



Mestrado em Engenharia Mecânica

**Maquinabilidade dos Aços Inoxidáveis:
Estudo Experimental da Degradação da Ferramenta no
corte do Aço Inoxidável Duplex**

Trabalho de Projeto apresentado para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Mecânica
Especialização em Construção e Manutenção de Equipamentos Mecânicos

Autor

Paulo Manuel de Almeida dos Santos Amaro

Orientadores

Prof. Doutor Fernando António Gaspar Simões

Professor do Departamento de Engenharia Mecânica
Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Prof. Doutor Pedro Manuel Soares Ferreira

Professor do Departamento de Engenharia Mecânica
Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Coimbra, Maio, 2017

Agradecimentos

Quero agradecer a todos aqueles que contribuíram e tornaram possível a concretização deste trabalho de mestrado, em especial:

Aos meus orientadores, Prof. Doutor Fernando António Gaspar Simões e Prof. Doutor Pedro Miguel Soares Ferreira, pela coordenação e conhecimento transmitido, pelo apoio durante a execução deste trabalho e pela disponibilidade e amizade demonstradas ao longo deste tempo.

Ao Instituto Politécnico de Coimbra pelo apoio financeiro à formação superior, para obtenção do grau académico de mestre.

À empresa Palbit® pela oferta de ferramentas e materiais utilizados nos ensaios de maquinagem.

Ao Prof. Doutor Luís Manuel Ferreira Roseiro, responsável pelo Laboratório de Biomecânica Aplicada, onde foram realizados os ensaios de maquinagem.

Por fim, mas não menos importante, ao meu filho e à minha esposa pelo incentivo e pela ajuda na revisão final do texto.

Resumo

Em resultado da colaboração entre o Laboratório de Fabrico Assistido por Computador do ISEC com a empresa Palbit®, foi identificado o interesse em aprofundar o conhecimento do desempenho das ferramentas no corte por arranque de apara de determinados materiais considerados de difícil maquinabilidade e usualmente utilizados em aplicações industriais. Assim, no âmbito do Mestrado em Engenharia Mecânica do ISEC, foi desenvolvido este trabalho, o qual é dedicado ao estudo da maquinabilidade dos aços inoxidáveis duplex.

De modo a enquadrar o tema e melhor o compreender, foi inicialmente efetuada uma revisão bibliográfica generalista relativa aos materiais utilizados nas ferramentas de corte, aos mecanismos de degradação desenvolvidos nas ferramentas durante as operações de maquinagem e à maquinabilidade dos aços inoxidáveis. Depois disso, na componente experimental do trabalho, foi aplicado a um bloco de aço inoxidável duplex uma estratégia de corte convencional e uma estratégia de corte trocoidal, sendo avaliado em cada caso a vida útil da ferramenta para diferentes parâmetros de corte.

No final foi possível concluir que a rutura das ferramentas deve-se principalmente ao desgaste de entalhe e que aplicando a estratégia trocoidal conseguem-se tempos de vida útil e taxas de remoção de material iguais ou superiores à estratégia convencional.

Palavras-chave: Aço inoxidável duplex; Maquinabilidade; Estratégia convencional; Estratégia trocoidal; Vida útil da ferramenta; Desgaste de entalhe.

Abstract

As a result of the collaboration that has been developed between the Computer Assisted Manufacturing Laboratory of ISEC and the Palbit® company, it was identified the company's interest in deepening the knowledge of the performance of its tools cutting materials of difficult Machinability, but usually used in industrial applications. Therefore, in the scope of the MSc in Mechanical Engineering of ISEC, this work was developed, which is dedicated to the study of the machinability of duplex stainless steels.

In order to better understand this issue, a general bibliographical review was initially made regarding the materials used in the cutting tools, the degradation mechanisms developed in the tools during the machining operations and the machinability of the stainless steels.

After that, in the experimental component of the work, a conventional cutting strategy and a trochoidal cutting strategy were applied to a duplex stainless steel block. The tool life was evaluated for each case with different cutting parameters.

It was possible to conclude that tool breakage is mainly due to notch wear, and that applying trochoidal strategy achieves lifetimes and material removal rates equal to or greater than the conventional strategy.

Keywords: Duplex stainless steels; Machinability; Conventional milling; Trochoidal milling; Tool Life; Notch wear.

Índice

Capítulo 1 - Introdução	1
1.1 - Enquadramento do tema	1
1.2 - Objetivos e metodologia	3
1.3 - Estrutura do trabalho	3
Capítulo 2 - Materiais para ferramentas de corte	5
2.1 - Caracterização dos materiais para ferramentas de corte	5
2.1.1 - Aços rápidos	6
2.1.2 - Carbonetos sinterizados	9
2.1.3 - Cermets	12
2.1.4 - Cerâmicos	13
2.1.5 - Ultraduros	14
Capítulo 3 - Degradação das ferramentas de corte	17
3.1 - Avarias e desgastes das ferramentas de corte	17
3.1.1 - Tipos de avarias	18
3.1.2 - Tipos de desgaste	22
3.2 - Mecanismos causadores de desgaste	25
3.2.1 - Adesão	25
3.2.2 - Abrasão	26
3.2.3 - Difusão	26
3.2.4 - Oxidação	26
3.3 - Medição dos desgastes e vida útil das ferramentas	28
Capítulo 4 - Maquinabilidade dos aços inoxidáveis	33
4.1 - Aços inoxidáveis	33
4.1.1 - Caracterização dos aços inoxidáveis ferríticos	34
4.1.2 - Caracterização dos aços inoxidáveis martensíticos	36

4.1.3 - Caracterização dos aços inoxidáveis austeníticos	37
4.1.4 - Caracterização dos aços inoxidáveis duplex	40
4.1.5 - Caracterização dos aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação	43
4.2 - Maquinabilidade dos aços inoxidáveis	45
Capítulo 5 - Componente experimental	51
5.1 - Enquadramento do trabalho experimental	51
5.1.1 - Centro de maquinagem	51
5.1.2 - Caracterização da ferramenta de corte	52
5.1.3 - Caracterização do material para os ensaios	54
5.1.4 - Sistema para fixação da ferramenta de corte	55
5.1.5 - Equipamento para aquisição de imagens e medição do desgaste da ferramenta	56
5.1.6 - <i>Software</i> de CAM e estratégias de maquinagem	57
5.1.7 - Parâmetros de corte na maquinagem	64
5.2 - Metodologia do trabalho experimental	65
5.2.1 - Estratégia convencional	66
5.2.2 - Estratégia trocoidal	68
Capítulo 6 - Estudo da degradação das ferramentas	71
6.1 - Análise do desgaste das ferramentas	71
6.1.1 - Análise e discussão dos resultados obtidos com a estratégia convencional	71
6.1.2 - Análise e discussão dos resultados obtidos com a estratégia trocoidal	81
Capítulo 7 - Conclusões e trabalhos futuros	91
7.1 - Conclusões	91
7.2 - Trabalhos futuros	92

Índice de figuras

Figura 2.1 – Relação entre dureza e tenacidade dos materiais utilizados para ferramentas de corte (Mitsubishi, 2015)	6
Figura 2.2 – Exemplos de ferramentas fabricadas em aço rápido (JSSTools, 2012)..7	
Figura 2.3 – Evolução da dureza dos materiais em função da temperatura (Gabaldo & Prado, 2015).....	8
Figura 2.4 – Representação da microestrutura do “metal duro”- adaptado de (Coromant, 2009)	9
Figura 2.5 – Classificação dos carbonetos sinterizados (Sandvik, 2015).....	10
Figura 2.6 – Representação do número de camadas e revestimentos aplicados em ferramentas de carbonetos sinterizados, pelos processos PVD [(a) e (b)] e CVD [(c), (d) e (e)] (Sandvik, 2005)	11
Figura 2.7 – Representação de insertos (pastilhas) cerâmicos (Tools, 2013-2014)..	13
Figura 2.8 – Pastilhas intercambiáveis para torneamento com pontas em PCBN (Sandvik, 2015)	15
Figura 2.9 – Pastilhas para torneamento com pontas em PCD (Sandvik, 2015).....	16
Figura 3.1 – Representação dos tipos de avarias ocorridas em ferramentas de corte: (a) Lascamento, (b) Quebra, (c) Fissuras térmicas, (d) Deformação plástica e (e) Apara aderente (Sandvik, 2010)	18
Figura 3.2 – Esquema representativo das principais áreas de desgaste na ferramenta de corte (adaptado de (Machado, et al., 2009).....	22
Figura 3.3 – Ilustração dos três tipos de desgaste verificados em ferramentas de corte: (a) Cratera, (b) Flanco e (c) Entalhe (Sandvik, 2010).....	22
Figura 3.4 – Diagrama dos diversos mecanismos de desgaste das ferramentas de corte em função da temperatura (Souza, 2011).....	27
Figura 3.5 – Formas e parâmetros de medição de desgaste em ferramentas de torneamento - adaptado de (Machado, et al., 2009)	28
Figura 3.6 – Representação das formas do desgaste de flanco: (a) Uniforme, (b) Não uniforme e (c) Entalhe (ISO-8688-1, 1989)	29

Figura 3.7 - Representação das formas do desgaste na face de ataque: (a) Cratera e (b) Escada (ISO-8688-1, 1989).....	30
Figura 3.8 – Evolução do desgaste na face de saída (VB) em função do tempo de corte - adaptado de (Carla, 2015).....	30
Figura 4.1 – Evolução da corrosão em função do teor em cromo nos aços inoxidáveis (Carbó, 2015).....	33
Figura 4.2 – Exemplos de aços inoxidáveis ferríticos e martensíticos - série 400 (Carbó, 2015).....	35
Figura 4.3 – Exemplo de aços inoxidáveis austeníticos - Série 200 e 300 (Carbó, 2015)	38
Figura 4.4 – Representação da microestrutura do aço inoxidável duplex (a ferrite aparece como a fase mais escura) (Loureiro, 2010)	40
Figura 4.5 – Comparação da tensão de cedência entre aços inoxidáveis duplex e o austenítico AISI 316L (IMOA, 2012)	41
Figura 4.6 – Resistência ao impacto dos aços inoxidáveis duplex e o 316L (Senatore, et al., 2007).....	42
Figura 4.7 – Índice de maquinabilidade para diferentes tipos de aços inoxidáveis (Sandvik, 2010).....	47
Figura 4.8 – Índice da maquinabilidade de aços inoxidáveis duplex comparado com o AISI 316 para ferramentas de carboneto cementado e de aço rápido (IMOA, 2012).....	49
Figura 5.1 – Centro de maquinagem Haas UMC-750 SS (Haas, 2016)	52
Figura 5.2 – Fresa utilizada nos ensaios: (a) vista lateral e (b) vista de topo	52
Figura 5.3 – Representação da pastilha na vista frontal (a), lateral (b) e de topo (c).....	53
Figura 5.4 – Representação esquemática e dimensões do bloco de inox duplex	54
Figura 5.5 – Porta-ferramentas <i>weldon</i> com pino de fixação CAT 40X45° M16	55
Figura 5.6 – Desenho técnico do porta-ferramentas (BTfixo, s.d.)	55
Figura 5.7 – Montagem do equipamento para aquisição de imagens	56
Figura 5.8 – Interface do <i>software Axion Vision LE</i> usado para medir o desgaste das ferramentas.....	56

Figura 5.9 – Principais elementos de interface do <i>software</i> Mastercam® X9: 1) - Menu bar, 2) - Toolbars, 3) - Autocursor toolbar, 4) - General selection toolbar, 5) - Ribon bars, 6) - Operation managers pane, 7) - Graphics window, 8) - Most recently used toolbar, 9) - Status bar.....	57
Figura 5.10 – Representação de trajetórias para o ciclo de facejamento: (a) Zig-zag, (b) One-way e (c) Dynamic.....	58
Figura 5.11 – Representação de trajetórias para abertura de caixas: (a) Zig zag, (b) Constant Overlap Spiral, (c) Parallel Spiral, (d) Parallel Spiral, Clean Corners, (e) Morph Spiral, (f) High Speed, (f.1) High Speed Trocoidal, (g) One Way, (h) True Spiral	59
Figura 5.12 – Representação da fresagem tradicional em cantos com raio igual a 50% do Dc (Sandvik, 2010).....	61
Figura 5.13 – Aumento do raio de canto para 75% do Dc (Sandvik, 2010).....	61
Figura 5.14 – Raio de canto igual a 100% do Dc (Sandvik, 2010)	62
Figura 5.15 – Trajetória trocoidal da ferramenta (HEIDENHAIN, 2016)	62
Figura 5.16 – Evolução das condições de corte em fresagem trocoidal (Sandvik, 2010)	63
Figura 5.17 – Fixação do bloco à mesa do centro de maquinagem.....	65
Figura 5.18 – Sonda Renishaw® utilizada para determinar o zero-peça.....	66
Figura 5.19 - Trajetória de maquinagem, opção <i>Facing Dynamic</i> , gerada pelo Mastercam®	67
Figura 5.20 - Trajetória de maquinagem, opção <i>Peel Mill</i> , gerada pelo Mastercam®	69
Figura 6.1 – Evolução do desgaste de flanco (VB_1) das pastilhas de grau PH7740, em função do tempo de maquinagem para o ensaio C1.....	74
Figura 6.2 – Evolução do desgaste de entalhe (VB_3) para as pastilhas de corte PH7740, em função do tempo de maquinagem para o ensaio C1	75
Figura 6.3 – Evolução do desgaste de flanco (VB_1) para as pastilhas de corte PH7930, em função do tempo de maquinagem para o ensaio C2.....	76

Figura 6.4 – Evolução do desgaste de entalhe (VB_3) para as pastilhas de corte PH7930, em função do tempo de maquinagem para o ensaio C2	77
Figura 6.5 - Evolução do desgaste de flanco (VB_1) para as pastilhas de corte PH7930, em função do tempo de maquinagem para o ensaio C3	78
Figura 6.6 – Evolução do desgaste de entalhe (VB_3) para as pastilhas de corte PH7930, em função do tempo de maquinagem para o ensaio C3	79
Figura 6.7 - Comparação entre vida útil da ferramenta e taxa de remoção de material para a estratégia convencional	80
Figura 6.8 - Evolução do desgaste de flanco (VB_1) em função do tempo de maquinagem nos ensaios T1 e T2.....	83
Figura 6.9 – Evolução do desgaste de entalhe (VB_3) em função do tempo de maquinagem nos ensaios T1 e T2.....	84
Figura 6.10 – Evolução do desgaste de flanco (VB_1) em função do tempo de maquinagem nos ensaios T3 e T4.....	85
Figura 6.11 – Evolução do desgaste de entalhe (VB_3) em função do tempo de maquinagem nos ensaios T3 e T4.....	86
Figura 6.12 - Evolução do desgaste de flanco (VB_1) em função do tempo de maquinagem nos ensaios T4 e T5.....	87
Figura 6.13 – Evolução do desgaste de entalhe (VB_3) em função do tempo de maquinagem nos ensaios T4 e T5.....	88
Figura 6.14 – Evolução do desgaste de entalhe (VB_3) em função do tempo de maquinagem no Ensaio T6	89
Figura 6.15 - Comparação entre vida útil da ferramenta e taxa de remoção de material para a estratégia trocoidal	89

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Composição química aproximada (% em massa) e dureza mínima dos aços rápidos mais utilizados, segundo a AISI	7
Tabela 2.2 - Tendência de crescimento da dureza, resistência ao desgaste e tenacidade.....	10
Tabela 3.1 – Causas e soluções para minorar o problema das avarias na ferramenta de corte (Sandvik, 2010)	21
Tabela 3.2 - Causas e soluções para minimizar o desgaste em ferramenta de corte (Sandvik, 2010)	24
Tabela 3.3 – Critérios para determinar o fim de vida útil de ferramentas de acordo com a norma (ISO-3685, 1993).....	31
Tabela 3.4 – Critérios para determinar o fim de vida útil de ferramentas de acordo com a norma (ISO-8688-1, 1989)	32
Tabela 4.1 – Propriedades mecânicas de alguns aços ferríticos no estado recozido (Moreira & Lebrão, 2015)	36
Tabela 4.2 – Propriedades mecânicas de alguns aços inoxidáveis martensíticos (Moreira & Lebrão, 2015)	37
Tabela 4.3 – Propriedades mecânicas de alguns aços inoxidáveis austeníticos (Abinox, 2015).....	39
Tabela 4.4 - Composição química (% em massa) típica de alguns aços dúplex (IMOA, 2012)	40
Tabela 4.5 – Limites mínimos das propriedades mecânicas para chapa de aço inoxidável duplex (IMOA, 2012)	41
Tabela 4.6 - Denominação comercial e correspondência com a designação ASTM de alguns aços inoxidáveis PH (Moreira & Lebrão, 2015).....	43
Tabela 4.7 – Propriedades mecânicas de alguns aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação (Moreira & Lebrão, 2015)	44
Tabela 4.8 – Orientações para fresagem de aços inoxidáveis duplex com ferramentas de carbonetos cementados (IMOA, 2012).....	50

Tabela 5.1 - Características gerais da ferramenta utilizada (Palbit, 2015)	53
Tabela 5.2 – Especificações técnicas da pastilha ANHX 120608 PNER-LS (Palbit, 2015)	53
Tabela 5.3 – Composição química (% em massa) do aço inoxidável duplex GX6CrNiN26-7, EN 10283 - 1.4347 (ARSOPI, 2015).....	54
Tabela 5.4 - Propriedades mecânicas do aço inoxidável duplex GX6CrNiN26-7 (1.4347) EN 10283 (ARSOPI, 2015).....	54
Tabela 5.5 – Especificações técnicas do porta-ferramentas (Haimer, 2016).....	55
Tabela 5.6 – Parâmetros de corte indicados pela Palbit®	67
Tabela 5.7 - Parâmetros de corte usados no ensaio convencional	68
Tabela 5.8 – Valores obtidos para o ensaio convencional.....	68
Tabela 5.9 - Parâmetros de corte usados nos ensaios com a estratégia trocoidal...	69
Tabela 5.10 – Valores obtidos para os ensaios com a estratégia trocoidal	70
Tabela 6.1 – Sequência do desgaste na face de saída principal da pastilha, na maquinagem convencional do aço inoxidável duplex	72
Tabela 6.2 - Sequência do desgaste na face de saída principal da pastilha, na maquinagem trocoidal do aço inoxidável duplex	81

Simbologia e Abreviaturas

2D - Duas dimensões

3D - Três dimensões

a_e - Largura de corte

AISI - *American Iron and Steel Institute*

a_p - Profundidade de corte

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

CAD - Desenho Assistido por Computador (*Computer Aided Design*)

CAM - Fabrico Assistido por Computador (*Computer-Aided Manufacturing*)

cfc - Cúbica de faces centradas

CNC - Controlo Numérico Computadorizado

CVD - Deposição Química em fase de Vapor (*Chemical Vapour Deposition*)

D_c - Diâmetro da fresa

D_{cap} - Diâmetro de corte na profundidade de corte efetiva, a_p

DIN - *Deutsches Institut für Normung*

D_m - Largura do canal

D_{vf} - Diâmetro da espiral na trajetória trocoidal

EN - Norma Europeia (*European Standard*)

f_z - Avanço por dente

$HR_{(B)}$ - *Hardness Rockwell (Scale Symbol)*

HSS - *High Speed Steel*

HV - *Hardness Vickers*

IM - Índice de maquinabilidade

ISO - *International Organization for Standardization*

KB - Largura da cratera

KM - Distância da aresta de corte principal ao centro da cratera

KT - Profundidade máxima da cratera

KT₁ - Desgaste de cratera

KT₂ - Desgaste em forma de escada

MTCVD - Deposição Química em fase de Vapor a Temperaturas Intermédias (*Medium temperature chemical vapor deposition*)

n - Velocidade de rotação

PCBN - Nitreto de Boro Cubico Policristalino (*Polycrystalline Cubic Boron Nitride*)

PCD - Diamante Policristalino (*Polycrystalline Diamond*)

PH - Endurecido por Precipitação (*Precipitation hardening*)

PVD - Deposição Física em fase de Vapor (*Physical Vapour Deposition*)

Q - Taxa de remoção de material

USA - *United States of America*

VB - Desgaste médio de flanco

VB₁ - Desgaste de flanco uniforme

VB₂ - Desgaste de flanco não uniforme

VB₃ - Desgaste de entalhe

VB_{máx} - Desgaste máximo de flanco

VC - Desgaste de entalhe na aresta secundária de corte

V_c - Velocidade de corte

V_f - Velocidade de avanço

V_{fm} - Velocidade de avanço periférico

VN - Desgaste de entalhe na aresta principal de corte

w - passo radial

Z_n - Número total de dentes

Capítulo 1

Introdução

1.1 - Enquadramento do tema

A maquinagem dos metais é caracterizada pela elevada deformação plástica localizada no material devido à formação da apanha. Entre os diferentes processos de maquinagem de materiais metálicos utilizados pela indústria metalomecânica destaca-se a fresagem, que é um dos métodos de corte por arranque de apanha mais versátil e mais utilizado. Embora este método de maquinagem pareça simples, devido aos elevados índices de produção, é na verdade uma operação que envolve muitas variáveis o que o torna algo complexo.

O desenvolvimento tecnológico na área da maquinagem fez com que surgisse no mercado uma grande multiplicidade de materiais e de revestimentos para ferramentas de corte. O objetivo destes revestimentos é aumentar a resistência ao desgaste, diminuir o atrito entre a ferramenta e a peça, reduzir as forças de corte, garantir a estabilidade térmica e química necessária e melhorar a resistência à oxidação. A conjugação de todos estes fatores permite que as ferramentas suportem temperaturas de corte mais elevadas e possibilitam maiores velocidades de corte.

A produção da maioria das peças mecânicas é efetuada em máquinas com controlo numérico computadorizado (CNC) pelo processo de fresagem a dois eixos e meio, em operações de desbaste, enquanto o acabamento pode ser feito em máquinas de 5 eixos. A fresagem a dois eixos e meio é composta por trajetórias a 2D (duas

dimensões), no plano XY, e com incremento em diferentes níveis ou patamares correspondente a uma altura determinada na coordenada Z. Dada a complexidade geométrica que algumas peças podem apresentar, as trajetórias de maquinagem são normalmente calculadas por *softwares* de fabrico assistido por computador (CAM, do inglês *Computer-Aided Manufacturing*).

Na fresagem existem várias estratégias para gerar trajetórias de maquinagem entre as quais prevalecem as paralelas a uma direção, ou em zigue-zague, e as equidistantes ao contorno (também conhecidas por pelo termo em inglês *offset*). Além das soluções anteriores têm sido utilizadas outras estratégias para a geração de trajetórias, nomeadamente a trocoidal. Esta estratégia pode ser definida como sendo a conjugação simultânea de dois movimentos, um circular ou aproximadamente circular e outro de translação no sentido radial.

Graças à utilização de estratégias de corte inovadoras, é possível reduzir significativamente o tempo de maquinagem, produzir geometrias de elevada complexidade e simultaneamente manter um apertado rigor dimensional e de qualidade superficial do produto. É nestas circunstâncias, que o Departamento de Engenharia Mecânica, do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra tem realizado ao longo da sua existência, formação académica e prestação de serviços na área da maquinagem. Nas últimas décadas, para responder aos desafios crescentes, revelou-se de grande importância a programação e a maquinagem CNC, conjuntamente com as tecnologias de desenho assistido por computador (CAD, do inglês *Computer Aided Design*) e de CAM.

O trabalho apresentado insere-se numa lógica de reforço das capacidades técnicas e científicas do Laboratório de Fabrico Assistido por Computador, que resulta da colaboração desenvolvida com a empresa Palbit®. Foi identificado o interesse em aprofundar o conhecimento na maquinagem de determinados materiais considerados de difícil maquinabilidade e usualmente utilizados em aplicações industriais.

É neste contexto que surge o interesse pela maquinagem de ligas de aço inoxidável duplex, as quais assumem um papel de destaque na indústria e com grande aplicação em equipamentos de processo, devido à sua elevada resistência à corrosão e resistência mecânica a altas temperaturas, que não se encontram em outras ligas metálicas.

1.2 - Objetivos e metodologia

O presente trabalho tem como objetivo principal avaliar a degradação das ferramentas de corte, com pastilhas intercambiáveis de carbonetos sinterizados revestidos com AlTiN pelo método de deposição física em fase de vapor (PVD, do inglês *Physical Vapour Deposition*), na fresagem do aço inoxidável sem fluido de refrigeração. Para este efeito pretende-se, em primeiro lugar, proceder à análise comparativa entre duas pastilhas de carbonetos sinterizados com diferentes graus, e selecionar a mais adequada através de ensaios de maquinagem recorrendo a uma estratégia convencional. Posteriormente, pretende-se comparar a vida útil da pastilha selecionada recorrendo a ensaios de maquinagem utilizando uma estratégia trocoidal. Neste âmbito e com as estratégias referidas anteriormente, serão selecionados parâmetros de corte mais adequados para cada caso, e avaliada sua influência no processo de fresagem.

1.3 - Estrutura do trabalho

Este trabalho está organizado em sete capítulos, acrescido das referências bibliográficas consultadas. Quatro dos capítulos abordam matérias técnico-científicas necessárias à compreensão do trabalho, e os outros três referem-se à componente experimental realizada para avaliar a degradação das ferramentas de corte. De seguida faz-se uma descrição sucinta sobre os conteúdos de cada um.

No **Capítulo 1** faz-se uma breve contextualização do trabalho, apresentam-se os objetivos gerais que fundamentaram a sua execução e apresenta-se também a estrutura do trabalho;

No **Capítulo 2** apresentam-se os principais materiais usados em ferramentas de corte, a sua classificação geral e referem-se as características e utilização dos mesmos;

O **Capítulo 3** apresenta os fundamentos teóricos sobre avarias e desgastes de ferramentas e os mecanismos causadores dos mesmos. Referem-se os

procedimentos, critérios e parâmetros para mensurar a vida útil das ferramentas de corte;

No **Capítulo 4** define-se o que são aços inoxidáveis e como são classificados, apresentam-se as composições, características e aplicações dos diferentes tipos de aço inoxidável. Apresenta-se conceito de índice de maquinabilidade e comparam-se os diferentes tipos de aços inoxidáveis com base neste conceito;

O **Capítulo 5** refere-se à componente experimental onde se apresentam os equipamentos, materiais e metodologia utilizada;

No **Capítulo 6** são apresentados, analisados e discutidos os resultados obtidos com o trabalho experimental;

No **Capítulo 7** apresentam-se as principais conclusões deste trabalho e sugerem-se temas de estudo para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Materiais para ferramentas de corte

2.1 - Caracterização dos materiais para ferramentas de corte

A maquinagem é um processo mecânico de corte por arranque de aparas, com vista à criação de uma peça, que implica a formação de uma apanha do material que se corta utilizando ferramentas de um material mais duro e mecanicamente mais resistente que a peça (Souza, 2011; Editora, 2003-2016).

Os materiais com as características adequadas ao fabrico de ferramentas de corte devem apresentar um conjunto de propriedades físicas e químicas, que conjugadas permitam obter uma ferramenta que apresente, em maior ou menor grau, as seguintes características (Davim, 2008; Diniz, et al., 2008):

- Elevada dureza a frio e a quente;
- Elevada resistência ao desgaste;
- Elevada tenacidade;
- Baixo coeficiente de atrito;
- Elevada condutibilidade térmica;
- Baixo coeficiente de dilatação;
- Elevada estabilidade química.

Os materiais utilizados para ferramentas de corte devem apresentar um equilíbrio entre resistência à deformação, resistência ao desgaste e tenacidade. Como em geral,

dureza e tenacidade são duas propriedades antagónicas (alta dureza associa-se a baixa tenacidade e vice-versa), como se demonstra na Figura 2.1, o balanço destas propriedades tornou-se um desafio para os fabricantes de ferramentas de corte. O arranjo destas propriedades foi conseguido com a produção de ferramentas com diferentes composições químicas, refinamento dos grãos, controlo dos processos de fabrico e do tratamento térmico (Davim, 2008; Machado, et al., 2009; Souza, 2011).

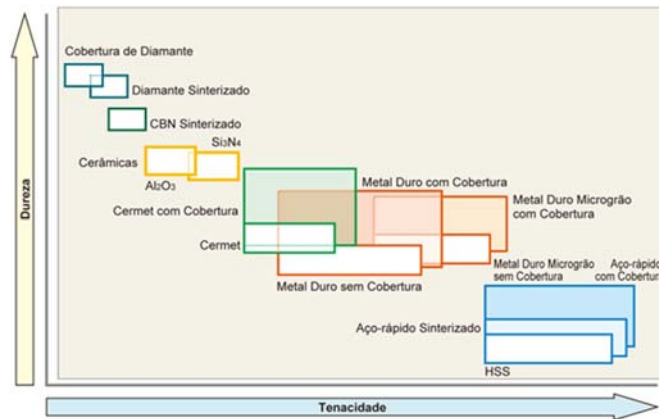


Figura 2.1 – Relação entre dureza e tenacidade dos materiais utilizados para ferramentas de corte (Mitsubishi, 2015)

Não existindo uma classificação geral de materiais para ferramentas de corte por arranque de apara, estes podem ser agrupados por ordem crescente de dureza nas seguintes classes (Davim, 2008; Diniz, et al., 2008):

- Aços rápidos;
- Carbonetos sinterizados;
- Cermets;
- Cerâmicos;
- Ultraduros.

2.1.1 - Aços rápidos

Os aços rápidos, também conhecidos pela sigla HSS (do inglês *High Speed Steel*), são assim designados pois aquando do seu desenvolvimento no final do século XIX, eram os materiais que suportavam maiores velocidades de corte, entre 30 a 35 m/min. Comparando com os materiais usados atualmente em ferramentas, esses valores são

relativamente baixos. No entanto os aços rápidos ainda são muito utilizados no fabrico de ferramentas, como mostra a Figura 2.2, principalmente as de forma complexa uma vez que o seu custo é relativamente baixo quando comparado com outros materiais (Machado, et al., 2009).



Figura 2.2 – Exemplos de ferramentas fabricadas em aço rápido (JSSTools, 2012)

Os aços rápidos podem ser classificados, segundo a AISI (*American Iron and Steel Institute*), em dois grupos fundamentais: os aços rápidos ao tungsténio (identificados pela letra T) e os aços rápidos ao molibdénio (identificados pela letra M). A Tabela 2.1 apresenta a composição química e a dureza mínima dos aços rápidos, T e M, mais utilizados segundo a AISI.

Tabela 2.1 – Composição química aproximada (% em massa) e dureza mínima dos aços rápidos mais utilizados, segundo a AISI

Aço [AISI]	Elementos						Dureza mínima [HV]
	C	Cr	Mo	W	V	Co	
T1	0.75	4.00	-	18.00	1.00	-	823
T2	0.80	4.00	-	48.00	2.00	-	823
T4	0.75	4.00	-	48.00	10.00	5.00	849
T5	0.80	4.00	-	18.00	2.00	8.00	869
T6	0.80	4.50	-	20.00	1.50	12.00	969
T15	1.50	4.00	-	12.00	5.00	5.00	890
M1	0.80	4.00	8.00	1.50	1.00	-	823
M2	0.85	4.00	5.00	6.00	2.00	-	836
M4	1.30	4.00	4.50	5.50	4.00	-	849
M15	1.55	4.50	4.10	6.50	5.00	5.00	869
M34	0.90	4.00	8.00	2.00	2.00	8.00	869
M42	1.10	3.75	9.50	1.50	1.15	8.00	897

Os materiais desta classe (aços rápidos) são tenazes, apresentam elevada resistência ao desgaste e elevada dureza a quente, quando comparados com os aços ao carbono, até temperaturas de corte da ordem dos 500 a 600 °C. No entanto continua a ser significativamente reduzida a resistência ao desgaste e a dureza a quente, quando

comparados com outros materiais de ferramentas, conforme se pretende mostrar através da Figura 2.3 (Davim, 2008; Diniz, et al., 2008).

