Desenvolvimento de ferramenta para furação de híbridos carbono-aço

Marco António Cró Freitas

Dissertação de Mestrado

Orientador (FEUP): Prof. Dr. António Torres Marques

Coorientador (FEUP): Prof. Dr. Abílio Manuel Pinho de Jesus

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Março 2019

À minha família e aos meus amigos

Resumo

Os materiais compósitos são bons candidatos para substituir materiais convencionais em aplicações estruturais, uma vez que apresentam excelentes propriedades como a elevada rigidez, resistência e baixo peso. Hoje em dia, os componentes em compósito são fabricados na forma quase-final, no entanto requerem, por vezes, processos de maquinagem para atingir especificidades do projeto final, em termos de tolerâncias e modos de montagem. Um dos métodos mais utilizados é a furação, sendo que, em termos de componentes estruturais, as ligações são, normalmente, aparafusadas ou rebitadas. Em aplicações comuns é efetuada a furação a seco, suscitando assim elevadas temperaturas durante o corte que resultam na formação de vários defeitos como rebarbas, delaminação, arrancamento de fibras, degradação da qualidade superficial e furos de baixa qualidade. Desta forma, a eficiência e qualidade das ligações depende das características dos furos maquinados.

A investigação sobre furação de materiais híbridos compósito/metal revela ser de maior importância para as indústrias produtoras, devido à crescente procura por novas soluções e materiais para optimizar os processos e reduzir custos. Existem vários métodos de furação que são utilizados para produzir furos em compósitos. Para garantir elevada resistência nas ligações, os furos têm de ser efetuados com elevada precisão e sem danos resultantes do processo de furação. Contudo, os compósitos possuem determinadas características como a abrasividade, não homogeneidade, anisotropia e elevada dureza, dificultando o processo de furação. As diferentes propriedades da matriz e das fibras apresentam um efeito significativo no processo de maquinagem. Desta forma, a escolha correta dos parâmetros de corte e das geometrias da ferramenta representam uma tarefa difícil. Nos materiais híbridos compósito-metal a seleção das ferramentas e parâmetros de corte assume uma dificuldade excecional pois os dois tipos de materiais apresentam comportamentos muito distintos, sendo difícil obter uma ferramenta que se adapte bem aos dois materiais.

Atualmente, os requisitos exigidos pelas indústrias criaram um desafio enorme aos fabricantes, que por consequência levou a uma aposta maior no desenvolvimento de melhores técnicas de maquinagem e criação de novas ferramentas para efeito. Desta forma, a presente dissertação visa desenvolver uma ferramenta especializada e estratégia de maquinagem, para realizar a furação de híbridos fibra de carbono/aço. Esta ferramenta foi desenvolvida para implementar furação convencional e orbital, com o objetivo de mitigar os danos de delaminação, resultantes dos esforços axiais elevados. O desenvolvimento desta ferramenta recai na dificuldade de maquinar materiais compósitos, sendo que permite realizar um processo de furação em três etapas, de forma a melhorar a qualidade final do furo através da escolha adequada dos parâmetros de corte para reduzir os esforços, minimizar os danos associados, diminuir o desgaste da ferramenta e melhorar o acabamento superficial.

Nesta dissertação foi

Abstract

Composite materials are good candidates for replacing conventional materials in structural applications, since they have excellent properties such as high stiffness, strength and low weight. Nowadays, composite components are manufactured in near net-shape; however, sometimes they require machining processes to achieve specificities of the final design in terms of tolerances and assembly modes. One of the most widely used methods is drilling, since in structural components, the connections are usually bolted or riveted. In common applications dry drilling is performed, thus raising high cutting temperatures resulting in the formation of various defects such as burrs, fibers pull-out, delaminations, degradation of surface quality and low quality holes. Thus, the efficiency and quality of the connections depends on the quality of the machined holes.

Research into drilling of hybrid composite/metal materials is of major importance to manufacturing industries because of the growing demand for new solutions and materials to streamline processes and reduce costs. There are several drilling methods that are used to produce holes in composites. In order to guarantee high resistance in the connections, the holes have to be made with high precision and damage-free from the drilling process. However, the composites have certain characteristics such as abrasiveness, inhomogeneity, anisotropy and high hardness, making the drilling process demanding. The different properties of the matrix and fibers have a significant effect on the machining process. Therefore, the correct choice of cutting parameters and tool geometries represent a difficult task. In composite/metal hybrid materials, the selection of cutting tools and parameters assumes an exceptional difficulty because the two types of materials have very different behaviors, and it is challenging to obtain a tool that fits well with both materials.

Nowadays, the requirements demanded by the industries created a huge challenge to the manufacturers, which consequently led to a greater investment in the development of better machining techniques and creation of new tools for effect. Hence, the present dissertation aims to develop a specialized tool for drilling carbon fiber/steel hybrids. This tool was developed to accommodate conventional and orbital drilling, with the objective of mitigating delamination damages, resulting from high axial loads. The development of this tool relies on the difficulty of machining composite materials, and it is possible to perform a three-stage drilling process in order to improve the final quality of the hole through the appropriate choice of cutting parameters to reduce the machining forces, minimize the damages associated, decrease tool wear and improve surface finish.

Agradecimentos

Gostaria, inicialmente, de agradecer aos meus orientadores, Prof. Dr. António Torres Marques e Prof. Dr. Abílio de Jesus, pela oportunidade de realização deste projeto e pelo apoio incansável ao longo do desenvolvimento do mesmo. Ao último, expresso, os meus maiores agradecimentos pelo acompanhamento e dedicação durante a realização desta dissertação.

Expresso, os meus sinceros agradecimentos à *Palbit,* s.a. pelo apoio constante no desenvolvimento e fabrico das ferramentas de corte, como também pela boa hospitalidade que proporcionaram.

Ao Eng. Daniel Figueiredo agradeço toda a sua disponibilidade e ajuda em tornar este projeto possível, como também um especial agradecimento ao Eng. Filipe Ferreira e ao Eng. André Pereira pelo apoio incansável no desenvolvimento e produção das ferramentas de corte e a sua disponibilidade para apoiar no decurso deste projeto.

Deixo um agradecimento ao Eng. Rui Soares, pela disponibilidade e apoio no tratamento de dados, à Armanda Teixeira pela ajuda prestada na análise dos provetes e ao José Teixeira pelo apoio dado durante a execução dos ensaios de furação.

Um especial agradecimento ao Eng. Miguel Rodrigues pelo apoio e disponibilidade na fase inicial da dissertação.

Esta dissertação foi desenvolvida no âmbito da operação NORTE-01-0145-FEDER-000022 – SciTech – Science and Technology for Competitive and Sustainable Industries, cofinanciado pelo Programa Operacional Regional do Norte (NORTE2020), através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER).

Índice de Conteúdos

Resumo iii
Machining of Multilayer Materials iv
Agradecimentos v
Índice de Conteúdos vi
Siglas viii
Lista de símbolos ix
Índice de Figuras x
Índice de Tabelas xvii

1. Introdução 1
   1.1. Enquadramento do Projeto e Motivação 1
   1.2. Objetivos do Projeto 1
   1.3. Estrutura da Dissertação 1

2. Materiais Compósitos e Híbridos 1
   2.1. Materiais compósitos 1
   2.2. Matriz 3
   2.3. Matriz Termoplástica 5
   2.4. Matriz Termoendurecível 5
   2.5. Reforço 7
   2.6. Fibras de Vidro 7
   2.7. Fibras de Carbono 8
   2.8. Fibras Aramídicas 11
   2.9. Formas de Fibras 11
   2.9.3. Interface fibra/matriz 13
   2.10. Compósitos Híbridos 13
   2.11. Materiais Híbridos Compósito/Metal 14
   2.12. Materiais Híbridos com Aço 15

3. Maquinagem de Materiais Compósitos 19
   3.1. Furação 19
   3.2. Furação Orbital 22
   3.3. Cinemática da Furação Orbital 23
   3.4. Furação de Compósitos 26
   3.5. Furação de CFRPs 28
   3.5.1. Furação Direta de CFRPs 28
   3.5.2. Furação Orbital de CFRPs 31
   3.5.3. Fresagem de CFRPs 33
   3.6. Furação de Materiais Híbridos Compósito-Metal 33
   3.7. Furação de Híbridos Fibra de Carbono-Aço 38
   3.8. Análise da Delaminação 47
   3.9. Modelos de Danos 50
   3.10. Outros Estudos 52

4. Trabalho experimental 54
   4.1. Compósito Híbrido CFRP/Aço 54
   4.2. Fabrico dos Provetes 55
   4.3. Centro de Maquinagem 57
   4.4. Processo de Furação Orbital 58
   4.5. Fabrico das Ferramentas 59
   4.6. Ferramentas Finais 64
   4.7. Fixação da Célula de Carga e dos Provetes 66
   4.8. Aquisição de Dados 67
   4.9. Parâmetros de Corte 68
   4.10. Equipamento de Análise 71

5. Discussão de Resultados 72
5.1. Testes Preliminares 72
5.2. Testes Finais 79
5.2.1. Diâmetro dos furos 79
5.2.2. Qualidade dos furos 81
5.2.3. Desgaste das ferramentas 92
5.2.3. Esforços de corte 104
6. Conclusões e Trabalhos Futuros 114
6.1. Conclusões 114
6.2. Trabalhos Futuros 115
Referências 116
Anexo A – Ficha técnica do Aço SSAB Docol 600 DP 120
Anexo B – Ficha Técnica do Pré-Impregnado Utilizado 121
Anexo C – Ficha Técnica da Resina epóxido PYROFIL #360/361 122
Anexo D – Ficha Técnica da Composição da Ferramenta em Metal Duro 124
Anexo E – Ficha Técnica da Composição da Revestimento da Ferramenta 125
Anexo F – Ficha técnica das Peças de Fixação dos Provetes 126
Anexo G – Ficha técnica da célula de carga KISTLER 9272 128
Anexo H – Diâmetros dos furos 131

Siglas

Al	Alumínio
ANOVA	*Analysis of Variance*
CER	*Cutting Edge Rounding*
CFRP	*Carbon Fiber Reinforced Polymers*
CNC	Controlo Numérico Computorizado
Co	Cobalto
CRM	*Continuous Random Mat*
CSM	*Chopped Strand Mat*
DC	*Diamond Coated*
DLC	*Diamond-Like Carbon*
FML	*Fibre Metal Laminates*
FRP	*Fibre Reinforced Polymer*
GFRP	*Glass Fibre Reinforced Plastics*
HM	*High Modulus*
HRC	*Rockwell C*
HS	*High Strength*
IM	*Intermediate Modulus*
LM	*Low Modulus*
MQL	*Minimal Quantity Lubricant*
Ni	Níquel
PA	Poliamida
PAN	Poliacrilonitrilo
PCD	*Polycrystalline Diamond*
PEEK	Poli-éter-éter-acetona
PP	Polipropileno
PPS	Poli-sulfeto de Fenileno
PSUL	Polisulfone
PVD	*Physical Vapour Deposited*
TiAlN	Nitreto de Titânio e Alumínio
TiN	Nitreto de Titânio
UC	*Uncoated*
UHM	*Ultra High Modulus*

Lista de símbolos

α	Ângulo da hélice (°)
a_f	Avanço por dente (mm/dente)
a_p^*	Profundidade de corte máximo por rotação orbital (mm/rot. orbital)
A	Área nominal do furo (mm^2)
A_{Avg}	Área nominal do furo (mm^2)
A_{del}	Área periférica danificada (mm^2)
A_{max}	Área máxima (mm^2)
A_{nom}	Área nominal do furo (mm^2)
D	Diâmetro da ferramenta (mm)
D_B	Diâmetro do furo (mm)
DF	Critério de delaminação equivalente
D_h	Diâmetro da hélice (mm)
D_{ij}	Coeficientes de flexão da matriz de rigidez
D_{Mar}	Área do dano na periferia do furo (mm^2)
D_{max}	Diâmetro máximo (mm)
D_{nom}	Diâmetro nominal do furo (mm)
D_{Rat}	*Damage ratio*
D_t	Diâmetro da ferramenta (mm)
e	Excentricidade (mm)
E	Módulo de elasticidade (GPa)
f	Avanço por rotação (mm/rot)
F_a	Força axial (N)
F_a	Força crítica (N)
F_{crit}	Força crítica (N)
F_d	Factor de delaminação
F_{da}	*Adjusted Delamination Factor*
$F_{f,a}$	Forças axiais (N)
$F_{f,l}$	Forças laterais (N)
F_r	Força radial (N)
f_r	Velocidade de avanço (mm/rot)
F_v	Força tangencial (N)
G_{IC}	Tenacidade à fractura em Modo I do material (MPa.$\sqrt{\text{mm}}$)
h	Espessura não cortada (mm)
N	Velocidade de rotação (rpm)
R_a	Rugosidade aritmética
ρ	Densidade (Kg/dm^3)
ξ	Rácio elíptico
V	Volt
V_c	Velocidade de corte (m/min)
v_f	Velocidade de avanço helicoidal (mm/min)
v_{fha}	Velocidade de avanço axial da hélice (mm/min)
v_{fht}	Velocidade de avanço tangencial da hélice (mm/min)
σ_u	Resistência à tração (GPa)
υ	Coeficiente de *Poisson*
z	Número de dentes

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Representação das quotas de mercado de FRPs [2]. 1

Figura 2.2 – Estrutura de um automóvel BMW i3 fabricado com componentes em CFRP, adaptado de [5]. 2

Figura 2.3 – Representação da produção de fibras de vidro [6]. 7

Figura 2.4 – Representação da produção de fibras de carbono a partir de poliacrilonitrilo [6]. 10

Figura 2.5 – Posicionamento seletivo de fibras de carbono e aramida [12]..... 13

Figura 2.6 – Representação de um material híbrido [20]..... 14

Figura 2.7 – Classificação dos FMLs com base nas camadas metálicas [18]. 15

Figura 2.8 – Distribuição do peso dos componentes de um veículo ligeiro [23]. 16

Figura 2.9 – Distribuição dos diferentes materiais num automóvel [23]. 17

Figura 2.10 – Diferentes abordagens em relação ao peso, custo e taxa de produção [23]..... 18

Figura 2.11 – Componente híbrido de uma estrutura automóvel adaptada consoante a carga [23]. 18

Figura 3.1 – Elementos da operação de furação [24]..... 20

Figura 3.2 – Geometria de uma broca helicoidal [28]. 20

Figura 3.3 – Decomposição das forças de corte [24]. 21

Figura 3.4 – Princípio da furação orbital [30]. 22

Figura 3.5 – Ferramentas de corte diversas, adaptado de [34]. 23

Figura 3.6 – Ilustração do processo de furação orbital [33]. 24

Figura 3.7 – Cinemática da furação orbital [33]. 24

Figura 3.8 – Ilustração dos parâmetros de corte da furação orbital [33]. 25

Figura 3.9 – Ilustração do parâmetro de corte *rough pass stepover*. 26

Figura 3.10 – Esquema da furação com delaminação à saída [41]..... 27

Figura 3.11 – Diagrama causa e efeito da qualidade do furo [37]..... 28

Figura 3.12 – Características das ferramentas utilizadas na furação direta de CFRPs [43]..... 28

Figura 3.13 – Força axial versus avanço para diferentes ferramentas usadas na furação de CFRPs [43]. 29

Figura 3.14 – Variação da força axial, binário e desgaste da aresta de corte em relação ao número de furos com a furação de CFRPs [45]..... 29

Figura 3.15 – Localização dos defeitos produzidos na furação de um laminado CFRP unidirecional [50]..... 30

Figura 3.16 – Comparação da furação em CFRPs recorrendo à furação direta e orbital - visualização em microscópio da saída dos furos [53, 54]. 31

Figura 3.17 – Comparação dos esforços na furação convencional e orbital: Forças axiais (Ff, a) e binário na furação convencional ($Tool$ A); Forças axiais (Ff, a) e forças laterais (Ff, l) na furação orbital ($Tool$ B) [54]. 32

Figura 3.18 – Comparação do tempo de processamento entre a furação convencional e a orbital [54]. 32

Figura 3.19 – Força axial resultante de diferentes ferramentas, em relação ao número de furos, na furação da camada em liga de titânio [60]. 33

Figura 3.20 - Força axial resultante de diferentes ferramentas, em relação ao número de furos, na furação da camada de CFRP [60]. 34

Figura 3.21 – Variação do diâmetro em relação ao número dos furos medidos na camada de liga de titânio [60]. 34

Figura 3.22 – Variação do diâmetro em relação ao número dos furos medidos na camada de CFRP [60]. 34

Figura 3.23 – Comparação do desgaste da ferramenta em relação à velocidade de rotação (Avanço=0.175mm/dente e Profundidade de corte = 0.71mm): comparação da maquinagem a seco com o uso de ar arrefecido [62]. 35

Figura 3.24 – Comparação do desgaste da ferramenta em relação ao avanço axial (Velocidade = 179m/min e Profundidade de corte = 0.71mm): comparação da maquinagem a seco com o uso de ar arrefecido [62]. 35

Figura 3.25 – Comparação do desgaste da ferramenta em relação à profundidade de corte (Velocidade = 179m/min e avanço=0.175mm/dente): comparação da maquinagem a seco com o uso de ar arrefecido [62]. 36

Figura 3.26 – Estratégia 2 de furação orbital com a sequência de furação CFRP/Ti [33]. 36

Figura 3.27 – Forças axiais da estratégia 2 com a sequência CFRP/Ti em relação ao avanço axial [33]. 37

Figura 3.28 – Etapas de furação orbital da estratégia 3 com a sequência de furação (1) CFRP/Ti, (2) Ti/CFRP e (3) CFRP/Ti [33]. 37

Figura 3.29 – Forças máximas axiais da estratégia 3 para diferentes velocidades de rotação [33]. 38

Figura 3.30 – Fresa para maquinagem de CFRP [25]. 40

Figura 3.31 – Fresa para maquinagem de aço [25]. 40

Figura 3.32 – Aspeto da ferramenta proposta para fresagem de aço: a) Ferramenta nova; b) ferramenta após realização de dois furos [25]. 40

Figura 3.33 – Aspeto da ferramenta proposta para fresagem de CFRPs: a) Ferramenta nova e b) Ferramenta após realização de três furos [25]. 40

Figura 3.34 – Esforço axial (repetição 1; ensaio 1) [25]. 41

Figura 3.35 – Esforço axial (repetição 1; ensaio 4) [25]. 41

Figura 3.36 – Dano de sobreaquecimento mais severo na zona do aço, quando maquinada com a ferramenta para aço (repetição 2; ensaio 2) [25]. 42

Figura 3.37 – Imagem microscópio (repetição 2; ensaio 2). 42

Figura 3.38 – Entrada do furo (repetição 3, ensaio 3) com a menor qualidade (Ferramenta CFRP) [25]. 43

Figura 3.39 – Sobreaquecimento na zona de aço maquinada com a ferramenta para CFRP (repetição3, ensaio 3) [25]. 43
Figura 3.40 – Imagem microscópio (repetição 3; ensaio 3). 43
Figura 3.41 – Comparação do esforço máximo absoluto [25]. 44
Figura 3.42 – Temperaturas de corte em relação ao número de furos [66]. 44
Figura 3.43 – Forças axiais em relação ao número de furos [66]. 45
Figura 3.44 – Evolução do desgaste das ferramentas em relação ao número de furos [66]. 45
Figura 3.45 – Forças axiais e temperaturas de corte em relação à profundidade de corte durante o furo nº 17 com ferramentas de metal duro [66]. 45
Figura 3.46 – Forças axiais e temperaturas de corte em relação à profundidade de corte durante o furo nº37 com ferramentas de metal duro [66]. 46
Figura 3.47 – Força axial na furação convencional (Azul) e na furação assistida por vibrações (Verde) por tempo [67]. 46
Figura 3.48 – Desenvolvimento do desgaste da ferramenta na furação convencional (CD) e na furação assistida por vibrações (VAD) em função do número de furos [67]. 47
Figura 3.49 – Classificação da delaminação [47]. 47
Figura 3.50 – Modos de fratura na delaminação à entrada (a) e na delaminação à saída (b) [42]. 48
Figura 3.51 – Quantificação da delaminação [47]. 50
Figura 3.52 – Modelo de placa circular para análise da delaminação (broca helicoidal) [84]. 51
Figura 3.53 – Ferramenta de corte em metal duro para furação abrasiva [91]. 52
Figura 3.54 – Desgaste em furação abrasiva para vários tipos de metal duro: a dureza aumenta da esquerda para a direita [92]. 53
Figura 4.1 – Granalhadora *DE LAURENTIIS 70S GM* [25]. 55
Figura 4.2 – Prensa hidráulica de pratos quentes *INTOCO*® [25]. 56
Figura 4.3 – Provetes híbridos CFRP-Aço. 56
Figura 4.4 – DMU 60 eVo DECKEL MAHO. 57
Figura 4.5 – Pinças de fixação tipo ER. 57
Figura 4.6 – Etapas do processo de furação: 1ª Etapa – Furo de 6 mm obtido por furação direta; 2ª Etapa – Furo de 8 mm obtido por furação orbital; 3ª Etapa – Furo de 10 mm obtido por furação orbital, adaptado de [64]. 58
Figura 4.7 – STRAUSAK U-Grind series 5 axes CNC-Tool grinders [94]. 60
Figura 4.8 – Área de trabalho da máquina STRAUSAK U-Grind series 5 axes CNC-Tool grinders. 60
Figura 4.9 – Sequência do processo de fabrico da ferramenta de corte preliminar P1 (Esquerda: Fresa; Direita: Fresa com ponta de Broca). 61
Figura 4.10 – Sequência do processo de fabrico da ferramenta de corte preliminar P2 (Esquerda: Fresa; Direita: Fresa com ponta de Broca). 62
Figura 4.11 – Simulação do ângulo de hélice da ferramenta B. 62
Figura 4.12 – Simulação do ângulo de ataque da ferramenta B. 62

Figura 4.13 – Ilustração da ferramenta P1 com as dimensões nominais 63

Figura 4.14 – Ilustração da ferramenta P2 com as dimensões nominais. 64

Figura 4.15 – Sequência do processo de fabrico da ferramenta de corte A (Esquerda: fresa; Direita: fresa com ponta de broca)..... 64

Figura 4.16 – Vista de topo da ferramenta de corte A. 65

Figura 4.17 – Sequência do processo de fabrico da ferramenta de corte C (Esquerda: Fresa; Direita: fresa com ponta em de Broca). 65

Figura 4.18 – Vista de topo da ferramenta de corte C. 65

Figura 4.19 – a) Mecanismo de fixação em liga de alumínio; b) Vista explodida da montagem da célula de carga no mecanismo de fixação [25]. 67

Figura 4.20 – *Setup* do ensaio preliminar..... 67

Figura 4.21 – (a) Célula de carga KISTLER 9272; (b) Amplificador KISTLER 5070A; (c) Carta de aquisição de dados *ADVANTECH* USB-4711ª..... 68

Figura 4.22 – Microscópio ótico OLYMPUS-SZH10-2..... 71

Figura 4.23 – Micrómetro de interiores *Mitutoyo* com escala de 8 a 10 mm e resolução de 0,001 mm..... 71

Figura 5.1 – Provete utilizado nos ensaios preliminares..... 73

Figura 5.2 – Ferramenta P1 nova para o teste preliminar. 74

Figura 5.3 – Ferramenta P1 para o teste preliminar após ensaios e ampliação do desgaste excessivo sofrido, incluindo aparas de aço aderentes. 74

Figura 5.4 – Entrada e saída do furo dos testes preliminares (Ensaio 1). 75

Figura 5.5 – Entrada e saída do furo dos testes preliminares (Ensaio 2). 75

Figura 5.6 – Entrada e saída do furo dos testes preliminares (Ensaio 3). 75

Figura 5.7 – Entrada e saída do furo dos testes preliminares (Ensaio 4). 76

Figura 5.8 – Ferramenta P2 nova para o teste preliminar. 76

Figura 5.9 – Ferramenta P2 para o teste preliminar após ensaios. 76

Figura 5.10 – Ferramenta P2 para o teste preliminar após ensaios com adesão das fibras de carbono. 77

Figura 5.11 – Entrada e saída do furo dos testes preliminares (Ensaios 5)..... 77

Figura 5.12 – Entrada e saída do furo dos testes preliminares (Ensaios 6)..... 77

Figura 5.13 – Entrada e saída do furo dos testes preliminares (Ensaios 7)..... 78

Figura 5.14 – Entrado do furo dos testes preliminares (Ensaios 8). 78

Figura 5.15 – Diâmetro médio dos furos obtidos em cada ensaio..... 80

Figura 5.16 – Entrada (Esquerda) e saída (direita) do furo realizado (Ferramenta A1; Ensaio 1). 81

Figura 5.17 – Visualização ao microscópio do furo realizado (Ferramenta A1; Ensaio 1). 82

Figura 5.18 – Entrada (Esquerda) e saída (direita) do furo realizado (Ferramenta A1; Ensaio 10). 82

Figura 5.19 – Visualização ao microscópio do furo realizado (Ferramenta A1; Ensaio 10). .. 82

Figura 5.20 – Entrada (Esquerda) e saída (direita) do furo realizado (Ferramenta B1; Ensaio 1). 83

Figura 5.21 – Entrada (Esquerda) e saída (direita) do furo realizado (Ferramenta B1; Ensaio 5). 83

Figura 5.22 – Visualização ao microscópio do furo realizado (Ferramenta B1; Ensaio 1). 84

Figura 5.23 – Entrada (Esquerda) e saída (direita) do furo realizado (Ferramenta B1; Ensaio 10). 84

Figura 5.24 – Visualização ao microscópio do furo realizado (Ferramenta B1; Ensaio 10). .. 84

Figura 5.25 – Entrada (Esquerda) e saída (direita) do furo realizado (Ferramenta C1; Ensaio 1). 85

Figura 5.26 – Visualização ao microscópio do furo realizado (Ferramenta C1; Ensaio 1). 85

Figura 5.27 – Entrada (Esquerda) e saída (direita) do furo realizado (Ferramenta C1; Ensaio 10). 86

Figura 5.28 – Visualização ao microscópio do furo realizado (Ferramenta C1; Ensaio 10). .. 86

Figura 5.29 – Entrada (Esquerda) e saída (direita) do furo realizado (Ferramenta D1; Ensaio 1). 87

Figura 5.30 – Visualização ao microscópio do furo realizado (Ferramenta D1; Ensaio 1). 87

Figura 5.31 – Entrada (Esquerda) e saída (direita) do furo realizado (Ferramenta D1; Ensaio 10). 87

Figura 5.32 – Visualização ao microscópio do furo realizado (Ferramenta D1; Ensaio 10). .. 88

Figura 5.33 – Entrada (Esquerda) e saída (direita) do furo realizado (Ferramenta A2; Ensaio 1). 88

Figura 5.34 – Visualização ao microscópio do furo realizado (Ferramenta A2; Ensaio 1). 89

Figura 5.35 – Entrada (Esquerda) e saída (direita) do furo realizado (Ferramenta A2; Ensaio 10). 89

Figura 5.36 – Visualização ao microscópio do furo realizado (Ferramenta A2; Ensaio 10). .. 90

Figura 5.37 – Entrada (Esquerda) e saída (direita) do furo realizado (Ferramenta A3; Ensaio 1). 90

Figura 5.38 – Visualização ao microscópio do furo realizado (Ferramenta A3; Ensaio 1). 91

Figura 5.39 – Entrada (Esquerda) e saída (direita) do furo realizado (Ferramenta A3; Ensaio 10). 91

Figura 5.40 – Visualização ao microscópio do furo realizado (Ferramenta A3; Ensaio 10). .. 91

Figura 5.41 – Ferramenta A1 nova: vista de topo (Esquerda); vista lateral (Direita)..... 92

Figura 5.42 – Ferramenta A1 após 5 furos. 93

Figura 5.43 – Ferramenta A1 após 5 furos: Vista lateral (esquerda); Vista da zona de transição (direita). 93

Figura 5.44 – Ferramenta A1 após 10 furos: Vista de topo (cima); Arestas de corte (baixo). 94

Figura 5.45 – Ferramenta B1 nova: vista de topo (Esquerda); vista lateral (Direita). 94

Figura 5.46 – Ferramenta B1 após 5 furos: Vista de topo (cima); Arestas de corte (baixo).... 95

Figura 5.47 – Ferramenta B1 após 5 furos: Vista lateral (cima); Vista da zona de transição (baixo). 95

Figura 5.48 – Esforços segundo os eixos x e y, do ensaio 5 com a ferramenta B1 (visível pico de carga correspondente ao momento do *chipping*). 96

Figura 5.49 – Ferramenta B1 após 10 furos: Vista de topo (cima); Arestas de corte (baixo).. 96

Figura 5.50 – Ferramenta B1 após 10 furos: Vista lateral (cima); Vista da zona de transição (baixo). 97

Figura 5.51 – Ferramenta C1 nova: Vista de topo (Esquerda); Vista lateral (Direita). 97

Figura 5.52 – Ferramenta C1 após 5 furos: Vista de topo (cima); Arestas de corte (baixo).... 98

Figura 5.53 – Ferramenta C1 após 5 furos: Vista lateral (cima); Vista da zona de transição (baixo). 98

Figura 5.54 – Ferramenta C1 após 10 furos: Vista de topo (cima); Arestas de corte (baixo).. 99

Figura 5.55 – Ferramenta C1 após 10 furos: Vista da zona de transição..... 99

Figura 5.56 – Ferramenta D1 nova: Vista de topo (Esquerda); Vista lateral (Direita)..... 100

Figura 5.57 – Ferramenta D1 após 5 furos: Vista de topo (cima); Arestas de corte (baixo). 100

Figura 5.58 – Ferramenta D1 após 5 furos: Vista lateral (cima); Vista do chanfro (baixo). . 101

Figura 5.59 – Ferramenta D1 após 10 furos: Vista de topo (cima); Arestas de corte (baixo). 101

Figura 5.60 – Ferramenta A2 após 10 furos: Vista de topo (cima); Arestas de corte (baixo). 102

Figura 5.61 – Ferramenta A2 após 10 furos: Vista lateral (cima); Vista do chanfro (baixo). 102

Figura 5.62 – Ferramenta A3 após 10 furos: Vista de topo (cima); Arestas de corte (baixo). 103

Figura 5.63 – Ferramenta A3 após 10 furos: Vista lateral (cima); Vista do chanfro (baixo). 103

Figura 5.64 – Gráfico dos esforços axiais em função do tempo no ensaio 2 realizado com a ferramenta A1. 105

Figura 5.65 – Gráfico dos esforços axiais em função do tempo, da primeira etapa, no ensaio 2 realizado com a ferramenta A1. 105

Figura 5.66 – Gráfico dos esforços tangenciais em função do tempo no ensaio 2 realizado com a ferramenta A1. 106

Figura 5.67 – Gráfico dos esforços tangenciais em função do tempo, da primeira etapa, no ensaio 2 realizado com a ferramenta A1. 106

Figura 5.68 – Gráfico dos esforços tangenciais em função do tempo, da segunda etapa, no ensaio 2 realizado com a ferramenta A1. 107

Figura 5.69 – Gráfico dos esforços tangenciais em função do tempo, da terceira etapa, no ensaio 2 realizado com a ferramenta A1. 107

Figura 5.70 – Esforços máximos registados em cada etapa e furo realizado com a ferramenta A1. 108

Figura 5.71 – Esforços máximos registados em cada etapa e furo realizado com a ferramenta B1. 109

Figura 5.72 – Esforços máximos registados em cada etapa e furo realizado com a ferramenta C1. 110
Figura 5.73 – Esforços máximos registados em cada etapa e furo realizado com a ferramenta D1. 111
Figura 5.74 – Esforços máximos registados em cada etapa e furo realizado com a ferramenta A2. 112
Figura 5.75 – Esforços máximos registados em cada etapa e furo realizado com a ferramenta A3. 113

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Tipos de matriz, adaptado de [10] 4

Tabela 2.2 – Vantagens e desvantagens das matrizes termoplásticas e termoendurecíveis, adaptado de [8]. 4

Tabela 2.3 – Propriedades de algumas resinas termoendurecíveis, adaptado de [10] 6

Tabela 2.4 – Designação de alguns tipos de fibras de vidro [12]. 8

Tabela 2.5 – Valores típicos das propriedades de diferentes fibras de vidro, adaptado de [8]. . 8

Tabela 2.6 – Propriedades de alguns tipos de fibras de carbono, adaptado de [6]. 10

Tabela 2.7 – Propriedades de alguns tipos de fibras aramídicas [6]. 11

Tabela 2.8 – Propriedades de fibras e de materiais na sua forma maciça, adaptado de [6]. 12

Tabela 3.1 – Processos de maquinagem [25]. 19

Tabela 3.2 – Parâmetros de corte selecionados, adaptado de [25]. 39

Tabela 3.3 – Matriz de ensaios, adaptado de [25]. 39

Tabela 3.4 – Ordem de execução dos ensaios, adaptado de [25]. 39

Tabela 3.5 – Dimensões das fresas utilizadas, adaptado de [25]. 41

Tabela 3.6 – Propriedades das ferramentas em metal duro do estudo, adaptado de [92]. 53

Tabela 4.1 – Propriedades mecânicas e composição química (mássica) do aço SSAB Docol 600DP [25]. 55

Tabela 4.2 – Características da máquina CNC DMU 60 eVo DECKEL MAHO, adaptado de [25]. 57

Tabela 4.3 – Etapas do processo de furação. 59

Tabela 4.4 – Características da máquina STRAUSAK U-Grind seriem 5 axes CNC-Tool grinders 61

Tabela 4.5 – Características das ferramentas preliminares. 63

Tabela 4.6 – Características das ferramentas finais. 66

Tabela 4.7 – Dados utilizados nos dispositivos de medição das cargas. 68

Tabela 4.8 – Parâmetros de corte usados na furação convencional, segundo vários estudos. . 69

Tabela 4.9 – Parâmetros de corte usados em furação orbital segundo vários estudos. 69

Tabela 4.10 – Parâmetros de corte usados em fresagem, segundo vários estudos. 69

Tabela 4.11 – Parâmetros de corte selecionados para as ferramentas A1, B1, C1 e D1. 70

Tabela 4.12 – Parâmetros de corte selecionados para ferramenta A2. 70

Tabela 4.13 – Parâmetros de corte selecionados para ferramenta A3. 70

Tabela 5.1 – Diâmetros na zona da fresa das ferramentas preliminares. 72

Tabela 5.2 – Parâmetros de ensaio preliminar para a primeira etapa (furação convencional). 73

Tabela 5.3 – Parâmetros de ensaio preliminar para a segunda e terceira etapa (furação orbital). 73

Tabela 5.4 – Diâmetros medidos das ferramentas finais. 80

1. Introdução

1.1. Enquadramento do Projeto e Motivação

A presente dissertação foi realizada para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Mecânica pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), na especialização de Projeto e Construção Mecânica.

O presente trabalho incidiu no estudo da furação orbital, uma técnica de maquinagem alternativa à furação convencional, mas com uma crescente utilização no que toca à furação de materiais compósitos e híbridos compósito/metal. A sua trajetória helicoidal permite uma redução das forças axiais, associadas a danos por delaminação. O híbrido em questão é de especial interesse para a indústria automóvel, uma vez que a redução de peso e a elevada resistência mecânica representam pontos muito importantes nesta indústria. É de referir, que, frequentemente, as ligações entre componentes são efetuadas através de parafusos, cavilhas ou rebites, sendo necessário garantir furos de elevada qualidade, com tolerâncias muito apertadas. A maquinagem de materiais híbridos de fibra de carbono/aço têm sido objeto de pouco estudo. Deste modo, foi procurado analisar a furação orbital por etapas deste tipo de híbrido, sendo que esta estratégia de furação, desenvolvida recentemente, tem sido utilizada em híbridos de fibras de carbono com ligas de titânio ou ligas de alumínio.

Este trabalho de investigação foi realizado no INEGI (preparação do material, ensaios de maquinagem, entre outras atividades) com o apoio da Palbit S.A. que produziu as ferramentas em metal duro usadas nos testes.

1.2. Objetivos do Projeto

O objetivo da presente dissertação consiste no desenvolvimento de uma técnica de furação para materiais híbridos de fibra de carbono e aço, utilizando quer ferramentas desenvolvidas especificamente para a operação quer estratégias de furação adequadas. Desta forma, procura-se diminuir os esforços de corte, danos associados, melhorar a qualidade final do furo e diminuir o desgaste das ferramentas.

1.3. Estrutura da Dissertação

A dissertação está organizada de acordo com a evolução lógica do projeto, enquadrando o leitor, numa primeira fase, através de uma revisão bibliográfica sobre o tema em específico. Desta forma, no primeiro capítulo é feita a descrição do projeto realizado, o seu enquadramento, motivação e o seu objetivo.

O segundo capítulo apresenta o estado da arte do tema em questão, onde é apresentada uma revisão sobre materiais compósitos e híbridos.

O terceiro capítulo ainda sobre o estado da arte, introduz os diferentes processos de furação utilizados neste projeto, como também a tecnologia associada a estes. Neste capítulo, são abordados estudos de furação de compósitos e materiais híbridos com diferentes métodos de maquinagem. Adicionalmente é apresentada uma análise da delaminação e os modelos de

dano associados, comuns na furação de compósitos e materiais híbridos, como também são mencionados vários estudos sobre a quantificação e qualificação dos danos inerentes à furação destes.

O quarto capítulo aborda o trabalho experimental realizado, onde são descritos os métodos de furação, os ensaios realizados, equipamentos utilizados, a escolha dos parâmetros de corte para as diferentes etapas, o fabrico dos provetes e das ferramentas de corte.

No quinto capítulo são apresentados, analisados e discutidos os resultados do estudo.

