessitam de Tratamento Térmico complexo;
 - Apresentam preço elevado.
- Apresentam dureza compreendida entre 60 e 67 HRC;
- Usado nas mais diversas situações:
 - Ferramentas para desbaste e acabamento;
 - Machos e caçonetes;
 - Brocas;
 - Alargadores e escareadores.

2.3.1.3. Metal duro

O metal duro é desenvolvido a partir de ligas fundidas de tungstênio, crômio e cobalto. As substâncias básicas na formação de carbonetos são os carbonetos de tungstênio, titânio e

tântalo. A mistura de pós de carboneto de tungstênio (WC) ou carboneto de titânio (TiC) e cobalto é primeiro pressionada num molde e, em seguida, sinterizada a 1300-1600°C.

O metal duro é identificado por letras, cores e números. As letras P, M e K especificam os maiores grupos de materiais de maquinagem. Elas indicam que material ou tipo de material é cortado. Às letras são também atribuídas cores específicas de identificação:

- P – azul para materiais de apara longa;
- M – amarelo para materiais polivalentes;
- K – vermelho para materiais de apara curta.

Tabela 19 – Faixas de aplicação dos metais duros (Davis, 1995)

Faixa de aplicação (Materiais)	Letra	Propriedades
Materiais de apara longa como aços, aços fundidos maleáveis, etc.	P	↑ Resistência ao desgaste Tenacidade ↓
Materiais polivalentes e de apara curta, aços, ferro fundido de liga, ferros austeníticos, etc.	M	
Materiais de apara curta, ferro fundido cinzento, metais não ferrosos, plásticos, etc.	K	

São utilizados números, depois das letras (por exemplo P01, M20, K30...), que indicam as características de desgaste e de tenacidade correspondente a cada metal duro. Estes valores restringem a aplicação de cada tipo deste material. Quanto maior for o número, maior será a tenacidade e menor será a resistência à corrosão, e vice-versa. Os parâmetros são 01, 10, 30, 40, 50. Por conseguinte, o P10 é altamente resistente ao desgaste, mas muito quebradiço, portanto, não deve ser usado para facejar, em que a aresta de corte é submetida a tensões repentinas no início de cada corte. Nestas circunstâncias, a vida da ferramenta seria encurtada, não por desgaste, mas por quebra da aresta de corte. Contudo, este metal duro seria adequado para maquinar aços de alta resistência a velocidades de corte elevadas.

Tabela 20 – Parâmetros dos metais duros (Davis, 1995)

Tipo de aço	Metais duros
Composição [%]	WC 30-92 / TiC+Tac 1-60 / Co 5-17
Resistência térmica [°C]	1000
Dureza operacional [HV30]	1300-1800
Vel. Corte admissível [m/min]	80-300 em média

As aplicações deste material são:

- Ferramentas para quase todas as operações de maquinagem (sob a forma de insertos);
- Ferramentas de desbaste e acabamento;
- Brocas helicoidais;
- Brocas para furação profunda;
- Fresas de topo;
- Mandris;
- Alargadores;
- Outros.

Alguns benefícios e informação geral (Silva, 2008):

- Desenvolvimento em Leipzig, em 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).

2.3.1.4. Cerâmicos

O principal componente dos materiais cerâmicos é o óxido de alumínio (Al_2O_3). Pode-se distinguir entre dois grupos de óxidos sinterizados: o óxido de alumínio puro, com baixo teor de elementos de liga de outros óxidos de metais, e os óxidos sinterizados, que contêm não só óxido de alumínio, mas também grandes quantidades de carbonetos metálicos (40-60%).

As ferramentas cerâmicas são muito duras e resistentes ao desgaste. Contudo, são muito frágeis e susceptíveis à fractura.

Devido à sua resistência ao desgaste, as ferramentas cerâmicas podem aguentar velocidades de corte muito altas. Conseqüentemente, este material é usado no processamento de peças que necessitem de elevado acabamento superficial. Contudo, a sua tenacidade limita a gama de aplicações. Portanto, as ferramentas cerâmicas são mais utilizadas em torneamento, maquinagem de materiais de apara curta, como ferro fundido cinzento, e no corte de aços mais resistentes ($\sigma > 600 \text{ N/mm}^2$).

Tabela 21 – Parâmetros dos materiais cerâmicos (Davis, 1995)

Tipo de material	Cerâmico		
	Al ₂ O ₃	Mo ₂ C	WC
Composição [%]	97	-	-
	40	-	60
	60	40	-
Resistência térmica [°C]	1800 (mas muito sensível a tensões térmicas)		
Dureza operacional (dureza Vickers kN/mm ²)	12-20(30)		
Vel. Corte admissível para aço e ferro fundido cinzento [m/min]	100-300 Desbaste 200-1000 Acabamento		

2.3.1.5. Ferramentas diamantadas

O material mais duro conhecido de todos, o diamante, consiste em carbono puro. Devido à sua dureza, este material é muito frágil e, portanto, muito sensível ao impacto e calor. As ferramentas diamantadas são predominantemente usadas para acabamento e super acabamento, garantindo superfícies maquinadas que podem alcançar uma rugosidade de até 0.1 μm . Também proporcionam velocidade de corte de até 3000 m/min, sendo a gama normal de operação na ordem dos 100 e 500 m/min.

Os diamantes são usados essencialmente nos seguintes materiais isentos de carbono:

Tabela 22 – Materiais processados com ferramentas diamantadas (Davis, 1995)

Metais leves	Alumínio e suas ligas
Metais pesados	Cobre e suas ligas, cobre catódico, latão, bronze, etc.
Metais preciosos	Platina, ouro, prata
Plásticos	
PRFV	Plásticos reforçados com fibra de vidro, papel plastificado, baquelites, etc.
Termoplásticos	Plexiglass, fibra vulcanizada, teflon, etc.
Materiais naturais	Borracha dura e macia

As ferramentas diamantadas têm arestas de corte com uma geometria específica. Normalmente, os diamantes encontram-se incrustados em suportes específicos, mas hoje em dia também são utilizadas ferramentas com corpos de corte policristalino (PCD). O PCD (*Polycrystalline Diamond*) é obtido com recurso a técnicas de deposição/síntese no vácuo (CVD – *Chemical Vapour Deposition*). Com esta configuração, um elevado número de diamantes muito pequenos são cristalizados sob alta pressão e a altas temperaturas na zona da aresta de corte de uma ferramenta de metal duro. As pontas de corte fabricadas desta maneira são normalmente brasadas ao suporte.

2.3.2. Graus de metal duro

Antes de seleccionar uma ferramenta para maquinar determinado material, é necessário perceber a que grupo de materiais pertence, visto que, está-lhes associado um grau de metal duro mais aconselhado.

Na tabela da Figura 59 é possível visualizar os diferentes grupos de materiais.

Letras de código	Grupo de maquinagem	Grupos dos materiais a serem maquinados	
P	P1–P15	Aço	Todos os tipos de aço e de aço fundido, excepto aço com estrutura austenítica
M	M1–M3	Aço inoxidável	Aço inoxidável austenítico e aço / aço fundido austeníticos-ferríticos
K	K1–K7	Ferro fundido	Ferro fundido cinzento, ferro fundido com grafita esférica, fundido maleável, ferro fundido com grafita vermicular
N	N1–N10	Metais não-ferrosos	Alumínio e outros metais não-ferrosos, materiais não-ferrosos
S	S1–S10	Ligas termorresistentes e ligas de titânio	Ligas especiais resistentes a altas temperaturas com base em aço, níquel e cobalto, titânio e ligas de titânio
H	H1–H4	Materiais duros	Aço temperado, ferros fundidos temperados, ferro fundido coquilhado, temperado
O	O1–O6	Outros	Plásticos, plásticos reforçados com fibras de vidro e carbono, grafite

Figura 59 – Diferentes grupos de materiais (WALTER - Catálogo Geral, 2012)

Para os aços, a variedade de graus é a que se pode visualizar na Figura 60.

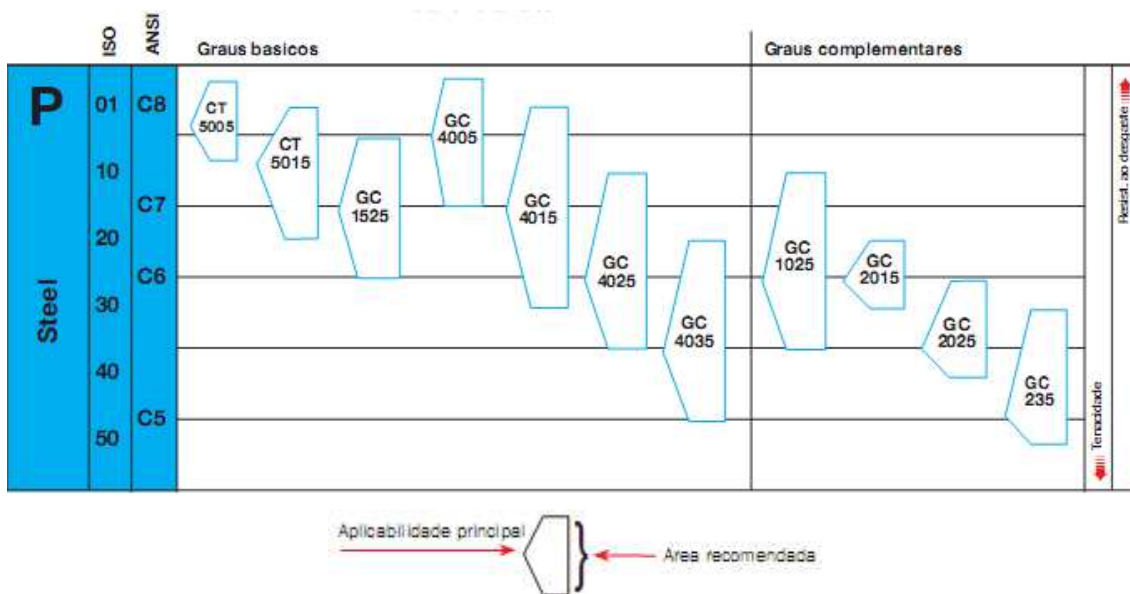


Figura 60 – Tipos de graus existentes para aços (Sandvik - Manual Técnico, 2010)

Para os aços inoxidáveis, a variedade de graus é a que se pode visualizar na Figura 60.

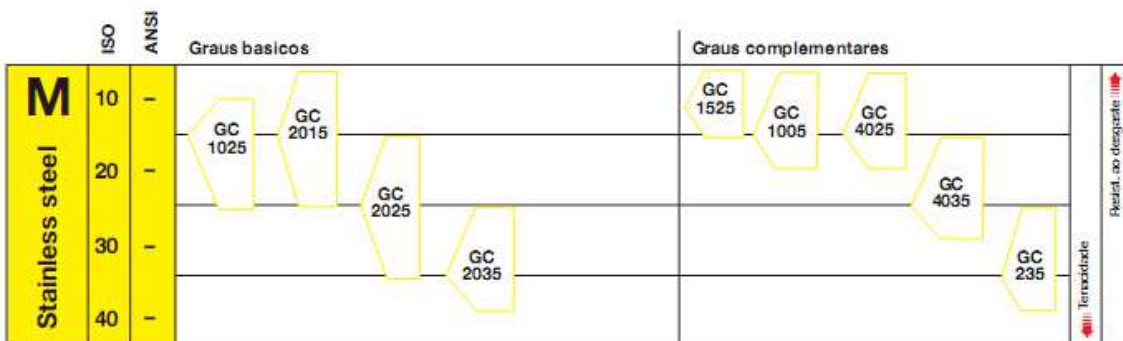

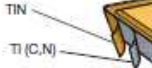
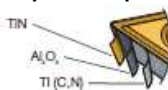
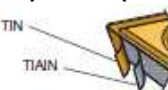
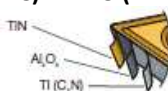



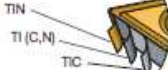


Figura 61 – Tipos de graus existentes para aços inoxidáveis (Sandvik - Manual Técnico, 2010)

Tabela 23 – Especificações dos graus adequados a aços inoxidáveis (Sandvik - Manual Técnico, 2010)

M Aço inoxidável Austenítico/Ferrítico/Martensítico, Aço manganês, Ligas de ferro fundido, Ferro maleável, Aço de corte livre	
Graus básicos	Graus complementares
<p style="text-align: center;">GC1025 (HC) – M15 (M10 – M25)</p>  <p>Metal duro de micro-grão revestido por PVD. Recomendado para acabamento de aço inoxidável com tolerâncias apertadas, excelente acabamento superficial ou acção corte vivo. Boa resistência a choques térmicos faz deste grau também aplicável a cortes interrompidos.</p>	<p style="text-align: center;">GC1525 (HC) – M10 (M05 – M15)</p>  <p>Cerâmica revestida por PVD com muito boa resistência ao desgaste e boa tenacidade. Ótima para acabamentos de aço inoxidável em condições favoráveis. Deve maquinar a alta velocidade e avanços relativamente pequenos. $F_n \times a_p < 0.35 \text{ mm}^2$</p>
<p style="text-align: center;">GC2015 (HC) – M15 (M05 – M25)</p>  <p>Grau de metal duro revestido por CVD utilizado para acabamento e desbaste ligeiro de aços inoxidáveis. Um substrato que aguenta altas temperaturas, aliado a uma resistência ao desgaste faz deste grau a escolha ideal para corte contínuo de moderada a alta velocidade de corte.</p>	<p style="text-align: center;">GC1005 (HC) – M15 (M05 – M20)</p>  <p>Metal duro revestido por PVD. A combinação de um substrato duro de grão fino com uma boa resistência à deformação plástica e um revestimento com boa resistência ao desgaste a altas temperaturas, faz deste grau adequado a acabamento de aços inoxidáveis a altas temperaturas.</p>
<p style="text-align: center;">GC2025 (HC) – M25 (M15 – M35)</p>  <p>Metal duro otimizado revestido por CVD utilizado em semi-acabamento e desbaste de aços inoxidáveis a velocidades de corte moderadas. Boa resistência ao choque térmico e impacto oferece uma segurança excelente no corte interrompido.</p>	<p style="text-align: center;">GC4025 (HC) - M15 (M05 - M20)</p>  <p>Grau de metal duro revestido por CVD para acabamento e desbaste ligeiro de aços inoxidáveis. a combinação do revestimento resistente ao desgaste e um substrato duro faz deste grau adequado na maquinagem de aços inoxidáveis de fundição.</p>
<p style="text-align: center;">GC2035 (HC) - M35 (M25 - M40)</p>  <p>Metal duro revestido por PVD recomendado para semi-acabamento e desbaste de aço inoxidável e aço inoxidável duplex a baixa velocidade. Boa resistência ao choque térmico faz deste grau ideal para aplicações com corte interrompido rápido.</p>	<p style="text-align: center;">GC4035 (HC) - M25 (M15 - M30)</p>  <p>Grau de metal duro revestido por CVD, que pode ser usado em semi-acabamento e desbaste de aços inoxidáveis a velocidades poderadas. Boa resistência ao choque térmico e impacto oferece bastante segurança no corte interrompido.</p>
	<p style="text-align: center;">GC235 (HC) - M40 (M25 - M40)</p>  <p>Grau de metal duro revestido por CVD utilizado em desbaste de aços inoxidáveis e aços inoxidáveis de fundição com capa superficial difícil. A dureza do substrato oferece segurança elevada que permite a este grau aguentar corte interrompido pesado de baixas a moderadas velocidades de corte.</p>

2.3.3. Revestimentos para ferramentas

Uma maneira encontrada para diminuir o desgaste das ferramentas é aumentar a dureza superficial da ferramenta depositando sobre ela um revestimento duro e fino. Esses filmes são formados, geralmente, por materiais cerâmicos de dureza bastante elevada e baixa afinidade em relação às peças de trabalho.

Os revestimentos são benéficos, não apenas para diminuir o desgaste das ferramentas, mas também para melhorar a qualidade superficial do produto, para aumentar a produtividade e para diminuir ou evitar o uso de lubrificantes.

A deposição química por vapor (CVD – Chemical Vapor Deposition) é uma técnica de revestimento que revolucionou as ferramentas de corte, quando foi introduzido nos finais da década de 60. Nos inícios da década de 80, esta técnica evoluiu para revestimentos de composição multicamada, como o TiC, TiCN e Al_2O_3 . O revestimento Al_2O_3 tem sido o mais importante para operações de corte de alta velocidade, alta temperatura e continua insuperável. A técnica de deposição física por vapor (PVD – Physical Vapor Deposition) foi desenvolvida depois, na década de 80, apresentando vantagens distintas e pôde substituir os revestimentos CVD da mesma composição, à exceção do Al_2O_3 .

O processo PVD faz-se a temperaturas mais baixas (de 170 a 480°C), comparado com os 980 a 1100°C, normalmente usados no processo CVD. Isto significa que o PVD pode ser aplicado a uma maior variedade de materiais de substrato do que o CVD, que pode danificar materiais de ferramentas sensíveis ao calor.

Desde que a tecnologia PVD foi introduzida nos inícios da década de 80, a tecnologia de revestimento tem tentado acompanhar a evolução natural das máquinas CNC e respectivos processos e parâmetros. Por exemplo, como os fabricantes de máquinas desenvolveram mais depressa equipamentos mais robustos, os fabricantes de ferramentas tiveram que responder com ferramentas revestidas que pudessem aguentar velocidades e temperaturas mais altas.

A tecnologia de revestimento actual permite que as máquinas mais recentes do mercado consigam maquinar mais rapidamente e, em muitos casos, trabalhar a seco. Uma vez que os novos revestimentos possuem dureza três ou quatro vezes mais elevada do que o material do substrato da ferramenta, proporcionam uma resistência ao desgaste excepcional. Com um coeficiente de atrito que oferece lubricidade natural e calor reduzido, e uma barreira não reactiva, estes revestimentos abrem um leque excepcional de oportunidades de maquinagem a seco ou quase seco (Teeter, 2006).

2.3.3.1. *Revestimentos disponibilizados comercialmente*

Os tipos de revestimento mais comuns para ferramentas são os seguintes (Daggett, 2005) (HARVEY-TOOL):

- **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 de aço rápido (HSS – High Speed Steel), apresentando boa capacidade de corte;
- **Nitreto de carboneto de titânio (TiCN)** – a adição de carbono adiciona mais dureza e melhor lubrificidade superficial. Este revestimento multicamada é ideal para ferramentas em HSS;
- **Nitreto de titânio-alumínio (TiAlN ou AlTiN)** – a camada formada de óxido de alumínio garante maior resistência em aplicações de alta temperatura. Este revestimento é escolhido principalmente para ferramentas de metal duro (HM – Hard Metal), onde pouco ou nenhum lubrificante é usado. O AlTiN oferece uma dureza de superfície mais elevada do que o TiAlN, juntamente com percentagens diferentes de alumínio e titânio. É uma outra opção viável na indústria de maquinagem rápida (HSM – High Speed Machining). Os materiais que pode trabalhar são: ligas de aço, aços inox, aços ferramenta, titânio, níquel, entre outros;
- **Nitreto de Crómio (CrN)** – As propriedades anti-gripagem deste revestimento faz dele a escolha ideal em situações onde é comum a formação de arestas postiças (BUE – Built up edge). Ferramentas de aço rápido ou metal duro apresentam-se, muitas vezes, com este revestimento quase invisível;
- **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 silício e muitos outros materiais abrasivos. Revestimentos de diamante não devem ser usados na maquinagem de aços, pois é gerado mais calor e provoca reacções químicas que decompõem as ligações que promovem a adesão deste revestimento à ferramenta.

2.3.3.2. Investigação ligada a revestimentos para ferramentas

Existem cinco razões principais para o uso de ferramentas revestidas:

- Aumentar a resistência ao desgaste;
- Aumentar a resistência à oxidação;
- Reduzir o atrito;
- Aumentar a resistência à fadiga;
- Aumentar a resistência ao choque térmico.

Quando as ferramentas estão devidamente revestidas e trabalham como o previsto, o resultado para o cliente final são parâmetros de corte otimizados, maior longevidade da ferramenta e possibilidade de maquinagem a seco (sem lubrificação) (Drape, 2011).

2.3.3.2.1. Métodos de revestimento das ferramentas de corte

São utilizados dois métodos principais de revestimento de ferramentas: Deposição química de vapor (CVD – Chemical Vapor Deposition) e Deposição física de vapor (PVD – Physical Vapor Deposition). Cada método tem as suas próprias vantagens e desvantagens.

A deposição química de vapor (CVD) foi o principal método de revestimento usado durante muitos anos. Este processo envolve aquecer o substrato com um reactor químico e expô-lo a um fluxo de gás. Estes gases decompõem-se na superfície do substrato, formando uma camada de revestimento. Em geral, a deposição química de vapor requer temperaturas na ordem dos 1000°C.

Um revestimento comum usa três gases: $TiCl_4$ (tetracloro de titânio), H_2 (hidrogénio) e N_2 (azoto) para produzir TiN (nitreto de titânio) + HCl (cloreto de hidrogénio). O HCl é um subproduto do processo que tem de ser eliminado, segundo apertadas regulações ambientais.

As vantagens do método CVD incluem óptima adesão das camadas, bem como, distribuição consistente e uniforme. As desvantagens são as altas temperaturas necessárias que afectam o substrato, poucos materiais de revestimento aplicáveis, visto que, que este é aplicado sobre a forma de gás, e longos tempos de ciclo. Provoca tensões mais elevadas no revestimento.

A deposição física de vapor (PVD) é uma técnica mais recente de revestimento que está a tornar-se muito popular na indústria. Este método envolve a deposição de filmes finos em vácuo pela condensação de uma forma vaporizada do material sobre o substrato, usando uma fonte de energia térmica ou eléctrica, o que permite que o material vaporizado adira ao substrato. Uma polarização do substrato e dos alvos, permite uma melhor adesão dos revestimentos.

As vantagens deste processo são a variedade de materiais de revestimento disponíveis, temperatura de operação relativamente baixas, à volta dos 450°C, o que permite o revestimento de arestas de corte afiadas. As desvantagens são que o revestimento interno de superfícies é difícil (o revestimento requer uma linha de visão do material vaporizado para o substrato) e os requisitos da superfície do substrato são maiores (Drape, 2011).

2.3.4. Desgaste das ferramentas

A vida de uma ferramenta de corte pode ser entendida como sendo o tempo que esta trabalha eficazmente até que se atinja um critério previamente estabelecido. O desgaste dessa mesma ferramenta é considerado como uma perda contínua e microscópica de partículas da ferramenta devido à acção do corte. Este fenómeno é considerado um problema crítico nos processos de maquinagem, pois prejudica a produção e diminui a qualidade do produto final ao longo do tempo.

2.3.4.1. Critérios de fim de vida de uma ferramenta

A vida útil de uma ferramenta é definida como sendo o tempo em que esta trabalha efectivamente, sem perder o corte ou até que se atinja o critério de fim de vida (ISO, ISO 8688-1, 1989).

O percurso de corte estabelecido através da vida da ferramenta (t), em minutos, pode ser expresso pela equação (ISO, ISO 8688-1, 1989):

$$L_c = V_c \cdot \frac{t}{1000}$$

Onde:

L_c – Percurso de corte (m)

V_c – Velocidade de corte (m/min)

O percurso de avanço para uma vida da ferramenta pode ser expresso por (ISO, ISO 8688-1, 1989):

$$L_f = f \cdot n \cdot t$$

Onde:

n – rotação da ferramenta (fresagem) [rpm]

t – tempo [s]

f – avanço por rotação [mm/rot]

O desgaste pode ser avaliado através de métodos directos, nos quais se mede a geometria da ferramenta através de inspecção visual, a olho nu ou utilizando lupas, e inspecção óptica, utilizando microscópios. Nos métodos indirectos, utiliza-se a aquisição de valores medidos como o aumento de vibrações, aumento do ruído, diminuição da qualidade superficial da peça e aumento da força de maquinagem necessária. Por maior que seja a dureza e a resistência ao desgaste das ferramentas de corte e por menor que seja a resistência mecânica da peça de trabalho, a ferramenta sofrerá um processo de destruição que, mais cedo ou mais tarde, exigirá a sua substituição. A Figura 62 Figura 63 mostra alguns tipos de desgaste e respectivas variáveis de medição no desgaste em ferramentas de maquinagem.

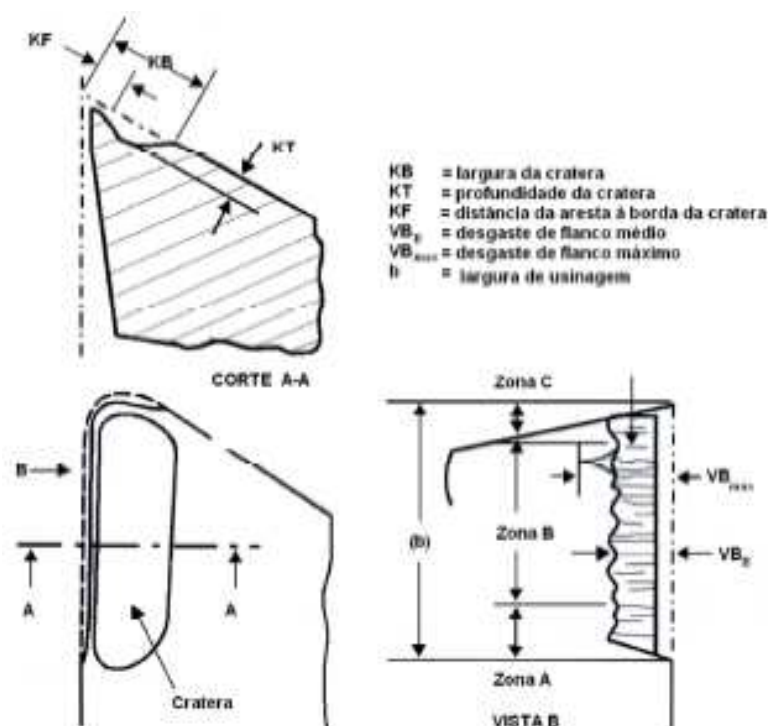


Figura 62 – Tipos de desgaste em ferramentas e variáveis de medição (ISO, ISO 3585, 1993)

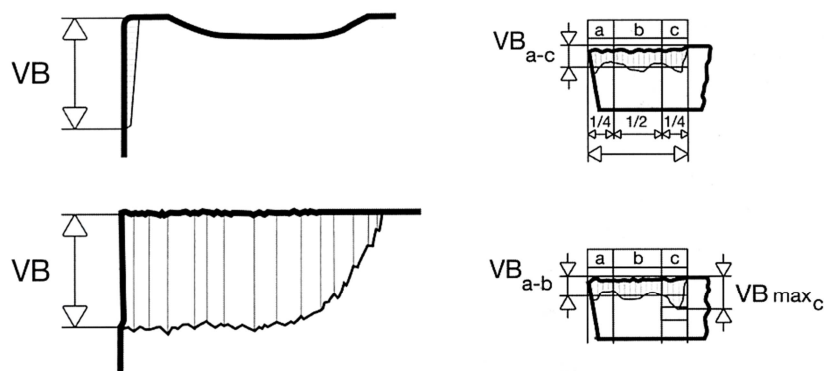


Figura 63 – Medição do desgaste dos flancos – VB (Silva, 2008)

Segundo a norma ISO 3585, desgastes nas ferramentas de corte de aço rápido, metal duro e cerâmica são quantificados utilizando-se os parâmetros:

$$KT = 0.06 + 0.3f$$

Onde:

f – é o avanço por rotação [mm/rot]

Como critério de vida da ferramenta carbonetos sinterizados temos: $VB_b = 0.3$ mm e $VB_{máx} = 0.6$ mm

2.3.4.2. Vida útil das ferramentas

A vida de uma ferramenta pode ser definida como sendo o tempo que a mesma trabalha efectivamente sem perder o corte ou até que atinja o critério de fim de vida.

São vários os critérios de fim de vida, de entre eles podem ser citados (Silva, 2008):

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

O desgaste VB tem tendência a aumentar consoante a velocidade de corte em função do tempo. Na Figura 64 pode ser visualizada esta relação (Silva, 2008).

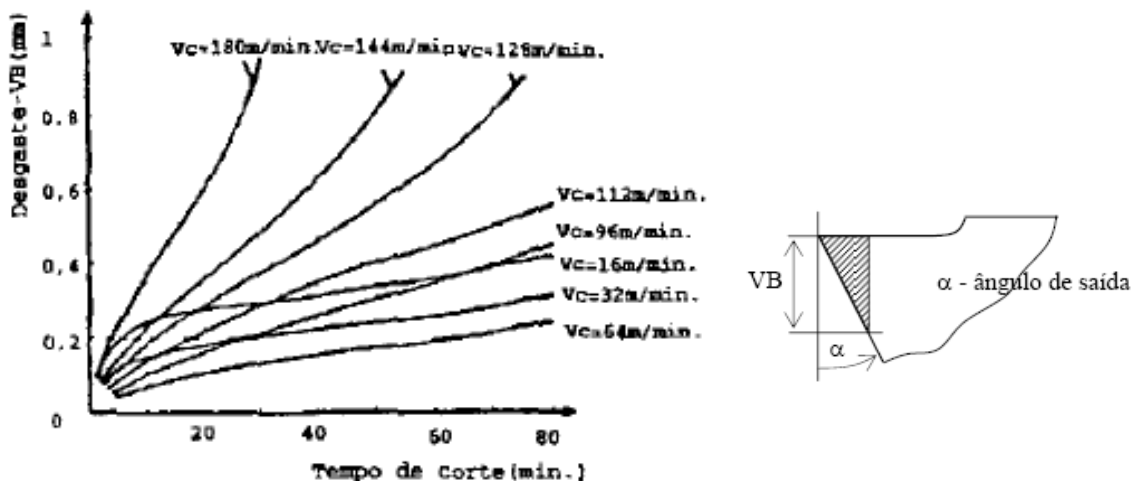


Figura 64 – Desgaste VB em função da velocidade de corte (Silva, 2008)

Por exemplo, para um VB de 0.2 mm, pode-se prever a vida útil de uma ferramenta como se vê no gráfico da Figura 65.

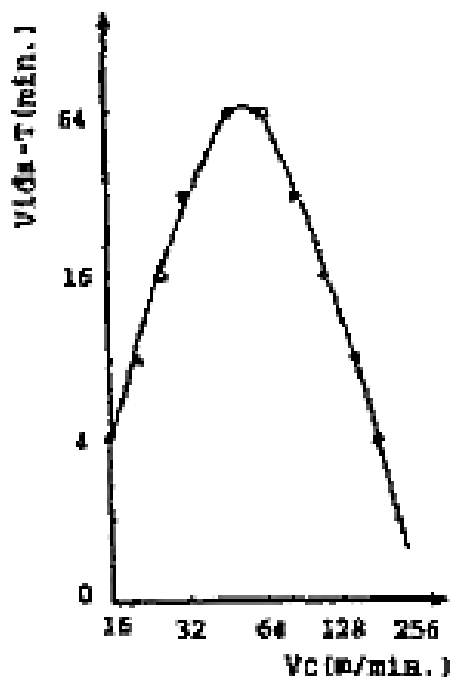


Figura 65 – Representação da curva de vida $T = f(V_c)$, para o desgaste $VB = 0.2 \text{ mm}$, obtida do gráfico anterior (Silva, 2008)

O percurso de corte esperado para um VB de 0.2 mm pode ser visualizado no gráfico da Figura 66.

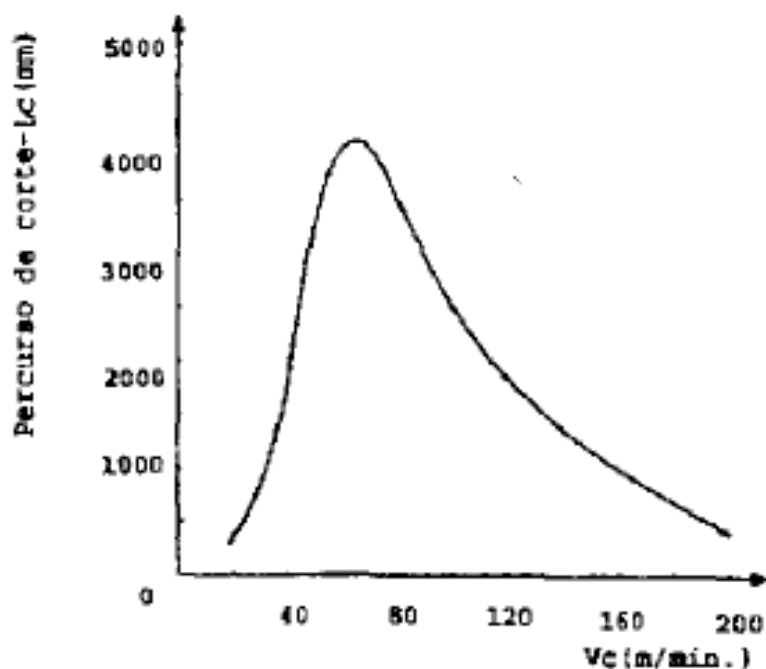


Figura 66 – Percurso de corte da ferramenta em função da velocidade de corte para um desgaste $VB = 0.2$ mm obtida do primeiro gráfico (Silva, 2008)

O comprimento de corte, em metros, pode ser encontrado através da expressão (Silva, 2008):

$$L_c = V_c \cdot t_c$$

Onde:

L_c – Comprimento de Corte [m];

V_c – Velocidade de Corte [m/min];

t_c – Tempo de Corte [min].

O débito de uma ferramenta, em m^3 , calcula-se da seguinte forma (Silva, 2008):

$$D = L_c \cdot S$$

Onde:

S – Secção da Apara (m^2)

D – Débito de uma ferramenta (m^3)

Finalmente pode-se calcular a taxa de produção, em m^3/min , com a expressão (Silva, 2008):

$$T_p = V_c \cdot S$$

É possível estabelecer uma relação entre a velocidade de corte e tempo de vida. Esta equação pode ser expressa pela *Lei de Taylor*, a qual foi obtida experimentalmente através de testes de vida da ferramenta, sendo dada pela seguinte equação (Silva, 2008):

$$T = K \cdot V_c^{-x}$$

Onde:

x é o coeficiente de desgaste da ferramenta;

K é a vida de ferramenta para a velocidade de corte de 1m/min (tabelados para cada material).