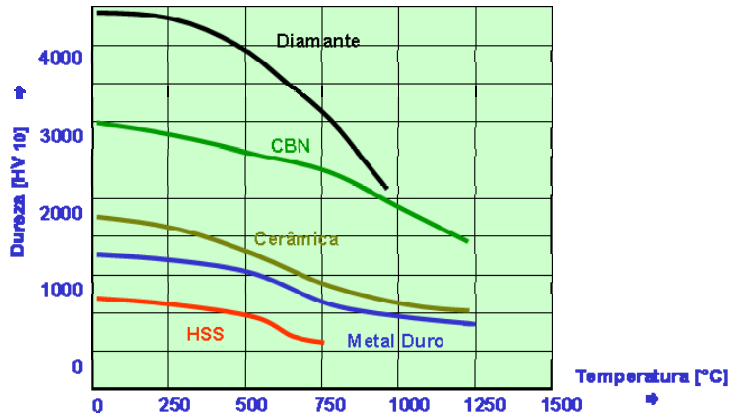


Figura 2.3 – Evolução da dureza dos materiais em função da temperatura (Gabaldo & Prado, 2015)

Importa realçar dois grandes desenvolvimentos tecnológicos que permitiram aumentar a dureza superficial e a resistência ao desgaste das ferramentas de aço rápido. O primeiro é a produção destas através da pulverometalurgia (ou metalurgia do pó), o segundo refere-se ao processo de revestimento das mesmas, através de deposição química em fase de vapor (CVD, do inglês *Chemical Vapour Deposition*) e deposição física em fase de vapor (PVD, do inglês *Physical Vapour Deposition*) (Davim, 2008).

Os aços rápidos produzidos pela metalurgia do pó, designados também de aços rápidos sinterizados, envolvem três etapas fundamentais: a obtenção dos pós através da atomização do metal líquido, a compactação e a sinterização em fornos de atmosfera controlada. O resultado obtido é um produto com a forma desejada, bom acabamento superficial, composição química e propriedades mecânicas controladas.

O revestimento de ferramentas iniciou-se na década de 60 do século passado, através do método de deposição química em fase de vapor, quando se aplicou nitreto de titânio (TiN) em ferramentas de carbonetos sinterizados. Este revestimento revelou-se inicialmente inadequado para o aço rápido devido às elevadas temperaturas envolvidas no processo (na ordem dos 1000 °C), que é superior à temperatura de precipitação dos carbonetos dos aços rápidos temperados e revenidos, com a consequente perda de dureza. Por volta de 1980 foi desenvolvido o processo de deposição física em fase de vapor, com maior sucesso, uma vez que este é realizado a uma temperatura entre os 450 e os 500 °C, não danificando o substrato dos aços rápidos já tratados termicamente (Davim, 2008; Diniz, et al., 2008).

2.1.2 - Carbonetos sinterizados

Os carbonetos sinterizados, também conhecidos por “metal duro”, terão aparecido por volta de 1920, na Alemanha, quando *Schröter* conseguiu produzir em laboratório carboneto de tungstênio (WC) em pó (Machado, et al., 2009).

Este material obtido através da pulverometalurgia, é constituído por partículas muito duras, geralmente de carboneto de tungstênio. Pode apresentar-se só ou combinado com outros carbonetos, nomeadamente: de titânio (TiC), de tântalo (TaC) e de nióbio (NbC). O tamanho destas partículas pode variar entre 1 a 10 μm ocupando entre 60 a 95 % do volume total do material. O metal aglomerante é, normalmente o cobalto, cuja função é ligar as partículas duras, sendo este elemento responsável pela tenacidade do material (Davim, 2008; Diniz, et al., 2008). A Figura 2.4 representa a microestrutura de um carboneto sinterizado, em que as partículas foram manchadas com tonalidades diferentes para facilitar a sua identificação

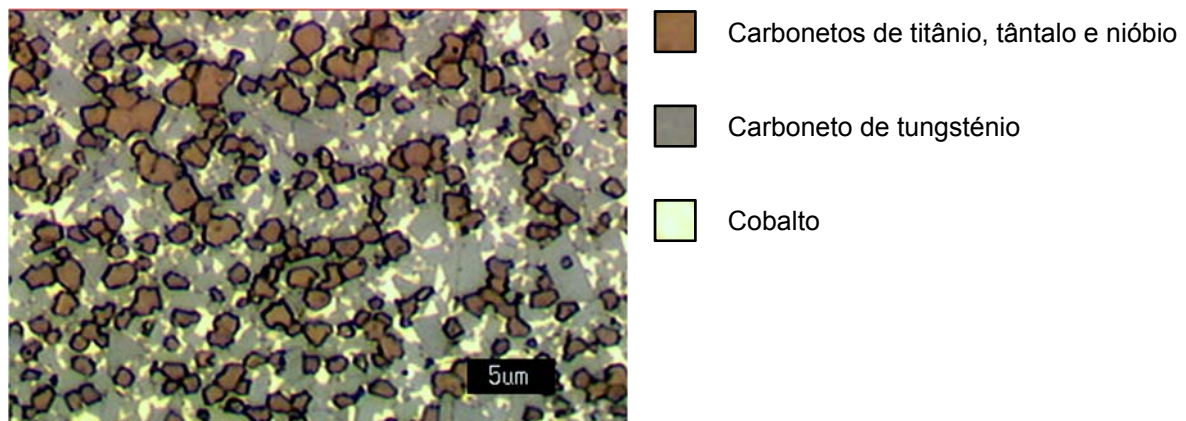


Figura 2.4 – Representação da microestrutura do “metal duro”- adaptado de (Coromant, 2009)

A norma ISO (*International Organization for Standardization*) 513 organiza os diversos tipos de carbonetos sinterizados em seis classes, conforme representado na Figura 2.5. Cada uma das classes está identificada por uma coloração específica, assim como a área de aplicação das mesmas.

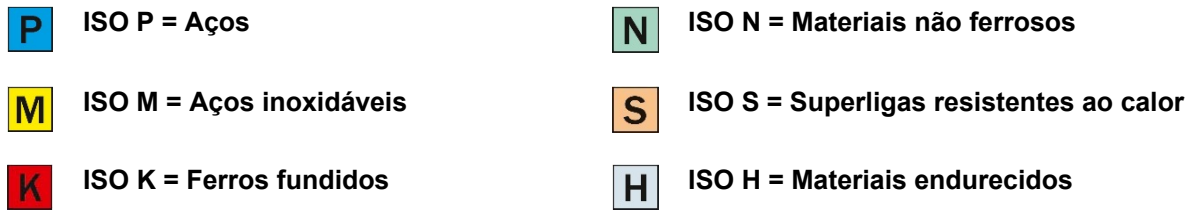


Figura 2.5 – Classificação dos carbonetos sinterizados (Sandvik, 2015)

Na Tabela 2.2 apresenta-se a subdivisão das classes citadas anteriormente, e a tendência de crescimento da dureza, resistência ao desgaste e tenacidade das mesmas. A letra de designação da classe é sempre acompanhada de um número que representa a tenacidade e a resistência ao desgaste do carboneto sinterizado. Quanto maior o valor numérico, maior a tenacidade e menor a resistência ao desgaste.

Tabela 2.2 - Tendência de crescimento da dureza, resistência ao desgaste e tenacidade	
Designação [ISO]	Dureza e resistência ao desgaste
	Tenacidade
P01 ... P50	
M01 ... M40	
K01 ... K40	
N01 ... N30	
S01 ... S30	
H01 ... H30	

O revestimento de ferramentas de carbonetos sinterizados ganhou grande importância, pois esse revestimento pode garantir um desempenho superior quando comparado com as ferramentas não revestidas, representando cerca de 80 a 90% de todas as pastilhas para ferramentas de corte (Machado, et al., 2009; Sandvik, 2010).

Ao contrário das ferramentas de aço rápido, que apenas usam o processo PVD, os carbonetos sinterizados podem receber tanto este processo como o CVD. Têm sido

desenvolvidos novos procedimentos de CVD, utilizando temperaturas intermédias entre o CVD e o PVD, chamados MTCVD (do inglês *Medium Temperature Chemical Vapor Deposition*) com temperaturas entre os 750 e 900 °C.

Os revestimentos das pastilhas de corte podem ser de camada única, dupla ou tripla (Figura 2.6), sendo os mais usados o carboneto de titânio (TiC), o óxido de alumínio (Al_2O_3), o nitreto de titânio (TiN), o carbonitreto de titânio (TiCN) e o nitreto de titânio-alumínio (TiAlN) ou nitreto de alumínio-titânio (AlTiN), dependendo se houver mais alumínio ou titânio na cobertura (Diniz, et al., 2008).

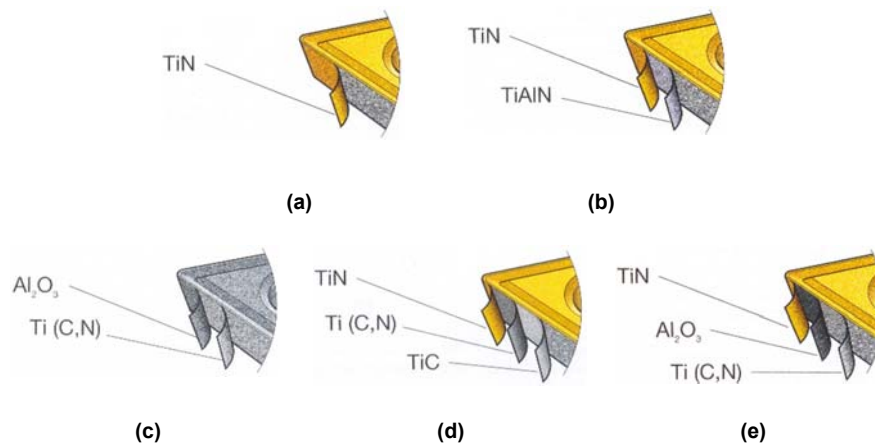


Figura 2.6 – Representação do número de camadas e revestimentos aplicados em ferramentas de carbonetos sinterizados, pelos processos PVD [(a) e (b)] e CVD [(c), (d) e (e)] (Sandvik, 2005)

As principais características das camadas de revestimento referidas anteriormente são as seguintes (Diniz, et al., 2008):

- TiC - utilizado como primeira camada pois facilita a adesão das camadas de revestimento com o substrato, apresenta elevada resistência ao desgaste por abrasão, baixa tendência de colar ao material da peça (minimizando o desgaste por adesão e formação de apara aderente) e baixo coeficiente de dilatação térmica.
- TiCN - tem características similares ao TiC, mas apresenta um coeficiente de atrito mais baixo que o carboneto de titânio.
- Al_2O_3 - garante a estabilidade térmica necessária, a temperaturas elevadas, por ser um material cerâmico refratário e possuir alta resistência ao desgaste por abrasão.
- TiN - aplicado normalmente na camada externa, reduz o atrito entre a ferramenta e a apara.

- TiAlN ou AlTiN - maior resistência à oxidação o que permite suportar temperaturas mais altas, baixa condutividade térmica (que protege a aresta de corte e aumenta a dissipação do calor através da apanha) e alta estabilidade química (que reduz significativamente o desgaste de cratera).

2.1.3 - Cermets

Os *cermets* são materiais formados por compostos cerâmicos refratários não metálicos ligados por um aglomerante metálico de menor ponto de fusão. Os compostos cerâmicos são essencialmente carboneto e nitreto de titânio (TiC e TiN) e podem conter também carbonetos de tungstênio (WC), de tântalo (TaC) e de nióbio (NbC). O elemento de ligação (aglomerante) é geralmente o níquel (Ni), podendo utilizar-se igualmente o cobalto (Co) ou o molibdênio (Mo).

Trata-se de uma classe de materiais que possui resistência ao desgaste, estabilidade química e dureza a quente situada entre os carbonetos sinterizados e os cerâmicos, mantendo a tenacidade na aresta de corte semelhante aos carbonetos sinterizados. Outras propriedades dos *cermets* são a elevada resistência à oxidação e à deformação plástica, baixa tendência à formação de apanha aderente e elevada estabilidade química (Davim, 2008; Diniz, et al., 2008; Machado, et al., 2009).

As principais aplicações dos *cermets* são o acabamento ou desbaste ligeiro em operações de torneamento e fresagem de aços. Dada a grande afinidade química do titânio com a maioria dos materiais não ferrosos, a sua aplicação restringe-se basicamente à maquinagem de materiais ferrosos.

Os *cermets*, à semelhança dos carbonetos sinterizados, também podem ser revestidos por PVD, proporcionando a estas ferramentas maior resistência ao desgaste e à deformação plástica (Sandvik, 2010).

2.1.4 - Cerâmicos

Os materiais cerâmicos são constituídos por elementos metálicos e não metálicos, geralmente na forma de óxidos, carbonetos ou nitretos. Surgiram no mercado no final dos anos 50 do século passado, sob a forma de insertos (Figura 2.7), à base de óxido de alumínio ou alumina (Al_2O_3). Passaram por um considerável desenvolvimento, sendo um grupo bastante competitivo em especial na maquinagem de materiais endurecidos e ligas termorresistentes (Machado, et al., 2009).



Figura 2.7 – Representação de insertos (pastilhas) cerâmicos (Tools, 2013-2014)

Os cerâmicos usados em ferramentas de corte podem ser divididos em dois grandes grupos, um à base de óxido de alumínio e outro à base de nitreto de silício (Si_3N_4) (Machado, et al., 2009). Os cerâmicos à base de óxido de alumínio são constituídos principalmente por finos grãos de alumina branca obtidos pela metalurgia do pó e prensados a frio, ou por uma mistura de Al_2O_3 com carboneto ou nitreto de titânio prensada a quente, a alumina preta (Davim, 2008).

Os cerâmicos à base de óxido de alumínio estende-se desde a alumina “pura” (alumina branca), apesar desta designação podem conter quantidades vestigiais de outros óxidos nomeadamente, de magnésio (MgO), de crómio (Cr_2O_3), de titânio (TiO_2) e de zircónio (ZrO_2), até às composições que contêm uma adição de cerca de 30% de outros compostos duros como o carboneto de titânio (Davim, 2008; Diniz, et al., 2008).

Na década de 1980 entraram no mercado, e com grande aceitação, ferramentas cerâmicas à base de Al_2O_3 reforçadas com *Whisker* (fibras de carboneto de silício na

forma de cilindros com 0.5 a 0.6 μm de diâmetro e 10 a 80 μm de comprimento) (Machado, et al., 2009).

Os cerâmicos à base de nitreto de silício (Si_3N_4) formam o outro grande grupo de materiais cerâmicos, por vezes adicionados com a alumina e com óxido de ítrio (Y_2O_3) numa matriz de carboneto de titânio. O desenvolvimento destes materiais originou outra variedade de grande importância como ferramenta de corte, que é o SIALON, constituída por uma base de Si_3N_4 em que parte deste foi substituído por alumínio e parte do nitrogénio por oxigénio, obtendo-se um composto de forma Si-Al-O-N (Davim, 2008).

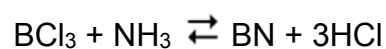
Os materiais cerâmicos usados em ferramentas de corte apresentam um conjunto de propriedades muito vantajosas das quais se destacam: a elevada dureza, a capacidade de suportar elevadas temperaturas sem perder resistência mecânica e estabilidade química o que permite usar velocidades de corte elevadas no corte contínuo. Porém, apresentam também propriedades desvantajosas como a baixa condutividade térmica e principalmente a baixa tenacidade, o que facilita o aparecimento de fissuras e consequentemente a quebra da ferramenta.

As ferramentas cerâmicas são utilizadas em operações de desbaste e acabamento de aços endurecidos, ferros fundidos e ligas metálicas com elevada resistência a altas temperaturas como as de níquel (Davim, 2008; Machado, et al., 2009).

2.1.5 - Ultraduros

Os materiais ultraduros para ferramentas de corte apresentam dureza superior a 3000 HV (do inglês *Hardness Vickers*), dos quais se destacam o nitreto de boro cúbico policristalino (PCBN, do inglês *Polycrystalline Cubic Boron Nitride*) e o diamante sintético policristalino (PCD, do inglês *Polycrystalline Diamond*).

O nitreto de boro (BN) é um material sintético obtido pela reação química entre o boro (B) e o nitrogénio (N). A reação que ocorre é descrita pela seguinte equação química:



A partir de grãos muito finos de BN de estrutura hexagonal, tratados termicamente entre os 1500 e os 1900 °C sob pressão elevada (5000 a 9000 MPa) e na presença de um catalisador para acelerar a sinterização, é obtida uma massa policristalina de nitreto de boro cúbico (Diniz, et al., 2008; Davim, 2008).

Devido ao alto custo destas ferramentas de corte, estas podem apresentar pontas de PCBN ligadas por brasagem a um inserto intercambiável (Figura 2.8) ou sob a forma de camada revestindo um substrato de carboneto sinterizado.



Figura 2.8 – Pastilhas intercambiáveis para torneamento com pontas em PCBN (Sandvik, 2015)

O PCBN é um material que apresenta maior dureza a frio e a quente, quando comparado com os cerâmicos, a tenacidade é equivalente à generalidade dos carbonetos e dos cerâmicos à base de nitretos. Possui elevada condutividade térmica e estabilidade química, sendo mesmo mais estável que o diamante, podendo ser usado na maquinagem de ligas ferrosas sem ocorrer grande desgaste por difusão. São também características deste material a pequena afinidade com os aços a elevadas temperaturas e a elevada resistência à oxidação.

Este material, como ferramenta de corte, é bastante usado na maquinagem de materiais ferrosos de elevada dureza e de ligas de níquel. Geralmente o corte é feito a seco, permite avanços superiores aos cerâmicos e suporta o corte interrompido (Davim, 2008; Diniz, et al., 2008).

Foi apresentado pela primeira vez em 1973 uma ferramenta revestida por uma camada de PCD. Esta camada é obtida por sinterização, a partir de partículas muito finas de monocristais de diamante e um ligante metálico (cobalto), a uma temperatura entre os 1400 e os 2000 °C e a uma pressão entre 6000 e 7000 MPa.

A camada com a espessura entre 0.5 e 1.0 mm, é colocada diretamente sobre uma pastilha de carboneto sinterizado ou ligada a esta por brasagem. Desta forma é

possível obter pastilhas de elevada dureza e resistência ao desgaste, contudo, a um preço muito elevado. Os fabricantes de ferramentas de modo a economizar material usam pontas de PCD, ligadas por brasagem a uma pastilha de carboneto sinterizado como mostra a Figura 2.9, a qual é fixada mecanicamente através de parafuso num porta-ferramentas (Davim, 2008; Diniz, et al., 2008).



Figura 2.9 – Pastilhas para torneamento com pontas em PCD (Sandvik, 2015)

Entre as características do PCD salientam-se a elevada condutividade térmica (550 W/m.K), a extrema dureza (5000 HV) e elevada tensão de rotura transversal (600 – 1100 Mpa) (Davim, 2008). As ferramentas de PCD têm a limitação de não poderem ser utilizadas na maquinagem de materiais ferrosos porque o diamante reage com o ferro originando um desgaste acelerado da ferramenta por difusão.

São recomendados para a maquinagem de ligas de alumínio e para materiais abrasivos, como materiais compósitos com matriz metálica, fibra de carbono reforçada com plástico, plásticos reforçados com fibra de vidro, carbonetos de tungsténio e materiais cerâmicos. Com refrigeração abundante também podem ser usadas em aplicações de acabamento em titânio (Davim, 2008; Sandvik, 2010).

Capítulo 3

Degradação das ferramentas de corte

3.1 - Avarias e desgastes das ferramentas de corte

Durante o processo de maquinagem, em função das condições de corte, as ferramentas ficam sujeita a uma combinação de fatores de natureza térmica, mecânica, química e abrasiva originando a sua degradação o que, mais tarde ou mais cedo, obriga à sua substituição ou afiamento (Souza, 2011).

Podemos considerar dois fenómenos com os quais as ferramentas de corte perdem a sua eficiência durante a maquinagem: a avaria e o desgaste. Em geral, as avarias são fenómenos que acontecem de uma forma repentina e imprevisível originando o colapso ou a perda de uma quantidade considerável de material da ferramenta, sendo apenas detetadas após o ocorrido. Os desgastes causam mudança na forma original da ferramenta, em consequência da perda contínua e progressiva de pequenas quantidades de material em determinadas zonas, localizadas na face de ataque ou na face de saída (Davim, 2008; Machado, et al., 2009).

3.1.1 - Tipos de avarias

Durante a maquinagem podem ocorrer diversos tipos de avarias nas ferramentas, sendo mais frequentes no corte interrompido devido aos choques mecânicos, causados na entrada ou saída da ferramenta da peça, ou ainda pelo choque térmico, originado pela variação rápida de temperatura durante o processo de corte.

Os tipos de avarias verificadas em ferramentas de corte encontram-se representados na Figura 3.1, e são: o lascamento, a quebra, as fissuras térmicas, a deformação plástica e a avara aderente (Davim, 2008; Diniz, et al., 2008). Este último tipo de avaria, segundo Souza (2011), pode ser entendido como uma avaria ou como um mecanismo de desgaste.

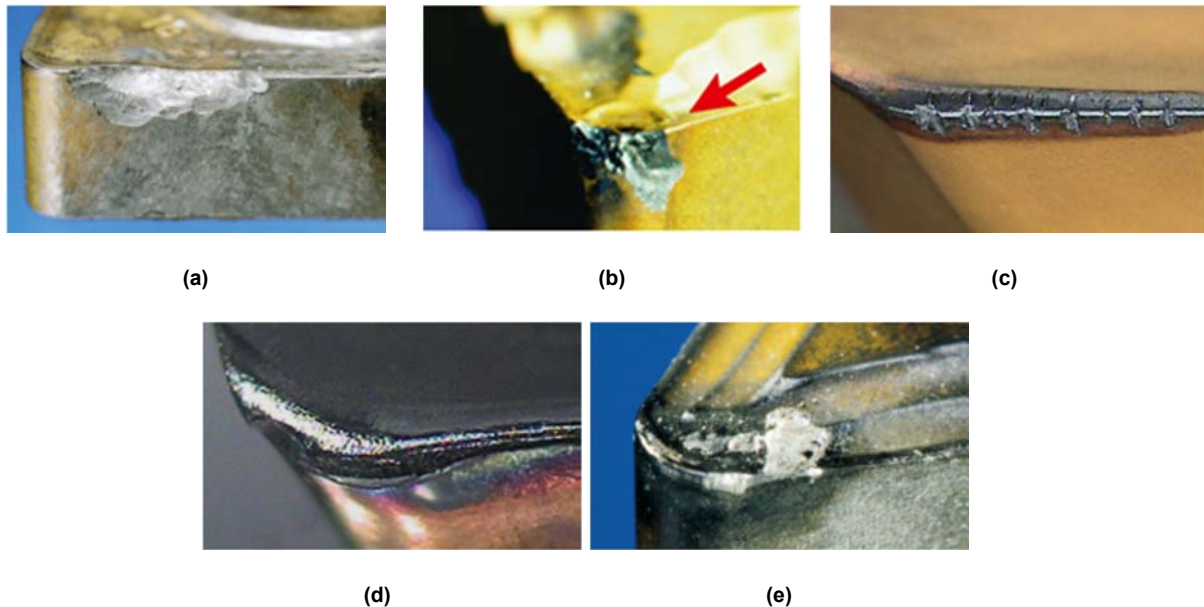


Figura 3.1 – Representação dos tipos de avarias ocorridas em ferramentas de corte: (a) Lascamento, (b) Quebra, (c) Fissuras térmicas, (d) Deformação plástica e (e) Avara aderente (Sandvik, 2010)

3.1.1.1 - Lascamento

O lascamento é uma falha acidental e prematura, que pode ocorrer principalmente quando a ferramenta apresenta elevada dureza. Existem vários fatores que contribuem para potenciar este tipo de avaria, nomeadamente o martelamento da avara, o impacto entre a ferramenta e a peça, a profundidade de corte e/ou a

velocidade de avanço elevada, inclusões duras no material da peça, a peça aderente, as vibrações ou desgaste excessivo na pastilha. O lascamento afeta o acabamento superficial da peça e se a falha continuar a desenvolver-se provoca a quebra da ferramenta (Diniz, et al., 2008; Sandvik, 2010).

3.1.1.2 - Quebra

A quebra de ponta ou a quebra da aresta de corte da ferramenta é provocada, quase sempre, por ação de grandes forças de maquinagem e descontinuidades no corte, porém algumas vezes essa quebra pode ocorrer inesperadamente devido a outros fatores, nomeadamente a elevada dureza da ferramenta, a paragem instantânea do movimento de corte, raio de ponta pequeno, corte interrompido, entre outros (Diniz, et al., 2008).

3.1.1.3 - Fissuras

As fissuras podem ser de origem térmica ou mecânica. As de origem térmica são provocadas pela variação repentina da temperatura durante o processo de maquinagem, isto é, a ferramenta aquece durante o corte efetivo e arrefece na fase sem corte. Essas fissuras geralmente aparecem perpendicularmente à aresta de corte, transformando-se por um processo de erosão em sulcos em forma de pente. As fissuras de origem mecânica podem surgir devido aos choques mecânicos, que ocorrem durante a entrada ou saída da ferramenta da peça, paralelamente à aresta de corte tanto na face de ataque como na face de saída. Estas fissuras ao progredirem podem interagir com outras, inclusive com as de origem térmica, e originar o lascamento e consequente destruição da ferramenta de corte (Machado, et al., 2009). Para evitar a formação de fissuras pode-se, entre outros procedimentos, escolher uma ferramenta mais tenaz, diminuir o avanço por dente e suavizar a entrada da ferramenta com a peça (Diniz, et al., 2008).

3.1.1.4 - Deformação plástica






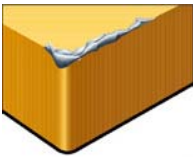
A deformação plástica é provocada pelas elevadas tensões de compressão aplicadas durante a maquinagem, principalmente de materiais de elevada dureza. A combinação de elevadas tensões com a alta temperatura de corte pode causar a deformação da aresta de corte, principalmente em ferramentas com baixa resistência mecânica e com maior tenacidade. Esta situação ocorre geralmente a elevadas velocidades de corte e de avanço, o que conduz a uma falha catastrófica. Em ferramentas cerâmicas, devido à baixa tenacidade, este tipo de avaria não ocorre porque a deformação plástica é muito pequena. Quando o limite de resistência é atingido, esta entra imediatamente em rutura causando a quebra da ferramenta (Diniz, et al., 2008; Machado, et al., 2009).

3.1.1.5 - Apara aderente

A aparta aderente formar-se na superfície de contacto entre a aparta e a face de ataque (soldada por pressão), que permanecendo colada à aresta de corte modifica o seu comportamento relativamente à força de corte, acabamento superficial da peça e desgaste da ferramenta. A aparta aderente cresce gradualmente até que, a qualquer momento rompe bruscamente, causando uma perturbação dinâmica. Quando rompe arranca partículas da face de saída da ferramenta, produzindo um grande desgaste de flanco, principalmente a baixas velocidades de corte. Já a face de ataque da ferramenta é protegida, uma vez que a aparta atrita com a aparta aderente fazendo com que o desgaste de cratera seja mínimo (Machado, et al., 2009). Este tipo de avaria é mais comum na maquinagem de materiais dúcteis, como aços com baixo teor de carbono, aços inoxidáveis e alumínio (Machado, et al., 2009; Sandvik, 2010).

Na Tabela 3.1 apresenta-se de forma sucinta os tipos de avarias mais comuns, que podem ocorrer durante a maquinagem, as causas e as soluções (propostas por um fabricante de ferramentas) para minorar os problemas da degradação das ferramentas.

Tabela 3.1 – Causas e soluções para minorar o problema das avarias na ferramenta de corte (Sandvik, 2010)

Tipo de avaria	Causa	Solução
<p>Lascamento</p> 	<p>A parte da aresta de corte que não está em uso é danificada pelo martelamento da avara. A face de topo e o apoio da pastilha podem ser danificados, resultando numa textura superficial da peça deficiente e desgaste excessivo de flanco.</p> <ul style="list-style-type: none"> • As aparas são desviados contra a aresta de corte. 	<ul style="list-style-type: none"> • Selecione uma classe mais tenaz; • Selecione uma pastilha com uma aresta de corte mais robusta; • Aumente a velocidade de corte (V_c); • Selecione uma geometria positiva; • Reduza o avanço no início do corte; • Melhore a estabilidade.
	<p>Pequenas fraturas na aresta de corte (microlascamento) causando um mau acabamento superficial da peça e desgaste excessivo de flanco.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Classe muito quebradiça; • Geometria da pastilha muito fraca; • Avara aderente. 	<ul style="list-style-type: none"> • Selecione uma classe mais tenaz; • Selecione uma pastilha com uma geometria mais robusta; • Aumente a velocidade de corte ou selecione uma geometria positiva; • Reduza o avanço no início do corte.
<p>Quebra</p> 	<p>Quebra da pastilha que danifica não só a pastilha, mas também o calço e a peça.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Classe muito quebradiça; • Carga excessiva sobre a pastilha; • Geometria da pastilha muito fraca; • Tamanho da pastilha muito pequeno. 	<ul style="list-style-type: none"> • Selecione uma classe mais tenaz; • Reduza o avanço e/ou a profundidade de corte; • Selecione uma geometria mais robusta, de preferência uma pastilha de face única; • Selecione uma pastilha mais espessa ou maior.
<p>Fissuras térmicas</p> 	<p>Pequenas fissuras perpendiculares à aresta de corte causando microlascamento e mau acabamento superficial.</p> <p>Fissuras térmicas resultantes de variações de temperatura causadas por:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Maquinagem intermitente; • Instabilidade no fornecimento de fluido de corte. 	<ul style="list-style-type: none"> • Selecione uma classe mais tenaz com melhor resistência a choques térmicos; • O fluido de corte deve ser aplicado em abundância ou não ser aplicado.
<p>Deformação plástica</p> 	<p>Deformação plástica da aresta, depressão ou impressão do flanco, originando um controle e de aparas imperfeito, causando mau acabamento superficial e quebra da pastilha.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pressão e temperatura de corte muito altas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Selecione uma classe mais resistente ao desgaste (mais dura); • Reduza a velocidade de corte; • Reduza o avanço por dente (f_z).
<p>Avara aderente</p> 	<p>A avara aderente causa um acabamento superficial irregular e microlascamento da aresta de corte quando a avara aderente é removida.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Temperatura da zona de corte muito baixa; • Material muito dúctil, como aços com baixo teor de carbono, aços inoxidáveis e alumínio; <p>O material da peça é soldado à aresta de corte devido a:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Baixa velocidade de corte; • Baixo avanço por dente; • Geometria de corte negativa. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumente a velocidade de corte; • Mude para uma geometria de pastilha mais adequada. • Aumente a velocidade de corte; • Aumente o avanço por dente; • Selecione uma geometria positiva. • Use névoa de óleo ou fluido de corte.

3.1.2 - Tipos de desgaste

Mesmo que a ferramenta possua tenacidade suficiente para evitar uma avaria, esta está sempre sujeita ao desgaste. Durante a maquinagem a ação do corte altera a forma geométrica original da ferramenta, pois verificam-se desgastes contínuos e progressivos normalmente em duas regiões adjacentes à aresta de corte, a face de ataque e a face de saída. A Figura 3.2 apresenta as principais áreas de desgaste na ferramenta de corte (Souza, 2011).

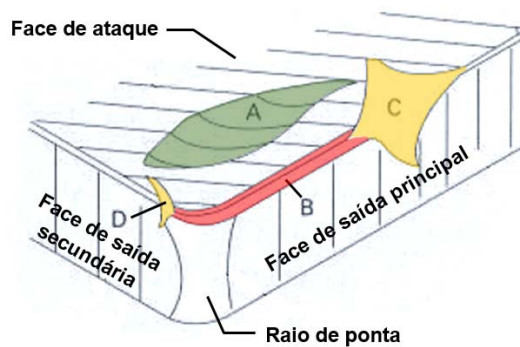


Figura 3.2 – Esquema representativo das principais áreas de desgaste na ferramenta de corte (adaptado de (Machado, et al., 2009)

Os desgastes mais comuns em ferramentas de corte e são o desgaste de cratera, o frontal ou de flanco e o entalhe (Figura 3.3).