Por fim, o sexto capítulo apresenta as conclusões finais do estudo e são sugeridas algumas propostas de modificações das ferramentas que possam ser futuramente introduzidas a fim de melhorar os processos e ferramentas utilizadas.

2. Materiais Compósitos e Híbridos

2.1. Materiais compósitos

Os materiais compósitos são definidos como a combinação de dois ou mais materiais distintos, para criar um novo material com melhores propriedades. Os constituintes mantêm a sua forma física e propriedades químicas, que não conseguem ser recriadas separadamente. Tendo em conta que os compósitos aparentam ser materiais da atualidade, estes são evidenciados no início das culturas civilizadas. A título de exemplo, durante os tempos antigos no Egito era utilizado uma mistura de lama com palha no fabrico de tijolos para construção.

Nos dias de hoje, este tipo de material é utilizado numa vasta gama de aplicações, particularmente na indústria aeronáutica, automóvel, espacial, entre outras, ver Figura 2.1 [1].

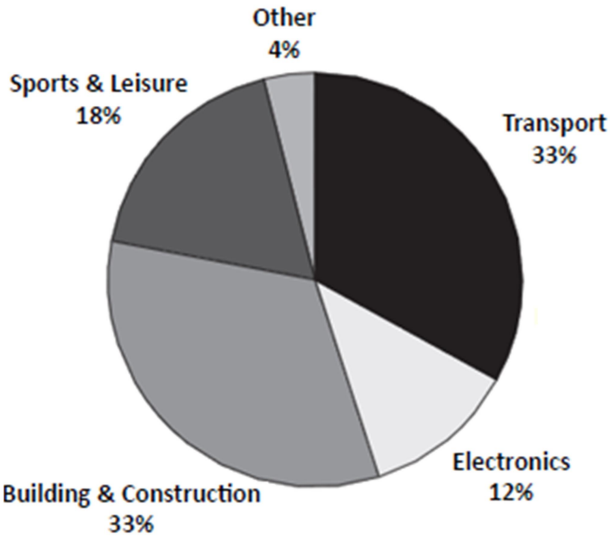


Figura 2.1 – Representação das quotas de mercado de FRPs [2].

Estes compósitos apresentam relações de propriedades muito interessantes, como sejam a rigidez/peso e resistência/peso superiores a qualquer polímero ou metal. É de referir, também, que exibem um excelente comportamento à fadiga e boa resistência à corrosão.

A procura por energia sustentável e a proteção do ambiente são dois temas críticos da atualidade. À medida que novos processos são desenvolvidos na produção destes compósitos, em conjunto com a crescente fiabilidade nas propriedades mecânicas desenvolvidas, estes têm um papel preponderante na indústria dos transportes, visto que a redução de peso implica menor consumo de energia e por consequência menores custos associados, como também menores emissões de gases, que são consideradas uma das principais razões das alterações climáticas. É estimado que 75% do consumo de energia de um veículo é devido ao seu peso, e que uma redução de 10% do peso resulta numa melhoria da eficiência do consumo de 6 a 8%.

Com estas vantagens, as aplicações destes compósitos, mais precisamente compósitos de fibras de carbono (CFRP), passaram de soluções simples para utilizações massivas, como é caso da sua utilização nas estruturas dos aviões comerciais, nomeadamente o *Airbus 380* e o *Boeing 787* [3, 4].

É de notar que na indústria automóvel as utilizações destes compósitos evoluíram de peças estéticas para componentes estruturais. Tal situação já é possível observar em modelos de edições especiais e automóveis desportivos assim como alguns modelos de produção em série como é o caso do fabricante BMW, ilustrado na Figura 2.2 [4]. Nesta indústria é dada maior importância a produções com elevada cadência e baixos custos, critérios que são comportados, atualmente, com compósitos de fibra de vidro e de matriz poliéster.

Figura 2.2 – Estrutura de um automóvel BMW i3 fabricado com componentes em CFRP, adaptado de [5].

Na indústria aeronáutica são procurados processos inovadores de forma a minimizar os custos operacionais, mesmo sendo necessário o recurso a processos de fabrico com custos elevados. Está geralmente associada a esta indústria a utilização de compósitos de fibras de carbono, aramida e híbridos de carbono-aramida com elevadas propriedades mecânicas, com vista a obter estruturas com elevada resistência aliadas a um peso reduzido.

Na indústria aeroespacial, os compósitos revelam ser de maior importância, pois os gastos em combustíveis para colocar em orbita qualquer estrutura são extremamente elevados, mas podem ser diminuídos com a redução do peso. Uma aplicação nesta indústria passa por utilizar compósitos de fibra de carbono, que conseguem apresentar um coeficiente de expansão térmica nulo, que garante uma boa estabilidade dimensional necessária para um bom desempenho no envio do sinal em antenas incorporadas em veículos espaciais quando expostas à radiação solar.

A utilização de compósitos continua a crescer num ritmo impressionante dentro das indústrias mencionadas, como também são empregues em novas áreas, nomeadamente em aplicações biomédicas e no desporto. O facto de estes serem utilizados em diversas áreas, faz com que os custos dos materiais compósitos sejam reduzidos. Noutros sectores como seja a construção, os compósitos são usados como reforço de estruturas. Por exemplo, compósitos de carbono/epóxido são usados no reforço de pilares de pontes localizadas em sítios sismicamente ativos, como no Japão [6].

Em termos de implicações ambientais, os compósitos aparentam ser uma preocupação, visto que a reciclagem destes é limitada e, comparado com outros materiais convencionais como o aço, os componentes em compósito não podem ser reutilizados para a mesma função noutra aplicação. No entanto, segundo *Chandramohan et al.* [7], a utilização de fibras de produtos naturais como reforço, com uma matriz de resina de epóxido biodegradável, pode ser uma solução com um menor impacto ambiental. Também a tendência recente de utilização de compósitos de matriz termoplástico aumenta a possibilidade de reciclagem destes materiais.

Tipicamente, os materiais compósitos possuem duas fases, nomeadamente um reforço embebido numa matriz [4].

2.2. Matriz

A matriz de um compósito representa a fase contínua, que permite a transferência uniforme dos esforços para o reforço, fase descontínua. Além disso, cria uma barreira contra os ambientes adversos, protege a superfície do compósito contra danos mecânicos, abrasão e corrosão, como também promove o correto alinhamento das fibras.

A distribuição dos esforços resulta da adesão entre constituintes dissimilares. No compósito, as características térmicas e mecânicas são influenciadas pela matriz, como a rigidez e a resistência mecânica e pelo desempenho a diferentes temperaturas, principalmente na direção transversal das fibras onde são menos eficazes.

É de notar que a condutividade térmica e a resistência a temperaturas extremas são propriedades muito importantes da matriz. É esperado que a matriz apresente um módulo de corte elevado para prevenir a encurvadura (*buckling)* dos constituintes, principalmente em solicitações à compressão [8].

Uma matriz deve possuir várias propriedades, de acordo com a sua função, sendo algumas enumeradas abaixo:

- Boa adesão às fibras;
- Boa fluidez para penetração completa e preencher vazios;
- Resistência à degradação química;
- Fácil processamento;
- Resistência a extremas temperaturas;
- Baixa absorção da humidade.

Uma matriz pode ser termoplástica, termoendurecível, metálica e cerâmica. A seleção da matriz, com base nas suas características, desempenha um papel importante na aplicação desta. Na Tabela 2.1, são apresentados vários tipos de matrizes utilizadas a nível comercial ou em investigação.

Para este trabalho é de maior relevância abordar os compósitos de matriz polimérica, pois estes serão utilizados na parte experimental da dissertação. Os compósitos com matriz polimérica são os mais utilizados, pois são mais fáceis de moldar e apresentam um peso reduzido. A matéria-prima utilizada na matriz representa cerca de 40% do custo total do compósito, enquanto o fabrico deste representa 30% [9].

Tabela 2.1 – Tipos de matriz, adaptado de [10]

Matriz Polimérica	*Matriz Metálica*	*Matriz Cerâmica*
Termoendurecível		
Epoxy		
Poliéster insaturado	**Ligas de alumínio**	**Óxido de alumínio**
Viniléster	**Ligas de titânio**	**Carboneto de silício**
Termoplástica	**Ligas de magnésio**	**Carbono**
PPS (Poli-sulfeto de Fenileno)	**Aço inoxidável**	
PEEK (Poli-éter-éter-acetona)		
PSUL (Polisulfone)		

As matrizes poliméricas estão divididas em dois grupos: termoplásticos e termoendurecíveis. Na Tabela 2.2 são apresentadas as vantagens e desvantagens das matrizes mencionadas na forma comparativa.

Tabela 2.2 – Vantagens e desvantagens das matrizes termoplásticas e termoendurecíveis, adaptado de [8].

Aplicações	*Propriedades*	*Termoendurecível*	*Termoplástica*
Matriz	***Formulação***	Complexa	Simples
	Viscosidade	Baixa (no início)	Bastante elevada
	Impregnação	Fácil comparativamente	Muito difícil
	Custo	Baixo a médio	Baixo a elevado
Pré-impregnado	***Aderência***	Boa	Baixo comparativamente
	Tempo de armazenamento	Muito curto	Médio
Compósito	***Ciclo do processo***	Muito longo	Curto a longo
	Temperatura e pressão de processamento	Moderado	Elevado
	Tamanho	Pequeno a muito grande	Pequeno a médio
	Resistência solvente	Boa	Baixa a boa
	Resistência ao dano	Baixa a excelente	Média a boa
	Resistência à fluência	Boa	Não conhecido
	Dureza	Baixa	Elevada
	Fabricação	Trabalho intensivo	Menor trabalho

2.3. Matriz Termoplástica

Numa matriz termoplástica as ligações das moléculas são estabelecidas por forças intermoleculares. Com a aplicação de calor e pressão estas ligações são quebradas temporariamente, que resulta na movimentação das moléculas, umas em relação as outras, para uma nova configuração. Durante o arrefecimento, estas ligações são restabelecidas, sendo obtida uma nova forma sólida. No entanto, a matriz resultante pode desenvolver mudanças a nível cristalino durante a produção e processamento do compósito, provenientes das variações da temperatura. Estes factores podem afectar as propriedades térmicas e mecânicas. Posto isto, os termoplásticos podem ser maleáveis e moldáveis durante vários ciclos sem perdas significativas das propriedades [10].

Geralmente, a utilização deste tipo de matriz nos compósitos resulta na diminuição dos custos de fabrico e possibilitam um ciclo de produção rápido e um fácil controlo de qualidade. Quando comparadas com os termoendurecíveis, estas apresentam uma boa resistência ao impacto, possuem uma maior extensão após rotura e mostram um período de vida de armazenamento ilimitado. Estes materiais são quimicamente inertes, logo não libertam gases prejudiciais à saúde, ao contrário dos termoendurecíveis. Contudo, as propriedades mecânicas são inferiores.

Desta forma, os termoplásticos mostram ser uma solução viável na recente procura por materiais compósitos com boas propriedades mecânicas, aliados de um peso reduzido, para aplicações de baixo custo.

Existem vários tipos de termoplásticos, como PPS (Poli-sulfeto de Fenileno), PEEK (Poli-éter-éter-acetona), PSUL (Polisulfone), PP (Polipropileno) e PA (Poliamida) [8].

2.4. Matriz Termoendurecível

As resinas termoendurecíveis são as mais utilizadas no fabrico de compósitos reforçados por fibras (FRP) devido à facilidade de processamento. Tipicamente são constituídos por três componentes: o acelerador, a resina e o endurecedor. A polimerização, geralmente designada por cura, é feita através da mistura dos constituintes a uma temperatura ambiente ou temperatura de cura. A reação desenvolvida resulta numa estrutura tridimensional rígida com ligações moleculares asseguradas por forças macromoleculares e ligações químicas "*crosslink*". Depois da cura, os termoendurecíveis não podem ser reaproveitados e, por norma não são recicláveis [8].

Estas resinas apresentam uma viscosidade inicial baixa, que possibilita elevadas fracções de volume de fibras ao nível do compósito, sem o auxílio de elevadas temperaturas ou pressões. Também possuem uma boa estabilidade dimensional, um baixo coeficiente de dilatação térmica e boa adaptabilidade a construções simples. Contudo, possuem um período de vida de armazenamento limitado, um custo superior, quando comparadas com as resinas termoplásticas, uma baixa extensão após rotura, que contribui para uma baixa resistência ao impacto, e um tempo de processamento de fabrico lento [10, 11]. É de salientar que alguns tipos de termoendurecíveis libertam gases prejudiciais à saúde durante o seu processamento [8].

Existem vários tipos de termoendurecíveis, sendo os mais utilizados o epóxido, o poliéster insaturado e o viniléster [10].

Resina de epóxido

Uma resina de epóxido para qualquer compósito é usualmente escolhida com base na aplicação final desta, visto que existem inúmeros tipos de resinas com propriedades térmicas e mecânicas muito distintas. No processo de cura, são utilizados agentes e/ou catalisadores que desenvolvem ligações cruzadas. Este processo depende fortemente dos agentes utilizados, como também do programa e temperatura de cura. Geralmente, estas apresentam excelentes propriedades mecânicas e um bom isolamento eléctrico. Estas resinas ganham vantagem sobre outras termoendurecíveis, pois durante a cura não há a libertação de agentes voláteis ou de condensação. Adicionalmente, estas apresentam excelente resistência química e a solventes, boa adesão a uma vasta gama de fibras e substratos e baixa contração durante a cura. Como desvantagens, possuem um longo período de cura e um custo elevado [8].

Resina de poliéster insaturado

No conjunto dos termoendurecíveis, as resinas de poliéster insaturado são as mais utilizadas, pois possuem boas propriedades mecânicas e químicas, aliadas a um custo reduzido e facilidade de processamento. Adicionalmente, exibem uma baixa viscosidade, baixa absorção de água e um curto período de cura. Quando comparadas diretamente com as resinas de epóxido, estas apresentam propriedades mecânicas e térmicas inferiores. A principal desvantagem dos poliésteres insaturados é a elevada contração volumétrica; mesmo que permitam uma fácil remoção das peças dos moldes, a diferença entre as características de contração da matriz com as fibras resultam em depressões na superfície da peça. Estas apresentam uma boa resistência química e podem ser reticuladas sem aplicação de calor e pressão [10].

Resina de viniléster

A resina de viniléster é enquadrada entre as resinas de epóxido e de poliéster insaturado no que diz respeito às propriedades. Esta, como a resina de epóxido, apresenta uma excelente resistência química e boa resistência à tração, da mesma ordem de grandeza. Inversamente, estas auferem um curto período de cura. Contudo, são caracterizadas por terem uma elevada contração volumétrica e uma moderada adesão entre as fibras e substrato [10].

A Tabela 2.3, apresentada abaixo, compara as propriedades dos três termoendurecíveis abordados.

Tabela 2.3 – Propriedades de algumas resinas termoendurecíveis, adaptado de [10]

Propriedades	***Resina***		
	Resina de epóxido	*Poliéster insaturado*	*Viniléster*
Massa Volúmica [Kg/m^3]	1200 – 1400	1200 – 1400	1150 – 1350
Resistência à Tração [MPa]	55 – 130	34,5 – 104	73 – 81
Módulo de Elasticidade [GPa]	2,8 – 4,1	2,1 – 3,5	3,0 – 3,5
Coeficiente de Poisson	0,2 – 0,33	0,35 – 0,39	0,36 – 0,39
Coeficiente de Expansão Térmica [10^{-6}/ ºC]	45 – 65	55 – 100	50 – 75

2.5. Reforço

O reforço é considerado o principal constituinte de um material compósito. Este ocupa a maior fracção volumétrica no compósito e é responsável por suportar a maior parte das solicitações aplicadas ao componente. Os tipos de reforços são em forma de partículas ou fibras, sendo este último o mais comum, pelo que será mais abordado nesta dissertação. As fibras de vidro são as mais utilizadas em compósitos reforçados com fibras, sendo que as fibras de carbono e aramida são utilizadas em aplicações com elevada exigência estrutural.

Nos dias de hoje é possível obter materiais compósitos com propriedades mecânicas muito elevadas, por vezes superiores às dos metais de uso geral em engenharia. Em termos de compósitos reforçados com fibras (FRP), a seleção das características das fibras como o comprimento, fracção volumétrica, orientação na matriz, diâmetro e dimensão revelam ser de maior importância, pois influenciam as propriedades finais dos compósitos, enumeradas abaixo:

- Massa volúmica;
- Resistência à tração e compressão;
- Resistência à fadiga;
- Condutividade térmica e eléctrica;
- Custo.

2.6. Fibras de Vidro

Nos materiais compósitos, os reforços mais utilizados são as fibras de vidro. O processo mais comum de produzir fibras de vidro é ilustrado na Figura 2.3. Este consiste no estiramento de vidro fundido através de uma fieira com orifícios de dimensões precisas, a uma temperatura a rondar os 1260 ºC, que depende da temperatura de fusão do vidro. À saída da fieira, são realizados tratamentos superficiais às fibras de vidro, consoante a finalidade destas. Um revestimento protetor é aplicado para que as fibras passem com maior facilidade no equipamento de produção sem risco de danificação da fibra [6, 12].

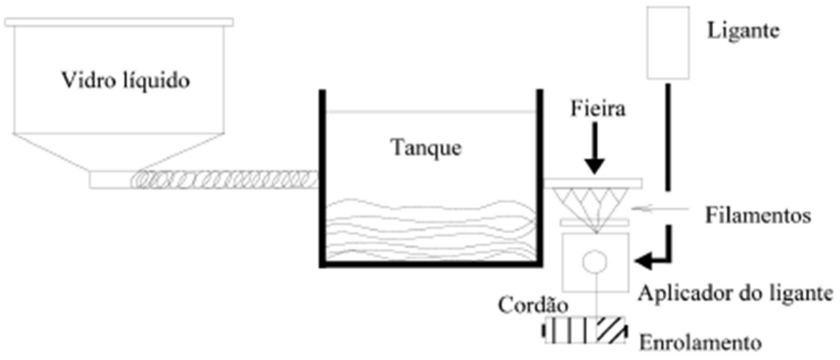


Figura 2.3 – Representação da produção de fibras de vidro [6].

As fibras de vidro são empregues em aplicações de baixa a média *performance*, pois apresentam elevada resistência à tração com um custo reduzido. Em aplicações de elevada "*performance"* mostram ser limitadas, pois exibem baixa resistência à fadiga e degradação das propriedades a elevadas temperaturas [13]. As fibras de vidro possuem boa resistência química e boas qualidades de isolamento térmico, contudo são difíceis de maquinar visto que têm uma elevada dureza, que resulta num elevado desgaste das ferramentas de corte. A Tabela 2.4 realça as propriedades dos diferentes tipos de fibra de vidro.

Tabela 2.4 – Designação de alguns tipos de fibras de vidro [12].

Tipo de fibra	***Propriedades***
Vidro E	Bom isolante elétrico e boa resistência mecânica
Vidro S	Elevada resistência mecânica a elevadas temperaturas
Vidro R	Elevadas resistência mecânica e rigidez

As fibras utilizadas na indústria dos compósitos reforçados são do tipo E e tipo S. Destas, o tipo E apresenta o custo mais baixo, sendo as mais utilizadas. Originalmente, o tipo S foi desenvolvido para a indústria aeroespacial, sendo que mostra uma elevada resistência à tração e elasticidade, no entanto apresenta um custo superior ao tipo E. Outro tipo de fibra de vidro é a do tipo C, que é muito utilizada em aplicações que requerem uma boa resistência à corrosão [10]. A Tabela 2.5 apresenta algumas propriedades dos diferentes tipos de fibra de vidro.

Tabela 2.5 – Valores típicos das propriedades de diferentes fibras de vidro, adaptado de [8].

Propriedades	***Vidro E***	***Vidro S***	***Vidro R***
Massa Volúmica [Kg/m^3]	2600	2490	2550
Módulo de Elasticidade[GPa]	73,0	85,5	86,0
Tensão de Rotura [MPa]	3400	4580	4400
Deformação na Rotura	4,4	5,3	5,2
Coeficiente de Expansão Térmica Axial [10^{-6}/$^{\circ}$C]	5,0	2,9	4,0

2.7. Fibras de Carbono

A procura de reforços para compósitos com propriedades mecânicas superiores às fibras de vidro resultou no desenvolvimento das fibras de carbono. Os polímeros reforçados com fibras de carbono são intitulados de CFRP "*Carbon Fibre Reinforced Plastics"* [10, 12]. É possível dividir em dois tipos de fibras: as fibras de carbono, que contêm um teor de carbono entre 80 e 95%, e as fibras de grafite com um teor de carbono a rondar os 99%.

Estas fibras são produzidas através a decomposição térmica de precursores orgânicos como o alcatrão "*pitch*", a celulose "*rayon fibers*" e o poliacrilonitrilo "*PAN*". Este último

apresenta boas propriedades com custos relativamente baixos, sendo o percursor mais utilizado. Estes processos de produção das fibras têm de garantir certas propriedades tais como:

- Resistência e manuseamento apropriado de forma a manter as fibras ligadas durante o processo de conversão em carbono;
- Não fusão em qualquer etapa do processo;
- Não volatilização durante o processo de pirólise.

Os diferentes precursores possibilitam diferentes propriedades mecânicas. O primeiro processo a ser desenvolvido foi o da celulose, no entanto produzia fibras com baixas propriedades mecânicas. Com os avanços neste método, tornou-se possível produzir fibras com propriedades semelhantes aos restantes métodos, mas devido às elevadas temperaturas no processo de grafitização, que acarreta elevados custos, este é pouco utilizado. As fibras desenvolvidas com um precursor de alcatrão mostram um elevado módulo de elasticidade e boa condutividade térmica e são utilizados em várias indústrias, nomeadamente na automóvel. É de referir, também, que estas possuem propriedades ligeiramente inferiores às produzidas com celulose, embora sejam menos dispendiosas. O precursor mais utilizado é o poliacrilonitrilo (PAN) e a sua produção, ilustrada na Figura 2.4, envolve as seguintes etapas [6, 12, 14]:

Oxidação – Aquecimento das fibras até 300 ºC em ambiente rico em oxigénio, promovendo a formação de uma estrutura reticular da cadeia molecular para que o ponto de fusão das fibras seja suprimido artificialmente;

Carbonização – Aquecimento gradual da cadeia molecular até cerca de 1100ºC num forno de atmosfera neutra, que permite obter apenas átomos de carbono no final. As fibras resultantes apresentam boas propriedades mecânicas e podem ser utilizadas sem tratamentos superficiais subsequentes;

Grafitização – Aquecimento em atmosfera neutra para efetuar a pirólise, que permite a obtenção de fibras de carbono com elevado módulo de elasticidade, o qual depende da temperatura do processo que ronda entre os 2000 ºC e os 3300 ºC;

Tratamento superficial – As superfícies são alterados numa atmosfera de ácido nítrico ou sulfúrico para atingir elevados níveis de adesão entre as fibras e as matrizes utilizadas.

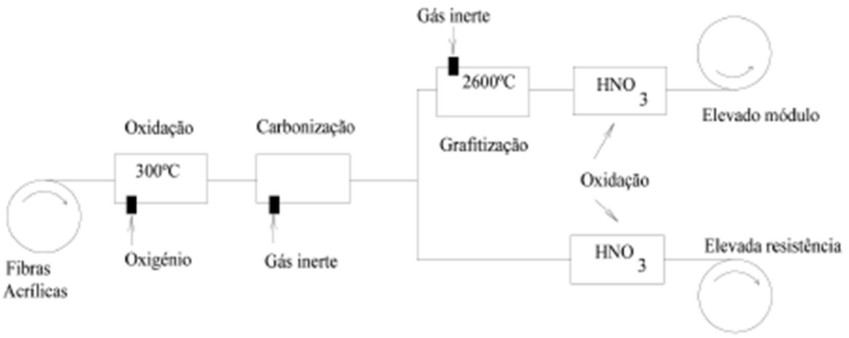


Figura 2.4 – Representação da produção de fibras de carbono a partir de poliacrilonitrilo [6].

Como referido anteriormente, as fibras de carbono são utilizadas em aplicações com elevados graus de exigência. Estas apresentam elevada resistência à tração, elevado módulo de elasticidade, massa especifica muito baixa, boa resistência à fadiga e bom comportamento linear até à rotura. É ainda importante referir que possuem a capacidade de manter as propriedades com a elevação da temperatura, sendo estas termicamente estáveis. Porém, exibem um custo muito elevado, sendo que são implementadas em aplicações onde a redução do peso é mais importante que o custo como, por exemplo, na indústria aeroespacial. Adicionalmente, as fibras de carbono apresentam baixa resistência ao impacto, baixa deformação antes da rotura, elevada condutividade térmica e baixa resistência à compressão. A Tabela 2.6 apresenta as propriedades de alguns tipos de fibra.

As fibras de carbono são agrupadas, com base na sua resistência mecânica, pelas seguintes designações [6]:

- UHM (*Ultra High Modulus*) – Fibras com módulos superiores a 500 GPa;
- HM (*High Modulus*) – Fibras com módulos superiores a 300 GPa;
- IM (*Intermediate Modulus*) – Fibras com módulos até 300 GPa;
- LM (*Low Modulus*) – Fibras com módulos inferiores a 100 GPa;
- HS (*High Strength*) – Fibras de resistências à tração superiores a 3 GPa.

Tabela 2.6 – Propriedades de alguns tipos de fibras de carbono, adaptado de [6].

Propriedades	***PAN***	***Alcatrão "pitch"***	***Rayon fibers***
Massa Volúmica [Kg/m^3]	1800	2000	1700
Módulo de Elasticidade [GPa]	200 – 400	300 – 700	415 – 680
Tensão de Rotura [MPa]	2480 – 5600	1900 – 2200	2070 – 2760
Deformação na Rotura [%]	0,6 – 1,2	1,0 – 1,5	0,5 – 0,6
Coeficiente de Expansão Térmica Axial [$10^{-6}/^{\circ}C$]	– 0,7 a – 0,5	– 1,6 a – 0,9	–

As fibras de carbono apresentam coeficientes de expansão térmica negativos ou quase nulos no sentido longitudinal. Quando são integrados com outros materiais que apresentam

um coeficiente positivo, podem suscitar efeitos adversos, como a manifestação de tensões na interface. No entanto, uma boa associação entre a fibra e a matriz possibilita a produção de materiais compósitos com um coeficiente de expansão térmica nulo [6, 12].

2.8. Fibras Aramídicas

As fibras de aramida, como reforço, apresentam um peso reduzido, elevada resistência à tração e boa resistência ao impacto. São produzidas com base em poliamidas aromáticas. Estas são utilizadas em diversas aplicações, onde a elevada resistência ao impacto é transversal em todas essas aplicações.

Na indústria aeronáutica estas fibras são aplicadas nas extremidades principais dos aviões, as quais são suscetíveis a colisões que podem causar danos. São também utilizados como armadura nos navios; devido à sua capacidade de absorver energia, estas são utilizadas em proteção balística.

Como desvantagens, as fibras aramídicas apresentam elevado custo, baixa resistência à compressão e flexão, como também ao corte interlaminar e mostram uma grande dificuldade em maquinar, que resulta no desgaste prematuro das ferramentas de corte [10, 11]. É de referir que as fibras de aramida exibem um coeficiente de dilatação térmico negativo na direção longitudinal. Estas têm pouca resistência química a condições com pH não neutro e com radiação ultravioleta [8]. A Tabela 2.7 apresenta as propriedades de alguns tipos de fibras aramídicas.

Tabela 2.7 – Propriedades de alguns tipos de fibras aramídicas [6].

Propriedade	***Kevlar® 29***	***Kevlar® 49***	***Twaron®***
Massa Volúmica [Kg/m^3]	1440	4450	1440
Módulo de Elasticidade [GPa]	60	129	60
Tensão de Rotura [GPa]	3000	3000	2600
Deformação na Rotura [%]	3,6	1,9	3,0
Coeficiente de Expansão Térmica [10^{-6}/ °C]	– 2,0	– 2,0	–

2.9. Formas de Fibras

Existem vários tipos e formas de fibras disponíveis, que apresentam um impacto importante nas propriedades finais do compósito. As fibras são combinadas com a matriz de várias formas e utilizam vários processos, sendo esta combinação dependente das características que são procuradas para o compósito. As fibras podem ser longas ou curtas, alinhadas ou dispostas aleatoriamente. Estas são fornecidas em diversas formas, como sejam os rolos (roving), tecidos, mantas e pré-impregnados. Nesta dissertação vão ser expostos resumidamente as várias formas de fornecimento das fibras [8].

Uma forma de fornecimento das fibras consiste nos cordões de filamentos contínuos enrolados em bobines. Estes são utilizados em diversas aplicações. No processo de laminação

em pistola, o cordão do rolo é cortado em pequenos segmentos e misturado simultaneamente com a resina e catalisador dentro da pistola de dispersão nas proporções corretas, sendo o material resultante projetado sobre o molde, permitindo preencher ângulos e pormenores de difícil realização [8, 12].

As mantas podem ser de filamentos cortados (CSM – *Chopped Strand Mat)* e de filamentos contínuos (CRM – *Continuous Random Mat)*. Nestas mantas as fibras são aleatoriamente distribuídas e agregadas por um ligante especial solúvel na solução. As primeiras apresentam baixas propriedades mecânicas, mas com um custo reduzido, e as segundas exibem boas propriedades mecânicas e boa conformabilidade permitindo uma maior facilidade em moldar formas mais complexas. Estas possuem as mesmas capacidades de reforço, no entanto diferem no seu manuseamento e moldação.

Os tecidos são obtidos entrelaçando fibras longas que asseguram a sua estabilidade. Estes podem ser dispostos em direção bidimensional ou tridimensional, sendo que esta última apresenta uma resistência interlaminar superior. No geral, os tecidos são fáceis de manusear e cortar, são estáveis e os componentes produzidos com estes apresentam boa resistência ao impacto [8].

Os pré-impregnados resultam de fibras previamente impregnada com uma resina, normalmente epóxido, para posteriormente serem conformados e consolidados, geralmente por moldação em autoclave. Estes podem ter como base os termoplásticos ou termoendurecíveis, sendo os últimos de aplicação mais generalizada. Os reforços disponíveis podem ser de carbono, vidro ou aramida com formato de fibras contínuas unidirecionais ou tecidos. Como a resina está previamente aplicada, não é possível adicionar outro tipo de material ao pré-impregnado. Desta forma, a resina deve ter todos os componentes necessários para à sua cura ou consolidação. Os pré-impregnados possuem uma certa flexibilidade que permite a moldação de peças com geometrias complexas [6, 12]. A Tabela 2.8 apresenta as propriedades de fibras e de materiais na sua forma maciça.

Tabela 2.8 – Propriedades de fibras e de materiais na sua forma maciça, adaptado de [6].

Material	***Módulo de elasticidade, E [GPa]***	***Resistência à tração, σ_u [GPa]***	***Massa Volúmica, ρ [Kg/dm^3]***	***Módulo específico, E/ρ***	***Resistência específica, σ_u/ ρ***
Fibras:					
Boro	393	3,1	2700	146	1,15
Sílica	72,4	5,8	2190	33	2,65
Tungsténio	414	4,2	19300	21	0,22
Berílio	240	1,3	1830	131	0,71
Matérias convencionais:					
Aço	210	0,34 – 2,1	7800	26,9	0,043 – 0,27
Ligas de Al	70	0,14 – 0,62	2700	25,9	0,052 – 0,23
Vidro	70	0,7 – 2,1	2500	28	0,28 – 0,84
Tungsténio	350	1,1 – 4,1	19300	18,1	0,057 – 0,21
Berílio	300	0,7	1830	164	0,38

2.9.3. Interface fibra/matriz

A ligação entre o reforço e a matriz é de grande importância, pois define o desempenho do compósito, como também as suas propriedades mecânicas. Tipicamente é desejável uma elevada resistência na ligação para que a transmissão dos esforços da matriz plástica para as fibras resistentes seja eficiente, prevenindo o arrancamento das fibras. Existem vários métodos que permitem otimizar e aumentar a resistência dessas ligações e aumentar a compatibilidade entre as fibras e matriz [12, 15].

2.10. Compósitos Híbridos

Durante anos os materiais compósitos rivalizaram com os metais, sendo que dessa competição surgiu os compósitos híbridos. Estes compósitos demonstram uma importância cada vez maior em aplicações, onde normalmente seriam utilizados materiais metálicos, devido às suas boas propriedades específicas. No entanto, estes apresentam características como baixa maquinabilidade, soldabilidade, ductilidade, elevado custo e um processo complexo de produção, que tornam os materiais metálicos uma solução preferencial para algumas aplicações [16].

Na secção anterior foi descrito que os compósitos são formados por uma matriz e um reforço. Nos compósitos híbridos é utilizado mais do que um tipo de fibra como reforço embebido numa matriz. Pode ser usada uma variedade de combinações de fibras e matrizes, mas no sentido mais comum, são utilizadas fibras de carbono e vidro numa simples matriz. Neste caso, as fibras de carbono proporcionam uma maior resistência, no entanto são dispendiosas. Por outro lado, as fibras de vidro têm um custo inferior, mas apresentam uma menor rigidez quando comparadas com as de carbono. Desta forma, é obtido um híbrido com uma boa resistência mecânica e ao impacto, com um custo inferior.

Uma aplicação destes compósitos híbridos consiste na utilização de fibras de aramida e carbono em vigas em "I" que são sujeitas a danos por impacto. As primeiras fibras são dispostas na parte superior e inferior da viga, pois têm uma boa resistência ao impacto, e as segundas no interior da viga, como ilustrado na Figura 2.5.

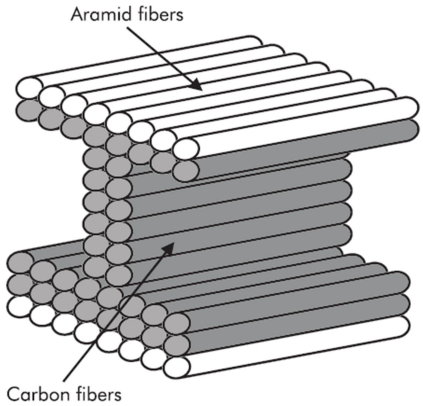


Figura 2.5 – Posicionamento seletivo de fibras de carbono e aramida [12].

Existem várias formas de combinar as diferentes fibras, que vão afetar as propriedades finais do híbrido. Por exemplo, as fibras podem ser alinhadas na mesma direção e embebidas na matriz, ou podem ser fabricados laminados com cada tipo de fibra, sendo dispostas alternadamente, com orientações iguais ou diferentes, de forma a criar um híbrido final. Uma das desvantagens destes compósitos híbridos reside na possibilidade de delaminação, que pode ser minimizada se for utilizada a mesma quantidade de resina entre as diferentes camadas. Estes compósitos são utilizados em componentes da estrutura de veículos de transporte, equipamentos desportivos e componentes ortopédicos [17].

2.11. Materiais Híbridos Compósito/Metal

Os materiais híbridos compósito-metal, mais conhecidos por *Fibre Metal Laminates* (FMLs), são compostos por finas camadas de polímeros reforçados com fibras e ligas metálicas. Estes híbridos são enquadrados entre os compósitos e as ligas metálicas, aproveitando as melhores propriedades da combinação. As ligas metálicas são praticamente isotrópicas, possuem uma boa resistência ao impacto e são de fácil reparação, enquanto os compósitos apresentam boas propriedades mecânicas e resistência à fadiga.

Durante décadas, a indústria aeronáutica procurou um material de baixa densidade, que pudesse substituir as ligas de alumínio tradicionais. Um material ideal nesta indústria combina elevada resistência mecânica e módulo de elasticidade, baixa densidade, elevada resistência à corrosão e bom comportamento à fadiga. Os materiais híbridos auferem de quase todas as características mencionadas. A grande desvantagem dos híbridos, mais associada aos laminados de fibras com matriz de epóxido e metal, é o longo ciclo de processamento, que por consequência aumenta o tempo da produção e o custo de fabrico [18].

Na indústria automóvel existe um desenvolvimento contínuo de novos materiais de baixa densidade. As estruturas são, frequentemente, submetidas a impactos a baixas velocidades, como durante um acidente contra outros veículos, estruturas e até peões. Esta indústria faz muito o uso das ligas de alumínio, no entanto para determinadas aplicações não são suficientemente rígidas para absorver os impactos. Por outro lado, os FMLs apresentam excelentes propriedades mecânicas, concedidas pelo compósito, aliadas de uma boa resistência ao impacto das ligas metálicas. [19].

O método mais comum de produzir materiais híbridos compósito-metal, como também polímeros reforçados com fibras, é com o recurso a autoclave [18]. A Figura 2.6 representa um típico material híbrido.

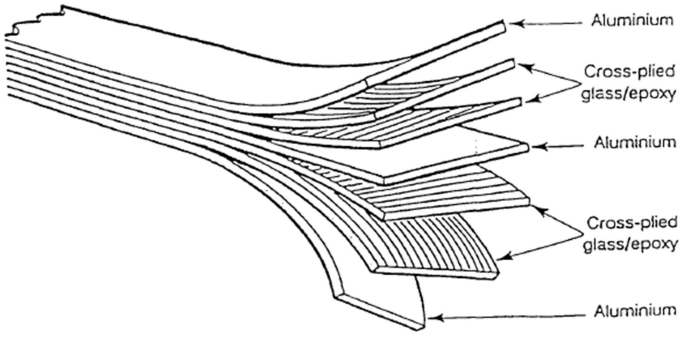


Figura 2.6 – Representação de um material híbrido [20].