A recta associada à curva de vida da ferramenta é a seguinte:

$$\text{Log } T = \text{Log } K - x \text{Log } V_c$$

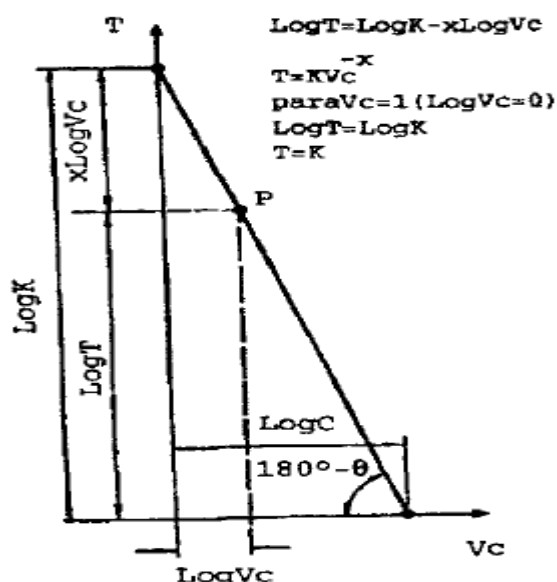


Figura 67 – Recta associada à curva de vida da ferramenta (Silva, 2008)

Considerando o efeito da penetração e do avanço, temos (Silva, 2008):

$$T = K_3 \cdot p^{-r} \cdot a^{-s} \cdot V_c^{-x}$$

Onde:

T – tempo [min]

p – penetração [mm]

a – avanço por rotação [mm/rot]

V_c – velocidade de corte [m/min]

K_3 – constante

r, s, x – coeficientes

2.3.4.3. Tipos de desgaste encontrados nas ferramentas

A Figura 68 demonstra as principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte.

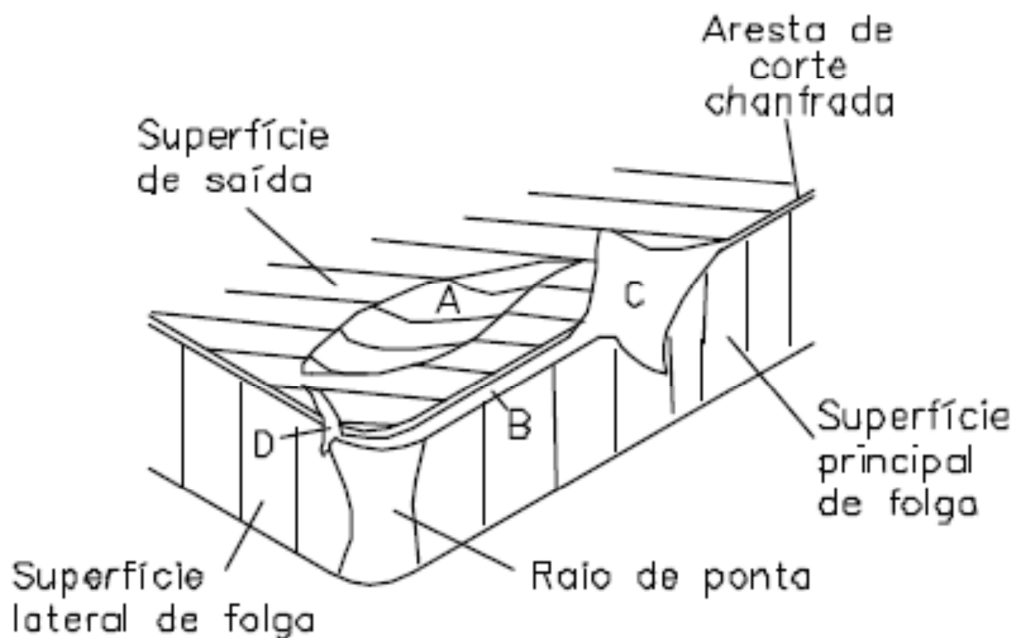


Figura 68 – Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte (ISO, ISO 3585, 1993)

Em cada área de desgaste de uma ferramenta surge um tipo de desgaste específico. Na zona de saída, por exemplo, verifica-se desgaste por cratera, que está associado a elevadas temperaturas geradas na interface avara/ferramenta, ocorrendo devido à combinação de mecanismos de desgaste denominados difusão e adesão. A profundidade e a largura da cratera formada estão relacionadas com a velocidade e o avanço utilizados no processo de corte (Ferraresi, 1977). Ocorrendo o crescimento do desgaste de cratera, gera-se a quebra da ferramenta quando este tipo de desgaste conflui com o desgaste frontal. A figura representa o desgaste de cratera de uma ferramenta localizada na superfície de uma ferramenta.

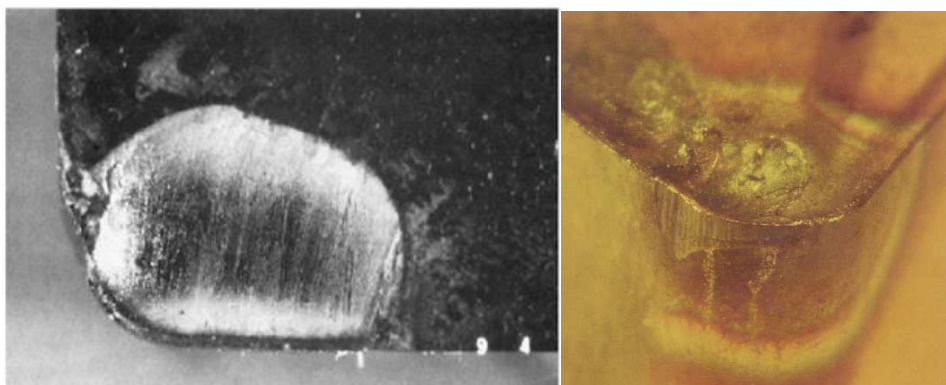


Figura 69 – Desgaste de cratera na superfície de uma ferramenta (Kim, 2004)

O desgaste por cratera acontece essencialmente na face de ataque da ferramenta. Deve-se a fenómenos de desgaste por abrasão e por difusão. A cratera gera-se devido a desprendimento de material da ferramenta. Esta situação pode ser minimizada através da selecção de uma dureza máxima a frio e a quente para a ferramenta, assim como, uma afinidade mínima com o material a cortar. Este fenómeno pode resultar numa grande alteração na geometria da ferramenta, alterando assim o sistema das forças de corte. Para tentar evitar que este problema ocorra as soluções passam por redução da velocidade de corte, redução do avanço, selecção de uma ferramenta mais robusta e utilização de fluido de corte na maquinagem (Silva, 2008).

É designado como desgaste de entalhe a anomalia formada na aresta principal de corte nas extremidades do flanco da ferramenta, tendo como prováveis características: concentrações de microfissuras, tensões na ferramenta e uma camada abrasiva de óxido na superfície a ser maquinada (Shaw, 1984).

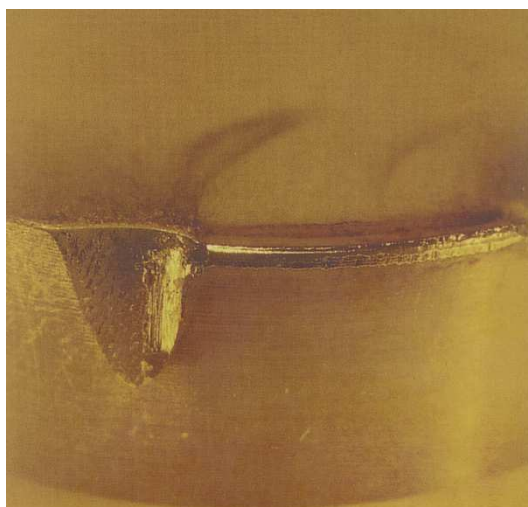


Figura 70 – Desgaste de entalhe na superfície de saída (Kim, 2004)

Este tipo de defeito pode ser devido a choque cíclicos, provocados pela utilização de forças de corte excessivas. É provocada pela constante variação de carga sobre a ferramenta, não sendo esta, no entanto, suficiente para promover a sua fractura directa. O início do corte e as variações de magnitude da força de corte sobre a ferramenta poderão ser demasiadas para a resistência e tenacidade da ferramenta. As fissuras produzem-se principalmente numa direcção paralela à aresta de corte. As correcções passam sempre pela redução de parâmetros como o avanço e velocidade de corte (Silva, 2008).

Outro tipo de desgaste encontrado poderá estar localizado na superfície de folga da ferramenta, pois apresenta perda neste ângulo de folga durante a maquinagem, designado desgaste de flanco. Este desgaste é considerado o mais comum na fresagem, sendo apontado como a razão de falha crítica da ferramenta (Diniz & Micaroni, 2007).

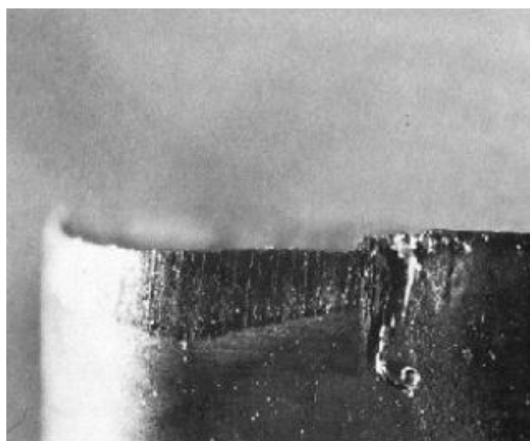


Figura 71 - Desgaste de flanco na superfície de saída de uma ferramenta (Kim, 2004)

É incentivado pelo aumento da velocidade de corte. É o tipo de desgaste mais comum nas ferramentas de corte. Incide essencialmente sobre os flancos da pastilha ou ferramenta sólida, promovendo ainda um ligeiro arredondamento do raio da aresta de corte. Deve-se principalmente a fenómenos de desgaste por abrasão, portanto, resulta da fricção existente entre a ferramenta e o metal da peça, antes e depois da formação da aparta. Como consequência, verifica-se um decréscimo da qualidade da superfície obtida por maquinagem, bem como, imprecisão dimensional e aumento da força necessária de corte. Soluções possíveis para esta situação recaem na redução da velocidade de corte e troca da ferramenta por uma mais robusta (Silva, 2008).

Outra anomalia passível de ocorrer é a deformação plástica da ferramenta.

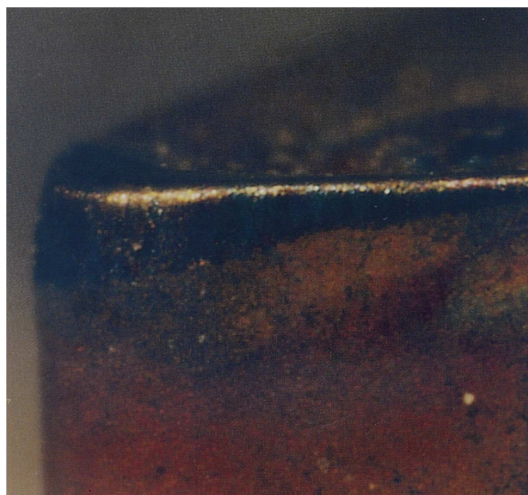


Figura 72 - Desgaste por deformação plástica (Silva, 2008)

Este fenómeno resulta da combinação de altas velocidades de corte com elevadas pressões exercidas sobre a aresta de corte da ferramenta. Velocidades de corte elevadas, avanços exagerados e materiais da peça muito duros, geram essencialmente calor e compressões elevadas. Portanto, torna-se essencial uma elevada dureza a quente da ferramenta. O arredondamento da aresta de corte irá, por sua vez, gerar elevadas temperaturas, deficiências geométricas e desvio do fluxo da apana, até a um estado crítico.

A geometria da ferramenta e um possível reforço da aresta de corte são características importantes para minimizar este tipo de desgaste. Para além disto, as soluções são as tomadas nas situações anteriores. Deve-se experimentar reduzir a velocidade de corte, reduzir o avanço, tentar seleccionar uma ferramenta mais robusta e utilizar fluido de corte.

As fissuras térmicas podem também ocorrer na ferramenta.

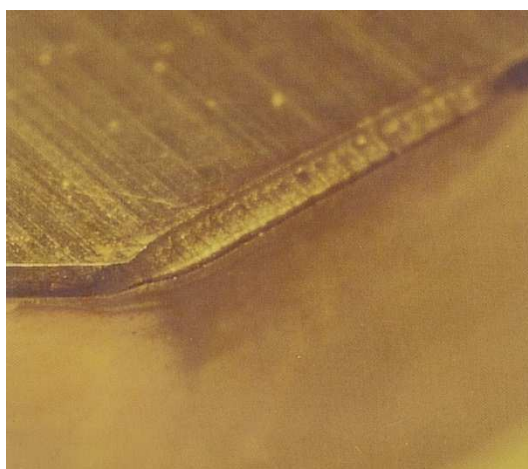


Figura 73 – Desgaste por fissura térmica na ferramenta (Silva, 2008)

Devem-se essencialmente a desgaste por fadiga, como consequência dos ciclos térmicos. Acontece principalmente em fresagem interrompida. A disposição das fissuras é normalmente perpendicular às arestas de corte. O desprendimento de partículas por fadiga térmica da ferramenta, poderá promover a destruição da aresta de corte, principalmente das suas extremidades. A variação da espessura da apra afecta também a aresta de corte. A utilização de fluido de corte poderá aumentar os problemas de fadiga térmica. Para minimizar a ocorrência deste problema, para não variar, deve-se reduzir a velocidade de corte e avanço, e aumentar o caudal de fluido de corte (Silva, 2008).

Outro desgaste comum é a rotura da aresta de corte. Isto acontece essencialmente quando a aresta de corte quebra, em detrimento de se desgastar. Na sua base estão também fenómenos de fadiga, originando o desprendimento de partículas de tamanho apreciável do gume cortante. Uma das principais causas deste fenómeno poderá ser a utilização da ferramenta em corte interrompido. Uma cuidadosa inspecção da ferramenta poderá auxiliar na detecção atempada deste fenómeno. Este fenómeno tem como variantes a microfissura e a fractura localizada.

Dos desgastes mais graves temos a fractura da ferramenta. Trata-se da quebra repentina do gume cortante. Poderá dever-se a uma deterioração excessiva da aresta de corte, a qual deverá ser evitada sempre que possível. É a ultima fase de alguns dos mecanismos de desgaste/falha anteriormente focados. Resulta numa mudança da geometria de corte, debilidade da aresta cortante, incremento da temperatura na zona do corte e aumento excessivo das forças de corte, os quais geram uma exigência acrescida sobre a aresta de corte. Para minimizar este problema há que tomar medidas para reduzir o mais possível as vibrações.



Figura 74 – Fractura da ferramenta (Silva, 2008)

É frequente que, na maquinagem de alguns materiais, mais pastosos, como por exemplo aços inoxidáveis, haja adesão de material na superfície de corte da ferramenta. Este fenómeno cria uma formação de material da peça de trabalho que se sobrepõe à aresta de corte da ferramenta, designado por aresta postiça. Está normalmente relacionada com a temperatura e a velocidade de corte, e com a falta de dureza do gume cortante, ou de outro tipo de desgaste. A elevada afinidade entre o material da ferramenta e da peça a maquinar, poderá originar este tipo de defeito, bem como, a existência de pressões elevadas e temperaturas baixas, através de adesão da apra à face de ataque da ferramenta. Este problema afecta a qualidade superficial das peças maquinadas. Neste caso, o que se deve fazer é aumentar o avanço e velocidade de corte, utilizar um fluido de corte mais eficiente e verificar a adequabilidade do quebra-aparas utilizado (no caso das pastilhas) (Silva, 2008).

Na imagem seguinte pode-se visualizar alguns desgastes que podem ocorrer no torneamento.

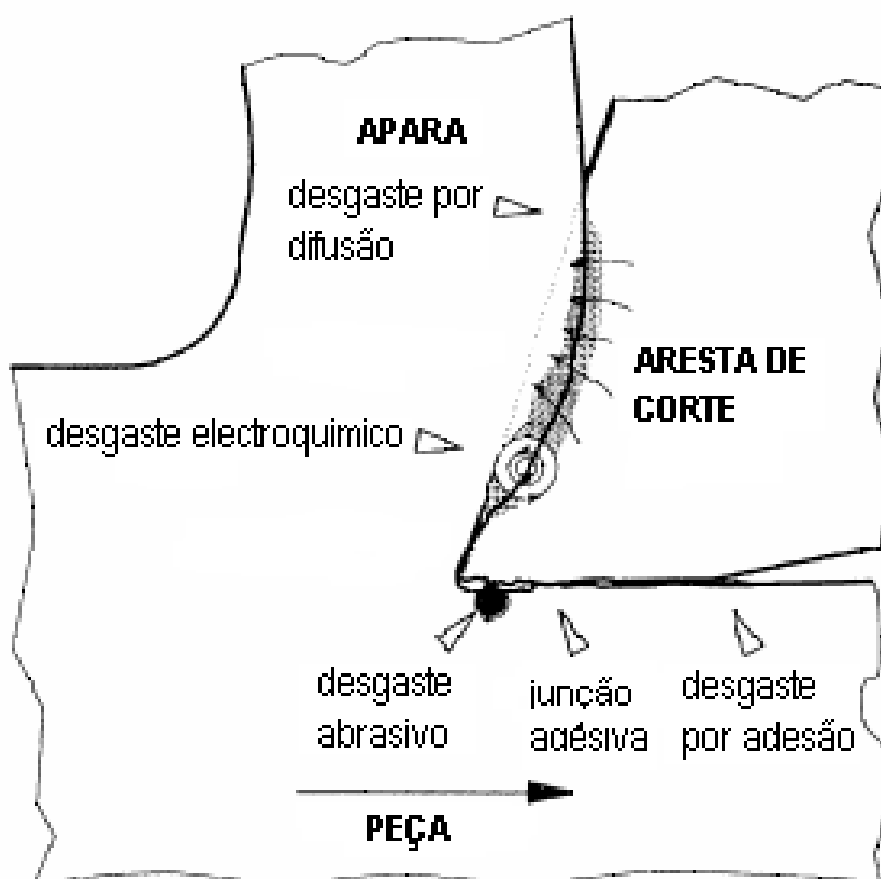


Figura 75 – Modos de desgaste no torneamento (Silva, 2008)

2.3.4.3.1. Estrutura das camadas de revestimento

Ao longo dos anos de desenvolvimento dos revestimentos, as estruturas das camadas sofreram grandes mudanças e melhoramentos. Em geral, existem cinco estruturas de camadas na tecnologia dos revestimentos.

A estrutura monocamada, como o nome sugere, é composta por uma única camada de revestimento. Observando a estrutura através de um microscópio, são visíveis colunas altas de revestimento. Esta estrutura é fácil de aplicar, mas também fácil de estalar e danificar. Imaginando uma bola a bater uma série de colunas, estas irão começar a cair e as fissuras criadas facilmente penetram até chegar ao substrato.

As estruturas multicamada são compostas por diferentes monocamadas, umas em cima das outras (Figura 76). O aço Damasceno é um exemplo histórico deste tipo de estruturas, que combina as propriedades de vários materiais para criar uma superfície que é tanto dura, como forte.

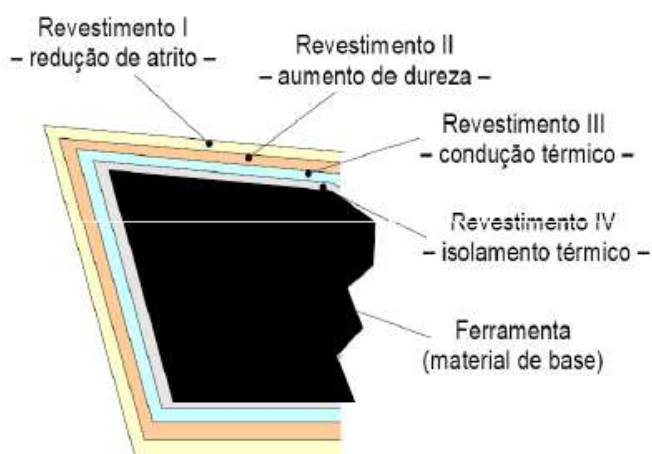


Figura 76 – Revestimento multicamada (Silva, 2008)

Os revestimentos nanocompósitos têm uma estrutura que combina a robustez da fase aglutinante (como exemplo cobalto com carboneto) com dureza do revestimento de nanocompósitos.

A estrutura de gradiente obtém as suas capacidades através de um núcleo macio e elástico, que vai endurecendo à medida que se aproxima da superfície, aumentando também a sua resistência ao desgaste (Drape, 2011).

Revestimentos para fresagem difícil, roscagem e furação, variam e são específicos para cada aplicação. Também disponíveis, como já referido em cima, estão os revestimentos multicamadas que fissuram até à camada imediatamente a seguir, em vez de evoluírem até ao substrato da ferramenta, proporcionando uma maior longevidade da mesma.

Um revestimento com a melhor relação custo-eficiência pode depender de vários factores, mas existe normalmente uma ou mais opções viáveis para cada aplicação. Fazendo a escolha certa do revestimento e seus atributos, pode significar a diferença entre uma operação bem-sucedida e outra que mostra pouca ou nenhuma melhoria. Profundidades de corte, velocidades e lubrificantes, têm todos efeito na maneira como a superfície reage (Daggett, 2005).

2.4. Aços inoxidáveis Duplex

Os aços inoxidáveis dúplex, com estrutura ferrítica-austenítica, fazem parte de uma classe de materiais com microestrutura bifásica, composta por uma matriz ferrítica e ilhas de austenite, com frações volumétricas aproximadamente iguais dessas fases. Esta classe de materiais é caracterizada por apresentar uma interessante combinação de elevadas propriedades mecânicas e de resistência à corrosão e, por isso, é considerada bastante versátil. Os aços inoxidáveis duplex são, frequentemente, utilizados nas indústrias química e petroquímica, de papel e celulose, siderúrgicas, alimentares e de geração de energia.

2.4.1. Composição química típica

Na Tabela 24, são apresentados os principais tipos de aços inoxidáveis, com destaque para os dúplex UNS S32304, S31803 e S32750 (SAF - Sandvik Austenitic Ferritic; 2304, 2205 e 2507) e suas respectivas composições químicas.

Os diferentes tipos de aços inoxidáveis duplex são, normalmente, separados em três grupos, com relação à composição química (Nilsson, 1992):

- Aços inoxidáveis duplex de baixa liga: devido ao menor teor de elementos de liga, são materiais económicos, não possuem molibdénio na composição química e podem substituir aços inoxidáveis austeníticos como TP304L/316L. Uma qualidade utilizada é o UNS S32304 (SAF 2304).
- Aços inoxidáveis duplex de média liga: nessa família, enquadram-se os duplex mais utilizados. A qualidade típica é o UNS S31803 (SAF 2205). Apresentam resistência à corrosão intermédia entre os austeníticos comuns TP304L/316L e aços inoxidáveis super austeníticos com 5 e 6% de molibdénio.
- Aços inoxidáveis duplex de alta liga: são comumente designados por super duplex. O UNS S32750 (SAF 2507) apresenta elevada resistência à corrosão comparável aos super austeníticos que possuem entre 5 e 6% de molibdénio.

Tabela 24 – Composição química dos principais aços inoxidáveis (Fontana & Greene, 1986)

AISI/UNS	%C máx	%Si	%Mn	%Cr	%Ni	%Mo	%N	%Cu	Microestrutura
304 L	0.03	0.5	1.3	18.5	10	-	-	-	Austenítica
316 L	0.03	0.4	1.7	17.5	13	2.6	-	-	Austenítica
S 32304	0.03	0.5	1	23	4.5	-	0.1	-	Duplex
S31803	0.03	1	2	22	5.5	3.2	0.18	-	Duplex
S32750	0.03	0.8	1.2	25	7	4	0.3	-	Duplex

2.4.1.1. Microestrutura dos aços inoxidáveis dúplex

A microestrutura duplex pode ser obtida através do equilíbrio dos elementos de liga e de tratamento termomecânico. O equilíbrio dos elementos de liga, nos aços inoxidáveis duplex, tem por objectivo controlar os teores de elementos estabilizadores de austenite, ou gamagénicos, tais como níquel, carbono, azoto e de elementos estabilizadores da ferrite, ou alfa-génicos, crómio, molibdénio e silício. Esses elementos constituem a composição química dos duplex. O tratamento termomecânico é, geralmente, realizado a temperaturas entre 1000 e 1250°C. Nessa faixa de temperatura, os aços inoxidáveis apresentam um comportamento muito próximo do equilíbrio estável e metaestável, produzindo uma estrutura lamelar com grãos alongados na direcção de laminagem e composta por uma matriz ferrítica com ilhas de austenite, sendo de aproximadamente 35-55% de ferrite e 45-65% de austenite, conforme ilustra a Figura 77.

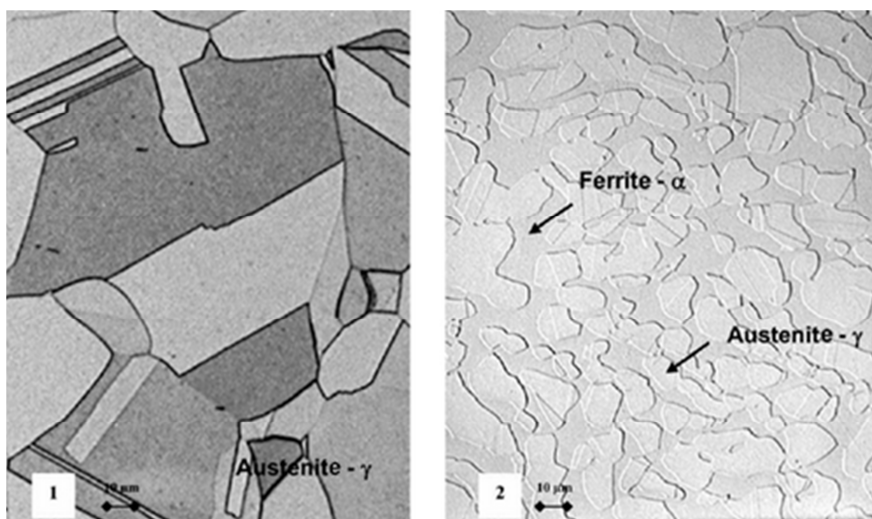


Figura 77 – Microestrutura típica de um aço inoxidável austenítico AISI 316L (x400) e microestrutura típica de um aço inoxidável duplex SAF 2205 (x400)

2.4.2. Propriedades mecânicas principais

A combinação entre os elevados valores de alongamento da austenite com a elevada tensão de limite elástico da ferrite nos aços inoxidáveis duplex, forma um conjunto de notáveis propriedades mecânicas. Os aços inoxidáveis duplex apresentam elevada tensão de limite elástico, na ordem de duas vezes o valor dos aços austeníticos. Além disso, apresentam um alongamento mínimo em torno de 25%.

O comportamento mecânico dos aços inoxidáveis duplex está intimamente relacionado com a característica de cada fase, por isso, o equilíbrio entre as frações volumétricas de austenite e ferrite deve estar próximo de 50% para cada uma das fases, a fim de se maximizar as propriedades mecânicas.

A Tabela 25 compara as propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis de microestrutura dúplex com os aços inoxidáveis austeníticos.

Tabela 25 – Comparação entre as propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis de microestrutura duplex com ligas austeníticas (Fontana & Greene, 1986)

AISI/UNS	Resist. Escoamento [MPa]	Resist. Tracção [MPa]	Alongamento mínimo [%]	Dureza Vickers	Microestrutura
304 L	210	515-680	45	155	Austenítica
316 L	220	515-690	40	160	Austenítica
S 32304	400	600-820	25	230	Duplex
S31803	450	680-880	25	260	Duplex
S32750	550	800-1000	25	290	Duplex

Os aços inoxidáveis duplex apresentam alta resistência ao impacto, à temperatura ambiente (25°C). A sua tenacidade está limitada à fracção volumétrica e distribuição da ferrite. Com uma fracção volumétrica de austenite na ordem dos 40%, obtém-se prevenção efectiva da nucleação e progressão de fissuras. Dessa forma, a orientação e a morfologia da estrutura dos duplex são importantes na avaliação da tenacidade. Resultados de ensaios de impacto demonstram que os aços duplex possuem boa tenacidade.

A Figura 78 ilustra os resultados obtidos no ensaio de impacto para a liga 316L, bem como, para três qualidades duplex: UNS S32304 (SAF 2304), UNS S31803 (SAF 2205) e UNS S32750 (SAF 2507). Nota-se que a temperatura de transição dúctil-frágil para os duplex está em torno de -50°C, enquanto que a liga 316L não apresenta esse fenómeno. A transição dúctil-frágil dos duplex é característica da fase ferrítica. (Senatore, Finzetto, & Perea, 2007).

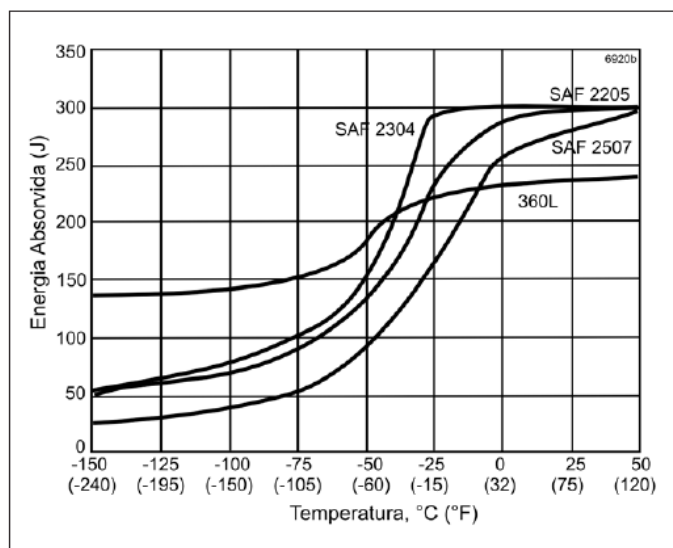


Figura 78 – Resistência ao impacto dos aços inox duplex e 316L. Ensaio Charpy, provetes de secção 10 x 10 x 50 mm³ e entalhe em V. Os ensaios foram realizados na direcção transversal à direcção de laminação (Charles, 1991)

2.4.3. Propriedades físicas

A Tabela 26 apresenta as principais características físicas dos aços inoxidáveis duplex, estabelecendo uma comparação com as dos aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos.

Tabela 26 – Propriedades físicas (Gomes, Viñas, & Vatavuk, 1999)

Material	UNS	Calor específico [J/Kg°C]			Condutividade térmica [W/m°C]		
		20°C	200°C	400°C	20°C	200°C	400°C
Ferrítico	S43000	460	540	580	17	22	23
Austenítico	S30400	480	510	540	14	17	20
Duplex	S32304	490	530	590	16	18	21
	S31803	480	530	590	14	17	20
	S32750	480	530	580	14	17	20

Observando a Tabela 26, nota-se que os aços duplex apresentam comportamento intermédio entre os aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos. A condutividade térmica dos aços inoxidáveis duplex é maior do que a dos aços inoxidáveis austeníticos.

Devido à presença da fase ferrítica, os aços inoxidáveis duplex possuem menor coeficiente de expansão térmica que os austeníticos, fazendo com que estas ligas apresentem comportamento próximo ao dos aços ao carbono.

A Figura 79 apresenta uma comparação entre os coeficientes de expansão térmica do aço inoxidável duplex com os das ligas austeníticas AISI 316L e 304L e um aço ao carbono.

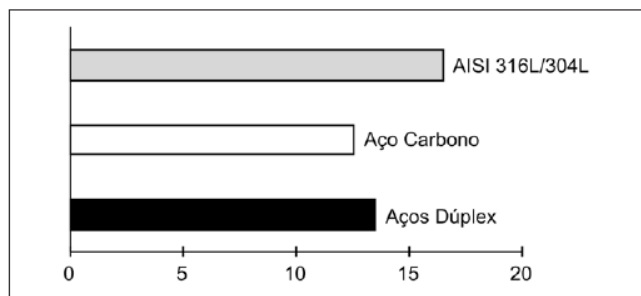


Figura 79 – Expansão térmica $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ (30-100°C) (Gomes, Viñas, & Vatauvuk, 1999)

2.4.4. Resistência à corrosão

A resistência à corrosão é determinada pela capacidade que esses materiais têm de se passivar e permanecer nesse estado no ambiente a que estiverem expostos. Essa propriedade está relacionada, principalmente, com os elementos de liga presentes na composição química do aço, embora outros factores como tamanho de grão, distribuição e morfologia de inclusões, precipitação de fases e qualidade da superfície também exerçam influência.

Os mecanismos de corrosão mais comuns são: corrosão por *pitting* e corrosão sob tensão. Em geral, os aços inoxidáveis duplex apresentam elevada resistência a todos esses mecanismos de corrosão.

Nos aços inoxidáveis austeníticos, assim como nos ferríticos, os elementos de liga estão distribuídos numa única fase, fazendo com que a resistência à corrosão desses aços seja relativamente homogênea. Nos duplex, no entanto, caso uma das fases apresente menor resistência à corrosão, esta determinará o comportamento do material. Embora a concentração dos elementos de liga seja diferente nas fases ferrítica e austenítica, os aços inoxidáveis duplex modernos possuem apurado equilíbrio de elementos de liga em ambas as fases, conduzindo a propriedades de corrosão bastante equilibradas para as duas fases (Senatore, Finzetto, & Perea, 2007).