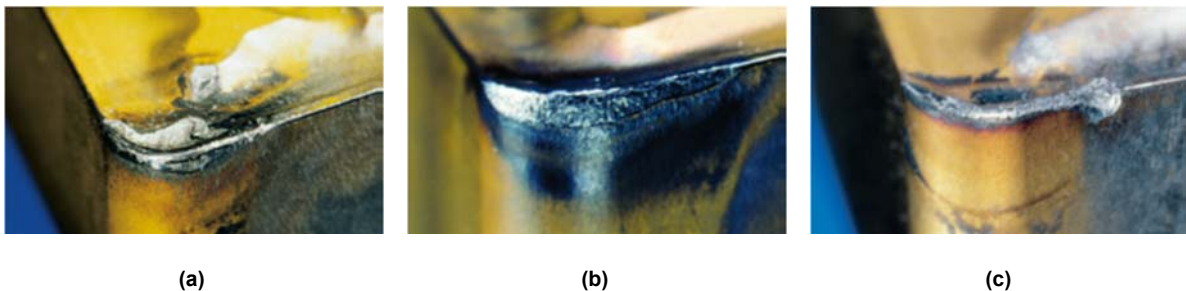


Figura 3.3 – Ilustração dos três tipos de desgaste verificados em ferramentas de corte: (a) Cratera, (b) Flanco e (c) Entalhe (Sandvik, 2010)

3.1.2.1 - Cratera

O desgaste de cratera acontece na superfície da face de ataque da ferramenta, provocado pelo atrito entre a avara e a ferramenta. Este fenómeno é explicado pelo

mecanismo de desgaste por difusão, que ocorre entre o material da peça e a ferramenta. Quando a cratera atinge um tamanho excessivo e se encontra com o desgaste frontal, provoca a quebra da ferramenta (Sandvik, 2010).

3.1.2.2 - Frontal ou de flanco

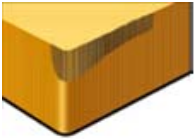



O desgaste frontal ou de flanco, tipo de desgaste mais comum, ocorre na face da saída da ferramenta de corte. É causado pela abrasão, devido ao atrito entre a ferramenta e a peça, dependendo da existência de partículas duras incrustadas no material da peça. Este tipo de desgaste provoca a deterioração do acabamento superficial da peça, por modificar totalmente a forma da aresta de corte, podendo originar peças fora da tolerância. O desgaste frontal é normalmente, o principal tipo de desgaste a considerar na avaliação da vida útil de uma ferramenta de corte (Diniz, et al., 2008; Sandvik, 2010).

3.1.2.3 - Entalhe

O desgaste de entalhe é caracterizado por um dano excessivo localizado na face de ataque e na face de saída da ferramenta (áreas C e D da Figura 3.2) na linha da profundidade de corte. Segundo a Sandvik (2010) este tipo de desgaste é causado pela adesão (solda por pressão da apana), porém, ainda não existe um consenso na literatura que explique exatamente o mecanismo que provoca este tipo de desgaste. Existem diferentes e prováveis causas para o seu desenvolvimento mas, por falta de unanimidade, é comum tratar esta forma de desgaste como um mecanismo que ocorre principalmente na maquinagem de aços inoxidáveis e de ligas termorresistentes (Machado, et al., 2009).

Na Tabela 3.2 expõe-se de forma resumida os tipos de desgaste mais comuns que podem ocorrer durante a maquinagem, as causas e as soluções propostas por um fabricante de ferramentas para reduzir os problemas de desgaste das ferramentas.

Tabela 3.2 - Causas e soluções para minimizar o desgaste em ferramenta de corte (Sandvik, 2010)

Tipo de desgaste	Causa	Solução
<p>Flanco</p> 	<p>Desgaste rápido resultando num mau acabamento superficial ou peça fora da tolerância.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Velocidade de corte muito alta; • Resistência ao desgaste insuficiente; • Avanço por dente muito baixo (f_z). 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduza a velocidade de corte (V_c); • Selecione uma classe mais resistente ao desgaste; • Aumente o avanço.
	<p>Desgaste excessivo reduzindo a vida útil da ferramenta.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vibrações; • Recorte da avara; • Formação de rebarbas na peça; • Mau acabamento superficial da peça; • Aumento de temperatura; • Ruído excessivo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumente o avanço por dente; • Usar o método de fresagem concordante; • Faça o escoamento da avara usando ar comprimido; • Verifique os valores dos parâmetros de corte recomendados.
<p>---</p>	<p>Desgaste desigual danificando o canto.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Batimento radial da ferramenta; • Vibrações; • Vida útil da ferramenta mais curta; • Acabamento superficial insatisfatório; • Alto nível de ruído; • Forças radiais muito altas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduza o batimento radial para menos de 0.02 mm; • Verifique o mandril e a pinça; • Minimizar o balanço da ferramenta; • Reduza os dentes em corte; • Aumente o diâmetro da ferramenta; • Divida a profundidade de corte (a_p) em mais passagens; • Reduza o avanço por dente; • Reduza a velocidade de corte; • Melhore a fixação da ferramenta e da peça.
<p>Cratera</p> 	<p>Desgaste excessivo causa o enfraquecimento da aresta. A quebra da aresta de corte na borda resulta num acabamento superficial deficiente.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Desgaste por difusão devido às temperaturas de corte muito altas na saída do corte. 	<ul style="list-style-type: none"> • Selecione uma classe com cobertura Al_2O_3; • Selecione uma geometria de pastilha positiva; • Primeiro, reduza a velocidade para obter uma temperatura mais baixa, depois reduza o avanço.
<p>Entalhe</p> 	<p>Desgaste de entalhe resultando num mau acabamento superficial e risco de quebra da aresta.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Materiais endurecidos; • Cascas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduza a velocidade de corte; • Selecione uma classe mais tenaz; • Aumente a velocidade de corte ao maquinar materiais termorresistentes com ferramentas cerâmicas.

3.2 - Mecanismos causadores de desgaste

Todas as formas de desgaste da ferramenta devem-se aos vários mecanismos de desgaste, podendo estes atuar de forma isolada ou combinada total ou parcialmente. A literatura apresenta diferenças na classificação dos mecanismos, no entanto, existem pelo menos quatro que são transversais em grande parte dos trabalhos: a adesão, a abrasão, a difusão e a oxidação (Davim, 2008; Souza, 2011).

3.2.1 - Adesão

Este mecanismo ocorre geralmente quando duas superfícies metálicas são postas em contacto sob cargas moderadas, a baixas temperaturas e a baixa velocidade de corte formando-se entre elas uma película metálica que provoca aderência. O fenómeno da aderência está presente na formação da apara aderente, no entanto pode existir desgaste (por adesão) mesmo sem formação de apara aderente (Diniz, et al., 2008). Através deste fenómeno fragmentos microscópicos são arrancados da superfície da ferramenta, e arrastados pelo fluxo de material adjacente às interfaces apara-ferramenta e peça-ferramenta, na face de ataque e na face de saída respetivamente (Davim, 2008).

Tem um papel preponderante para minimizar este tipo de desgaste a utilização de fluido de corte (principalmente com efeito lubrificante), o uso de ferramentas revestidas com materiais de baixo coeficiente de atrito e com granulação fina. Como o processo de perda de material é a nível de grãos, é vantajoso usar ferramentas com grão mais pequeno porque é necessário uma perda elevado de grãos finos para compensar a perda de um grão maior (Machado, et al., 2009).

3.2.2 - Abrasão

É uma das principais causas de desgaste da ferramenta, principalmente na face de saída (desgaste de flanco), já que o atrito da ferramenta é mais intenso com a peça do que com a avara.

O desgaste produzido pela abrasão (ou atrito mecânico) é estimulado pela presença de inclusões duras no material da peça a maquinar, ou de partículas provenientes do desgaste da ferramenta, e pelo aumento da temperatura de corte que reduz a dureza da ferramenta. Assim, quanto maior a dureza a quente da ferramenta, maior a sua resistência ao desgaste abrasivo. Também a avara aderente é responsável por este tipo de desgaste, uma vez que a sua destruição cíclica produz fragmentos de material muito duro devido ao encruamento, os quais, durante o seu sua trajeto de saída potenciam a abrasão nas superfícies de contacto (Davim, 2008; Diniz, et al., 2008).

3.2.3 - Difusão

A difusão é um fenómeno microscópico, ativado pela temperatura, e deve-se à diferença de concentração dos dois metais envolvidos (ferramenta e avara) na zona do corte. Esta é a forma de desgaste presente na face de ataque da ferramenta de corte, que leva à formação de uma cratera de desgaste.

Este fenómeno é tanto mais significativo quanto maior for a temperatura, dado que a velocidade de difusão cresce exponencialmente com a temperatura. Por essa razão, a contribuição da difusão para o desgaste da face de saída revela-se preponderante a elevadas velocidades de corte (Davim, 2008; Diniz, et al., 2008).

3.2.4 - Oxidação

Este tipo de mecanismo desenvolve-se, normalmente, a altas temperaturas e na presença de ar e água (contida no fluido de corte) provocando a oxidação da maioria

dos metais. O desgaste gerado pela oxidação forma-se especialmente nas extremidades do contacto entre a apana e a ferramenta devido ao ar existente nesta região, sendo esta uma possível explicação para o surgimento do desgaste de entalhe (Diniz, et al., 2008).

Na maioria das vezes a oxidação é responsável pela deterioração da aresta de corte secundária, promovendo um mau acabamento superficial das peças, resultando numa redução da vida útil das ferramentas. Este mecanismo de desgaste atua de forma mais acentuada a altas velocidades de corte e quando o material da ferramenta for constituído por aço rápido ou por alguns tipos de carbonetos sinterizados. Contudo, pode também ter alguma influência no desgaste dos materiais cerâmicos (Davim, 2008).

A ação dos mecanismos de desgaste referidos anteriormente e que influenciam o desgaste total da ferramenta encontram-se representados na Figura 3.4. Esses mecanismos dependem de vários parâmetros, como a temperatura de corte, a velocidade de avanço mas principalmente da velocidade de corte.

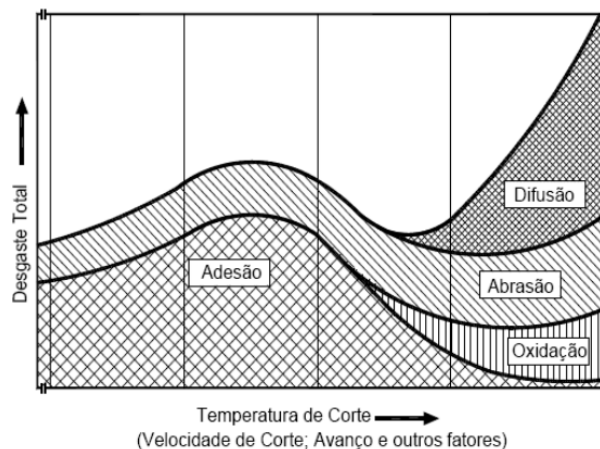


Figura 3.4 – Diagrama dos diversos mecanismos de desgaste das ferramentas de corte em função da temperatura (Souza, 2011)

Podemos constatar através da figura anterior, que a baixa temperatura de corte, apenas estão presentes os mecanismos de abrasão e adesão sendo este último o predominante, enquanto a temperatura elevada a adesão cede o lugar a novos mecanismos de desgaste, a oxidação e a difusão. Verifica-se que estes dois mecanismos crescem com o aumento da temperatura, e que a difusão desenvolve-se numa escala exponencial. De destacar também que o desgaste total da ferramenta cresce muito com o aumento da temperatura de corte (Machado, et al., 2009).

3.3 - Medição dos desgastes e vida útil das ferramentas

Devido ao desgaste progressivo a que estão sujeitas as ferramentas de corte, é necessário definir qual o valor admissível de desgaste e o tempo que as mesmas podem ser utilizadas sem perda das suas capacidades de corte.

A norma ISO 3685 especifica um conjunto de procedimentos, critérios e parâmetros para mensurar a vida útil das ferramentas de torneamento. Através da Figura 3.5 pretende-se mostrar a forma do desgaste e os parâmetros utilizados para o quantificar.

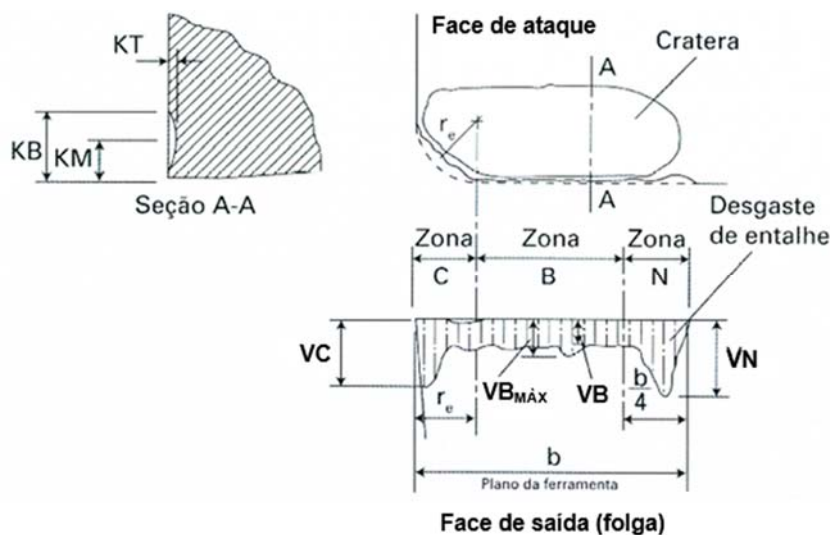


Figura 3.5 – Formas e parâmetros de medição de desgaste em ferramentas de torneamento - adaptado de (Machado, et al., 2009)

Pela análise da figura anterior verifica-se que o desgaste na face de saída não é regular ao longo do comprimento da aresta de corte, apresenta máximos na parte correspondente ao entalhe da aresta principal (VN) e junto do raio de curvatura da aresta secundária (VC).

Os parâmetros utilizados para quantificar o desgaste da face de saída são geralmente definidos pelo valor médio (VB) ou valor máximo (VB_{MÁX}), da largura do desgaste de flanco, enquanto o desgaste na face de ataque toma em consideração a profundidade máxima da cratera (KT), a sua largura (KB) e a distância da aresta de corte principal ao centro da cratera (KM) (Davim, 2008; Diniz, et al., 2008).

Na maquinagem, usando fresas de facejamento (*face mill*) com pastilhas intercambiáveis, a norma ISO 8688-1 descreve os procedimentos e define os parâmetros utilizados para quantificar o desgaste da ferramenta de corte. A mesma norma estabelece ainda três formas de distribuição do desgaste de flanco (VB) que podem ocorrer durante o processo de facejamento: o desgaste uniforme (VB₁), o não uniforme (VB₂) e o de entalhe ou localizado (VB₃), representados através da Figura 3.6.

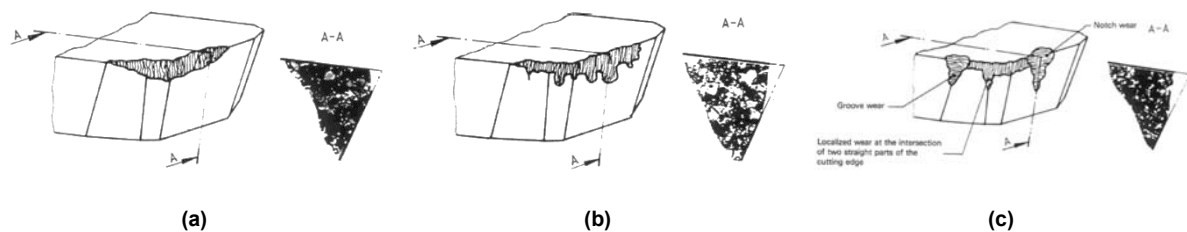


Figura 3.6 – Representação das formas do desgaste de flanco: (a) Uniforme, (b) Não uniforme e (c) Entalhe (ISO-8688-1, 1989)

- O desgaste de flanco uniforme (VB₁) ocorre na superfície da face de saída, é normalmente de largura constante, e estende-se ao longo de todo o comprimento da aresta de corte que se encontra em contacto com o material.
- O desgaste de flanco não uniforme (VB₂) aparece na superfície de saída, apresenta largura irregular, sendo o perfil do desgaste variável em cada posição de medição.
- O desgaste de flanco localizado (VB₃) é uma forma de desgaste excessivo, que se desenvolve de diferentes formas em determinados pontos localizados nos flancos. Uma forma especial deste tipo de degradação é o desgaste de entalhe, que ocorre em duas zonas adjacentes à aresta de corte principal, a face de ataque e a face de saída. A segunda forma é o desgaste de ranhura, que surge no flanco secundário, adjacente à face de saída secundária e face de ataque. A última forma de desgaste localizado, que pode ocorrer, situa-se na ponta da ferramenta no ponto de intersecção de duas superfícies planas.

O desgaste que ocorre na face de ataque pode desenvolver-se de dois modos diferentes, sob a forma de cratera ou em forma de escada, conforme representado pela Figura 3.7.

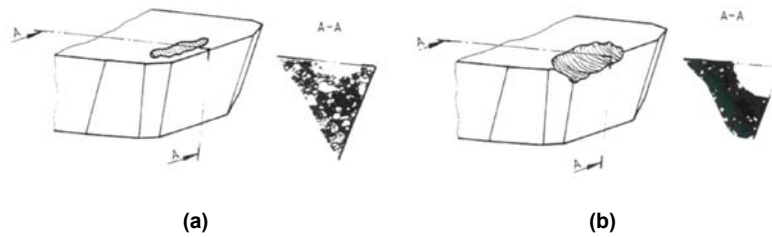


Figura 3.7 - Representação das formas do desgaste na face de ataque: (a) Cratera e (b) Escada (ISO-8688-1, 1989)

- O desgaste de cratera (KT_1), com orientação aproximadamente paralela à aresta de corte principal, apresenta uma profundidade máxima a uma determinada distância a partir da aresta principal de corte.
- O desgaste em forma de escada (KT_2) apresenta uma profundidade máxima, medida perpendicularmente à face de ataque da ferramenta, na intersecção da marca de desgaste da face da saída com a aresta de corte principal.

O desgaste de cratera e o desgaste de flanco aumentam de forma progressiva com o decorrer do tempo de corte, enquanto o desgaste de cratera apresenta uma evolução linear o desgaste de flanco apresenta uma evolução não linear, podendo esta ser representada por uma curva padrão (Figura 3.8).

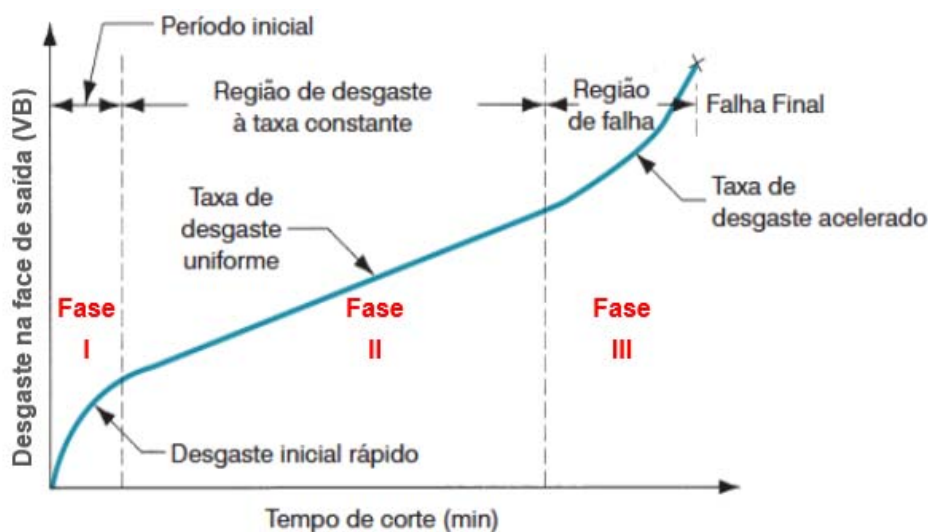


Figura 3.8 – Evolução do desgaste na face de saída (VB) em função do tempo de corte - adaptado de (Carla, 2015)

Nessa curva, podemos observar a evolução do desgaste de flanco em função do tempo de corte, apresentando este três fases distintas. A fase I, que corresponde ao início do corte usando uma ferramenta afiada, na qual o desgaste é acelerado até que a aresta fique arredondada, passando a apresentar uma taxa de desgaste decrescente com o passar do tempo. A fase II caracteriza-se por um aumento gradual, controlado e previsível do desgaste ao longo do tempo. A ferramenta já se encontra totalmente acomodada ao processo e os mecanismos de desgaste apresentam uma taxa constante até atingirem uma nova inflexão. Na fase III o desgaste volta a aumentar muito rapidamente num curto espaço de tempo, até à rutura completa da ferramenta (Davim, 2008; Machado, et al., 2009).

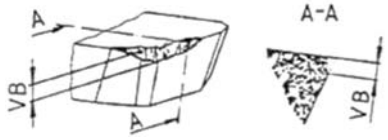
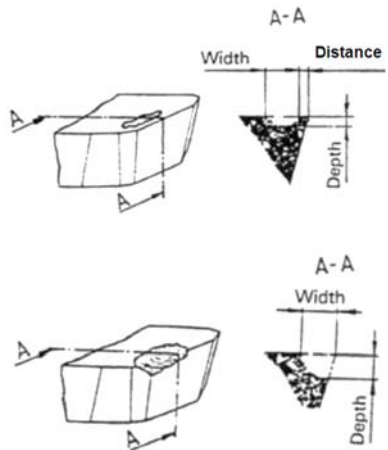
A vida das ferramentas pode ser definida como sendo o tempo efetivo em que as mesmas trabalham, até perderem a capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido. O critério mais usual para determinar o fim de vida das ferramentas de torneamento é definido pela norma ISO 3685. Segundo esta norma podem ocorrer falhas catastróficas ou desgastes que evoluem ao longo do tempo, devendo adotar-se por ordem hierárquica as recomendações indicadas na Tabela 3.3 (Davim, 2008).

Tabela 3.3 – Critérios para determinar o fim de vida útil de ferramentas de acordo com a norma (ISO-3685, 1993)

Material da ferramenta	
Aço rápido e cerâmico	Carbonetos sinterizados
1. Destruição total	1. $VB = 0.3 \text{ mm}$ ^(†)
2. $VB = 0.3 \text{ mm}$ ^(†)	2. $VB_{MAX} = 0.6 \text{ mm}$ ^(**)
3. $VB_{MAX} = 0.6 \text{ mm}$ ^(**)	3. $KT = 0.06 + 0.3 \times f_c$ (onde f_c é o avanço em mm/rot)
^(†) Se o flanco apresentar desgaste de uniforme	
^(**) Se o flanco apresentar desgaste de não uniforme	

Os critérios utilizados para testes de vida útil de ferramentas (*face mill*), usadas na fresagem de facejamento, são definidas pela norma ISO 8688-1. Na Tabela 3.4 apresentam-se os valores para os desgastes de flanco e desgastes na face de ataque, em função de diferentes critérios designados pelas siglas S (*Small*), N (*Normal*) e L (*Large*).

Tabela 3.4 – Critérios para determinar o fim de vida útil de ferramentas de acordo com a norma (ISO-8688-1, 1989)

Sigla	Fenómeno de desgaste	Critério			Ilustração
		S	N	L	
VB	Desgaste de flanco				
	1 Uniforme	0.2	0.35	0.5	
	2 Não uniforme	0.9	1.2	1.5	
	3 Localizado	0.8	1.0	1.2	
KT	Desgaste na face de ataque				
	1 Desgaste de cratera:				
	Profundidade	0.05	0.1	0.15	
	Largura	---	---	---	
	Distância	---	---	---	
	2 Forma de escada:				
	Profundidade	0.25	0.3	0.35	
Profundidade/largura	---	---	---		

Desta forma, quando qualquer um dos limites referidos nas tabelas anteriores for ultrapassado, recomenda-se o afiamento ou substituição da ferramenta de corte.

Capítulo 4

Maquinabilidade dos aços inoxidáveis

4.1 - Aços inoxidáveis

Os aços inoxidáveis são ligas ferrosas que apresentam na sua composição química um teor mínimo de cromo entre 10% a 12% (Relvas, 2007). O cromo (Cr) é considerado o elemento de liga mais importante, porque é ele que concede aos aços inoxidáveis elevada resistência à corrosão, e quanto maior o seu teor maior a resistência, como se observa pela Figura 4.1.

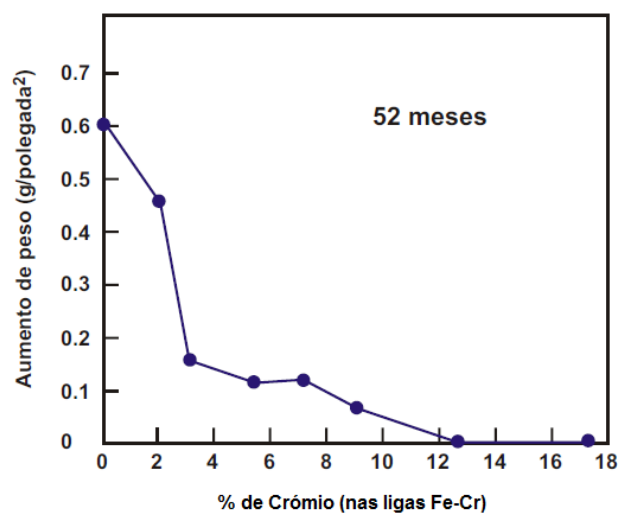


Figura 4.1 – Evolução da corrosão em função do teor em cromo nos aços inoxidáveis (Carbó, 2015)

O crómio na presença de um agente de oxidante (oxigénio) forma uma película superficial, com uma espessura média de 10 μm , de óxido de crómio (Cr_2O_3) durante o processo de fabrico, que protege o metal da oxidação (Sandvik, 2010; Relvas, 2007).

A adição de outros elementos de liga como o níquel (Ni), o molibdénio (Mo), o silício (Si), o alumínio (Al) o nióbio (Nb) e titânio (Ti), também aumentam a resistência à corrosão e contribuem para a melhoria das propriedades mecânicas a altas temperaturas dos aços inoxidáveis (Sandvik, 2010; Diniz, et al., 2008).

Existe uma grande diversidade de aços inoxidáveis com níveis progressivamente maiores de resistência à corrosão e resistência mecânica. Essa diferenciação é causada pela adição controlada de elementos de liga, em que cada um desses elementos origina propriedades específicas nos aços inoxidáveis (Silva, et al., 2007; Abinox, 2015). Os aços inoxidáveis são geralmente classificados em cinco tipos básicos (Centimfe, 2003; Abinox, 2015): os ferríticos, os martensíticos, os austeníticos, os duplex e os endurecíveis por precipitação.

4.1.1 - Caracterização dos aços inoxidáveis ferríticos

Os aços inoxidáveis ferríticos (série 400) são ligas binárias de ferro e crómio, que têm entre 10.5 a 27% de crómio, sendo este o principal elemento de liga. Os aços inoxidáveis que possuam principalmente crómio como elemento de liga são designados por ferríticos, porque apresentam estrutura e propriedades semelhantes ao ferro puro. O teor de carbono é mantido baixo, que resulta para estes caso numa limitada resistência mecânica. São aços com propriedades magnéticas e apresentam estrutura cristalina cubica de corpo centrado à temperatura ambiente (Diniz, et al., 2008; Abinox, 2015).

Entre os aços inoxidáveis ferríticos (Figura 4.2) o AISI 430 é o mais conhecido e o mais usado desta série, com uma percentagem de crómio mínima de 16%, sendo os demais desenvolvidos a partir deste para dar resposta às diferentes solicitações.

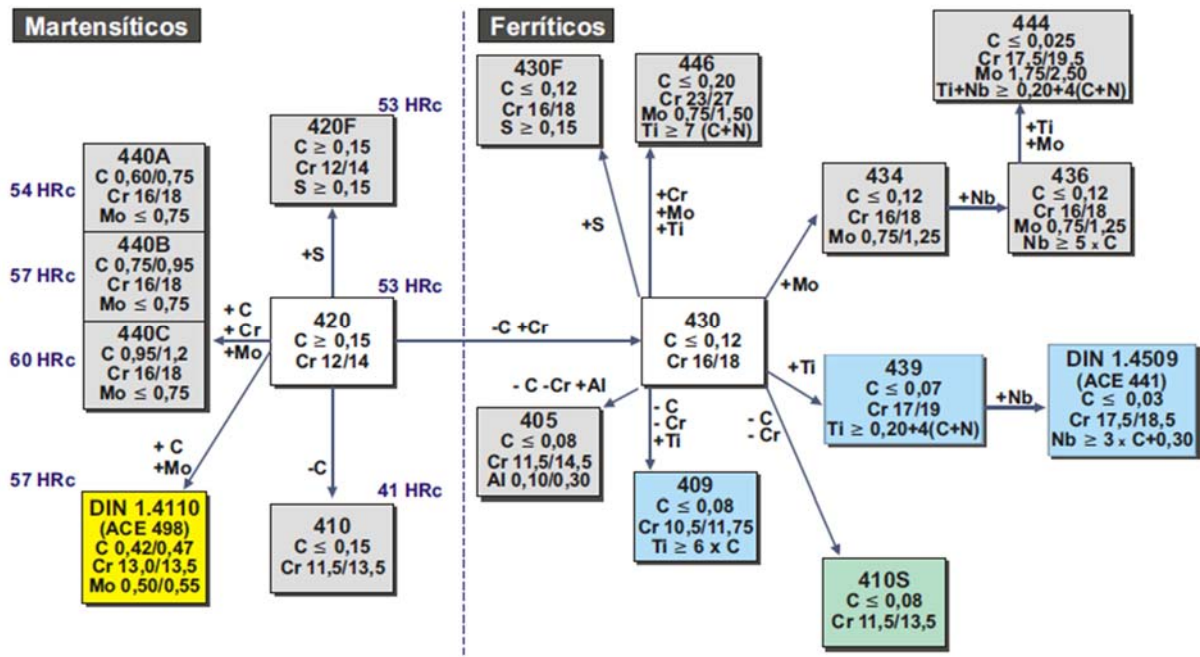


Figura 4.2 – Exemplos de aços inoxidáveis ferríticos e martensíticos - série 400 (Carbó, 2015)

Estes aços inoxidáveis contêm, em geral, um teor de crômio superior aos dos martensíticos (também estes da série 400) e uma quantidade de carbono mais baixa, no máximo 0.12%. Como consequência, os aços inoxidáveis ferríticos não são endurecíveis pelo tratamento térmico de têmpera, mas apresentam uma melhor resistência à corrosão quando comparados com os martensíticos (Carbó, 2015; Moreira & Lebrão, 2015).

Os aços inoxidáveis ferríticos são relativamente baratos, porque não contêm níquel, mas apresentam limitações ao nível da resistência à corrosão, da tenacidade, conformação e soldabilidade quando comparados com os austeníticos mais comuns (Abinox, 2015). São geralmente usados em aplicações onde a resistência à corrosão não é muito exigente, por exemplo: eixos para bombas, turbinas a vapor e a água, caldeiras, eletrodomésticos, porcas e parafusos, entre outros (Sandvik, 2010; Moreira & Lebrão, 2015).

Na Tabela 4.1 apresentam-se as propriedades mecânicas obtidas a partir de ensaios de alguns aços inoxidáveis ferríticos, em forma de chapas no estado recozido.

Tabela 4.1 – Propriedades mecânicas de alguns aços ferríticos no estado recozido (Moreira & Lebrão, 2015)

Aço [AISI]	Resistência à tração [MPa]	Tensão de cedência [MPa]	Alongamento [%]	Dureza Rockwell [HRB]
405	415	170	20	88
409	415	205	22	80
430	450	205	22	88
430 F (arame)	585 a 860	--	--	--
434	530	365	23	83
436	530	365	23	83
444	415	275	20	95
446	480	275	16	--

4.1.2 - Caracterização dos aços inoxidáveis martensíticos

Os aços inoxidáveis martensíticos, à semelhança dos aços ferríticos, são ligas binárias de ferro e cromo, que apresentam um teor de cromo entre 12 a 18% sendo este também o principal elemento de liga (Abinox, 2015). Estes aços, com uma quantidade de carbono entre 0.15 e 1%, ao serem tratados termicamente pelo processo de têmpera transformam a ferrite em austenite. Durante o arrefecimento a austenite transforma-se em martensite, designando-se assim estes aços por martensíticos porque tem a capacidade de desenvolver uma estrutura martensítica quando sofrem um tratamento térmico. São aços com propriedades magnéticas e apresentam estrutura tetragonal de corpo centrado à temperatura ambiente (Smith, 1998; Carbó, 2015).

O aço inoxidável martensítico mais conhecido é o AISI 420, com cerca de 12% de cromo e aproximadamente 0.35% de carbono, e a partir deste foram desenvolvidos outros como se pode verificar pela Figura 4.2.