A primeira literatura conhecida sobre a utilização de FMLs remonta à década de 50. A utilização destes pela empresa fabricante de aviões *Fokker Aero-structures of Netherlands* teve como objetivo prevenir fissuras originadas pela fadiga nas estruturas dos aviões. O desenvolvimento dos FMLs foi atribuído à Universidade Técnica de Delft na década de 80. A investigação tinha como finalidade aumentar a resistência à fadiga em ligas de alumínio. Esta melhoria foi conseguida utilizando fibras de aramida de elevada resistência mecânica, para reforçar as placas de alumínio. Este híbrido foi intitulado de ARALL ("*Aramid Reinforced Aluminium Laminate*"). Mais tarde, outros dois tipos de híbridos foram desenvolvidos. O primeiro é constituído por fibras de carbono e ligas de alumínio, chamado de CARALL ("*Carbon Reinforced Aluminium Laminates*"). O segundo é constituído por fibras de vidro, geralmente do tipo E, e ligas de alumínio, intitulado de GLARE ("*Glass Laminate Aluminium Reinforced Epoxy*"). A Figura 2.7 representa a classificação dos *FMLs* com base nas camadas metálicas [18, 21].

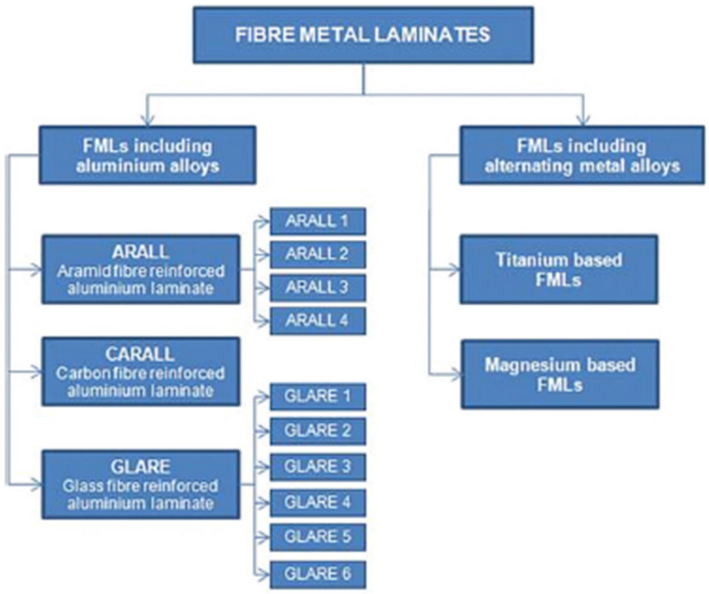


Figura 2.7 – Classificação dos FMLs com base nas camadas metálicas [18].

2.12. Materiais Híbridos com Aço

Os estudos efetuados ao longo dos anos sobre FMLs têm maior incidência em ligas de alumínio e titânio como metais de base, pois existe uma grande demanda pela redução de peso, como principal objetivo. Porém, inúmeros estudos sobre o impacto de objetos foram também efetuados em materiais híbridos com aço como metal base. Segundo Bikakis *et al.* [22] a resistência ao impacto destes híbridos representa uma vantagem enorme para a indústria automóvel, aeroespacial e de transporte, visto que é provável o impacto de objetos estranhos durante o fabrico, serviço e operações de manutenção. Outro estudo, neste sentido, foi efetuado por Lee *et al.* [19] que investigaram o fabrico de FMLs de elevada rigidez e o seu comportamento ao impacto a baixas velocidades. Nestes estudos, o objetivo é apresentar uma solução capaz de absorver a energia gerada no impacto com um peso mais reduzido.

Na indústria automóvel, a tendência tem evoluído da utilização de aços convencionais para: (i) aços de média e elevada resistência, (ii) ligas leves (alumínio e magnésio) e (iii) compósitos de matriz polimérica. A Figura 2.8 apresenta a contribuição dos materiais utilizados nos veículos ligeiros ao longo dos anos.

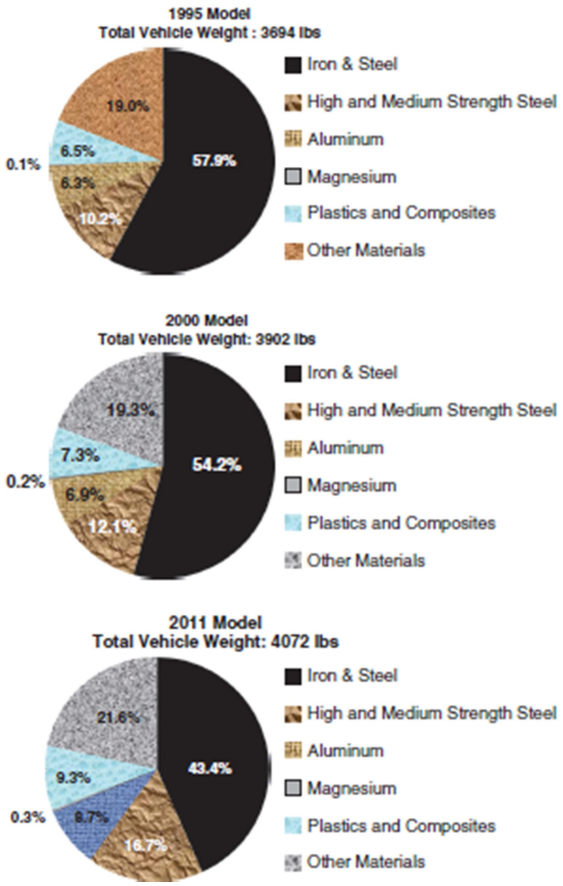


Figura 2.8 – Distribuição do peso dos componentes de um veículo ligeiro [23].

Os componentes estruturais de um veículo são, tipicamente, projetados para apresentarem comportamentos distintos sob a ação de solicitações acidentais tal como se ilustra na Figura 2.9. Geralmente, a distribuição estruturados materiais e configuração dos elementos estruturais não é uniforme, existindo zonas de maior rigidez e outras com maior deformabilidade de modo a permitir, que em impactos resultantes de um acidente rodoviário os ocupantes do veículo sejam protegidos contra danos físicos.

Igualmente a utilização de matérias mais leves revela ser a abordagem a seguir de forma a reduzir o peso das estruturas, com um comportamento semelhante ou até melhor que o anterior. É possível realizar esta abordagem de diferentes formas:

(i) Melhorar as características dos materiais, como na utilização de aços de elevada resistência. Desta forma é reduzida a espessura das estruturas, mas a certa altura a espessura atinge um nível crítico que provoca problemas de estabilidade no material;

(ii) Substituir matérias convencionais por FRPs, que permitem reduzir substancialmente o peso das estruturas. Estes apresentam vantagens como o aumento da resistência mecânica, durabilidade e redução dos consumos de energia. Alguns estudos apontam para uma melhoria das estruturas ao impacto. Contudo, a utilização deste tipo de estruturas está restrita a veículos de custo elevado, devido aos longos e complexos ciclos de produção aliados ao elevado custos na produção destes, sendo incompatíveis com a elevada produtividade necessária na indústria automóvel. A viabilidade deste tipo de estruturas depende da redução dos custos associados ao fabrico, por otimização;

(iii) Combinar diferentes materiais de forma ótima, como por exemplo os CFRPs e o aço. Os materiais são combinados de forma a beneficiar das vantagens específicas de cada. A ligação das estruturas é feita de forma permanente.

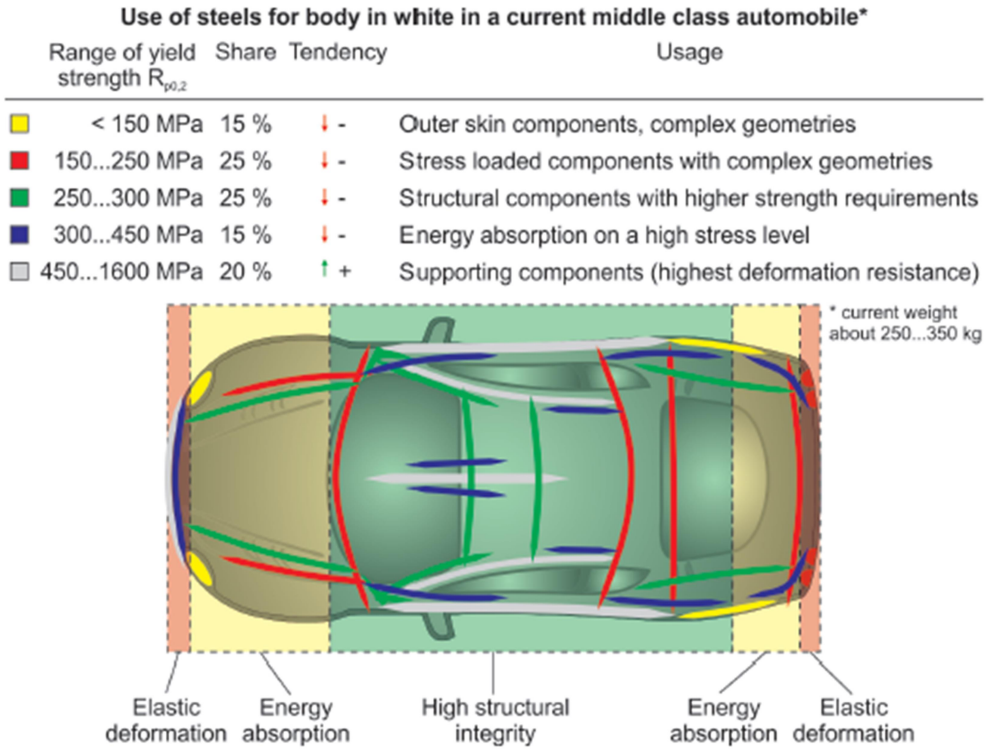


Figura 2.9 – Distribuição dos diferentes materiais num automóvel [23].

Na indústria automóvel, as propriedades mecânicas e a redução do peso das estruturas são requisitos muito importantes, mas para produções de grande escala outros aspetos têm de ser levados em conta como a integração em processos já existentes, garantia das tolerâncias dimensionais, garantia de qualidade e custo de fabrico controlados. A Figura 2.10 ilustra as três abordagens mencionadas consoante o custo, peso e taxa de produção, sendo apresentada uma gama ótima destes parâmetros.

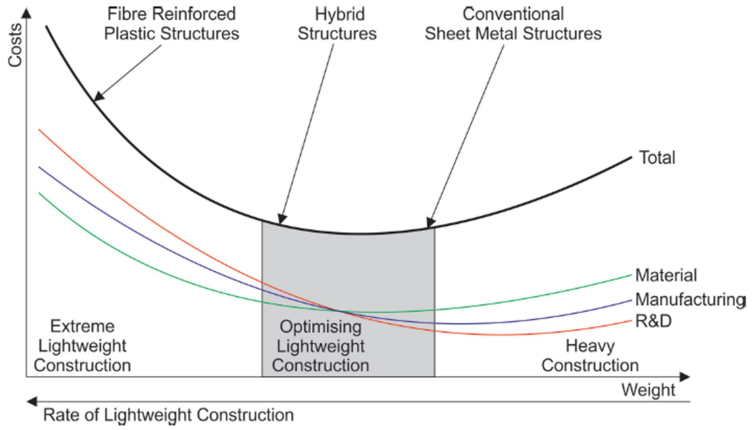


Figura 2.10 – Diferentes abordagens em relação ao peso, custo e taxa de produção [23].

A disposição dos componentes deverá ser realizada com base nas cargas exercidas na estrutura, sendo benéfico para os compósitos do ponto de vista da geometria e da sua utilização eficiente, ajustada às cargas variáveis. A produção de estruturas adaptadas às cargas é realizada através da utilização de estruturas metálicas com menores espessuras reforçadas com FRPs. Esta combinação proporciona uma redução de peso nos componentes de um automóvel. Por exemplo, a utilização de CFRPs como reforço das estruturas em aço submetidas a elevadas solicitações revela ser uma solução para reduzir o peso da estrutura, com propriedades mecânicas semelhantes. A Figura 2.11 ilustra o exemplo referido [23].

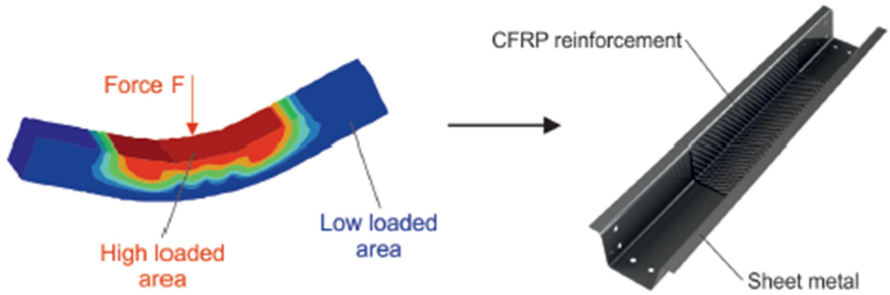


Figura 2.11 – Componente híbrido de uma estrutura automóvel adaptada consoante a carga [23].

3. Maquinagem de Materiais Compósitos

Muitos produtos fabricados incorporam processos de maquinagem na sua sequência de produção. Estes processos consistem na remoção de material da peça de trabalho, para resultar o produto final nas dimensões e formas pretendidos, com a qualidade superficial desejada. Geralmente, a maquinagem abrange uma gama alargada de processos, que por um lado permitem realizar operações simples, como uma limpeza grosseira de peças e, por outro, possibilitam realizar operações muito complexas, como *micromachining* de elevada precisão em componentes mecânicos que requerem tolerâncias muito apertadas. Os principais processos de maquinagem são apresentados na Tabela 3.1 [24].

Tabela 3.1 – Processos de maquinagem [25].

Processos de Maquinagem
Torneamento
Fresagem
Furação ***- Furação Convencional*** ***- Furação Orbital***
Mandrilagem
Retificação
Corte
Brochagem

Os processos de maquinagem podem ser efetuados manualmente, através de máquinas convencionais, ou de uma forma automatizada com recurso a máquinas de controlo numérico computorizado "CNC". Neste trabalho, é atribuído um foco aos processos de furação (direta e orbital), visto que são de grande interesse para nos processos de produção de componentes em materiais híbridos. Nomeadamente, os furos são usados na ligação de componentes através de ligações aparafusadas ou rebitadas. Deste modo, é realizada uma descrição mais detalhada destes processos nas secções seguintes, com maior foco na furação de materiais compósitos e materiais híbridos com CFRP. Será feita uma abordagem a estudos experimentais, sendo este o foco do presente trabalho. Apesar das ferramentas de simulação sejam já uma realidade no estudo/otimização de processos de maquinagem, a sua aplicação nos materiais compósitos e híbridos é ainda muito insipiente.

3.1. Furação

A furação é o método mais comum de remoção de material em metais e compósitos. Este permite realizar furos a partir de uma ferramenta de corte, mais especificamente uma broca. O processo resulta de dois movimentos básicos: o movimento principal de rotação (movimento de corte) e o movimento auxiliar de avanço linear, como mostra a Figura 3.1.

Este processo é efetuado em máquinas de furação convencionais, máquinas de fresagem e vários dispositivos especializados [24, 26].

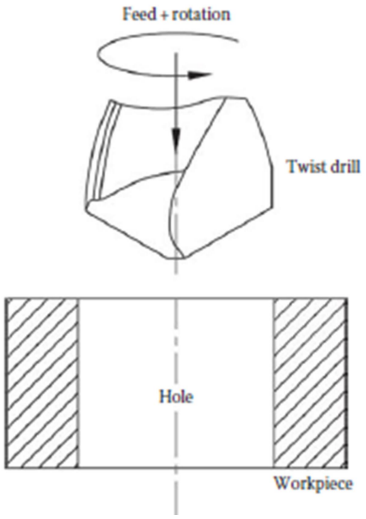


Figura 3.1 – Elementos da operação de furação [24].

O tipo de ferramenta mais comum na furação é a broca helicoidal. Na Figura 3.2 é representada uma broca helicoidal típica, com a terminologia apropriada [27].

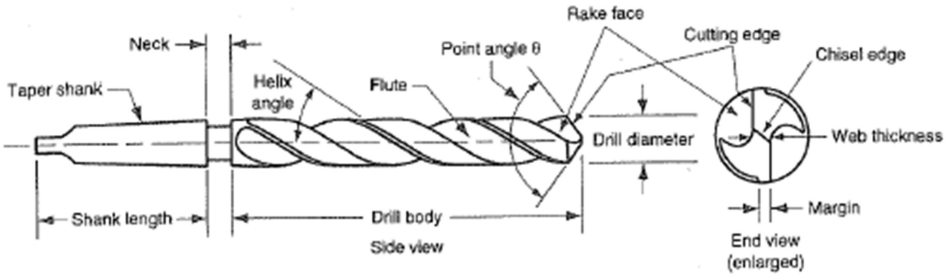


Figura 3.2 – Geometria de uma broca helicoidal [28].

Durante a furação, o movimento de rotação e o avanço axial são descritos através dos seguintes parâmetros: a velocidade de corte (V_c) em [m/min], expressão (3.1), o avanço por rotação (f) em [mm/rot] associado à velocidade de avanço ($\mathfrak{f}_r$), expressão (3.2), e o avanço por dente ($a_\mathfrak{f}$) em [mm/dente], expressão (3.3).

$$V_c = \frac{\pi . D . N}{1000} \tag{3.1}$$

$$\mathfrak{f}_r = \mathfrak{f} . N \tag{3.2}$$

onde, (N) representa a velocidade de rotação em [rpm] e (D) o diâmetro da ferramenta em [mm].

O avanço por dente está associado ao número de dentes/gumes cortantes (z) da ferramenta de acordo com a expressão (3.3) [24, 26]:

$$a_f = \frac{f}{Z} \tag{3.3}$$

As forças associadas ao movimento de corte da ferramenta podem ser divididas em três: a força axial (F_a), ao longo do eixo da ferramenta, a força radial (F_r) e a força tangencial (F_v), perpendicular às outras duas forças. A decomposição das forças está ilustrada na Figura 3.3 [29].

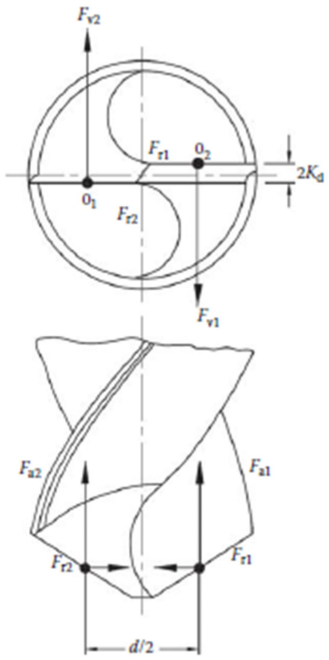


Figura 3.3 – Decomposição das forças de corte [24].

A rotação e o avanço resultam num movimento relativo entre a peça de trabalho e a aresta de corte, gerando as aparas. A velocidade de corte (V_c) ao longo de cada aresta de corte vária em função da distância ao eixo de rotação. Desta forma, a eficiência de corte é maior na parte exterior da ferramenta, diminuindo até ao centro. De facto, a velocidade relativa no indentador da broca é nula. Neste ponto a aresta de corte da ponta da ferramenta empurra o material ao penetrar o furo e ocorre a extrusão do material, processo este que induz elevadas forças axiais. Os esforços gerados podem ser problemáticos, mais precisamente na furação de compósitos, pois causam danos como seja a delaminação, tal como será discutido no capítulo seguinte [28].

3.2. Furação Orbital

A furação orbital consiste em realizar um furo em que a ferramenta de corte descreve uma trajetória helicoidal enquanto gira em torno do seu eixo. A trajetória pode ser dividida na direção axial e tangencial, combinando o corte frontal e periférico. A furação orbital permite adotar várias estratégias para realizar furos de geometrias complexas e operações de acabamento superficial sem a mudança da ferramenta. Esta característica é conseguida através do ajuste da excentricidade, entre eixo da ferramenta e eixo do furo. A Figura 3.4 apresenta a trajetória helicoidal da furação orbital.

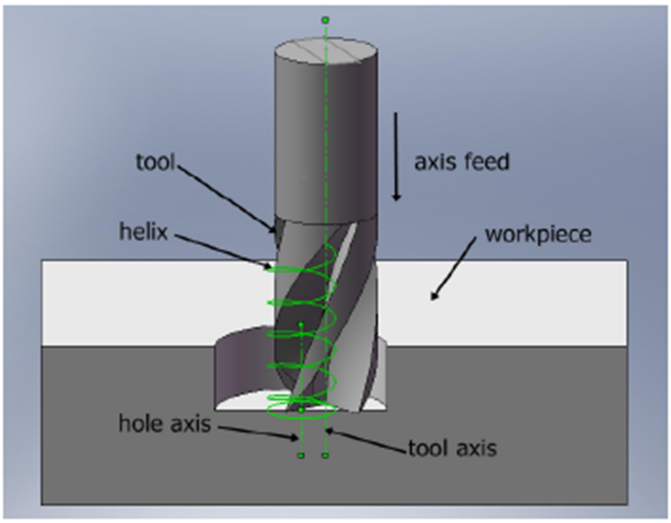


Figura 3.4 – Princípio da furação orbital [30].

Esta técnica é aplicada na furação de materiais difíceis de maquinar como é caso dos CFRP, as ligas de titânio, materiais de elevada dureza, entre outros [31].

No âmbito da maquinagem, a furação convencional ou direta revela ser um processo de maior importância, pois representa 50% da extensão da maquinagem. Tipicamente, as operações deste processo são as últimas a serem realizadas no fabrico de peças, pelo que têm de apresentar elevada fiabilidade de modo a não conduzir à rejeição das peças que já incorporam um valor elevado.

O processo de furação convencional/direta apresenta algumas desvantagens como as elevadas forças axiais submetidas à peça de trabalho, formação de rebarbas, deformação à volta do furo, dificuldades em extrair as aparas e em dissipação do calor. Em termos de furação convencional de compósitos, o processo resulta em danos como a delaminação, degradação da matriz por temperaturas excessivas e arrancamento de fibras. Com base nas desvantagens mencionadas, a furação convencional não representa um processo de fabrico competitivo na indústria aeronáutica. A crescente tendência de produzir componentes com tratamentos térmicos dificulta o processo de furação destes, visto que por vezes a dureza destes materiais chegam aos 60 HRC.

A furação orbital é um processo de maquinagem inovador que pode ser utilizado como alternativa à furação convencional. O percurso helicoidal da ferramenta permite remover material perto do centro do furo através do corte, ao invés da extrusão que ocorre na

furação convencional, que, desta forma, produz menores esforços axiais. Este percurso também possibilita a realização de furos com diâmetros diferentes sem a mudança da ferramenta (ver ferramentas típicas na Figura 3.5), encurtando os ciclos de furação e evitando processos adicionais [32]. A maior desvantagem da furação orbital reside no facto de poder resultar em menor produtividade, quando comparado com a furação convencional, visto que o tempo de maquinagem/corte é em geral superior apesar de resultar em melhor qualidade e maior versatilidade das ferramentas [33].

Figura 3.5 – Ferramentas de corte diversas, adaptado de [34].

Na furação orbital é possível corrigir o diâmetro da hélice durante o processo para corrigir os erros dimensionais e geométricos, que resultam do desgaste da ferramenta.

Como o diâmetro da ferramenta é inferior ao do furo a realizar, existe um espaço livre entre a ferramenta e o furo que possibilita uma melhor extração da apara e dissipação do calor. Por consequência, a extração da apara pode ser efetuada através de ar comprimido ao invés da utilização de fluídos de corte líquidos para remoção das aparas.

A furação orbital apresenta um grande potencial na maquinagem de materiais compósitos devido à redução das forças e temperaturas de corte quando comparada com a furação convencional/direta. Este processo foi alvo de estudo por alguns investigadores e apresentou bons resultados em termos de tolerâncias dimensionais, geométricas e qualidade do furo [32].

3.3. Cinemática da Furação Orbital

O processo de furação orbital é composto por três movimentos simultâneos da ferramenta de corte. Em primeiro lugar, o movimento de rotação da ferramenta em torno do seu eixo; em segundo lugar o movimento de rotação da ferramenta da ferramenta em torno do eixo do furo e por último, o movimento de avanço linear na direção do eixo do furo. O processo é realizado simultaneamente pelo corte periférico descontínuo, similar à fresagem e frontal contínuo, similar à furação convencional. A rotação da ferramenta de corte em torno do eixo do furo promove o corte periférico, enquanto o avanço na direção do eixo do furo promove o corte axial. A Figura 3.6 ilustra os movimentos descritos [33, 35].

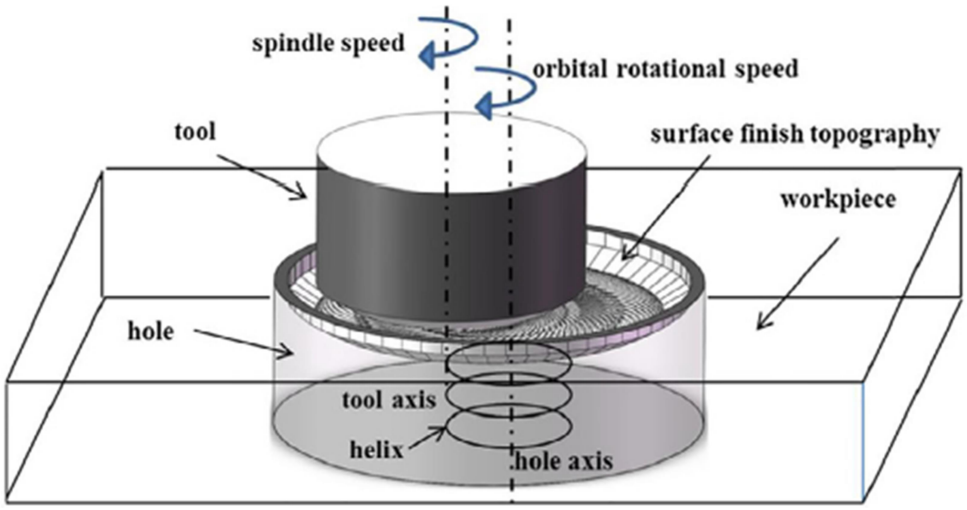


Figura 3.6 – Ilustração do processo de furação orbital [33].

Para ser possível entender a cinemática do processo, é importante realizar uma uniformização da nomenclatura dos parâmetros de corte, pois existem diferentes definições na literatura o que torna difícil a compreensão e aplicação destes de uma forma otimizada [32].

Para tal, são considerados os parâmetros definidos por Rodrigues [25] e Denkena *et al.* [36] como a velocidade de corte, diâmetro do furo, diâmetro da hélice, velocidade de avanço helicoidal e avanço axial por rotação orbital, como ilustrado na Figura 3.7.

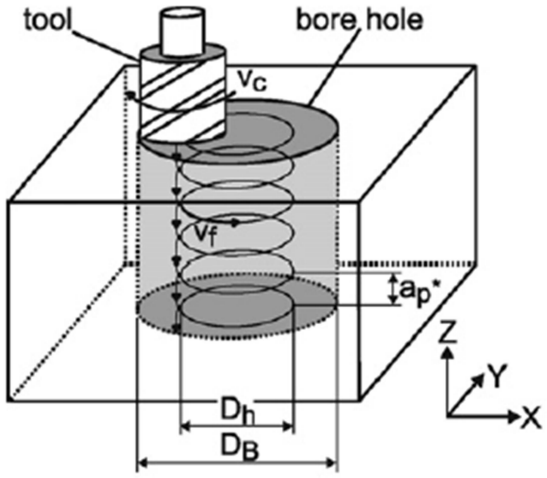


Figura 3.7 – Cinemática da furação orbital [33].

Onde, (v_c) = velocidade de corte, (v_f) = velocidade de avanço helicoidal, (D_h) = diâmetro da hélice, (D_B) = diâmetro do furo e (a_p^*) = profundidade de corte máximo por rotação orbital ou avanço axial por orbita completa da ferramenta.

Como o movimento da ferramenta é tridimensional a velocidade de avanço helicoidal (v_f) em [mm/min], expressão (3.4), pode ser dividida em duas componentes, a

velocidade de avanço axial da hélice (v_{fha}) em [mm/min], expressão (3.5), e a velocidade de avanço tangencial da hélice (v_{fht}) em [mm/min], expressão (3.6) [33].

$$v_f = \sqrt{{v_{fha}}^2 + {v_{fht}}^2} \tag{3.4}$$

$$v_{fha} = f_{za}.z.n \tag{3.5}$$

$$v_{fht} = \frac{v_{ft}.D_h}{D_B} \tag{3.6}$$

$$v_{ft} = f_{zt}.z.n \tag{3.7}$$

No movimento linear da ferramenta na direção axial do furo, a profundidade de corte pode ser descrita considerando o avanço axial por dente (f_{za}) em [mm/dente], o número de dentes (z) da ferramenta e a velocidade de rotação (n) em [rpm], na expressão (3.7). Os parâmetros de corte descritos nas equações estão ilustrados na Figura 3.8.

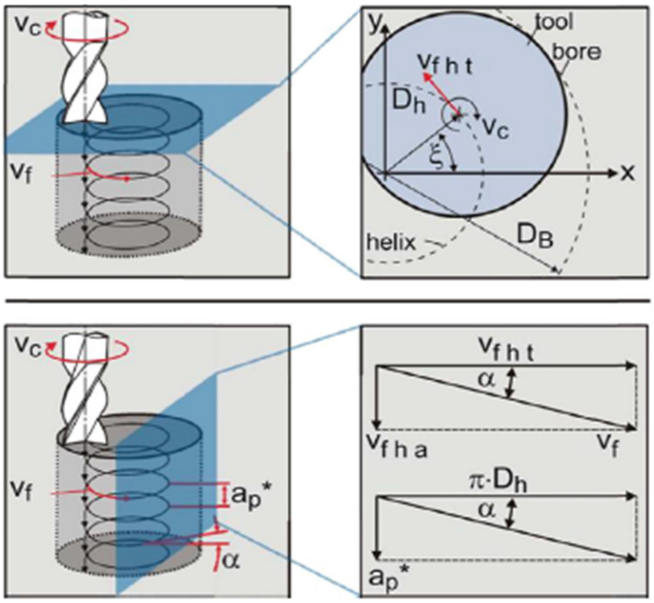


Figura 3.8 – Ilustração dos parâmetros de corte da furação orbital [33].

Da decomposição da velocidade de avanço helicoidal, o ângulo da hélice ($\boldsymbol{\alpha}$) em [°] é calculado de acordo com a expressão (3.8), enquanto a profundidade de corte máxima por rotação orbital em [mm/rot. orbital] é calculado com a expressão (3.9).

$$\boldsymbol{\alpha} = \arctan\left(\frac{v_{fha}}{v_{fht}}\right) \tag{3.8}$$

$$a_p^* = \tan(\boldsymbol{\alpha}) \,.\, \boldsymbol{\pi}.\, D_h \tag{3.9}$$

O parâmetro de corte que define o diâmetro da hélice e por consequência os outros é a excentricidade $(\boldsymbol{e})$ em [mm], que resulta da distância entre o eixo do furo e o eixo da ferramenta. Este parâmetro é baseado no diâmetro do furo (D_B) e o diâmetro da ferramenta (D_t) e pode ser calculado pela expressão (3.10).

$$\boldsymbol{e} = \frac{D_b - D_t}{2} \tag{3.10}$$

Um parâmetro de corte importante, nesta dissertação, é o *rough pass stepover,* em [mm], que define o diâmetro da ferramenta a utilizar para a profundidade de corte no movimento helicoidal. A Figura 3.9 ilustra o parâmetro de corte mencionado.

Figura 3.9 – Ilustração do parâmetro de corte *rough pass stepover.*

Na furação orbital é necessário escolher os parâmetros de corte apropriados, de forma a caracterizar por completo o movimento da ferramenta. Para tal, é utilizado a velocidade de corte (v_c) em [m/min], o avanço tangencial por dente (f_{zt}) em [mm/dente] e a profundidade de corte por rotação orbital (a_p) em [mm/rot. orbital] [33] [35, 37-40].

3.4. Furação de Compósitos

Devido à natureza anisotrópica e abrasiva dos compósitos, o processo de maquinagem destes é muito diferente dos materiais homogéneos e isotrópicos. As diversas propriedades da matriz e das fibras, com diferentes orientações, apresentam um efeito significativo no processo de maquinagem. Desta forma, a escolha correta das condições de corte representa uma tarefa difícil devido ao facto das fibras serem abrasivas e à matriz macia.

Atualmente, os requisitos exigidos pelas indústrias criaram um desafio enorme aos fabricantes, que por consequência levou a uma aposta maior no desenvolvimento de melhores técnicas de maquinagem [41].

Uma das maiores vantagens dos compósitos reside no facto de estes poderem ser fabricados quase na forma final de acordo com os requisitos. Assim sendo, novos processos e técnicas de maquinagem têm de garantir uma elevada eficiência aliada a um baixo custo. Mesmo com o fabrico quase na forma final, os processos de maquinagem ainda são necessários para diferentes etapas da produção, como na preparação dos laminados, fabrico de peças e montagem final. A qualidade da peça resultante influência as tolerâncias de montagem e o desempenho da estrutura.

Um dos métodos mais utilizados como processo secundário de maquinagem de compósitos é a furação. Em aplicações comuns é efetuada furação a seco, suscitando assim elevadas temperaturas durante o corte que resultam na formação de vários defeitos como rebarbas, delaminação, degradação da qualidade superficial e propriedades geométricas dos furos de baixa qualidade. Em certas aplicações a furação convencional chega a um limite, como na relação entre na furação de certos compósitos de fibras de carbono ou fibras de vidro com os danos associados a este [42]. A Figura 3.10 ilustra um esquema de furação com delaminação à saída.

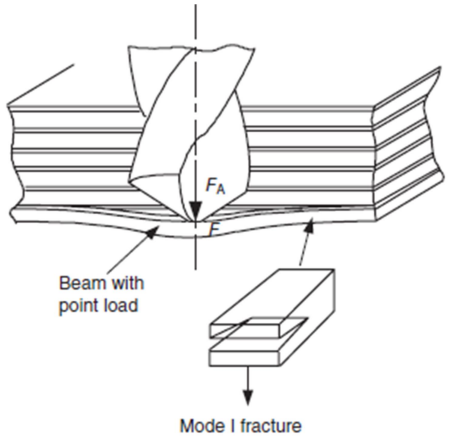


Figura 3.10 – Esquema da furação com delaminação à saída [41].

Em termos de materiais estruturais, as ligações são, normalmente, aparafusadas ou rebitadas. Desta forma, a eficiência e qualidade das ligações depende das características dos furos maquinados. Existem vários métodos de furação utilizados para produzir furos em compósitos, no geral, durante o processo de ligação com outros componentes. Para garantir elevada resistência nas ligações, os furos têm de ser efetuados com elevada precisão e sem danos resultantes do processo de furação. Contudo, os compósitos possuem determinadas características como abrasividade, não homogeneidade, anisotropia e elevada dureza, que dificulta o processo de furação e, de forma geral, a maquinagem destes. Alguns dos danos comuns resultantes da furação são a delaminação, arrancamento de fibras e a degradação da matriz, que reduzem drasticamente as propriedades mecânicas [42].

3.5. Furação de CFRPs

Vários estudos têm sido realizados para solucionar os problemas induzidos pela furação de CFRPs, através de diferentes estratégias de maquinagem, diferentes materiais das ferramentas e revestimentos, recurso à lubrificação, otimização dos parâmetros de corte, variação da geometria das ferramentas, propriedades dos CFRP, entre outras. A Figura 3.11 ilustra um diagrama de causa e efeito que descreve os diferentes parâmetros que influenciam o objetivo final, que é a qualidade do furo produzido no CFRP.

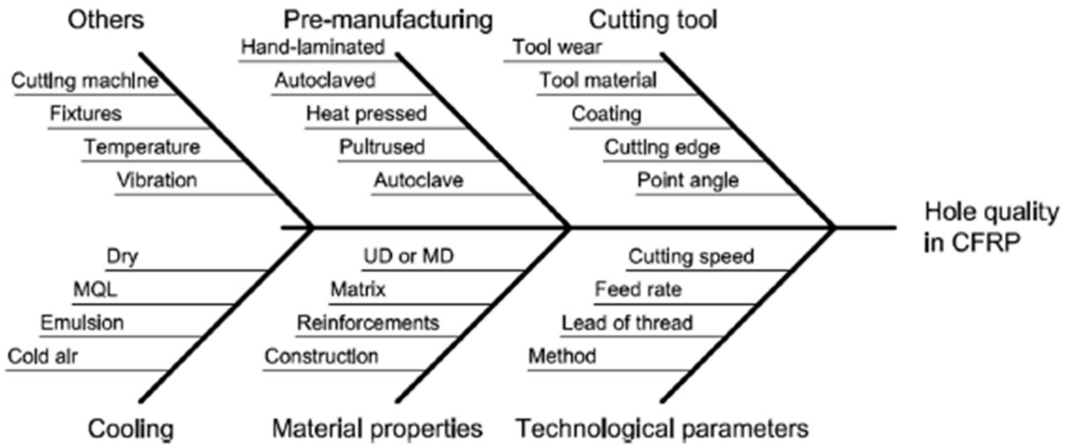
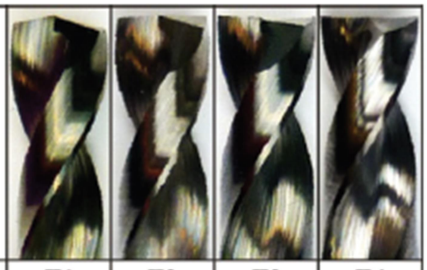


Figura 3.11 – Diagrama causa e efeito da qualidade do furo [37].