2.4.5. Maquinabilidade dos aços inoxidáveis Duplex

O aço inox duplex tem, geralmente, o dobro do limite de tensão de cedência das restantes classes austeníticas sem azoto na composição, e a sua taxa inicial de encruamento é pelo menos comparável às classes austeníticas normais. As aparas formadas na maquinagem deste material são fortes e abrasivas, especialmente nos duplex altamente ligados, o que dificulta muito o processo. Esta situação deve-se sobretudo ao facto dos duplex serem produzidos com o menor teor de enxofre possível, tornando-se difícil a quebra da apara. Por esta razão, este material é mais difícil de maquinar que a série de aço inox austenítico 300, que tem a mesma resistência à corrosão. São necessárias forças maiores de corte e, conseqüentemente, há um maior desgaste de ferramenta. A maior dificuldade de maquinagem, comparativamente aos aços austeníticos, é notória quando se usa ferramentas de metal duro. É possível observar esta situação na Figura 80, com o comparativo do índice de maquinabilidade relativa para alguns aços inox duplex e aço inox 316 (Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless 2nd Ed., 2009)

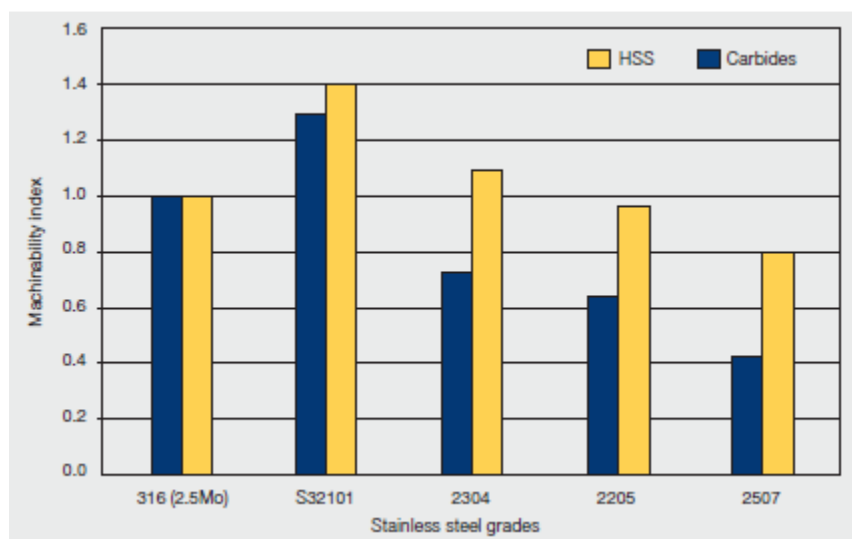







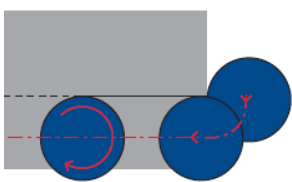
Figura 80 – Maquinabilidade relativa de aço inox duplex comparada com o tipo 316 para ferramentas em metal duro (HM) e aço rápido (HSS) (Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless 2nd Ed., 2009)

Seguidamente são descritas algumas directrizes para maquinagem de aços inox duplex (Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless 2nd Ed., 2009):

- É recomendado o uso de máquinas de elevada potência e rigidez, com forte fixação, tanto da ferramenta como da peça, devido às forças de corte envolvidas serem geralmente mais altas para duplex do que para o aço inox austenítico correspondente;
- Minimização de vibrações, mantendo a extensão da ferramenta o mais curta possível;
- Usar ferramentas com raio de canto não superior ao necessário, para evitar vibrações;
- Preferir ferramentas em metal duro, com uma geometria de lâmina que ofereça grande poder de corte, garantindo também resistência adequada. Desta forma, a ferramenta gera menos calor e minimiza o encruamento da peça;
- Usar percursos de maquinagem que permitam uma profundidade de corte abaixo da camada endurecida pelas passagens anteriores de maquinagem;
- 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 apra na ferramenta e, como se trata de um material pastoso, é mais provável a sua ocorrência. A baixa velocidade de corte também aumenta o risco de formação de aresta postiça;
- Trocar as pastilhas de corte ou afiar ferramenta em intervalos regulares, para garantir lâminas afiadas;
- Usar fluido de corte abundante (óleos de corte ou emulsões), com pressão elevada. Com menor calor envolvido, garante-se uma maior longevidade da ferramenta;
- Usar ferramentas de metal duro revestido, com quebra-apara de geometria positiva.

Existem alguns problemas associados à maquinagem de duplex que podem ser detectados através da análise do tipo de desgaste da ferramenta. Na Tabela 27 pode-se visualizar esses mesmos problemas, assim com, soluções mais aconselhadas.

Tabela 27 – Alguns problemas associados à maquinagem de aços duplex e respectivas soluções (OUTOKUMPU - Machinability of Duplex SS, 2011)

Imagem			
Problema	Desgaste do flanco Tipo de desgaste esperado de uma maquinagem com parâmetros de maquinagem bem estabelecidos	Entalhe Tipo de desgaste típico da maquinagem de duplex	Material agarrado Esta situação deve-se ao uso de velocidade de corte demasiado baixa, promovendo a adesão de material à ferramenta
Solução	Para maior longevidade da ferramenta, deve-se reduzir a velocidade de corte a partir deste ponto	Aumentar a velocidade de corte reduz este problema, mas aumenta o desgaste do flanco. Se possível, usar uma profundidade de corte variável	Portanto deve-se aumentar a velocidade
Imagem			
Problema	Aparas longas Pode levar a quebra de ferramenta	Deformação plástica É um problema comum em operações de torneamento	Quebra de ferramenta à entrada A entrada na peça pode provocar danos na ferramenta, especialmente em classes duplex de alta liga
Solução	Aumentar avanço	Reduzir velocidade de corte e avanço	Com uma entrada em curva suave pode-se evitar esta situação. Quando a ferramenta passa por furos ou cavidades, deve-se reduzir a velocidade de corte e avanço (-25%)

Segundo um estudo realizado neste campo – “Maquinagem de aço inoxidável duplex com ferramenta revestida a AlTiN e AlCrN através de PVD” – a grande dificuldade de maquinagem deste material fica a dever-se à sua alta plasticidade e tendência a encruar, principalmente nos aços inoxidáveis austeníticos (AISI 316 – dureza = 160 HB), semelhantes ao do caso de estudo, que levam a condições de corte muito severas. Para além disso, este tipo de material tem uma baixa condutividade térmica comparado com os aços ao carbono estruturais. Isto inflige alto impacto térmico na zona de contacto, que por sua vez, aumenta significativamente o desgaste da ferramenta. A sua maquinabilidade pode ser melhorada com a utilização de ferramentas de corte revestidas. Os revestimentos PVD com baixa condutividade térmica, que permitem bons acabamentos superficiais, devem ser utilizados.

Isto leva a grandes melhoramentos a nível de características de fricção na interface peça/ferramenta, bem como no processo de extracção de apara. Neste estudo em particular, foram maquinadas placas deste material usando fresas de topo de acabamento com 8 mm de diâmetro em metal duro com quatro revestimentos diferentes: AlCrN, AlCrNbN, AlTiN refinado e AlTiN nano-cristalino. Os parâmetros de maquinagem foram: $V_c = 120$ m/min; $f = 0.05$ mm/min; $A_p = 10$ mm; $A_e = 0.5$ mm. Ambos os revestimentos à base de AlTiN e AlCrN têm alta resistência à oxidação devido à formação de alumina na superfície das suas camadas. A influência do tratamento superficial de pós-deposição na ferramenta na intensidade de desgaste da mesma foi investigada. A superfície do revestimento antes e depois do tratamento de pós-deposição foi analisada utilizando curvas de relação de *Abbot-Firestone*. A intensidade de desgaste ocorrido para as ferramentas com revestimento AlTiN nano-cristalino, para um percurso de maquinagem de 150 metros foi mínima. Portanto, foram realizados, os estudos da importância da selecção do revestimento, bem como, do pós-tratamento superficial na melhoria da maquinabilidade de aços inoxidáveis austeníticos. Como os pós-tratamentos resultam sempre num aumento da longevidade da ferramenta, devido à quantificação das curvas de relação de materiais indica, resultando numa diminuição da área de pico e num aumento na área de vales. Uma selecção de PVD adequada parece, também, ter um forte impacto na longevidade da ferramenta. O revestimento AlTiN nano-cristalino superou o AlTiN refinado na fase pós-rodagem de desgaste (estável), quase duplicando a sua vida útil. Quanto aos revestimentos à base de AlCrN, o AlCrNbN com estrutura do tipo (200), tem um desempenho muito melhor do que o AlCrN com estrutura (111) (Endrino, Fox-Rabinovich, & Gey, 2005).

Noutro estudo sobre microfresagem do mesmo material, também se verificou a diferença de *performance* entre vários tipos de revestimento, utilizando fresas de topo de 2 lâminas com diâmetro de 1 mm. O aço inoxidável investigado foi o X5CrNi18-10 (1.4301). Quanto aos revestimentos em análise têm-se CrN, TiN, AlCrN, AlTiN e TiAlN. Usando parâmetros de corte iguais e o mesmo tipo de geometria básica de ferramenta, o desempenho alcançável de cada revestimento era avaliado recorrendo às forças envolvidas no processo, o desgaste da ferramenta e qualidade superficial. Os parâmetros de maquinagem utilizados foram: $V_c = 100$ m/min; $f_z = 0.011$ mm; $A_p = 0.17$ mm; $A_e = 0.3$ mm. A utilização de revestimentos TiAlN e AlCrN geraram resultados muito bons no que diz respeito ao desgaste da ferramenta. Relativamente à qualidade superficial produzida, o revestimento AlTiN revelou os melhores resultados (Biermann, Steiner, & Krebs, 2013).

3. Desenvolvimento

3.1. Objectivos do trabalho

Neste trabalho pretende-se obter dados comparativos de quatro ferramentas de corte, mais concretamente, quatro fresas de marcas e configurações diferentes, realizando ensaios de maquinagem de desbaste moderados em condições e parâmetros controlados e equivalentes ao nível do avanço por dente, profundidade de corte e desbaste lateral, de modo a posteriormente realizar análises de rugosidade da superfície da peça maquinada e, também, averiguar o nível de desgaste ocorrido nas ferramentas ao fim de cada ensaio. Foi também anotado o peso das ferramentas, antes e depois da maquinagem, para averiguar se houve ou não variações significativas na massa das mesmas.

Os ensaios foram realizados usando duas fases diferentes, que variam ao nível do comprimento de percurso de maquinagem.

A ordem de realização das tarefas foi a seguinte:

- Numa primeira fase, realizaram-se 8 ciclos para cada ferramenta;
- Cada ciclo corresponde ao desbaste de uma camada com 0.5 mm de profundidade do tarugo de 60 mm de diâmetro disponibilizado para o efeito;
- Cada camada equivale a um percurso de maquinagem de 0.942 m;
- No total, os 8 ciclos correspondem a sensivelmente 7.5 metros de percurso de maquinagem para cada ferramenta;
- Determinou-se a rugosidade superficial da peça maquinada através do rugosímetro;
- Por fim, analisou-se o estado de desgaste na ferramenta, através de análise num microscópio electrónico, com vista a obter uma melhor profundidade de campo;
- Utilizando fresas novas, realizou-se de novo os ensaios de desbaste, mas desta vez para 16 ciclos, cerca de 15 metros de percurso total de maquinagem;
- Determinou-se novamente a rugosidade superficial da peça e desgaste das ferramentas.

3.2. Caracterização do equipamento de maquinagem

Foi utilizado um centro de maquinagem vertical CNC (Cone ISO40 Standard) para efectuar operações de facejamento e posterior desbaste (fresagem) utilizando fresas de 4 mm de diâmetro, de diferentes proveniências, configurações (nº de lâminas) e tipos de revestimentos (TAX e AlCrN). Após cada teste foi efectuado um corte transversal no tarugo, de modo a preservar os resultados obtidos (acabamentos) para cada fresa, utilizando um serrote mecânico.

3.2.1. Centro de maquinagem utilizado

O centro de maquinagem utilizado para a realização dos ensaios é da marca HAAS, modelo VF-2, conforme mostrado na Figura 82.



Figura 81 – Centro de maquinagem HAAS VF-2

3.2.1.1. HAAS VF-2 - Resumo do produto

Aqui pode ser visualizada uma síntese das características principais do produto:

- Centro de maquinagem vertical;
- Configurado para trabalhar apenas com 3 eixos, embora possua 4º e 5º eixos;

- Montagem de conicidade 40 (ISO BT 40);
- Accionamento vectorial de 30 hp (22,4 kW);
- 10000 rpm como rotação máxima disponível;
- Accionamento directo em linha;
- Troca automática de ferramenta tipo carrossel de 20 estações;
- Movimentos livres efectuados à velocidade máxima de 25,4 m/min;
- Memória de programa de 1 MB;
- Monitor LCD policromático de 15";
- Porta USB;
- Interruptor de chave para bloqueio de memória;
- Roscagem rígida;
- Sistema de refrigeração por imersão total com reservatório de 208 litros.

3.2.1.2. Especificações técnicas do centro de maquinagem

Cursos	S.A.E.	Métrico
Eixo X	30"	762 mm
Eixo Y	16"	406 mm
Eixo Z	20"	508 mm
Nariz da árvore à mesa (~ máx)	24"	610 mm
Nariz da árvore à mesa (~ mín)	4"	102 mm
Mesa	S.A.E.	Métrico
Comprimento	36"	914 mm
Largura	14"	356 mm
Largura do rasgo em T	5/8"	16 mm
Distância ao centro do rasgo em T	4.92"	125.0 mm
Número de rasgos em T normalizados	3	3
Peso máximo na mesa (distribuição uniforme)	3000 lb	1361 kg
Árvore	S.A.E.	Métrico
Potência máxima	30 hp	22.4 kW
Velocidade máxima	10000 rpm	8100 rpm

Força máxima	90 ft-lb @ 2000 rpm	122 Nm @ 2000 rpm
Sistema de transmissão	Inline Direct-Drive	Inline Direct-Drive
Força máxima c/ caixa de transmissão opcional	250 ft-lb @ 450 rpm	339 Nm @ 450 rpm
Cone	CT or BT 40	CT or BT 40
Lubrificação do rolamento	Air/Oil Injection	Air/Oil Injection
Líquido de refrigeração	Liquid Cooled	Liquid Cooled
Avanço	S.A.E.	Métrico
Em X	1000 in/min	25.4 m/min
Em Y	1000 in/min	25.4 m/min
Em Z	1000 in/min	25.4 m/min
Em corte (máxima)	650 in/min	16.5 m/min
Motores do eixo	S.A.E.	Métrico
Força máx. X	2550 lb	11343 N
Força máx. Y	2550 lb	11343 N
Força máx. Z	4200 lb	18683 N
Trocador de ferramentas	S.A.E.	Métrico
Tipo	Carrossel	Carrossel
Capacidade	20	20
Diâmetro máxima da ferramenta (cheio)	3.5"	89 mm
Peso máxima da ferramenta	12 lb	5.4 kg
Ferramenta a ferramenta (média)	4.2 s	4.2 s
Apara a apara (média)	4.5 s	4.5 s
Geral	S.A.E.	Métrico
Ar necessário	4 scfm, 100 psi	113 L/min, 6.9 bar
Capacidade do líquido de refrigeração	55 gal	208 L

3.2.2. Dispositivos de fixação das peças

Na fixação da peça (tarugo) foi utilizada uma bucha de três mordentes concêntrica com aperto cilíndrico de acordo com a norma DIN 6350 (montagem frontal) de corpo em aço da marca *Bison*. Esta bucha aperta a peça de trabalho e centra-a simultaneamente durante o aperto.

A bucha foi fixada na mesa da máquina do centro de maquinagem como se pode ver na Figura 82.

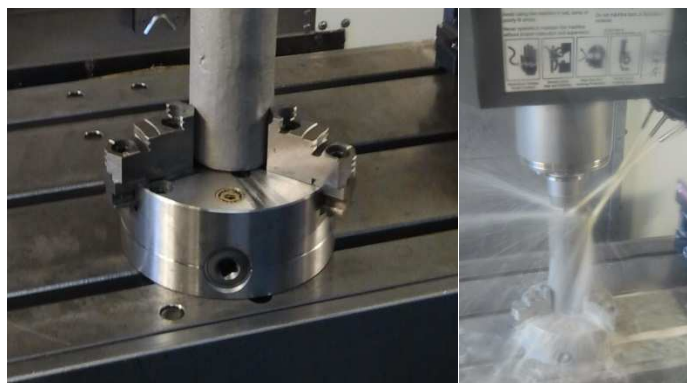


Figura 82 – Fixação do tarugo na mesa de trabalho do centro de maquinagem

As características da mesma são apresentadas nas tabelas seguintes.

Tabela 28 – Dimensões e algumas características da bucha Bison 3575

<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="flex: 1;"> </div> <div style="flex: 1; text-align: center;"> <p>3575</p> <ul style="list-style-type: none"> Standard Zubehör Standard accessories 1 Satz harte Aufsatzbacken 1 Set of hard top jaws 1 Satz harte Grundbacken 1 Set of hard master jaws 1 Schlüssel 1 Wrench </div> <div style="flex: 0.5; text-align: center;"> </div> </div>											
<ul style="list-style-type: none"> • Superfícies de trabalho temperadas e rectificadas; • Prato equilibrado; • Sistema de montagem flexível: montagem da parte de trás e da frente usando um prato adaptador. 											
A	B	B1	C	DH7	E	F	G	J	L	P	Kg
160	68.0	72.8	4	125	42.0	140	6xM10	32	43.0	6xM10	10.0

3.2.3. Dispositivos de fixação das ferramentas

Para a fixação das ferramentas foi utilizado inicialmente um porta-piças OZ25. No entanto, verificando-se que o mesmo não permitia que a ferramenta trabalhasse sem um elevado nível de vibrações, o mesmo foi substituído por um cone hidráulico da marca WTE, modelo DIN 69871-AD/B (Figura 83), com as características indicadas no quadro seguinte (Tabela 29).



Figura 83 – Cone hidráulico WTE, modelo DIN 69871-AD/B, utilizado nos ensaios

Tabela 29 – Características técnicas do cone hidráulico

Cone hidráulico WTE DIN 69871-AD/B									
Características:									
		<ul style="list-style-type: none"> Alta precisão de funcionamento cíclico Efeito de amortecimento da vibração Alta rigidez radial Fixação sem equipamento adicional 							
Tamanho nominal ISO	Dimensões					G	Peso kg	Ref.	
40	d₁	d₂	l₁	l₂	l₃				
	20	49.5	64.5	51	10	M16x1	1.3	15.508.40.20.Z	

3.3. Caracterização das ferramentas a utilizar

Todas as ferramentas utilizadas nos ensaios tiveram os seguintes critérios de selecção 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 extracção de aparas e permitindo manter a eficiência de corte, não comprometendo o acabamento;
- Encabadouro de 6 mm, para evitar a mais possível as vibrações. Foram realizadas experiências-teste com encabadouros de 4 mm, que provaram ser ineficientes nesta tarefa, partindo prematuramente pela zona imediatamente a seguir à zona útil de trabalho, sinal claro de excesso de esforço imposto na ferramenta.

As características que variam foram:

- Número de lâminas – 2, 3 e 4 dentes
- 2 tipos de revestimento – Alcrona e Nitreto de titânio-alumínio;
- Altura da zona útil de trabalho (no caso da fresa HPMT de 4 lâminas esta zona é ligeiramente maior).

As ferramentas utilizadas nos ensaios foram as seguintes:

Tabela 30 – Ferramentas utilizadas

Ferramenta (D = 4 mm)					
Marca	Modelo		Material-Base	Revestimento	Nº Lâminas
WALTER Protostar N45 Compact	H30140418-4		HM	TAX	4
HPMT SE30 Plunge-Mill	G10040005006		HM	AlCrN	3
HPMT SE45 Noviano Standard	V47BXZ024GX040 001		HM	AlCrN	4
DORMER Spectrum	S812HA		HM	AlCrN	2

É recomendável a utilização de fresas com maior número de lâminas (4Z, por exemplo) nas operações onde a extracção de aparas é facilitada, tais como desbaste lateral (Side Milling - Figura 84/A). No caso de o desbaste ser “em cheio”, é mais indicado utilizar um menor número de lâminas (2Z e 3Z), de maneira a prevenir que o material fique agarrado à ferramenta ou, por outras palavras, crie uma aresta postiça (Slotting - Figura 84/B).

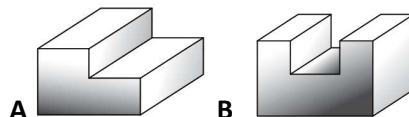


Figura 84 – A: Fresagem lateral (*Side Milling*); B: Fresagem “em cheio” (*Slotting*)

3.3.1. Ferramenta do tipo A - WALTER Protostar N45 Compact H3014018-4

Uma das ferramentas utilizadas nos ensaios foi a fresa da marca *Walter* modelo *Protostar N45 Compact H3014018* de 4 lâminas com corte ao centro. O seu revestimento é de Nitreto de Titânio-Alumínio (TiAlN).

Tabela 31 – Características gerais da fresa WALTER Protostar N45 Compact

Fresagem a 90°/Canais	
Maquinagem 	Fresas de topo de metal duro
Ângulo de hélice λ	45°
Denominação Haste DIN 6535 HA	H3014018
Tipo	Compact N45
Material base	Metal duro com revestimento
Revestimento	TAX – Nitreto de titânio-alumínio A camada TAX é utilizada nos casos em que for necessária uma elevada resistência à temperatura, como por exemplo, na maquinagem de aços temperados
Faixa de \varnothing	2-12
N° lâminas	4 com corte no centro
Norma	Norma P, S
Dureza de materiais	Até 48 HRC
Aplicações	 Fresagem de canal: $a_p \leq 0,5 \times D_c$ Fresagem a 90°: $a_e \leq 0,6 \times D_c$

O seu campo de aplicabilidade é o seguinte:

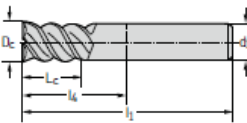
Tabela 32 – Fresagem a 90° sem raio de canto com fresa WALTER Protostar N45 Compact

Grupo de materiais	Classificação dos principais grupos de materiais e respectivos códigos de letras Material da peça		Dureza HB	Resist. Tracção Rm N/mm ²	Aplicação principal ●● Aplicação secundária ●
P	Aço sem liga e de baixa liga	Recozido (beneficiado)	210	700	●●
		Aço de corte livre	220	750	●●
		Beneficiado	300/380/430	1010/1280/1480	●●
	Aço de alta liga e aço ferramenta de alta liga	Recozido	200	670	●●
		Temperado e revenido	300/400	1010/1360	●●
	Aço inoxidável	Ferrítico/martensítico, recozido	200	670	●●
Martensítico, beneficiado		330	1110	●●	
M	Aço inoxidável	Austenítico, duplex	230	780	●
		Austenítico, temperado (PH)	300	1010	●
K	Ferro fundido cinzento		245	-	●
	Ferro fundido com grafita nodular		365	-	●
	GGV (CGI)		200	-	●

Estabilidade da máquina, fixação e peça - Boa

Tabela 33 - Dimensões da ferramenta Walter Protostar N45 Compact

Norma P, S	D _c h11 mm	L _c mm	l ₁ mm	l ₄ mm	d ₁ h6 mm	Z	TAX denominação H3014018
Haste DIN 6535 HA	2	3	39	12	6	4	-2
	3	4	39	12	6	4	-3
	4	5	39	12	6	4	-4
	5	6	39	12	6	4	-5
	6	7	39	12	6	4	-6
	8	9	44	17	8	4	-8
	10	11	51	20	10	4	-10
	12	13	56	22	12	4	-12



Quanto aos parâmetros de maquinação aconselhados pelo fabricante temos:

Tabela 34 – Parâmetros recomendados pelo fabricante

Classificação dos principais grupos de materiais e respectivos códigos			Dureza HB	R. tracção Rm N/mm ²	V _c m/min			VT
					A _e /D _c			
						1/1	1/2	1/10
M	Aço Inox	Austenítico-ferrítico, duplex	230	778	50	70	100	B

*Dados de corte indicados são valores médios de referência. É recomendado um ajuste em aplicações específicas

3.3.2. Ferramenta do tipo B - HPMT SE30 Plunge-Mill G10040005006 (G6110)(Z3)

Foram utilizadas duas ferramentas da HPMT. Uma delas foi a fresa HPMT SE30 Plunge-Mill G10040005006 de 3 lâminas com corte ao centro. O seu revestimento é Alcrona (AlCrN).

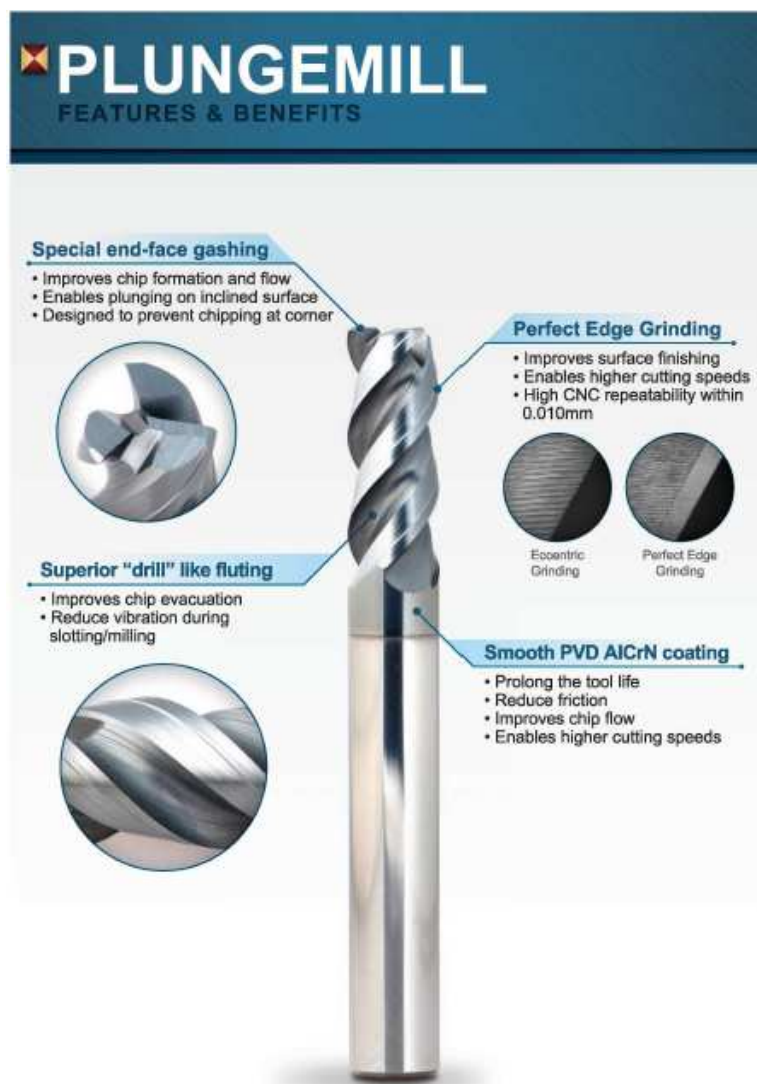


Figura 85 - Características e benefícios HPMT SE30 Plunge-Mill

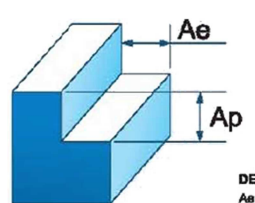
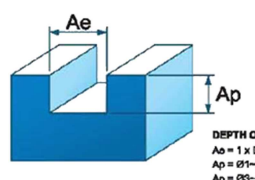
Tabela 35 – Propriedades da fresa HPMT SE30 Plunge-Mill

PLUNGEMILL LINE	
	Metal duro
	Chanfro

	Ângulo de ataque do dente		
	Ângulo da hélice da lâmina		
	Material de revestimento = AlCrN (Monocamada) Microdureza (HV 0.05) = 3200 Temperatura máxima de aplicação ≤ 1100°C Coeficiente de Fricção = 0.3 HPT = High Performance Tools (Ferramentas de alto desempenho)		
	Sem vibrações		
	3 Lâminas de corte		
			
Dimensões (mm)			
D	L1	L	d2 (h6)
4	8	50	6

Quanto aos parâmetros de maquinagem aconselhados pelo fabricante temos:

Tabela 36 – Parâmetros recomendados pelo fabricante

3Z – FRESAGEM LATERAL									
Material	Grupo de materiais	d1 (mm)	Vc (m/min)	Fz (mm)	Ap (mm)	Ae (mm)	N (min ⁻¹)	Vf (mm/min)	
Aço inox	M16, M20	4	58	0.031	≤1.5D	≤0.4D	2660	250	<p>DEPTH OF CUT Ae = 0.4D (SUS = 0.3D) Ap = 1.5 x D</p>
3Z – FRESAGEM “EM CHEIO” (SLOTING)									
Material	Grupo de materiais	d1 (mm)	Vc (m/min)	Fz (mm)	Ap (mm)	Ae (mm)	N (min ⁻¹)	Vf (mm/min)	
Aço inox	M16, M20	4	58	0.013	≤1.0 D	≤1.0 D	2660	100	<p>DEPTH OF CUT Ae = 1 x D Ap = Ø1-Ø2.5 = 0.8D (SUS = 2.5D) Ap = Ø3-Ø16 = 1D (SUS = 0.5D)</p>



3.3.3. Ferramenta do tipo C - HPMT SE45 Noviano Standard V47BXZ024GX040001 (G6110)(Z4)








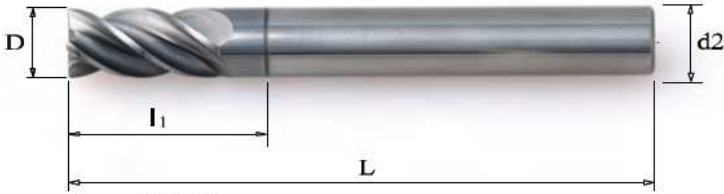
A outra ferramenta da HPMT utilizada nos ensaios foi a fresa HPMT SE45 Noviano Standard V47BXZ024GX040001, provida de 4 lâminas com corte ao centro. O seu revestimento é Alcrona (AlCrN).



Figura 86 – Características e benefícios HPMT SE45 Noviano Standard

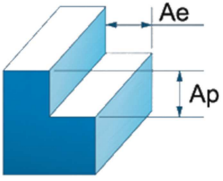
Tabela 37 – Propriedades da fresa HPMT SE45 Noviano Standard

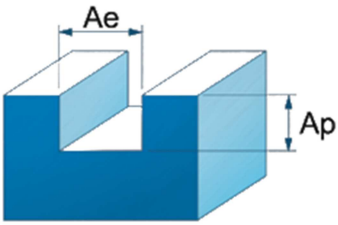
	
NOVIANO LINE	
	Metal duro

	Sem raio de canto		
	Ângulo de ataque do dente		
	Ângulo da hélice da lâmina		
	Material de revestimento = AlCrN (Monocamada) Microdureza (HV 0.05) = 3200 Temperatura máxima de aplicação $\leq 1100^{\circ}\text{C}$ Coeficiente de Fricção = 0.3 HPT = High Performance Tools (Ferramentas de alto desempenho)		
	Sem vibrações		
	4 Lâminas de corte		
	 * L ~ DIN 6527L		
Dimensões (mm)			
D	I1	L	d2 (h6)
4	12	57	6

Quanto aos parâmetros de maquinagem aconselhados pelo fabricante temos:

Tabela 38 – Parâmetros recomendados pelo fabricante

4Z – FRESAGEM LATERAL									
Material	Grupo de materiais	d1 (mm)	Vc (m/min)	Fz (mm)	Ap (mm)	Ae (mm)	N (min ⁻¹)	Vf (mm/min)	
Aço temperado (45~55H RC) AISI H13, Aço inox, níquel, liga base	M20, M26, M31, M32	4	58	0.01 3	≤ 1.5 D	≤ 0.2 D	460 0	234	 <p>DEPTH OF CUT $Ae \leq 0.2D$ ($\emptyset 3 \leq D \leq \emptyset 5$) $Ae \leq 0.3D$ ($\emptyset 6 D \leq \emptyset 20$) $Ap \leq 1.5D$</p>

4Z – FRESAGEM “EM CHEIO” (SLOTING)									
Material	Grupo de materiais	d1 (mm)	Vc (m/min)	Fz (mm)	Ap (mm)	Ae (mm)	N (min ⁻¹)	Vf (mm/min)	
Aço temperado (45~55H RC) AISI H13, Aço inox, níquel, liga base	M20, M26, M31, M32	4	58	0.010	≤1.0 D	≤1.0 D	4600	187	 <p>DEPTH OF CUT $A_e = D$ $A_p \leq 0.05D$ ($0.5 \leq D \leq 2$) $A_p \leq 1.0D$ ($D > 2$)</p>

3.3.4. Ferramenta do tipo D - DORMER Spectrum S812HA

Por fim, temos a última ferramenta utilizada, a fresa Dormer Spectrum S812HA, provida de 2 lâminas com corte ao centro. O seu revestimento é também Alcrona (AlCrN).

Principais características:

- Multi-aplicação na fresagem de alta performance;
- Redução de ferramentas armazenadas – uma fresa maquina múltiplos materiais e operações;
- O revestimento AlCrN promove a alta produtividade e acabamentos superiores na superfície das peças;
- Hélice de 30°, tolerância P9 para desbaste “em cheio”;
- Comprimento de corte curto para minimizar as vibrações.

Tabela 39 - Propriedades da fresa DORMER S812HA

DORMER	
HM	Metal duro (<i>hard metal</i>)
P9	Desbaste “em cheio” P9 (<i>Slotting</i>)
N	Tipo de fresa para aços, de baixa a alta resistência
Z 2	Nº de lâminas (dentes)
	Comprimento de corte curto


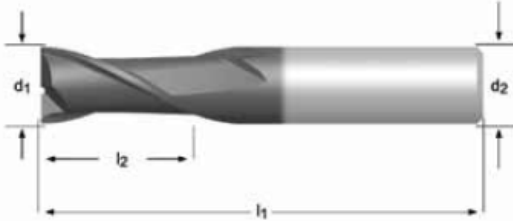
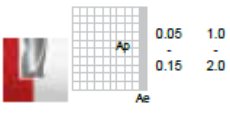
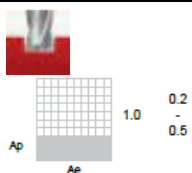
	Ângulo da hélice da lâmina		
	Tipo de haste; encabadouro cilíndrico		
	Revestimento em Alcrona (AlCrN)		
	Direcção de corte – <i>Slotting</i> , desbaste em rampa e mergulho		
	<i>Standard</i>		
			
Dimensões (mm)			
d₁	d₂	l₂	l₁
4	6	8	57

Tabela 40 – Parâmetros recomendados pelo fabricante

Grupo de materiais			Dureza (HB)	Resistência à tracção (N/mm ²)	Desbaste lateral		<i>Slotting</i>	
								
					Vc (m/min)	fz (mm/Z) ±25%	Vc (m/min)	fz (mm/Z) ±25%
Aço inox	2.3	Ferrítico + austenítico, ferrítico, martensítico	<300	<1000	55	0.030	55	0.013

3.4. Caracterização do material a maquinar

O material escolhido para a realização deste trabalho é o Aço inoxidável Duplex CD4MCuN (ASTM A890) ou 1.4517 (EN 10283). Trata-se de um aço inoxidável austenítico-ferrítico. A combinação das suas propriedades permite obter excelentes prestações em aplicações exigentes, no que diz respeito à resistência, manutenção, durabilidade e eficiência de custos a longo prazo.

As propriedades mais importantes do Duplex são (*Sandvik - Material Center Datasheet* - LDX2101, 2013):

- Alta resistência mecânica (aproximadamente duas vezes maior que os aços inoxidáveis austeníticos ASTM 304 e 316);
- Muito boa resistência à corrosão de fadiga;
- Boa resistência à corrosão e *pitting*;
- Grande poder de absorção de energia;
- Propriedades físicas que permitem avanços a nível de *design* estrutural;
- Boa tenacidade;
- Boa soldabilidade;
- Facilidade de fabricação.