A resistência dos aços inoxidáveis martensíticos mecânica obtida pelo tratamento térmico depende da quantidade de carbono presente na liga. Aumentando o teor deste elemento aumenta a capacidade de resistência mecânica e da dureza mas diminui a ductilidade e a tenacidade (Abinox, 2015). A resistência mecânica, a dureza assim como a resistência à corrosão destes aços inoxidáveis é relativamente baixa quando

comparada com a dos aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos. De referir que os aços inoxidáveis martensíticos têm que ser temperados para resistirem à corrosão (Smith, 1998; Carbó, 2015).

A alta dureza do material temperado (estrutura martensítica) faz com que estes aços inoxidáveis sejam muito utilizados no fabrico de produtos de cutelaria, lâminas, instrumentos cirúrgicos e odontológicos. Podem também ser aplicados em, instrumentos de medida, porcas e parafusos, componentes da indústria petroquímica, entre outros (Sandvik, 2010; Carbó, 2015; Moreira & Lebrão, 2015).

Na Tabela 4.2 apresentam-se as temperaturas e o modo de tratamento térmico, assim como as propriedades mecânicas de alguns dos aços inoxidáveis martensíticos.

Tabela 4.2 – Propriedades mecânicas de alguns aços inoxidáveis martensíticos (Moreira & Lebrão, 2015)

Aço [AISI]	Têmpera		Revenido	Resistência à tração [MPa]	Tensão de cedência [MPa]	Alongamento [%]	Dureza [HB]
	Temperatura [°C]	Meio de têmpera	Temperatura [°C]				
410	925 - 1000	Óleo	220 - 380	1280	960	15	360 - 380
420	975 - 1050	Ar ou martêmpera	150 - 380	1720	1550	8	470 - 530
440 A	1000 - 1075	Ar ou martêmpera	150 - 380	1850	1790	5	500 - 560
440 B	1000 - 1075	Ar ou martêmpera	150 - 380	1920	1850	3	520 - 590
440 C	1000 - 1075	Ar ou martêmpera	150 - 380	1960	1890	2	540 - 620

4.1.3 - Caracterização dos aços inoxidáveis austeníticos

Os aços inoxidáveis austeníticos da série 300 são essencialmente ligas ternárias constituídas por ferro, crómio e níquel, contendo cerca de 16 a 25% de crómio e 7 a 20% de níquel. Os da série 200 têm na sua composição, para além dos elementos referidos anteriormente, manganês. Estas ligas designam-se austeníticas porque a sua estrutura, cubica de faces centradas (cfc), permanece austenítica à temperatura normal dos tratamentos térmicos. Os aços inoxidáveis que possuam alto teor em níquel, (também este elemento com estrutura cfc), apresentam austenite à

temperatura ambiente, enquanto nos outros aços inoxidáveis esta é visível apenas à temperatura de 723 °C ou superior (Smith, 1998; Silva, et al., 2007; Diniz, et al., 2008) Os aços inoxidáveis austeníticos (Figura 4.3) são aqueles que apresentam o maior número de ligas e os mais utilizados em componentes sujeitos à corrosão. O mais conhecido é o AISI 304 com 18% de crómio e 8% de níquel (Carbó, 2015). Uma liga com melhor resistência à corrosão (AISI 316), criada pela adição de 2 a 3% de molibdénio, geralmente chamada de “aço à prova de ácido”. O molibdênio é adicionado em alguns dos aços austeníticos para aumentar sua resistência aos mecanismos de corrosão localizada (corrosão galvânica e por picadas ou *pit*) (Abinox, 2015; Sandvik, 2010).

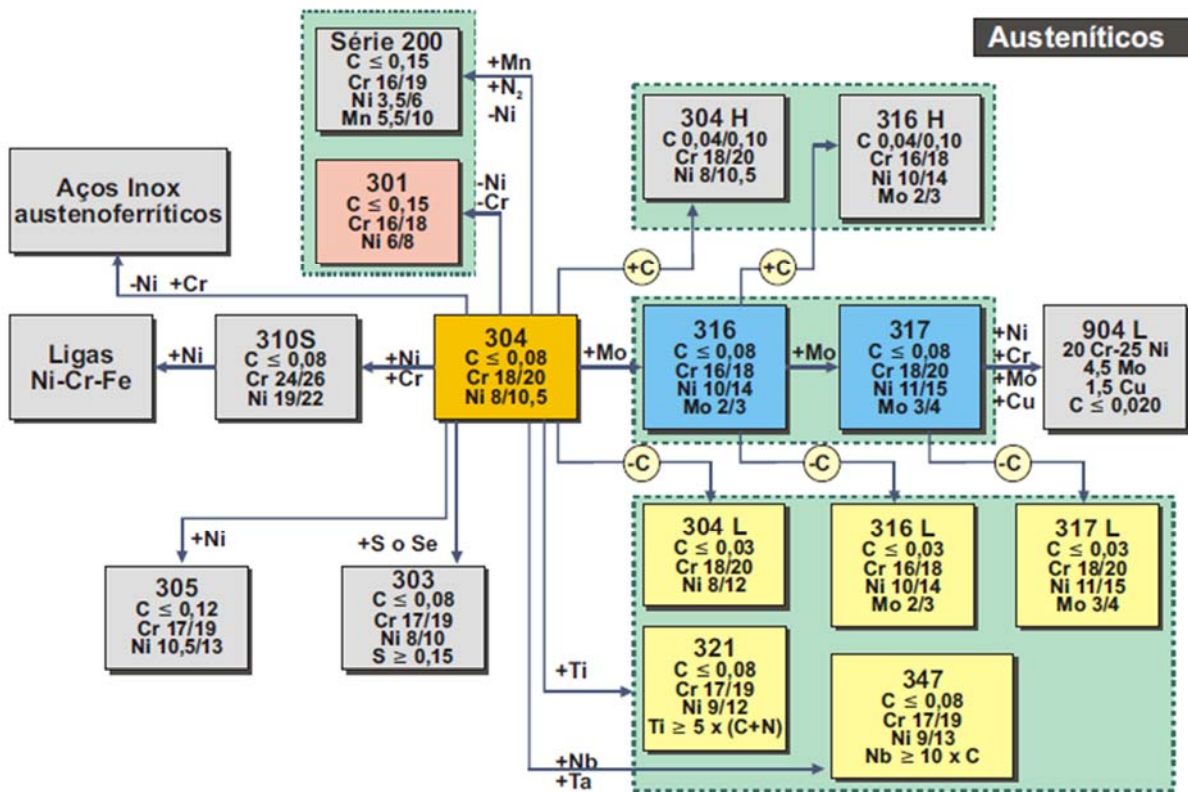


Figura 4.3 – Exemplo de aços inoxidáveis austeníticos - Série 200 e 300 (Carbó, 2015)

A presença de austenite à temperatura ambiente causa alterações significativas nas propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis austeníticos. Dessas propriedades salientam-se a elevada capacidade de deformação a frio e a quente (o que não é possível em outros aços inoxidáveis) devido à sua estrutura cfc, a tenacidade, a resistência a altas temperaturas e elevada resistência à corrosão (Smith, 1998; Diniz, et al., 2008). Quando são sujeitos a uma deformação a frio sofrem um aumento da

dureza e uma diminuição da ductilidade devido ao encruamento do material. Essa capacidade de encruamento é superior quando comparada com os aços inoxidáveis ferríticos (Guida, 2006).

Geralmente os aços inoxidáveis austeníticos não são magnéticos, porém, quando deformados a frio podem apresentar propriedades magnéticas devido às modificações parciais na estrutura, tornando-se esta parcialmente martensítica. Estes aços, à semelhança do que acontece com os ferríticos, não podem ser endurecidos por tratamento térmico tendo em conta o baixo teor em carbono (Abinox, 2015; Guida, 2006).

Os aços inoxidáveis austeníticos são utilizados onde é necessário uma boa resistência contra a corrosão, soldabilidade e elevada resistência mecânica a diferentes temperaturas. As aplicações incluem entre outras: próteses ortopédicas, utensílios culinários, componentes para fins estruturais, indústria química e petroquímica, elementos de fixação, etc..

Na Tabela 4.3 apresentam-se as propriedades mecânicas de alguns aços inoxidáveis austeníticos.

Tabela 4.3 – Propriedades mecânicas de alguns aços inoxidáveis austeníticos (Abinox, 2015)

Aço [AISI]	Resistência à tração [MPa]	Tensão de cedência [MPa]	Alongamento [%]	Dureza Rockwell [HRB]
301	770	280	60	85
304	588	294	55	80
304 L	567	273	55	79
305	595	266	50	80
310	665	315	45	85
316	588	294	50	79
316 L	567	294	50	79
317	630	280	45	85
321	630	245	45	80
347	665	280	45	85

4.1.4 - Caracterização dos aços inoxidáveis duplex

Os aços inoxidáveis duplex são materiais que apresentam uma microestrutura bifásica (Figura 4.4), constituída por regiões alternadas de ferrite e austenite. É geralmente aceite que as propriedades ideais destes aços inoxidáveis podem ser atingidas com equilíbrio de fases na faixa de 30 a 70% de ferrite e austenite respetivamente. Contudo estes aços apresentam normalmente teores com proporções equivalentes de ferrite e austenite, com a produção comercial atual a favorecer ligeiramente austenite para melhorar a tenacidade e o processamento dos mesmos (Sandvik, 2010; IMO, 2012).

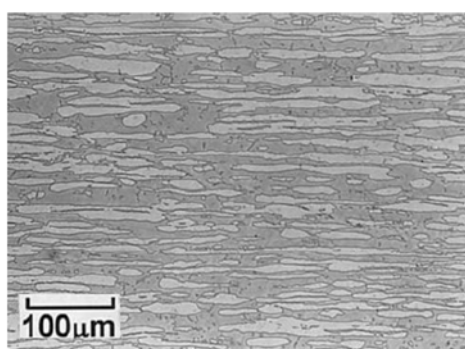


Figura 4.4 – Representação da microestrutura do aço inoxidável duplex (a ferrite aparece como a fase mais escura) (Loureiro, 2010)

Tipicamente a composição química para estes aços inoxidáveis é de 18 a 28% de crómio, 4 a 7% de níquel, cerca de 3% de molibdénio e quantidades vestigiais de nitrogénio. As interações dos principais elementos de liga citados anteriormente são bastante complexas. A fim de atingir uma estrutura duplex estável e que facilite o seu processamento, deve-se tomar atenção à quantidade correta de cada dos elementos (Sandvik, 2010; IMO, 2012; Abinox, 2015). Na Tabela 4.4 indica-se a composição química típica de alguns aços inoxidáveis duplex, entre os quais o mais conhecido (Tipo 2205 ou EN 1.4462).

Tabela 4.4 - Composição química (% em massa) típica de alguns aços dúplex (IMO, 2012)

Tipo	Norma EN	C	Cr	Ni	Mo	N	Mn	Cu
2304	1.4362	0.03	21.5-24.5	3.0 - 5.5	0.05 – 0.6	0.05 – 0.20	2.50	0.05 – 0.60
2205	1.4462	0.03	21.0 – 23.0	4.5 – 6.5	2.5 – 3.5	0.08 – 0.20	2.00	--
2507	1.4410	0.03	24.0 – 26.0	6.0 – 8.0	3.0 – 5.0	0.24 – 0.32	1.20	0.5

Os aços inoxidáveis duplex caracterizam-se por apresentarem alta resistência à corrosão (sob tensão, intergranular e por *pit*), e valores superiores para a resistência mecânica quando comparados com os aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos tradicionais. Na Tabela 4.5 apresentam-se algumas propriedades mecânicas referentes a três tipos de aços inoxidáveis duplex.

Tabela 4.5 – Limites mínimos das propriedades mecânicas para chapa de aço inoxidável duplex (IMOA, 2012)

Tipo	Norma EN	Tensão de cedência $R_{p0.2}$ [MPa]	Resistência à tração R_m [MPa]	Alongamento A_5 [%]
2304	1.4362	400	630	25
2205	1.4462	460	640	25
2507	1.4410	530	730	20

Possuem praticamente o dobro do valor da tensão de cedência dos aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos, e o alongamento é superior ao dos aços inoxidáveis ferríticos, martensíticos e na maioria dos aços PH. A Figura 4.5 compara os limites da tensão de cedência (escoamento) típicos de vários aços inoxidáveis duplex com os do aço inoxidável austenítico AISI 316L, entre a temperatura ambiente e a temperatura de 300°C (Guida, 2006; Loureiro, 2010; Abinox, 2015; Moreira & Lebrão, 2015).

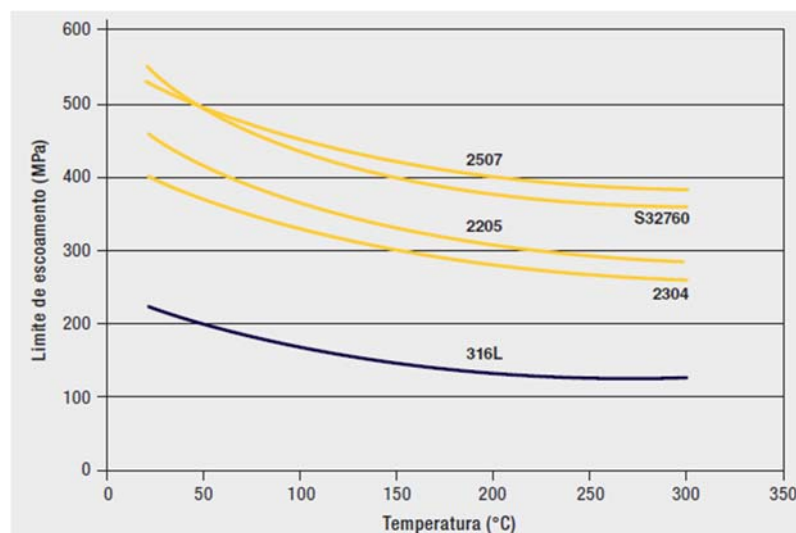


Figura 4.5 – Comparação da tensão de cedência entre aços inoxidáveis duplex e o austenítico AISI 316L (IMOA, 2012)

Apesar da alta resistência mecânica dos aços inoxidáveis duplex, eles apresentam boa tenacidade mesmo a baixas temperaturas, contudo inferior aos aços inoxidáveis

austeníticos, que geralmente não apresentam uma transição dúctil a frágil e mantêm excelente tenacidade em temperaturas criogênicas (IMOA, 2012).

A Figura 4.6 mostra os resultados obtidos em ensaios de impacto para a liga AISI 316L, em comparação com três ligas de aço inoxidável duplex: EN1.4362 (SAF 2304), EN1.4462 (SAF 2205) e EN1.4410 (SAF 2507). Verifica-se que a energia absorvida pelos aços duplex decresce substancialmente, passando de valores elevados para valores baixos próximo dos -50°C sensivelmente. Este facto deve-se à transição da fratura dúctil a frágil da ferrite, que é uma característica da fase ferrítica (Senatore, et al., 2007).

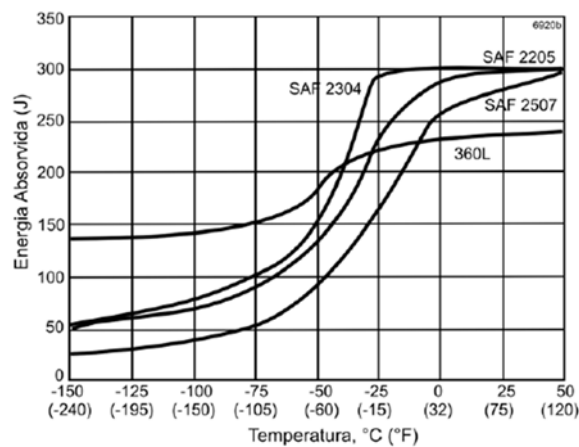


Figura 4.6 – Resistência ao impacto dos aços inoxidáveis duplex e o 316L (Senatore, et al., 2007)

Estes aços apresentam ainda propriedades magnéticas, boa conformação, no entanto são necessárias maiores forças devido à sua maior resistência e a soldabilidade é equivalente à dos aços inoxidáveis austeníticos (Abinox, 2015).

As propriedades mecânicas superiores dos aços inoxidáveis duplex em relação aos outros tipos de aços inoxidáveis são o fator decisivo para a utilização crescente desses materiais em aplicações de grande importância, tais como: indústria química, indústria de extração de gás e petróleo, construção de infraestruturas, equipamentos médicos, entre outros (Sandvik, 2010; Infomet, 2015).

4.1.5 - Caracterização dos aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação

Os aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação (designados também pela sigla PH, do inglês *Precipitation Hardening*) são ligas constituídas por ferro, cromo (12 a 17%), níquel (4 a 8%) e molibdénio (0 a 2%). São endurecidos através de tratamento térmico de solubilização e de envelhecimento, e em função da estrutura, no estado solubilizado, e da que resulta após o tratamento de envelhecimento. Os aços inoxidáveis PH são divididos em martensíticos, semi-austeníticos e austeníticos. A Tabela 4.6 apresenta, de acordo com a divisão citada anteriormente, o nome comercial e a designação (quando existe) segundo a norma ASTM (*American Society for Testing and Materials*) de alguns aços inoxidáveis PH e a respetiva composição química (Moreira & Lebrão, 2015; Infomet, 2016).

Tabela 4.6 - Denominação comercial e correspondência com a designação ASTM de alguns aços inoxidáveis PH (Moreira & Lebrão, 2015)

	Nome comercial	Norma ASTM	Composição química (% massa)								
			C (max.)	Mn (max.)	P (max.)	S (max.)	Si (max.)	Cr	Ni	Cu	Outros
Martensíticos	17-4 PH	630	0.07	1.0	0.04	0.03	1.0	16.5	4	4	Nb+Ta=0.3
	Stainless W	635	0.08	1.0	0.04	0.03	1.0	16.7	6.75		Al = 0.4 max. Ti = 0.8
Semi-Austeníticos	17-7 PH	631	0.09	1.0	0.04	0.03	1.0	17	7.1	--	Al = 1.10
	PH15-7 Mo	632	0.09	1.0	0.04	0.03	1.0	15	7.1	--	Mo = 2.75
	AM-350	--	0.08	0.8	0.01	0.01	0.25	16.5	4.3	--	Al = 1.10 Mo = 2.75 N = 0.10
	AM-355	634	0.13	0.95	0.01	0.02	0.25	15.5	4.3	--	Mo = 2.75 N = 0.10
Austeníticos	17-10 P	--	0.15	1.0	0.30	0.04	1.0	17	10.8	--	
	17-14 CuMo	--	0.12	0.75	0.02	0.01	0.5	15.9	14.1	3	Mo = 2.5 Nb = 0.5 Ti = 0.25

Os aços PH normalmente têm estrutura martensítica, e assim, são ferromagnéticos. Caracterizam-se por apresentarem a maior resistência mecânica entre os aços inoxidáveis, podendo atingir valores até 1800 MPa para a tensão de cedência, elevada resistência à corrosão que é comparável ao aço austenítico AISI 304 e boa ductilidade.

Outra característica dos aços inoxidáveis PH é que estes podem ser soldados mais facilmente que os aços martensíticos comuns (Moreira & Lebrão, 2015; Abinox, 2015; Metals, 2016)

Na Tabela 4.7 apresentam-se as propriedades mecânicas de alguns aços inoxidáveis PH em função do tratamento térmico aplicado.

Tabela 4.7 – Propriedades mecânicas de alguns aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação (Moreira & Lebrão, 2015)

Aço [Nome comercial]	Tratamento térmico	Resistência à tração [MPa]	Tensão de cedência [MPa]	Alongamento [%]	Dureza
Stainless W	Solubilização a 1040°C – arrefecimento em óleo	930	660	14	26 HRC
	Solubilização acima e envelhecimento a 510°C por 0.5 h	1450	1380	10	44 HRC
17-4 PH	Solubilização a 1040°C – arrefecimento em óleo	1030	760	12	363 HB
	Solubilização acima e envelhecimento a 480°C por 1 h	1380	1280	14	44 HRC
AM-350	Solubilização entre 1010°C e 1040°C – arrefecimento ao ar	1000	410	40	20 HRC
	Solubilização acima + aquecimento a 930°C, arrefecimento a -75°C e envelhecimento a 455°C por 1 h	1430	1200	13.5	45HRC
AM-355	Mesma solubilização aplicada ao AM-350	1110	390	26	--
	Mesmo envelhecimento aplicado ao AM-350	1490	1260	19	--
17-7 PH	Solubilização a 1065°C – arrefecimento em óleo	890	270	35	85 HRB
	Laminado a frio e envelhecido a 480°C por 1 h	1820	1800	2	49 HRC
PH-15-7 Mo	Solubilização a 1065°C – arrefecimento em óleo	890	380	35	88 HRB
	Solubilização acima + envelhecimento a 480°C por 1 h	1820	1800	2	49 HRC
17-10 P	Solubilização a 1120°C – arrefecimento em água	620	260	70	90 HRB
	Solubilização acima + envelhecimento a 705°C por 24 h	930	610	25	30 HRC
17-14 CuMo	Solubilização a 1120°C – arrefecimento em água	600	290	45	--
	Solubilização acima + envelhecimento a 730°C por 5 h	620	280	45	--

Estes aços inoxidáveis (PH) utilizam-se na indústria química, petroquímica, em máquinas e equipamentos, diversos instrumentos cirúrgicos, componentes aeronáuticos e aeroespaciais, reatores nucleares e mísseis, etc. (Metals, 2016).

4.2 - Maquinabilidade dos aços inoxidáveis

A maquinabilidade de um metal pode ser definida, segundo Ferraresi (1970), como uma grandeza tecnológica, que expressa por meio de um valor numérico comparativo, (índice de maquinabilidade) um conjunto de propriedades de maquinagem de um metal, em relação a outro tomado como padrão. Esta pode ser medida através de vários indicadores como: a vida útil da ferramenta, o volume de apara removido por unidade de tempo, a força e a potência necessária para o corte material, o acabamento superficial da peça ou a temperatura de corte. O grande número de indicadores mostra que nenhum deles é totalmente conclusivo o que reflete a complexidade do fenómeno (Ferraresi, 1970; Centimfe, 2003; Relvas, 2007; Diniz, et al., 2008).

O conceito de índice de maquinabilidade (IM) foi introduzido no início do século XX e estabelece um valor indicativo do grau de facilidade ou de dificuldade para maquinar determinado material. O metal utilizado como padrão para determinar o IM é o aço B1112 de acordo com a norma AISI (*American Iron and Steel Institute*), ao qual é atribuído o índice 100, quando torneado com uma ferramenta de HSS a uma velocidade de corte de 55 m/min. O IM é estabelecido para os diversos materiais através da determinação da vida útil de uma ferramenta de aço rápido quando utilizada numa operação de maquinagem realizada com as mesmas condições de trabalho (Relvas, 2007).

Os fatores mais importantes que influenciam o IM dos metais são: as propriedades dos materiais a maquinar, o material e geometria da ferramenta de corte e as condições e parâmetros de corte utilizados (Ferraresi, 1970; Relvas, 2007).

Os métodos de ensaio para a medição da maquinabilidade podem ser de curta ou longa duração, necessitando este último de um tempo de ensaio muito longo, além de um gasto elevado de material. Para Diniz, et al. (2008) o método mais aceite é o ensaio de longa duração, onde o material ensaiado e o material tomado como padrão são maquinados até ao fim de vida da ferramenta, ou até um determinado valor de desgaste (VB ou KT), em diversas velocidades de corte. Este ensaio permite obter a velocidade de corte para uma determinada vida da ferramenta (20 minutos - VC_{20} ou 60 minutos - VC_{60}).

O IM é calculado pela relação entre o valor de VC_{20} (ou VC_{60}) do material ensaiado e o valor correspondente ao material tomado como padrão, ao qual se confere o índice 100.

$$IM = \frac{V_{c20}(\text{material ensaiado})}{V_{c20}(\text{padrão})} \quad (4.1)$$

A maquinabilidade pode ser estabelecida através de dois tipos de informação (Relvas, 2007):

- a) Ensaio de maquinagem e de não maquinagem. Nos ensaios de maquinagem são medidos os diferentes parâmetros de corte e a maquinabilidade do material é estimada em função dos resultados. Nos ensaios de não maquinabilidade, a maquinabilidade e os diferentes parâmetros de corte são baseados nas propriedades físicas e químicas dos materiais.
- b) Tabelas de maquinabilidade. Nestas tabelas são apresentados valores indicativos do IM para diferentes materiais e os respetivos parâmetros de corte, resultantes da combinação entre os materiais da ferramenta e da peça.

Relativamente à maquinabilidade dos aços inoxidáveis, estes apresentam diferenças significativas relativamente a outros metais, tais como os aços de baixo teor em carbono, os ferros fundidos ou as ligas de alumínio, sendo estes apenas alguns exemplos. A maioria dos aços inoxidáveis é difícil de maquinar devido principalmente à sua baixa condutividade térmica, alta ductilidade e da tendência em formar aparas longas e flexíveis, que podem aderir à superfície da face de ataque permanecendo “soldadas” à aresta de corte da ferramenta. Como resultado da apara aderente a vida útil da ferramenta é reduzida, provocando também um efeito negativo no acabamento superficial da peça (Ferreira, 2015).

Dependendo dos elementos de liga, tratamento térmico e processo de produção a maquinabilidade dos aços inoxidáveis pode ser muito díspar. Em geral, esta diminui com o aumento do teor de elementos de liga, como o cromo, o níquel, o molibdénio e titânio (Sandvik, 2010).

Quando comparamos o índice de maquinabilidade (também designado por maquinabilidade relativa) entre os diferentes tipos de aços inoxidáveis (Figura 4.7) podemos observar que estes apresentam valores muito diferentes, 100% para os aços inoxidáveis ferríticos e aproximadamente 30% para os aços duplex.

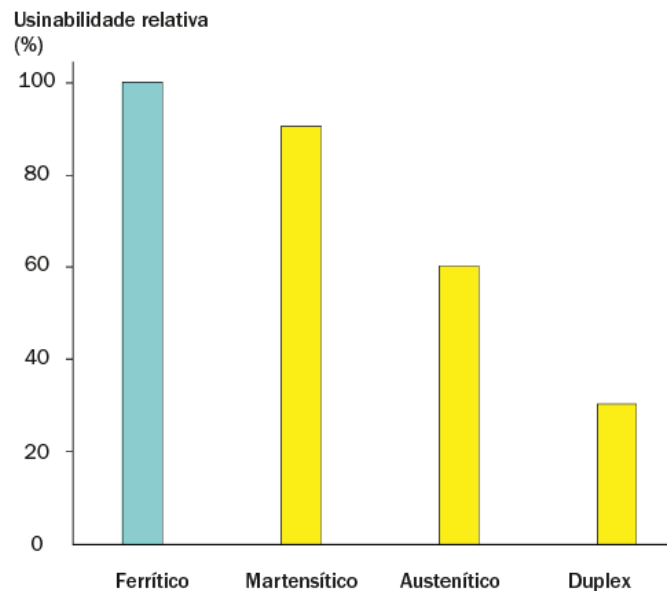


Figura 4.7 – Índice de maquinabilidade para diferentes tipos de aços inoxidáveis (Sandvik, 2010)

Os aços inoxidáveis ferríticos têm geralmente boa maquinabilidade, comparando-se à dos aços de baixo teor em carbono (Sandvik, 2010). Este atributo pode ser explicado pela presença de aditivos, como o enxofre para melhorar a maquinabilidade dos aços inoxidáveis ferríticos, mas em geral, as operações de maquinagem não têm o mesmo desempenho em operações semelhantes no aço-carbono com os mesmos aditivos (Machado, et al., 2009).

Os aços inoxidáveis martensíticos com alto teor em carbono são mais difíceis de maquinar, devido à elevada dureza causada fundamentalmente pela presença de partículas duras e abrasivas de carboneto de cromo na matriz, aumentando assim o desgaste das ferramentas. Normalmente estes aços são maquinados no estado recozido porque adquirem uma significativa redução de dureza, ficando a estrutura menos abrasiva e exigindo um menor esforço de corte, aumentando assim a vida útil da ferramenta (Diniz, et al., 2008; Machado, et al., 2009).

Aços inoxidáveis austeníticos e duplex têm propriedades que lhes conferem uma maquinabilidade díspar comparativamente aos aços inoxidáveis ferríticos ou martensíticos.

Os aços inoxidáveis austeníticos apresentam uma dificuldade superior no processo de maquinagem, comparativamente aos aços inoxidáveis ferríticos e martensíticos, com um índice de maquinabilidade próximo de 60% (Figura 4.7). Esta dificuldade está relacionada principalmente com a maior ductilidade do material e com a alta taxa de endurecimento por deformação plástica, sendo necessárias maiores forças de corte, o que origina um enorme aumento de temperatura e pressão na zona de corte. Este aumento de temperatura e a elevada pressão pode proporcionar a formação de apara aderente na aresta de corte, provocando um desgaste acelerado da ferramenta (Centimfe, 2003; Machado, et al., 2009).

A apara formada durante a maquinagem, dos aços inoxidáveis austeníticos, é grossa e enrolada o que complica a sua remoção (Diniz, et al., 2008; Relvas, 2007). Para além das características da apara mencionadas anteriormente salienta-se também a sua elevada dureza, que pode provocar o rompimento do material da cobertura ou do substrato, levando ao desgaste (tipo entalhe) na aresta de corte (Sandvik, 2010).

Outras características que dificultam a maquinagem dos aços inoxidáveis em geral, e do aço austenítico em particular, são a baixa condutividade térmica dos mesmos (que dificulta a dissipação do calor na zona de corte), o alto coeficiente de atrito (que provoca o aumento das forças de corte e da temperatura) e o elevado coeficiente de dilatação térmica (que pode comprometer as tolerâncias das peças (Diniz, et al., 2008).

Para materiais com altas taxas de endurecimento, como é o caso dos aços inoxidáveis austeníticos, devem ser usadas ferramentas de corte com geometria positiva e arestas bem afiadas, mantendo a profundidade de corte constante (Machado, et al., 2009; Sandvik, 2010).

O índice de maquinabilidade dos aços inoxidáveis duplex normalmente é baixo, cerca de 30%, conforme representado na Figura 4.7. Esta dificuldade superior no processo de maquinagem, comparativamente a outros aços inoxidáveis (ferríticos, martensíticos e austeníticos) deve-se principalmente à sua maior dureza e alta velocidade de endurecimento por deformação plástica (Sandvik, 2010).

As operações de maquinagem dos aços inoxidáveis duplex geralmente reduzem a vida útil da ferramenta ou exigem tempos de maquinagem mais longos, quando comparados com os austeníticos padrão, porque são necessárias maiores forças de corte. Para além disso a apanha resultante do corte dos aços inoxidáveis duplex é difícil de formar, grossa e abrasiva para a ferramenta, devido à elevada resistência destes materiais, especialmente nos aços que possuem mais elementos de liga. Para além dos problemas anteriormente referidos, verifica-se também um grande aumento de temperatura provocado pelo atrito entre a apanha e a ferramenta, o que pode causar deformação plástica e desgaste severo tipo cratera na superfície da face de ataque (Sandvik, 2010; IMO, 2012).

Os aços duplex apresentam valores para a tensão de cedência normalmente duas vezes maiores que os aços inoxidáveis austeníticos sem nitrogénio, e a taxa inicial de endurecimento quando trabalhados é pelo menos comparável aos aços inoxidáveis austeníticos comuns. Por estas razões os aços inoxidáveis duplex são tipicamente mais difíceis de serem maquinados que os aços inoxidáveis austeníticos (da serie 300), com resistência à corrosão equivalente.

A maior dificuldade de maquinagem dos aços inoxidáveis duplex, quando comparada com os aços inoxidáveis austeníticos, é mais evidente quando se utilizam ferramentas de carbonetos como mostra a Figura 4.8. Observa-se também um valor mais alto do índice de maquinabilidade do aço inoxidável duplex S32101 (EN1.4162), quando comparado com o aço inoxidável austeníticos AISI 316 (IMO, 2012).