3.5.1. Furação Direta de CFRPs

Nesta sequência, Heisel *et al.* [43], estudaram a influência do ângulo de ponta da ferramenta na qualidade dos furos realizados em CFRPs assim como as forças de corte resultantes. Concluíram, que o aumento do ângulo de ponta resulta no aumento das forças axiais, sendo melhorada a qualidade dos furos à entrada, porém apresentam piores qualidades à saída. As ferramentas utilizadas neste estudo e os resultados em termos de forças axiais em relação ao avanço são apresentados nas Figuras 3.12 e 3.13, respetivamente.



Name of tool	T1	T2	T3	T4
Point angle [°]	155	175	185	185/178
Rake angle [°]	31	31	31	31
Clearance angle [°]	7	8	7	6
Wedge angle [°]	52	51	52	53
Cutting material	Cemented Carbide			

Figura 3.12 – Características das ferramentas utilizadas na furação direta de CFRPs [43].

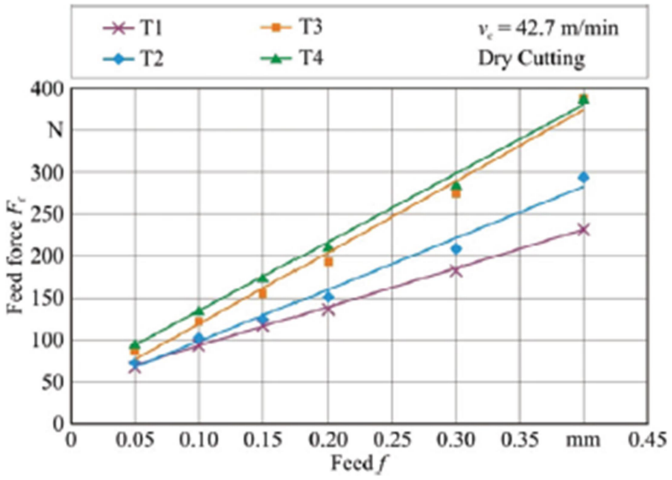


Figura 3.13 – Força axial versus avanço para diferentes ferramentas usadas na furação de CFRPs [43].

Neste seguimento, outro estudo foi efetuado por Gaitonde *et al.* [44]. Estes autores investigaram alguns parâmetros de corte e assim como o efeito da geometria da ferramenta na delaminação durante a furação de CFRP.

Outro estudo foi realizado por Murphy *et al.* [45]; estes autores analisaram o desempenho de ferramentas de metal duro com revestimentos de TiN, DLC ("*Diamond-Like Carbon")* e sem revestimento. Neste estudo, com o aumento do número de furos realizados as forças associadas à furação também aumentam. Também visualizaram um grande desgaste na aresta de corte da ferramenta. Os furos iniciais apresentam danos negligenciáveis, sendo amplificados com o maior desgaste da ferramenta, especificamente no flanco. No geral, com a utilização de revestimento nas ferramentas resultam menores taxas de desgaste, no entanto resultam em maiores esforços axiais na furação de CFRPs. As forças de corte e o desgaste das ferramentas são apresentadas na Figura 3.14.

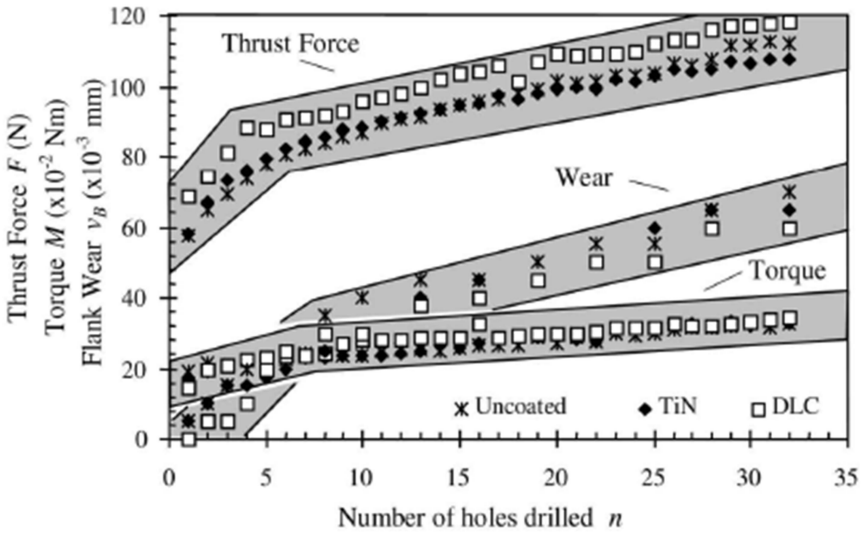


Figura 3.14 – Variação da força axial, binário e desgaste da aresta de corte em relação ao número de furos com a furação de CFRPs [45].

No que diz respeito aos revestimentos das ferramentas, Gaugel *et al.* [46] estudaram a, furação de CFRPs com ferramentas de metal duro com revestimento de diamante e sem revestimento. Do estudo concluíram que as ferramentas sem revestimento apresentaram maior durabilidade quando comparadas com as ferramentas revestidas, para os parâmetros de corte utilizados. Neste estudo a vantagem das ferramentas sem revestimento foi atribuída ao menor "*Cutting Edge Rounding"* (CER), critério utilizado por Faraz *et al.* [47], da ferramenta sem revestimento. No entanto, as ferramentas com revestimento apresentaram menores valores de esforços axiais e furos com melhores propriedades geométricas.

Wang *et al.* [48] investigaram as variações de temperatura durante a furação de CFRPs e consequência nas propriedades resultantes. Neste estudo, é definida uma gama de temperaturas ideal do compósito testado, para que haja menor probabilidade de delaminação durante a furação, com base na relação entre a temperatura e as forças de corte, como também a sua relação com a resistência interlaminar à fratura. Esta gama situa-se entre a temperatura de rotura/comportamento frágil e a temperatura de transição vítrea.

Krishnamoorthy *et al.* [49] analisaram a delaminação de CFRPs com a tecnologia termográfica. Para tal, aqueceram as amostras durante um período de tempo e registaram a queda da temperatura com uma câmara de infravermelhos. Foram estudados os fatores que contribuem para a delaminação como o ângulo de ponta, o avanço axial e a rotação da ferramenta. Foi concluído que o ângulo de ponta representa o parâmetro que mais participa na delaminação, seguido pelo avanço axial. A velocidade de rotação não aparenta ter grande impacto na delaminação.

Ramirez *et al.* [50] investigou o desgaste das ferramentas e a qualidade dos furos resultante da furação convencional de CFRP. Para tal, utilizaram um dispositivo para medir a circularidade do furo e concluíram que existem zonas críticas onde ocorrem a maior extensão dos danos associados à furação. Na Figura 3.15 é possível visualizar zonas com fibras por cortar, localizadas entre – 10º e – 45º e, simetricamente, entre 135º e 170º. A gama angular destas zonas é igual a 35º. Estas gamas vão de encontro aos estudos efetuados posteriormente por Wang *et al.* [51] e Bonnet *et al.* [52].

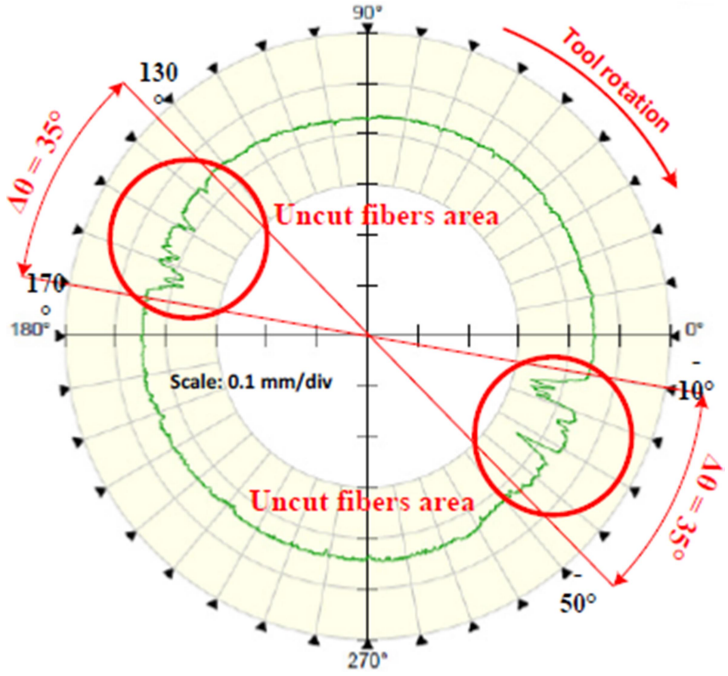


Figura 3.15 – Localização dos defeitos produzidos na furação de um laminado CFRP unidirecional [50].

3.5.2. Furação Orbital de CFRPs

Algumas vantagens da furação orbital, em comparação com a furação convencional/direta, são a melhor qualidade do furo, melhor remoção de apara, menores forças de corte e melhor gestão do inventário das ferramentas. No entanto, a menor produtividade apresentada por este processo pode ser verificada como uma desvantagem importante a ser analisada, pois não existem muitos estudos sobre este assunto, mais especificamente na produtividade em relação à qualidade do furo e custos associados a estes [32].

Voss *et al.* [53, 54] realizaram um estudo de comparação entre a furação convencional e a furação orbital de CFRPs. Nesta comparação os dois processos são comparados em termos de danos produzidos, desgaste das ferramentas resultante, variação do diâmetro dos furos e os tempos de ciclo. A Figura 3.16 representa a comparação da qualidade de saída do furo em relação à furação convencional e orbital. A primeira fila apresenta uma série de 1000 furos realizados com o processo convencional. Com o aumento do número, a quantidade de fibras por cortar aumenta, como também a delaminação à volta do furo. Na segunda fila, à semelhança da primeira mas com a furação orbital, os furos, de uma forma global, apresentam uma melhor qualidade que os realizados por furação convencional. Nesta última, os furos aparentam melhor qualidade com o aumento do número de furos realizados. É possível verificar a dificuldade inerente no que toca à maquinagem de CFRPs sem ocorrer danos.

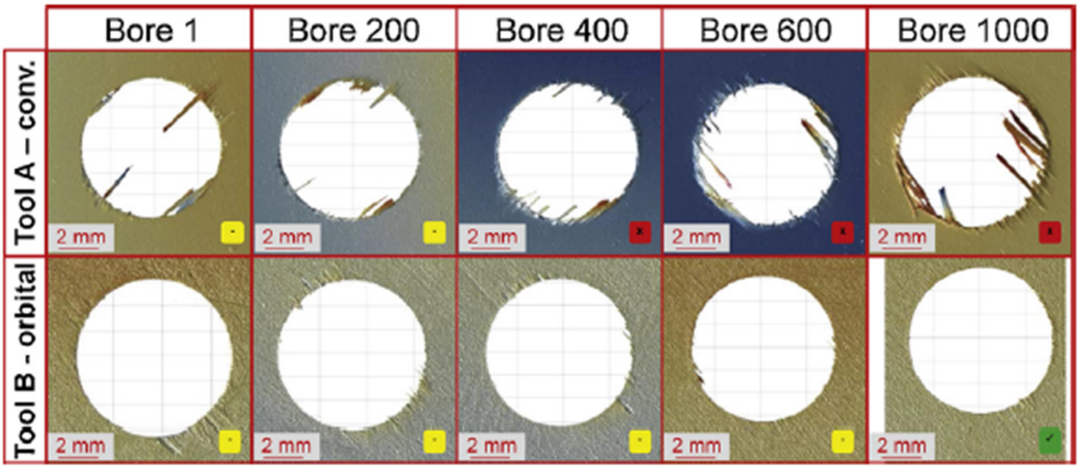


Figura 3.16 – Comparação da furação em CFRPs recorrendo à furação direta e orbital - visualização em microscópio da saída dos furos [53, 54].

A Figura 3.17 apresenta um gráfico das forças axiais ($F_{f,a}$) como também o binário e as forças laterais ($F_{f,l}$) dos dois processos em questão. Devido ao elevado desgaste da ferramenta (*Tool* A) na furação convencional, as forças axiais aumentam progressivamente, enquanto o binário aumenta quase linearmente. Desta forma, as elevadas forças axiais presentes na furação convencional causam os danos excessivos visualizados na Figura 3.16. As forças axiais na furação orbital mantêm valores baixos ao longo dos furos realizados.

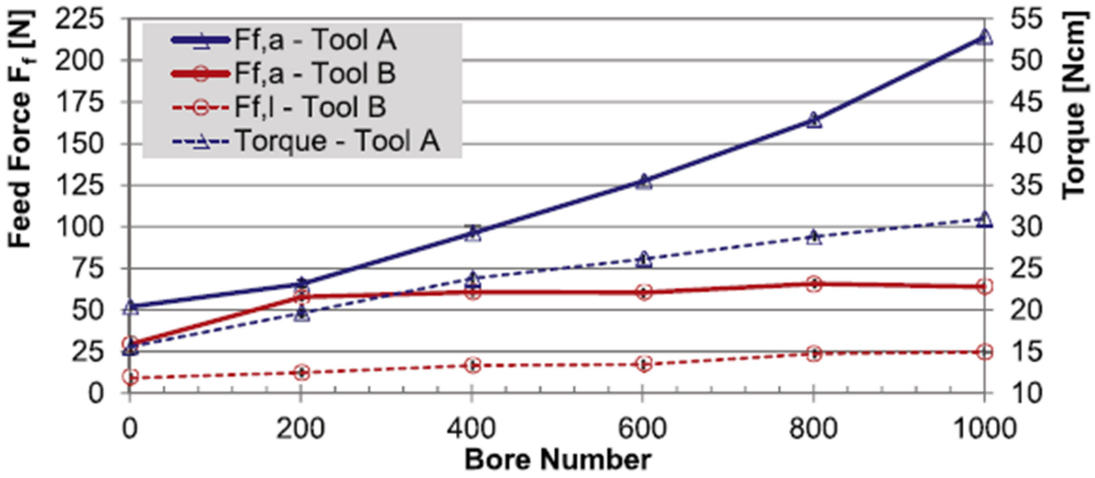


Figura 3.17 – Comparação dos esforços na furação convencional e orbital: Forças axiais ($F_{f,a}$) e binário na furação convencional (*Tool* A); Forças axiais ($F_{f,a}$) e forças laterais ($F_{f,l}$) na furação orbital (*Tool* B) [54].

Neste estudo, também é analisado o tempo de processamento do furo na furação convencional e orbital. A Figura 3.18 apresenta o tempo de furação para realizar um furo com os dois processos, sendo necessário 8s (100%) na furação orbital, enquanto na furação convencional é necessário apenas 3.8s (47.5%).

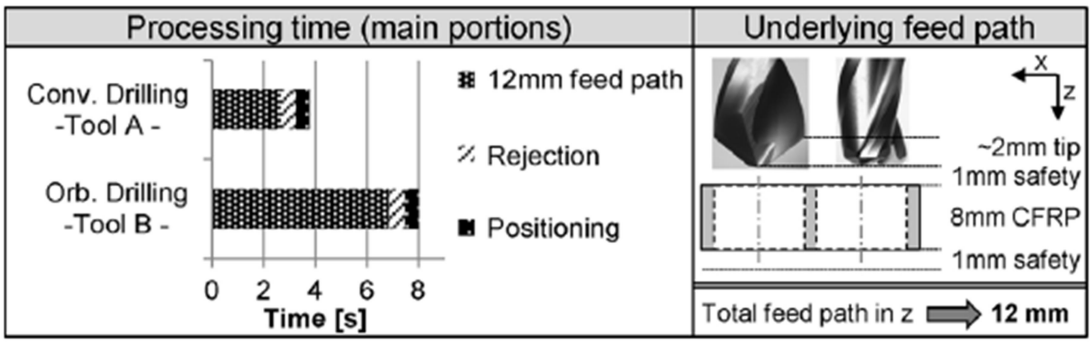


Figura 3.18 – Comparação do tempo de processamento entre a furação convencional e a orbital [54].

Outro estudo, neste sentido, foi efetuado por Caggiano *et al.* [55] que tem por base a caracterização de um novo processo de furação, que incorpora a furação convencional com a orbital, com o objetivo de mitigar os danos por delaminação. Deste estudo, a furação orbital produz furos de melhor qualidade com forças axiais mais baixas, mas requer processos mais complexos com tempos de processamento maiores [54].

Liu *et al.* [39] realizou um estudo com vista a averiguação da variação da temperatura na peça de trabalho durante a furação orbital de CFRPs. Foi demonstrado que a temperatura aumenta com o aumento dos parâmetros como seja a velocidade de rotação e avanço axial por dente, sendo este último de maior influência. O avanço tangencial por dente tem uma influência muito baixa na variação da temperatura. Na literatura existe uma grande variedade de estudos que utilizam a furação convencional. Nestes, os parâmetros de corte mais influentes na delaminação do compósito são o avanço da ferramenta e o ângulo de ponta da mesma.

3.5.3. Fresagem de CFRPs

Em termos da geometria da ferramenta, Hosokawa *et al.* [56] estudaram a fresagem de CFRP com diferentes ferramentas de metal duro revestidas com *DLC*. A geometria das ferramentas difere no ângulo da hélice. Neste estudo os efeitos do revestimento utilizado nas ferramentas são marginais e pouco significativos em comparação à geometria da ferramenta.

As forças axiais e tangenciais diminuem significativamente, como também é possível obter superfícies com bom acabamento superficial e poucos danos em termos de delaminação e arrancamento de fibras, com a utilização de um ângulo da hélice elevado. Outro estudo, nesta sequência, foi efetuado por Waqar *et al.* [57] que investigaram a otimização dos parâmetros relativos à geometria da ferramenta na fresagem de CFRPs com recurso a várias análises estatísticas. Foi utilizada uma análise estatística *Taguchi S/N* para averiguar as forças de corte e a rugosidade superficial. Também foi realizada uma análise estatística da variância (ANOVA) que mostrou que o ângulo de ataque da ferramenta como o fator com maior influência nas forças de corte; já o ângulo de hélice da ferramenta apresentou maior impacto na rugosidade superficial.

3.6. Furação de Materiais Híbridos Compósito-Metal

O processo de furação de materiais híbridos compósito-metal revela um enorme desafio devido às distintas propriedades de maquinagem dos diferentes materiais. Além disso, a furação de compósitos necessita de ferramentas com geometrias especiais e arestas de corte muito afiadas, que levam a tensões muito elevadas e, por consequência, desgastes excessivos.

No que diz respeito à furação, muitos estudos têm sido realizados em laminados de CFRP/Al e CFRP/Ti [58, 59]. Estes estudos revelam uma forte aposta neste tipo de híbridos, sendo que materiais híbridos com aço como metal base não têm sido alvo de grande investigação, devido à falta de compatibilidade com o requisito de reduzir o peso.

Li *et al.* [60] realizaram um estudo de comparação entre ferramentas de metal duro com revestimento diamantado (DC), TiAlN+AlCrN (TAC), TiAlN (TC) e sem revestimento (UC). Foi concluído, que as ferramentas sem revestimento apresentam melhores resultados, como a menor rugosidade da superfície do furo, menores esforços de corte e maior consistência de diâmetros. Estes resultados são apresentados nas Figuras 3.19 à 3.22.

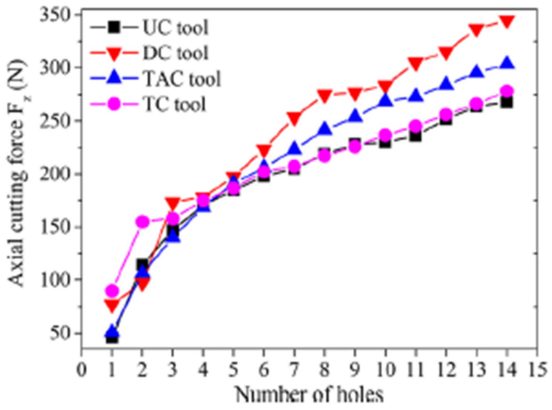


Figura 3.19 – Força axial resultante de diferentes ferramentas, em relação ao número de furos, na furação da camada em liga de titânio [60].

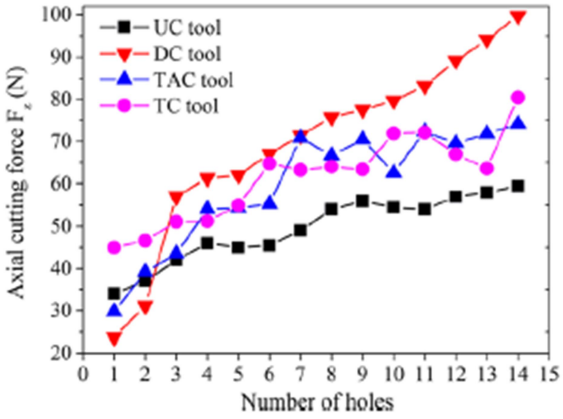


Figura 3.20 - Força axial resultante de diferentes ferramentas, em relação ao número de furos, na furação da camada de CFRP [60].

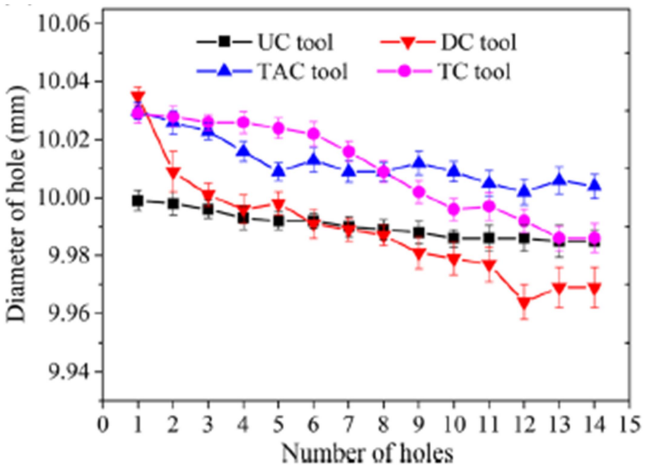


Figura 3.21 – Variação do diâmetro em relação ao número dos furos medidos na camada de liga de titânio [60].

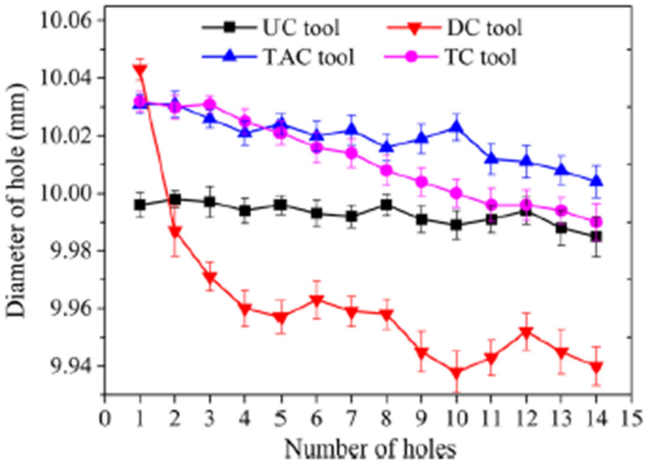


Figura 3.22 – Variação do diâmetro em relação ao número dos furos medidos na camada de CFRP [60].

Relativamente à lubrificação, foram efetuados estudos por Senthilkumar *et al.* [61] que investigaram a furação de materiais híbridos CFRP/Ti6Al4V recorrendo à técnica de aplicação da quantidade mínima de lubrificante, MQL "*Minimal Quantity Lubricant*".

Concluíram que para um determinado fluxo é possível obter melhores resultados em termos de menores forças de corte, melhores qualidades de furos, menores rebarbas e desgaste das ferramentas.

Khairusshima *et al.* [62] investigaram o desgaste das ferramentas na fresagem de CFRPs com assistência de um sistema de fluxos de ar a baixa temperatura. Neste estudo o desgaste das ferramentas aumenta com a velocidade de rotação, avanço axial e profundidade de corte sem o recurso de fluxos de ar. Um padrão semelhante foi visualizado com a utilização de ar a baixas temperatura com resultados menores em termos do desgaste das ferramentas. No entanto, com a utilização deste sistema, o aumento da velocidade de rotação apresentou um decréscimo no desgaste, em particular no incremento de 160 para 200 m/min. O tempo de vida da ferramenta com e sem o auxílio do sistema foi de 9,287 e 6,542 minutos, respetivamente, sendo que as Figuras 3.23 à 3.25 representam o desgaste da ferramenta em relação ao tempo de vida, para diferentes parâmetros de corte.

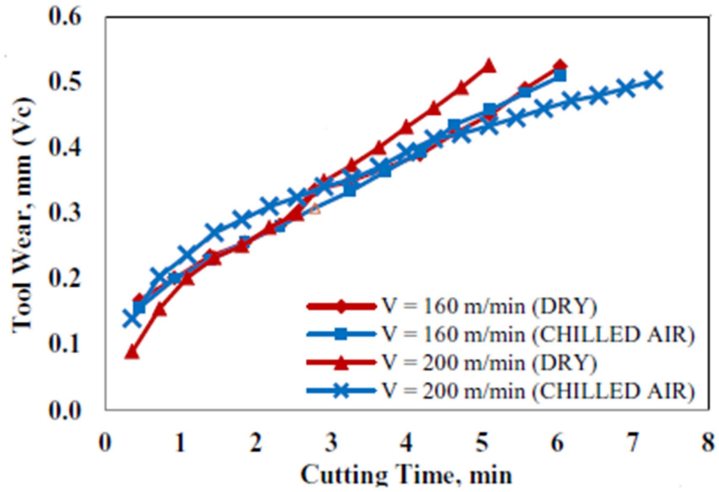


Figura 3.23 – Comparação do desgaste da ferramenta em relação à velocidade de rotação (Avanço=0.175mm/dente e Profundidade de corte = 0.71mm): comparação da maquinagem a seco com o uso de ar arrefecido [62].

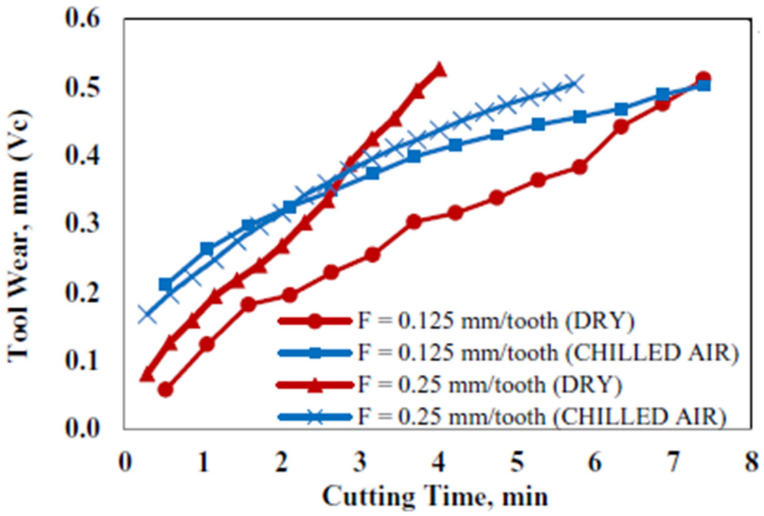


Figura 3.24 – Comparação do desgaste da ferramenta em relação ao avanço axial (Velocidade = 179m/min e Profundidade de corte = 0.71mm): comparação da maquinagem a seco com o uso de ar arrefecido [62].

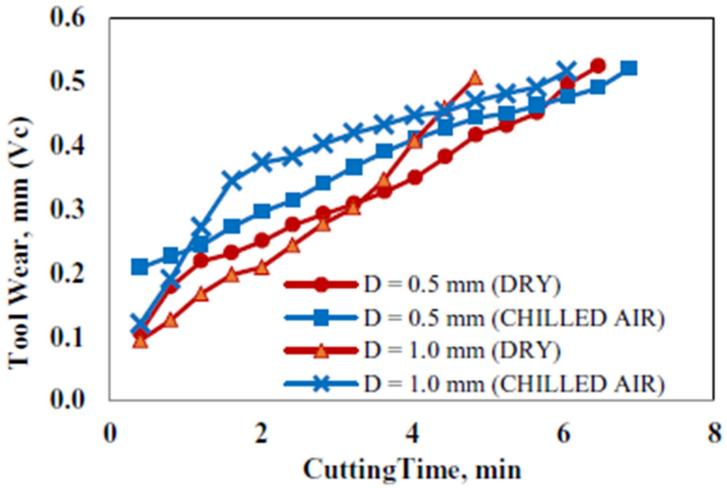


Figura 3.25 – Comparação do desgaste da ferramenta em relação à profundidade de corte (Velocidade = 179m/min e avanço=0.175mm/dente): comparação da maquinagem a seco com o uso de ar arrefecido [62].

Wang *et al.* [33] investigaram várias estratégias para reduzir a delaminação durante a furação orbital de híbridos CFRP/Ti. Neste estudo é indicado que as forças de corte se correlacionam com o dano submetido à peça de trabalho. Foi concluído que as forças de corte aumentam com aumento do avanço axial, sendo atribuído ao facto de elevados avanços significarem um aumento do volume de material cortado pela ferramenta, necessitando assim de maiores forças de corte e por consequência maiores esforços axiais. Contudo, a velocidade de rotação da ferramenta apresenta uma relação inversa com as forças de corte. Esta relação foi imputada à maior interação entre a ferramenta e a peça de trabalho, que desta forma gera calor devido às forças de fricção entre as duas. Assim sendo, a magnitude das forças necessárias para cortar o material é reduzida, visto que o calor gerado tende a amaciar a matriz do compósito. No estudo realizado por Wang *et al.* [33] foram utilizadas quatro estratégias, sendo a segunda e terceira as mais relevantes. A segunda estratégia consiste na furação orbital de um furo, de 12mm, pela ordem CFRP/Ti, como mostra a Figura 3.26. Esta demonstrou a melhor combinação de resultados, em termos da qualidade dos furos, temperaturas e forças de corte, Figura 3.27. As relações do avanço axial e velocidade de rotação com o esforço axial também vão de encontro com o estudo efetuado por Eneyew *et al.* [63].

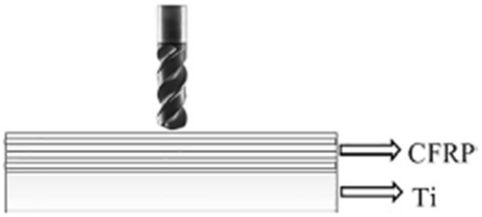


Figura 3.26 – Estratégia 2 de furação orbital com a sequência de furação CFRP/Ti [33].

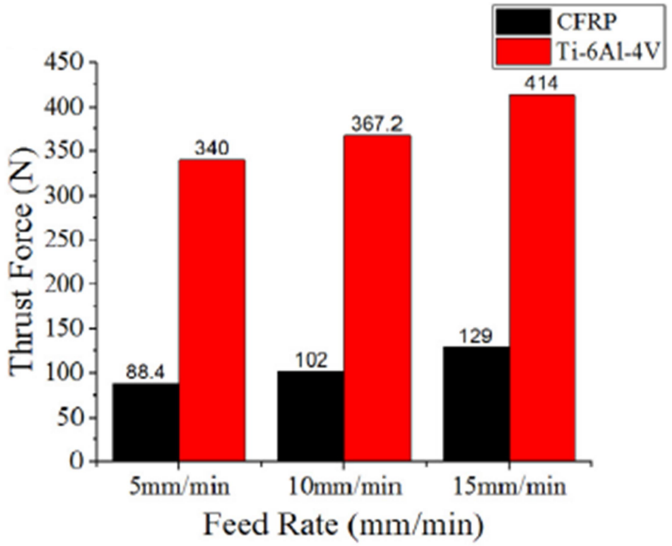


Figura 3.27 – Forças axiais da estratégia 2 com a sequência CFRP/Ti em relação ao avanço axial [33].

A terceira estratégia apresenta a furação orbital por etapas, como mostra a Figura 3.28. Nesta, a primeira etapa resulta num furo de 8mm com a sequência CFRP/Ti; na segunda etapa é maquinado um furo de $10\ mm$ com a sequência Ti/CFRP e na terceira etapa é maquinado um furo de $12\ mm$ com a sequência CFRP/Ti. As últimas etapas têm por objetivo eliminar os danos causados na primeira etapa. A Figura 3.29 apresenta os esforços axiais em função do tempo de furação, para as diferentes etapas.

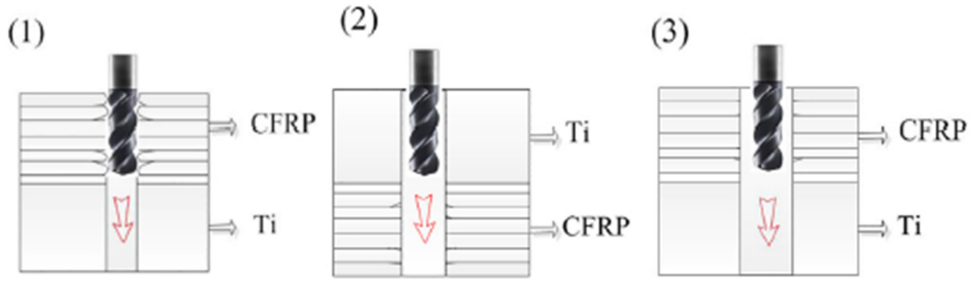


Figura 3.28 – Etapas de furação orbital da estratégia 3 com a sequência de furação (1) CFRP/Ti, (2) Ti/CFRP e (3) CFRP/Ti [33].

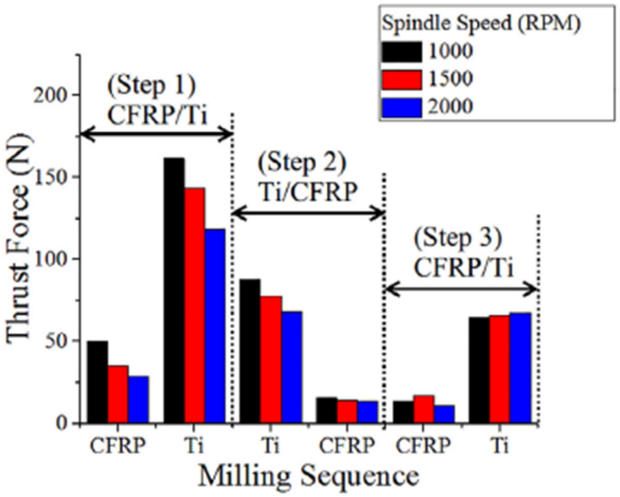


Figura 3.29 – Forças máximas axiais da estratégia 3 para diferentes velocidades de rotação [33].

Neste estudo não foi utilizando um critério na escolha dos diâmetros das etapas subsequentes, sendo que mais tarde foi publicado um estudo por Wang *et al.* [64] muito semelhante ao anterior onde analisaram diferentes estratégias na furação orbital de CFRP/Ti com maior rigor na escolha dos diâmetros das etapas. Para tal, foram implementadas quatro estratégias, sendo que nas duas primeiras foram realizados, com uma etapa de furação, furos de $12\ mm$ e nas últimas dois furos com o mesmo diâmetro, mas com três etapas de furação, sendo realizados furos com $9\ mm$, $11\ mm$ e $12\ mm$. A estratégia com as três etapas de furação apresentou melhores resultados em termos da qualidade dos furos, temperaturas de corte e fatores de delaminação. Outro estudo que apresenta a furação orbital por etapas pode ser encontrado na referência [65].

3.7. Furação de Híbridos Fibra de Carbono-Aço

A elaboração desta dissertação teve como base o estudo prévio feito por Rodrigues [25], onde é abordado a furação orbital de híbridos CFRP-Aço. Nesta secção será apresentado um resumo deste estudo uma vez que será o ponto de partida para o estudo a realizar na presente dissertação. Em particular, será usada a mesma amostra de material e *setup* experimental.

No estudo em questão foi efetuado um trabalho experimental com foco nos parâmetros de corte e a sua influência no desgaste das ferramentas, como também a avaliação das forças axiais geradas no processo de furação. O grande desafio passou pelo desgaste excessivo das ferramentas e a degradação da matriz, ambos correlacionados com as elevadas temperaturas geradas no processo devido à natureza abrasiva dos CFRPs. A furação orbital, neste contexto, tem por objetivo reduzir os danos associados, mais precisamente a delaminação através da redução dos esforços axiais, característicos da furação convencional. Os parâmetros que foram selecionados nesta investigação são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Parâmetros de corte selecionados, adaptado de [25].

V_c *(m/min)*	100	300
Avanço por dente (mm/dente)	0,01	0,05
Avanço axial (mm/rotação orbital)	0,05	0,10

O plano de ensaios foi o apresentado na Tabela 3.3, sendo composto por oito ensaios com três tipos de parâmetros para garantir um fatorial completo, sendo repetido três vezes com a ferramenta específica para furar o CFRP+Aço. A Tabela 3.4 mostra a ordem dos ensaios realizados.

Tabela 3.3 – Matriz de ensaios, adaptado de [25].

Experiência	*Velocidade de corte (m/min)*	*Avanço por dente (mm/dente)*	*Avanço axial (mm/rotação orbital)*
1	100	0,05	0,10
2	100	0,01	0,10
3	300	0,05	0,10
4	300	0,01	0,10
5	300	0,05	0,05
6	300	0,01	0,05
7	100	0,01	0,05
8	100	0,05	0,05

Tabela 3.4 – Ordem de execução dos ensaios, adaptado de [25].

Repetição	*Ordem de execução dos ensaios*
1	1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8
2	8 – 7 – 6 – 5 – 4 – 3 – 2 – 1
3	5 – 4 – 6 – 3 – 7 – 2 – 8 – 1

As ferramentas utilizadas neste estudo para maquinar o híbrido CFRP + aço são ilustradas nas Figuras 3.23 e 3.31, respetivamente. Estas ferramentas são soluções comerciais normalmente propostas para a maquinagem de CFRPs e aço, respetivamente.

Figura 3.30 – Fresa para maquinagem de CFRP [25].