Este material é utilizado nos seguintes tipos de indústria:

- Construção civil (ex.: componentes estruturais de construção, pontes);
- Canalização e tubagens;
- Barras de reforço;
- Tanques de armazenamento;
- Tanques de carga e sistemas de tubagens em navios cisterna (ex.: petroleiros);
- Reservatórios pressurizados;
- Processamento de água do mar (ex.: estação de dessalinização);
- Paredes anti-fogo e anti-explosão;
- Permutadores de calor;
- Aquecedores de água;
- Rotores, impulsores e eixos;
- Sistemas de limpeza de gases de combustão;
- Fábricas de celulose e papel.

As grandes razões para se ter optado por este tipo de material é o facto de ser um material relativamente pouco explorado a nível de maquinagem, não havendo grandes estudos feitos neste campo de fabricação/processamento e, também, por representar um bom desafio. A maquinagem deste material é comum em flanges e outros acessórios ligados ao transporte de fluidos corrosivos.

3.4.1. Composição química

A composição química equilibrada do Aço inoxidável Duplex CD4MCuN (ASTM A890) resulta numa microestrutura contendo quantidades iguais (aproximadamente) de ferrite e austenite, depois do material ser recozido a uma temperatura de 1040-1135°C. Devido ao baixo teor de outros elementos ligados, para além do cromo e níquel, este aço inoxidável está menos sujeito a precipitações de fases intermetálicas do que outros aços duplex.

A sua composição química está representada na tabela seguinte:

Tabela 41 - Propriedades químicas do Duplex CD4MCuN (Arsopi - Certificado 22 - Tarugo Duplex, 2014)

Composição química													
C	Si	Mn	P	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb	V	W	N	Co	Fe
0.03	0.41	1.48	0.02	25.41	6.08	2.91	3.30	0.01	0.02	0.04	0.19	0.08	60.02

Os efeitos dos principais elementos constituintes deste aço são (Oliveira, 2006):

- **Crómio (Cr)** – É um elemento que favorece a formação de carbonetos no aço. Por conseguinte, aumenta a dureza e a resistência à tracção do aço. Aumenta, também, a temperabilidade e em grandes quantidades a resistência à corrosão, mas diminui um pouco a tenacidade e bastante a sua soldabilidade;
- **Níquel (Ni)** – Confere ao aço maior penetração de têmpera, pois diminui consideravelmente a velocidade crítica de arrefecimento. O níquel, quando ligado ao cromo, aumenta a tenacidade do aço. Em grandes teores, junto ao cromo, torna o aço resistente à corrosão e ao calor;
- **Molibdénio (Mo)** – Aumenta a resistência a quente e, em presença do níquel e do cromo, aumenta o limite da tensão de rotura e a tensão de cedência. O molibdénio dificulta a forjagem, melhora a temperabilidade, a resistência à fadiga e propriedades magnéticas. Exerce uma notável influência nas propriedades da solda. É um elemento formador de carbonetos. Em acções rápidas, aumenta a tenacidade, mantendo as propriedades de dureza a quente e retenção de corte;
- **Cobre (Cu)** – Melhora os limites da tensão de rotura e a tensão de cedência dos aços, mas diminui as propriedades de elasticidade. Em pequenas quantidades, torna o aço resistente à corrosão;
- **Manganês (Mn)** – Aumenta a temperabilidade, a soldabilidade e o limite de resistência à tracção ou tensão de rotura, com diminuição insignificante na tenacidade. O manganês combina-se em primeiro lugar com o enxofre, para

formar o sulfureto respectivo (MnS), o excedente liga-se em parte com o carbono, dando o respectivo carboneto (MnC), composto análogo à cementite (FeC), à qual se associa e, em parte, se difunde na ferrite. A cementite contém teores variáveis de MnC. Em grandes quantidades e em presença de carbono aumenta muito a resistência à abrasão. O manganês é um poderoso desoxidante;

- **Silício (Si)** – Prejudica o alongamento, a tenacidade, a condutividade térmica e a maquinabilidade. Reduz a formação de carbonetos porque, de certa forma, auxilia a decomposição de cementite em ferrite. Praticamente é impossível obter um aço isento de silício, já que, além deste elemento estar presente no minério de ferro, encontra-se também nos materiais refractários dos fornos, de onde é absorvido aquando do processo de fusão. Os aços ao silício apresentam boa capacidade de têmpera, por ter reduzida velocidade crítica de arrefecimento;
- **Azoto (N)** – Prejudicial ao aço de baixa liga porque diminui a tenacidade, além de causar corrosão intergranular. Em aços inoxidáveis austeníticos, o azoto estabiliza a estrutura, aumenta a dureza e a tensão de cedência.

3.4.2. Propriedades Mecânicas

O aço inox duplex CD4MCuN tem alta resistência mecânica devido à sua estrutura duplex e alto teor em azoto, possuindo características muito especiais. Entre elas está o seu excelente comportamento plástico, indicado pelas grandes deformações às quais pode ser sujeito, sem a ocorrência de estrição em temperaturas próximas de metade da sua temperatura de fusão. Além da sua super plasticidade e resistência mecânica, está entre as propriedades mecânicas dos aços duplex, a alta resistência à corrosão.

Na Tabela 42 são apresentados os intervalos de valores típicos das propriedades para este material.

Tabela 42 – Propriedades mecânicas do Aço Duplex CD4MCuN (MatWeb) (CES Edupack 2005)

Propriedades mecânicas (valores de referência)	
Densidade	7700 - 7800 Kg/m ³
Resistência à tracção	655 - 820 MPa
Módulo de Young	195 - 205 GPa
Tensão de cedência	505 - 620 MPa
Módulo de rigidez	75 - 82 GPa
Dureza	245 - 270 HV
Alongamento	≥ 25 %
Factor de forma	42
Coefficiente de Poisson	0.265-0.285
Limite de fadiga*	323-373 MPa
Módulo volumétrico	138-159 GPa

*tensão (flutuação-variação) abaixo da qual o material suporta um nº de ciclos infinito, sem que haja rotura.

Aços inoxidáveis austeníticos e duplex têm propriedades que lhes conferem uma maquinabilidade diferente, comparativamente ao aço ao carbono e ao aço inoxidável ferrítico ou martensítico. A maior diferença é a alta ductilidade, bem como, a sua tendência de encruamento e formação de arestas postiças na ferramenta de corte (acumulação de material na aresta de corte). Para além disso, nos aços inoxidáveis duplex, a geração de aparas é dificultada devido à elevada resistência destes materiais.

Em toda a maquinagem que envolva o processamento de aços inoxidáveis austeníticos e duplex, o encruamento é mais pronunciado que nos aços ao carbono e aços inoxidáveis ferríticos ou martensíticos. A superfície maquinada torna-se mais dura à medida que a vida útil da ferramenta diminui.

Alguns cuidados a ter na maquinagem deste tipo de aços:

- Usar ferramentas de corte actuais, com uma geometria aconselhada;
- Mudar a pastilha/inserto regularmente (caso se aplique).

3.4.2.1. *A altas temperaturas*

Se o Duplex CD4MCuN for exposto durante prolongados períodos de tempo a temperaturas acima de 280°C, a microestrutura muda, o que resulta numa redução da resistência ao impacto. Este efeito não afecta necessariamente o comportamento do material à temperatura de operação. Por exemplo, a tubagem dos permutadores de calor podem trabalhar a altas temperaturas sem qualquer problema. Na Tabela 43 temos os valores de tracção a altas temperaturas do aço duplex LDX2101, em quase tudo semelhante ao Duplex CD4MCuN, pelo que se pode fazer uma aproximação dos valores esperados.

Tabela 43 – Propriedades de tracção a altas temperaturas do Duplex LDX 2101 (Sandvik - Material Center Datasheet - LDX2101, 2013)

Valores mínimos		Temperaturas				
		50°C	100°C	150°C	200°C	300°C
$R_{p0.2}$	MPa	430	380	350	330	300
R_m	MPa	630	590	560	540	540

3.4.2.2. Fadiga

A alta resistência à tracção dos aços duplex implica também que possuam elevada resistência à fadiga.

A Tabela 44 apresenta o resultado de ensaios de fadiga por vibração ($R=0.1$) à temperatura ambiente. A resistência à fadiga foi avaliada durante dois milhões de ciclos e probabilidade de rotura de 50%. Como o teste foi realizado usando barras de teste redondas polidas, criadas a partir de chapas laminadas a quente, os factores de correcção de rugosidade superficial, entalhes, soldas, etc., são necessários, de acordo com a teoria clássica relacionada com a falha por fadiga. Como mostrado na tabela, a resistência à fadiga dos aços duplex corresponde aproximadamente ao limite convencional de escoamento do material.

Tabela 44 – Resultados dos ensaios de fadiga por vibração do Duplex CD4MCuN

	$R_{p0.2}$	R_m	Resistência à fadiga
	MPa	MPa	MPa
Duplex CD4MCuN	478	696	500
2205	497	767	578
1.4404*	500	510	360

*1.4404 é equivalente ao AISI 316L nestes testes

O desvio padrão da resistência à fadiga para a totalidade da amostra é de, aproximadamente, 30 MPa.

3.4.3. Propriedades Físicas

As propriedades físicas do Duplex CD4MCuN podem ser comparadas com as obtidas no aço inoxidável Duplex 2101, que é um material muito semelhante, as quais são mostradas na Tabela 45.

Tabela 45 – Propriedades físicas do Duplex LDX2101 (Sandvik - Material Center Datasheet - LDX2101, 2013)

		Temperatura °C			
		20	100	200	300
Densidade	$\times 10^3 \text{ kg/m}^3$	7.7			
Módulo de elasticidade	GPa	200	194	186	180
Coefficiente de Poisson		0.27			
Expansão linear (20>)°C	$\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$	-	13.5	14.0	14.5
Condutividade térmica	$\text{W/m}^\circ\text{C}$	15	16	17	18
Capacidade térmica	$\text{J/kg}^\circ\text{C}$	500	530	560	590
Resistividade eléctrica	$\text{n}\Omega\text{m}$	750	800	850	900

3.4.3.1. Resistência à corrosão

Devido à grande resistência à corrosão do aço inoxidável duplex CD4MCuN, é utilizado numa grande variedade de aplicações e ambientes. Em condições normais, a resistência à corrosão deste material é pelo menos tão boa quanto a da classe de aços inoxidáveis Cr-Ni, como o AISI 304L, e em alguns casos chega ao nível da classe Cr-Ni-Mo, como o AISI 316L.

Uma breve descrição da resistência a diferentes tipos de corrosão é mostrada em baixo:

- A corrosão geral é caracterizada por um ataque uniforme sobre a superfície do aço em contacto com um meio corrosivo;
- A resistência à corrosão é, geralmente, considerada boa, se a taxa de corrosão for menor que 0.1 mm/ano.

3.4.3.2. Pitting e corrosão intersticial

A resistência ao *pitting* e à corrosão intersticial, que é causada, maioritariamente, por ambientes ricos em cloretos, aumenta com o teor em cromo, molibdénio e azoto no aço, pelo que o Duplex CD4MCuN apresenta boas prestações a este nível.

A corrosão por *pitting* foi avaliada usando o *Avesta Cell* (ASTM G 150) que é uma pilha electroquímica, adequada para este tipo de testes, que desconsidera a corrosão intersticial, aumentando assim a precisão do ensaio da corrosão por *pitting*. Este teste refere-se ao Duplex 2101 que mais uma vez usaremos como termo comparativo.

A Figura 87 mostra que a resistência é maior do que a normalmente obtida pela classe Cr-Ni, como por exemplo o AISI 304L, e aproxima-se da classe Cr-Ni-Mo, como o AISI 316L.

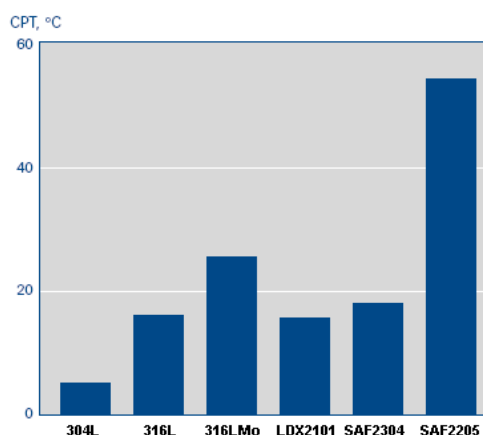


Figura 87 – Temperaturas críticas de *pitting* em 1M NaCl segundo ao ASTM G 150 usando a *Avesta Cell* (Sandvik - Material Center Datasheet - LDX2101, 2013)

3.4.3.3. Corrosão atmosférica

A resistência à corrosão atmosférica de um aço está fortemente ligada à sua resistência à corrosão uniforme e localizada, como o *pitting* e corrosão intersticial. Como o Duplex CD4MCuN mostra uma boa resistência a estes tipos de corrosão, pode-se assumir que é suficientemente resistente na maior parte dos ambientes.

3.4.3.4. Corrosão sob tensão

Como todos os aços inoxidáveis duplex, CD4MCuN demonstra uma boa resistência à corrosão sob tensão induzida por cloretos. Muitos métodos de teste são usados para classificar os diferentes tipos de aços no que diz respeito à resistência à corrosão sob tensão. Um desses métodos é o teste de dobragem em U, no qual a amostra é exposta a uma solução de 3M de cloreto de magnésio ($MgCl_2$) a 100°C durante 500 horas. A dobragem é realizada longitudinal e transversalmente à direcção de laminagem. Os resultados do ensaio para o Duplex LDX 2101 são os seguintes:

Tabela 46 – Resultados do teste de corrosão sob tensão de dobragem em $MgCl_2$ (Sandvik - Material Center Datasheet - LDX2101, 2013)

	Logitudinal/Transversal
Duplex LDX 2101	Sem corrosão sob tensão (alguma corrosão uniforme)
SAF2304	Sem corrosão sob tensão (alguma corrosão uniforme)
4301*	Corrosão sob tensão e <i>pitting</i>

*Equivalente ao AISI 304

3.4.3.5. Corrosão intergranular

Devido à microestrutura duplex do CD4MCuN, apresenta uma resistência à corrosão intergranular muito boa. Este material passa nos testes segundo a norma EN/ISO 3651-2, método A (*Strauss*) e método C (*Streicher*). Estes resultados são expectáveis nos aços duplex, pois são menos susceptíveis a este tipo de corrosão do que os aços inoxidáveis austeníticos.

3.4.3.6. Soldabilidade

O Duplex CD4MCuN apresenta uma boa soldabilidade e pode ser soldado usando qualquer um dos processos aplicados aos restantes aços duplex.

A soldabilidade destes materiais requer cuidados, quanto ao sobreaquecimento, aporte térmico, temperatura entressões não superior a 150 °C e velocidade de arrefecimento, pois quando aquecidos e posteriormente arrefecidos, formam precipitados que interferem directamente na resistência do material soldado, especialmente nos testes de impacto (Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless 2nd Ed., 2009).

Alguns dos processos passíveis de serem utilizados são o processo manual de soldadura por arco com eléctrodos revestidos, ou soldadura por arco com protecção gasosa. Devem ser usados materiais de adição que proporcionem uma soldadura austenítica-ferrítica, a fim de se obter um metal de soldadura com resistência à corrosão e propriedades mecânicas semelhantes à do material base.

3.5. Caracterização dos meios laboratoriais de análise utilizados

Foram utilizados os seguintes meios laboratoriais, todos para 8 e 16 ciclos:

- Balança analítica digital – Análise da massa das fresas antes e após cada ensaio de maquinagem utilizando uma balança com sensibilidade até à milésima de grama, para verificar se ocorreram grandes variações a este respeito;
- Rugosímetro de contacto – para verificação do estado da superfície, em termos de rugosidade, deixada por cada tipo de fresa utilizada após cada ensaio;
- Microscópio electrónico de varrimento – para verificação em detalhe do desgaste ocorrido na fresa após cada ensaio de maquinagem.

3.5.1. Rugosímetro

Foi utilizado um rugosímetro para medição do estado superficial das peças, após os ensaios de maquinagem, da marca Mahr, modelo M2.



Figura 88 – Rugosímetro Mahr M2

Os seus dados técnicos podem ser visualizados na Tabela 47.

Tabela 47 – Dados técnicos do rugosímetro

Princípio de medição	Método <i>Stylus</i>
Alcance de medições	Até 150 μm
Filtro	Seleccção automática
Cutoffs	0.25/0.8/2.5 mm
Comprimento de travessia conforme DIN EN ISO 4288/ASME B461:	1.75/5.6/17.5 mm; conforme EN ISO 12085: 1 mm, 2 mm, 4 mm, 8 mm, 12 mm, 16 mm
Comprimentos de amostra	De 1 até 5 mm
Standards	DIN/ISO/JIS/CNOMO (Motif) seleccionável
Parâmetros conforme DIN/ISO/SEP	Ra, Rz, Rmax, Rz, Rp, Rq, Rt, R3z, Rk, Rvk, Rpk, Mr1, Mr2, Mr, 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

3.5.2. Microscópio Electrónico de Varrimento

Foi utilizado um microscópio electrónico de varrimento na análise do estado de degradação das fresas, após os ensaios de maquinagem, da marca *FEI*, modelo *Quanta 400 FEG*.

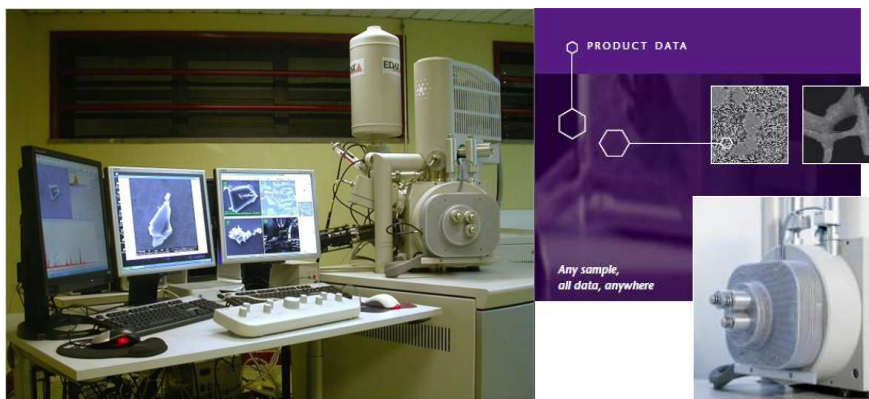


Figura 89 – Microscópio Electrónico de Varrimento (MEV) FEI Quanta 400 FEG

Os seus dados técnicos podem ser visualizados na Tabela 48.

Tabela 48 – Dados técnicos do microscópio óptico de varrimento

Especificações essenciais	
<p>Óptica electrónica</p> <ul style="list-style-type: none"> • Emissão de campo de alta resolução - SEM coluna otimizada para alto brilho / alta corrente • Lente objectiva de 45 ° de geometria com bombeamento diferencial através da lente e aberturas das objectivas aquecidas <p>Resolução</p> <ul style="list-style-type: none"> • Alto vácuo: <ul style="list-style-type: none"> - 0,8 Nm a 30kV (STEM); - 1.2Nm em 30kV (SE); - 2,5 nm a 30 kV (BSE); - 3.0nm a 1kV (SE). • Baixo vácuo: <ul style="list-style-type: none"> - 1,5 nm a 30 kV (SE); - 2,5 nm a 30 kV (BSE); - 3.0nm em 3kV (SE). • Modo de vácuo estendido (ESEM): <ul style="list-style-type: none"> - 1,5 nm a 30 kV (SE). • Voltagem de aceleração: 200V - 30kV; • Corrente da sonda: até 100nA - continuamente ajustável. <p>Detectores</p> <ul style="list-style-type: none"> • Everhardt-Thornley SED; • Baixo vácuo SED (LFD); • gasoso SED (GSED); • IR-CCD; • Estado sólido BSED. 	<p>Câmara de vácuo</p> <ul style="list-style-type: none"> • Alto vácuo: <math>6e-4</math> Pa; • Baixo vácuo: 10 a 130 Pa; • ESEM-vácuo: 10-4000 Pa. <p>Sistema de vácuo</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1x 240 l / s TMP, PVP 2x; • Patenteado através da lente diferencial de bombeamento; • Comprimento do caminho de gás: 10 ou 2 mm. <p>Câmara</p> <ul style="list-style-type: none"> • 379 mm esquerda para a direita; • 10 mm WD analítica; • 10 portas; • EDX ângulo de saída: 35 °. <p>5-eixos motorizados etapa</p> <ul style="list-style-type: none"> • X, Y = 100 milímetros; • Z = 60 milímetros (Z - folga de 75 milímetros); • T = -5° a + 70° (WD dependente); • R = 360° contínua.

3.5.3. Condições utilizadas nos ensaios de maquinagem

A maioria dos parâmetros e condições mantiveram-se iguais para cada ensaio excepto no caso do avanço da mesa que teve de ser ajustado de modo a que avanço por dente seja semelhante para cada ferramenta, devido à variação do número de lâminas e robustez de cada ferramenta, garantindo assim resultados mais coerentes.



Figura 90 – Orientação da operação de maquinagem

3.5.4. Parâmetros utilizados e respectiva explicação sobre a sua adopção

Como já foi referido, a maioria das condições de maquinagem mantiveram-se, independentemente da ferramenta. Dos parâmetros e condições que não se alteraram tem-se:

- Parâmetros de maquinagem:
 - Rotação (N) = 4000 rpm;
 - Profundidade de corte (A_p) = 0.5 mm;
 - Desbaste lateral (A_e) = 3 mm.
- Cone hidráulico para isentar o mais possível as vibrações na ferramenta;
- Bucha concêntrica de três mordentes para fixação da peça;
- Emulsão de fluido de corte para reduzir a fricção e temperatura de maquinagem.

A rotação utilizada foi determinada e ajustada de modo a melhorar o acabamento superficial da peça, utilizando rotação por excesso e tendo em conta, como referência, os valores recomendados pelos fabricantes das diferentes ferramentas.

A profundidade (A_p) e largura de desbaste lateral (A_e) foram determinadas através de tentativa-erro. Numa fase inicial utilizou-se um A_p de 1 mm, excessivo para o diâmetro da

ferramenta seleccionada e dureza do material trabalhado, e um A_e de 2 mm, que se provou prejudicial no que diz respeito ao acabamento superficial e vida útil da ferramenta, muito por causa da zona de entrada da fresa na peça coincidir com o centro da ferramenta, zona onde o esforço e vibrações produzidas são maiores. Com estas condições, para além da produção de maus acabamentos na peça, também se partiram algumas fresas, que não suportaram as vibrações e impacto de entrada na peça.

É recomendável utilizar uma largura de corte/passo lateral (A_e) de cerca de 60-70% do diâmetro da fresa, para garantir abrangência máxima de canto, razão pela qual se optou por utilizar um A_e de 3 mm e também um A_p de 0.5 mm, para baixar as tensões exercidas na ferramenta.

O parâmetro de maquinagem que se fez variar foi o avanço, como já foi referido.

Na Tabela 49, pode-se verificar a globalidade dos parâmetros utilizados.

Tabela 49 – Parâmetros de maquinagem utilizados

Ferramenta (D = 4 mm)						Parâmetros de corte		
Marca	Modelo	Nº Lâminas	Rotação	Vel. Corte	Avanço	Avanço/dente	a_e	a_p
			rpm	m/min	mm/min			
WALTER 4Z	H30140418-4	4	4000	50,27	250	0,0156	3	0,5
HPMT 3Z	G10040005006 PLUNGE-MILL	3	4000	50,27	190	0,0158	3	0,5
HPMT 4Z	V47BXZ024GX040 001 NOVIANO	4	4000	50,27	180	0,0113	3	0,5
DORMER 2Z	S812HA	2	4000	50,27	125	0,0156	3	0,5

O encabadouro da ferramenta (haste) utilizado também teve muita influência na realização dos ensaios. Foram realizadas algumas experiências prévias com encabadouros de menor diâmetro (do mesmo diâmetro da zona da hélice da ferramenta - 4 mm), mas provaram ser ineficientes nesta aplicação, partindo prematuramente. Com a utilização de encabadouros de 6 mm, conseguiu-se realizar com sucesso todos os ensaios. Isto deveu-se essencialmente à melhor absorção e dissipação das vibrações produzidas pelo processo de maquinagem, resultando, assim, em acabamentos superficiais de qualidade superior e menor desgaste das ferramentas.

A vibração foi mesmo a maior das dificuldades encontradas, principalmente devido à grande dureza do material maquinado e à fixação da peça não ser ideal. O cone hidráulico revelou-se bastante eficiente na prevenção deste problema, pois após a mudança de um porta-piças de aperto por porca para este, verificou-se uma melhoria significativa.

Quanto ao fluido de corte, foi utilizada uma emulsão para refrigerar a peça e ferramenta. Como a fresagem é um processo intermitente, faz com que as temperaturas geradas na aresta de corte fltuem constantemente entre vários níveis de quente e frio. As variações de temperatura são agravadas quando a aresta de corte entra e sai do corte. A aresta de corte está então sujeita a choques térmicos e tensões cíclicas que podem resultar em fissuras e, no pior cenário, podem levar ao final prematuro da vida da ferramenta. Quanto mais quente a área de corte, mais inapropriado se torna o uso do fluido de corte. Em operações de acabamento, a aplicação de fluido não reduzirá a vida útil da ferramenta tanto quanto no desbaste, devido ao nível reduzido de calor gerado, sendo usado para evitar a abrasão de partículas de metais na textura da superfície e para lubrificar e arrefecer a peça. No caso de utilização de líquido refrigerante, este deve ser aplicado em abundância.



Figura 91 – Tipo de refrigeração utilizada

3.5.5. Realização prática dos ensaios de maquinagem

Os ensaios de maquinagem realizados tiveram em comum o tipo de percurso de corte. Visto tratar-se de uma peça de revolução (com 60 mm de diâmetro), optou-se por desbastar em espiral, de fora para dentro, com uma entrada suave na peça (em rampa), ou seja, a fresa aproximou-se gradualmente sem que houvesse uma entrada brusca, prevenindo assim um embate forte que se poderia traduzir numa mais rápida degradação da ferramenta, sob a forma de quebra prematura das suas arestas de corte. Este percurso em espiral foi realizado mantendo sempre a mesma altura de corte (mesmo A_p , de 0.5 mm). Desbastando um nível, que corresponde a um ciclo, a fresa é baixada fora da peça em 0.5 mm e novamente é realizado o percurso em espiral até ao centro, repetindo o processo até se atingir os 8 ou 16 ciclos pretendidos.

Para a realização dos ensaios foram utilizadas fresas de diferentes configurações, no que diz respeito ao número de lâminas, comprimento de área de trabalho (hélice) e revestimento.

Os parâmetros de maquinagem foram adaptados segundo o número de lâminas de corte de cada fresa e as recomendações do fabricante, numa tentativa de manter o avanço por dente sensivelmente igual para todas as ferramentas, enquanto a rotação da árvore foi mantida nas 4000 rpm. Só no caso da fresa HPMT Noviano de 4 lâminas não foi possível manter o avanço por dente semelhante às restantes, muito por causa da sua configuração, dado que esta possui uma área de trabalho ligeiramente mais alta do que as restantes.

Durante os ensaios detectou-se a presença de vibrações, através não só do ruído produzido aquando do desgaste, como também através da qualidade de acabamento resultante da peça. As causas deste fenómeno podem dever-se a várias limitações referentes à ferramenta de corte e seu sistema de fixação, ao centro de maquinagem, às características da peça e sistema de fixação da mesma. É de referir, também, que esta vibração era mais notória quando a distância da superfície da peça ao sistema de fixação era maior.

Tabela 50 – Características gerais e parâmetros dos ensaios

Nº ciclos	Nº ensaio	Ferramenta	Nº dentes (Z)	Avanço por dente	Fixação da peça	Fixação da ferramenta	Máquina utilizada	Parâmetros
8 7.5 metros de percurso de maquinagem	1	WALTER H30140418-4	4	0,0156	Bucha Bison 3575 de aperto cilíndrico	Cone hidráulico WTE DIN 69871-AD/B	Centro de maquinagem HAAS VF-2	Verificar capítulo anterior
	2	HPMT G10040005006 PLUNGE-MILL	3	0,0158				
	3	HPMT 4Z V47BXZ024GX040001 NOVIANO	4	0,0113				
	4	DORMER S812HA	2	0,0156				
16 15 metros de percurso de maquinagem	5	WALTER H30140418-4	4	0,0156				
	6	HPMT G10040005006 PLUNGE-MILL	3	0,0158				
	7	HPMT 4Z V47BXZ024GX040001 NOVIANO	4	0,0113				
	8	DORMER S812HA	2	0,0156				

3.6. Resultados

Realizados os ensaios de maquinagem, procedeu-se à análise da rugosidade superficial da peça, para avaliar o desempenho específico de cada fresa utilizada, verificando-se também o estado de degradação resultante em cada ferramenta através do microscópio electrónico de varrimento.

3.6.1. Resultados para 8 ciclos – percurso de maquinagem de 7,5 metros

Foram realizadas as análises de rugosidade superficial e desgaste das ferramentas para o percurso de maquinagem de 8 ciclos que corresponde a cerca de 7.5 metros de desbaste.

3.6.1.1. Fresa WALTER Protostar N45 Compact H30140418-4 para 8 ciclos

A fresa WALTER 4Z utilizada neste ensaio foi já caracterizada, conforme pode ser visto no subcapítulo 3.3.1.

3.6.1.1.1. Análise de rugosidade para 8 ciclos - Fresa WALTER 4Z

Os dados obtidos experimentalmente para o percurso de maquinagem de 8 ciclos são os apresentados na tabela seguinte. As respectivas médias são consideradas como valores de referência representativos do estado geral do nível de rugosidade superficial de cada superfície ensaiada.

Estranhamente, os resultados obtidos para esta fresa, no que diz respeito aos valores de Ra, radial e tangencial, apresentaram valores maiores do que para 16 ciclos, apesar de terem trabalhado menos. Apesar da diferença não ser relevante, seria à partida expectável obterem-se valores inferiores, não sendo encontradas explicações válidas para esta situação. De qualquer forma, os valores obtidos de rugosidade média foram bastante satisfatórios, sendo esta a fresa mais regular das quatro em estudo. Como grande melhoria encontrada entre 8 e 16 ciclos, têm-se o facto de se ter obtido valores de Rz radial bastante inferiores aos obtidos para 16 ciclos, significando que a superfície deixada na peça tem uma diferença de amplitude entre picos e vales de rugosidade mais baixa e, conseqüentemente, uma superfície não tão frágil e sensível ao desgaste mecânico, correndo menos riscos de perder o seu rigor dimensional.

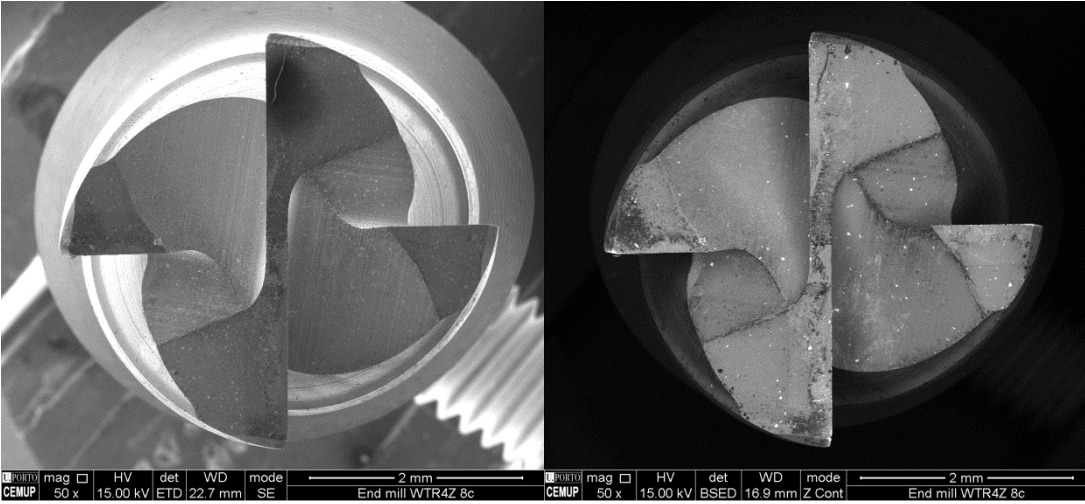

Tabela 51 – Valores de rugosidade Ra, Rz e Rmax das superfícies maquinadas pela WALTER 4Z – 8 ciclos (Valores em μm)

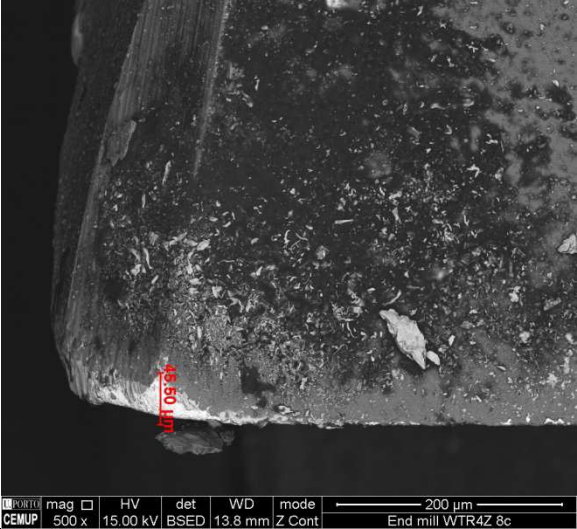
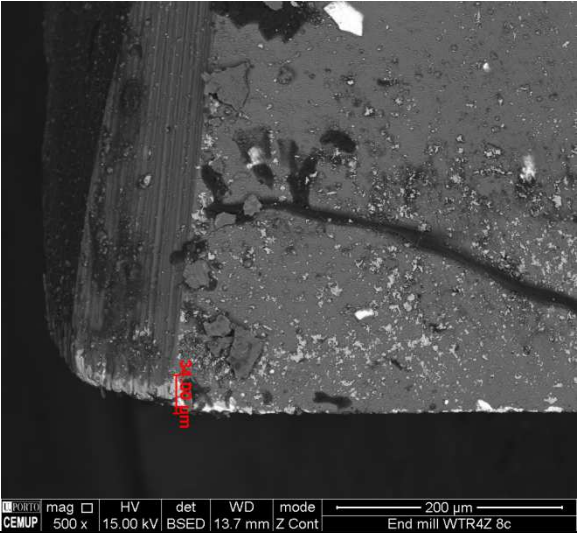
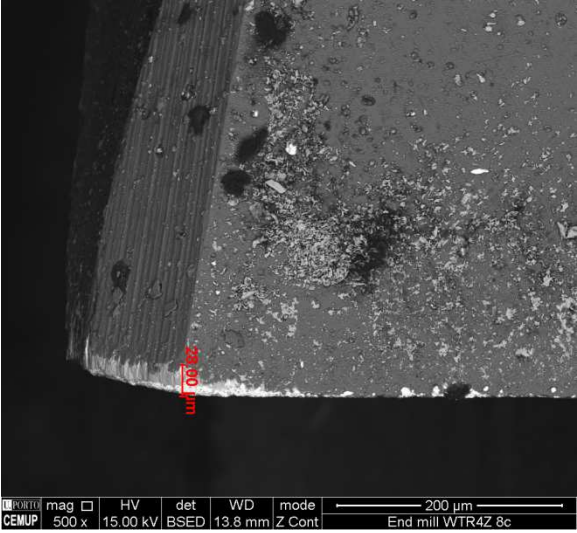
8 Ciclos	Ra	Rz	Rmax
8cRug_Walter_Radial_1	0.443	2.562	5.220
8cRug_Walter_Radial_2	0.472	2.644	5.420
8cRug_Walter_Radial_3	0.442	2.687	5.390
Média	0.452	2.631	5.343
8cRug_Walter_Tang_1	0.259	1.681	2.360
8cRug_Walter_Tang_2	0.253	1.552	2.040
8cRug_Walter_Tang_3	0.268	1.568	1.760
Média	0.260	1.600	2.053

3.6.1.1.2. Análise de desgaste para 8 ciclos - Fresa WALTER 4Z

As imagens resultantes da análise de microscopia electrónica de varrimento realizada na fresa da Walter de 4 lâminas podem ser visualizadas nas tabelas abaixo.