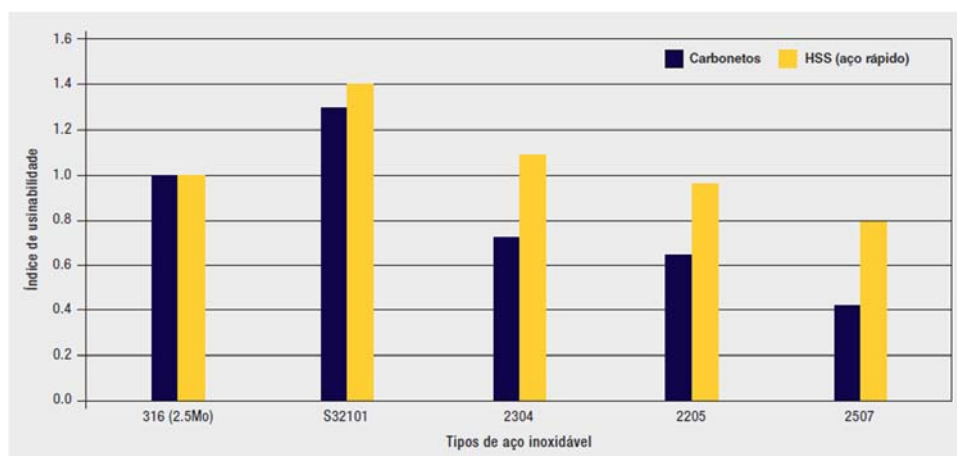


Figura 4.8 – Índice da maquinabilidade de aços inoxidáveis duplex comparado com o AISI 316 para ferramentas de carboneto cementado e de aço rápido (IMO, 2012)

As orientações descritas a seguir para maquinagem são geralmente aplicáveis a todos os aços inoxidáveis, mas a sua importância é ainda maior no caso dos aços inoxidáveis duplex (Machado, et al., 2009; IMO, 2012):

- Utilizar máquinas potentes e rígidas, com montagem extremamente robusta das ferramentas e da peça de trabalho de modo a garantir a qualidade superficial;
- Minimizar vibrações, mantendo o comprimento da ferramenta o menor possível;
- Não utilizar ferramentas com raio de ponta maior que o necessário;
- Favorecer as ferramentas de carbonetos (com maior tenacidade para o desbaste e mais duras para acabamento fino) revestidas pelo método de PVD, de geometria positiva e aresta afiada com quebra apara;
- Programar sequências de maquinagem de modo a que a profundidade de corte esteja abaixo da camada endurecida por deformação plástica resultante de passagens anteriores;
- Para operações de desbaste usar preferencialmente altos valores de avanços e de profundidade, combinada com baixas velocidades de corte;
- Trocar as ferramentas, ou afia-las em intervalos programados, para garantir bordas com corte preciso;
- Usar fluxos abundantes e com alta pressão de fluido refrigerante, utilizando óleos ou emulsões com aditivos.

Os parâmetros de corte recomendados para a fresagem dos aços inoxidáveis duplex, com ferramentas de carbonetos cementados, são apresentadas na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Orientações para fresagem de aços inoxidáveis duplex com ferramentas de carbonetos cementados (IMO, 2012)

Aço Inoxidável (ou dados de maquinagem)	Desbaste			Acabamento		
	Velocidade de avanço [m/min]	Avanço por dente [mm]	Profundidade de corte [mm]	Velocidade de avanço [m/min]	Avanço por dente [mm]	Profundidade de corte [mm]
S32101	180 - 230	0.2 – 0.4	2.0 – 5.0	200 - 250	0.1 – 0.2	1.0 – 2.0
2304	100 - 130	0.2 – 0.4	2.0 – 5.0	130 - 150	0.1 – 0.2	1.0 – 2.0
2205	50 - 80	0.2 – 0.4	2.0 – 5.0	80 - 110	0.1 – 0.2	1.0 – 2.0
2507	30 - 50	0.2 – 0.4	2.0 – 5.0	50 - 70	0.1 – 0.2	1.0 – 2.0
Tipo de carboneto	ISO P20 - P40 (2101, 2304, 2205) ISO P25 - P40 (2507)			ISO P10 - P25 (2101, 2304, 2205) ISO P20 - P30 (2507)		

Capítulo 5

Componente experimental

5.1 - Enquadramento do trabalho experimental

5.1.1 - Centro de maquinagem

Os ensaios foram realizados num centro de maquinagem vertical de cinco eixos, *Haas UMC-750 SS* (Figura 5.1), com um curso de 762 mm para o eixo X e 508 mm para os eixos Y e Z. A velocidade máxima de avanço para os eixos referidos anteriormente é de 30.5 m/min. A mesa de dois eixos (B +35°/-110° basculante e C 360° rotativo), com as dimensões de 630x500 mm com rasgos em “Tê” de 16 mm e furo central de precisão, permite posicionar as peças praticamente em todas as posições para maquinagem a 3, 3+2 ou a 5 eixos simultâneos.

A máquina está equipada com uma árvore de transmissão direta em linha com o motor de 30 CV (22.4 kW) que permite elevada rotação (15000 rpm). O nariz da árvore utiliza cone do tipo ISO 40, com face de apoio SK40, obedecendo à norma DIN (*Deutsches Institut für Normung*) 69871. O armazém lateral para ferramentas tem capacidade para 40+1 postos com trocador de braço rápido.

O centro de maquinagem possui um sistema de centragem de peças, constituído por sonda e macro respetiva, que permite centrar as mesmas em qualquer posição sendo especialmente útil e eficiente em aplicações a 5 eixos. Faz parte também do

equipamento o sistema de medição de ferramenta automático (*wireless*), constituído por apalpador elétrico de contacto e macros respetivas, que permite medir as ferramentas e introduzir automaticamente as compensações (*tool offsets*).

O controlador do equipamento é da *Haas, Visual Quick Code standard*, que permite fazer diretamente programação conversacional através de ciclos pré-programados.



Figura 5.1 – Centro de maquinagem Haas UMC-750 SS (Haas, 2016)

5.1.2 - Caracterização da ferramenta de corte

A Figura 5.2 mostra a ferramenta usada nos ensaios experimentais, trata-se de uma fresa de topo plano, da marca Palbit® - referência 032W17590-03-06-032110, com haste de fixação tipo *Weldon*, com três pastilhas de corte.



Figura 5.2 – Fresa utilizada nos ensaios: (a) vista lateral e (b) vista de topo

As características gerais da ferramenta encontram-se indicadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Características gerais da ferramenta utilizada (Palbit, 2015)

Fresa 032 W 175 90 – 03 – 06 – 032 110	
Ângulo de posicionamento da pastilha - K_r [°]	90
Diâmetro de corte - D_c [mm]	32
Diâmetro de acoplamento - d [mm]	32
Comprimento total - L [mm]	110
Profundidade de corte - a_p [mm]	9
Dentes de corte efetivos - Z_n	3
Tipo de acoplamento	<i>Weldon</i>
Ângulo axial (ângulo de construção da ferramenta) - γ_p [°]	-6
Sentido de corte	Direito
Peso [Kg]	--
Refrigeração interna	Sim

As pastilhas utilizadas na maquinagem do aço inoxidável duplex são de carbonetos sinterizados, classificados pelo sistema de codificação de graus da Palbit® por PH7740 e PH7930 (equivalente à designação atribuída pela norma ISO por M40 e M30 respetivamente), ambas revestidas com AlTiN pelo método de PVD. As primeiras apresentam uma tenacidade mais elevada, quando comparado com as segundas, enquanto estas possuem maior dureza e resistência ao desgaste relativamente às primeiras. A Figura 5.3 representa a geometria das pastilhas ensaiadas (referência ANHX 120608 PNER-LS) nas vistas: frontal (a), lateral (b) e de topo (c), estando as especificações técnicas das mesmas indicadas na Tabela 2.1.

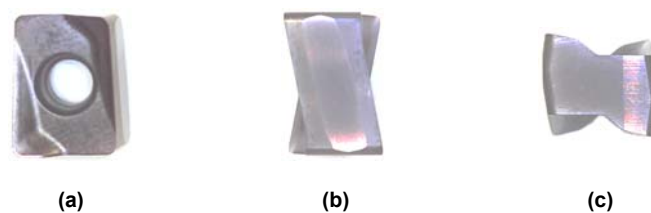
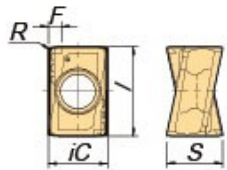


Figura 5.3 – Representação da pastilha na vista frontal (a), lateral (b) e de topo (c)

Tabela 5.2 – Especificações técnicas da pastilha ANHX 120608 PNER-LS (Palbit, 2015)

		Dimensões (mm)				
		<i>iC</i>	<i>S</i>	<i>F</i>	<i>R</i>	<i>L</i>
		9.0	8.2	1.2	0.8	12.0

5.1.3 - Caracterização do material para os ensaios

O material utilizado para os ensaios foi o aço inoxidável duplex GX6CrNiN26-7, de acordo com a norma europeia EN 10283 - 1.4347, fornecido pela empresa ARSOPI®, com a composição química e propriedades mecânicas indicadas na Tabela 5.3 e Tabela 5.4 respetivamente (ARSOPI, 2015). Este aço inoxidável apresenta, à temperatura ambiente, uma estrutura bifásica constituída por austenite e ferrite.

Tabela 5.3 – Composição química (% em massa) do aço inoxidável duplex GX6CrNiN26-7, EN 10283 - 1.4347 (ARSOPI, 2015)

Elementos	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb	V	W	N	Co	Fe
%	0.03	0.95	1.47	0.02	0.00	25.12	5.89	0.20	0.14	0.01	0.02	0.08	0.12	0.08	65.86

Tabela 5.4 - Propriedades mecânicas do aço inoxidável duplex GX6CrNiN26-7 (1.4347) EN 10283 (ARSOPI, 2015)

Propriedades mecânicas	Valor mínimo
Resistência à tração [MPa]	590
Tensão de cedência [MPa]	420
Alongamento [%]	20
Dureza Brinell [HB]	--
Resistência ao impacto [J]	30

O bloco de material apresentava inicialmente as dimensões de 300 X 300 X 85 mm (comprimento X largura X altura), com quatro sulcos laterais para fixação, de acordo com a Figura 5.4.

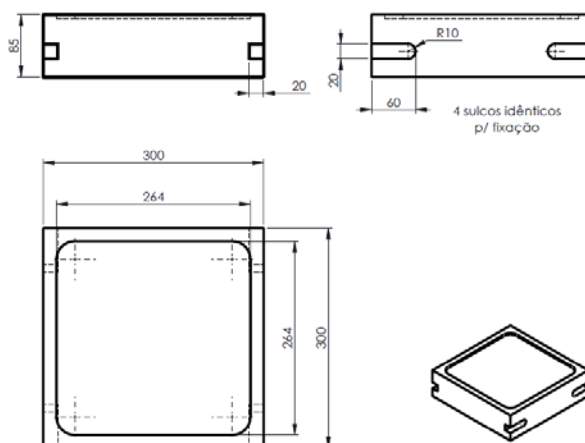


Figura 5.4 – Representação esquemática e dimensões do bloco de inox duplex

5.1.4 - Sistema para fixação da ferramenta de corte

O porta-ferramenta faz a interface entre a máquina e a ferramenta de corte, podendo influenciar significativamente a qualidade superficial das peças e a vida útil da ferramenta. Por isso, é importante escolher o sistema de fixação certo uma vez que pode existir uma grande concentração de esforços nesta ligação. Os sistemas utilizados para ferramentas com haste cilíndrica, dependendo do tipo de aplicação, podem ser de fixação térmica ou mecânica. Entre os porta-ferramentas com sistema de aperto mecânicos mais comuns temos os hidráulicos, os porta-pinças ER, o *whistle-notch* e o *weldon*.

Para os ensaios experimentais foi utilizado um porta-ferramentas SK40 com adaptador *weldon*, de acordo com a norma DIN 69871, da marca HAIMER®, referência 40.300.32 representado na Figura 5.5.



Figura 5.5 – Porta-ferramentas *weldon* com pino de fixação CAT 40X45° M16

O desenho e as especificações técnicas do porta-ferramentas encontram-se representados na Figura 5.6 e na Tabela 5.5 respetivamente.

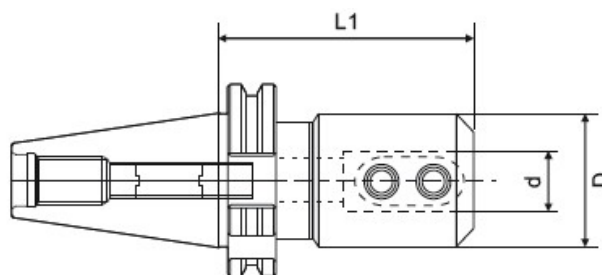


Figura 5.6 – Desenho técnico do porta-ferramentas (BTfixo, s.d.)

Tabela 5.5 – Especificações técnicas do porta-ferramentas (Haimer, 2016)

Cone	Norma	Modelo	d [mm]	D [mm]	L1 [mm]	Balanceamento
SK40	DIN 69871	40.300.32	32	72	100	G2.5 - 22000 rpm

5.1.5 - Equipamento para aquisição de imagens e medição do desgaste da ferramenta

Para monitorizar o desgaste de flanco e o desgaste de entalhe da ferramenta de corte foi utilizado um microscópio digital “*Dino-Lite Basic*”, representado na Figura 5.7, integrado com o *software* de aquisição de imagem “*Dino Capture 2.0*”.

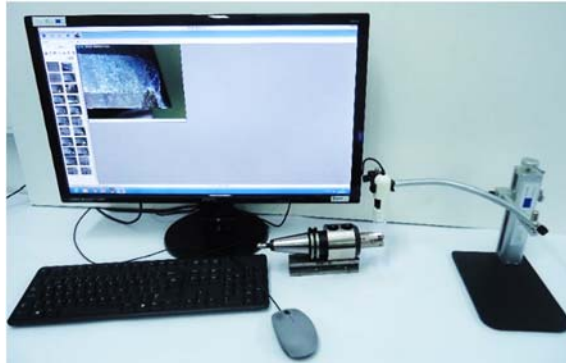


Figura 5.7 – Montagem do equipamento para aquisição de imagens

A partir das fotografias obtidas e com a utilização do *software* “*Axion Vision LE*”, do qual se representa a interface através da Figura 5.8, foi medido o desgaste de flanco e desgaste de entalhe observado na face de saída principal da pastilha.

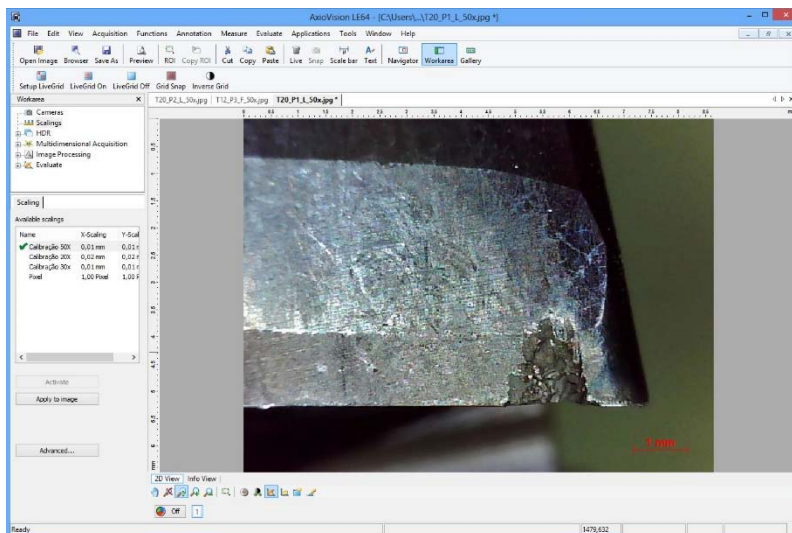


Figura 5.8 – Interface do *software* Axion Vision LE usado para medir o desgaste das ferramentas

5.1.6 - Software de CAM e estratégias de maquinagem

Dada a complexidade geométrica que algumas peças podem apresentar, as trajetórias de maquinagem são normalmente calculadas por *softwares* próprios. O *software* de fabrico assistido por computador (ou CAM) utilizado para gerar as trajetórias de maquinagem foi o Mastercam® versão X9, desenvolvido pela empresa CNC Software, Inc., USA (United States of America). Este programa computacional apresenta uma interface de fácil utilização, representada pela Figura 5.9, com a possibilidade do utilizador poder configurar menus e barras de ferramentas. Para além destes atributos tem a vantagem de ser usado no Departamento de Engenharia Mecânica, do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra.

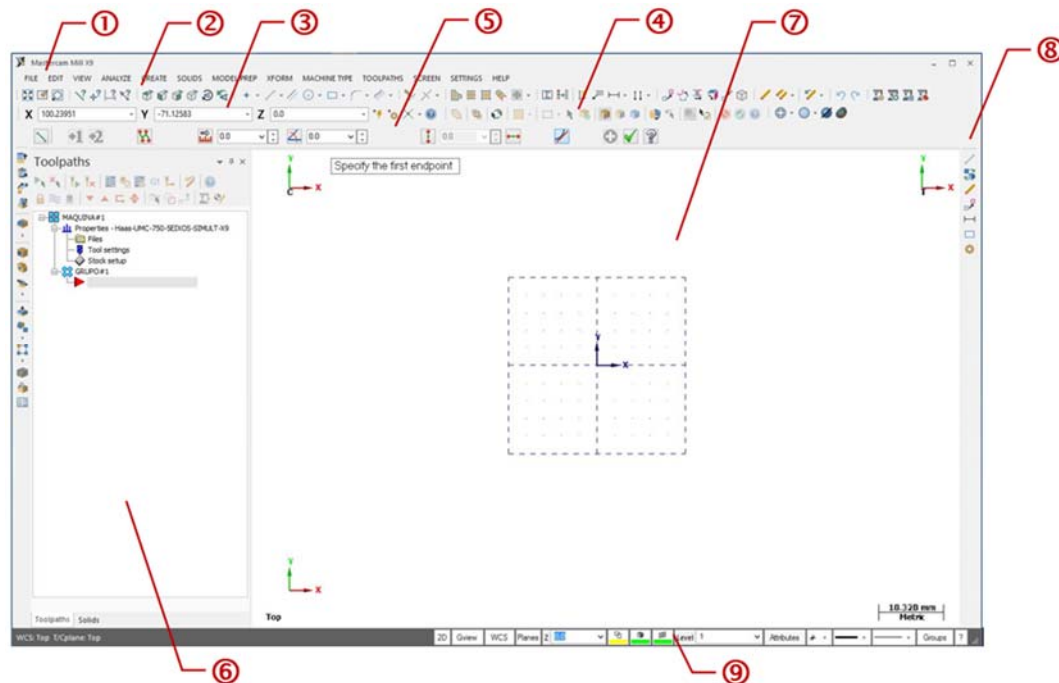


Figura 5.9 – Principais elementos de interface do *software* Mastercam® X9: 1) - Menu bar, 2) - Toolbars, 3) - Autocursor toolbar, 4) - General selection toolbar, 5) - Ribbon bars, 6) - Operation managers pane, 7) - Graphics window, 8) - Most recently used toolbar, 9) - Status bar

O Mastercam® possui módulos para *design*, fresagem (*mill*), torneamento (*lathe*), erosão por fio (*wire*), além de outros mais específicos. No caso particular do módulo de fresagem, o *software* disponibiliza várias trajetórias e estratégias a 2 e 3D, a 4 e 5 eixos e a alta velocidade.

Tendo em conta o objetivo do trabalho experimental, as características do material e da ferramenta, optou-se pelo processo de fresagem a dois eixos e meio. Nesse processo, e referindo apenas as opções com viabilidade de serem utilizadas, o Mastercam® disponibiliza ciclos de facejamento, abertura de cavidades e ciclos dinâmicos de alta velocidade (conhecidos pelos termos em inglês *facing*, *pocket* e *2D high speed* respetivamente). Para o ciclo de facejamento destacam-se as trajetórias de maquinagem representadas na Figura 5.10, obtidas a partir da simulação do *software*.

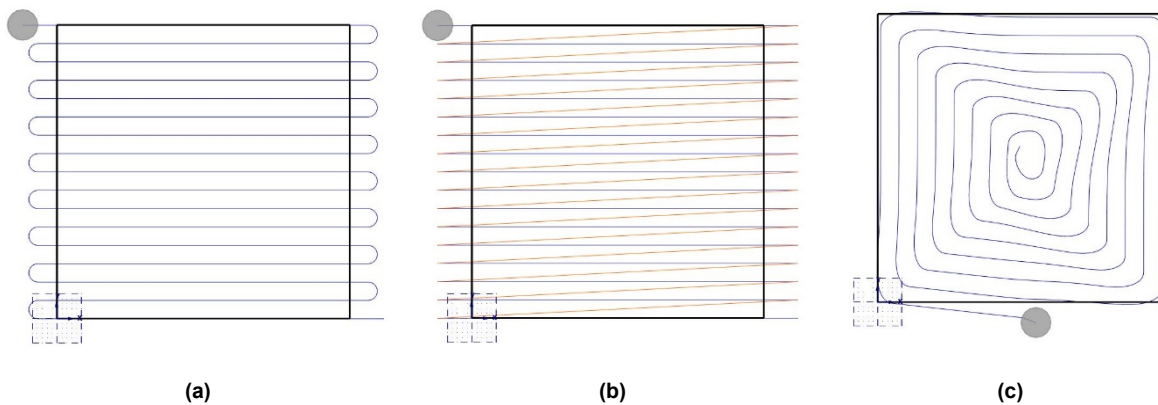


Figura 5.10 – Representação de trajetórias para o ciclo de facejamento: (a) Zig-zag, (b) One-way e (c) Dynamic

Relativamente à abertura de cavidades (*pocket standard*) o Mastercam® apresenta várias opções de maquinagem, resultando assim num conjunto diversificado de trajetórias. Na Figura 5.11 apresentam-se os exemplos das trajetórias resultantes da simulação efetuada pelo *software*, tendo em conta as opções selecionadas para a maquinagem da cavidade.

Analisando as figuras anteriores e posteriores, verifica-se que prevalecem dois tipos de trajetórias, as paralelas a uma direção e as equidistantes ao contorno (também conhecidas por *offset*), resultando das estratégias zigue-zague e paralela ao contorno respetivamente.

Além das soluções anteriores o Mastercam® apresenta outras estratégias para gerar trajetórias, entre as quais se destaca a trocoidal, conseguida pela opção “*Peel Mill*”, através dos ciclos dinâmicos de alta velocidade (*2D high speed toolpath*).

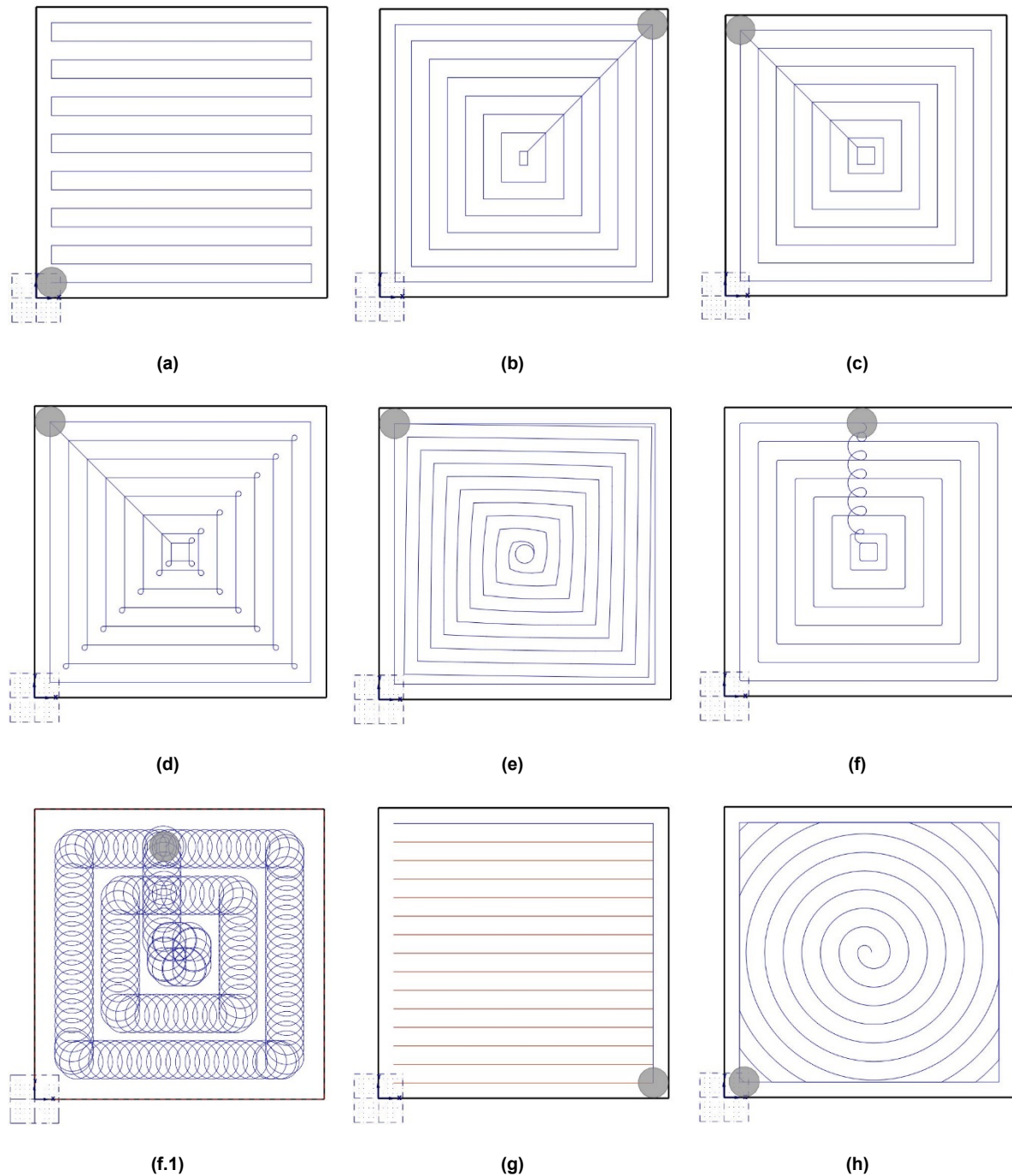


Figura 5.11 – Representação de trajetórias para abertura de caixas: (a) Zig zag, (b) Constant Overlap Spiral, (c) Parallel Spiral, (d) Parallel Spiral, Clean Corners, (e) Morph Spiral, (f) High Speed, (f.1) High Speed Trocoidal, (g) One Way, (h) True Spiral

5.1.6.1 - Estratégia em zigue-zague

Com esta estratégia o *software* gera trajetórias lineares, paralelas a um eixo ou em função de um ângulo previamente definido, com a vantagem de usar sempre profundidade e largura de corte constante, além de ser simples e rápida a sua programação. Porém, este tipo de estratégia vai alternando entre o corte concordante

e discordante, necessitando normalmente (na abertura de caixas) de uma passagem suplementar de contorno para remover o material remanescente. Outra limitação está relacionada com a entrada no material, que no primeiro troço a ser maquinado a ferramenta entra totalmente em carga, isto é, a largura de corte (a_e) é igual ao diâmetro de corte da ferramenta (D_c). Esta situação pode representar um problema acrescido para a ferramenta principalmente na fresagem de materiais duros (González, 2013; Lima & Silveira, 2013).

5.1.6.2 - Estratégia paralela ao contorno

Esta estratégia, baseada em “*offsets*”, assenta tipicamente em trajetórias paralelas ao contorno, semelhante a uma espiral, mantendo sempre a mesma profundidade e largura de corte entre cada passagem e o mesmo sentido de corte (concordante ou discordante). Outra das vantagens é o número reduzido de movimentações de reposicionamento da ferramenta, contribuindo de forma significativa para uma redução do tempo de maquinagem.

Embora as trajetórias paralelas ao contorno sejam a melhor opção para reduzir os tempos de operação, na maioria das situações, ela apresenta um problema que se torna mais evidente no caso da maquinagem de materiais de elevada dureza e na fresagem de alta velocidade. Esse problema está relacionado com a variação significativa do arco de contacto da fresa e com a velocidade de avanço, particularmente nos cantos e nos segmentos com mudança de direção com raio de curvatura pequeno. A fresa ao avançar, para os cantos interiores (Figura 5.12), o arco de contacto radial aumenta e exige ainda mais da aresta de corte. Geralmente o processo torna-se instável, devido ao aumento da vibração, produzindo marcas nos cantos. Há também o risco acrescido de microlascamento ou quebra total das arestas de corte da ferramenta (González & Ferreira, 2015; Sandvik, 2010).

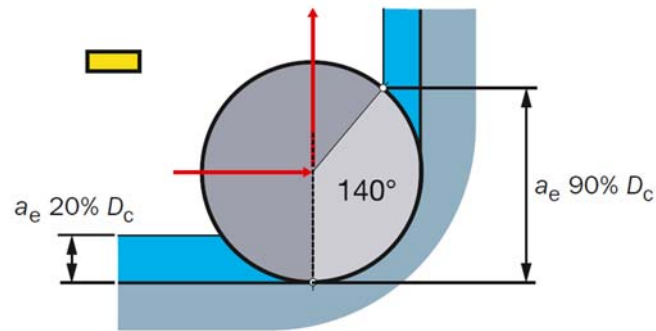


Figura 5.12 – Representação da fresagem tradicional em cantos com raio igual a 50% do D_c (Sandvik, 2010)

Segundo González (2013), este problema tem sido estudado por diversos autores existindo diferentes abordagens para minimizar ou evitar o seu efeito. Uma solução apresentada passa pela redução da velocidade de avanço, isto quando houver um aumento do arco de contacto entre a fresa e o material. Com a redução do avanço consegue-se evitar um aumento da potência necessária para maquinar o material na zona dos cantos. Porém, o tempo de contacto da ferramenta com a peça aumenta, podendo gerar vibrações, ou desgaste excessivo na ferramenta.

Outra solução referida pela Sandvik (2010) passa pela limitação do arco de contacto, conseguido através do aumento do raio de canto (Figura 5.13). Em algumas situações a solução apresentada pode ser favorável, pois permite usar fresas de maior diâmetro no desbaste, mantendo a produtividade elevada. Esta opção reduzirá a tendências ao aparecimento de vibrações, o que permitirá maior profundidade de corte e maiores velocidades de avanço.

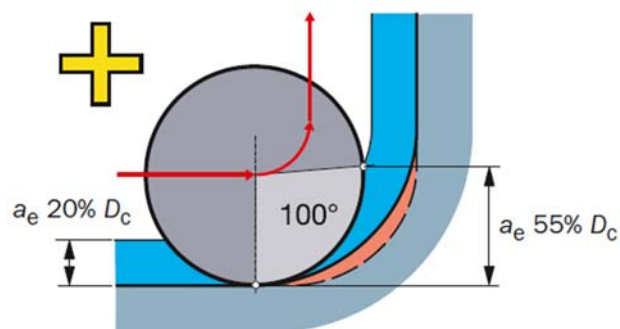


Figura 5.13 – Aumento do raio de canto para 75% do D_c (Sandvik, 2010)

No acabamento nem sempre é possível ter um raio tão grande, a alternativa passa por usar uma fresa de menor diâmetro para fazer o corte com o raio pretendido (Figura

5.14). No entanto, o diâmetro da fresa não deve ser maior do que 1.5 vezes o raio de canto da peça.

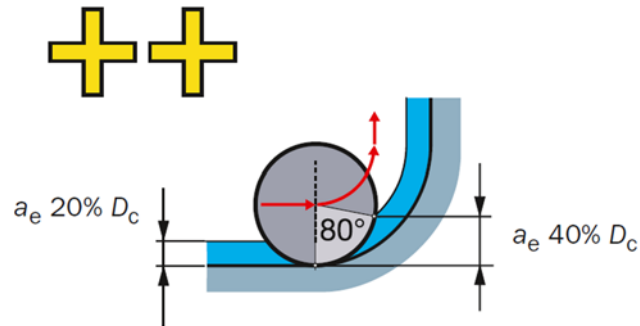


Figura 5.14 – Raio de canto igual a 100% do D_c (Sandvik, 2010)

5.1.6.3 - Estratégia trocoidal

Esta estratégia pode ser definida como sendo a conjugação simultânea de dois movimentos, um circular ou aproximadamente circular e outro de translação no sentido radial. Assim, esta trajetória é repetida pela ferramenta, que vai removendo “fatias” de material numa sequência ou percurso com a configuração de uma espiral contínua para formar um canal ou um perfil conforme ilustrado na Figura 5.15.