Figura 3.31 – Fresa para maquinagem de aço [25].

As Figuras 3.32 e 3.33 apresentam a evolução do desgaste da ferramenta após dois furos realizados, por cada ferramenta, sendo evidente o desgaste excessivo destas.

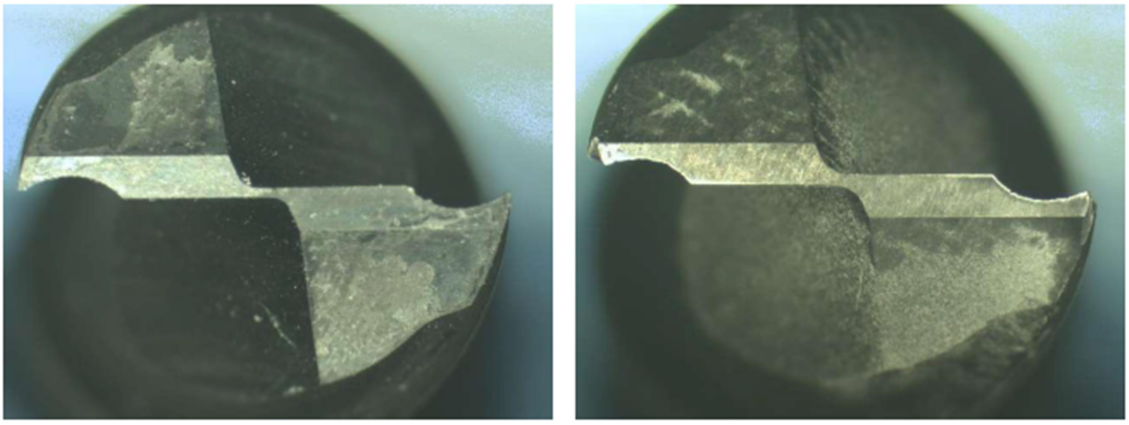


Figura 3.32 – Aspeto da ferramenta proposta para fresagem de aço: a) Ferramenta nova; b) ferramenta após realização de dois furos [25].

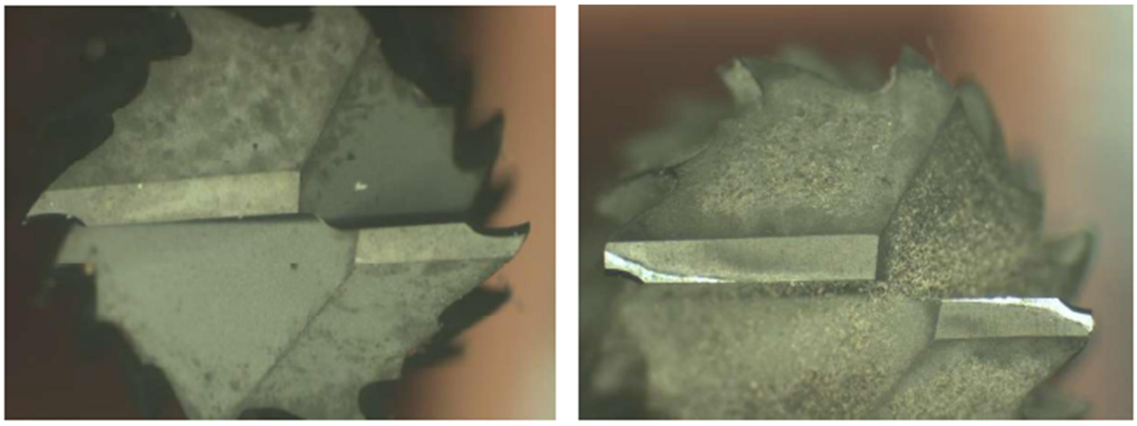


Figura 3.33 – Aspeto da ferramenta proposta para fresagem de CFRPs: a) Ferramenta nova e b) Ferramenta após realização de três furos [25].

Na Tabela 3.5 são apresentadas as dimensões das ferramentas utilizadas no estudo.

Tabela 3.5 – Dimensões das fresas utilizadas, adaptado de [25].

	Diâmetro da haste [mm]	*Diâmetro do corpo [mm]*	*Comprimento do corpo [mm]*	*Comprimento total [mm]*	*Ângulo da hélice [º]*
Fresa para CFRP	6	6	18	50	25
Fresa para Aço	6	6	10	57	30

As Figuras 3.34 e 3.35 mostram a comparação da evolução das forças axiais exercidas na furação com a ferramenta para aço e CFRP, respetivamente. As forças axiais geradas pela ferramenta para CFRP foram maiores do que as resultantes com as ferramentas para aço.

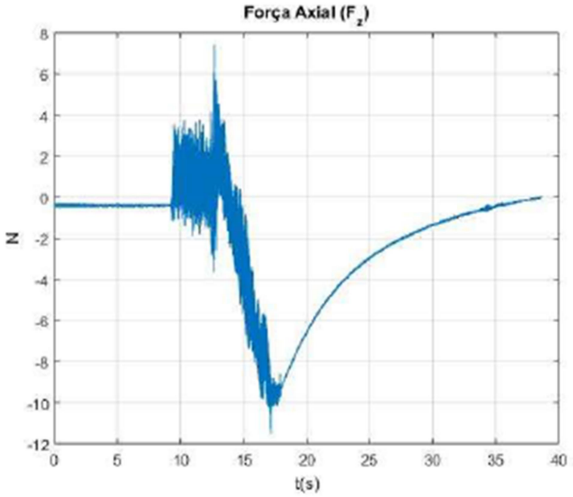


Figura 3.34 – Esforço axial (repetição 1; ensaio 1) [25].

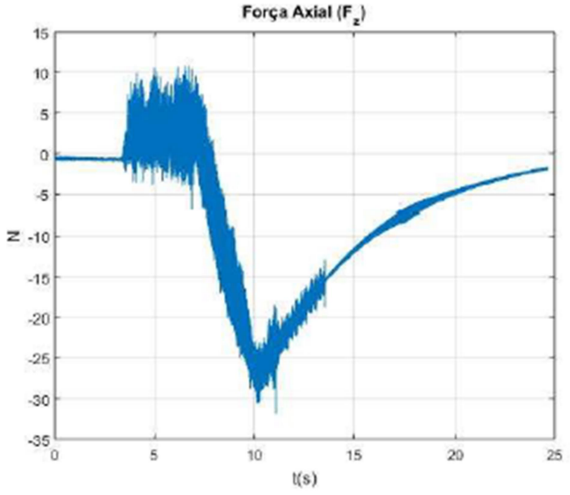


Figura 3.35 – Esforço axial (repetição 1; ensaio 4) [25].

Na Figura 3.36 é possível verificar o sobreaquecimento na zona do aço maquinado com a ferramenta para aço.

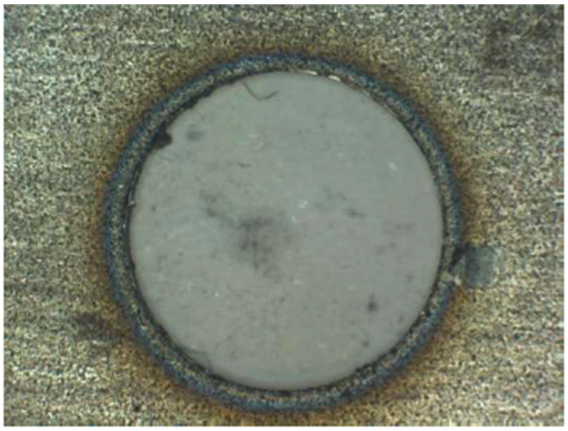


Figura 3.36 – Dano de sobreaquecimento mais severo na zona do aço, quando maquinada com a ferramenta para aço (repetição 2; ensaio 2) [25].

A Figura 3.37 expõe a visualização por microscópio da superfície do furo, sendo possível verificar o dano por sobreaquecimento na zona do aço, cavidades provenientes do processo de cura na prensa de pratos quentes do material híbrido e alguns danos por delaminação à entrada do compósito.

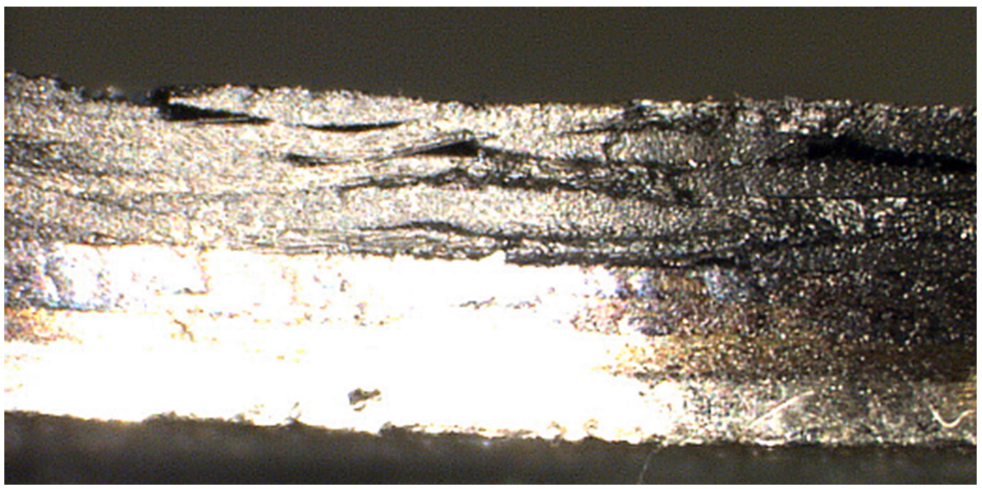


Figura 3.37 – Imagem microscópio (repetição 2; ensaio 2)

Com a ferramenta para CFRP, a Figura 3.38 mostra alguns danos à entrada do furo, na zona do compósito, nomeadamente delaminação e fibras por cortar.

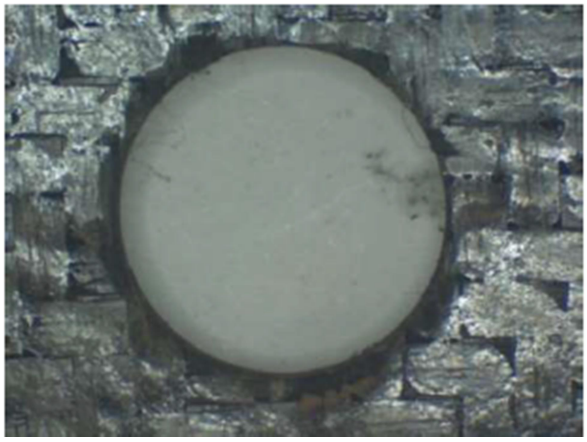


Figura 3.38 – Entrada do furo (repetição 3, ensaio 3) com a menor qualidade (Ferramenta CFRP) [25].

O sobreaquecimento na zona do aço foi também verificado na furação com ferramentas para CFRP, como mostra a Figura 3.39. Na Figura 3.40é visualizada através de microscópio ótico a superfície do furo sendo evidente cavidades devido ao processo de cura, arrancamento de fibras, sobreaquecimento na zona do aço e delaminação à entrada.

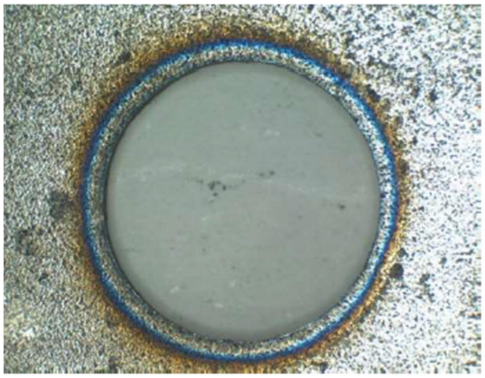


Figura 3.39 – Sobreaquecimento na zona de aço maquinada com a ferramenta para CFRP (repetição3, ensaio 3) [25].

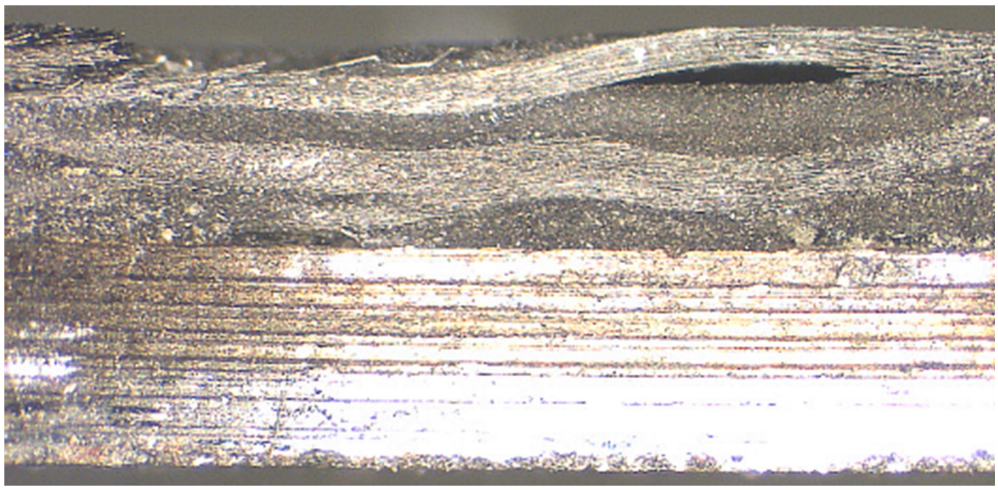


Figura 3.40 – Imagem microscópio (repetição 3; ensaio 3).

Os esforços máximos absolutos axiais apresentam menores valores durante a furação com recurso a ferramentas para aço, quando comparado com as ferramentas para CFRP como é verificado na Figura 3.41.

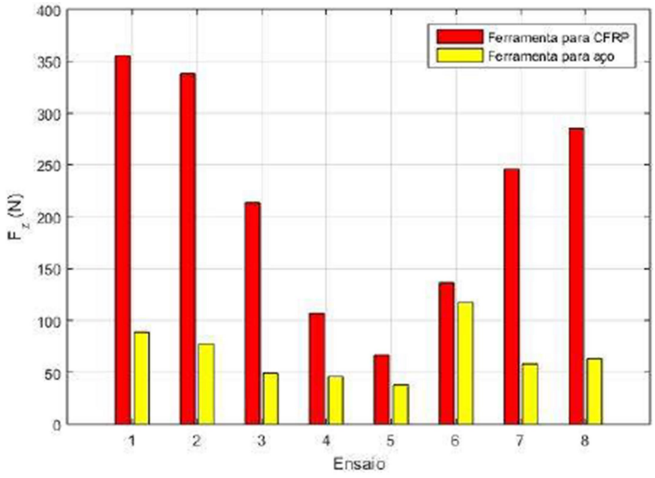


Figura 3.41 – Comparação do esforço máximo absoluto [25].

Kolesnyk *et al.* [66] analisaram os efeitos da temperatura de corte na vida das ferramentas de metal duro no processo de furação convencional de híbridos CFRP/Aço. Neste estudo foi utilizado duas ordens de furação: CFRP/Aço e Aço/CFRP. Da investigação concluíram, que as temperaturas de corte mais elevadas ocorriam na sequência CFRP/Aço, como é possível verificar nas Figuras 3.42 e 3.43. Também, visualizaram que o desgaste das ferramentas, representado na Figura 3.44, aumenta consoante o número de furos realizados, sendo que a taxa de desgaste diminui em relação a estes. O maior desgaste das ferramentas foi verificado na sequência de furação CFRP/Aço. As Figuras 3.45 e 3.46 apresentam as forças axiais e temperaturas de corte em relação à profundidade de corte durante o furo nº 17 e o furo nº 37, respetivamente.

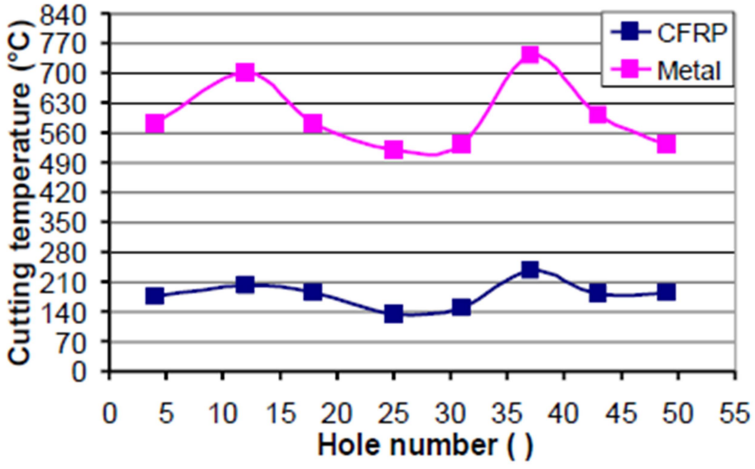


Figura 3.42 – Temperaturas de corte em relação ao número de furos [66].

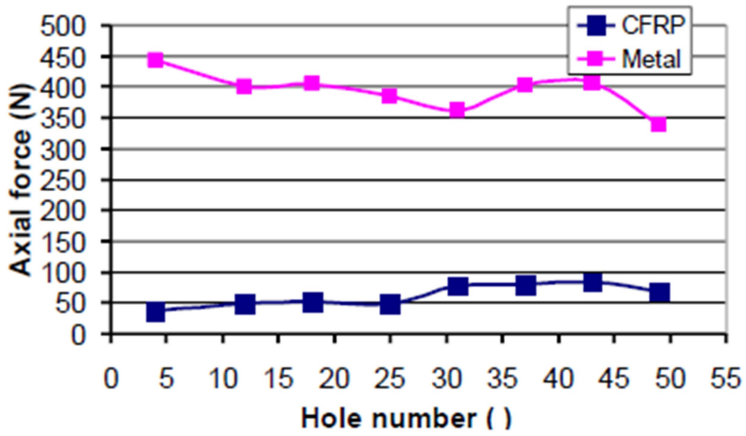


Figura 3.43 – Forças axiais em relação ao número de furos [66].

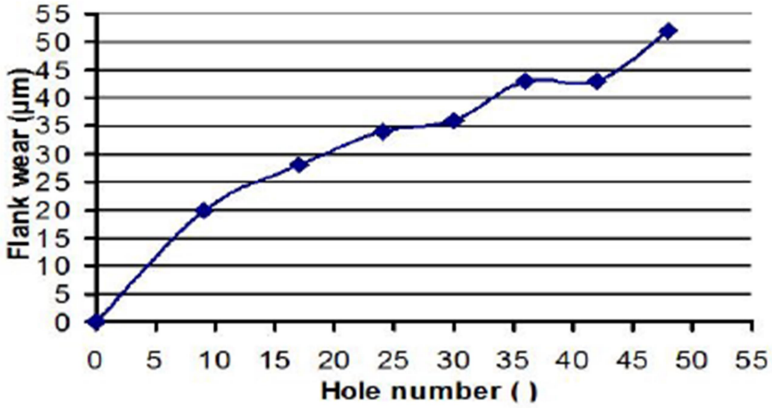


Figura 3.44 – Evolução do desgaste das ferramentas em relação ao número de furos [66].

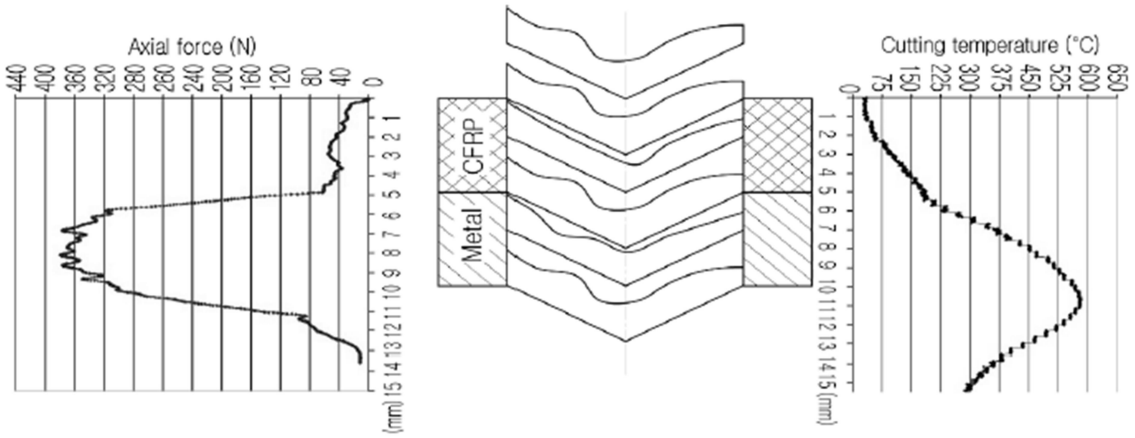


Figura 3.45 – Forças axiais e temperaturas de corte em relação à profundidade de corte durante o furo nº 17 com ferramentas de metal duro [66].

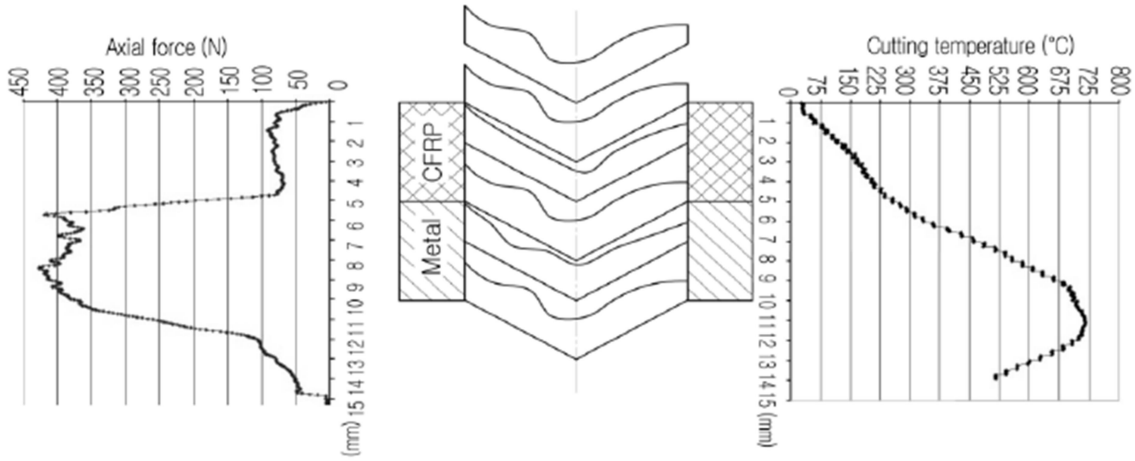


Figura 3.46 – Forças axiais e temperaturas de corte em relação à profundidade de corte durante o furo nº37 com ferramentas de metal duro [66].

Bleicher *et al.* [67] investigaram a furação assistida por vibração em híbridos CFRP/aço, a baixas frequências e elevadas amplitudes. O objetivo deste estudo passa por melhorar a formação das aparas de forma a obter uma dimensão apropriada para reduzir as forças de corte e por consequência melhorar o tempo de vida da ferramenta.

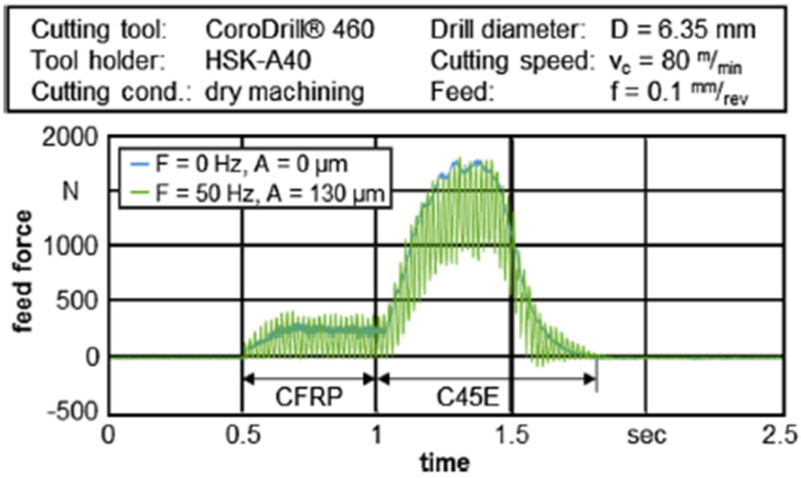


Figura 3.47 – Força axial na furação convencional (Azul) e na furação assistida por vibrações (Verde) por tempo [67].

Da Figura 3.47 é possível verificar que apesar da força axial ser ligeiramente superior na furação assistida por vibrações na zona do compósito, a força axial média, de uma forma global, é reduzida significativamente. Quanto ao desgaste da ferramenta, a Figura 3.48 demonstra que a furação assistida resulta num menor desgaste com um comportamento mais estável.

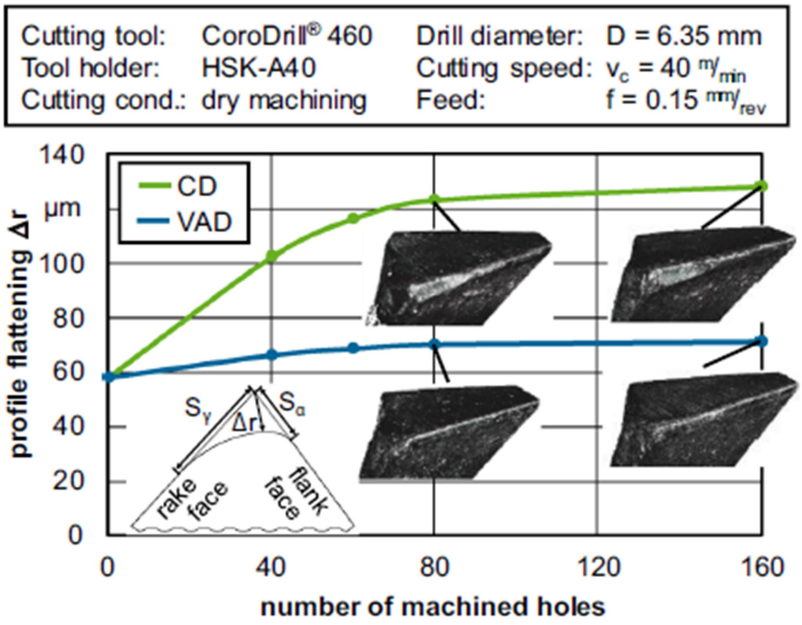


Figura 3.48 – Desenvolvimento do desgaste da ferramenta na furação convencional (CD) e na furação assistida por vibrações (VAD) em função do número de furos [67].

3.8. Análise da Delaminação

A delaminação é uma falha entre camadas no compósito causado pela furação [68]. Segundo Persson *et al*. [69], que investigaram os efeitos dos furos maquinados em laminados de compósitos na resistência mecânica e à fadiga, a delaminação é considerado o dano mais preocupante em termos de furação de compósitos. Esta consideração é feita noutros estudos [70-72].

Quando a delaminação ocorre na parte superior do laminado, ou seja, na entrada da ferramenta de corte no compósito é intitulada de *peel-up delamination*, pois o movimento de rotação tende a puxar as camadas. Quando ocorre na parte inferior do compósito, ou seja, à saída é intitulada de *push-down delamination*, visto que empurra as camadas [47]. Esta última representa o dano mais severo, pois afeta substancialmente as propriedades mecânicas do compósito [68]. Estes tipos de delaminações podem ser visualizados na Figura 3.49.

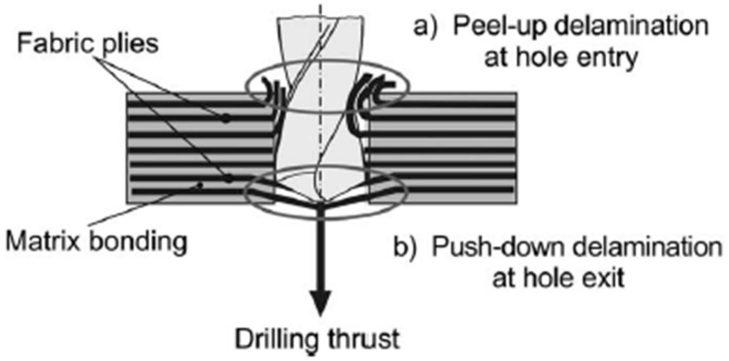


Figura 3.49 – Classificação da delaminação [47].

A delaminação à entrada está associada à combinação do ângulo da hélice, do binário de corte e da geometria da ferramenta, que resulta em fraturas em modo I e III, ver Figura 3.50(a). A delaminação à saída ocorre quando a última camada do compósito não é suportada à medida que a ferramenta sai do compósito, que provoca fraturas no modo I e II, ver Figura 3.50(b).

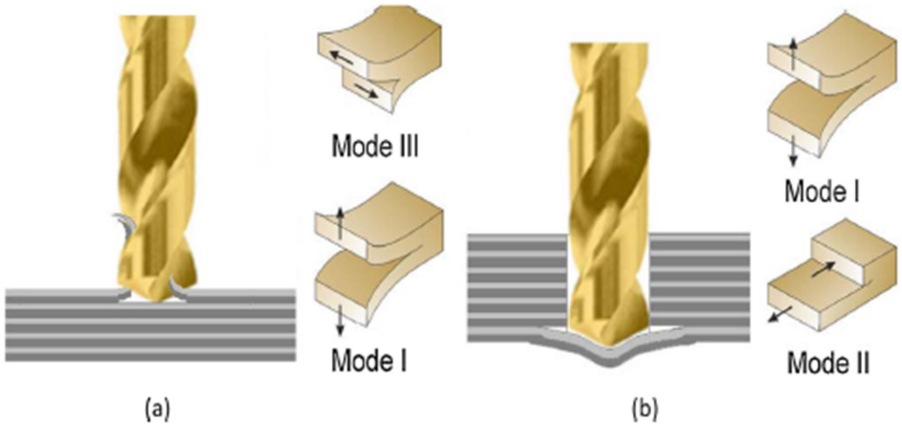


Figura 3.50 – Modos de fratura na delaminação à entrada (a) e na delaminação à saída (b) [42].

As elevadas forças axiais durante a furação aparentam ser a principal causa para ocorrer a delaminação. Foram efetuados inúmeros estudos para tentar mitigar este problema com recurso a diferentes estratégias. Hocheng *et al.* [73] investigaram diferentes processos e estratégias de furação convencional e não convencional, com diferentes ferramentas de corte, a fim de eliminar os danos por delaminação durante a furação de materiais compósitos. Os investigadores concluíram que existe uma relação entre as forças axiais submetidas ao compósito e a extensão da delaminação. Esta correlação pode ser encontrada noutros estudos [74, 75].

Foi analisado por vários investigadores o efeito dos parâmetros de corte na ocorrência da delaminação e atribuem ao avanço axial a maior importância no aumento das forças axiais, na furação convencional, para qualquer velocidade de corte [68, 76]. Sorretino *et al.* [77] investigaram um novo método para reduzir a delaminação durante a furação de compósitos através do controlo do avanço axial. Neste estudo são utilizados dois tipos de avanços axiais durante a realização do furo, sendo que no início da furação é usado um determinado avanço e, posteriormente, avanços mais baixos à saída da ferramenta do compósito, a fim de reduzir a delaminação à saída. Deste estudo foi obtido uma redução da delaminação à saída de 27% em compósitos de fibra de vidro (GFRP) e 37% em CFRP.

Outro estudo, neste sentido, foi efetuado por Geier *et al.* [37], onde investigaram a otimização dos parâmetros de corte na furação convencional e orbital de CFRP. Deste estudo concluíram que os parâmetros de corte que influenciam mais as forças axiais é o avanço axial, na furação convencional, e o avanço axial por rotação orbital, na furação orbital. Esta última pode ser verificada na dissertação efetuada por Rodrigues [25]. Destes estudos mencionados, é possível concluir que há uma forte aposta em tentar reduzir os danos por delaminação. Segundo Krishnaraj *et al.* [78] este defeito conduz a uma taxa de rejeição de aproximadamente 60% dos componentes na indústria aeronáutica. Desta forma, qualquer dano associado a este representa um custo elevado, pois, normalmente, a furação é o processo final durante a montagem de componentes feitos de compósitos. Para aumentar a eficiência do processo de furação de compósitos com o mínimo de danos, é essencial efetuar um grande

número de experiências a fim de entender o comportamento do processo e estabelecer modelos representativos [41, 68].

No entanto, segundo Rodrigues [25], que estudou a furação orbital de híbridos fibra de carbono/aço, o dano mais preocupante verificado foi a degradação da matriz devido às elevadas temperaturas de corte. Estes danos térmicos resultam da fricção entre a ferramenta e o compósito e dependem principalmente da largura da margem em contacto com a superfície do furo, também associado a parâmetros de corte inadequados - velocidades de corte elevadas e baixos avanços axiais [42].

Chen [75] apresentou um factor de delaminação, F_d, que avalia e compara a extensão da delaminação proveniente da furação de compósitos. Vários estudos utilizam este conceito para quantificar a delaminação [71, 79]. Este é baseado numa medição unidimensional do diâmetro observado e é dado por:

$$F_d = \frac{D_{max}}{D_{nom}} \tag{3.11}$$

onde, D_{max} e D_{nom} são o diâmetro máximo da zona afetada e o diâmetro nominal do furo, respetivamente.

Contudo, o critério, F_d, baseado nos diâmetros da zona afetada apresenta, geralmente, incoerências devido à extensão da delaminação verificada por algumas fibras, que não representam, verdadeiramente, a zona de delaminação na periferia do furo. Estes pormenores podem ser observados na Figura 3.50.

Desta forma, Mehta et al. [80] mostrou um critério bidimensional com o mesmo objetivo mencionado anteriormente, intitulado de *Damage ratio,* D_{Rat}, que é definido pela relação entre a área do dano na periferia do furo, D_{Mar}, e a área nominal do furo, A_{Avg}. A equação é dada por:

$$D_{Rat} = \frac{D_{Mar}}{A_{Avg}} \tag{3.12}$$

Mais tarde, Davim *et al.* [81] apresentaram um novo método de avaliação da delaminação intitulado de *Adjusted Delamination Factor*, F_{da}, expressão (3.13).

$$F_{da} = \alpha \frac{D_{max}}{D} + \beta \frac{A_{max}}{A} \tag{3.13}$$

onde, A_{max} representa a área correspondente ao diâmetro máximo, D_{max}, da zona delaminada e A diz respeito à área nominal do furo. Neste critério, o primeiro termo equivale ao fator de delaminação convencional, F_d, e o segundo termo considera a área da zona danificada. Os parâmetros α e β são contribuições, sendo a sua soma igual a um. Faraz *et al.* [47] apresentou um critério de delaminação equivalente, DF, dado por:

$$DF = \left(\frac{A_{del} - A_{nom}}{A_{nom}}\right)\% \tag{3.14}$$

onde, A_{del} é a área periférica danificada, ilustrada na Figura 3.51, enquanto, A_{nom}, é a área nominal do furo.

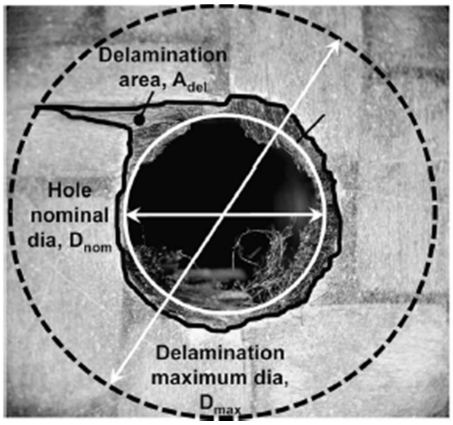


Figura 3.51 – Quantificação da delaminação [47].

3.9. Modelos de Danos

Dharan e Hocheng [82] conseguiram estabelecer conceitos onde a Mecânica da Fratura é empregue nos materiais compósitos. Neste estudo atribuíram a ocorrência da delaminação, em laminados unidirecionais, aos esforços axiais gerados pelo movimento de corte.

Mais tarde, Dharan e Hocheng [83] apresentaram o primeiro modelo numérico da força axial crítica baseado na Mecânica da Fratura para solucionar o problema. Este modelo foi desenvolvido para materiais isotrópicos, enquanto os compósitos são anisotrópicos. Dado que a fratura nos últimos é mais complexa do que nos isotrópicos, pois relaciona parâmetros como a orientação das fibras, ordem dos laminados e o comportamento mecânico entre as fibras, a matriz e a sua interface. Desta forma, desenvolveram uma equação (3.15) que demonstra a força axial crítica F_a, em [N], para ocorrer delaminação em função da espessura não cortada e das propriedades do compósito:

$$F_a = \left[\frac{8.G_{IC}.E.h^3}{3.(1-\upsilon^2)}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{3.15}$$

onde,

- E – Módulo de Young [GPa]
- υ – Coeficiente de Poisson
- h – Espessura não cortada [mm]

- G_{IC} – Tenacidade à fratura em Modo I do material [$MPa.\sqrt{mm}$]

Na furação de compósitos laminados, a espessura restante a cortar para suportar as forças de corte diminui à medida que a ferramenta se aproxima da saída. As últimas camadas podem ser separadas da sua ligação interlaminar à volta do furo. A certa altura, as forças de corte superam esta ligação e ocorre a delaminação, como mostra a Figura 3.52. Desta forma, para não ocorrer delaminação, o trabalho realizado pela força axial tem de ser inferior à tenacidade do material. Também investigaram o efeito do desgaste da ferramenta na delaminação, durante a furação de materiais compósitos. Foi concluído que o esforço axial crítico é maior quanto maior for o desgaste da ferramenta, no entanto a delaminação tem maior tendência a ocorrer, pois os esforços axiais aumentam em maior medida com o desgaste [84].