Tabela 52 – Resultados de desgaste obtidos na ferramenta WALTER 4Z para 8 ciclos

Desgaste de ferramentas em 8 ciclos		
		
Problemas	Causas possíveis	Possíveis soluções
<p>Lascagem na aresta</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Condições instáveis; • Classe muito dura/quebradiça. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tornar as condições da máquina mais estáveis; • Seleccionar uma ferramenta com uma geometria mais robusta e tenaz.

<p style="text-align: center;">Aresta de corte 1</p> 	<p style="text-align: center;">VB = 45.50 μm</p>
<p style="text-align: center;">Aresta de corte 2</p> 	<p style="text-align: center;">VB = 34.00 μm</p>
<p style="text-align: center;">Aresta de corte 3</p> 	<p style="text-align: center;">VB = 28.00 μm</p>



Para o percurso de maquinagem mais curto, de 7.5 metros, a fresa aparenta ter sofrido muito pouco desgaste, apresentando um VB muito pequeno, tendo sido identificado um só tipo de desgaste – lascagem na aresta – que não teve nenhuma ou quase nenhuma influência nos resultados recolhidos correspondentes à rugosidade. Nas imagens, a fresa apresenta diversas formações na superfície que não passam de impurezas, como óleo e aparas, que se devem essencialmente a uma limpeza não muito cuidada da ferramenta.

3.6.1.2. Fresa HPMT SE30 Plunge-Mill G10040005006 3Z para 8 ciclos

A fresa HPMT 3Z utilizada neste ensaio foi já caracterizada, conforme pode ser visto no subcapítulo 3.3.2.

3.6.1.2.1. Análise de rugosidade para 8 ciclos - Fresa HPMT 3Z

Nesta fresa, os valores obtidos para 8 ciclos, no que diz respeito ao Ra, foram melhores face aos obtidos para 16 ciclos, se bem que a diferença não seja elevada. Os valores de Rz é que foram claramente inferiores, obtendo-se uma superfície com menos amplitude entre picos e vales de rugosidade, mas sem resultados tão bons como a fresa da WALTER, mesmo assim.

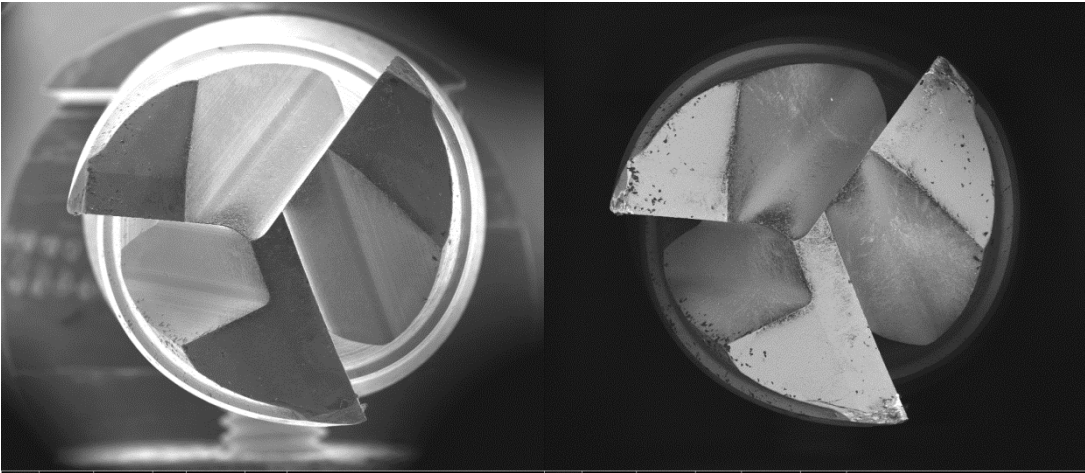

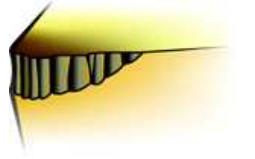
Tabela 53 - Valores de rugosidade Ra, Rz e Rmax das superfícies maquinadas pela HPMT 3Z – 8 ciclos (Valores em μm)

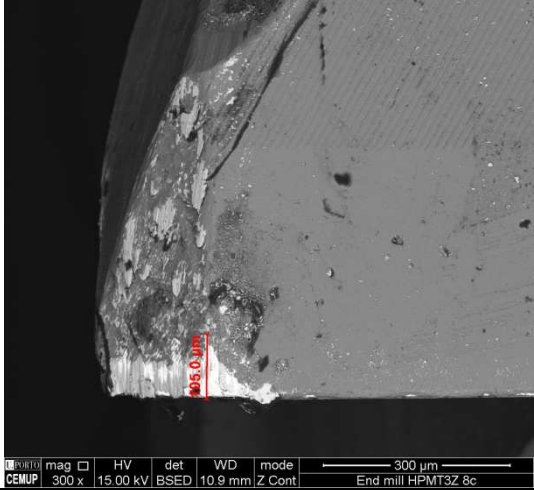
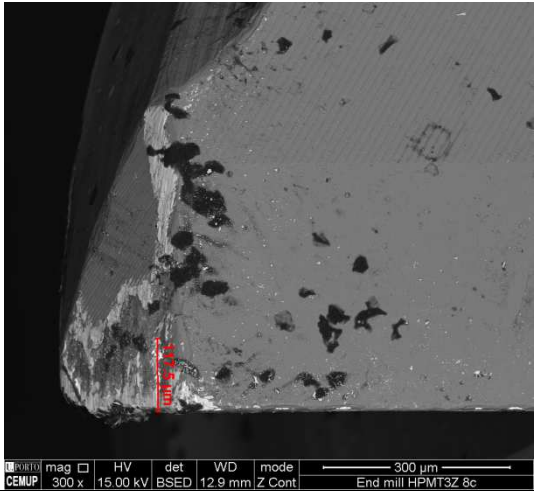
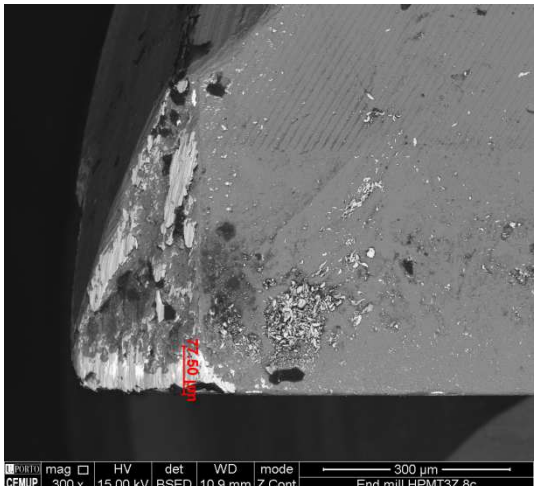
8 Ciclos	Ra	Rz	Rmax
8cRug_HPMT3Z_Radial_1	0.526	2.960	5.400
8cRug_HPMT3Z_Radial_2	0.493	2.779	4.420
8cRug_HPMT3Z_Radial_3	0.463	2.556	4.570
Média	0.494	2.765	4.797
8cRug_HPMT3Z_Tang_1	0.274	1.953	2.570
8cRug_HPMT3Z_Tang_2	0.313	1.914	2.290
8cRug_HPMT3Z_Tang_3	0.330	2.107	2.340
Média	0.306	1.991	2.400

3.6.1.2.2. Análise de desgaste para 8 ciclos - Fresa HPMT 3Z

As imagens resultantes da análise de microscopia electrónica de varrimento realizada na fresa da HPMT de 3 lâminas podem ser visualizadas na tabela abaixo.

Tabela 54 - Resultados de desgaste obtidos na ferramenta HPMT 3Z para 8 ciclos

Desgaste de ferramentas em 8 ciclos		
		
Problemas	Causas possíveis	Possíveis soluções
Lascagem na aresta 	<ul style="list-style-type: none"> • Condições instáveis; • Classe muito dura/quebradiça. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tornar as condições da máquina mais estáveis; • Seleccionar uma ferramenta com uma geometria mais robusta e tenaz.
Desgaste do flanco 	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidade de corte muito alta; • Classe muito tenaz; • Resistência ao desgaste insuficiente. 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduzir a velocidade de corte; • Seleccionar ferramenta mais adequada de acordo com a exigência por tenacidade ou resistência ao desgaste;

<p style="text-align: center;">Aresta de corte 1</p>  <p style="text-align: center;">VB = 105.00 μm</p>	
<p style="text-align: center;">Aresta de corte 2</p>  <p style="text-align: center;">VB = 117.50 μm</p>	
<p style="text-align: center;">Aresta de corte 3</p>  <p style="text-align: center;">VB = 77.50 μm</p>	

Esta fresa obteve resultados de rugosidade satisfatórios, que a posicionaram como a terceira melhor deste teste. Verificou-se, no entanto, alguma adesão de material maquinado na superfície da ferramenta, como se pode visualizar na Figura 92.

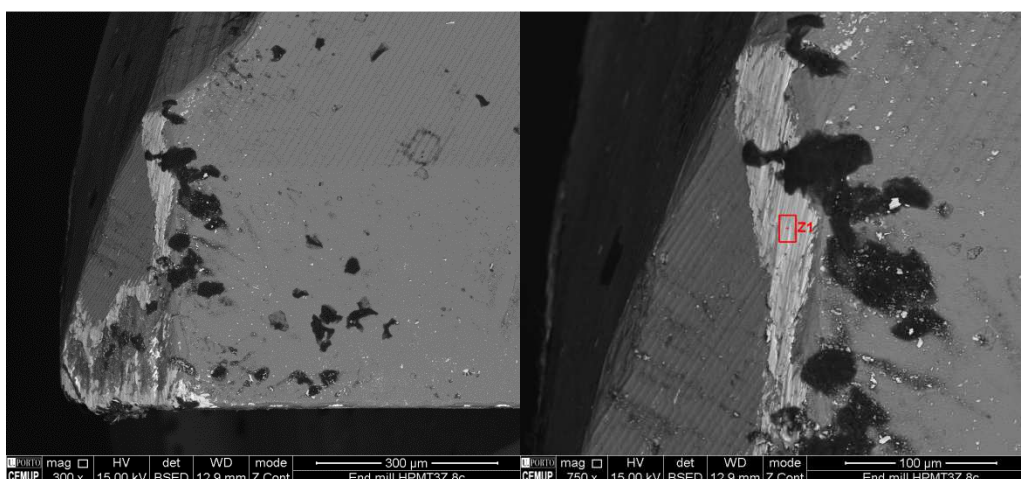


Figura 92 – Zona de adesão de material no flanco da fresa HPMT 3Z para 8 ciclos, assinalada como Z1

Este fenómeno pode ser o que antecede um possível arrancamento de revestimento. O gráfico da análise EDS desta zona é mostrado na figura abaixo.

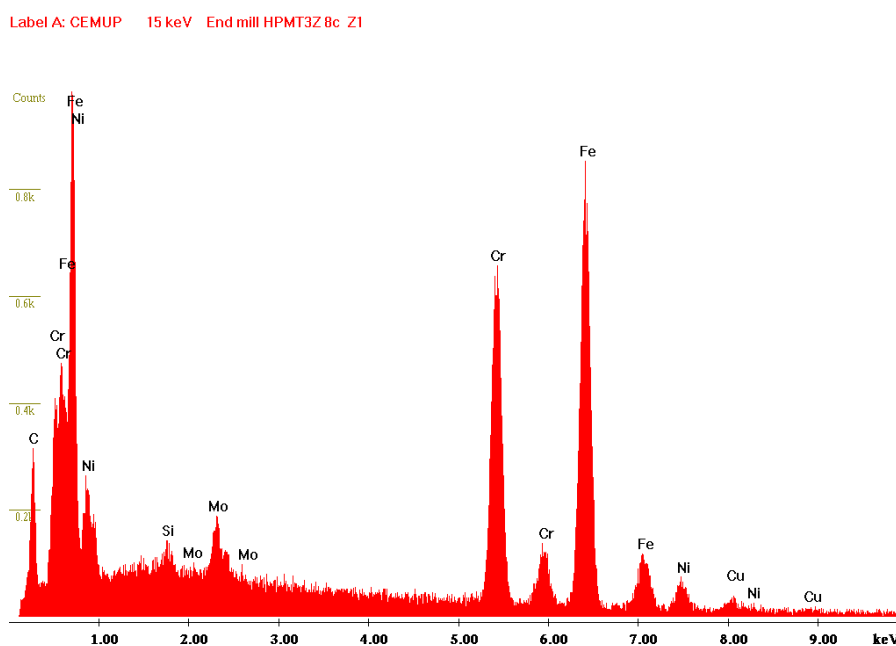


Figura 93 – Composição relativa à zona Z1 na ferramenta HPMT 3Z

3.6.1.3. Fresa HPMT SE45 Noviano Standard V47BXZ024GX040001 4Z para 8 ciclos

A fresa HPMT 4Z utilizada neste ensaio foi já caracterizada, conforme pode ser visto no subcapítulo 3.3.3.

3.6.1.3.1. Análise de rugosidade para 8 ciclos - Fresa HPMT 4Z

Os resultados obtidos com esta fresa são inexplicáveis. Mantiveram-se todos os parâmetros de maquinagem e condições de ensaio. Não se chegou a nenhuma conclusão relativamente às razões para que este ensaio tenha corrido tão mal. Provavelmente terá sido alguma anomalia do género colisão de aparas ou desprendimento de material da peça que terá chocado contra a superfície da fresa e terá danificado as arestas de corte, bem como, a existência de alguma heterogeneidade no material, visto este resultar de um processo de fundição em que a purificação não é levada à exaustão, tais como uma inclusão de fases mais duras. Também fica em aberto a possibilidade de a fresa ter algum defeito de fabrico que levou à falência prematura e bem vincada da mesma.

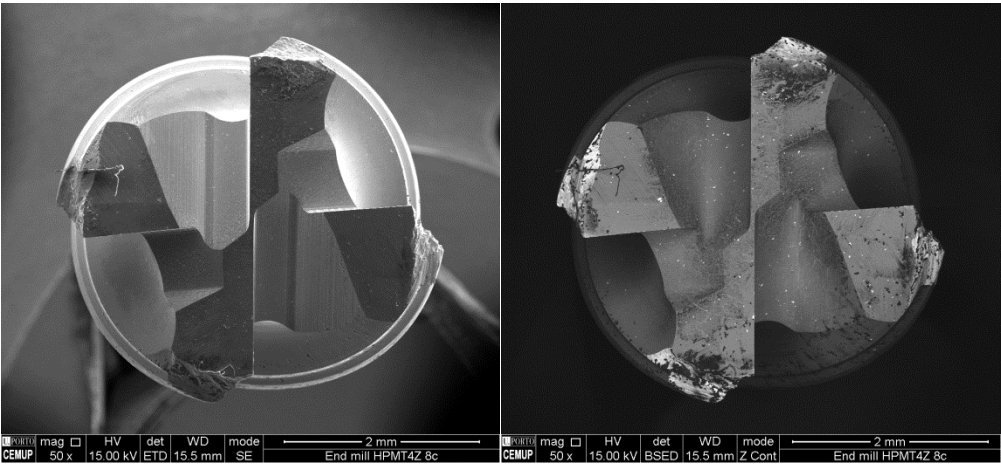


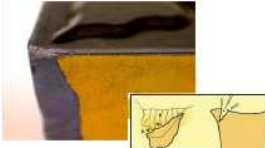

Tabela 55 - Valores de rugosidade Ra, Rz e Rmax das superfícies maquinadas pela HPMT 4Z – 8 ciclos (Valores em μm)

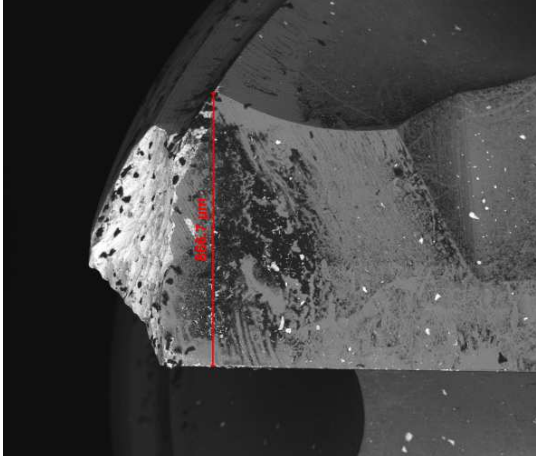
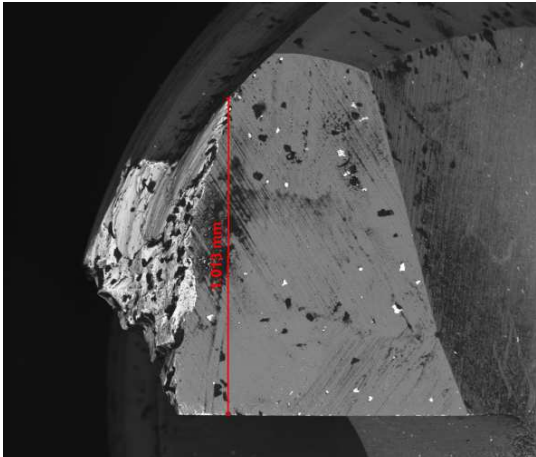
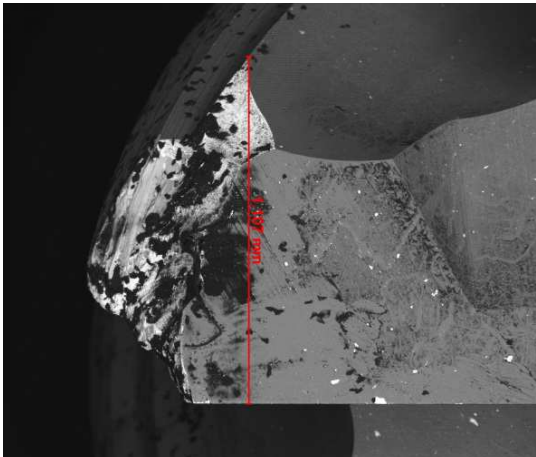
8 Ciclos	Ra	Rz	Rmax
8cRug_HPMT4Z_Radial_1	1.771	9.590	27.650
8cRug_HPMT4Z_Radial_2	1.594	9.432	23.530
8cRug_HPMT4Z_Radial_3	1.714	10.513	22.190
Média	1.693	9.845	24.457
8cRug_HPMT4Z_Tang_1	1.191	6.262	7.950
8cRug_HPMT4Z_Tang_2	1.280	6.679	7.070
8cRug_HPMT4Z_Tang_3	1.360	6.917	8.870
Média	1.277	6.619	7.963

3.6.1.3.2. Análise de desgaste para 8 ciclos - Fresa HPMT 4Z

As imagens resultantes da análise de microscopia electrónica de varrimento realizada na fresa da HPMT de 4 lâminas podem ser visualizadas na tabela abaixo.

Tabela 56 - Resultados de desgaste obtidos na ferramenta HPMT 4Z para 8 ciclos

Desgaste de ferramentas em 8 ciclos		
		
Problemas	Causas possíveis	Possíveis soluções
Entalhe 	<ul style="list-style-type: none"> • Atrito; • Oxidação; • Materiais pastosos e/ou endurecidos por trabalho; • Uso de ângulo de posição de ~90°; • A geometria é muito negativa. 	<ul style="list-style-type: none"> • Seleccionar uma aresta mais viva; • Diminuir o ângulo de posição; • Seleccionar uma ferramenta com cobertura CVD (para maior resistência ao desgaste); • Seleccionar uma ferramenta com cobertura PVD (para resistência à escamação e aresta postiça); • Variar a profundidade de corte.
Lascagem na aresta 	<ul style="list-style-type: none"> • Condições instáveis; • Classe muito dura/quebradiça. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tornar as condições da máquina mais estáveis; • Seleccionar uma ferramenta com uma geometria mais robusta e tenaz.
Quebra 	<ul style="list-style-type: none"> • Desgaste excessivo; • Classe muito tenaz (deformação e quebra); • Classe muito dura. 	<ul style="list-style-type: none"> • Maquinar em operações mais curtas (tempo em corte): verificar como o desgaste começa e qual o tipo de desgaste dominante; • Alterar os dados de corte;
Aresta de corte 1 		VB = 1.137 mm

<p style="text-align: center;">Aresta de corte 2</p>  <p style="text-align: right;">VB = 866.7 µm</p>	
<p style="text-align: center;">Aresta de corte 3</p>  <p style="text-align: right;">VB = 1.013 mm</p>	
<p style="text-align: center;">Aresta de corte 4</p>  <p style="text-align: right;">VB = 1.107 mm</p>	

Como já foi referido, esta fresa teve um desempenho lastimável e inesperado. As tentativas de justificação são várias e já foram referidas acima, mas a hipótese mais plausível será a existência de heterogeneidades na zona onde se iniciou a maquinagem, sob a forma de inclusões de fases diferentes e, provavelmente, mais duras que, através de imagens recolhidas por SEM das aparas pós-ensaio, se podem observar nas figuras seguintes.

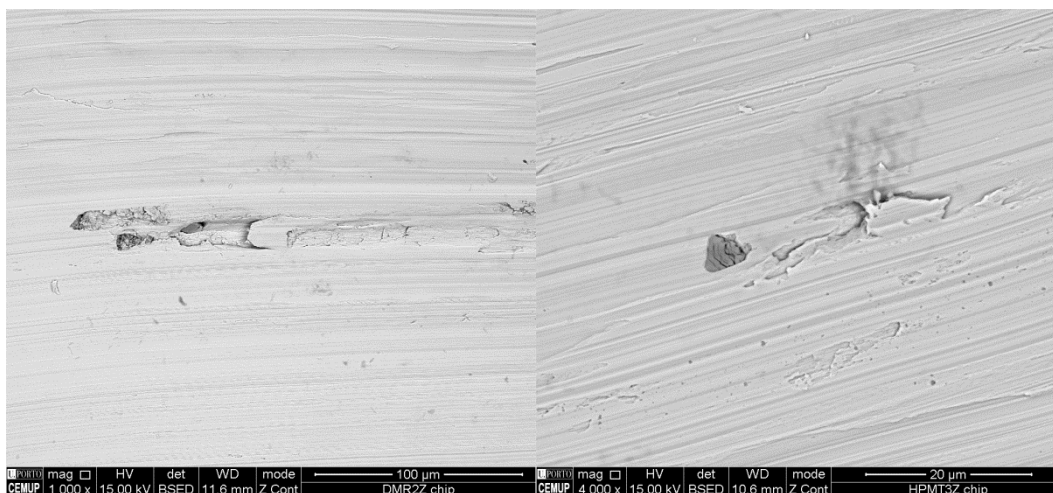


Figura 94 – Inclusões de heterogeneidades (fases mais duras) no material, encontradas através da análise das aparas pós-ensaios

Nestas imagens é possível verificar a presença dessas mesmas inclusões seguidas de uma espécie de “rasto” que é formado após o embate da fresa nessas formações, demonstrando a violência deste fenómeno, o que se julga ser a resposta para o maior desgaste sofrido em algumas das ferramentas, mas com particular incidência nesta.

3.6.1.4. Fresa DORMER Spectrum S812HA 2Z para 8 ciclos

A fresa DORMER 2Z utilizada neste ensaio foi já caracterizada, conforme pode ser visto no capítulo 3.3.4.

3.6.1.4.1. Análise de rugosidade para 8 ciclos - Fresa DORMER 2Z

Esta fresa teve resultados surpreendentes para este número de ciclos, ao nível de Ra e Rz, radial e tangencial, sendo os mais baixos de todos os ensaios, obtendo-se também a menor diferença entre Ra radial e tangencial, ou seja, o relevo da fronteira entre passagens era quase imperceptível. Por outro lado, a diferença dos resultados de 8 para 16 ciclos revelaram que o ritmo de degradação desta fresa é muito rápido, não dando grandes garantias no que diz respeito à sua durabilidade.

Tabela 57 - Valores de rugosidade Ra, Rz e Rmax das superfícies maquinadas pela fresa DORMER 2Z – 8 ciclos (Valores em μm)

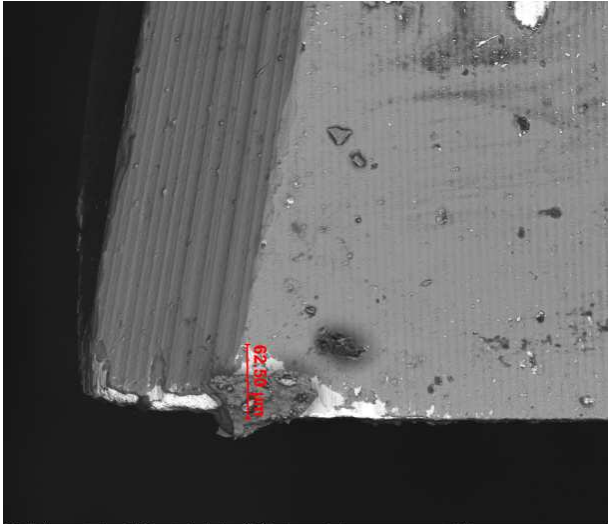
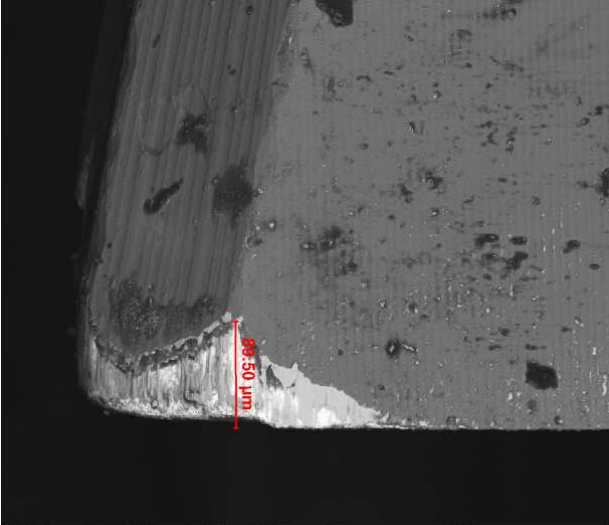
8 Ciclos	Ra	Rz	Rmax
8cRug_Dormer_Radial_1	0.315	1.818	2.360
8cRug_Dormer_Radial_2	0.248	1.574	2.230
8cRug_Dormer_Radial_3	0.289	1.961	3.200
Média	0.284	1.784	2.597
8cRug_Dormer_Tang_1	0.188	1.255	1.610
8cRug_Dormer_Tang_2	0.167	1.076	1.270
8cRug_Dormer_Tang_3	0.185	1.329	1.600
Média	0.180	1.220	1.493

3.6.1.4.2. Análise de desgaste para 8 ciclos - Fresa DORMER 2Z

As imagens resultantes da análise de microscopia electrónica de varrimento realizada na fresa da Dormer de 2 lâminas podem ser visualizadas na tabela abaixo.

Tabela 58 - Resultados de desgaste obtidos na ferramenta DORMER 2Z para 8 ciclos

Desgaste de ferramentas em 8 ciclos		
Problemas	Causas possíveis	Possíveis soluções
Desgaste do flanco 	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidade de corte muito alta; • Classe muito tenaz; • Resistência ao desgaste insuficiente. 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduzir a velocidade de corte; • Seleccionar ferramenta mais adequada de acordo com a exigência por tenacidade ou resistência ao desgaste;
Lascagem na aresta 	<ul style="list-style-type: none"> • Condições instáveis; • Classe muito dura/quebradiça. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tornar as condições da máquina mais estáveis; • Seleccionar uma ferramenta com uma geometria mais robusta e tenaz.

<p style="text-align: center;">Aresta de corte 1</p>  <p style="text-align: right;">VB = 62.50 μm</p> <table border="1" style="width: 100%; font-size: small;"> <tr> <td>PORTO</td> <td>mag</td> <td>HV</td> <td>det</td> <td>WD</td> <td>mode</td> <td>200 μm</td> </tr> <tr> <td>CEMUP</td> <td>500 x</td> <td>15.00 kV</td> <td>BSED</td> <td>15.3 mm</td> <td>Z Cont</td> <td>End mill DMR2Z 8c</td> </tr> </table>	PORTO	mag	HV	det	WD	mode	200 μ m	CEMUP	500 x	15.00 kV	BSED	15.3 mm	Z Cont	End mill DMR2Z 8c	
PORTO	mag	HV	det	WD	mode	200 μ m									
CEMUP	500 x	15.00 kV	BSED	15.3 mm	Z Cont	End mill DMR2Z 8c									
<p style="text-align: center;">Aresta de corte 2</p>  <p style="text-align: right;">VB = 89.50 μm</p> <table border="1" style="width: 100%; font-size: small;"> <tr> <td>PORTO</td> <td>mag</td> <td>HV</td> <td>det</td> <td>WD</td> <td>mode</td> <td>200 μm</td> </tr> <tr> <td>CEMUP</td> <td>500 x</td> <td>15.00 kV</td> <td>BSED</td> <td>15.2 mm</td> <td>Z Cont</td> <td>End mill DMR2Z 8c</td> </tr> </table>	PORTO	mag	HV	det	WD	mode	200 μ m	CEMUP	500 x	15.00 kV	BSED	15.2 mm	Z Cont	End mill DMR2Z 8c	
PORTO	mag	HV	det	WD	mode	200 μ m									
CEMUP	500 x	15.00 kV	BSED	15.2 mm	Z Cont	End mill DMR2Z 8c									

Em concordância com os resultados obtidos na análise de rugosidade superficial (que apresentou resultados excelentes), esta fresa não apresenta grandes danos nas suas arestas de corte. O que se pode referir é que uma das arestas apresenta um VB ligeiramente maior que a outra. O que explica esta situação é que a aresta com um VB maior se trata da aresta que faz um desbaste inicial com maior taxa de remoção de material, enquanto que a outra se limita a dar uma passagem de rectificação da superfície gerada pela lâmina contrária, sofrendo, conseqüentemente, menos desgaste.

3.6.2. Resultados para 16 ciclos – percurso de maquinagem de 15 metros

Realizaram-se as análises de rugosidade superficial e desgaste das ferramentas para o percurso de maquinagem de 16 ciclos, o qual corresponde a cerca de 15 metros de desbaste.

3.6.2.1. Fresa WALTER Protostar N45 Compact H30140418-4 para 16 ciclos

A fresa WALTER 4Z utilizada neste ensaio foi já caracterizada, conforme pode ser visto no subcapítulo 3.3.1.

3.6.2.1.1. Análise de rugosidade para 16 ciclos - Fresa WALTER 4Z

Os dados de rugosidade obtidos experimentalmente para o percurso de maquinagem de 16 ciclos são os apresentados na tabela seguinte. À semelhança do estudo anterior, foram determinadas as respectivas médias que serão consideradas como valores de referência representativos do estado geral do nível de rugosidade superficial da face maquinada.

Os melhores valores de Ra para 16 ciclos, tanto radial como tangencial, foram obtidos com esta fresa. Devido à sua configuração (4 lâminas) e robustez, torna-se ideal para este tipo de aplicações e para maquinar materiais mais duros, como o ensaiado nesta experiência.

Como já foi referido anteriormente, esta fresa apresentou níveis de Ra e Rz tangencial ligeiramente inferiores para 16 ciclos, situação para a qual não foi encontrada justificação. Contudo, não se trata de uma diferença relevante. Radialmente, os valores de rugosidade “pioraram” como já era expectável, mas também sem grandes diferenças, o que leva a crer que esta fresa apresenta uma longevidade muito acima da das concorrentes, não aparentando grandes sinais de desgaste no fim dos ensaios de maior duração – 16 ciclos.