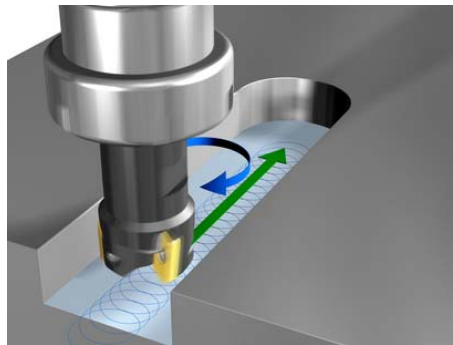


Figura 5.15 – Trajetória trocoidal da ferramenta (HEIDENHAIN, 2016)

Em teoria esta estratégia permite que ocorram sempre mudança de direção suaves, minimizando o problema nos cantos e nos segmentos com raio de curvatura pequenos. É um excelente método para abertura de canais, quando as vibrações são um problema, e é igualmente adequado para a fresagem de cavidades confinadas. De referir no entanto que cerca 50% do tempo de maquinagem a ferramenta está fora do corte (Sandvik, 2010; González, 2013).

O avanço ou passo radial (w) da ferramenta, também designado pelo termo em inglês *step over*, permanece inalterável, no entanto o arco de contacto e a largura de corte (a_e) variam constantemente atingindo o seu valor máximo na posição da linha de eixo do canal (Figura 5.16).

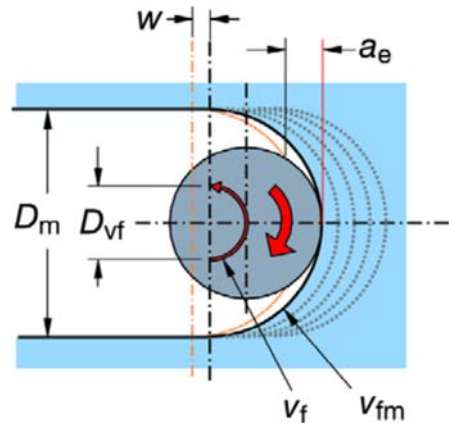


Figura 5.16 – Evolução das condições de corte em fresagem trocoidal (Sandvik, 2010)

Conforme refere a Sandvik (2010), a largura de corte máxima (a_e) não deve exceder os 20% do diâmetro de corte (D_c) da fresa e o arco de contacto, segundo a Tools (2016), varia entre os 10 e os 80° durante um ciclo.

Para larguras de canais (D_m) inferiores a duas vezes o diâmetro de corte da fresa ($2 \times D_c$), a largura de corte máxima é maior que o passo programado, (*vide* Figura 5.16), nesta situação é importante definir o passo radial abaixo de 10% do D_c de modo a garantir que o a_e máximo não ultrapasse os 20% do D_c . A limitação do arco de contacto consegue-se através da diminuição do diâmetro da fresa, que deve ser pelo menos 30% abaixo da largura do canal para que esta possa efetuar a trajetória circular.

Nesta estratégia, a entrada e saída da ferramenta é programada com uma interpolação circular, com passos radiais (w) pequenos, o que significa que o arco de contato gera baixas forças de corte permitindo aumentar a profundidade de corte (a_p) até $2 \times D_c$. Como todo o comprimento da aresta de corte é utilizado, garante-se que o calor e o desgaste sejam distribuídos uniformemente, proporcionando uma vida útil da ferramenta mais longa que na fresagem tradicional de canais.

Devido ao arco de contato pequeno são utilizadas normalmente ferramentas com múltiplas arestas de corte, o que permite elevadas velocidades de avanço assegurando a vida útil da ferramenta.

As vantagens da fresagem trocoidal afiguram-se muito promissoras uma vez que o reduzido tempo de contacto, entre a aresta de corte e o material, proporciona uma menor quantidade de calor transferido beneficiando a vida útil da ferramenta, a produtividade e a tolerância das peças (Sandvik, 2010; Tools, 2016).

5.1.7 - Parâmetros de corte na maquinagem

Na fresagem, assim como em outros processos tecnológicos de maquinagem, os parâmetros de corte bem definidos são de enorme importância para se maximizar os resultados relativamente a tempos de operação, ao período de vida útil da ferramenta e à qualidade superficial das peças.

Os parâmetros de corte responsáveis pelo movimento da ferramenta são a velocidade de rotação (n) e a velocidade de avanço (V_f). A velocidade de rotação, calculada pela equação (5.1) a partir do valor da velocidade de corte (V_c) e do diâmetro de corte na profundidade de corte efetiva (D_{cap}), indica o número de rotações que a ferramenta faz por minuto.

$$n = \frac{1000 \times V_c}{\pi \times D_{cap}} \quad (5.1)$$

A velocidade de avanço (expressa em mm/min) caracteriza o movimento da ferramenta em relação à peça, calculada pela equação (5.2), depende do avanço por dente (f_z) e do número de dentes da fresa (Z_n).

$$V_f = f_z \times n \times Z_n \quad (5.2)$$

A taxa de remoção de material (Q) é outro parâmetro a considerar, pois indica-nos o volume de material removido por unidade de tempo (cm^3/min). É calculada pela

equação (5.3), a partir dos valores da profundidade de corte (a_p), da largura (a_e) e da velocidade de avanço (V_f) (Sandvik, 2010).

$$Q = \frac{a_p \times a_e \times V_f}{1000} \quad (5.3)$$

onde:

a_e – Largura de corte [mm];

a_p – Profundidade de corte [mm];

D_{cap} – Diâmetro de corte na profundidade de corte efetiva, a_p [mm];

f_z – Avanço por dente [mm];

n – Velocidade de rotação [rpm];

Q – Taxa de remoção de material [cm³/min];

V_c – Velocidade de corte [m/min];

V_f – Velocidade de avanço [mm/min];

Z_n – Número total de dentes.

5.2 - Metodologia do trabalho experimental

Para a realização deste trabalho encetou-se por fixar convenientemente o bloco de aço inoxidável duplex à mesa do centro de maquinagem, conforme mostra a Figura 5.17, utilizando-se para o efeito quatro grampos de fixação com os respectivos tirantes para ranhuras em T e porcas de aperto sextavadas.

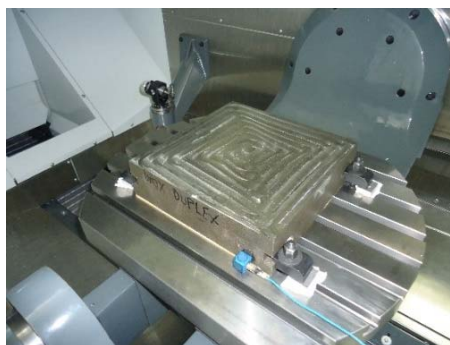


Figura 5.17 – Fixação do bloco à mesa do centro de maquinagem

De seguida procedeu-se à determinação do zero-peça, com sonda de transmissão de sinal ótico (*Renishaw*[®] *OMP40-2*), conforme representado na Figura 5.18. Posteriormente mediu-se o comprimento da ferramenta, através do apalpador elétrico de contacto (*Renishaw*[®] *OTS*), para determinar a compensação de altura (*tool offset*).

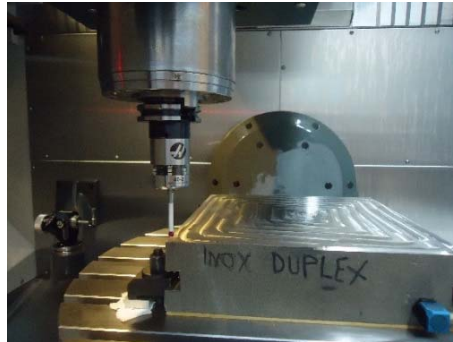


Figura 5.18 – Sonda Renishaw[®] utilizada para determinar o zero-peça

Para o estudo experimental optou-se por utilizar uma estratégia de maquinagem convencional, apoiada pelo ciclo de facejamento dinâmico (*Facing Dynamic*), e uma estratégia trocoidal, baseada no ciclo dinâmico de alta velocidade (*2D High Speed Peel Mill*).

5.2.1 - Estratégia convencional

Para a estratégia convencional utilizou-se uma geometria simples, com um formato quadrado de 300 X 300 mm, onde foram testadas pastilhas de carbonetos sinterizados revestidas com AlTiN pelo método de PVD. A trajetória gerada pelo Mastercam[®], para o ciclo de facejamento dinâmico, encontra-se representada pela Figura 5.19. Salienta-se que a entrada da ferramenta é feita do exterior para o interior do bloco, descrevendo um percurso semelhante a uma espiral no sentido horário. Deste modo privilegiou-se o corte concordante em detrimento do discordante, ou seja, garantiu-se que na zona de corte o sentido de rotação da fresa e a direção do avanço da peça são os mesmos.

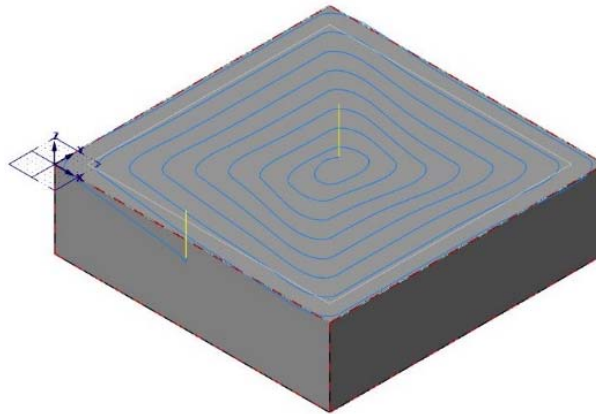


Figura 5.19 - Trajetória de maquinagem, opção *Facing Dynamic*, gerada pelo Mastercam®

A opção de usar um ciclo de facejamento dinâmico está relacionada com as vantagens que este apresenta, entre as quais se destaca o contacto permanente da ferramenta de corte com o material, o controlo do arco de contacto (conseguido através do ajuste da largura de corte) promovendo assim transições menos agressivas na mudança de direção do corte e a manutenção do sentido de corte ao longo de toda a trajetória.

Os parâmetros de corte propostos para o trabalho foram indicados pelo fabricante da ferramenta, estando estes apresentados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Parâmetros de corte indicados pela Palbit®

Parâmetros de corte	Estratégia convencional	Estratégia trocoidal
Velocidade de corte - V_c [m/min]	90 - 120	--
Avanço por dente - f_z [mm/t]	0.1 - 0.2	--
Largura de corte (% D_c)	60 - 70	10 - 20
Profundidade de corte - a_p [mm]	2.0 - 4.0	Máximo 9.0

Nos ensaios realizados manteve-se constante o tipo de percurso, a profundidade de corte, a largura de corte e o avanço por dente. Neste contexto são testados dois graus de carbonetos sintetizados, inicialmente o PH7740 e posteriormente o PH7930. Os parâmetros de corte usados para a maquinagem convencional encontram-se indicados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 - Parâmetros de corte usados no ensaio convencional

	Grau da pastilha	V_c [m/min]	a_p [mm]	$a_e = 60\% D_{cap}$ [mm]	f_z [mm/dente]
Ensaio C1	PH7740	90	2.5	19.2	0.1
Ensaio C2	PH7930	90	2.5	19.2	0.1
Ensaio C3	PH7930	120	2.5	19.2	0.1

Com os parâmetros de corte referidos na tabela anterior, calculou-se através das equações (5.1), (5.2) e (5.3), a velocidade de rotação, a velocidade de avanço e a taxa de remoção de material respetivamente. Os resultados obtidos apresentam-se na Tabela 5.8, assim como o tempo aproximado de maquinagem e o comprimento de corte (valores estes obtidos através da simulação do Mastercam®).

Tabela 5.8 – Valores obtidos para o ensaio convencional

	Velocidade de rotação [rpm]	Velocidade de avanço [mm/min]	Taxa de remoção de material [cm ³ /min]	Tempo de maquinagem [h:min:s]	Comprimento de corte [mm]
Ensaio C1	895	269	12.91	00:19:51	5332.24
Ensaio C2	895	269	12.91	00:19:51	5332.24
Ensaio C3	1193	358	17.18	00:14:54	5332.24

5.2.2 - Estratégia trocoidal

Para a estratégia trocoidal optou-se por dividir a área total do bloco em seis retângulos iguais com as dimensões de 300 X 50 mm (comprimento X largura), os quais foram maquinados com pastilhas PH7930, com uma profundidade de corte de 7.5 mm. A trajetória gerada pelo Mastercam®, para o ciclo dinâmico de alta velocidade *Peel Mill*, encontra-se representada pela Figura 5.20. Refere-se ainda que a entrada da ferramenta é feita do exterior para o interior do bloco, descrevendo um percurso semelhante a uma espiral no sentido anti-horário garantindo deste modo o sentido de corte concordante.

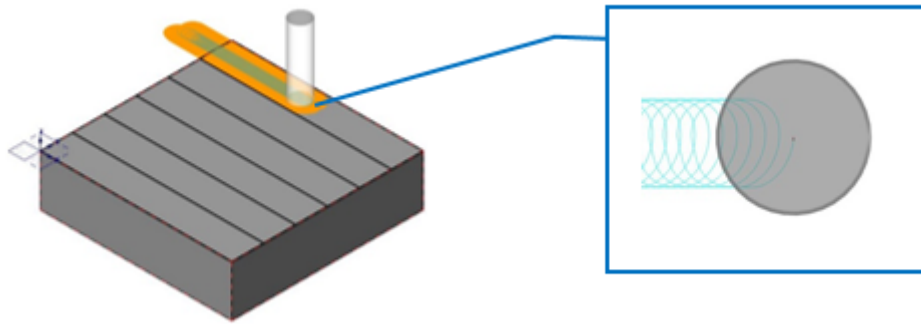


Figura 5.20 - Trajetória de maquinagem, opção *Peel Mill*, gerada pelo Mastercam®

A razão para a aplicação da estratégia trocoidal assenta nas vantagens que esta apresenta, e que já foram referidas no item 5.1.6.3.

Nos ensaios realizados manteve-se constante o tipo de percurso e a profundidade de corte, encontrando-se os restantes parâmetros indicados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 - Parâmetros de corte usados nos ensaios com a estratégia trocoidal

	V_c [m/min]	a_p [mm]	w		$a_e \text{ max}$ [mm]	f_z [mm/dente]
			% D_{cap}	[mm]		
Ensaio T1	120	7.5	7	2.24	5.21	0.15
Ensaio T2	120	7.5	7	2.24	5.21	0.20
Ensaio T3	240	7.5	5	1.6	3.89	0.15
Ensaio T4	240	7.5	7	2.24	5.21	0.15
Ensaio T5	240	7.5	7	2.24	5.21	0.20
Ensaio T6	300	7.5	5	1.6	3.89	0.15

Com os parâmetros de corte referidos na tabela anterior calculou-se, através das equações (5.1), (5.2) e (5.3), a velocidade de rotação, a velocidade de avanço e a taxa de remoção do material respetivamente. Os resultados obtidos apresentam-se na Tabela 5.10, assim como o tempo aproximado de maquinagem obtido através da simulação do Mastercam®.

Tabela 5.10 – Valores obtidos para os ensaios com a estratégia trocoidal

	Velocidade de rotação [rpm]	Velocidade de avanço [mm/min]	Taxa de remoção de material [cm³/min]	Tempo de maquinagem [h:m:s]
Ensaio T1	1193	536.85	8.87	00:28:37
Ensaio T2	1193	715.80	11.83	00:21:28
Ensaio T3	2387	1074	12.59	00:19:51
Ensaio T4	2387	1074	17.75	00:14:20
Ensaio T5	2387	1432	23.66	00:10:44
Ensaio T6	2984	1342	15.74	00:15:53

Capítulo 6

Estudo da degradação das ferramentas

6.1 - Análise do desgaste das ferramentas

O desgaste das ferramentas (ou pastilhas) de corte foi registado através de fotografias da face de saída principal, captadas pelo microscópio digital com uma ampliação de 50X, com um intervalo de tempo previamente definido até ser atingido o fim de vida útil da ferramenta. A partir destas fotografias, recorrendo ao *software* “*Axion Vision LE*”, foi medida a largura do desgaste de flanco e a largura máxima do desgaste de entalhe.

Foram considerados para determinar o fim de vida das ferramentas de corte os valores de desgaste de flanco (VB_1) e de desgaste de entalhe (VB_3) estabelecido pela norma ISO 8688-1 considerando o critério de duração de teste normal.

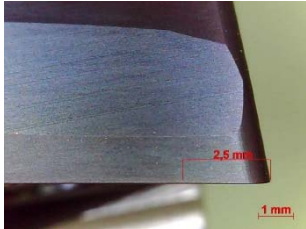





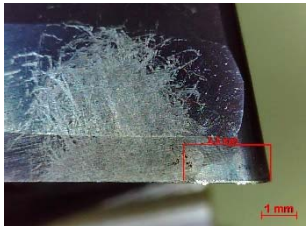




6.1.1 - Análise e discussão dos resultados obtidos com a estratégia convencional

No primeiro e segundo ensaios, C1 e C2, realizados com a estratégia convencional, usaram-se pastilhas de carbonetos sinterizados de grau PH7740 e PH7930

respetivamente. Fotografou-se a face de saída principal de cada uma das pastilhas e procedeu-se à medição dos desgastes, após o primeiro minuto de corte e minutos subsequentes até à rutura das mesmas. No terceiro ensaio, C3, usaram-se unicamente pastilhas de grau PH7930 e manteve-se a mesma metodologia dos ensaios anteriores, à exceção do intervalo de avaliação do desgaste que passou a ser mensurado em intervalos de 5 minutos até à rutura de um dos gumes de corte.

Na Tabela 6.1 apresentam-se fotografias, captadas nos instantes indicados, da superfície da face de saída principal da pastilha, que evidenciou em cada um dos ensaios o melhor desempenho na maquinagem do aço inoxidável duplex. Refere-se que todos os ensaios foram realizados sem fluido de refrigeração.

Tabela 6.1 – Sequência do desgaste na face de saída principal da pastilha, na maquinagem convencional do aço inoxidável duplex

<p>Ensaio C1 Grau PH7740 Vc = 90 m/min fz = 0.1 mm/dente ap = 2.5 mm ae = 19.2 mm</p>				
	t = 0	t = 2	t = 4	
				
	t = 6	t = 10	t = 12	
	<p>Ensaio C2 Grau PH7930 Vc = 90 m/min fz = 0.1 mm/dente ap = 2.5 mm ae = 19.2 mm</p>			
		t = 4	t = 12	t = 20
		<p>Ensaio C3 Grau PH7930 Vc = 120 m/min fz = 0.1 mm/dente ap = 2.5 mm ae = 19.2 mm</p>		
t = 5			t = 15	t = 20

Foi possível observar no decorrer dos ensaios com estratégia convencional um fenómeno cíclico de adesão de apara (zonas brilhantes) e desprendimento da mesma da aresta de corte, como mostram as fotografias da tabela anterior. A apara aderente permanecendo colada ao gume de corte cresce gradualmente até que a qualquer momento rompe bruscamente, arrancando consigo pequenas quantidades de material modificando a forma da pastilha. Este fenómeno pode ser justificado pelas propriedades dos aços inoxidáveis duplex, nomeadamente a elevada ductilidade e a baixa condutividade térmica.

É notório em todos os ensaios a presença de lascamento parcial do flanco com rutura do revestimento, expondo o substrato em contacto direto com o material a cortar potenciando a rutura da pastilha. O lascamento e a separação cíclica da apara produzem partículas provenientes da ferramenta e fragmentos de material muito duro, devido ao encruamento, os quais durante o seu trajeto de saída estimulam a abrasão nas superfícies de contacto. Nos ensaios com a estratégia convencional este mecanismo de desgaste prevaleceu até cerca de 50% do tempo de maquinagem, provocando desgaste de flanco uniforme.

Após o rompimento da camada de revestimento a ferramenta fica mais vulnerável, principalmente na linha da profundidade de corte ($a_p = 2.5$ mm), verificando-se a existência de desgaste de entalhe. Este tipo de desgaste, conjugado com o lascamento provoca uma rápida degradação da ferramenta atingindo outras zonas da face de saída, causando perturbações nas condições de maquinagem das quais se destacam o aumento de temperatura e das forças de corte, potenciando a probabilidade desta colapsar.

Observa-se pelas fotografias do ensaio C3 que o desgaste de entalhe foi inferior, tendo em conta o tamanho deste, quando comparado com o ensaio C2 para o mesmo tempo de maquinagem ($t = 20$ min). A justificação para este acontecimento pode estar relacionada com o aumento da velocidade de corte, que no caso do ensaio C2 foi de 90 m/min e no ensaio C3 foi de 120 m/min.

A Figura 6.1 mostra a evolução do desgaste de flanco (VB_1) das pastilhas de grau PH7740 (ensaio C1) em função do tempo de maquinagem, com velocidade de corte de 90 m/min, avanço por dente de 0.1mm, profundidade de corte de 2.5 mm e 19.2 mm de largura de corte.

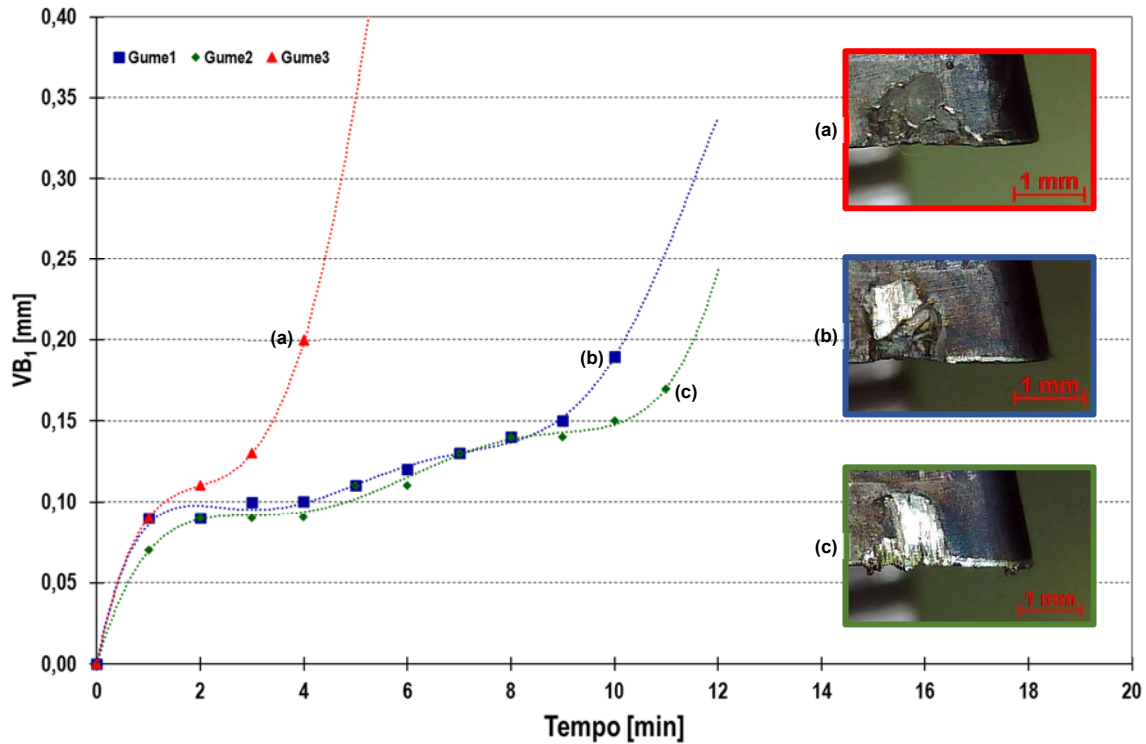


Figura 6.1 – Evolução do desgaste de flanco (VB_1) das pastilhas de grau PH7740, em função do tempo de maquinagem para o ensaio C1

Analisando a Figura 6.1 verifica-se que o desgaste de flanco (VB_1) não evoluiu da mesma forma nos três gumes de cortes, no entanto tende a aumentar com o decorrer do tempo de maquinagem como era espectável. O gume 1 e o gume 2 apresentam uma evolução semelhante até aos 9 minutos de maquinagem, apresentando o gume 2 um melhor desempenho relativamente aos restantes. O desgaste de flanco do gume 3 evolui mais rapidamente, e a partir dos 3 minutos apresenta uma evolução exponencial do VB_1 .

Na Figura 6.2 encontra-se representada a evolução do desgaste de entalhe (VB_3) das pastilhas de grau PH7740 (ensaio C1) em função do tempo de maquinagem, com velocidade de corte de 90 m/min, avanço por dente de 0.1mm, profundidade de corte de 2.5 mm e 19.2 mm de largura de corte.

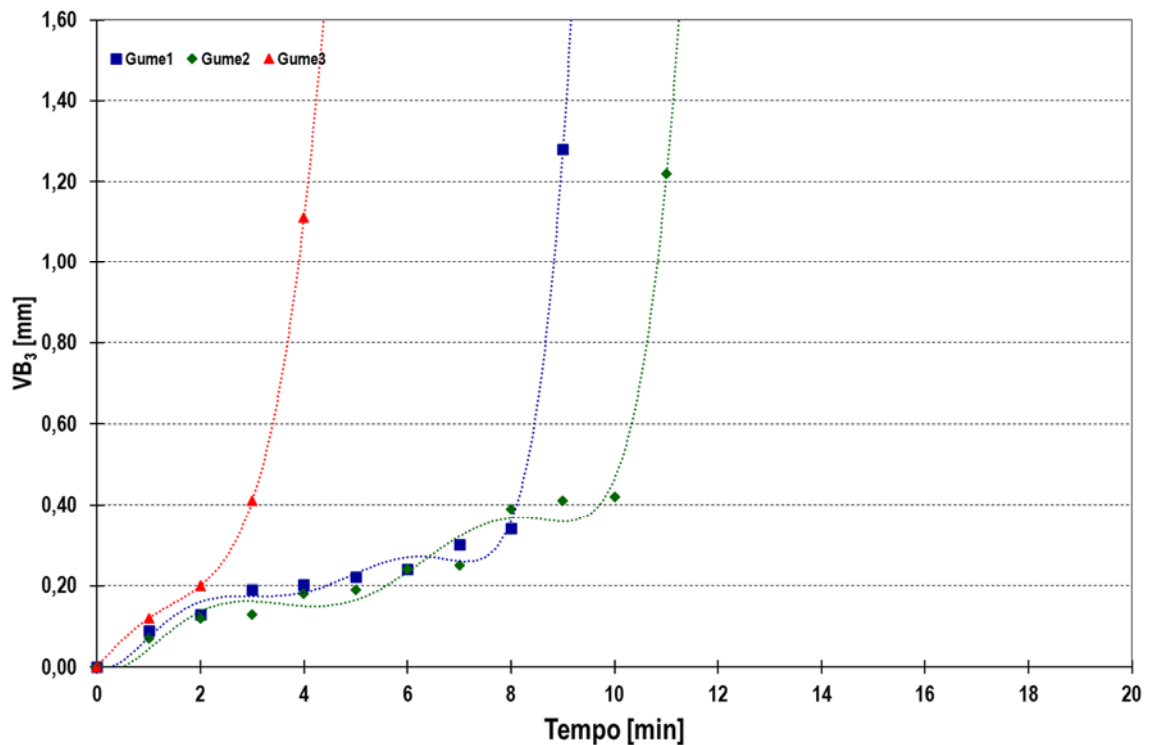


Figura 6.2 – Evolução do desgaste de entalhe (VB_3) para as pastilhas de corte PH7740, em função do tempo de maquinagem para o ensaio C1

Verifica-se que o desgaste de entalhe (VB_3) não evolui da mesma forma nos três gumes. Os gumes 1 e 2 apresentam semelhança na evolução do VB_3 até aos 8 minutos, tendo o gume 2 superado o gume 1 em 2 minutos de maquinagem como já tinha acontecido com o desgaste de flanco. O gume 3 apenas suportou cerca de 3 minutos de maquinagem dentro dos critérios estabelecidos na norma ISO 8688-1, ou seja VB_3 abaixo de 1.0 mm.

Pela análise das Figuras 6.1 e 6.2 verifica-se que o gume 2 teve um comportamento mais eficaz, com 10 minutos de vida útil, apresentando para este tempo de maquinagem 0.15 mm de desgaste de flanco (VB_1) e 0.42 mm de desgaste de entalhe (VB_3). Verifica-se também que todos os gumes de corte neste ensaio entram em rutura provocado pelo desgaste de entalhe.

A Figura 6.3 representa a evolução do desgaste de flanco (VB_1) das pastilhas de grau PH7930 (ensaio C2) em função do tempo de maquinagem, com velocidade de corte de 90 m/min, avanço por dente de 0.1mm, profundidade de corte de 2.5 mm e 19.2 mm de largura de corte.

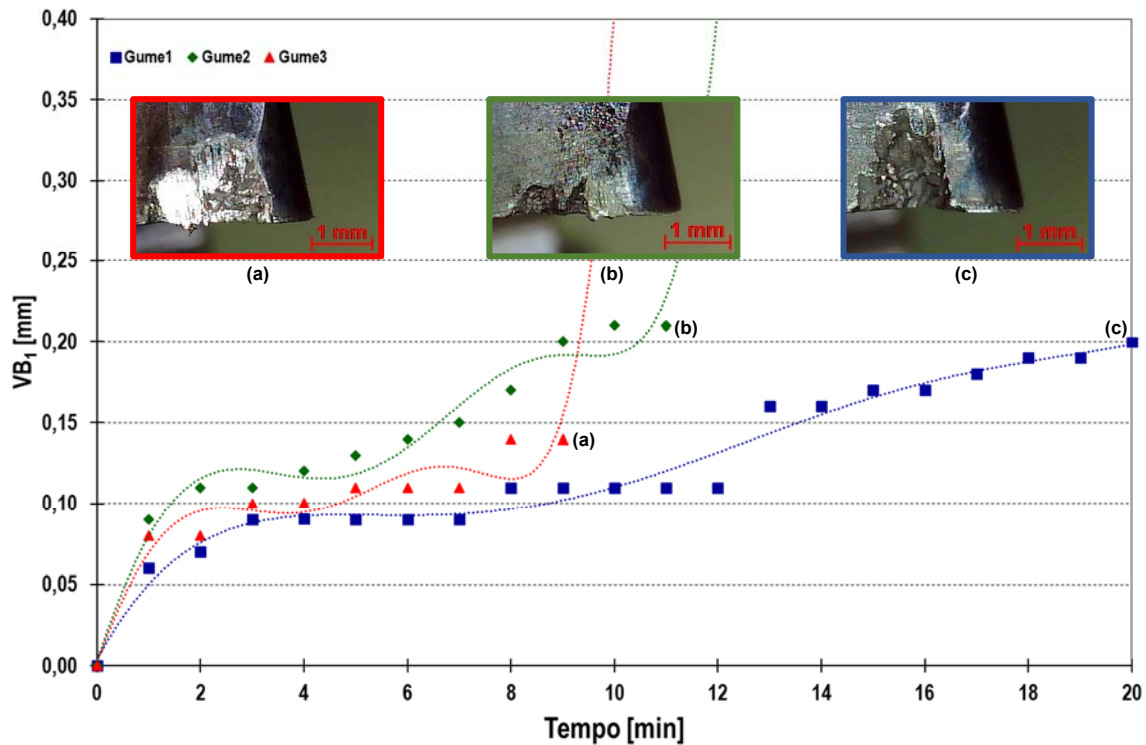


Figura 6.3 – Evolução do desgaste de flanco (VB_1) para as pastilhas de corte PH7930, em função do tempo de maquinagem para o ensaio C2

Observando a Figura 6.3 verifica-se novamente que a evolução do desgaste de flanco (VB_1), ao longo do tempo de maquinagem, não é semelhante entre os 3 gumes de corte. Os gumes 2 e 3 degradam-se mais rapidamente que o gume 1, no entanto é o gume 3 que entra em rutura em primeiro lugar (aos 9 minutos) devido ao desgaste de entalhe (*vide* Figura 6.4). A partir do instante em que os gumes entraram em rutura não foi possível continuar as medições de desgaste de flanco porque o desgaste de entalhe sobrepôs-se sobre o desgaste de flanco. O gume 1 foi o que suportou mais tempo de maquinagem (20 minutos) apresentando no final do ensaio 0.20 mm de desgaste de flanco.