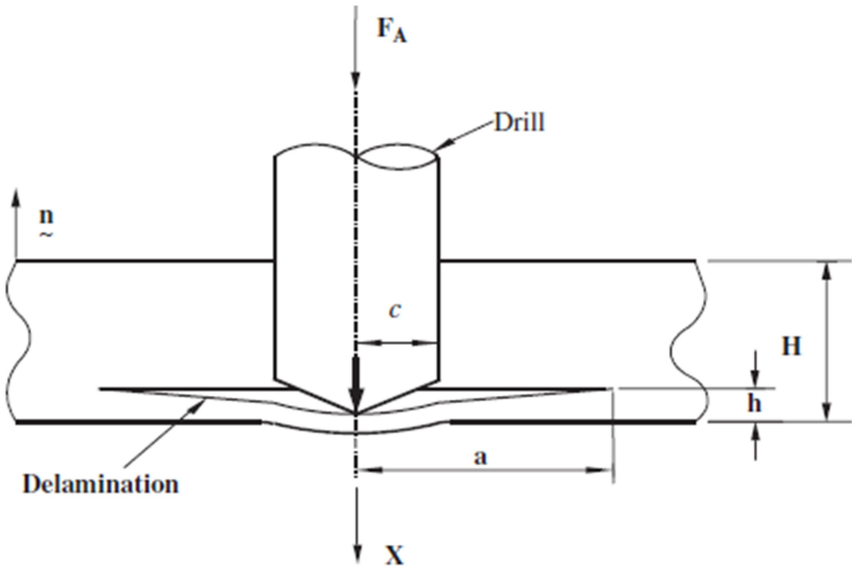


Figura 3.52 – Modelo de placa circular para análise da delaminação (broca helicoidal) [84].

Jain e Yang [85, 86] introduziram um critério que integra a anisotropia do material com a força axial localizada no centro. Neste critério a zona delaminada é considerada como uma forma aproximadamente elíptica, no que difere do proposto por Hocheng e Dharan [83], que assumiram a zona como uma forma circular. O critério em questão é mais realista para materiais compósitos com comportamentos quase isotrópicos do que compósitos unidirecionais. Nestes estudos, é desenvolvido um modelo de força crítica que incorpora a flexão e tração, normalmente, presentes na furação de CFRPs. O modelo é apresentado na expressão (3.16).

$$F_{crit} = \frac{3.\pi}{\xi}\sqrt{2.G_{IC}.D_C^*} \tag{3.16}$$

onde,

$$D_C^* = D_{11} + \frac{2.(D_{12} + 2.D_{66})}{3}\xi^2 + D_{22}\xi^4 \tag{3.17}$$

e, $\xi = a/b$ é o rácio elíptico, sendo que a representa o eixo maior da elipse e o b o eixo menor.

Os parâmetros D_{ij} representam os coeficientes de flexão da matriz de rigidez nas várias direções.

Até recentemente, os estudos sobre a furação de compósitos têm sido realizados, na maior parte, de forma experimental. A elaboração de procedimentos que permitem prever completamente os danos e forças de corte provenientes do processo de furação tem sido difícil de alcançar. As dificuldades acrescidas aliadas a um custo elevado das experiencias e o longo tempo de execução deram origem a novas técnicas para realizar os estudos, por meio de códigos de elementos finitos [87]. Na literatura, é possível encontrar vários estudos sobre modelos de simulação de furação de compósito. Phadnis *et al.* [88] propuseram um modelo 3D de furação em compósitos para prever a força axial crítica e o binário que provocam danos no compósito e validaram, com recurso a testes experimentais.

Wu *et al.* [89] estudaram métodos de simulações de elementos finitos, para prever as forças de corte na furação de CFRPs. Como base de comparação foi efetuado um teste experimental com os mesmos parâmetros de corte. No fim, a comparação entre o teste experimental e a simulação resultou num erro de 7.4%. Outro estudo de simulação foi realizado por Durão *et al.* [90] que estudaram a simulação numérica do processo de furação de compósitos fibra de carbono/epoxy, a fim de comparar a influência de diferentes geometrias de ferramentas no início e propagação dos danos associados.

3.10. Outros Estudos

Katiyar *et al.* [91] estudaram os modos de falha e desgaste em pontas de ferramentas de metal duro. Concluíram que para condições de furação abrasiva uma ferramenta em metal duro com baixa percentagem de Co e Ni e grãos muito finos resulta numa maior dureza da ferramenta e por consequência uma maior resistência ao desgaste. No entanto, a baixa percentagem destes materiais reduz a tenacidade da ferramenta. Com uma percentagem maior destas materiais de liga e com grãos grosseiros é possível obter uma boa resistência ao impacto. A Figura 3.53 apresenta uma ferramenta de corte para furação abrasiva.

Figura 3.53 – Ferramenta de corte em metal duro para furação abrasiva [91].

Shipway *et al.* [92] estudaram os mecanismos de desgaste nas ferramentas em metal duro com três tipos de partículas abrasivas (Diamante policristalino, carboneto de silício e alumina). A Tabela 3.6 apresenta as propriedades das ferramentas utilizadas neste estudo.

Tabela 3.6 – Propriedades das ferramentas em metal duro do estudo, adaptado de [92].

Tipo de ferramenta	*Tamanho de grão [μm]*	*Teor de Cobalto [wt%]*	*Dureza [GPa]*
S11F	<1	11	16,4
S6M	2 – 5	6	16,2
S11M	2 – 5	11	13,8
S11C	5 – 7	11	11,7
S24M	2 – 5	24	9,4

Na Figura 3.54 as ferramentas com maior dureza não apresentam a menor taxa de desgaste e, com o tamanho de grão constante, a taxa de desgaste aumenta com o aumento da percentagem de cobalto. Similarmente, com a percentagem de cobalto constante, o aumento do tamanho de grão diminui a taxa de desgaste [92].

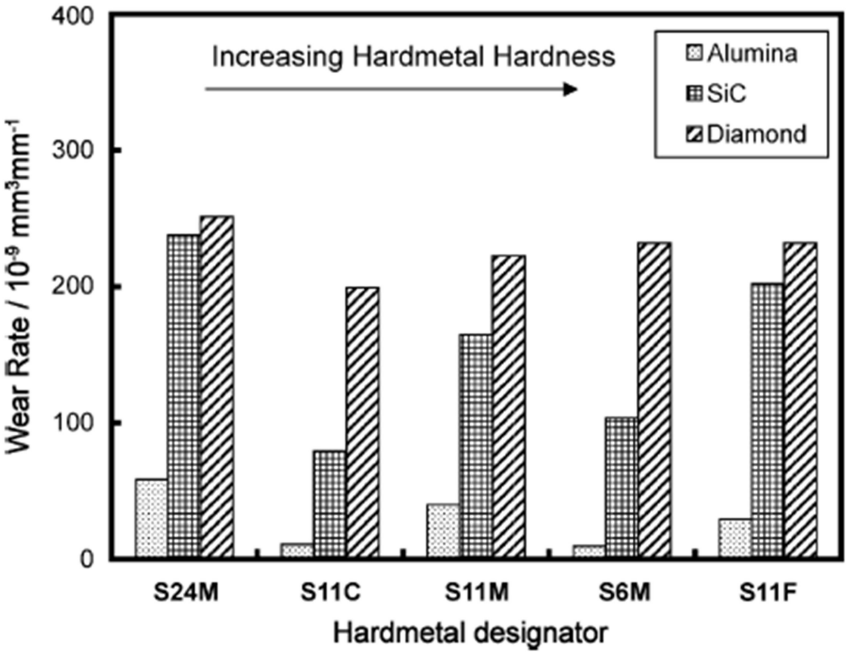


Figura 3.54 – Desgaste em furação abrasiva para vários tipos de metal duro: a dureza aumenta da esquerda para a direita [92].

4. Trabalho experimental

A investigação sobre furação de materiais híbridos compósito/metal revela ser de maior importância para as indústrias produtoras devido à crescente procura por novas soluções de materiais para optimizar os processos e reduzir custos. Normalmente, as ligações dos componentes de uma estrutura são aparafusadas e/ou rebitadas, sendo preponderante garantir uma boa qualidade dos furos com as tolerâncias exigidas, aliadas a uma boa produtividade. O objetivo desta dissertação passa por estudar diferentes geometrias de ferramentas visando o desenvolvimento de um processo de furação por etapas e verificar a qualidade dos furos obtidos, como também o desgaste das ferramentas. Para tal, foi proposta uma nova ferramenta que incorpora dois tipos de furação: a furação convencional/direta a furação orbital. O desenvolvimento desta ferramenta recai na dificuldade de maquinar materiais compósitos, pois por um lado estes são anisotrópicos e não homogéneos, sendo muito abrasivos para as ferramentas de corte durante a furação. Esta ferramenta permite realizar um processo de furação por etapas, que será pormenorizado mais à frente.

No presente capítulo é descrito detalhadamente os materiais utilizados, o fabrico dos materiais híbridos de CFRP/Aço usado neste estudo, as ferramentas desenvolvidas, os parâmetros de corte escolhidos, o equipamento de furação e a análise de esforços (forças e binários) e desgaste das ferramentas.

4.1. Compósito Híbrido CFRP/Aço

Este trabalho foi suportado por um conjunto de provetes produzidos em material híbrido CFRP/Aço, que foram fabricados por Rodrigues na sua dissertação de mestrado [25]. Assim sendo, são descritos os materiais e processo de fabrico dos provetes nas secções seguintes. O aço a utilizar tem a designação de SSAB Docol 600DP, sendo caracterizado por uma boa capacidade de conformação plástica e boa soldabilidade, características importantes na indústria automóvel. No entanto, este material apresenta uma grande sensibilidade a tratamentos térmicos (< 200 °C). Este aço consiste numa matriz de ferrite possuindo uma segunda fase de martensite. As propriedades deste aço são descritas na Tabela 4.1 e a ficha técnica pode ser consultada no Anexo A.

Os compósitos de fibra de carbono foram obtidos a partir de pré-impregnados de cura rápida da *Mitsubishi Rayon,* com a designação TR3523 361 GMP. Este pré-impregnado é apropriado para o processo de moldação por compressão. O tempo de cura recomendado é de 5 minutos, com uma temperatura de cura de 140 ºC e pressão entre os 3 e 10 MPa. A ficha técnica pode ser consultada no Anexo B, com outras recomendações. O tipo de fibra de carbono resulta de um percursor PAN, cuja designação é TR 30S 3L. A resina epóxi contida nos pré-impregnados tem a designação PYROFIL #360 /#361. As suas propriedades podem ser consultadas no Anexo C

Tabela 4.1 – Propriedades mecânicas e composição química (mássica) do aço SSAB Docol 600DP [25].

Propriedades	***SSAB Docol 600DP***
Espessura [mm]	1
Tensão de cedência $\sigma_{p\ 0.2}$ *[MPa]*	350 – 450
Tensão de rotura σ_m *[MPa]*	600 – 700
Extensão após rotura A80 [min %]	16
C [max %]	0,12
Si [max %]	0,40
Mn [max %]	1,00
P [max %]	0,025
S [max %]	0,010
Al [max %]	0,015
Nb+Ti [max %]	0,10

4.2. Fabrico dos Provetes

O processo de fabrico dos provetes teve por base os melhores resultados obtidos na dissertação efetuada por Monge [93]. Desta forma tiras de aço DP600, com as dimensões 350×40 mm^2, foram submetidas a tratamentos superficiais por granalhagem com partículas de alumina (Al_2O_3) na granalhadora *DE LAURENTIIS 70S GM*, apresentada na Figura 4.1. Este processo permite um aumento do nível de adesão entre o metal e o compósito.

.

Figura 4.1 – Granalhadora *DE LAURENTIIS 70S GM* [25].

De seguida, foi realizado uma limpeza das superfícies com um desengordurante e três camadas de pré-impregnado foram posicionados na sequência [+45º/-45º/+45º] sobre o metal. Posto isto, foi efetuado o processo de cura com a utilização de uma prensa hidráulica de pratos quentes *INTOCO*®, Figura 4.2. Este processo provém de um ciclo com uma rampa de aquecimento de 30 minutos até aos 120 °C, com estágio de 15 minutos nesta temperatura. Depois do estágio, os provetes são arrefecidos ao ar até à temperatura ambiente. No fim, os provetes apresentam uma espessura final de 1,65 mm, representados na Figura 4.3.

Figura 4.2 – Prensa hidráulica de pratos quentes *INTOCO*® [25].

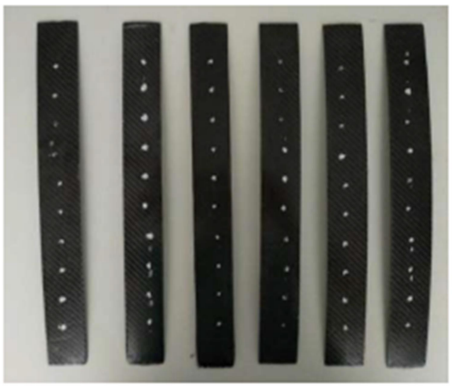


Figura 4.3 – Provetes híbridos CFRP-Aço.

4.3. Centro de Maquinagem

O processo de furação foi realizado no centro de maquinagem de cinco eixos DMU 60 eVo DECKEL MAHO, Figura 4.4, disponibilizado pelo INEGI. As ferramentas foram fixadas ao cone, tipo HSK, da máquina a partir de pinças ER32, Figura 4.5. As características da máquina são apresentadas na Tabela 4.2. Os códigos CNC necessários ao estudo foram realizados com recurso ao *software MasterCAM.*

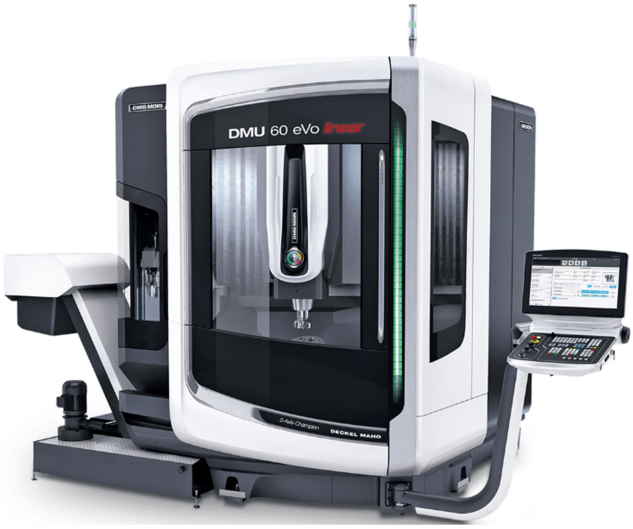


Figura 4.4 – DMU 60 eVo DECKEL MAHO.

Figura 4.5 – Pinças de fixação tipo ER.

Tabela 4.2 – Características da máquina CNC DMU 60 eVo DECKEL MAHO, adaptado de [25].

Eixos X, Y ambos arranjados como pórtico
Velocidade do spindle variável entre 20 e 18000 RPM
Peso de aproximadamente 9600 kg
Carga máxima na mesa de trabalho de 400 kg
Área de trabalho de 600 × 500 × 500 mm
Potência máxima do spindle de 25 kW
Binário máximo do spindle de 80 N.m
Capacidade para 30 ferramentas

4.4. Processo de Furação Orbital

Neste estudo é proposto um processo de furação composto por três etapas para obter o diâmetro final de 10mm, com uma ferramenta que possui uma ponta de broca incorporada numa fresa e permite realizar furação direta/convencional e orbital, através da sua geometria. A zona da broca apresenta um diâmetro de 5 mm, enquanto a zona da fresa tem um diâmetro de 6 mm. A primeira etapa consiste na furação convencional/direta e a segunda e terceira etapas correspondem à furação orbital. Para tal, usando as ferramentas definitivas, a etapa de furação direta corresponde à realização de um primeiro furo de 6 mm; na segunda e terceira etapas a ferramenta faz um recuo para posteriormente realizar uma furação orbital para o diâmetro de 8 mm e 10 mm respetivamente. Deste modo, a ferramenta permite remover grande parte do material na primeira etapa. A segunda etapa representa uma etapa intermédia onde é dada maior importância à minimização do desgaste da ferramenta, através da escolha adequada dos parâmetros de corte. A última etapa possibilita um acabamento superficial com a utilização de avanços mais baixos e velocidades de corte maiores.

A ordem de furação é CFRP/Aço, assim obtendo menor delaminação à saída, pois o aço funcionará como placa de suporte, como mencionado em [25]. Este processo de furação foi baseado em estudos recentes [33, 55, 64, 65], que realizaram furação orbital por etapas. A Figura 4.6 ilustra as diferentes etapas do processo de furação concebido para este projeto, sendo apresentada a designação de cada etapa na Tabela 4.3.

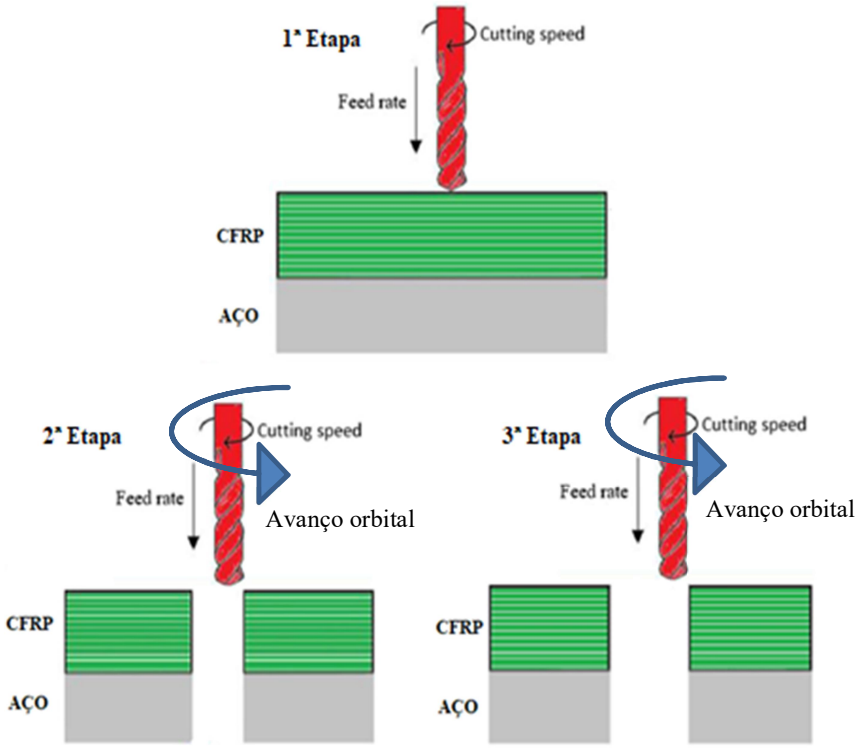


Figura 4.6 – Etapas do processo de furação: 1ª Etapa – Furo de 6 mm obtido por furação direta; 2ª Etapa – Furo de 8 mm obtido por furação orbital; 3ª Etapa – Furo de 10 mm obtido por furação orbital, adaptado de [64].

Tabela 4.3 – Etapas do processo de furação.

Etapa	*Designação*
1ª	Furação Convencional
2ª	Furação Orbital
3ª	Furação Orbital

O processo por etapas apresenta grandes vantagens como a redução das forças axiais em cada etapa subsequente, visto que por cada etapa é reduzido o volume de material a ser cortado pela ferramenta, sendo utilizado sobretudo o corte periférico na fresagem orbital com algum corte frontal. A etapa final do processo resulta em menores temperaturas de corte, que promove furos de melhor qualidade [33, 64, 65].

4.5. Fabrico das Ferramentas

A ferramenta foi desenvolvida de forma a incorporar dois processos de furação: a furação convencional ou direta e a furação orbital. Foi escolhido um diâmetro de 6 mm, para as ferramentas de corte, e um diâmetro do furo a realizar igual a 10 mm. Foi criada uma matriz da geometria da ferramenta com diferentes parâmetros geométricos como o ângulo da hélice e o ângulo de ataque. As ferramentas foram fabricadas integralmente em metal duro (7% Co+WC+1-2% outros carbonetos), com tamanho de grau aproximado de 0,8 μm. Estas possuem duas arestas de corte na zona da broca e quatro arestas de corte na zona da fresa. A composição do material da ferramenta pode ser consultada no Anexo D. Neste estudo foram produzidas ferramentas para ensaios preliminares de maquinagem e após estes ensaios, foram produzidas novas ferramentas para o estudo final. As ferramentas utilizadas nos testes preliminares não foram revestidas e as ferramentas utilizadas nos testes finais foram revestidas com AlTiN. A ficha técnica do revestimento pode ser consultada no Anexo E.

O desenvolvimento e fabrico das ferramentas utilizadas nesta dissertação foram efetuados pela empresa *Palbit*, s.a. Para o efeito foi utilizada uma máquina STRAUSAK *U-Grind series 5 axes CNC-Tool grinders*, Figura 4.7 e 4.8, onde é possível desenvolver e simular o processo na totalidade a partir do *software* incorporado *NUMroto Plus*. As características da máquina são apresentadas na Tabela 4.4.

Figura 4.7 – STRAUSAK U-Grind series 5 axes CNC-Tool grinders [94].

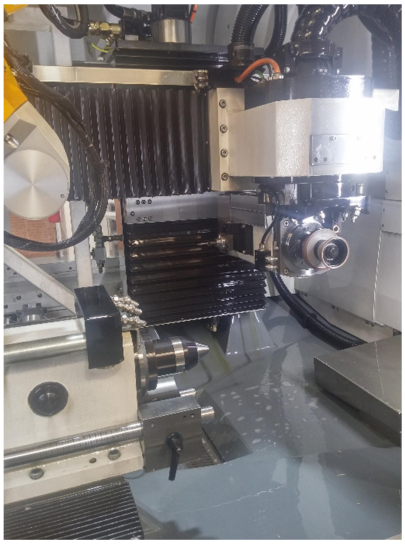


Figura 4.8 – Área de trabalho da máquina STRAUSAK U-Grind series 5 axes CNC-Tool grinders.

A evolução no desenvolvimento das ferramentas passou por várias etapas, sendo que as ferramentas preliminares serviram para testar a sua funcionalidade e melhorar o processo de fabrico das ferramentas finais.

A sequência de fabrico das ferramentas passa por desenvolver em primeiro lugar a variação brusca do diâmetro da broca até ao diâmetro da fresa. Seguidamente é realizada a fresa com o ângulo de hélice e com o ângulo de ataque definido. Por último, é realizada a ponta da ferramenta, para furação direta, com o ângulo de ponta de 118º predefinido. Esta sequência pode ser visualizada nas Figuras 4.9. As Figuras 4.11 e 4.12 apresentam a exemplificação do ângulo de hélice e do ângulo de ataque na ferramenta B, respetivamente.

Tabela 4.4 – Características da máquina STRAUSAK U-Grind seriem 5 axes CNC-Tool grinders

Grinding Capacity
Diâmetro máximo da ferramenta (produção) de 32 mm
Diâmetro máximo de afiação da ferramenta de 150 mm
Comprimento máximo da ferramenta de 500 mm
Eixos axiais
Avanço rápido de 15 m/min
Resolução de 0,0001 mm
Eixos de rotação
Velocidade de rotação do eixo C de 2000 rpm
Resolução de 0,0001º
Grinding Spindle
Velocidade de rotação de 500 a 12000 rpm
Potência máxima do spindle de 12 kW
Binário máximo do spindle de 12,3 N.m
Diâmetro máximo da mó de 150mm
Controlo CNC
Controlo de interface NUMroto Plus
Dimensões
Comprimento de 2250 mm, largura de 2200 mm e altura de 2200 mm

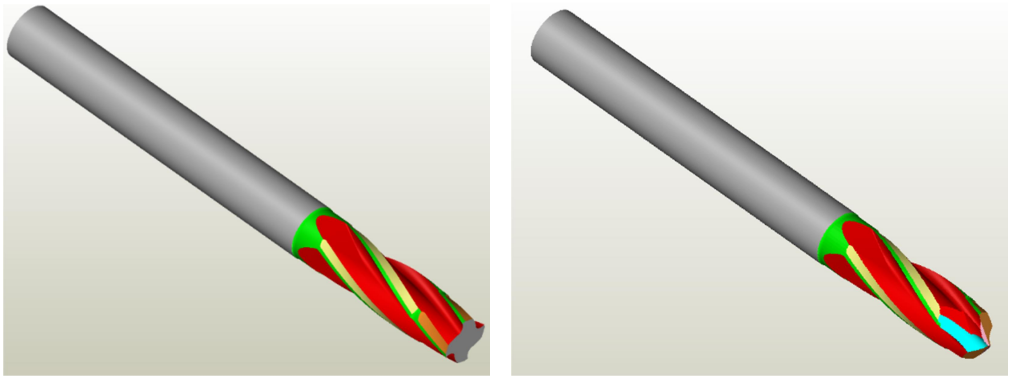


Figura 4.9 – Sequência do processo de fabrico da ferramenta de corte preliminar P1
(Esquerda: Fresa; Direita: Fresa com ponta de Broca).

Durante os testes preliminares realizados com a ferramenta P1, o tempo total de furação era muito longo; este rondava os 3 minutos para efetuar o furo final de 10 mm. O problema era apresentado no valor de *rough pass stepover* máximo, de 0,1 mm, que podíamos impor ao processo de furação, visto que a variação do diâmetro entre a broca e a fresa, era de 0,2 mm. Posto isto, foi desenvolvida uma nova ferramenta com a variação do diâmetro de 1 mm, que por sua vez possibilita impor avanços maiores no parâmetro de corte

rough pass stepover. Desta forma, os testes preliminares realizados com esta ferramenta possibilitaram efetuar furos com tempos a rondar os 50 segundos. A nova ferramenta desenvolvida, P2, é apresentada na Figura 4.10. Esta tem por base o mesmo processo de fabrico da ferramenta P1.

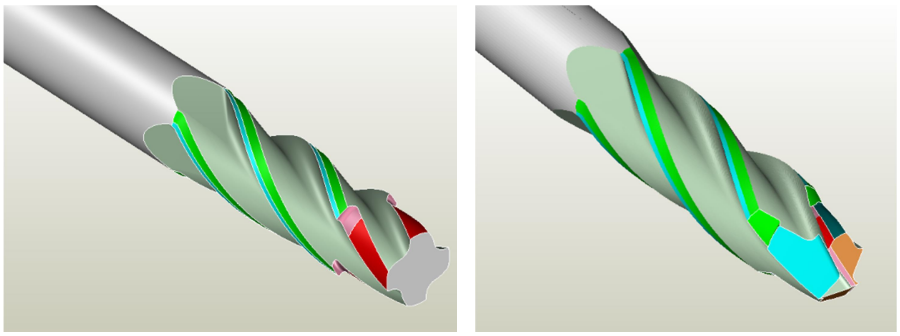


Figura 4.10 – Sequência do processo de fabrico da ferramenta de corte preliminar P2 (Esquerda: Fresa; Direita: Fresa com ponta de Broca).

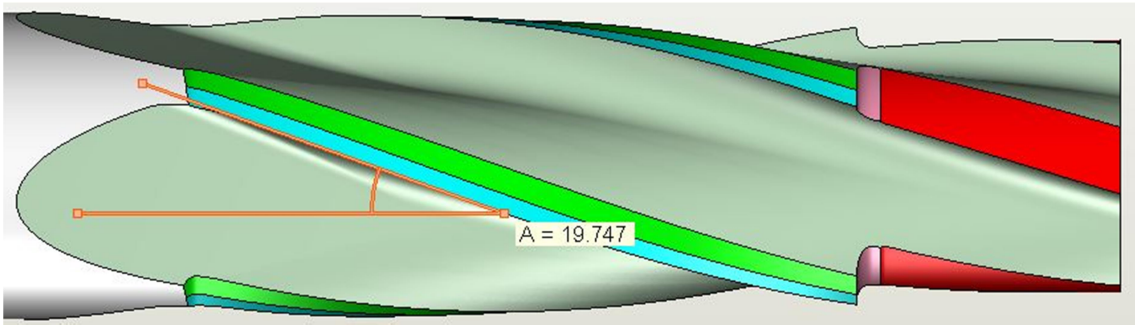


Figura 4.11 – Simulação do ângulo de hélice da ferramenta B.

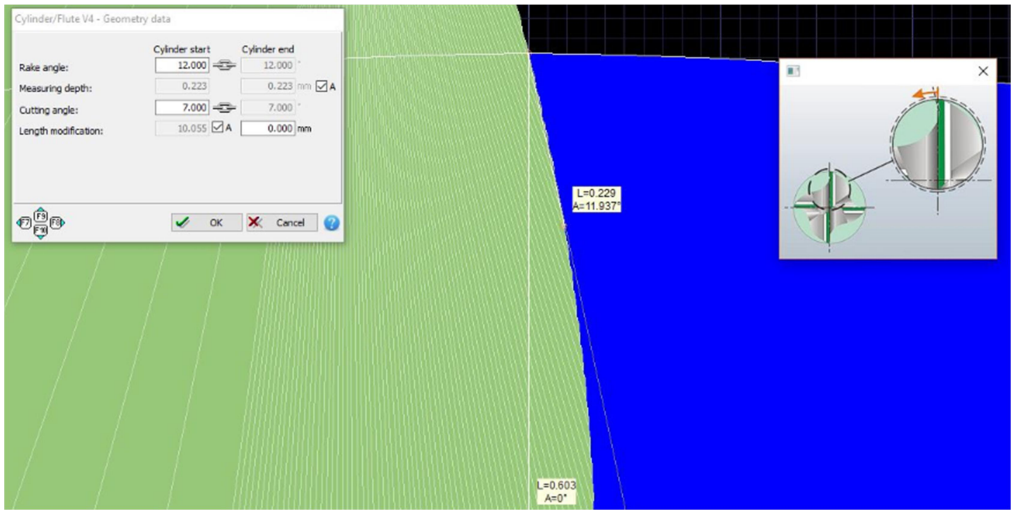


Figura 4.12 – Simulação do ângulo de ataque da ferramenta B.

As características das ferramentas utilizadas para os testes preliminares (ferramentas P1 e P2) são apresentadas na Tabela 4.5. As Figuras 4.13 e 4.14 apresentam uma ilustação das ferramentas preliminares desenvolvidas, com as dimensões nominais.

Tabela 4.5 – Características das ferramentas preliminares.

Designação	***P1***	***P2***
Ferramenta/Revestimento	Metal Duro/Sem Revestimento	Metal Duro/Sem Revestimento
Ângulo da hélice [º]	20	20
Ângulo de ataque [º]	12	12
Ângulo de ponta [º]	118	118
Diâmetro nominal da broca [mm]	5,6	5,0
Diâmetro nominal da fresa [mm]	5,8	6,0
Comprimento total do corpo [mm]	61	58
Comprimento da broca [mm]	5	5

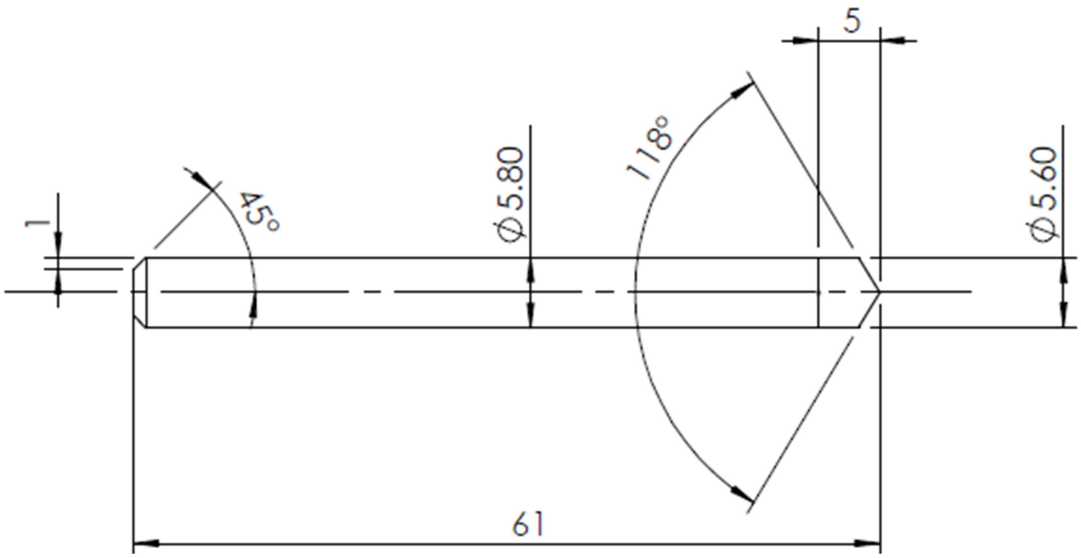


Figura 4.13 – Ilustração da ferramenta P1 com as dimensões nominais

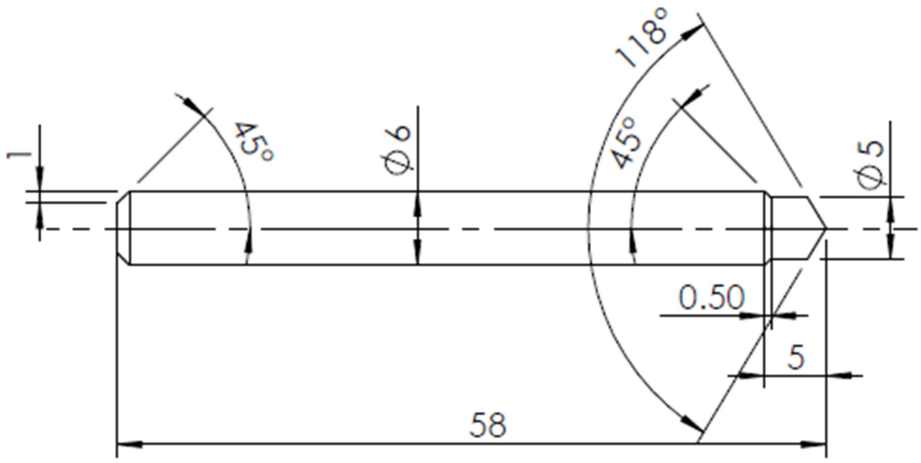


Figura 4.14 – Ilustração da ferramenta P2 com as dimensões nominais.

4.6. Ferramentas Finais

Depois de desenvolver as ferramentas preliminares e realizar os respetivos testes preliminares, foram produzidas as ferramentas finais do mesmo modo que foi fabricada a ferramenta P2. Da Figura 4.15 à Figura 4.18 são apresentados os desenvolvimentos das ferramentas de corte A e C e as respetivas vistas de topo. Como a alteração do ângulo de ataque é imperceptível nas Figuras, são exibidas as ferramentas que exibem um ângulo de hélice diferente, de 20º e 10º, ferramentas A e C, respetivamente. Na Tabela 4.6 são apresentadas as características das ferramentas finais.

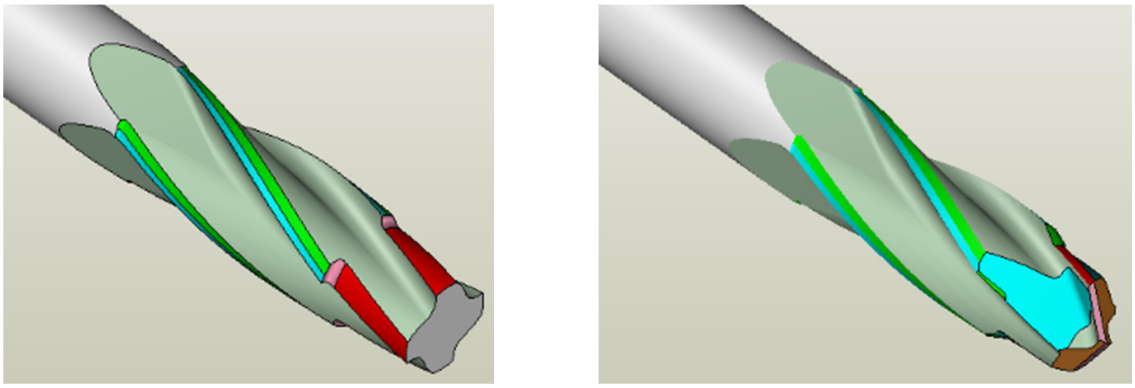


Figura 4.15 – Sequência do processo de fabrico da ferramenta de corte A (Esquerda: fresa; Direita: fresa com ponta de broca).

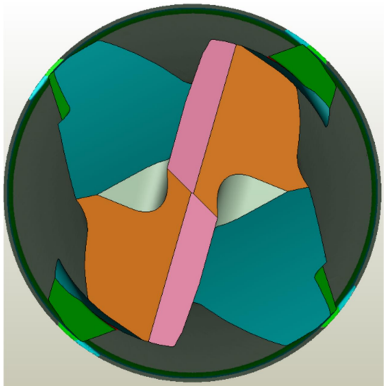


Figura 4.16 – Vista de topo da ferramenta de corte A.

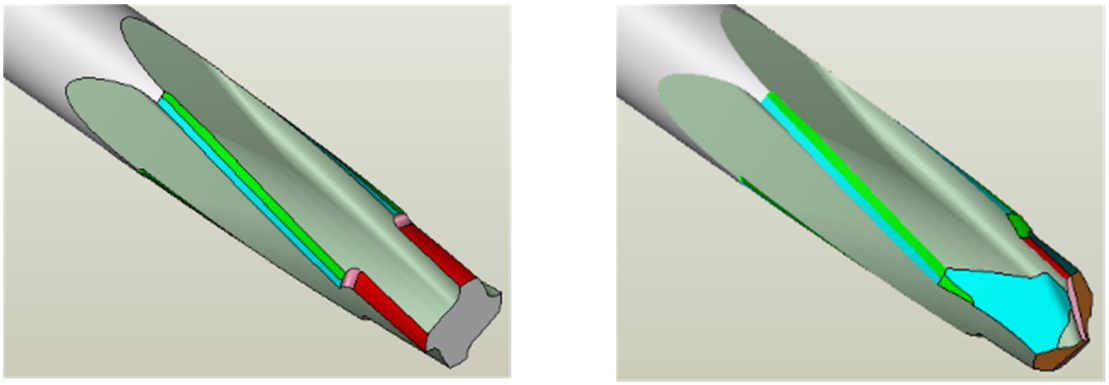


Figura 4.17 – Sequência do processo de fabrico da ferramenta de corte C (Esquerda: Fresa; Direita: fresa com ponta em de Broca).