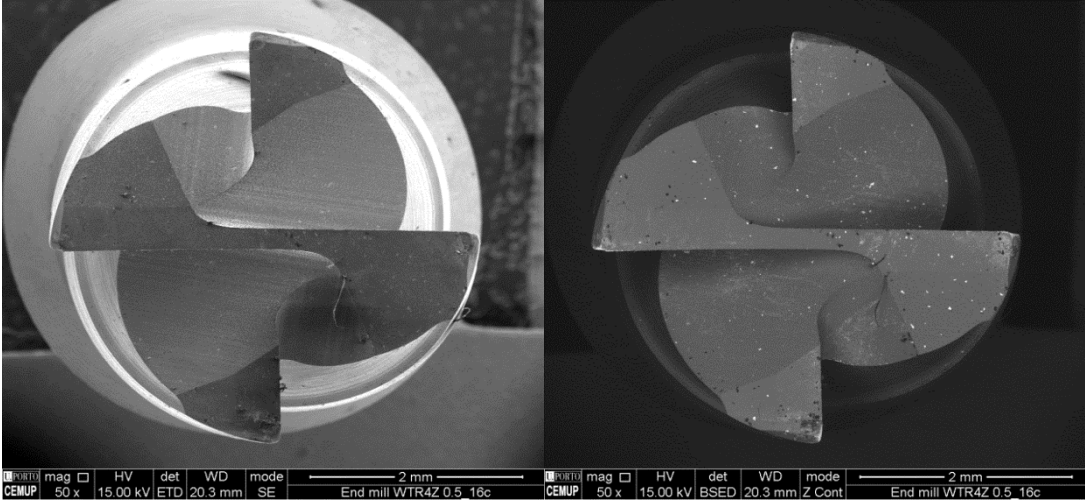


Tabela 59 – Valores de rugosidade Ra, Rz e Rmax das superfícies maquinadas pela WALTER 4Z – 16 ciclos (Valores em μm)

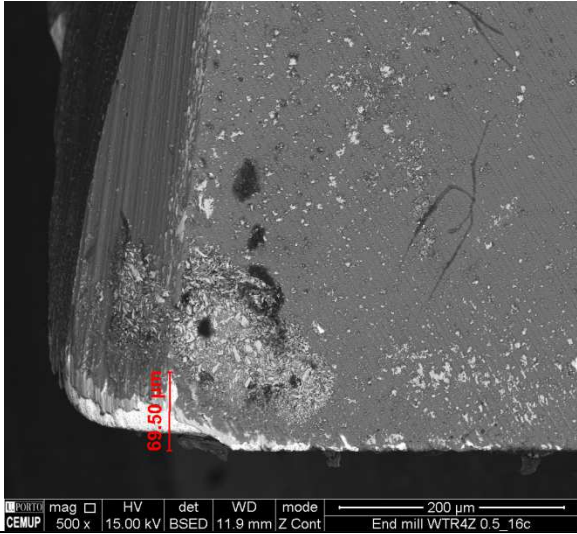
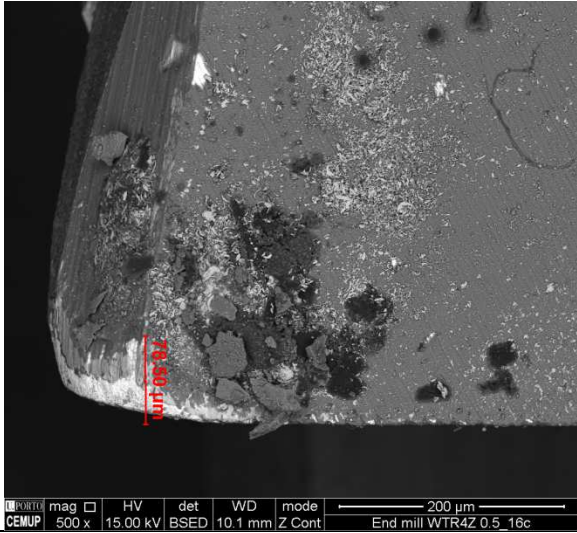
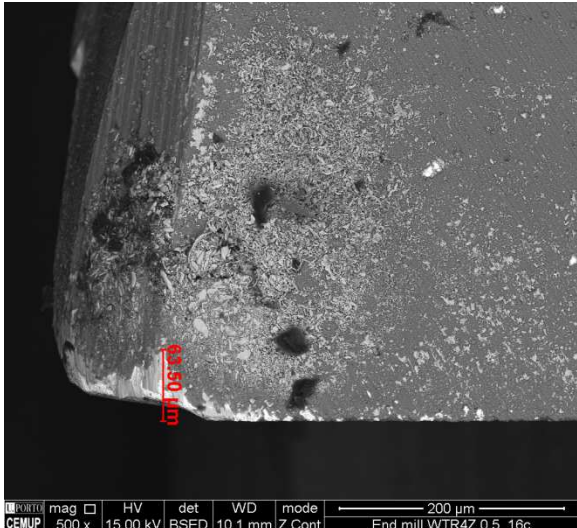
16 Ciclos	Ra	Rz	Rmax
16cRug_Walter_Radial_1	0.531	3.509	6.460
16cRug_Walter_Radial_2	0.545	3.262	7.690
16cRug_Walter_Radial_3	0.504	2.784	6.670
Média	0.527	3.185	6.940
16cRug_Walter_Tang_1	0.247	1.515	1.740
16cRug_Walter_Tang_2	0.261	1.574	1.780
16cRug_Walter_Tang_3	0.244	1.553	1.720
Média	0.251	1.547	1.747

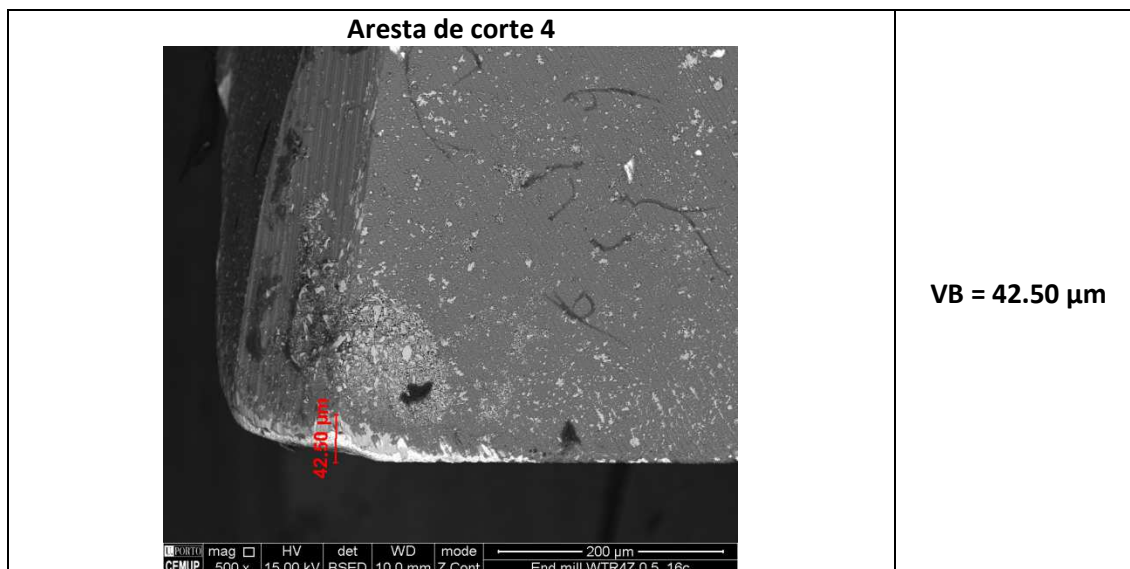
3.6.2.1.2. Análise de desgaste para 16 ciclos - Fresa WALTER 4Z

As imagens resultantes da análise de microscopia electrónica de varrimento realizada na fresa da Walter de 4 lâminas podem ser visualizadas nas tabelas abaixo, através de análise de electrões secundários (esquerda) e electrões retrodifundidos (direita).

Tabela 60 – Resultados de desgaste obtidos na ferramenta WALTER 4Z para 16 ciclos

Desgaste de ferramentas em 16 ciclos		
		
Problemas	Causas possíveis	Possíveis soluções
<p>Entalhe</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Atrito • Oxidação • Materiais pastosos e/ou endurecidos por trabalho; • Uso de ângulo de posição de ~90°; • A geometria é muito negativa. 	<ul style="list-style-type: none"> • Seleccionar uma aresta mais viva; • Diminuir o ângulo de posição; • Seleccionar uma ferramenta com cobertura CVD (para maior resistência ao desgaste); • Seleccionar uma ferramenta com cobertura PVD (para resistência à escamação e aresta postiça); • Variar a profundidade de corte.
<p>Lascagem na aresta</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Condições instáveis; • Classe muito dura/quebradiça. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tornar as condições da máquina mais estáveis; • Seleccionar uma ferramenta com uma geometria mais robusta e tenaz.

Análise das arestas de corte	
<p>Aresta de corte 1</p>  <p>69.50 µm</p> <p>PORTO mag HV det WD mode CEMUP 500 x 15.00 kV BSED 11.9 mm Z Cont 200 µm End mill WTR4Z 0.5_16c</p>	<p>VB = 69.50 µm</p>
<p>Aresta de corte 2</p>  <p>78.50 µm</p> <p>PORTO mag HV det WD mode CEMUP 500 x 15.00 kV BSED 10.1 mm Z Cont 200 µm End mill WTR4Z 0.5_16c</p>	<p>VB = 78.50 µm</p>
<p>Aresta de corte 3</p>  <p>63.50 µm</p> <p>PORTO mag HV det WD mode CEMUP 500 x 15.00 kV BSED 10.1 mm Z Cont 200 µm End mill WTR4Z 0.5_16c</p>	<p>VB = 63.50 µm</p>



Na superfície da fresa foram detectadas duas zonas diferentes. A zona ainda revestida e outra já com o substrato da ferramenta evidenciado. Este fenómeno acontece devido ao desgaste natural provocado pela fricção da fresa na peça de trabalho. Também se podem verificar pontos brancos ao longo da superfície, provocados pelo choque da apara extraída com a superfície da fresa. Verifica-se também uma zona onde, aparentemente, ficou material da peça de trabalho e impurezas (ex.: partículas presentes no óleo) agarradas. Esta adesão pode dever-se à configuração desta fresa ser de 4 lâminas, que leva a uma maior dificuldade na extracção da apara da zona de trabalho e posterior acumulação de impurezas diversas.

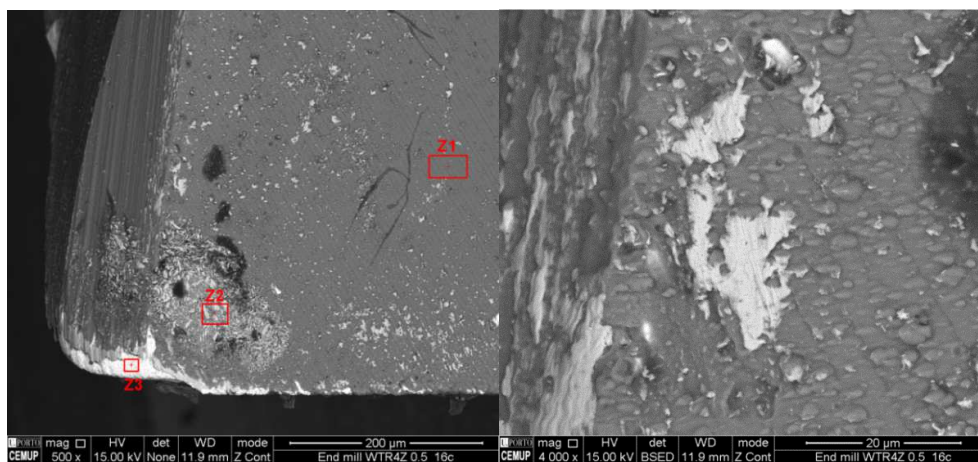


Figura 95 – Diferentes zonas e impurezas detectadas na superfície da fresa da WALTER 4Z

Tabela 61 – Definição das diferentes zonas encontradas na superfície da fresa da WALTER 4Z

Z1	Z1 trata-se do revestimento – Nitreto de titânio-alumínio / TAX (Figura 96)
Z2	Z2 é material da peça de trabalho, partículas de substrato e impurezas – Maioritariamente carbono, titânio, cromo, ferro e manganês (Figura 97)
Z3	Z3 é o substrato da fresa – Metal duro/ Carboneto de Tungsténio (Figura 98)

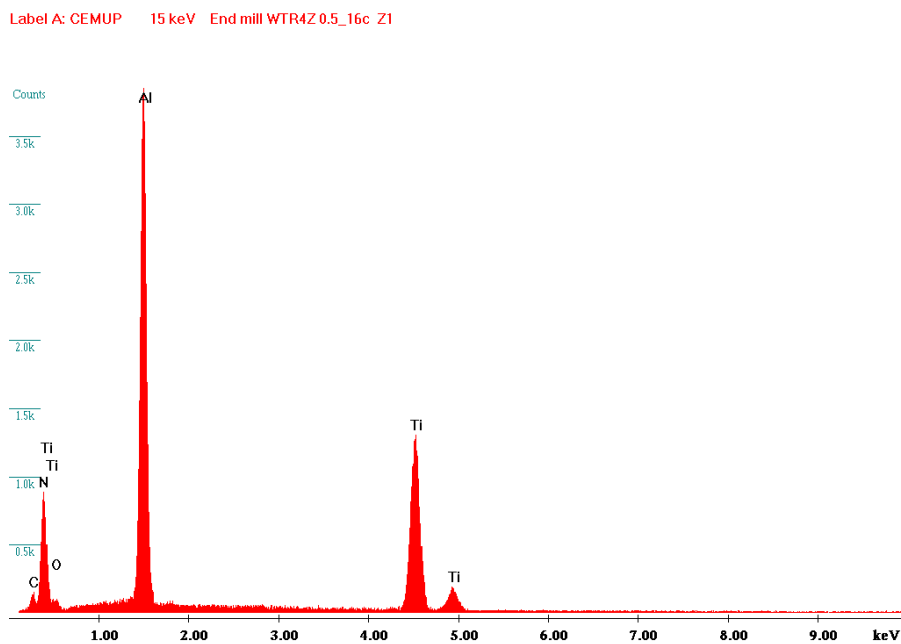


Figura 96 – Composição relativa à zona Z1 na ferramenta WALTER 4Z

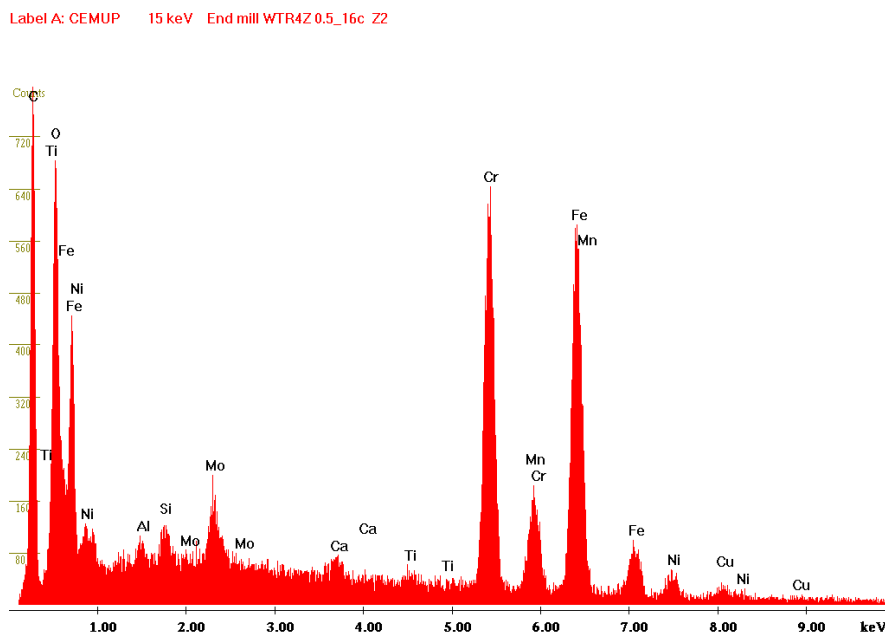


Figura 97 – Composição relativa à zona Z2 na ferramenta WALTER 4Z

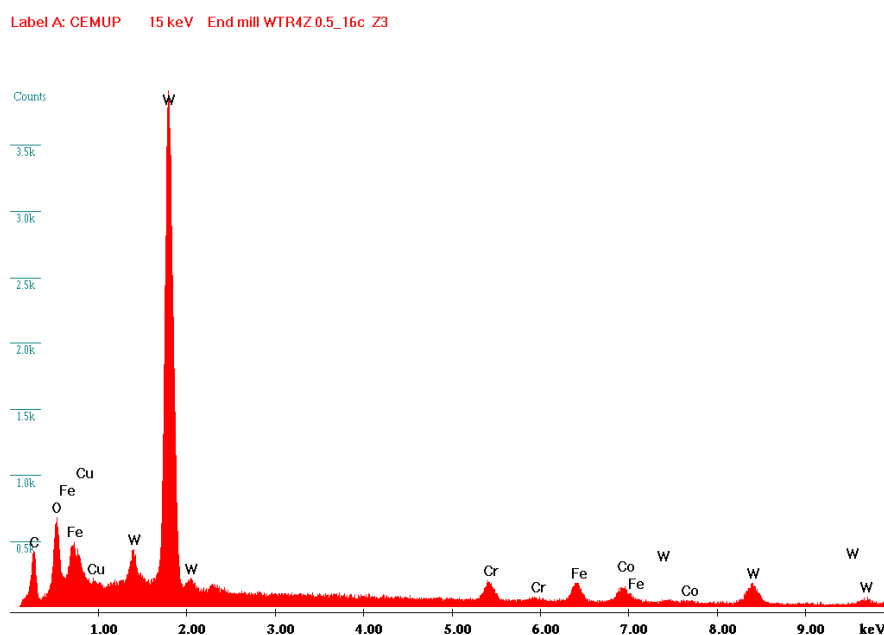


Figura 98 – Composição relativa à zona Z3 na ferramenta WALTER 4Z

3.6.2.2. Fresa HPMT SE30 Plunge-Mill G10040005006 3Z para 16 ciclos

As características da fresa HPMT 3Z utilizada neste ensaio foram apresentadas no subcapítulo 3.3.2.

3.6.2.2.1. Análise de rugosidade para 16 ciclos - Fresa HPMT 3Z

A rugosidade superficial alcançada por esta fresa coloca-a na última posição, para 16 ciclos, no que diz respeito ao Ra e Rz tangenciais (ver Tabela 62), ou seja, na qualidade da superfície gerada, embora quase em igualdade de circunstâncias com a fresa DORMER 2Z. Portanto, a superfície resultante apresenta maior rugosidade média e maior amplitude entre picos e vales de rugosidade, deixando uma superfície frágil, com tendência a perder as dimensões iniciais, comprometendo o seu uso em aplicações onde o toleranciamento dimensional é apertado. Quanto à rugosidade radial, apresenta-se como a terceira melhor, apresentando melhores resultados do que a HPMT 4Z e piores do que a DORMER 2Z, deixando uma marca de passo com algum relevo. Esta ferramenta destaca-se pela sua polivalência em termos de abordagens de maquinagem e materiais admissíveis.

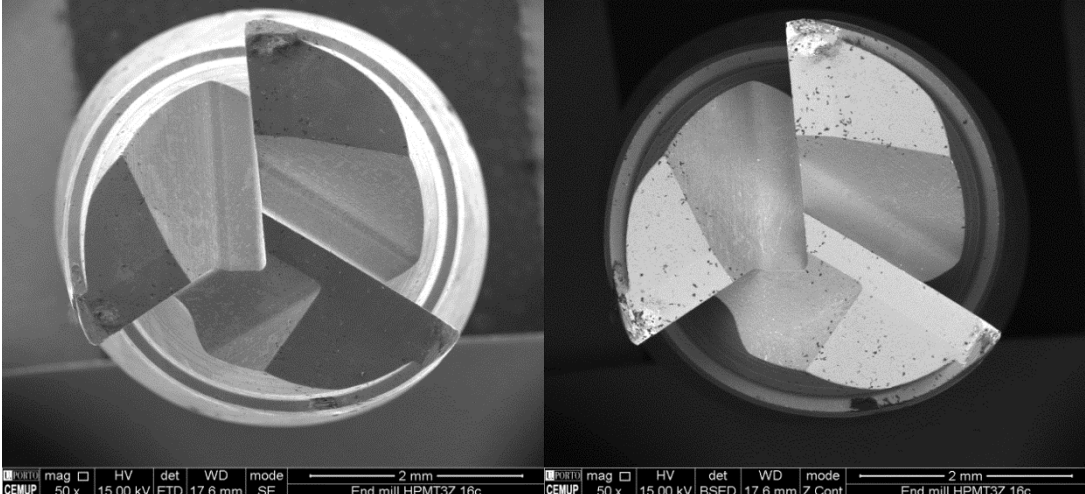

Tabela 62 - Valores de rugosidade Ra, Rz e Rmax das superfícies maquinadas pela HPMT 3Z – 16 ciclos (Valores em μm)


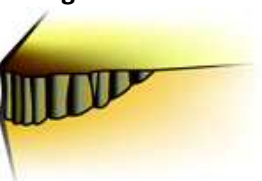
16 Ciclos	Ra	Rz	Rmax
16cRug_HPMT3Z_Radial_1	0.633	3.194	5.050
16cRug_HPMT3Z_Radial_2	0.612	3.077	4.060
16cRug_HPMT3Z_Radial_3	0.663	3.445	5.160
Média	0.636	3.239	4.757
16cRug_HPMT3Z_Tang_1	0.386	2.280	2.410
16cRug_HPMT3Z_Tang_2	0.370	2.233	2.500
16cRug_HPMT3Z_Tang_3	0.350	2.099	2.460
Média	0.369	2.204	2.457

3.6.2.2.2. Análise de desgaste para 16 ciclos - Fresa HPMT 3Z

As imagens resultantes da análise de microscopia electrónica de varrimento realizada na fresa da HPMT de 3 lâminas podem ser visualizadas na tabela abaixo, através de análise de electrões secundários (esquerda) e electrões retrodifundidos (direita).

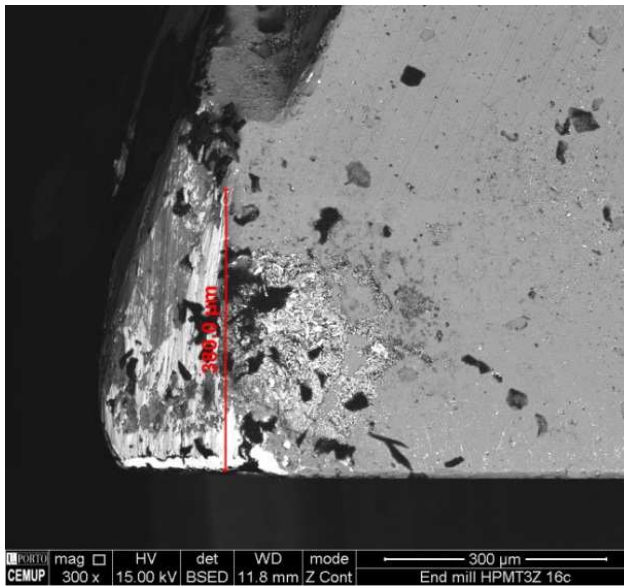
Tabela 63 - Resultados de desgaste obtidos na ferramenta HPMT 3Z para 16 ciclos

Desgaste de ferramentas em 16 ciclos		
		
Problemas	Causas possíveis	Possíveis soluções
Entalhe 	<ul style="list-style-type: none"> • Atrito • Oxidação • Materiais pastosos e/ou endurecidos por trabalho; • Uso de ângulo de posição de $\sim 90^\circ$; • A geometria é muito negativa. 	<ul style="list-style-type: none"> • Seleccionar uma aresta mais viva; • Diminuir o ângulo de posição; • Seleccionar uma ferramenta com cobertura CVD (para maior resistência ao desgaste); • Seleccionar uma ferramenta com cobertura PVD (para resistência à escamação e aresta postiça); • Variar a profundidade de corte.

<p>Lascagem na aresta</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Condições instáveis; • Classe muito dura/quebradiça. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tornar as condições da máquina mais estáveis; • Seleccionar uma ferramenta com uma geometria mais robusta e tenaz.
<p>Desgaste do flanco</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidade de corte muito alta; • Classe muito tenaz; • Resistência ao desgaste insuficiente. 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduzir a velocidade de corte; • Seleccionar ferramenta mais adequada de acordo com a exigência por tenacidade ou resistência ao desgaste;

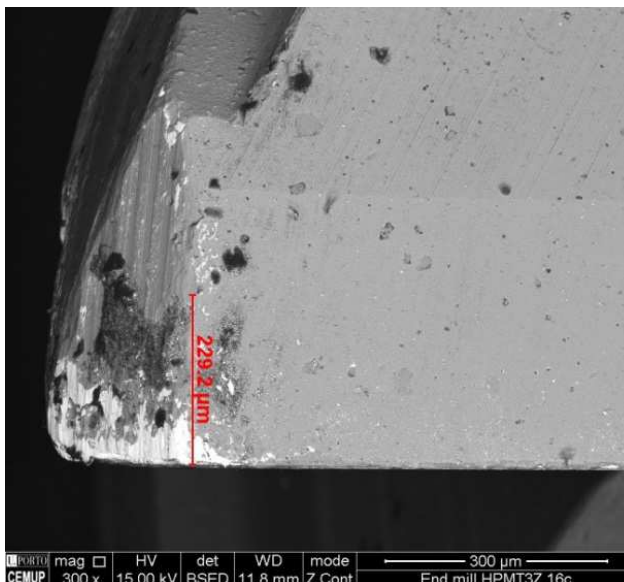
Análise das arestas de corte

Aresta de corte 1

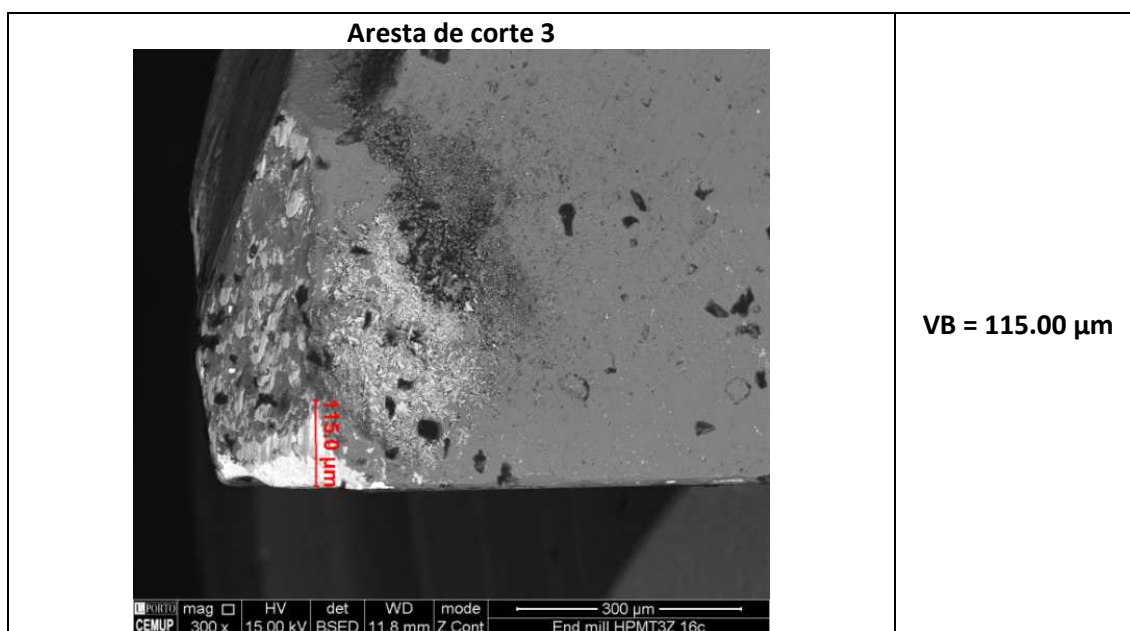


VB = 380.00 µm

Aresta de corte 2



VB = 229.20 µm



Esta ferramenta foi a que apresentou os piores resultados em 16 ciclos, a nível de Ra e Rz tangencial, como já foi referido, apesar de, mesmo assim, serem bastante satisfatórios. Esta fresa é mais vocacionada para o desbaste em mergulho (*slotting*), desbaste “em cheio” (*down milling*), devido às suas excelentes capacidades de extracção de aparas (menor número de lâminas). Em termos de durabilidade, provavelmente também não será a que mais eficiente e produtiva, especialmente neste tipo de material, mas tem como ponto forte, o seu preço mais económico, que faz dela uma boa escolha para uma série de aplicações. Para esta ferramenta decidiu-se que não seria necessário uma análise EDS, visto que o custo-benefício dessa análise era francamente desfavorável.

3.6.2.3. Fresa HPMT SE45 Noviano Standard V47BXZ024GX040001 4Z para 16 ciclos

Detalhes sobre as características da fresa HPMT 4Z são apresentados no subcapítulo 3.3.3.

3.6.2.3.1. Análise de rugosidade para 16 ciclos - Fresa HPMT 4Z

Esta fresa foi a que apresentou resultados mais inconsistentes. Esquecendo os resultados obtidos para 8 ciclos, esta fresa apresentou um Ra radial muito elevado, para 16 ciclos, face às outras. Esta situação pode-se dever ao facto de, aquando da maquinagem e segundo se pode verificar nas fotos de microscopia, a fresa ter perdido as extremidades da

aresta de corte de uma forma mais notória, o que originou um maior relevo na zona de fronteira das passagens da fresa. Por outro lado, apresenta um Ra tangencial surpreendentemente baixo, fazendo mesmo frente à melhor fresa do teste (WALTER 4Z – pela sua consistência de resultados), com a vantagem de ser muito mais barata. No entanto, é de prever que não tenha uma durabilidade semelhante, como se pode comprovar pelos fenómenos apontados acima.

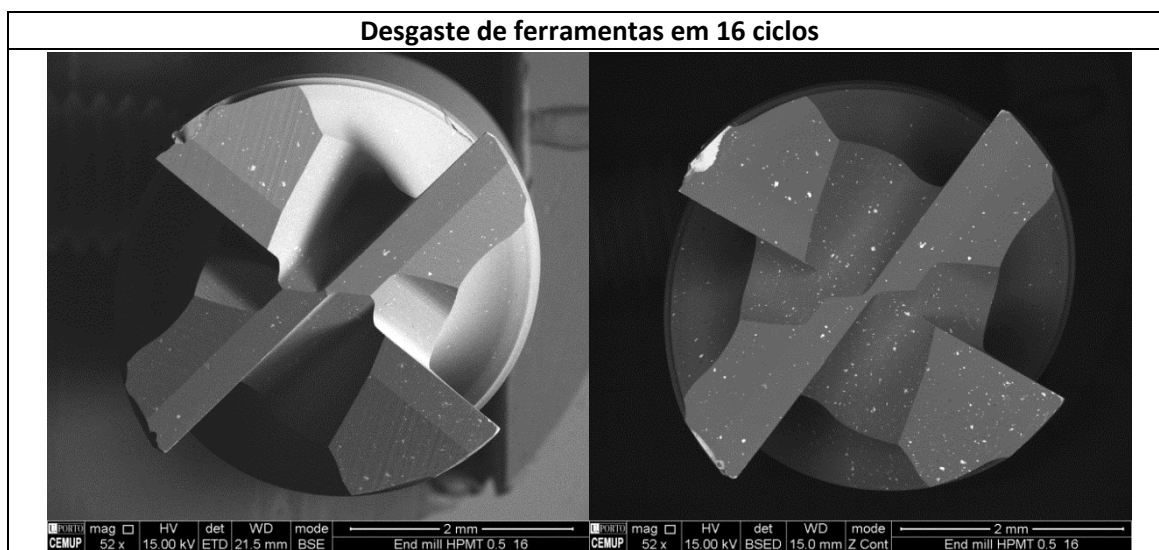
Tabela 64 - Valores de rugosidade Ra, Rz e Rmax das superfícies maquinadas pela HPMT 4Z – 16 ciclos (Valores em μm)



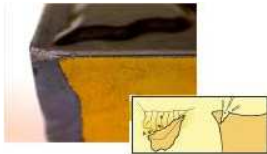
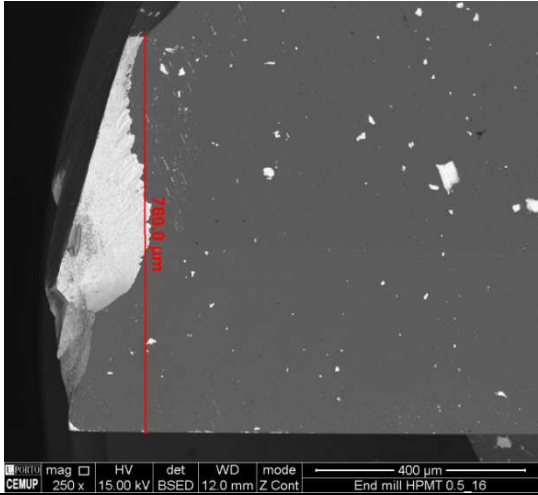
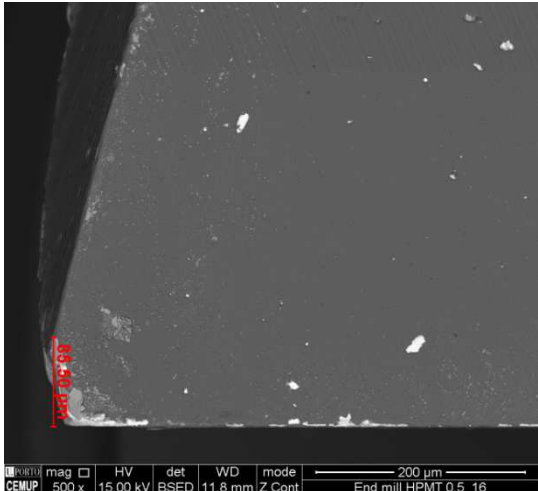
16 Ciclos	Ra	Rz	Rmax
16cRug_HPMT4Z_Radial_1	1.184	6.528	15.010
16cRug_HPMT4Z_Radial_2	1.117	6.105	15.440
16cRug_HPMT4Z_Radial_3	1.079	6.393	14.860
Média	1.127	6.342	15.103
16cRug_HPMT4Z_Tang_1	0.259	1.849	2.500
16cRug_HPMT4Z_Tang_2	0.255	1.758	2.100
16cRug_HPMT4Z_Tang_3	0.246	1.671	1.960
Média	0.253	1.759	2.187

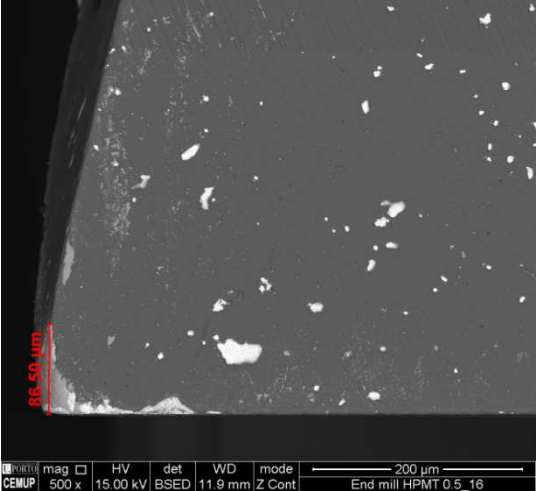
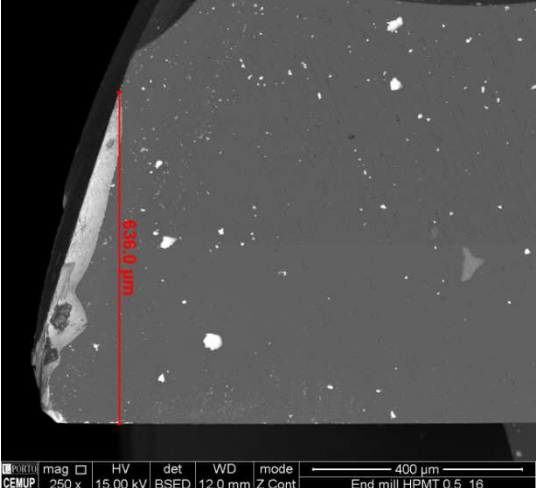
3.6.2.3.2. Análise de desgaste para 16 ciclos - Fresa HPMT 4Z

As imagens resultantes da análise de microscopia electrónica de varrimento realizada na fresa da HPMT de 4 lâminas podem ser visualizadas na tabela abaixo, através de análise de electrões secundários (esquerda) e electrões retrodifundidos (direita).