A Figura 6.4 representa a evolução do desgaste de entalhe (VB_3) das pastilhas de grau PH7930 (ensaio C2) em função do tempo de maquinagem, com velocidade de corte de 90 m/min, avanço por dente de 0.1mm, profundidade de corte de 2.5 mm e 19.2 mm de largura de corte.

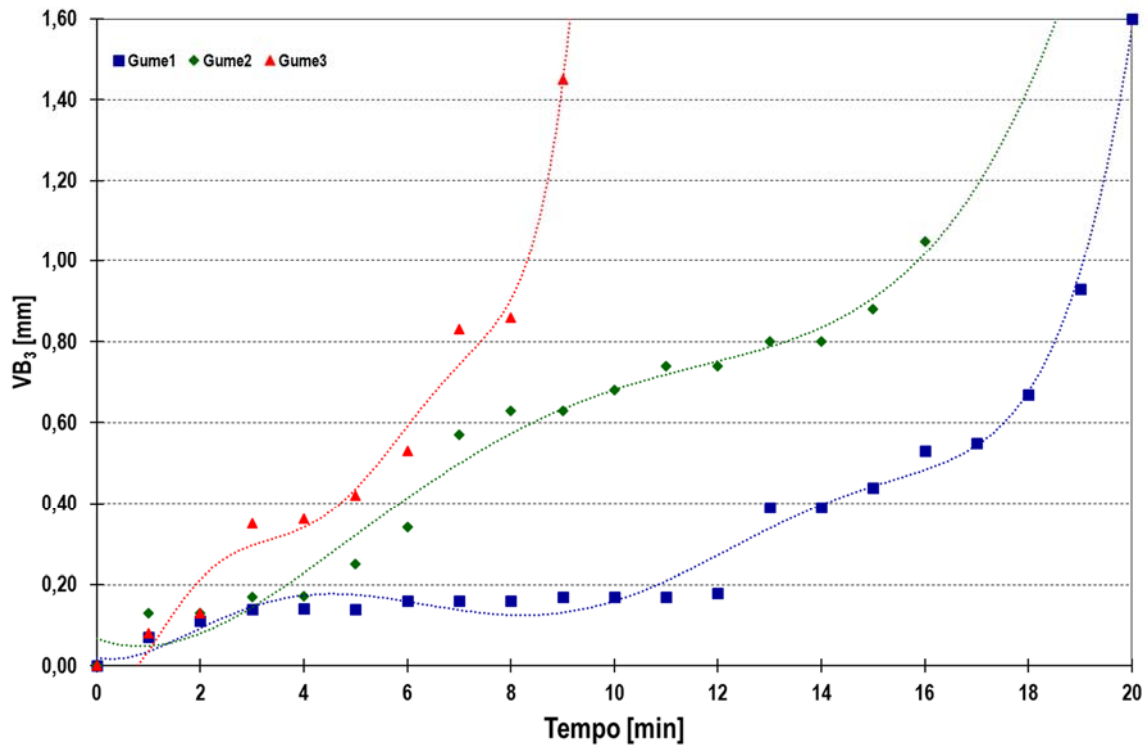


Figura 6.4 – Evolução do desgaste de entalhe (VB_3) para as pastilhas de corte PH7930, em função do tempo de maquinagem para o ensaio C2

Analisando a Figura 6.4 verifica-se que a evolução do VB_3 nos três gumes de corte foi muito diferente. O gume 1 apresentou o menor valor de VB_3 , mantendo-se abaixo do limite imposto pela norma ISO 8688-1 até aos 19 minutos entrando em rutura no minuto seguinte. O gume 2 e o gume 3 entraram em rutura aos 16 e aos 9 minutos de maquinagem, com 1.05 mm e 1.45 mm de desgaste de entalhe respetivamente.

Comparando os resultados obtidos neste ensaio verifica-se que o gume 1 apresenta o melhor desempenho, com 0.22 mm de VB_1 e 0.93 mm de VB_3 aos 19 minutos de maquinagem. Verifica-se novamente que todos os gumes de corte entram em rutura provocado pelo desgaste de entalhe.

Analisando conjuntamente os resultados dos dois ensaios, C1 e C2, fica patente que as pastilhas de grau PH7930 apresentam maior resistência que as pastilhas de grau PH7740 para as condições de corte referidas na Tabela 5.7.

A Figura 6.5 mostra a evolução do desgaste de flanco (VB_1) das pastilhas de grau PH7930 (ensaio C3) em função do tempo de maquinagem, com velocidade de corte de 120 m/min, avanço por dente de 0.1mm, profundidade de corte de 2.5 mm e 19.2 mm de largura de corte.

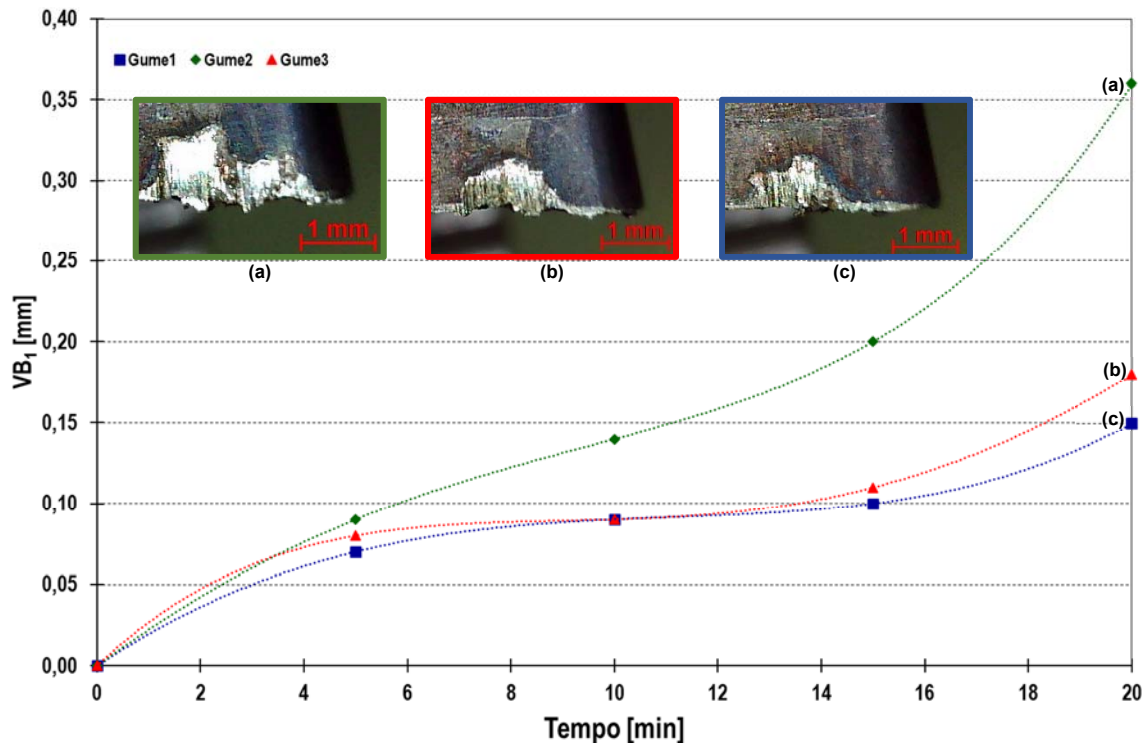


Figura 6.5 - Evolução do desgaste de flanco (VB_1) para as pastilhas de corte PH7930, em função do tempo de maquinagem para o ensaio C3

Pela análise da Figura 6.5 pode-se verificar que a evolução do desgaste de flanco (VB_1) dos gumes 1 e 3 foi idêntica, apresentando no final do ensaio 0.15 e 0.18 mm respetivamente.

Analisando as curvas de desgaste dos gumes referidos anteriormente, podemos constatar que estas se aproximam da forma da curva padrão para a evolução do desgaste de flanco (*vide* Figura 3.8). Cresce de forma rápida no intervalo tempo [0, 5] min, passando para uma segunda fase onde esse desgaste aumenta gradualmente e de forma previsível com o decorrer do tempo entre os 5 e os 15 minutos, entrando depois na terceira fase, no intervalo tempo [15, 20] min, onde o desgaste aumenta rapidamente num curto espaço de tempo podendo ocorrer a rutura da ferramenta. O gume 2 apresentou um desgaste mais acentuado a partir dos 5 minutos pelo que não se enquadra na curva padrão.

A Figura 6.6 representa a evolução do desgaste de entalhe (VB_3) das pastilhas de grau PH7930 (ensaio C3) em função do tempo de maquinagem, com velocidade de corte de 120 m/min, avanço por dente de 0.1mm, profundidade de corte de 2.5 mm e 19.2 mm de largura de corte.

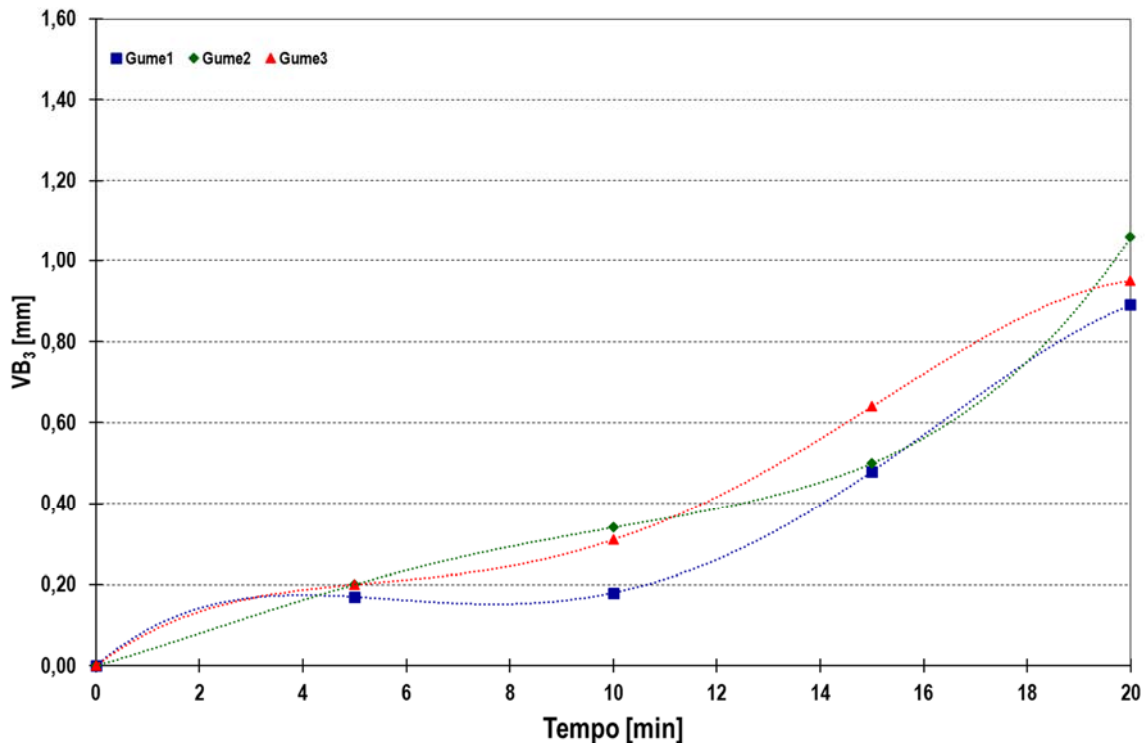


Figura 6.6 – Evolução do desgaste de entalhe (VB_3) para as pastilhas de corte PH7930, em função do tempo de maquinagem para o ensaio C3

Analisando a Figura 6.6 verifica-se que a evolução do desgaste de entalhe (VB_3) nos três gumes de corte foi semelhante. Os gumes 1 e 3 foram os que melhor suportaram este tipo de desgaste apresentando no final do ensaio valores de VB_3 abaixo do limite imposto pela norma ISO 8688-1. O gume 2 apresentou a mesma tendência durante uma parte significativa do ensaio, no entanto no final deste apresenta um VB_3 de 1.06 mm, excedendo assim o limite imposto pela norma.

Comparando os resultados deste ensaio verifica-se que o gume 1 apresenta a melhor prestação, com os valores mais baixos de VB_1 (0.15 mm) e de VB_3 (0.89 mm), seguido do gume 3 com 0.18 mm de VB_1 e 0.95 mm de VB_3 para um tempo de maquinagem de 20 minutos.

Comparando os resultados obtidos nos ensaios C2 e C3 verifica-se que foi positivo o aumento da velocidade de corte para 120 m/min, do ensaio C3, uma vez que os gumes

principais mostraram valores de desgaste de flanco e de entalhe inferiores aos verificados no ensaio C2, realizado com uma velocidade de corte de 90 m/min.

A Figura 6.7 compara o tempo de vida útil da ferramenta de cada um dos ensaios, com a respetiva taxa de remoção de material.

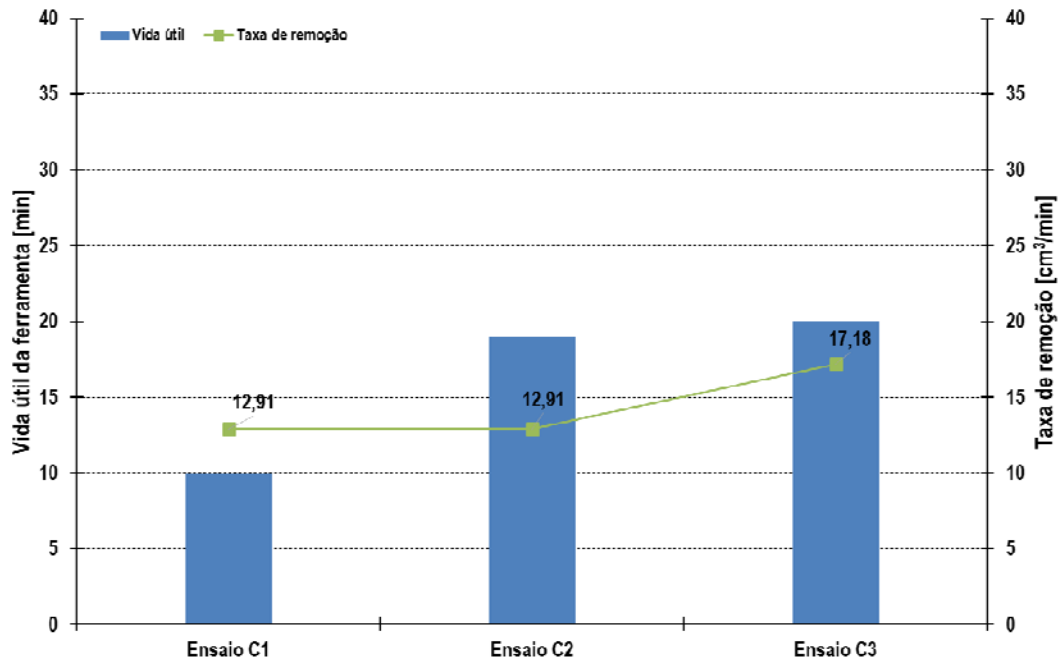


Figura 6.7 - Comparação entre vida útil da ferramenta e taxa de remoção de material para a estratégia convencional

Analisando os dados da figura anterior podemos verificar que:

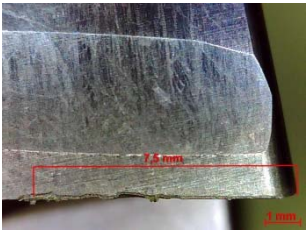


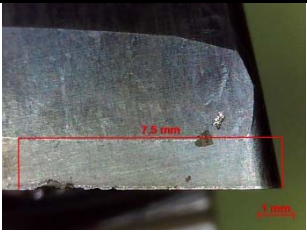



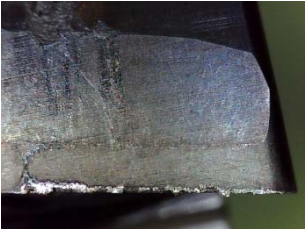

- O ensaio C1 apresenta o menor tempo de vida útil da ferramenta e uma taxa de remoção de material calculada de 12.91 cm³/min, para uma velocidade de corte de 90m/min
- O ensaio C2, realizado com pastilhas mais duras (PH7930) e com a mesma velocidade de corte do ensaio C1, apresenta um aumento de 90% da vida útil da ferramenta relativamente à ferramenta usada no ensaio C1.
- No ensaio C3 realizado com o mesmo tipo de pastilhas do ensaio C2, com velocidade de corte de 120 m/min, verifica-se um aumento de 5% no tempo de vida útil da ferramenta relativamente ao ensaio C2. No entanto consegue-se uma taxa de remoção de 17.18 cm³/min, ou seja 33% acima da taxa do ensaio C2.

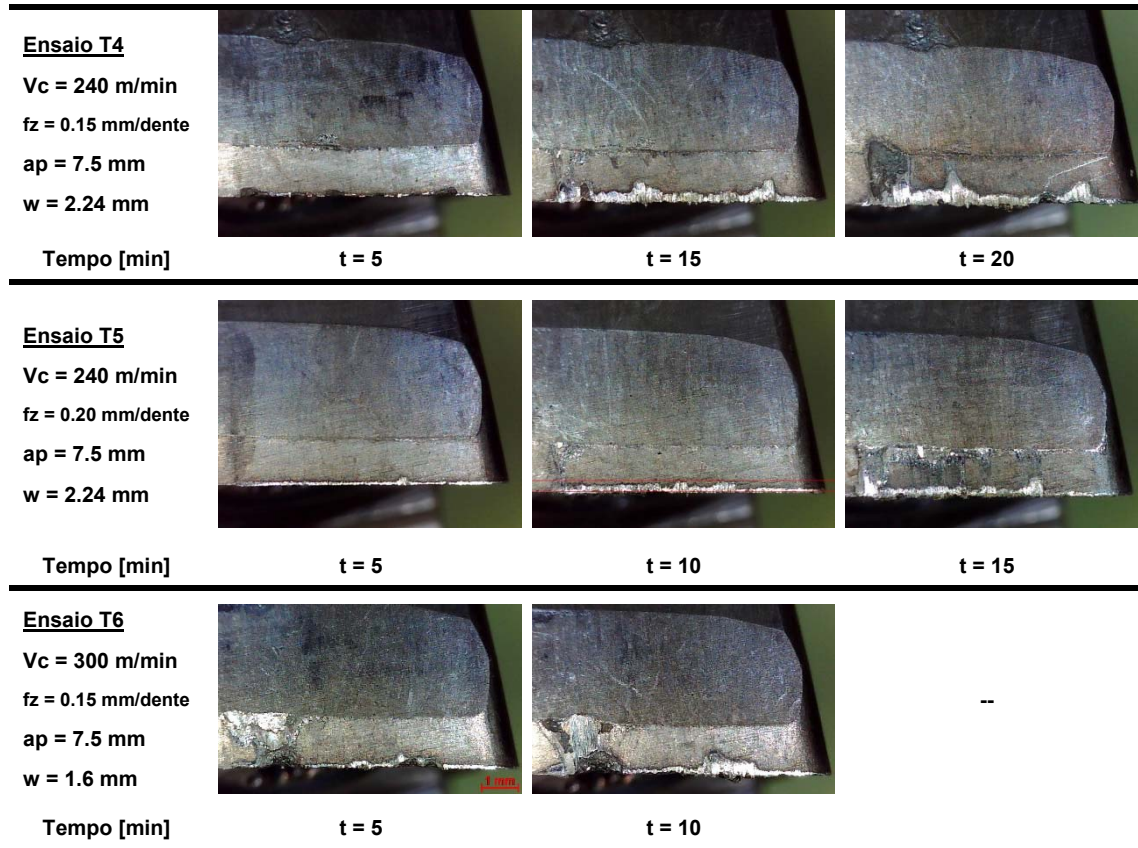
6.1.2 - Análise e discussão dos resultados obtidos com a estratégia trocoidal

Nos ensaios realizados com a estratégia trocoidal usaram-se apenas pastilhas de grau PH7930, fotografaram-se os gumes principais observados na face de saída principal das mesmas, e procedeu-se à medição dos desgastes em intervalos de 5 minutos de maquinagem até à rutura da ferramenta. Todos os ensaios foram realizados sem fluido de refrigeração.

Na Tabela 6.2 apresentam-se fotografias captadas nos instantes indicados, que em cada um dos ensaios apresentaram o melhor desempenho na maquinagem do aço inoxidável duplex.

Tabela 6.2 - Sequência do desgaste na face de saída principal da pastilha, na maquinagem trocoidal do aço inoxidável duplex

<p>Ensaio T1 $V_c = 120 \text{ m/min}$ $f_z = 0.15 \text{ mm/dente}$ $a_p = 7.5 \text{ mm}$ $w = 2.24 \text{ mm}$</p>			
<p>Tempo [min]</p>	<p>t = 5</p>	<p>t = 15</p>	<p>t = 35</p>
<p>Ensaio T2 $V_c = 120 \text{ m/min}$ $f_z = 0.20 \text{ mm/dente}$ $a_p = 7.5 \text{ mm}$ $w = 2.24 \text{ mm}$</p>			
<p>Tempo [min]</p>	<p>t = 5</p>	<p>t = 15</p>	<p>t = 25</p>
<p>Ensaio T3 $V_c = 240 \text{ m/min}$ $f_z = 0.15 \text{ mm/dente}$ $a_p = 7.5 \text{ mm}$ $w = 1.6 \text{ mm}$</p>			
<p>Tempo [min]</p>	<p>t = 5</p>	<p>t = 15</p>	<p>t = 25</p>



Observa-se na maioria das fotografias da tabela anterior adesão de aparas na superfície de saída da pastilha, zonas brilhantes, independentemente dos parâmetros de corte utilizados.

Verifica-se que no ensaio T1 predomina o desgaste por abrasão até final da vida útil da ferramenta, no ensaio T6, ocorre um dano excessivo na face de saída numa fase inicial. Nos restantes ensaios verifica-se mecanismo por abrasão até cerca de 50% do tempo de maquinagem com a rutura da ferramenta devido ao desgaste de entalhe e ao lascamento parcial do gume de corte.

É notório em todos os ensaios a presença de lascamento parcial ao longo da aresta de corte com rutura do revestimento, expondo o substrato em contacto direto com o material a cortar potenciando o desgaste prematuro da ferramenta.

Após o rompimento do revestimento a ferramenta fica mais frágil, principalmente na linha da profundidade de corte (7.5 mm), onde se verifica de forma mais pronunciada a existência de desgaste de entalhe. A conjugação deste tipo de desgaste, com o lascamento ao longo do gume principal de corte em contacto com o material provoca

uma rápida degradação da ferramenta, causando perturbações nas condições de maquinagem.

A Figura 6.8 representa a evolução do desgaste de flanco (VB_1) observado na face de saída principal das pastilhas, em função do tempo de maquinagem nos ensaios T1 e T2, com f_z de 0.15 e 0.20 mm/dente respetivamente e passo radial com 7% do D_{cap} (2.24 mm).

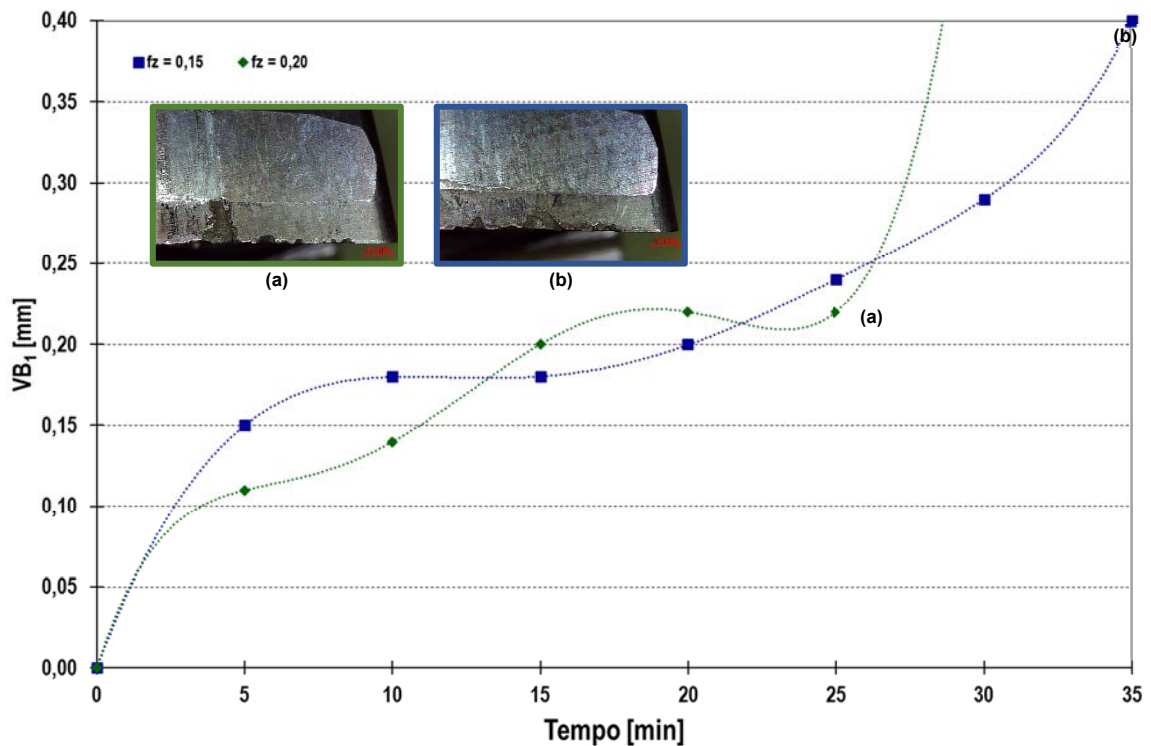


Figura 6.8 - Evolução do desgaste de flanco (VB_1) em função do tempo de maquinagem nos ensaios T1 e T2

Verifica-se pela análise da Figura 6.8 que as pastilhas não apresentaram o mesmo comportamento. No ensaio com o avanço por dente de 0.15 mm as pastilhas suportaram 35 minutos de corte, acabando por entrar em rutura devido ao desgaste de flanco, apresentando no final do ensaio 0.40 mm de largura. As pastilhas ensaiadas com um avanço por dente maior, 0.20 mm, apresentam um desgaste de flanco menor, no entanto o tempo de vida foi inferior ao ensaio T1, situando-se no intervalo tempo [20,25] min, uma vez que estas entraram em rutura devido ao desgaste de entalhe (vide Figura 6.9).

Analisando a curva para $f_z = 0.15$ mm/dente da Figura 6.8, podemos constatar que esta se assemelha da forma da curva padrão para a evolução do desgaste de flanco

(vide Figura 3.8) apresentando uma primeira fase onde o desgaste cresce de forma rápida, no intervalo tempo [0, 5] min, passando para uma segunda fase onde esse desgaste aumenta gradualmente e de forma previsível com o decorrer do tempo, entre os 5 e os 20 minutos, entrando depois na terceira fase, no intervalo tempo [30, 35] min, onde o desgaste aumenta rapidamente num curto espaço de tempo até à rutura completa da ferramenta.

A Figura 6.9 representa a evolução do desgaste de entalhe (VB_3) observado na face de saída principal das pastilhas, em função do tempo de maquinagem, nos ensaios T1 e T2, com f_z de 0.15 e 0.20 mm/dente respetivamente e passo radial com 7% do D_{cap} (2.24 mm).

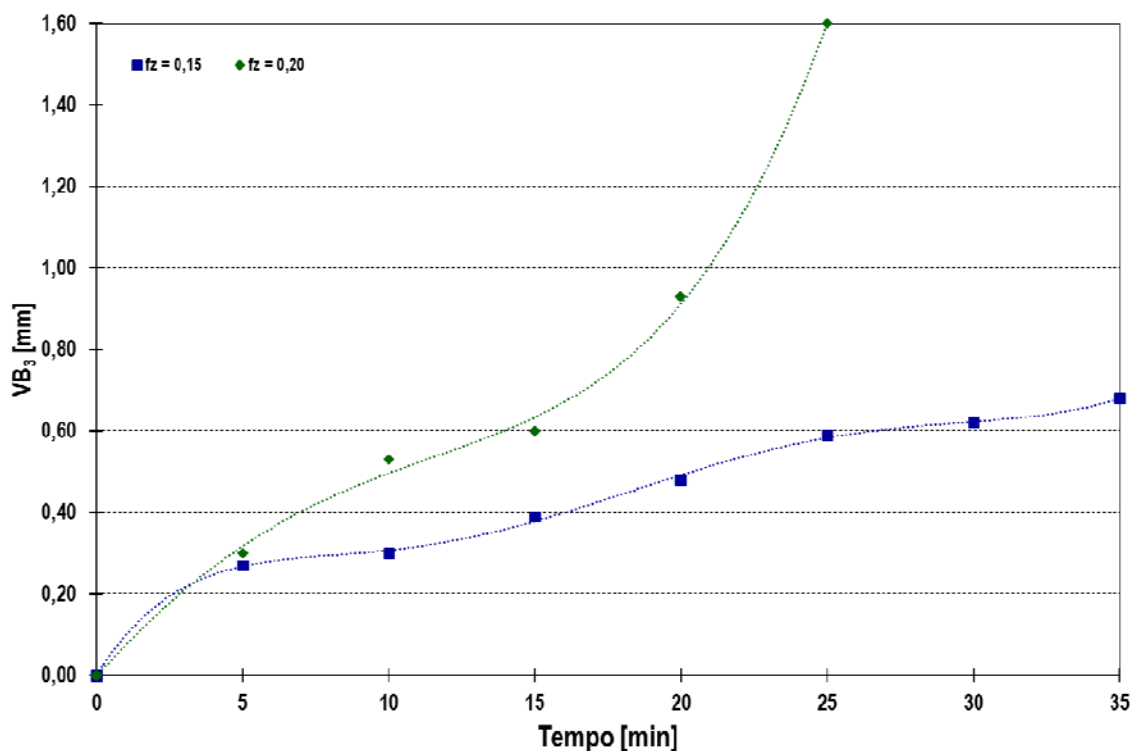


Figura 6.9 – Evolução do desgaste de entalhe (VB_3) em função do tempo de maquinagem nos ensaios T1 e T2

Analisando a Figura 6.9 observa-se que o desgaste de entalhe (VB_3) nos dois ensaios teve uma evolução muito díspar. No ensaio T1 a ferramenta de corte apresenta maior resistência quando comparada com o ensaio T2 acabando por entrar em rutura aos 35 minutos, devido ao desgaste de flanco, e não pelo desgaste de entalhe. O ensaio T2 apresenta uma evolução do VB_3 mais rápida que o ensaio T1, acabando as pastilhas por romper no intervalo tempo [20,25] min com um entalhe de 1.60 mm de largura.

Comparando os resultados dos desgastes, de flanco e de entalhe, com os parâmetros de corte usados nos ensaios referidos, verifica-se que o avanço por dente de 0.15 mm proporciona um aumento de vida da ferramenta superior a 70% quando comparado com os 0.20 mm aplicados no ensaio T2.

A Figura 6.10 representa a evolução do desgaste de flanco (VB_1) observado na face de saída principal das pastilhas, em função do tempo de maquinagem nos ensaios T3 e T4, com passo radial (w) igual a 1.6 mm e 2.24 mm respetivamente e com f_z de 0.15 mm/dente.