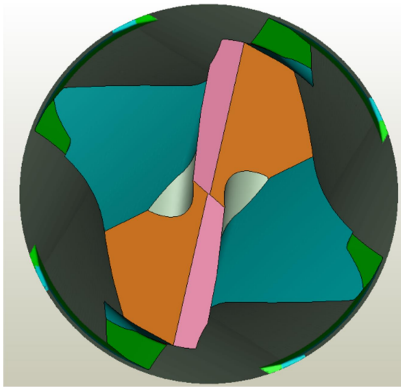


Figura 4.18 – Vista de topo da ferramenta de corte C.

Tabela 4.6 – Características das ferramentas finais.

Designação	***A***	***B***	***C***	***D***
Ferramenta/Revestimento	Metal Duro/TiAlN	Metal Duro/TiAlN	Metal Duro/TiAlN	Metal Duro/TiAlN
Ângulo da hélice [º]	20	20	10	10
Ângulo de ataque [º]	18	12	18	12
Ângulo de ponta [º]	118	118	118	118
Diâmetro nominal da broca [mm]	5,0	5,0	5,0	5,0
Diâmetro nominal da fresa [mm]	5,98	5,98	5,98	5,98
Comprimento do corpo [mm]	58	58	58	58
Comprimento da broca [mm]	5	5	5	5

4.7. Fixação da Célula de Carga e dos Provetes

A fixação da célula de carga foi feita por intermédio de uma base própria desenvolvida por Neto [94], visto que as dimensões e geometria da célula não permitem uma fixação direta à mesa de trabalho do centro de maquinagem. Para maquinar os provetes foi utilizado um mecanismo de fixação criado no decorrer da dissertação de Rodrigues [25], sendo apresentado na Figura 4.19. O respetivo desenho técnico deste pode ser consultado no Anexo F. o mecanismo contém uma ranhura (guia) que bloqueia o movimento lateral do provete durante a furação. A célula de carga é montada na base inferior do mecanismo de fixação através de quatro parafusos M8 embebidos com um binário de aperto de 20 N.m, sendo a parte superior fixa com recurso a quatro parafusos M6 com um binário de aperto de 6 N.m. A parte superior garante o posicionamento dos provetes na ranhura do mecanismo de fixação. O furo central do mecanismo de fixação e da tampa corresponde a um diâmetro de 11 mm, para ser possível à ferramenta de corte atravessar o conjunto e realizar um furo com diâmetro final de 10 mm no material híbrido. A Figura 4.20 apresenta o *setup* do ensaio preliminar, que será utilizado nos ensaios finais.

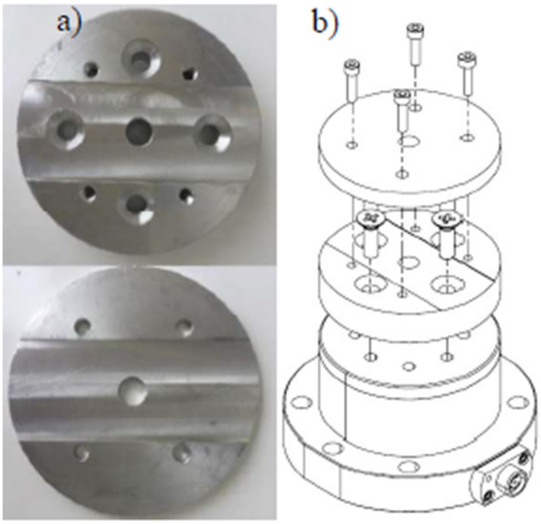


Figura 4.19 – a) Mecanismo de fixação em liga de alumínio; b) Vista explodida da montagem da célula de carga no mecanismo de fixação [25].

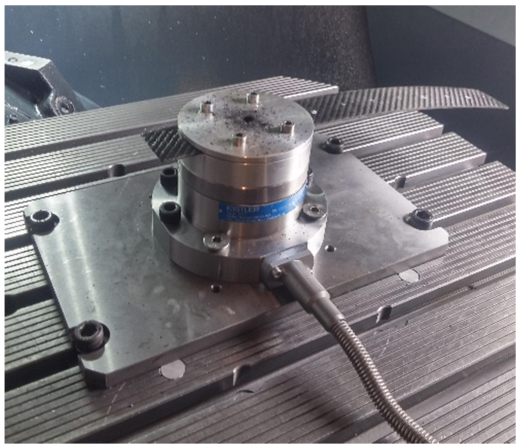


Figura 4.20 – *Setup* do ensaio preliminar.

4.8. Aquisição de Dados

A medição das forças de corte e binários foi feita através de uma célula de carga KISTLER 9272, Figura 4.21(a), onde a ficha técnica pode ser consultada no Anexo G. A célula de carga é, de facto, um dinamómetro piezoeléctrico que mede os esforços nas três direções ortogonais e o binário segundo o eixo vertical. Para os ensaios de furação, foi de maior interesse medir os esforços associados, pois sendo o material híbrido composto por dois materiais com propriedades mecânicas e comportamentos durante a maquinagem completamente diferentes, será de esperar uma deteção clara da transição entre materiais, pela análise desses esforços. Para amplificar o sinal, foi utilizado um amplificador KISTLER 5070A, Figura 4.21(b), sendo os dados recolhidos e enviados para um computador a partir de uma carta de aquisição de dados ADVANTECH USB-4711A, Figura 4.21(c). Deste modo, é possível visualizar os esforços de corte em tempo real, sendo estes armazenados para futura

análise. A Tabela 4.7 apresenta os parâmetros de configuração utilizados na célula de carga e amplificador.

a) b) c)

Figura 4.21 – (a) Célula de carga KISTLER 9272; (b) Amplificador KISTLER 5070A; (c) Carta de aquisição de dados *ADVANTECH* USB-4711ª.

Tabela 4.7 – Dados utilizados nos dispositivos de medição das cargas.

Designação	***Binário***	***Força axial***	***Força radial y***	***Força radial x***
Unidade	N.m	N	N	N
Limite máximo [V]	20	2000	1000	1000
Fator de conversão	2 N.m/V	200 N/V	100 N/V	100 N/V
Frequência de aquisição [Hz]	2000	2000	2000	2000
Período [s]	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005

4.9. Parâmetros de Corte

Os parâmetros de corte foram selecionados de acordo com estudos efetuados sobre a furação orbital de CFRP e híbridos CFRP/Metal. A seleção dos parâmetros de corte teve por base as propriedades mecânicas dos materiais a furar e as exigências de maquinagem destes, sendo que o aço é considerado dúctil enquanto a fibra de carbono é um material frágil e muito rígido. Devido à espessura reduzida dos provetes, os parâmetros de corte foram escolhidos sobretudo para garantir uma furação adequada da fibra de carbono. Para além das exigências dos vários materiais, foram também consultados vários estudos sobre a maquinagem de CFRP e híbridos CFRP/Metal, para averiguar quais os parâmetros de corte e geométricos utilizados nessas pesquisas. É de referir, que são utilizados a velocidade de corte (v_c), o avanço tangencial por dente (f_{zt}), a profundidade de corte por rotação orbital (a_p) e o *rough pass stepover* como parâmetros de corte.

Nas Tabelas 4.8, 4.9 e 4.10 são apresentados os parâmetros mencionados em estudos de furação convencional, orbital e fresagem.

Tabela 4.8 – Parâmetros de corte usados na furação convencional, segundo vários estudos.

Referência	*Diâmetro [mm]*	*Ferramenta/Revestimento*	*Z*	V_c *[m/min]*	*Avanço [mm/rot]*	*Material a furar*
[45]	6,35	Metal Duro/TiN/PCD	4	60	0,0485	CFRP
[50]	12	Metal Duro	2	100	0,05	CFRP
[54]	6,35	Metal Duro/PCD	2	90	0,06	CFRP
[63]	6,35	Metal Duro/PCD	2	30 – 120	0,064 – 0,32	CFRP
[66]	10	Metal Duro	2	25	0,02	CFRP/Aço
[95]	6	Metal Duro	2	25 – 100	0,05 – 0,15	CFRP
[96]	6	Metal Duro/CVD	2	90	0,1 – 0,3	CFRP

Tabela 4.9 – Parâmetros de corte usados em furação orbital segundo vários estudos.

Referência	*Ferramenta/Revestimento*	*Z*	V_c *[m/min]*	*Avanço por dente tangencial [mm/dente]*	*Avanço axial [mm/rot. orbital]*	*Material a furar*
[25]	Metal Duro/ TiAlN	2	100 – 300	0,01 – 0,05	0,05 – 0,10	CFRP/Aço
[30]	Metal Duro/ TiAlN	3	75 – 150	0,02 – 0,04	0,1 – 0,25	CFRP
[38]	Metal Duro/ TiAlN	4	75 – 113	0,02 – 0,06	0,1 – 0,2	CFRP
[39]	Metal Duro	4	113 – 188	0,03 – 0,04	0,15 – 0,20	CFRP
[40]	Metal Duro/ TiAlN	4	75 – 125	0,02 – 0,06	0,1 – 0,2	CFRP
[58]	Metal Duro	4	90 – 150	0,03 – 0,06	0,3 – 0,6	CFRP/Al
[60]	Metal Duro	4	56 – 141	0,03 – 0,06	0,1 – 0,15	CFRP/Ti

Tabela 4.10 – Parâmetros de corte usados em fresagem, segundo vários estudos.

Referência	*Diâmetro [mm]*	*Ferramenta/Revestimento*	*Z*	V_c *[m/min]*	*Avanço por dente tangencial [mm/dente]*	*Material a furar*
[57]	6,35	Metal Duro	4	78,5	0,02	CFRP
[62]	12	Metal Duro	2	160 – 200	0,125 – 0,25	CFRP

Tendo em conta a extensão e diversidade dos parâmetros de corte apresentados nos estudos, foram realizados testes preliminares como uma forma de auxílio à seleção dos parâmetros adequados. Os parâmetros de corte utilizados nos ensaios preliminares serão apresentados no próximo capítulo. Os parâmetros de corte escolhidos para realizar os ensaios finais são apresentados nas Tabelas 4.10, 4.11 e 4.12.

Tabela 4.11 – Parâmetros de corte selecionados para as ferramentas A1, B1, C1 e D1.

Ensaio	$Ø_{nom}$ *[mm]*	V_c *[m/min]*	f_z *[mm/dente]*	a_p *[mm/rot.orbital]*	*Rough pass stepover [mm]*	f_z *[mm/dente]*
1ª Etapa (Furação Convencional)	6	100	–	–	–	0,1
2ª Etapa (Furação Orbital)	8	100	0,05	0,1	0,5	–
3ª Etapa (Furação Orbital)	10	300	0,05	0,05	0,25	–

Tabela 4.12 – Parâmetros de corte selecionados para ferramenta A2.

Ensaio	$Ø_{nom}$ *[mm]*	V_c *[m/min]*	f_z *[mm/dente]*	a_p *[mm/rot.orbital]*	*Rough pass stepover [mm]*	f_z *[mm/dente]*
1ª Etapa (Furação Convencional)	6	100	–	–	–	0,1
2ª Etapa (Furação Orbital)	8	100	0,05	0,1	0,5	–
3ª Etapa (Furação Orbital)	10	300	0,05	0,05	0,5	–

Tabela 4.13 – Parâmetros de corte selecionados para ferramenta A3.

Ensaio	$Ø_{nom}$ *[mm]*	V_c *[m/min]*	f_z *[mm/dente]*	a_p *[mm/rot.orbital]*	*Rough pass stepover [mm]*	f_z *[mm/dente]*
1ª Etapa (Furação Convencional)	6	100	–	–	–	0,1
2ª Etapa (Furação Orbital)	8	100	0,05	0,1	0,5	–
3ª Etapa (Furação Orbital)	10	300	0,01	0,05	0,5	–

4.10. Equipamento de Análise

Nesta secção é discutido o equipamento utilizado para efetuar a análise da qualidade geral dos furos, o diâmetro e o desgaste das ferramentas.

A análise do desgaste das ferramentas foi feita de forma qualitativa e os danos provenientes da furação, como a delaminação à entrada, rebarbas e defeitos gerais foram visualizados com recurso a um microscópio OLYMPUS-SZH10-2, Figura 4.22. A visualização do interior dos furos foi feita após o corte das amostras segundo uma secção diametral de cada furo.

Figura 4.22 – Microscópio ótico OLYMPUS-SZH10-2.

A medição dos diâmetros dos furos finais, de 10 mm, foi realizada com auxílio de o micrómetro de interiores de três pontas da marca *Mitutoyo*, tal como se representa na Figura 4.23.

Figura 4.23 – Micrómetro de interiores *Mitutoyo* com escala de 8 a 10 mm e resolução de 0,001 mm.

5. Discussão de Resultados

5.1. Testes Preliminares

O método de furação em três etapas, como mencionado anteriormente, foi inspirado em estudos recentes que visavam diminuir os danos associados à furação de compósitos e, por consequência, melhorar a qualidade dos furos. Para tal, foram realizados testes preliminares para averiguar se o método de furação de três etapas idealizado e os parâmetros de corte selecionados seriam adequados à furação de materiais híbridos CFRP/Aço. Estes testes preliminares incluíram sete ensaios com estratégias diferentes, que serão mencionados mais à frente.

As ferramentas preliminares não apresentaram revestimento devido às limitações no tempo necessário para desenvolver estas ferramentas. É de referir, que devido às ferramentas não serem revestidas, a taxa de desgaste será maior. Foram utilizadas duas ferramentas para realizar os testes preliminares, intituladas de P1 e P2.

A primeira fase de testes preliminares foi efetuada com a ferramenta designada por *P1*. Nesta fase foram adoptadas duas estratégias de furação para realizar as três etapas, nomeadamente:

(I) Realizar um furo passante de 5,8 mm de diâmetro na primeira etapa com furação convencional, sendo que a ferramenta penetra na sua totalidade no híbrido, incluindo a zona da fresa. Seguidamente, na segunda e terceira etapas procede-se à fresagem periférica do furo, segundo trajetória espiral da ferramenta, para 8 e 10 mm de diâmetro, respetivamente.

(II) Realizar um furo passante, de 5,8 mm, na primeira etapa como furação convencional, sendo que a ferramenta penetra na sua totalidade no híbrido, incluindo a zona da fresa. Seguidamente, a segunda e terceira etapa resulta na furação orbital do furo para 8 e 10 mm, respetivamente. Em cada uma destas etapas a ferramenta é reposicionada fora da placa e avança descrevendo trajetória helicoidal e cortando com a zona de transição entre a extremidade broca e o corpo da fresa.

Antes de realizar os ensaios, foram realizadas medições dos diâmetros na zona da fresa das ferramentas no centro de maquinagem, que são apresentados na Tabela 5.1. O diâmetro na zona da broca não foi medido, pois nas etapas subsequentes o diâmetro do furo é aumentado, sendo que não será necessário muita precisão na primeira etapa. Os parâmetros de corte utilizados para os testes preliminares são apresentados nas Tabelas 5.2 e 5.3.

Tabela 5.1 – Diâmetros na zona da fresa das ferramentas preliminares.

Designação	*Diâmetro inicial [mm]*
P1	5,7834
P2	5,7895

Tabela 5.2 – Parâmetros de ensaio preliminar para a primeira etapa (furação convencional).

Designação	*Ensaio*	*Diâmetro do furo [mm]*	*Estratégia*	V_c *[m/min]*	F_z *[mm/dente]*
P1	1 – 2	5,8	I	150	0,1
	3 – 4	5,8	II	150	0,1
P2	5	5,8	II	100	0,1
	6	5,8	II	100	0,1
	7	5,8	–	100	0,1
	8	5,8	II	100	0,1

Tabela 5.3 – Parâmetros de ensaio preliminar para a segunda e terceira etapa (furação orbital).

Designação	*Ensaio*	*Diâmetro do furo [mm]*	*Estratégia*	V_c *[m/min]*	F_z *[mm/dente]*	a_p*[mm/rot. orbital]*	*Rough pass stepover [mm]*
P1	1 – 2	10	I	150	0,01	0,05	0,1
	3 – 4	7	II	150	0,01	0,05	0,1
P2	5	10	II	100	0,05	0,1	0,5
	6	10	II	100	0,05	0,2	0,5
	7	10	II	300	0,05	0,1	0,25

Na Figura 5.1 é observado o provete onde foram realizados os ensaios preliminares.

Figura 5.1 – Provete utilizado nos ensaios preliminares.

Ensaios 1 – 4

Nesta fase, a ferramenta P1 utilizada para realizar os testes preliminares é apresentada na Figura 5.2. Esta foi visualizada no microscópio depois dos ensaios, Figura 5.3, sendo que foram realizados dois furos por cada estratégia utilizada.

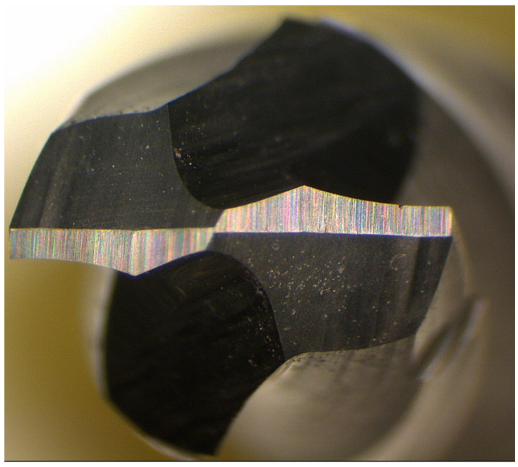


Figura 5.2 – Ferramenta P1 nova para o teste preliminar.

É possível observar algum desgaste na ferramenta P1, Figura 5.3, pois esta não apresenta revestimento e a utilização da estratégia I, nos ensaios 1 e 2, mostrou ser pouco ajustada para o processo de furação.

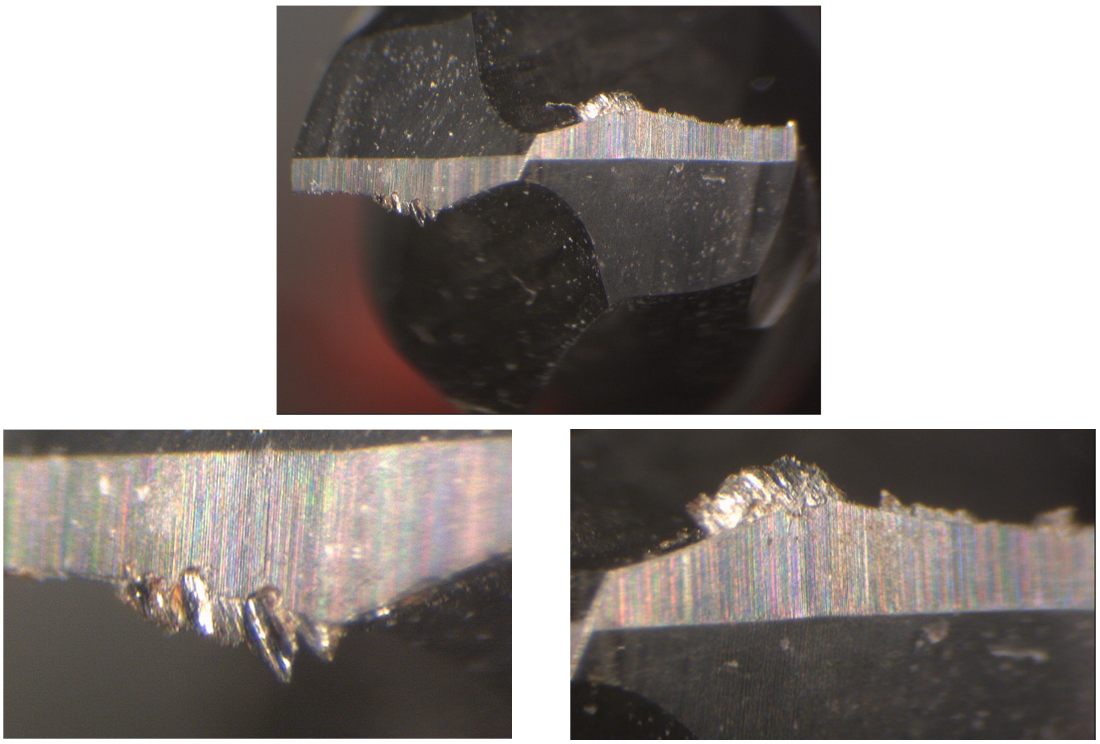


Figura 5.3 – Ferramenta P1 para o teste preliminar após ensaios e ampliação do desgaste excessivo sofrido, incluindo aparas de aço aderentes.

Nos dois ensaios com a primeira estratégia, os furos resultantes apresentaram baixa qualidade devido às fibras por cortar à entrada do compósito, Figuras 5.4 e 5.5. Com recurso à segunda estratégia foram realizados dois ensaios, que apresentaram uma melhoria na

qualidade dos furos. Estes foram observados no microscópio, à entrada e saída, e podem ser visualizados nas Figuras 5.6 e 5.7.

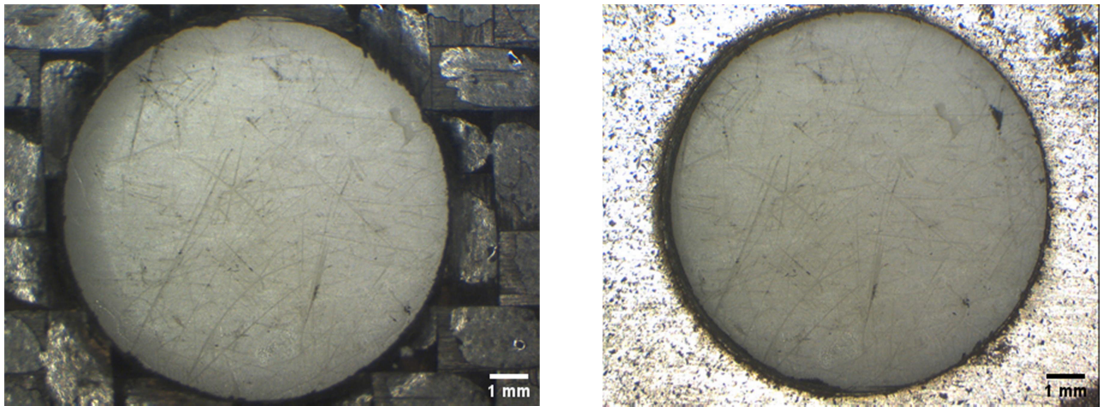


Figura 5.4 – Entrada e saída do furo dos testes preliminares (Ensaio 1).

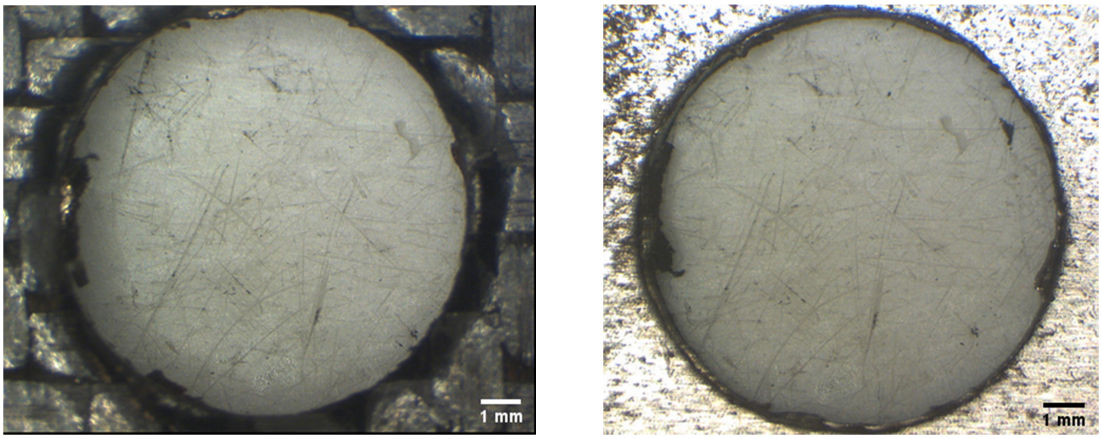


Figura 5.5 – Entrada e saída do furo dos testes preliminares (Ensaio 2).

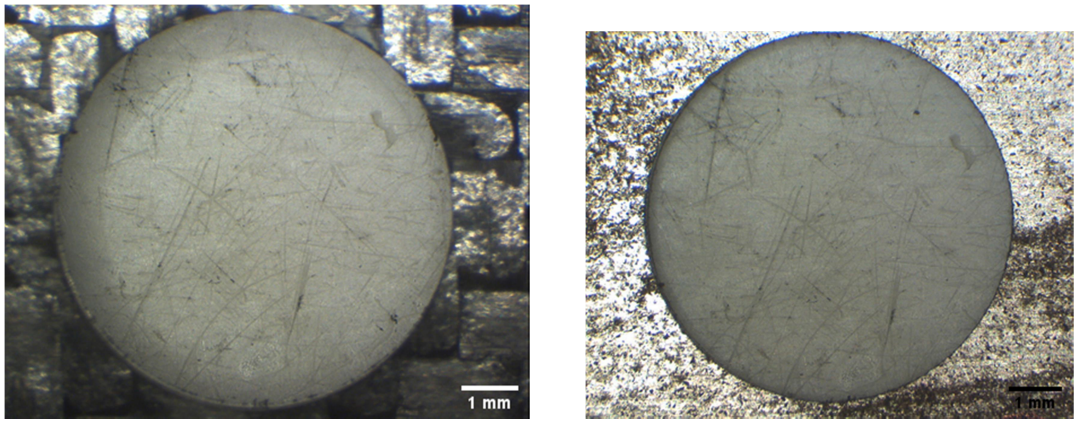


Figura 5.6 – Entrada e saída do furo dos testes preliminares (Ensaio 3).

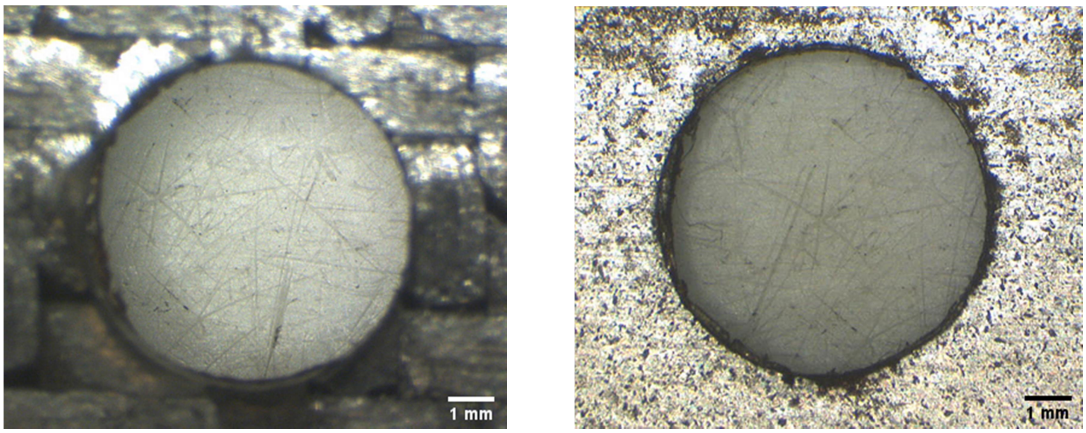


Figura 5.7 – Entrada e saída do furo dos testes preliminares (Ensaio 4).

Ensaios 5 – 7

A segunda fase de testes preliminares foi efetuada com a ferramenta designada por *P2*. Com esta ferramenta apenas foi utilizada a estratégia II de furação. As Figuras 5.8 e 5.9 apresentam a ferramenta nova e após realizar o ensaio, respetivamente. Na Figura 5.10 é possível observar adesão das fibras de carbono à ferramenta.

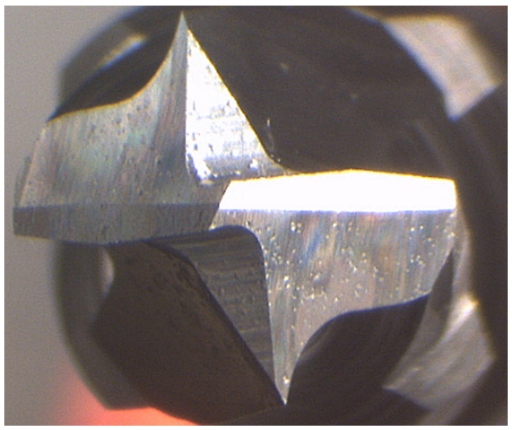


Figura 5.8 – Ferramenta P2 nova para o teste preliminar.

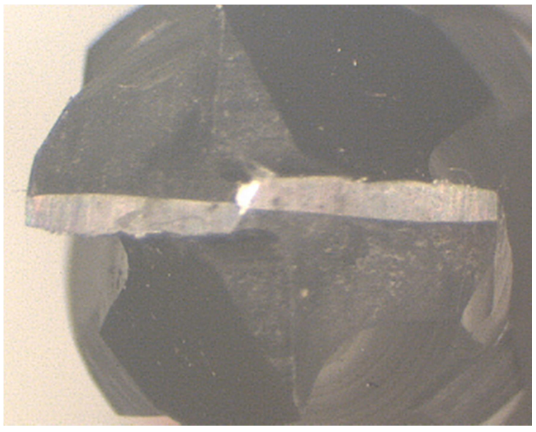


Figura 5.9 – Ferramenta P2 para o teste preliminar após ensaios.

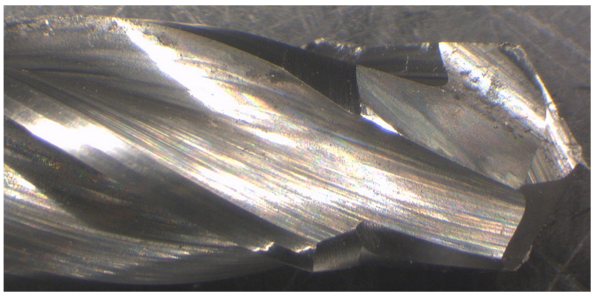


Figura 5.10 – Ferramenta P2 para o teste preliminar após ensaios com adesão das fibras de carbono.

Os furos realizados com a ferramenta designada por P2 apresentaram uma melhor qualidade, sendo que foi adoptada a estratégia II de furação. É de referir, que foi utilizado para o ensaio 6, Figura 5.12, um avanço axial por rotação orbital de 0,2 mm/rot.orbital maior que para o ensaio 5, Figura 5.11, de 0,1 mm/rot.orbital, com os outros parâmetros de corte constantes, para tentar averiguar se este é adequado para este processo de furação, no qual o aumento resultou num furo com pior qualidade.

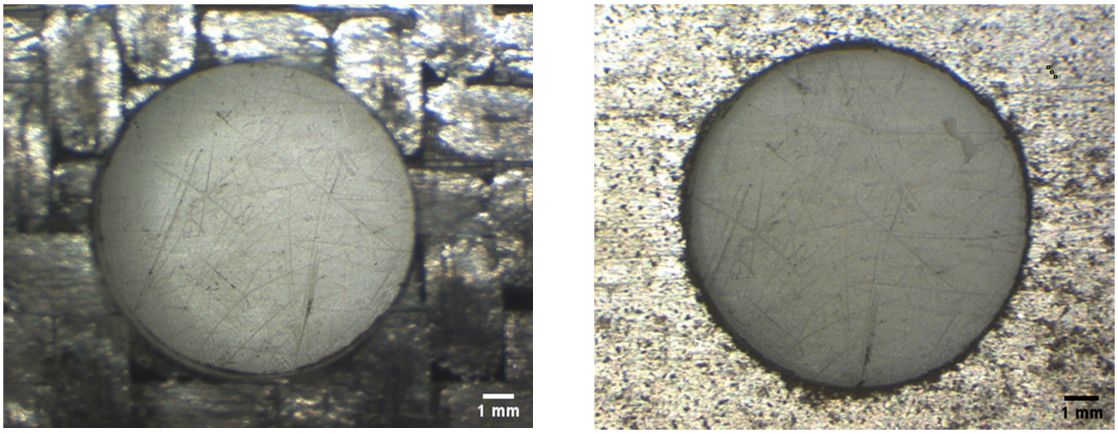


Figura 5.11 – Entrada e saída do furo dos testes preliminares (Ensaios 5).

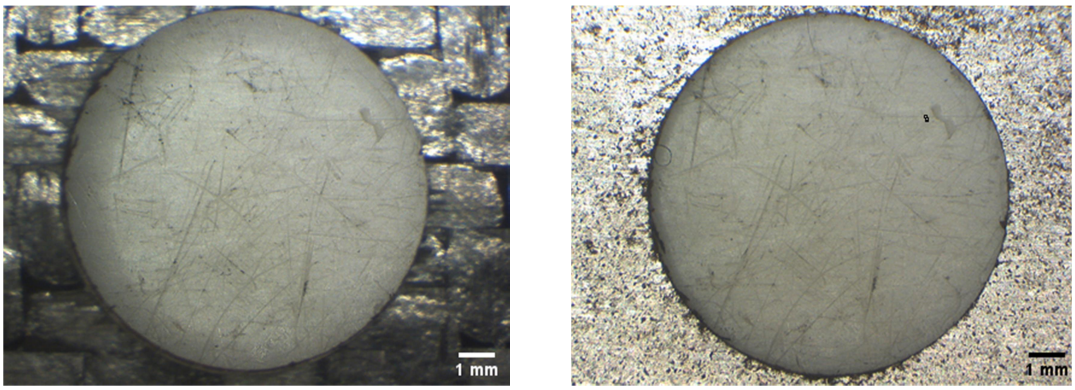


Figura 5.12 – Entrada e saída do furo dos testes preliminares (Ensaios 6).

No ensaio 7 foram alterados os parâmetros de corte, para melhorar a última etapa. Para tal, o *rough pass stepover* foi reduzido para 0,25 mm, e a velocidade de corte aumentou

para 300 m/min. Na Figura 5.13 é possível observar uma melhoria na qualidade do furo, e, com base neste ensaio, os parâmetros de corte para a terceira etapa foram definidos.

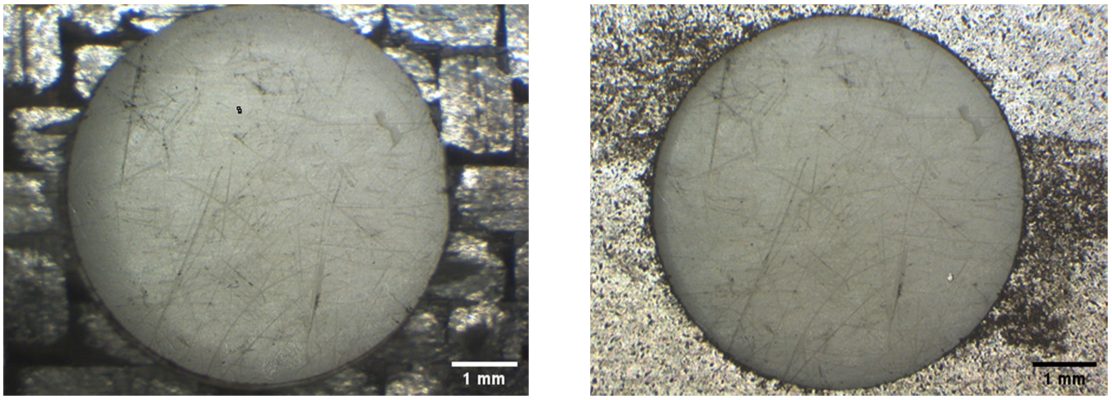


Figura 5.13 – Entrada e saída do furo dos testes preliminares (Ensaios 7).

O ensaio 8, Figura 5.14, resultou num furo de 5,8 mm para ser possível visualizar a sua condição, a fim de garantir que não haja danos excessivos no material que possam desgastar e danificar a ferramenta durante as restantes etapas de furação.

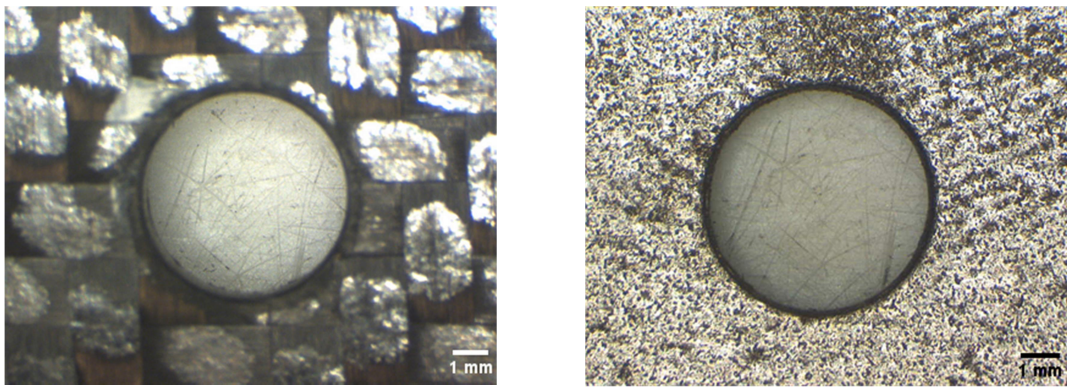


Figura 5.14 – Entrado do furo dos testes preliminares (Ensaios 8).

Durante os testes preliminares realizados com a ferramenta P2, foi possível diminuir o tempo de furação, a rondar os 50s, devido ao aumento da variação do diâmetro. Os ensaios realizados com a ferramenta P2 apresentaram uma melhoria na qualidade do furo, no entanto o desgaste da ferramenta foi excessivo devido à não utilização de revestimento, como verificado na ferramenta P1.