Tabela 65 - Resultados de desgaste obtidos na ferramenta HPMT 4Z para 16 ciclos



Problemas	Causas possíveis	Possíveis soluções
Entalhe 	<ul style="list-style-type: none"> • Atrito • Oxidação • Materiais pastosos e/ou endurecidos por trabalho; • Uso de ângulo de posição de ~90°; • A geometria é muito negativa. 	<ul style="list-style-type: none"> • Seleccionar uma aresta mais viva; • Diminuir o ângulo de posição; • Seleccionar uma ferramenta com cobertura CVD (para maior resistência ao desgaste); • Seleccionar uma ferramenta com cobertura PVD (para resistência à escamação e aresta postiça); • Variar a profundidade de corte.
Lascagem na aresta 	<ul style="list-style-type: none"> • Condições instáveis; • Classe muito dura/quebradiça. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tornar as condições da máquina mais estáveis; • Seleccionar uma ferramenta com uma geometria mais robusta e tenaz.
Quebra 	<ul style="list-style-type: none"> • Desgaste excessivo; • Classe muito tenaz (deformação e quebra); • Classe muito dura. 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduzir vibrações (ex.: melhorar as condições de fixação tanto da peça como da ferramenta); • Alterar os dados de corte.
Aresta de corte 1		
		VB = 760.00 µm
Aresta de corte 2		
		VB = 85.50 µm

<p style="text-align: center;">Aresta de corte 3</p> 	<p style="text-align: center;">VB = 86.50 µm</p>
<p style="text-align: center;">Aresta de corte 4</p> 	<p style="text-align: center;">VB = 636.00 µm</p>

Na superfície da ferramenta é possível verificar pontos brancos, os quais dizem respeito a zonas de falta de revestimento. Este fenómeno acontece devido ao choque da apara extraída com a superfície da fresa.

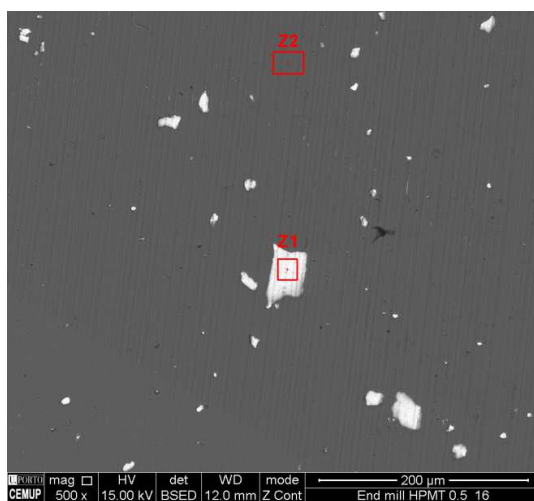
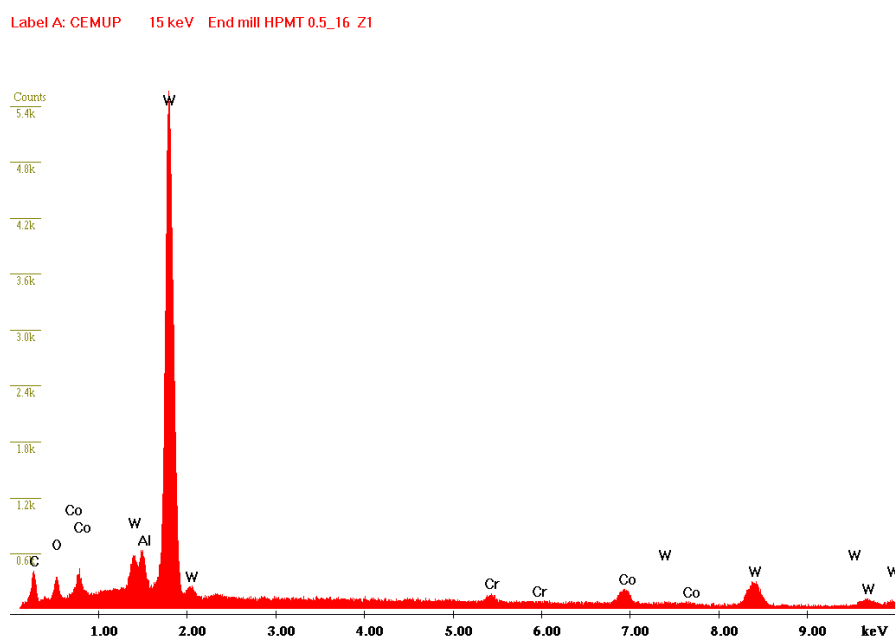
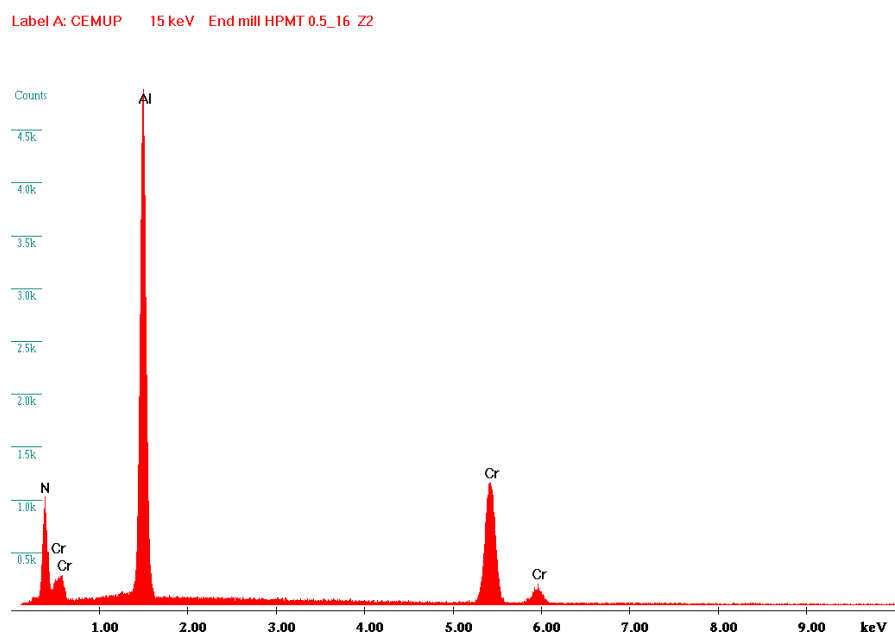


Figura 99 – Diferentes zonas detectadas na fresa HPMT 4Z em 16 ciclos

Tabela 66 – Definição das diferentes zonas encontradas na superfície da fresa da HPMT 4Z

Z1	é o substrato da fresa – Metal duro/ Carboneto de Tungsténio (Figura 100)
Z2	trata-se do revestimento – Alcrona/ Nitreto de Crómio Alumínio/ AlCrN (Figura 101)

**Figura 100 – Composição relativa à zona Z1 na ferramenta HPMT 4Z****Figura 101 – Composição relativa à zona Z2 na ferramenta HPMT 4Z**

3.6.2.4. Fresa DORMER Spectrum S812HA 2Z para 16 ciclos

As características técnicas da fresa DORMER 2Z são apresentadas em detalhe no subcapítulo 3.3.4.

3.6.2.4.1. *Análise de rugosidade para 16 ciclos - Fresa DORMER 2Z*

Os resultados de rugosidade tangencial desta fresa não são os melhores, ficando na terceira posição, muito longe dos resultados obtidos para 8 ciclos (que foram os melhores), mas não deixam de ser bastante interessantes, porque há que ter em conta que são só duas lâminas a fazer o mesmo trabalho que as outras, ou seja, cada dente faz o dobro do trabalho efectuado por uma fresa de 4 lâminas, por exemplo. A nível de Ra radial situa-se também na terceira posição. Com estes resultados pode-se concluir que esta fresa apresenta propriedades interessantes a nível de qualidade superficial produzida, principalmente para percursos de maquinagem pequenos, mas devido ao seu alto ritmo de degradação, a sua longevidade é curta. A par da HPMT 3Z, a fresa da DORMER 2Z destaca-se também pela sua polivalência relativamente às estratégias de maquinagem possíveis e gama de materiais onde pode ser aplicada.

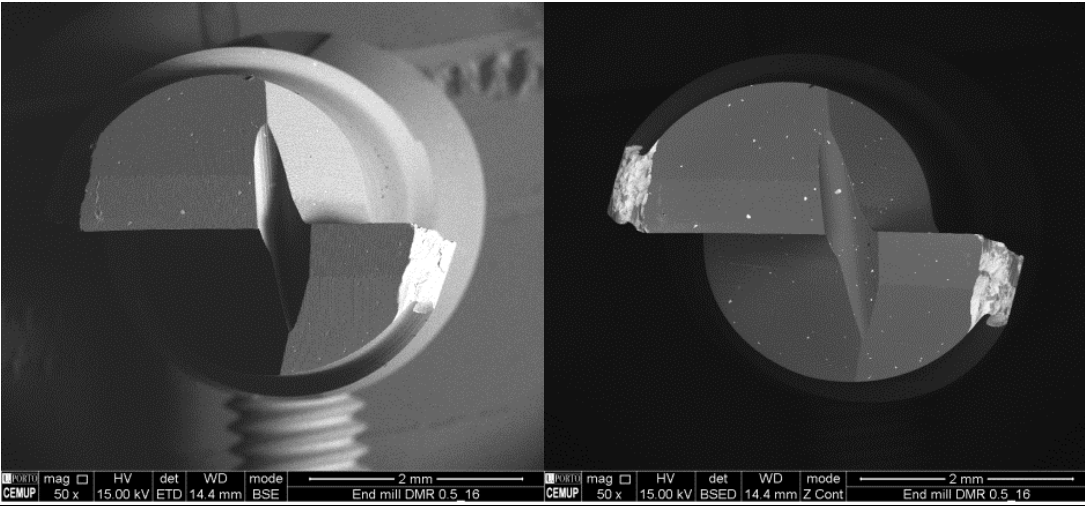
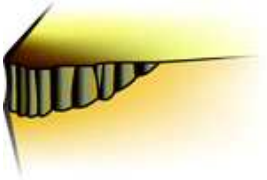


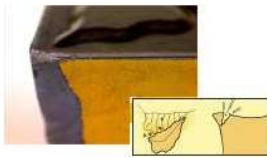
Tabela 67 - Valores de rugosidade Ra, Rz e Rmax das superfícies maquinadas pela DORMER 2Z – 16 ciclos (Valores em μm)

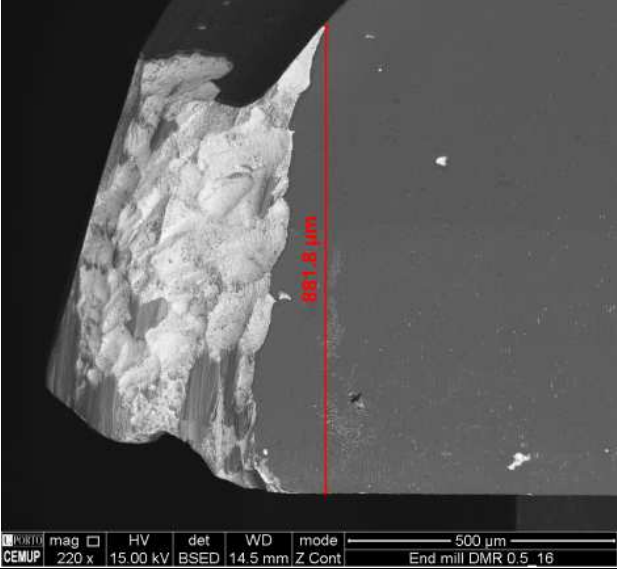
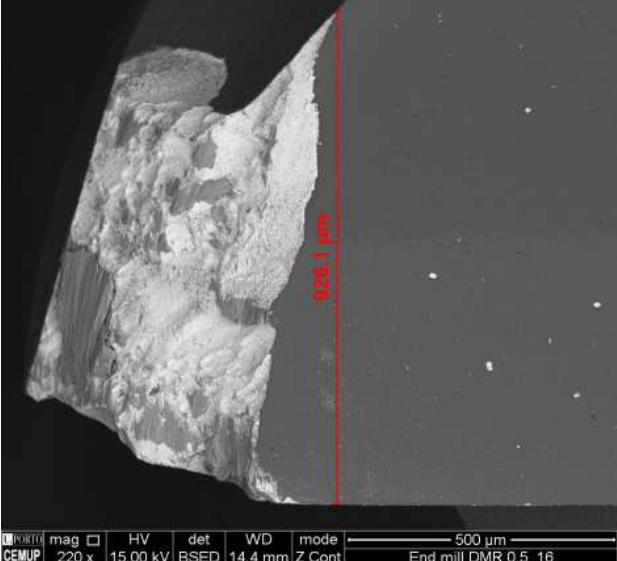
16 Ciclos	Ra	Rz	Rmax
16cRug_Dormer_Radial_1	0.572	3.449	6.470
16cRug_Dormer_Radial_2	0.553	4.192	6.240
16cRug_Dormer_Radial_3	0.579	3.400	6.640
Média	0.568	3.680	6.450
16cRug_Dormer_Tang_1	0.330	2.110	2.320
16cRug_Dormer_Tang_2	0.352	2.311	2.590
16cRug_Dormer_Tang_3	0.363	2.133	3.180
Média	0.348	2.185	2.697

3.6.2.4.2. *Análise de desgaste para 16 ciclos - Fresa DORMER 2Z*

As imagens resultantes da análise de microscopia electrónica de varrimento realizada na fresa da Dormer de 2 lâminas podem ser visualizadas na tabela abaixo.

Tabela 68 - Resultados de desgaste obtidos na ferramenta DORMER Z2 para 16 ciclos

Desgaste de ferramentas em 16 ciclos		
		
Problemas	Causas possíveis	Possíveis soluções
Desgaste do flanco 	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidade de corte muito alta; • Classe muito tenaz; • Resistência ao desgaste insuficiente. 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduzir a velocidade de corte; • Seleccionar ferramenta mais adequada de acordo com a exigência por tenacidade ou resistência ao desgaste;
Entalhe 	<ul style="list-style-type: none"> • Materiais pastosos e/ou endurecidos por trabalho; • Uso de ângulo de ataque de $\sim 90^\circ$; • A geometria é muito negativa. 	<ul style="list-style-type: none"> • Seleccionar uma aresta mais viva; • Diminuir o ângulo de posição; • Seleccionar uma ferramenta com cobertura CVD (para maior resistência ao desgaste); • Seleccionar uma ferramenta com cobertura PVD (para resistência à escamação e aresta postíça); • Variar a profundidade de corte.
Lascagem na aresta 	<ul style="list-style-type: none"> • Condições instáveis; • Classe muito dura/frágil. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tornar as condições da máquina mais estáveis; • Seleccionar uma ferramenta com uma geometria mais robusta e tenaz.
Quebra 	<ul style="list-style-type: none"> • Desgaste excessivo; • Classe muito tenaz (deformação e quebra); • Classe muito dura. 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduzir vibrações (ex.: melhorar as condições de fixação tanto da peça como da ferramenta); • Alterar os dados de corte.

<p style="text-align: center;">Aresta de corte 1</p> 	<p>VB = 881,8 μm</p>
<p style="text-align: center;">Aresta de corte 2</p> 	<p>VB = 926,1 μm</p>

Como já foi referido, apesar desta fresa aparentar um desgaste mais acentuado do que as “rivais”, há que salientar que o menor número de lâminas levou a que cada dente tivesse de trabalhar o dobro daquilo que trabalham as fresas de 4 lâminas, por exemplo. Portanto trabalharam duas vezes mais para o mesmo percurso de maquinagem, independentemente do menor avanço por dente aplicado, o que pode explicar as imagens de SEM obtidas. Contudo, os acabamentos superficiais obtidos são bastante satisfatórios.

O ponto forte de uma fresa com esta configuração é o corte de material “em cheio” (abertura de rasgos - *Slotting*), muito por causa do grande poder de extração de aparas, que minimiza e/ou previne a adesão de material na aresta de corte da ferramenta.

Nesta fresa, tal como aconteceu com a HPMT 3Z, não se considerou necessário realizar a análise de EDS, pois não se verificou nada que a diferenciasse das restantes ferramentas.

3.6.3. Análises genéricas

Aqui será feita uma reflexão sobre a globalidade dos resultados obtidos experimentalmente.

Foram maquinadas 8 peças iguais no total, sendo quatro com 7.5 metros de percurso de maquinagem (8 ciclos) e quatro com 15 metros de percurso de maquinagem (16 ciclos), portanto cada ciclo corresponde a aproximadamente 0.942 metros.

3.6.3.1. Análise da rugosidade superficial

As peças foram submetidas à verificação da rugosidade, onde o comportamento de cada fresa foi analisado recorrendo a dois tipos de análises: radial e tangencial.

Foram registados três parâmetros:

- Rugosidade média aritmética (Ra) – aritmética significa a soma de todos os valores. A média da rugosidade é o parâmetro unidimensional;
- Rugosidade máxima (Rz) – soma da altura do maior pico e profundidade do vale maior dentro de um comprimento de amostra (l_r);
- Maior pico ou vale encontrado (Rmax) – é o maior valor de rugosidade encontrado naquele comprimento de amostra.

Com a análise radial foi possível verificar a rugosidade nas fronteiras do passo, ou seja, as zonas de união das passagens feitas pela fresa, e a tangencial permitiu verificar a rugosidade sem estas zonas de união. Para cada fresa foram realizadas seis análises – 3 radiais e 3 tangenciais – de modo a encontrar um valor intermédio representativo do estado geral da rugosidade na superfície peça. Esta tarefa revelou-se, de certo modo, complicada possivelmente devido a folgas no centro de maquinagem, vibrações e desgaste das ferramentas, terem originado zonas onde a rugosidade era ligeiramente maior do que outras, daí a necessidade de se achar um valor médio para cada situação.

Na análise superficial das peças verificaram-se variações de rugosidade acentuadas, consoante a fresa utilizada e duração do ensaio (8 e 16 ciclos), tendo os ensaios com menor número de ciclos apresentado uma rugosidade inferior, como seria de esperar.

Tabela 69 – Globalidade de valores de rugosidade Ra, Rz e Rmax obtidos das superfícies maquinadas pelas 4 fresas para 8 e 16 ciclos (Valores em μm)

Ferramentas e respectiva orientação da análise de rugosidade	8 ciclos			16 ciclos		
	Ra	Rz	Rmax	Ra	Rz	Rmax
Rug_Walter_Radial_1	0.443	2.562	5.220	0.531	3.509	6.460
Rug_Walter_Radial_2	0.472	2.644	5.420	0.545	3.262	7.690
Rug_Walter_Radial_3	0.442	2.687	5.390	0.504	2.784	6.670
Média radial	0.452	2.631	5.343	0.527	3.185	6.940
Rug_Walter_Tang_1	0.259	1.681	2.360	0.247	1.515	1.740
Rug_Walter_Tang_2	0.253	1.552	2.040	0.261	1.574	1.780
Rug_Walter_Tang_3	0.268	1.568	1.760	0.244	1.553	1.720
Média tangencial	0.260	1.600	2.053	0.251	1.547	1.747
Rug_HPMT3Z_Radial_1	0.526	2,960	5.400	0.633	3.194	5.050
Rug_HPMT3Z_Radial_2	0.493	2.779	4.420	0.612	3.077	4.060
Rug_HPMT3Z_Radial_3	0.463	2.556	4.570	0.663	3.445	5.160
Média radial	0.494	2.765	4.797	0.636	3.239	4.757
Rug_HPMT3Z_Tang_1	0.274	1.953	2.570	0.386	2.280	2.410
Rug_HPMT3Z_Tang_2	0.313	1.914	2.290	0.370	2.233	2.500
Rug_HPMT3Z_Tang_3	0.330	2.107	2.340	0.350	2.099	2.460
Média tangencial	0.306	1.991	2.400	0.369	2.204	2.457
Rug_HPMT4Z_Radial_1	1.771	9.590	27.650	1.184	6.528	15.010
Rug_HPMT4Z_Radial_2	1.594	9.432	23.530	1.117	6.105	15.440
Rug_HPMT4Z_Radial_3	1.714	10.513	22.190	1.079	6.393	14.860
Média radial	1.693	9.845	24.457	1.127	6.342	15.103
Rug_HPMT4Z_Tang_1	1.191	6.262	7.950	0.259	1.849	2.500
Rug_HPMT4Z_Tang_2	1.280	6.679	7.070	0.255	1.758	2.100
Rug_HPMT4Z_Tang_3	1.360	6.917	8.870	0.246	1.671	1.960
Média tangencial	1.277	6.619	7.963	0.253	1.759	2.187
Rug_Dormer_Radial_1	0.315	1.818	2.360	0.572	3.449	6.470
Rug_Dormer_Radial_2	0.248	1.574	2.230	0.553	4.192	6.240
Rug_Dormer_Radial_3	0.289	1.961	3.200	0.579	3.400	6.640
Média radial	0.284	1.784	2.597	0.568	3.680	6.450
Rug_Dormer_Tang_1	0.188	1.255	1.610	0.330	2.110	2.320
Rug_Dormer_Tang_2	0.167	1.076	1.270	0.352	2.311	2.590
Rug_Dormer_Tang_3	0.185	1.329	1.600	0.363	2.133	3.180
Média tangencial	0.180	1.220	1.493	0.348	2.185	2.697

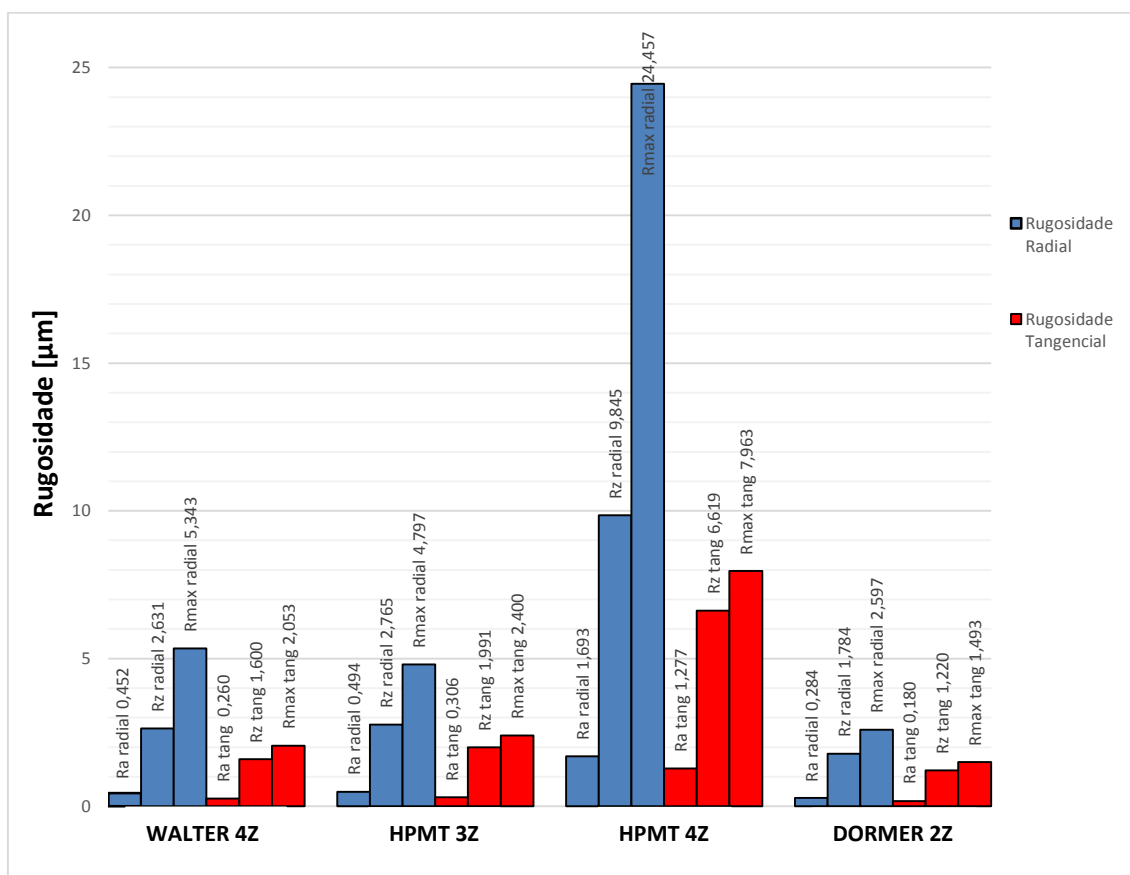


Figura 102 - Resultados de Ra, Rz e Rmax obtidos relativos aos 8 ciclos

Para o percurso de maquinagem de 8 ciclos, correspondentes a aproximadamente 7.5 metros de comprimento de corte, há que destacar principalmente as prestações da fresa da DORMER 2Z que não só teve os menores valores de rugosidade de todos os testes, mas também teve a menor diferença entre valores de Ra, radial e tangencial, significando, por isso, que quase não deixou marcas nas fronteiras entre passagens. Os valores de Rz obtidos por esta ferramenta também foram os mais baixos, significando que a superfície resultante deverá suportar melhor possíveis contactos mecânicos devido à baixa amplitude entre picos e vales de rugosidade, levando a que a peça não tenha tendência a perder o seu rigor dimensional.

A WALTER 4Z teve, estranhamente, valores de rugosidade ligeiramente acima para 8 ciclos, mas, no geral, foi a fresa mais regular. Obteve o segundo melhor resultado do teste de 8 ciclos.

A HPMT 3Z obteve valores de rugosidade razoáveis, sendo a terceira melhor para 8 ciclos. O seu Rz também a coloca num nível razoável para este tipo de teste.

Já a fresa HPMT 4Z teve péssimos resultados, não havendo até então justificação para o sucedido, só especulações, tais como a existência de heterogeneidades na peça que tenham danificado as arestas de corte da ferramenta ou defeito de fabrico da própria fresa.

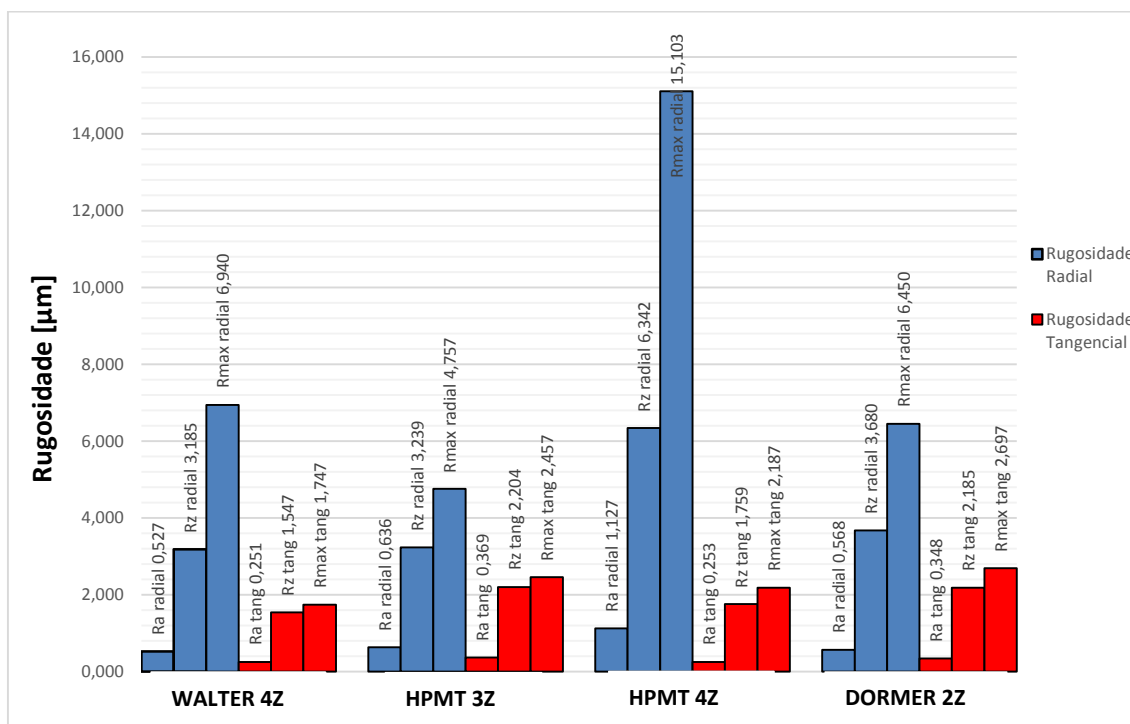


Figura 103 - Resultados de Ra, Rz e Rmax obtidos relativos aos 16 ciclos

No gráfico de resultados para 16 ciclos é possível verificar que, a nível de rugosidade radial, temos uma fresa que se destaca pela negativa nos ensaios de 16 ciclos. Enquanto que as fresas da Walter 4Z, HPMT 3Z e DORMER 2Z mantiveram valores relativamente idênticos de Ra, têm-se a fresa da HPMT 4Z que, com esta orientação de ensaio, revelou maus resultados face às restantes. Como já foi referido, esta fresa perdeu as extremidades das arestas de corte aquando da maquinagem, o que poderá explicar o maior relevo na zona de fronteira de passagem, que é detectável pelo pico máximo apresentado e que levou também a incremento significativo do valor de Rz.

Já na análise tangencial (sem zonas de fronteira de passagens) os resultados são bem diferentes. As melhores fresas foram a WALTER 4Z e a HPMT 4Z, o que leva a crer que, nesta última, com esta orientação de ensaio, a quebra das arestas de corte não teve grande influência, alcançando resultados muito bons e semelhantes, a nível de Ra e Rz, à da WALTER. A fresa da HPMT 3Z e a da DORMER 2Z apresentaram também resultados muito aproximados entre as duas, a nível de Ra e Rz. As duas apresentam resultados muito satisfatórios a nível de Ra, mas o mesmo não se poderá dizer de Rz. Esta variável é bastante elevada comparativamente às restantes fresas. Portanto, a superfície deixada por elas apresenta uma diferença grande de amplitude entre picos e vales, levando a que a superfície se torne frágil, o que, dependendo da aplicação, leva a que, havendo contacto mecânico, estas possam perder algum rigor dimensional, originando folgas.

As evoluções ocorridas nas quatro fresas, entre os 8 e os 16 ciclos, relativamente às rugosidades radial e tangencial podem ser observadas nos gráficos das figuras seguintes.

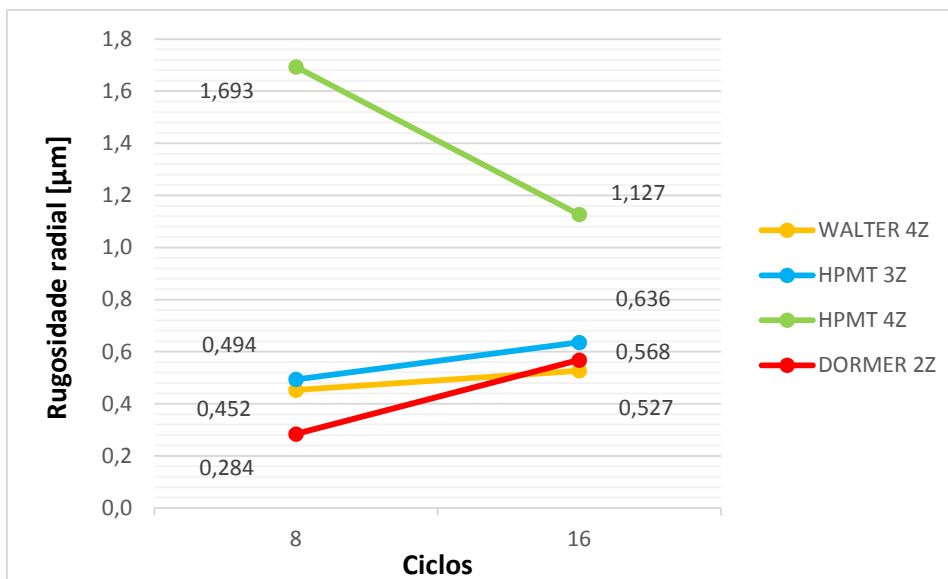


Figura 104 – Evolução da rugosidade radial nas 4 fresas em estudo

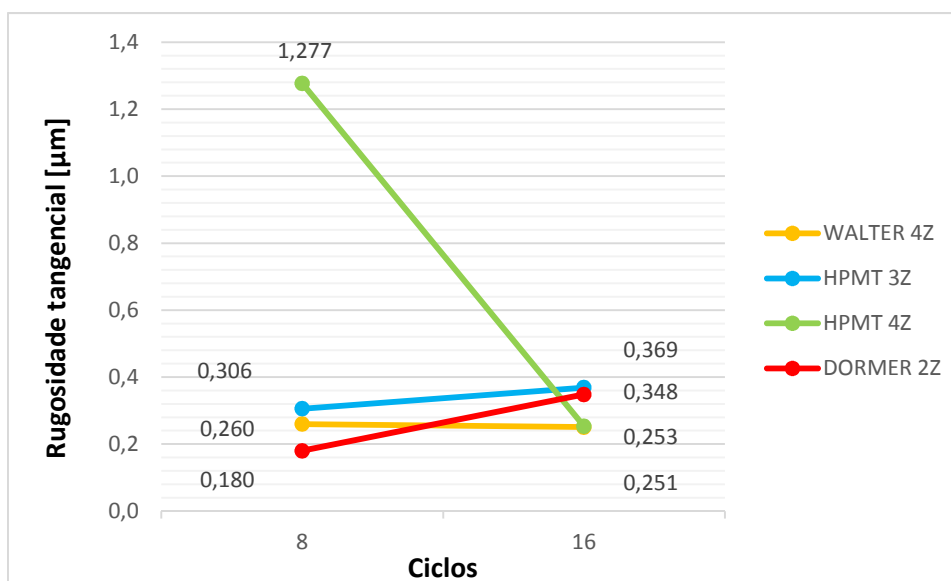


Figura 105 – Evolução da rugosidade tangencial nas 4 fresas em estudo

3.6.4. Análise do desgaste das ferramentas

Após a realização dos ensaios, verificaram-se tipos de desgaste semelhantes em todas as ferramentas, bem como resultados desses problemas na peça de trabalho, só variando, como seria de esperar, a intensidade/gravidade dos mesmos.