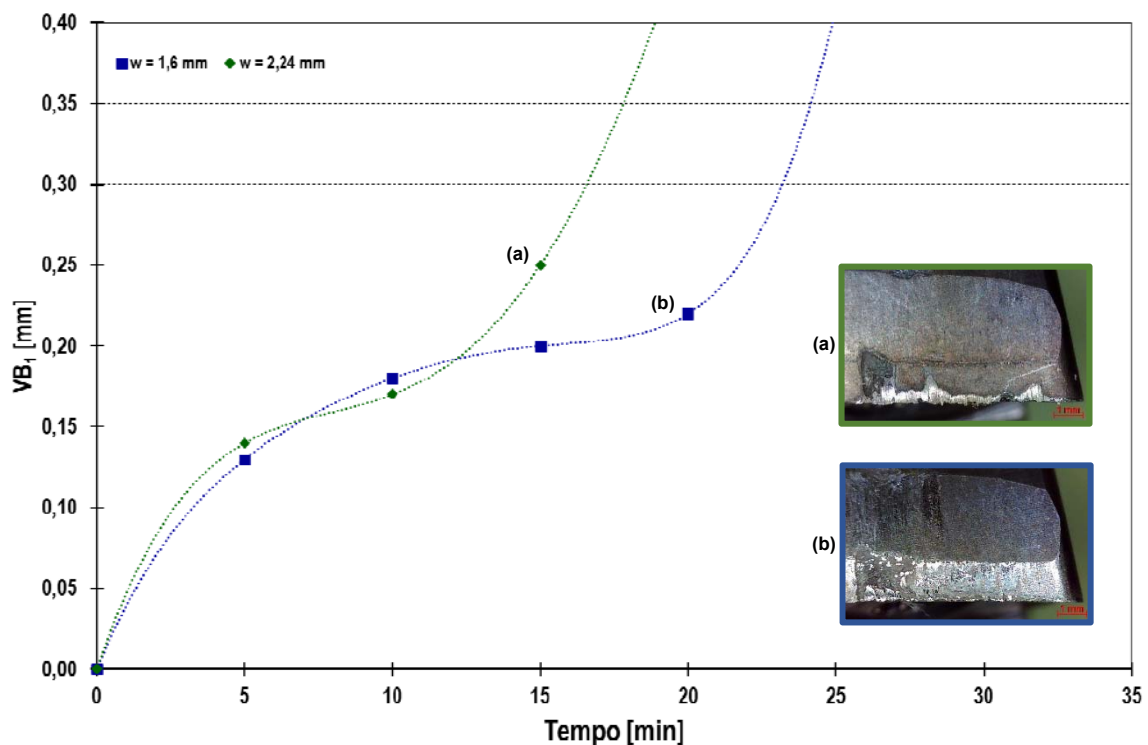


Figura 6.10 – Evolução do desgaste de flanco (VB_1) em função do tempo de maquinagem nos ensaios T3 e T4

Atendendo à Figura 6.10 verifica-se que os ensaios T3 e T4 apresentam semelhança na evolução do VB_1 no intervalo tempo [0, 10] min, e que a partir dos 10 minutos é o ensaio T3 que apresenta melhores resultados relativamente ao desgaste de flanco. As pastilhas usadas nos ensaios, T3 e T4, apresentaram igual durabilidade no intervalo tempo [15,20] min, acabando por romperem devido ao desgaste de entalhe (*vide* Figura 6.11).

A Figura 6.11 representa a evolução do desgaste de entalhe (VB_3) observado na face de saída principal das pastilhas, em função do tempo de maquinagem nos ensaios T3 e T4, com passo radial (w) igual a 1.6 mm e 2.24 mm respetivamente e com f_z de 0.15 mm/dente.

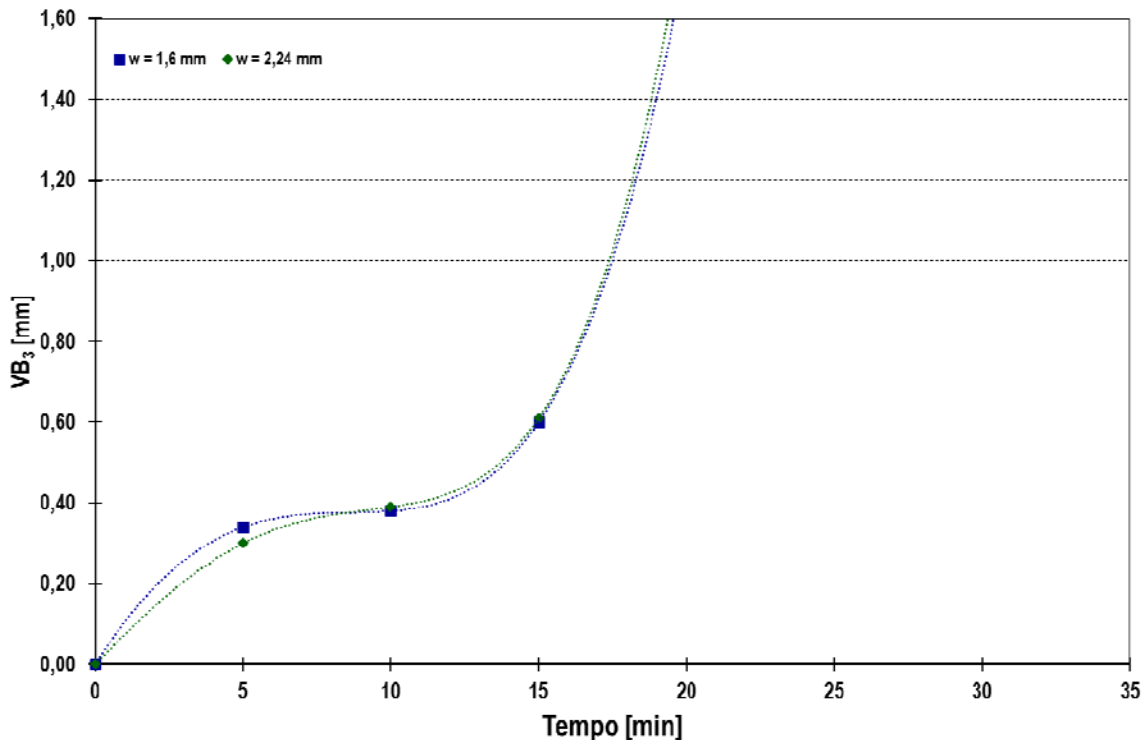


Figura 6.11 – Evolução do desgaste de entalhe (VB_3) em função do tempo de maquinagem nos ensaios T3 e T4

Analisando a Figura 6.11 verifica-se que o desgaste de entalhe (VB_3) apresenta a mesma tendência e com valores muito próximos nos dois ensaios. No final de 20 minutos de maquinagem os valores de VB_3 foram de 1.76 e 1.86 mm para os ensaios T3 e T4 respetivamente.

Apesar da diferença do passo radial nos dois ensaios esta não causou diferenças significativas no resultado final.

A Figura 6.12 representa a evolução do desgaste de flanco (VB_1) observado na face de saída principal das pastilhas, em função do tempo de maquinagem, nos ensaios T4 e T5 com f_z de 0.15 e 0.20 mm/dente respectivamente e passo radial de 2.24 mm.

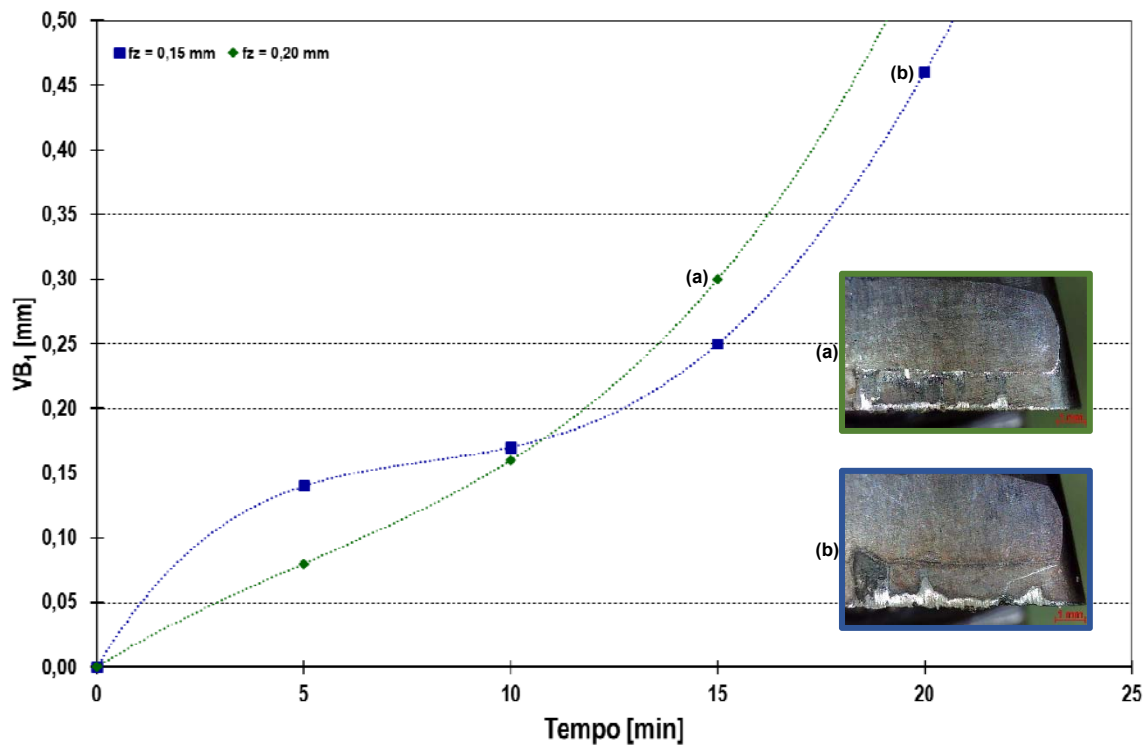


Figura 6.12 - Evolução do desgaste de flanco (VB_1) em função do tempo de maquinagem nos ensaios T4 e T5

Analisando a Figura 6.12 verifica-se um comportamento diferenciado relativamente à evolução do desgaste de flanco nos dois ensaios. As pastilhas usadas nos ensaios T4 e T5, com avanço por dente de 0.15 e de 0.20 mm respectivamente, suportaram entre 15 a 20 minutos de vida útil dentro dos parâmetros estabelecidos na norma ISO 8688-1 (VB_1 abaixo de 0.4 mm) acabando por se degradarem devido ao desgaste de entalhe (vide Figura 6.13).

A Figura 6.13 representa a evolução do desgaste de entalhe (VB_3) observado na face de saída principal das pastilhas, em função do tempo de maquinagem, nos ensaios T4 e T5 com f_z de 0.15 e 0.20 mm/dente respectivamente e passo radial de 2.24 mm.

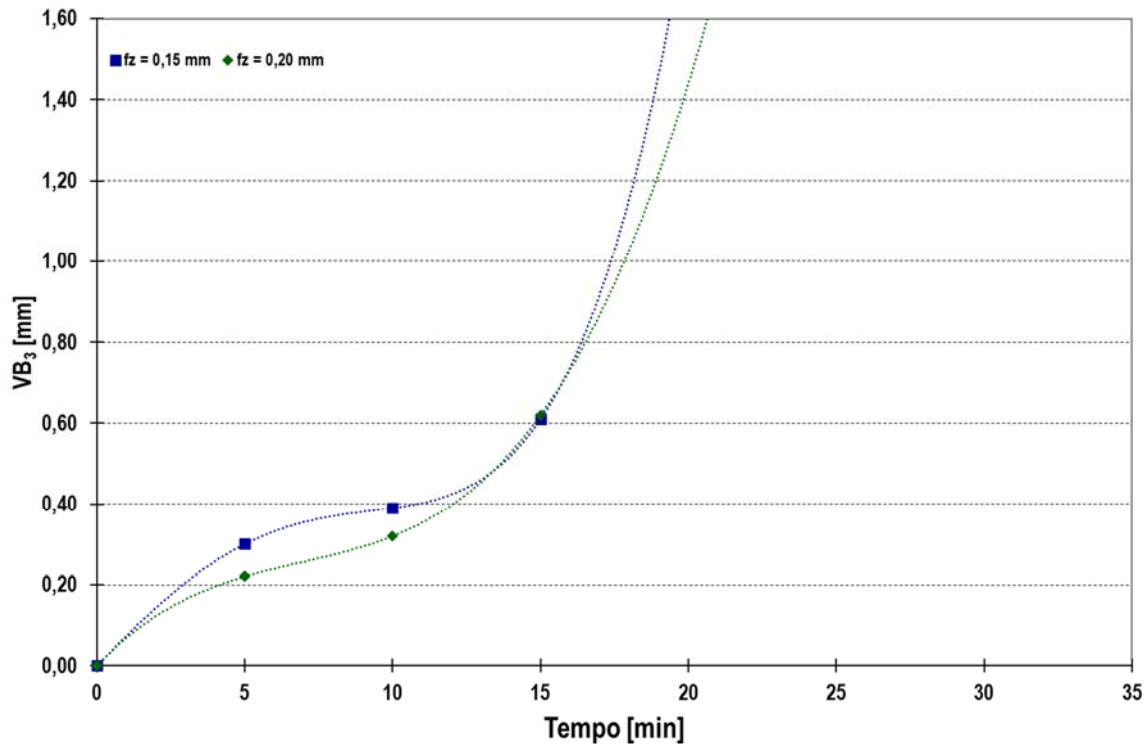


Figura 6.13 – Evolução do desgaste de entalhe (VB₃) em função do tempo de maquinagem nos ensaios T4 e T5

Analisando a Figura 6.13 verifica-se que o desgaste de entalhe (VB₃) nos dois ensaios teve a mesma evolução, apresentando valores muito próximos até aos 15 minutos, entrando as pastilhas em rutura no intervalo tempo [15,20] min devido ao entalhe.

A Figura 6.14 representa o desgaste de entalhe observado na face de saída principal das pastilhas, em função do tempo de maquinagem no ensaio T6 com f_z de 0.15 mm/dente e 2.24 mm de passo radial.

No ensaio T6 verificou-se um dano excessivo localizado na face de saída principal da pastilha, numa fase prematura do ensaio, no intervalo tempo [0, 5] min pelo que não foi possível analisar o desgaste de flanco.

O desgaste de entalhe (VB₃) terá surgido de forma repentina, apresentando os gumes 2 e 3 semelhança na evolução do mesmo até aos 5 minutos, registando o gume 1 o valor mais baixo com 0.68 mm de largura.

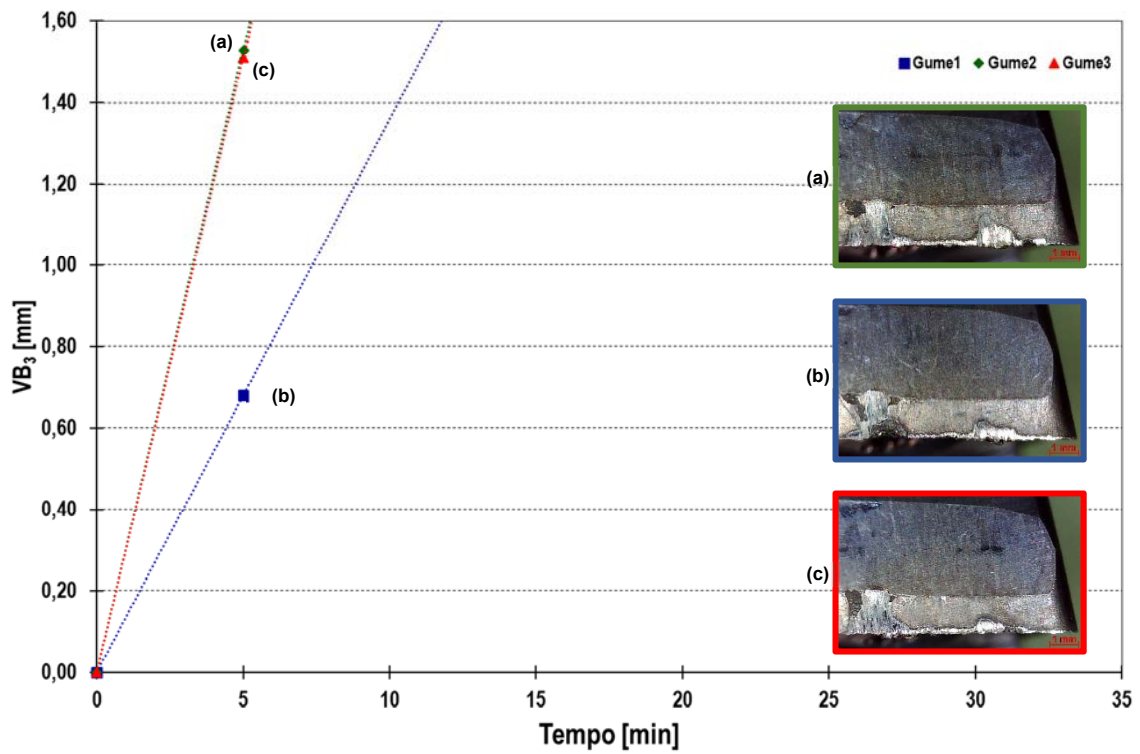


Figura 6.14 – Evolução do desgaste de entalhe (VB_3) em função do tempo de maquinagem no Ensaio T6

A Figura 6.15 compara a vida útil da ferramenta de cada um dos ensaios, com a taxa de remoção de material correspondente.

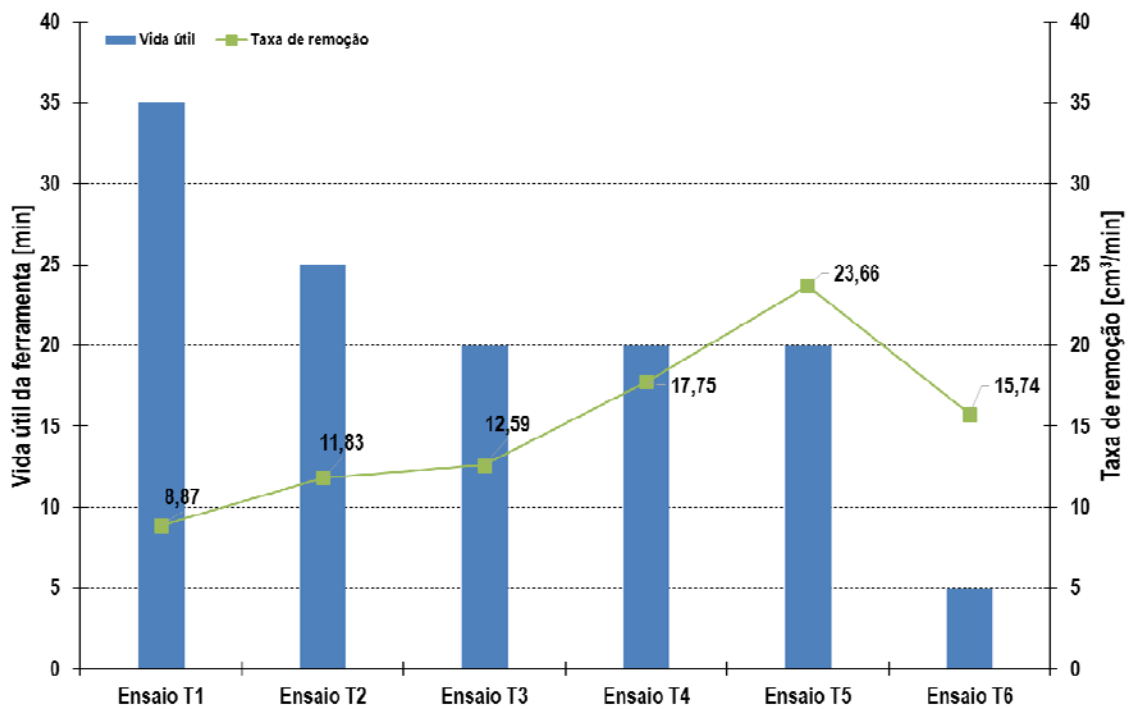


Figura 6.15 - Comparação entre vida útil da ferramenta e taxa de remoção de material para a estratégia trocoidal

Analisando os dados da figura podemos verificar que:

- Para uma velocidade de corte de 120 m/min, 2.24 mm de passo radial e $f_z = 0.15$ mm/dente, o ensaio T1 apresenta o maior tempo de vida útil da ferramenta, 35 minutos, no entanto a taxa de remoção de material calculada é a mais baixa, 8.87 cm³/min. O ensaio T2, com um avanço por dente de 0.20 mm, apresenta uma diminuição da vida útil da ferramenta em cerca de 28%, relativamente à ferramenta usada no ensaio T1, por outro lado a taxa de remoção de material, 11.83 cm³/min, é superior em 33% relativamente ao ensaio T1.
- Para uma velocidade de corte de 240 m/min e avanço por dente de 0.15 mm, os ensaios T3 e T4, com diferentes valores de passo radial, apresentam o mesmo tempo de vida útil da ferramenta, 20 minutos, no entanto no ensaio T4 usando $w=2.24$ mm consegue-se aumentar a taxa de remoção de material em cerca de 41%, para 17.75 cm³/min, relativamente ao ensaio T3.
- Para uma velocidade de corte de 240 m/min e 2.24 mm de passo radial, o ensaio T4, com $f_z = 0.15$ mm/dente apresenta 20 minutos de tempo de vida útil da ferramenta, com uma taxa de remoção de material calculada de 17.75 cm³/min. O ensaio T5, com um avanço por dente de 0.20 mm, apresenta igualmente 20 minutos de vida útil da ferramenta no entanto a taxa de remoção de material calculada, 23.66 cm³/min, é superior em cerca de 33% relativamente ao ensaio T4.

Capítulo 7

Conclusões e trabalhos futuros

7.1 - Conclusões

No final deste trabalho é possível estabelecer algumas conclusões tendo em conta as condições definidas para os ensaios de maquinagem do aço inoxidável duplex GX6CrNiN26-7, as quais se apresentam em seguida:

Verificou-se em alguns ensaios que a degradação das pastilhas de corte foi substancialmente diferente tendo em conta a sua posição relativa. Na maioria dos casos esse efeito não foi significativo, optando-se nestes casos por apresentar os resultados apenas para uma pastilha. Este fenómeno pode ser atribuído ao batimento radial provocado pelo sistema de fixação da ferramenta ao porta-ferramentas.

A rutura da ferramenta deve-se principalmente ao desgaste de entalhe, causado pelo fenómeno de adesão, onde partículas microscópicas são arrancadas e arrastados pelo fluxo de material. Este tipo de desgaste, conjugado com o lascamento provoca uma rápida degradação da ferramenta atingindo outras zonas da face de saída

As pastilhas de grau PH7930 revelam-se mais resistentes na maquinagem do aço inoxidável duplex, com as condições de corte estabelecidas pelo fabricante. Para o caso da estratégia trocoidal, é possível concluir que a diferença no valor do passo radial não tem qualquer relevância nos resultados finais em termos de durabilidade da pastilha. Já o valor da velocidade de corte e do avanço por dente influenciam a vida útil da ferramenta.

Para a estratégia convencional, com os parâmetros de corte definidos para atingir uma taxa de remoção de $17.18 \text{ cm}^3/\text{min}$, a vida útil da ferramenta é de 20 minutos. Para a estratégia trocoidal, com taxas de remoção de $23.66 \text{ cm}^3/\text{min}$, o tempo de vida útil da ferramenta é de aproximadamente 20 minutos. Contudo foi possível atingir um tempo de vida útil de 35 minutos na estratégia trocoidal, reduzindo a taxa de remoção para $8.87 \text{ cm}^3/\text{min}$.

Tendo sido demonstrado que é possível obter para a estratégia trocoidal tempos de vida útil da ferramenta e taxas de remoção de material iguais ou superiores à estratégia convencional, recomenda-se a sua utilização para a maquinagem do aço inoxidável duplex, atendendo aos benefícios que esta estratégia possibilita.

7.2 - Trabalhos futuros

Relativamente a trabalhos futuros que se consideram pertinentes desenvolver no seguimento deste trabalho, indicam-se os seguintes:

- Utilizar ferramentas integrais no estudo da maquinabilidade do aço inoxidável duplex e outros tipos de estratégias de corte;
- Medição de forças, de potência e temperatura de corte na maquinagem de aços inoxidáveis duplex;
- Realizar ensaios aplicados em blocos com geometrias mais complexas, tais com caixas, ilhas e zonas confinadas;
- Utilização de fluido de corte com o método de alta pressão
- Realizar o estudo experimental da degradação da ferramenta no corte, aplicado a outros materiais de difícil maquinabilidade. Nomeadamente, ligas de titânio e ligas de níquel;
- Relacionar o processo de maquinagem do aço inox duplex com o sinal de vibração adquirido pelo sistema que foi implementado no centro de maquinagem, identificando as condições adequadas e instáveis de corte;
- Relacionar o sinal de vibração adquirido com o processo de maquinagem, identificando a situação limite de vida das ferramentas de corte.

Bibliografia

Abinox, 2015. *Abinox - Associação Brasileira do Aço Inoxidável*. [Online] Available at: <http://www.abinox.org.br/upfiles/arquivos/biblioteca/composicao-quimica.pdf> [Acedido em 11 dezembro 2015].

Abinox, 2015. *Abinox - Associação Brasileira do Aço Inoxidável*. [Online] Available at: <http://www.abinox.org.br/upfiles/arquivos/biblioteca/tipos-de-acos-inoxidaveis.pdf> [Acedido em 11 dezembro 2015].

ARSOPI, 2015. *Tests Report*, Vale de Cambra: s.n.

BTfixo, s.d. *BT Fixo Distribuidor Ltda*. [Online] Available at: <http://www.btfixo.com.br/uploads/attachment2-58.jpg> [Acedido em 30 maio 2016].

Carbó, H. M., 2015. *Rioinox*. [Online] Available at: http://www.rioenix.com/Acesita_Aplica_Especificas.pdf [Acedido em 07 dezembro 2015].

Carla, A., 2015. *Universidade Federal do Rio de Janeiro/UFRJ*. [Online] Available at: http://www.mecanica.scire.coppe.ufrj.br/util/b2evolution/media/blogs/annacarla/Usina_geml/Aula16-Desgaste.pdf [Acedido em 10 novembro 2015].

Centimfe, 2003. *Manual do projectista para moldes de injeção de plástico*. s.l.:Centimfe - Centro Tecnológico da Indústria de Moldes, Ferramentas Especiais e Plásticos.

Coromant, A. S., 2009. *Tecnología de Corte de Metal*, Suécia: S - 811 81 Sandviken.

Davim, J. P., 2008. *Princípios da maquinagem*. 2ª ed. Porto: Publindústria.

Diniz, A. E., Marcondes, F. C. & Coppini, N. L., 2008. *Tecnologia da usinagem dos materiais*. 6.ª ed. São Paulo - Brasil: Artliber Editora Ltda.

Editora, P., 2003-2016. *Infopédia - Dicionários Porto Editora*. [Online] Available at: <http://www.infopedia.pt/dicionarios/lingua-portuguesa/maquinagem> [Acedido em 15 Setembro 2016].

Ferraresi, D., 1970. *Fundamentos da Usinagem dos Metais - Volume 1*. São Paulo - Brasil: Edgard Blücher Ltda.

Ferreira, P. M. S., 2015. *Estudo da maquinabilidade das ligas Ti-6Al-4V e Co-28Cr-6Mo na fresagem de dispositivos biomédicos*. Tese de doutoramento ed. s.l.:Universidade de Aveiro.

Gabaldo, S. & Prado, J., 2015. *usinagem sem segredos*. [Online] Available at: http://3.bp.blogspot.com/_5ST5h7ELUzk/TMLPueLphYI/AAAAAAAAAGk/enu6XIKgt3I/s1600/tooooo.png [Acedido em 02 novembro 2015].

González, D. M. & Ferreira, J. C., 2015. *Geração de trajetórias trocoidais e espirais para o fresamento de cavidades 2,5D com múltiplas ferramentas*. Salvador, Bahia, 8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação.

González, D. M. O., 2013. *Método de geração de trajetórias trocoidais e espirais combinadas para o fresamento de desbaste de cavidades 2,5D com múltiplas ferramentas*. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica ed. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina.

Guida, R. B., 2006. *Comparação da estampabilidade de chapas de aço inoxidável ferrítico estabilizado ao nióbio obtidas através de duas rotas de fabricação*. Tese de mestrado ed. s.l.:Universidade Federal de Minas Gerais.

Haas, 2016. *Haas Automation Ltd*. [Online] Available at: http://www.haas.co.uk/images/vmc/UMC_750_RO.jpg [Acedido em 18 fevereiro 2016].

Haimer, 2016. *Haimer*. [Online] Available at: http://www.haimer.es/fileadmin/assets/downloads/kataloge/DE_EN/2016-04-Werkzeugaufnahmen-DE-EN-screen.pdf [Acedido em 27 maio 2016].

HEIDENHAIN, 2016. *Klartext-Portal – Die Informationsseite für HEIDENHAIN-Steuerungen*. [Online] Available at: <https://www.klartext-portal.de/uploads/smc/5a6104aca790cedef1045adfd54a6571f8e314ca.jpg> [Acedido em 08 julho 2016].

IMOA, 2012. *Orientações práticas para o processamento dos aços inoxidáveis Duplex*. 2ª ed. Londres, UK: International Molybdenum Association.

Infomet, 2015. *Infomet*. [Online] Available at: <http://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=109> [Acedido em 18 dezembro 2015].

Infomet, 2016. *Infomet*. [Online] Available at: <http://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=208> [Acedido em 29 agosto 2016].

ISO-3685, 1993. *Tool-life testing with single-point turning tools*. s.l.:International Organization for Standardization.

ISO-513, 2012. *Classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined cutting edges -- Designation of the main groups and groups of application*. 4.^a ed. s.l.:International Organization for Standardization.

ISO-8688-1, 1989. *Tool life testing in milling - Parte 1: Face milling*. s.l.:International Organization for Standardization.

JSSTools, 2012. *JSS Tools Comercial de Ferramentas Ltda.* [Online] Available at: http://www.jsstools.com.br/imagens_site/ferramentas-corte.jpg [Acedido em 16 setembro 2016].

Lima, D. O. & Silveira, J. L., 2013. *Geração da trajetória no fresamento CNC utilizando diagrama de voronoi*. Penedo, Itatiaia, 7º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação.

Loureiro, J. P., 2010. *Caracterização do aço inoxidável duplex UNS S31803 pela técnica não destrutiva de correntes parasitas pulsadas*. Projeto de Graduação ed. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Machado, Á. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T. & Silva, M. B., 2009. *Teoria da Usinagem dos Materiais*. 1.^a ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda.

Metals, V., 2016. *Villares Metals*. [Online] Available at: <http://www.villaresmetals.com.br/pt/Produtos/Acos-Inoxidaveis/Endureciveis-por-Precipitacao-PH> [Acedido em 18 janeiro 2016].

Mitsubishi, 2015. *Mitsubishi materials corporation*. [Online] Available at: http://www.mitsubishicarbide.net/contents/mht/pt/html/product/technical_information/information/cutting_tool.html [Acedido em 14 outubro 2015].

Moreira, M. F. & Lebrão, S. M. G., 2015. *Dalmolim*. [Online] Available at: <http://www.dalmolim.com.br/educacao/materiais/bibliomat/inoxidaveis.pdf> [Acedido em 18 dezembro 2015].

Palbit, 2015. *General Catalogue*. MKT 12 ED04 REV_15 ed. s.l.:s.n.

Relvas, C. A. M., 2007. *Concepção e estudo de próteses de anca anatomicamente adaptadas por obtenção in situ da geometria do canal femoral*. Tese de doutoramento ed. s.l.:Universidade de Avairo.

Sandvik, 2005. *Manual Técnico de Usinagem*. Suécia: Elanders.

Sandvik, 2010. *Manual técnico*. Suécia: Elanders.

Sandvik, 2015. [Online] Available at:

http://sandvik.ecbook.se/SE/pt/Turning_Tools_2015/ [Acedido em 02 novembro 2015].

Sandvik, 2015. *Sandvik coromant*. [Online] Available at:

http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/cutting_tool_materials/introduction/pages/default.aspx [Acedido em 12 outubro 2015].

Senatore, M., Finzetto, L. & Perea, E., 2007. *Estudo comparativo entre os aços inoxidáveis dúplex e os inoxidáveis AISI 304L/316L*. Ouro Preto MG - Brasil, Rev. Esc. Minas Vol.60, n.º1.

Silva, F. C., Perrira, J. A., Ferreira, C. C. & Silva, M. B., 2007. *Análise do torneamento do aço inoxidável ABNT 304 através da temperatura do cavaco*. Uberlândia - MG, 17º Simpósio de Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica.

Smith, W. F., 1998. *Princípio de Ciência e Engenharia dos Materiais*. 3.^a ed. Alfragide: McGraw-Hill de Portugal.

Souza, A. J., 2011. *ENG 03343 - Processos de Fabricação por Usinagem, Parte 1- Fundamentos da Usinagem dos Materiais*. Rio Grande do Sul: DEM-UFRGS.

Tools, L., 2016. [Online] Available at: <http://www.lmt-tools.com/the-shortest-path-is-a-curve/> [Acedido em 11 julho 2016].

Tools, L., 2016. [Online] Available at: http://www.lmt-tools.com/fileadmin/migrated/pics/trochides_Fraesen_eng.jpg [Acedido em 11 julho 2016].

Tools, N. C., 2013-2014. *NTK Cutting Tools U.S.A.* [Online] Available at:
http://www.ntkcuttingtools.com/product/images/cera_ceramics.jpg [Acedido em 22
setembro 2016].