De um modo geral, verificou-se a ocorrência de fissuras, entalhes e lascagem na aresta de corte e até mesmo quebra parcial da extremidade da aresta de corte. Verificou-se também a ocorrência de desgaste nos flancos. Tudo isto teve como consequência prática o aumento da rugosidade superficial da peça de trabalho e, nos casos onde houve quebra da ponta da aresta mais significativa, verificou-se a formação de relevos (apesar de muito pequenos) nas zonas de fronteira entre as passagens e, conseqüentemente, valores de rugosidade não tão satisfatórios.

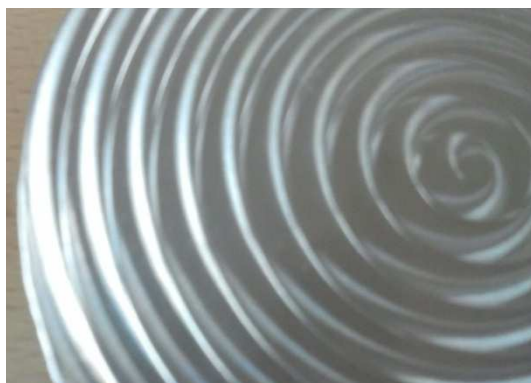


Figura 106 – Relevo na zona de fronteira do passo

Nos ensaios realizados utilizou-se um Ap baixo (0.5 mm de profundidade), assemelhando-se mais a uma operação de acabamento do que uma operação de desbaste puro, com baixa taxa de remoção de apara por rotação, produzindo níveis razoavelmente baixos de calor e com utilização de refrigeração externa. Como a utilização de refrigeração gera variações constantes de temperatura na ferramenta, fragilizando-a estruturalmente (fadiga térmica), há uma grande probabilidade de ter sido a causa dos fenômenos de quebra das extremidades das arestas de corte nas ferramentas, aliado também ao facto da geração de vibrações normais à maquinagem de materiais duros ser um factor potenciador da nucleação e futura progressão de fissuras superficiais e subsuperficiais.

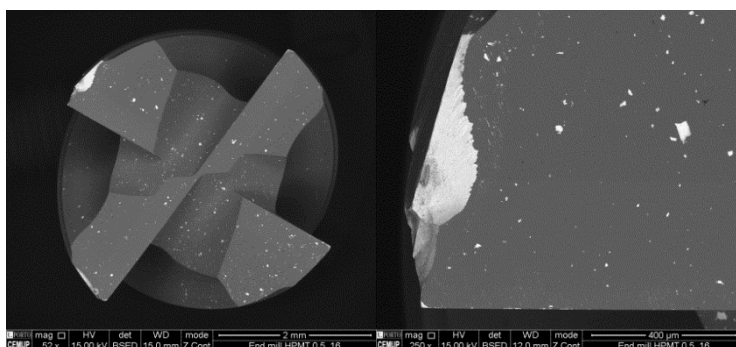


Figura 107 – Fenómeno da quebra das extremidades das arestas de corte e desgaste dos flancos

Nos ensaios iniciais, foram utilizadas fresas com diâmetro do encabadouro igual ao da zona útil de trabalho da fresa, ou seja, 4 mm, mas estas não aguentaram a tarefa e quebraram na zona de transição (entre a hélice e o encabadouro). Esta situação ficou a dever-se ao material da peça de trabalho possuir uma resistência bastante elevada, como já foi referido, o que em conjunto com uma selecção de parâmetros não muito feliz para a ferramenta, com consequente produção de vibrações, levou à falência da mesma.



Figura 108 – Quebra da ferramenta no final da zona útil de trabalho

No gráfico da Figura 109 podem ser observados os valores de VB (desgaste de flanco) relativos aos ensaios de 8 ciclos medidos recorrendo à análise de microscopia electrónica de varrimento.

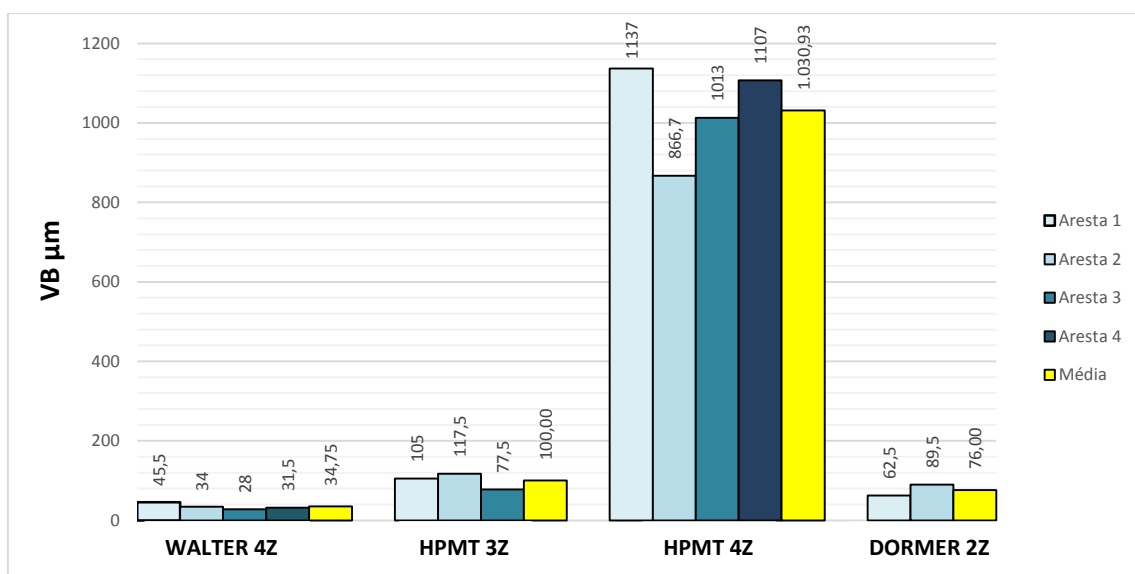


Figura 109 – Valores de VB das arestas obtidos de cada ferramenta relativos 8 ciclos

A fresa mais regular a nível de desgaste foi a WALTER 4Z, seguida da fresa da DORMER 2Z, que apresentou as melhores médias de Ra e Rz, à frente da fresa HPMT 3Z, que teve também um nível de desgaste normal e uniforme, deixando para ultimo a fresa com piores resultados no conjunto de todos os testes, a HPMT 4Z, que teve valores de desgaste *record*, para os quais já foram apontadas algumas possíveis causas para o sucedido, mas tratando-se apenas de especulações.

O gráfico da Figura 111 mostra os valores de VB (desgaste do flanco), relativos aos ensaios de 16 ciclos, medidos recorrendo à análise por microscopia electrónica de varrimento.

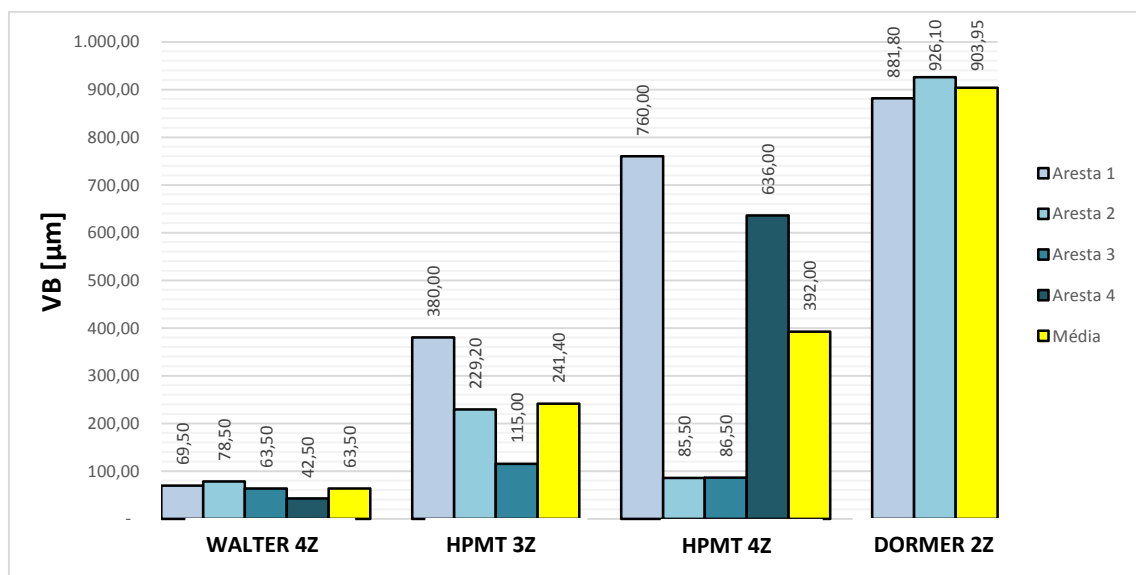


Figura 110 – Valores de VB das arestas obtidos de cada ferramenta relativos 16 ciclos

A fresa que apresentou o menor desgaste, à semelhança dos ensaios de 8 ciclos, foi a WALTER 4Z, que também obteve os melhores resultados de rugosidade, tanto radial como tangencial, apresentando a maior uniformidade entre dentes a nível de VB. A seguir, aparece a HPMT 3Z, mas com uma variação relativamente grande entre dentes. Apesar deste nível baixo de desgaste face às restantes (excepto a WALTER 4Z), foi a que apresentou piores resultados de rugosidade, tanto radial como tangencial. A HPMT 4Z fica na 3ª posição, apresentando uma particularidade interessante. Dois dentes estão com um VB baixo (aresta 2 e 3), enquanto os outros dois (aresta 1 e 4) sobem para valores muito altos. Possíveis razões para este fenómeno em particular, são difíceis de encontrar, mas poderá dizer-se que as arestas 1 e 4 terão sofrido com algum choque de apara, ou então uma possível fragilidade já existente no substrato da ferramenta, ou alguma heterogeneidade do material da peça, que terá levado a este desfecho, aliado também à fadiga térmica provocada pelo constante aquecimento e arrefecimento da ferramenta e, claro, vibrações.

A fresa que revelou piores resultados de VB foi claramente a DORMER 2Z, mas, neste caso, como se trata de uma fresa com somente duas lâminas, cada dente trabalhou mais em comparação com qualquer outra ferramenta ensaiada, para o mesmo percurso de maquinagem, como já foi dito em cima, o que pode justificar esta extensão de desgaste. Apesar destes valores obtidos, a rugosidade superficial produzida por esta fresa foi bastante satisfatória, sendo a 3ª melhor nesse campo a nível de Ra.

3.6.5. Análise das aparas recolhidas

Foram recolhidas aparas após os ensaios de maquinagem de 8 ciclos das fresas HPMT 3Z e DORMER 2Z, as quais são mostradas nas imagens seguintes.

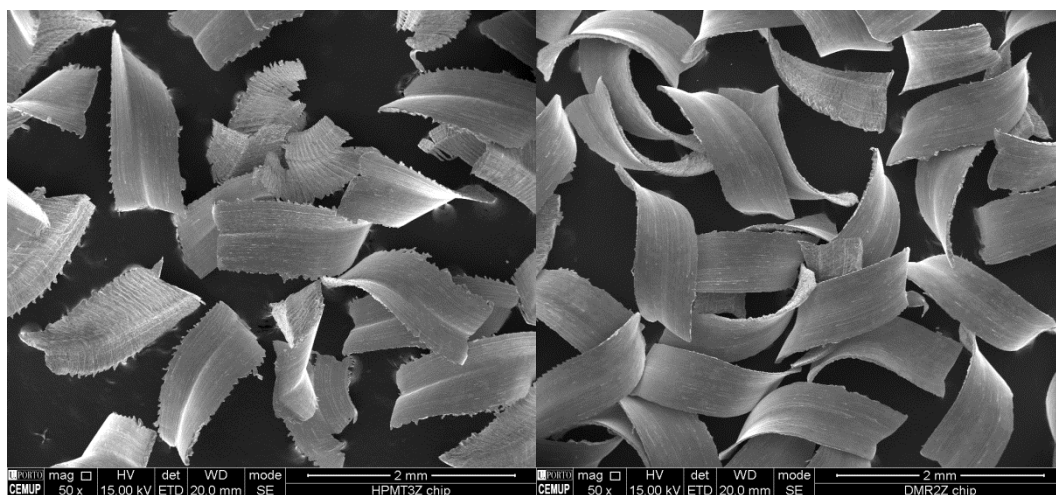


Figura 111 – Aparas recolhidas após ensaios de 8 ciclos da HPMT 3Z (esquerda) e da DORMER 2Z (direita)

Desde logo se nota uma diferença na geometria das duas amostras.

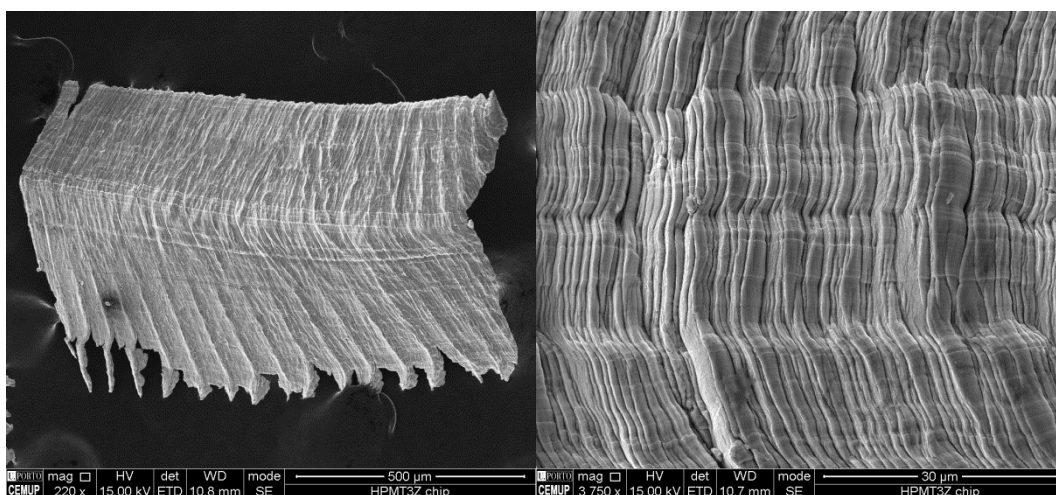


Figura 112 – Apara da HPMT 3Z em 8 ciclos e pormenor da face de esmagamento

A apara proveniente da fresa HPMT 3Z é mais irregular e apresenta os rebordos mais deformados/recortados. Isto pode dever-se a uma maior dificuldade de extracção da apara, com a presença de maior atrito no processo, impulsionado pelo facto de se tratar de uma fresa com mais lâminas e do ângulo de ataque ser menos incisivo. Por esta razão, a face de esmagamento da apara aparenta que estiveram envolvidas maiores forças na sua extracção.

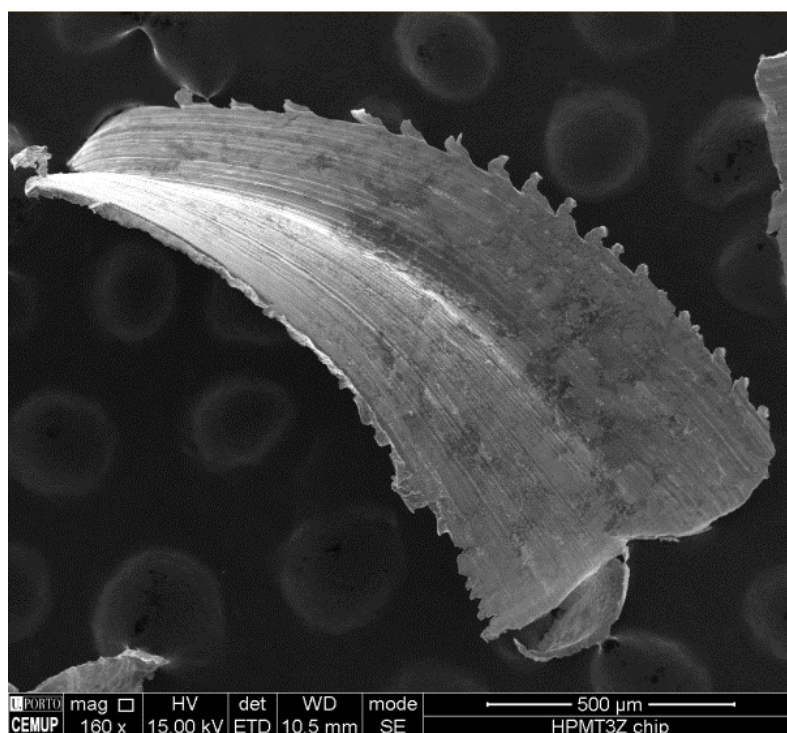


Figura 113 – Face de corte da apara da HPMT 3Z

Seguidamente podem ser visualizadas as aparas ao pormenor da DORMER 2Z.

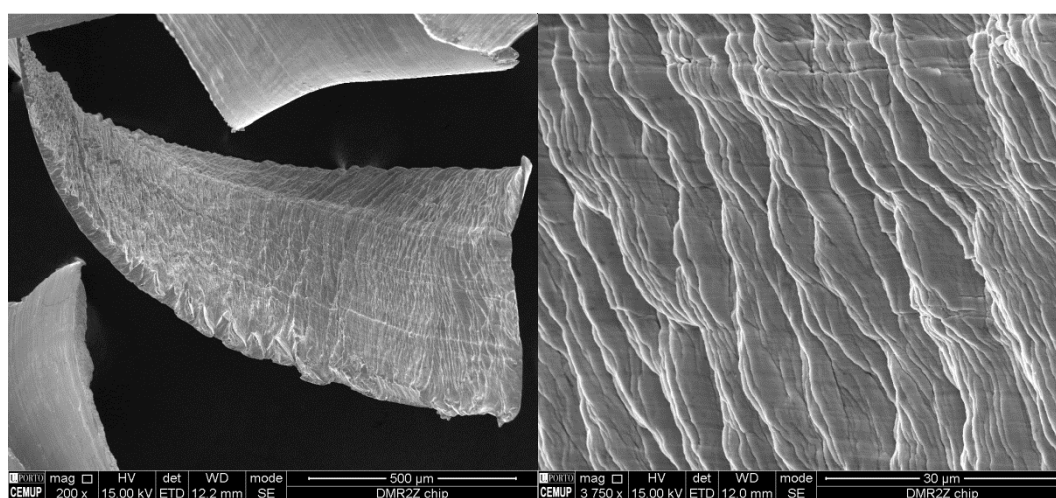


Figura 114 – Apara da DORMER 2Z em 8 ciclos e pormenor da face de esmagamento

A apara da DORMER 2Z parece resultar de um corte mais “limpo”, devido à facilidade de extracção da mesma e, conseqüente, menor atrito envolvido, evidenciado pelos rebordos mais regulares e menos “recortados”. Apresenta também uma zona de esmagamento com estrias mais espaçadas devido também ao menor esforço de corte proporcionado pelo ângulo de ataque mais incisivo, conforme se pode observar na Figura 114.

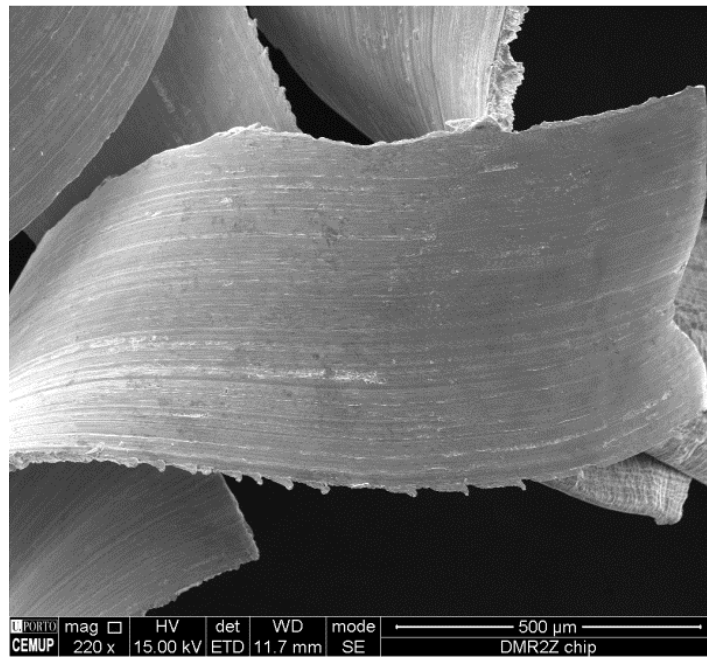


Figura 115 - Face de corte da apara da DORMER 2Z

4. Conclusões

De um modo geral, pode-se afirmar que, para 16 ciclos, as fresas de 4 lâminas apresentaram os melhores resultados a nível dos parâmetros Ra, Rz e Rmax, sendo, portanto, a escolha mais apropriada para desbastes laterais. Contudo, as restantes fresas também revelaram resultados bastante interessantes e pouco abaixo das “rivais” de 4 lâminas, mas, efectivamente, o ponto forte destas será no desbaste de mergulho (*Slotting*) ou desbaste “em cheio” (*down milling*), onde o número inferior de lâminas é uma clara vantagem, pois permite uma maior eficiência na extração de aparas, prevenindo assim, problemas de adesão de material da peça de trabalho na aresta de corte, especialmente materiais com a composição do ensaiado neste trabalho. Provavelmente, também a durabilidade destas ferramentas de 2 e 3 lâminas tenderá a ser inferior, pois cada dente estará sujeito a mais trabalho, para o mesmo percurso de maquinagem, comparativamente a uma ferramenta de 4 lâminas, por exemplo, independentemente do ajuste no avanço de mesa, de modo a manter constante o avanço por dente.

O aço inoxidável duplex utilizado neste trabalho demonstrou ser severo para as ferramentas utilizadas, já que o percurso de corte se pode considerar reduzido, face à gravidade dos danos causados pela maquinagem.

Parece ter ficado claro que a ferramenta da WALTER (4Z) apresentou os melhores resultados em termos de desgaste, e quase sempre também em termos de qualidade da superfície gerada. De referir ainda que, apesar do elevado desgaste sofrido pela fresa da DORMER (2Z), a qualidade da superfície gerada fica pouco aquém dos melhores resultados conseguidos com as fresas concorrentes.

5. Bibliografia e outras fontes de informação

5.1. Bibliografia

- Chiaverini, V. (1977). *Tecnologia Mecânica- Processos de Fabricação e Tratamento Vol. II, 2ª Edição*. São Paulo: McGraw-Hill.
- Davis, J. R. (1989). *ASM Handbook - Machining Processes - Volume 16*. E.U.A.: American Society for Metals.
- Davis, J. R. (1995). *Tool Materials - ASM Specialty Handbook*. E.U.A.: American Society for Materials.
- Ferraresi, D. (1977). *Fundamentos da Usinagem dos Metais*. São Paulo: Edgard Blücher, Ltda.
- Fontana, M. G., & Greene, N. D. (1986). *Corrosion Engineering 3rd ed*. Boston, MA: McGraw-Hill.
- Helmi A. Youssef, H. E.-H. (2008). *Machining Technology: Machine Tools and Operations 1st ed*. E.U.A.: CRC Press.
- Hoffman, P. J., Hopewell, E. S., & Janes, B. (2012). *Precision Machining Technology 2nd ed*. E.U.A.: Cengage Learning.
- Nilsson, J. O. (1992). Super Duplex Stainless Steels. *Materials Science and Technology. Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless 2nd Ed*. (2009). Obtido em Junho de 2014, de IMO: http://www.imoa.info/download_files/stainless-steel/Duplex_Stainless_Steel_2d_Edition.pdf
- Schneider Jr., G. (2009). Chapter 1 - Cutting Tool Materials. *American Machinist*.
- Shaw, M. C. (1984). *Metal Cutting Principles 2nd ed*. Nova Iorque: Oxford University Press.
- Tschätsch, H. (2008). *Applied Machining Technology*. Dresden: Springer.

5.2. Outras fontes de informação

- Arsopi - Certificado 22 - Tarugo Duplex. (2014). Vale de Cambra.
- Biermann, D., Steiner, M., & Krebs, E. (2013). Investigation of Different Hard Coatings for Micromilling of Austenitic Stainless Steel. *Procedia CIRP - Forty Sixth CIRP Conference on Manufacturing Systems 2013*, 7, pp. 246-251.
- Borges, M. (2008). *MMBorges - Furação*. Obtido em Julho de 2014, de MMBorges: <http://mmborges.com/processos/USINAGEM/FURACAO.htm>
- Borges, M. (2008). *MMBorges - Torneamento*. Obtido em Junho de 2014, de MMBorges: <http://mmborges.com/processos/USINAGEM/TORNEAMENTO.htm>
- CENFIM. (s.d.). *Cenfim - Operações básicas de torneamento*. Obtido em Outubro de 2014, de <http://elearning.iefp.pt/>: http://elearning.iefp.pt/pluginfile.php/48531/mod_resource/content/0/UP0051_OPERACOES_BASICAS_DE_TORNEAMENTO.pdf
- CES Edupack 2005. (s.d.). *CES Edupack 2005*.
- Charles, J. (1991). Super Duplex Stainless Steels: Structure and Properties. *Proceedings of the Conference on Duplex Stainless Steels*.
- Costa, V. B. (2014). *Ebah - PROC FAB.02 - Furação e Mandrilagem*. Obtido de Ebah: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAUK0AE/procfab-02-furacao-mandrilagem>
- Daggett, S. A. (Novembro de 2005). *MoldMaking Technology - How to Choose the Right Tool Coating for Your Machining Application*. Obtido em Junho de 2014, de <http://www.moldmakingtechnology.com/articles/how-to-choose-the-right-tool-coating-for-your-machining-application>
- Diniz, A. E., & Micaroni, R. (2007). Influence of the direction and flow rate of the cutting fluid on tool life in turning process of AISI 1045 steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47, pp. 247-254.
- DORMER. (2010). *Technical HandBook*. Suécia: DORMER.
- Drape, D. (Agosto de 2011). *Production Machining - Cutting Tool Coating Production*. Obtido em Junho de 2014, de <http://www.productionmachining.com/articles/cutting-tool-coating-production>
- Endrino, J., Fox-Rabinovich, G., & Gey, C. (2005). Hard AlTiN, AlCrN PVD coatings for machining of austenitic stainless steel. *Surface and Coatings Technology*, 200, pp. 6840-6845. Obtido de Science Direct: www.sciencedirect.com

- Gomes, E. S., Viñas, J. B., & Vatauvuk, J. (1999). Aços inoxidáveis duplex - propriedades e aplicações na indústria química. *Proc. Congresso de Automação e Equipamento da Indústria Química, ABIQUIM*. São Paulo.
- HARVEY-TOOL. (s.d.). *Applicaton Guide - Coatings and Substrates*. Obtido em Junho de 2014, de http://www.harveytool.com/cms/CoatingsChart_16.aspx
- ISO. (1989). *ISO 8688-1*. Filadélfia: ISO.
- ISO. (1993). *ISO 3585*. Filadélfia: ISO.
- ISO. (1994). *ISO 241*. Filadélfia: ISO.
- Kim, S. (2004). *Design & Manufacturing II*. Obtido em Setembro de 2014, de OCW.MIT.EDU: http://ocw.mit.edu/courses/mechanical-engineering/2-008-design-and-manufacturing-ii-spring-2004/lecture-notes/08cutting_2_6_f.pdf
- MatWeb. (s.d.). Obtido em Junho de 2014, de MatWeb: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=197b4027f1304d698504a9be533018ed&ckck=1>
- Oliveira, Á. F. (2006). *Influência dos elementos químicos no aço*. Obtido em Junho de 2014, de Ebah: <http://www.ebah.pt/content/ABAAAFUe4AF/influencia-dos-elementos-quimicos-no-aco>
- OUTOKUMPU - Machinability of Duplex SS. (2011). Avesta, Suécia.
- Sandvik - *Definições na furação*. (s.d.). Obtido em Julho de 2014, de Sandvik Coromant: http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/drilling/formulas_and_definitions/drilling_definitions/Pages/default.aspx
- Sandvik - *Manual Técnico*. (2010).
- Sandvik - *Material Center Datasheet - LDX2101*. (Novembro de 2013). Obtido em Junho de 2014, de Sandvik Materials Technology: <http://www.smt.sandvik.com/en-au/materials-center/material-datasheets/plate-and-sheet-aus/ldx-2101-aus/>
- Sandvik - *Torneamento de perfis*. (s.d.). Obtido em Outubro de 2014, de <http://www.sandvik.coromant.com/>: http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/general_turning/choice-of-application/external-turning/profile-turning/Pages/default.aspx
- SANDVIK-Coromant. (s.d.). *CoroTurn 107*. Obtido de Sandvik: http://www.sandvik.coromant.com/en-us/products/coroturn_107/pages/default.aspx
- Schneider, J. (2002). *Cutting tool applications, Tooling & Production*. Obtido em Junho de 2014, de Ebah: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAABVTcAL/introducao-aos-processoa-fabricacao-fresagem>
- Senai - *Torneamento e Rectificação*. (Outubro de 2009). Obtido em Setembro de 2014, de <http://dc706.4shared.com/doc/aJtPJGWg/preview.html>
- Senatore, M., Finzetto, L., & Perea, E. (2007). *Estudo comparativo entre os aços inoxidáveis dúplex e os inoxidáveis AISI 304L/316L*. Obtido em Julho de 2014, de Scielo: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672007000100027
- Silva, F. J. (2008). *Acetatos de maquinagem 4 - Desgaste e avarias nas ferramentas*. Porto: ISEP.
- Silva, F. J. (2008). *Acetatos de Maquinagem 5 - Materiais para Ferramentas*. Porto: ISEP.
- Silva, F. J. (2008). *Acetatos de maquinagem 5 - Vida das ferramentas e custos de maquinagem*. Porto: ISEP.
- Smith, G. T. (2008). *Cutting Tool Technology - Industrial Handbook*. Springer. Obtido em Junho de 2014, de Ebah: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAABOxoAA/ferramentas-corte>
- Teeter, F. J. (2006). Thin Wins. *CTEMag*, 58. Obtido em Setembro de 2014, de <http://www.ctemag.com/pdf/2006/0610-Toolcoatings.pdf>
- Vieira, R. (Junho de 2014). *Torno Mecânico*. Obtido de ebah: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAABQ-gAD/torno-mecanico>
- WALTER - *Catálogo Geral*. (2012).

ANEXO I

XXXX

PEDRO REIS - MAPA DE EXPERIÊNCIAS & RESULTADOS

Ferramenta (D = 4 mm)					Parâmetros de corte							Rugosidade Radial			Rugosidade Tangencial			Peso da Ferramenta			
Marca	Modelo	Material Base	Revestimento	Z	N	Vc	f	fz	a _e	a _p	Nº Ciclos	Percurso	R _a	R _z	R _{max}	R _a	R _z	R _{max}	Inicial	Final	Diferença
					rpm	m/min	mm/min	mm/dente	mm	mm		m	µm	µm	µm	µm	µm	µm	g	g	g
WALTER 4Z	H30140418-4	HM	TAX	4	4000	50,27	250	0,0156	3	0,5	8	7,536	0,452	2,631	5,343	0,260	1,600	2,053	13,1306	13,1302	0,0004
HPMT 3Z	E37ABX013QX0400	HM	AlCrN	3	4000	50,27	190	0,0158	3	0,5	8	7,536	0,494	2,765	4,797	0,306	1,991	2,400	17,0490	17,0488	0,0002
HPMT 4Z	V47BXZ024GX04001	HM	AlCrN	4	4000	50,27	180	0,0113	3	0,5	8	7,536	1,693	9,845	24,457	1,277	6,619	7,963	16,8563	16,8543	0,0020
DORMER 2Z	S812HA	HM	AlCrN	2	4000	50,27	125	0,0156	3	0,5	8	7,536	0,284	1,784	2,597	0,180	1,220	1,493	18,9573	18,9499	0,0074
WALTER 4Z	H30140418-4	HM	TAX	4	4000	50,27	250	0,0156	3	0,5	16	15,072	0,527	3,185	6,940	0,251	1,547	1,747	13,1490	13,1490	0,0000
HPMT 3Z	E37ABX013QX0400	HM	AlCrN	3	4000	50,27	190	0,0158	3	0,5	16	15,072	0,636	3,239	4,757	0,369	2,204	2,457	17,1635	17,1640	-0,0005
HPMT 4Z	V47BXZ024GX04001	HM	AlCrN	4	4000	50,27	180	0,0113	3	0,5	16	15,072	1,127	6,342	15,103	0,253	1,759	2,187	16,8304	16,8304	0,0000
DORMER 2Z	S812HA	HM	AlCrN	2	4000	50,27	125	0,0156	3	0,5	16	15,072	0,568	3,347	6,450	0,348	2,185	2,697	18,9773	18,9759	0,0014

ARSOPI

APARTADO 10 - RELVA - VILA CHÁ
3730-954 VALE DE CAMBRA PORTUGAL
TELF +351 256 426100 FAX +351 256 426101
arsopi@arsopi.pt http://www.arsopi.pt

TESTS REPORT

According EN 10204/2.2

Nr. : ISEP-001

DATE : 2014-04-30

Page 1 of 1

COSTUMER : KSB SERVICE GmbH D-66424 HOMBURG Neue Industriestrasse DEUTSCHLAND

MATERIAL : Stainless Steel Castings EN 10283 - 1.4517 = ASTM A890 Grade 1B = ARSOPI 2606/2. **MELTING PROCESS :** Electric Induction

BRAND MARK

HEAT TREATMENT : Quenching at 1135°C, lower to 1040°C, water cooling.



CHEMICAL ANALYSIS																TENSILE - ISO 6892-1				IMPACT		HARDNESS	
(Optical Emission Spectrometer)																							
(%)																							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb	V	W	N	Co	Fe	STANDARD	Rp .2%	Rp 1%	Rm	A	ISO 148-1 KV	ISO 6506-1 HB	
																	N/mm ²		%	Av(J)			
	0.03	1.00	1.50	0.03	0.02	26.5	7.00	3.50	3.5	----	----	----	0.22	----	----	Max	----	----	----	----	----	----	
Qty						24.5	5.00	2.50	2.75	----	----	----	0.12	----	----	Min	480	----	650	22	50	----	
Heat																							
Reference	0696C	0.03	0.92	1.42	0.02	0.01	25.56	5.95	2.99	2.95	0.01	0.02	0.04	0.14	0.07	59.86	489	566	797	30.3	114	267	
Really Supplied																							
1	9603B	0.03	0.41	1.48	0.02	0.00	25.41	6.08	2.91	3.30	0.01	0.02	0.04	0.19	0.08	60.02	---	---	---	---	---	---	
1	Part(s) "		Tarugo Ø60x300mm																				



The requirements stipulated are satisfied. All the products supplied is made by the same material and manufacturing method as reference, but not necessary of the same heat

This testimonial and certification respectively is recorded by computersystem, and is valid without signature, according to EN 10204.

QUALITY DEPARTMENT

A. Pedro V. Pinho
Quality Control