5.2. Testes Finais

Nesta secção são analisados os diâmetros dos furos, a qualidade destes, o desgaste das ferramentas e as forças de corte provenientes dos ensaios de furação. Os testes finais foram realizados em duas fases. Na primeira fase de testes foram efetuados ensaios para averiguar qual o tipo de ferramenta que produz os melhores resultados globais. Deste modo, e com base nos diâmetros dos furos, na qualidade destes, no desgaste das ferramentas e nas forças de corte, a ferramenta A1 produziu os melhores resultados. Sendo assim, foram realizados, na segunda fase de testes, mais ensaios com as ferramentas A2 e A3 (ferramentas iguais), com variação dos parâmetros de corte, que na primeira fase permaneceram inalterados em todas as etapas de furação. É de notar, que na primeira fase de testes, o *rough pass stepover* escolhido, de 0,25 mm, para a última etapa resultou em piores resultados, ao contrário do que foi concluído nos teste preliminares. A maior diferença reside, no facto, das ferramentas finais apresentarem revestimento, que provoca um pequeno aumento no raio das arestas de corte, promovendo uma menor *sharpness* na ferramenta, como visto na referência [60]. De outro modo, a escolha do valor do parâmetro de corte *rough pass stepover*, significa que a zona de variação do diâmetro da ferramenta não é utilizada na sua totalidade, e, desta forma, pode influenciar negativamente as condições de corte e o desgaste da ferramenta. Adicionalmente, a segunda fase de testes, onde o *rough pass stepover* foi alterado para 0,5 mm, permitiu utilizar a zona de variação do diâmetro na sua totalidade, sendo que ocorreu uma melhoria na qualidade global do furo.

Durante os ensaios realizados com ferramenta B1 ocorreu *chipping* na zona do de variação do diâmetro, sendo este dano discutido mais à frente. A ferramenta D1 apresentou os piores resultados, a nível da qualidade do furo.

É de salientar, que as ferramentas que apresentam um ângulo de hélice de 20º (A1 e B1) produzem furos de melhor qualidade na zona do aço, quando comparadas com as ferramentas com um ângulo de hélice de 10º (C1 e D1), uma vez que são utilizados ângulos de hélice maiores para maquinar aço. De forma inversa, são utilizados ângulos de hélice mais pequenos para maquinar compósitos de fibra de carbono, para diminuir os esforços axiais, e por consequência, diminuir os danos por delaminação. As ferramentas com um ângulo de ataque de 18º (A1 e C1) demonstraram melhores resultados a nível da qualidade do furo, pois resultaram em menores fibras por cortar, na zona do compósito, e menores rebarbas, na zona do aço, quando comparadas com as ferramentas com um ângulo de ataque de 12º (B1 e D1).

5.2.1. Diâmetro dos furos

Nesta secção é efetuada a análise dos furos realizados à entrada do compósito e à saída do aço. No entanto, em primeiro lugar foram medidos os diâmetros das ferramentas utilizadas neste trabalho no centro de maquinagem, visto que o diâmetro nominal de 6 mm idealizado para as ferramentas não corresponde aos valores finais dos diâmetros obtidos no fabrico. Foi utilizado o *software MasterCAM* para definir a trajetória da ferramenta durante a realização do furo. Em primeiro lugar foram medidos os diâmetros da zona da fresa antes de realizar qualquer ensaio, para ser possível compensar a trajetória da ferramenta no centro de maquinagem. Posteriormente, foram realizados 5 furos com todas as ferramentas e foi repetido o processo de medição dos diâmetros das ferramentas. De uma forma geral, os diâmetros aumentaram após a realização dos 5 furos, sendo atribuído à montagem das

ferramentas, novamente, no centro de maquinagem, que pode causar um desvio nos valores dos diâmetros. Estes valores são apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Diâmetros medidos das ferramentas finais.

Parâmetro geométrico	*Designação*	*Diâmetro inicial [mm]*	*Diâmetro após 5 furos [mm]*
A)	*A1*	5,9542	5,9824
	A2	5,9526	–
	A3	5,9762	–
B)	*B1*	5,9570	5,9814
C)	*C1*	5,9620	5,9618
D)	*D1*	5,9598	5,9676

Foi utilizado um micrómetro de interiores *Mitutoyo* para medir os diâmetros dos furos finais, como já mencionado. A Figura 5.15 representa a média dos furos obtidos em cada ensaio com as diferentes ferramentas. Nesta Figura é possível verificar que os valores medidos estão muito próximos do diâmetro nominal pretendido, de 10mm, sendo que para todas as ferramentas, à exceção da A3, os valores do diâmetro são superiores ao nominal. Os furos efetuados com a ferramenta A3 apresentam valores abaixo do nominal. Os valores medidos podem ser consultados no Anexo H.

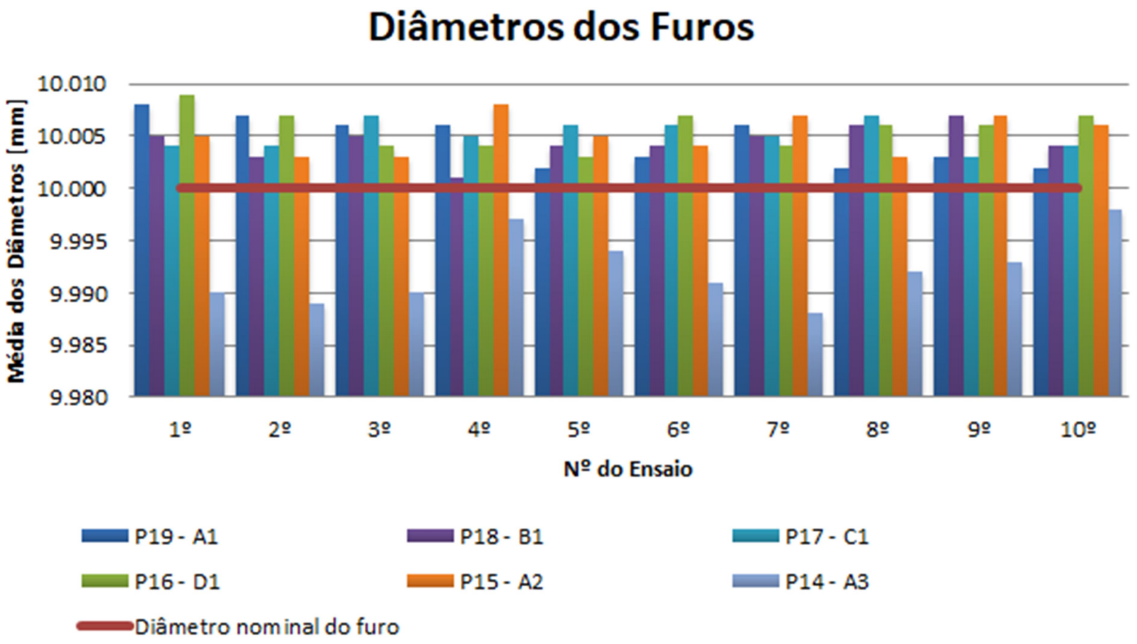


Figura 5.15 – Diâmetro médio dos furos obtidos em cada ensaio.

5.2.2. Qualidade dos furos

A análise da qualidade geral dos furos e da delaminação é feita de forma qualitativa. Em termos da qualidade, os furos foram observados no microscópio e são apresentadas as evoluções das condições à entrada e saída do provete ao longo dos ensaios realizados, para todas as ferramentas utilizadas. Com o desgaste das ferramentas, no decorrer dos ensaios, são observadas algumas fibras por cortar nos últimos furos realizados. Este facto é explicado pelo desgaste prematuro da zona de variação do diâmetro da ferramenta.

De uma forma qualitativa, a delaminação do furo é praticamente não existente, visto que os esforços axiais são baixos durante as etapas de furação orbital. No entanto, os danos na zona do compósito ocorrem maioritariamente à entrada, com fibras por cortar em alguns ensaios. Também, é de salientar que são verificadas porosidades no interior do CFRP provenientes do processo de cura na prensa de pratos quentes, e que em parte dificultam a análise da qualidade global dos furos.

Ferramenta A1

A ferramenta A1 apresenta um ângulo de hélice de 20º e um ângulo de ataque de 18º. Nas Figuras 5.16 e 5.17 é possível verificar a entrada e saída do primeiro ensaio realizado, onde este apresenta algumas fibras por cortar na zona de entrada. Na zona de saída, o furo exibe rebarbas de pequena dimensão. As Figuras 5.18 e 5.19 apresentam o último ensaio realizado com a ferramenta A1 onde é verificado uma diminuição da qualidade do furo e agravamento dos danos visualizados no primeiro ensaio.

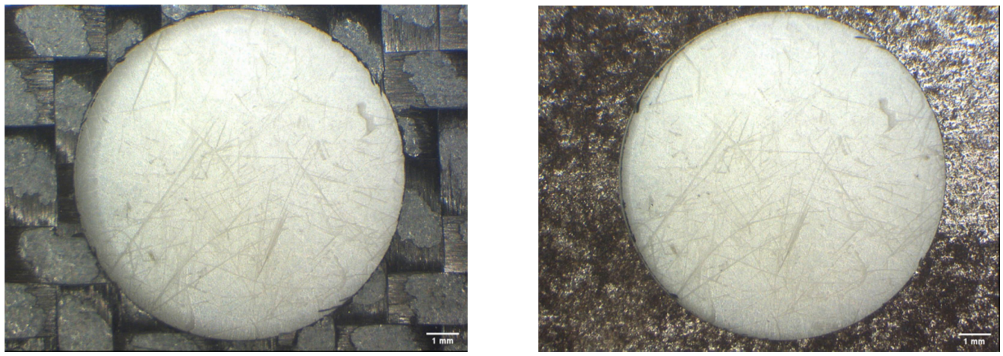
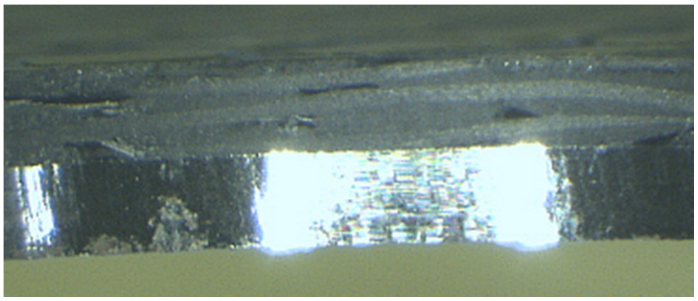


Figura 5.16 – Entrada (Esquerda) e saída (direita) do furo realizado (Ferramenta A1; Ensaio 1).



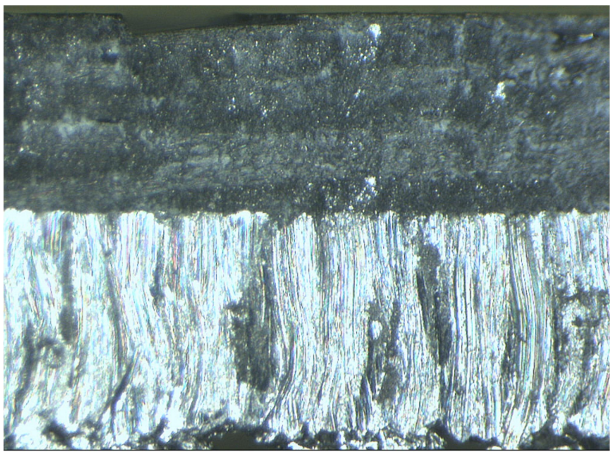


Figura 5.17 – Visualização ao microscópio do furo realizado (Ferramenta A1; Ensaio 1).

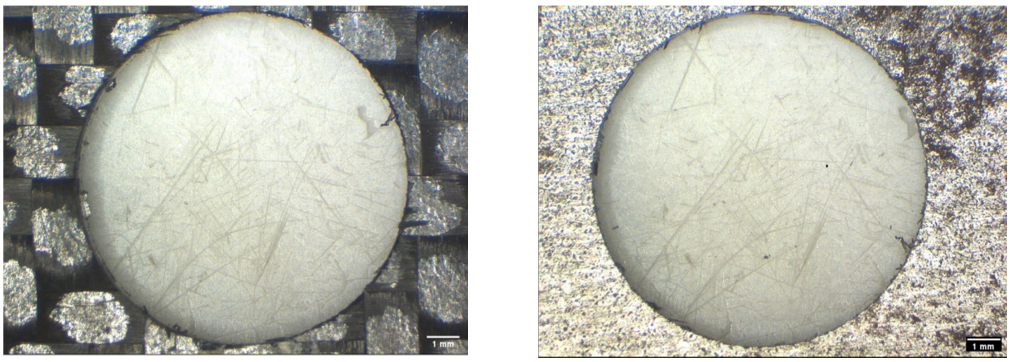


Figura 5.18 – Entrada (Esquerda) e saída (direita) do furo realizado (Ferramenta A1; Ensaio 10).

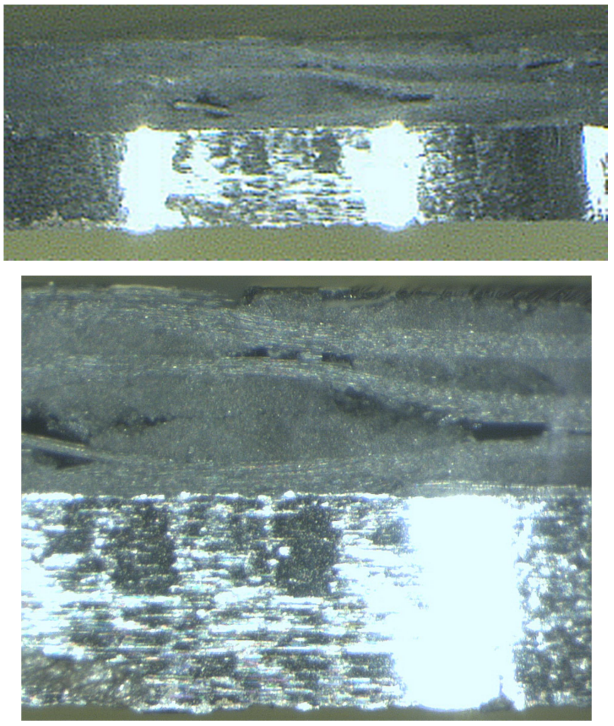


Figura 5.19 – Visualização ao microscópio do furo realizado (Ferramenta A1; Ensaio 10).

Ferramenta B1

A ferramenta B1 apresenta um ângulo de hélice de 20º e um ângulo de ataque de 12º. Na Figura 5.20 é possível verificar a entrada e saída do primeiro ensaio realizado, onde este apresenta algumas fibras por cortar na zona de entrada. Na zona de saída, o furo exibe rebarbas de pequena dimensão. As Figuras 5.21 e 5.22 apresentam o quinto ensaio realizado com a ferramenta B1, onde ocorreu *chipping* na zona de transição da broca para a fresa. Neste ensaio, são visualizadas algumas fibras por cortar, no entanto esta zona do compósito apresenta poucas cavidades. Após o quinto ensaio, é verificada uma diminuição excessiva da qualidade do furo, devido ao dano sofrido pela ferramenta na zona da variação do diâmetro, sendo possível observar muitas fibras por cortar, nas Figuras 5.23 e 5.24.

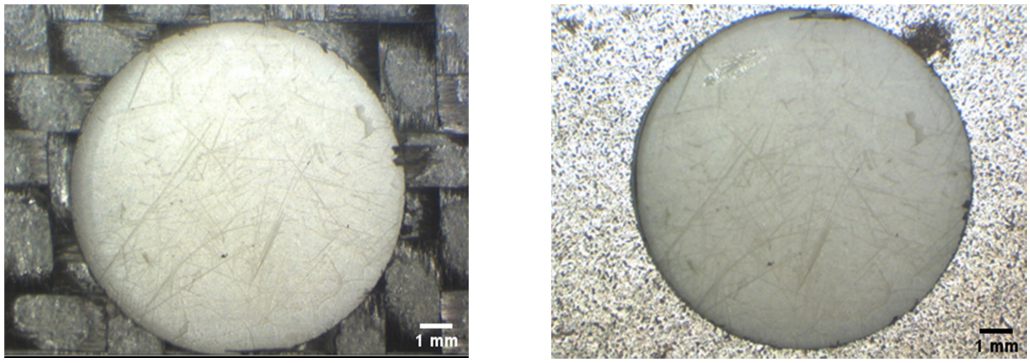


Figura 5.20 – Entrada (Esquerda) e saída (direita) do furo realizado (Ferramenta B1; Ensaio 1).

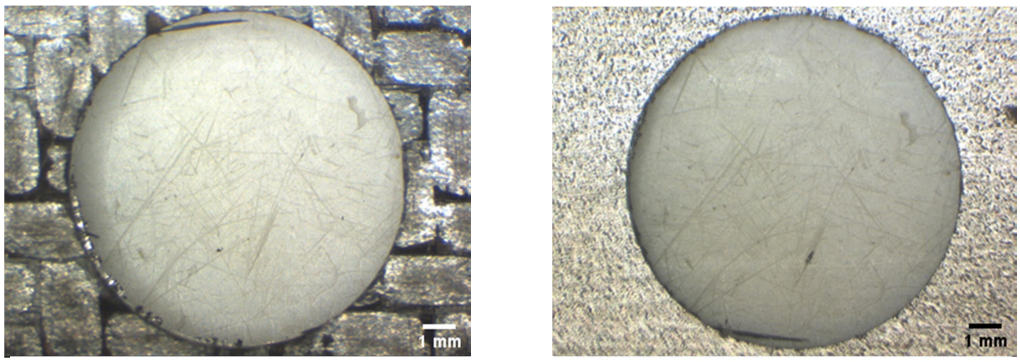
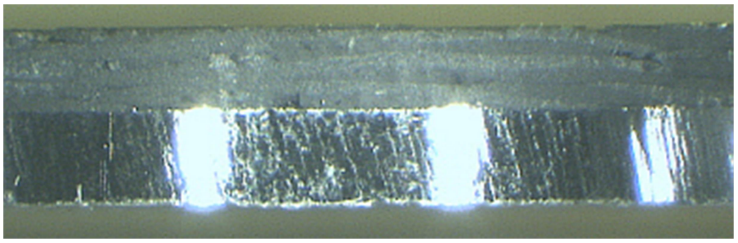


Figura 5.21 – Entrada (Esquerda) e saída (direita) do furo realizado (Ferramenta B1; Ensaio 5).



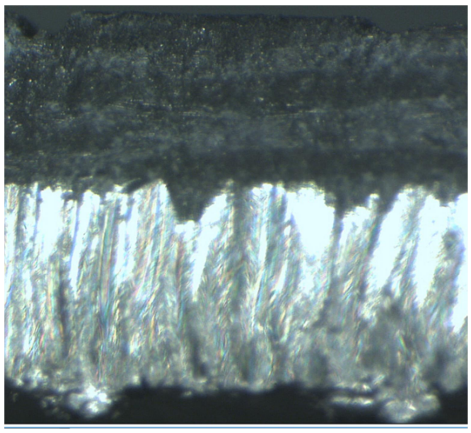


Figura 5.22 – Visualização ao microscópio do furo realizado (Ferramenta B1; Ensaio 1).

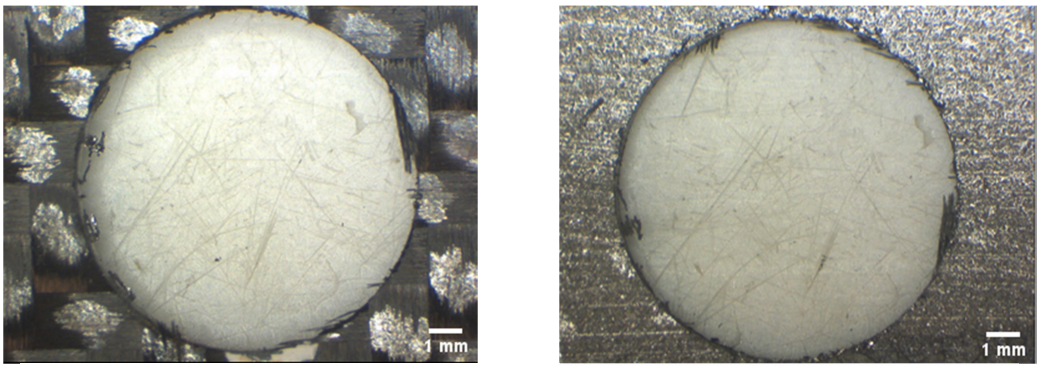


Figura 5.23 – Entrada (Esquerda) e saída (direita) do furo realizado (Ferramenta B1; Ensaio 10).

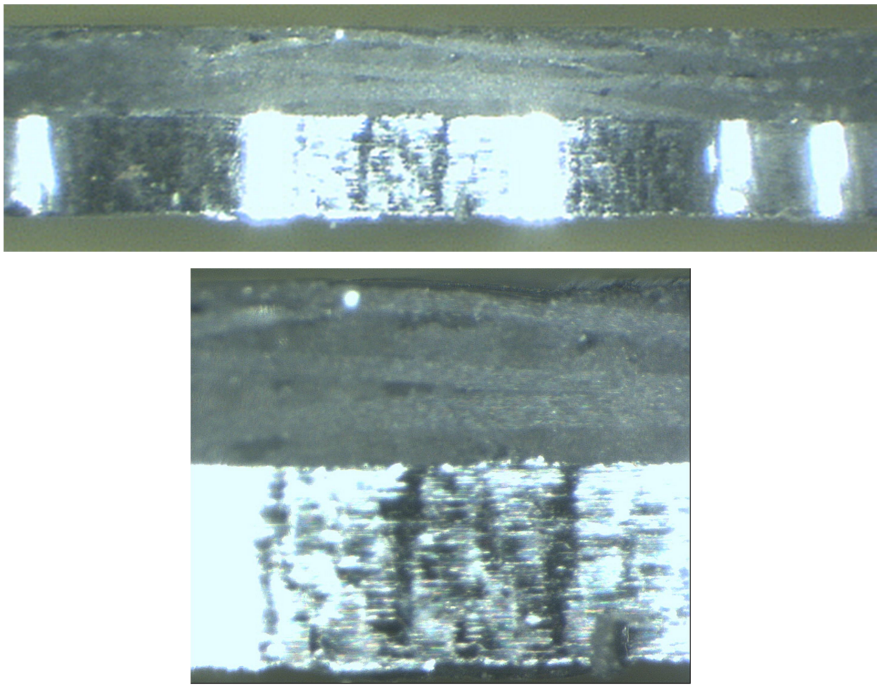


Figura 5.24 – Visualização ao microscópio do furo realizado (Ferramenta B1; Ensaio 10).

Ferramenta C1

A ferramenta C1 apresenta um ângulo de hélice de 10º e um ângulo de ataque de 18º. Nas Figuras 5.25 e 5.26 é possível verificar a entrada e saída do primeiro ensaio realizado, onde este apresenta uma boa qualidade, quer na zona do compósito, quer na zona do aço. Contudo, ao longo dos ensaios, com esta ferramenta, existe um deterioramento da qualidade dos furos, em maior grau, que ocorre com a ferramenta A1, como verificado nas Figuras 5.27 e 5.28.

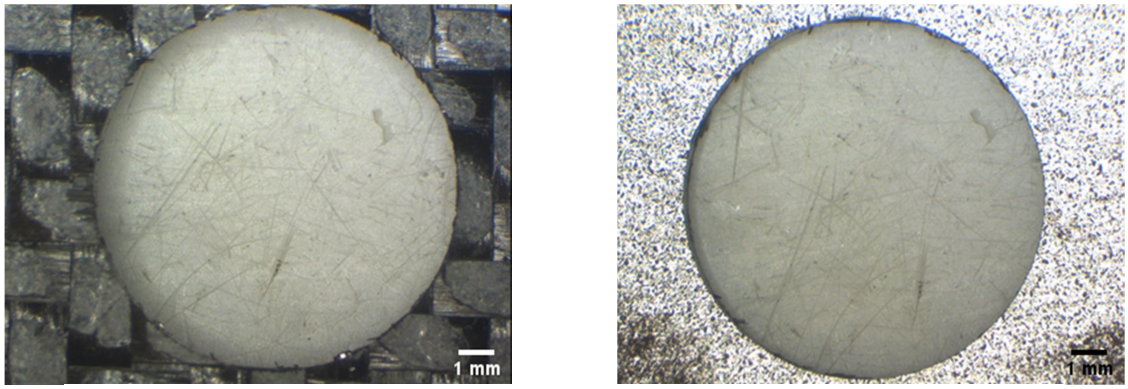


Figura 5.25 – Entrada (Esquerda) e saída (direita) do furo realizado (Ferramenta C1; Ensaio 1).

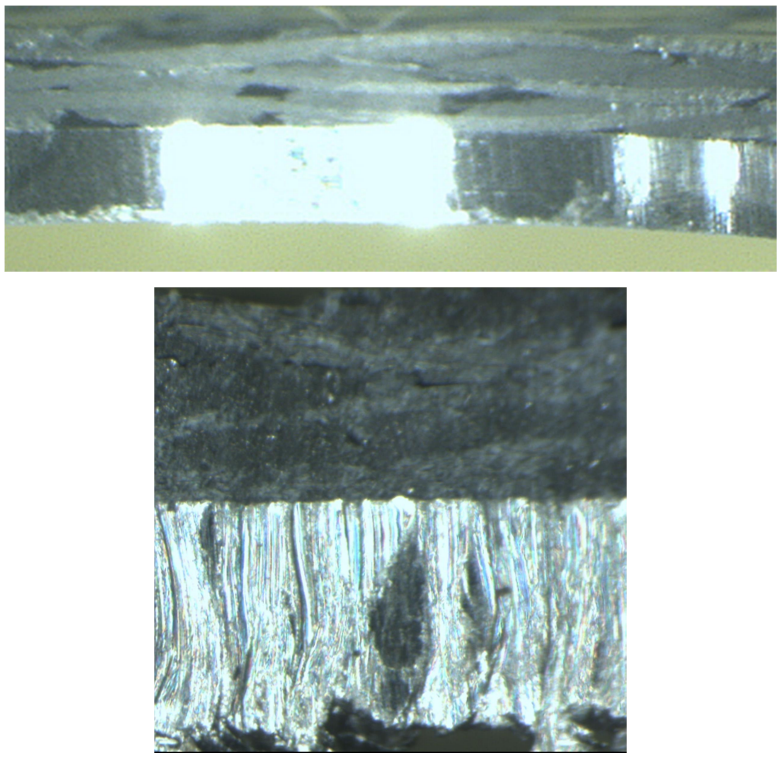


Figura 5.26 – Visualização ao microscópio do furo realizado (Ferramenta C1; Ensaio 1).

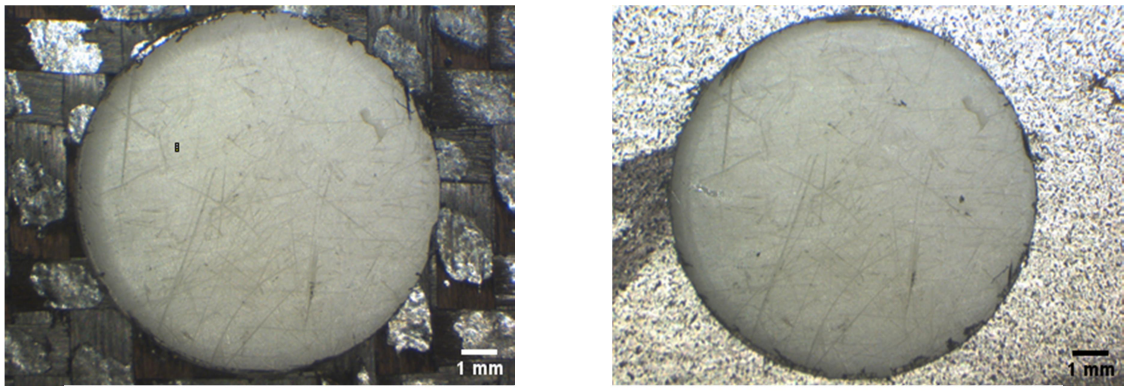


Figura 5.27 – Entrada (Esquerda) e saída (direita) do furo realizado (Ferramenta C1; Ensaio 10).

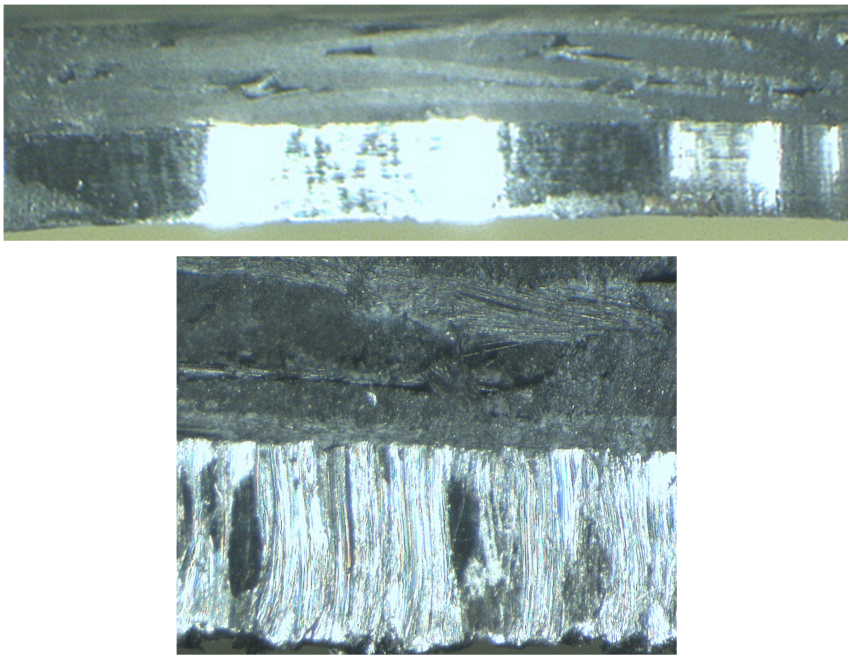


Figura 5.28 – Visualização ao microscópio do furo realizado (Ferramenta C1; Ensaio 10).

Ferramenta D1

A ferramenta D1 apresenta um ângulo de hélice de 10º e um ângulo de ataque de 12º. Os ensaios realizados com esta ferramenta mostraram os piores resultados, como já mencionado, a nível da qualidade do furo. Nas Figuras 5.29 e 5.30 é possível verificar a entrada e saída do primeiro ensaio realizado, onde este apresenta zonas de fibras por cortar e rebarbas na zona do aço. As Figuras 5.31 e 5.32 exibem o último ensaio realizado, onde o furo apresenta uma má qualidade, com muitas fibras por cortar e rebarbas de grande dimensão.

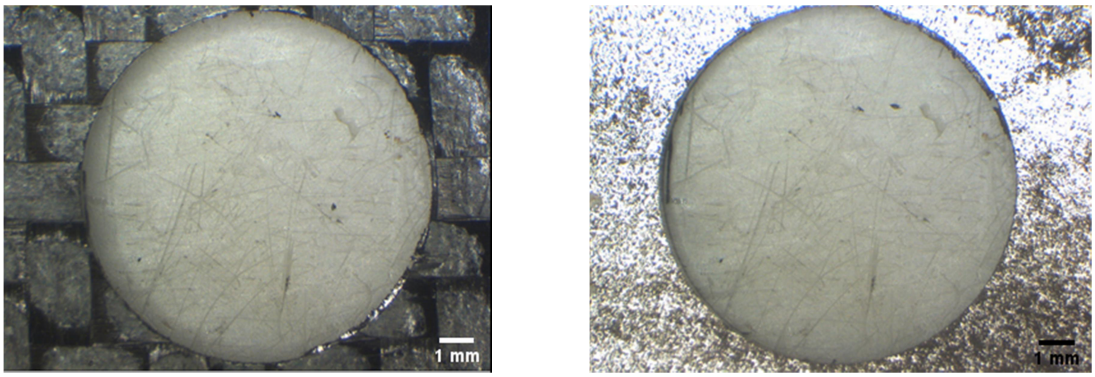


Figura 5.29 – Entrada (Esquerda) e saída (direita) do furo realizado (Ferramenta D1; Ensaio 1).

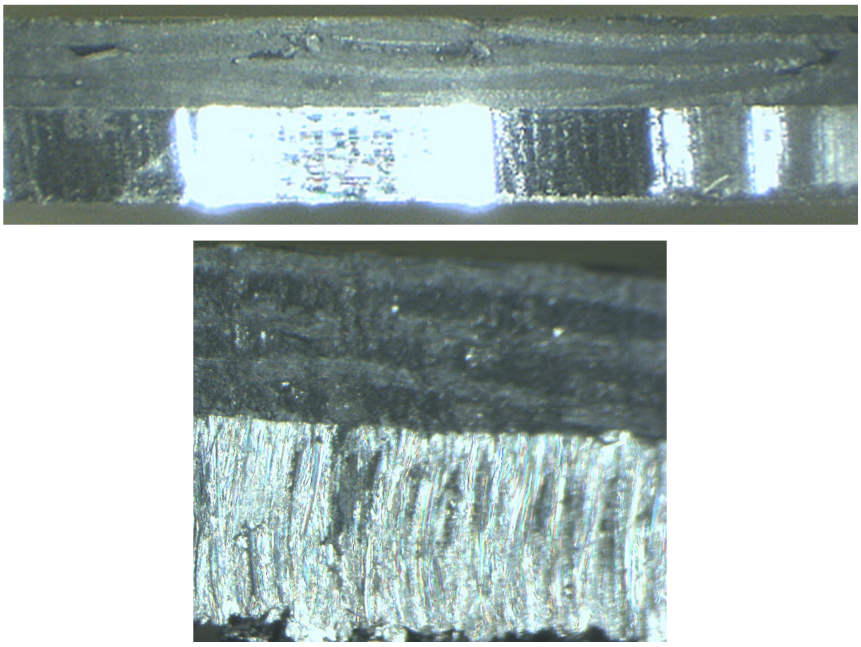


Figura 5.30 – Visualização ao microscópio do furo realizado (Ferramenta D1; Ensaio 1).

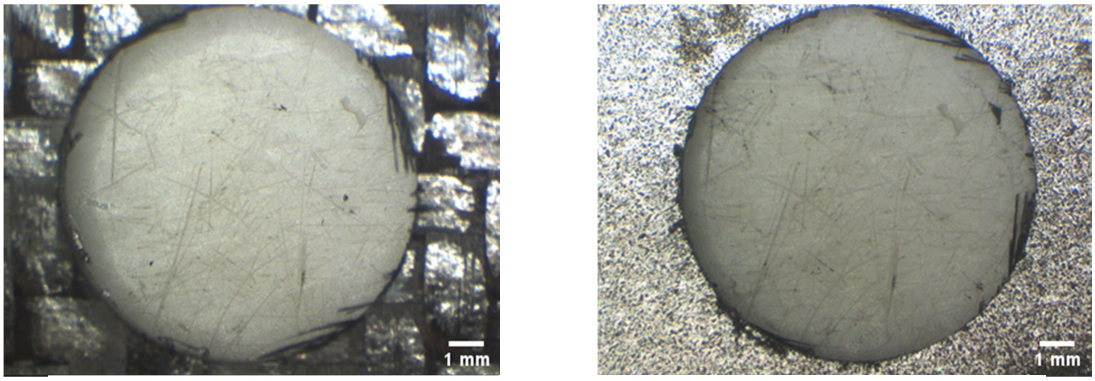


Figura 5.31 – Entrada (Esquerda) e saída (direita) do furo realizado (Ferramenta D1; Ensaio 10).

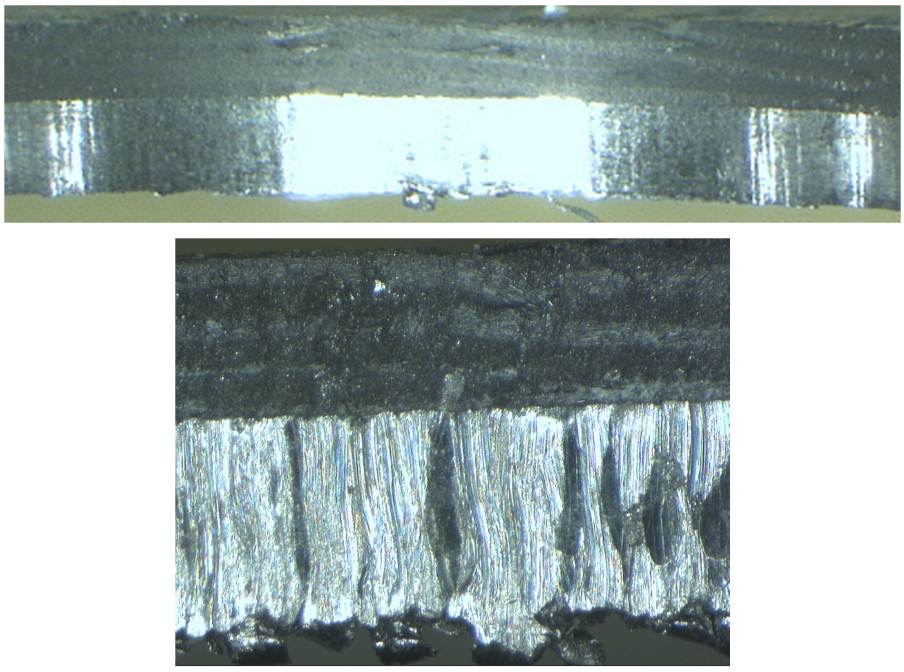


Figura 5.32 – Visualização ao microscópio do furo realizado (Ferramenta D1; Ensaio 10).

Ferramenta A2

Os furos realizados com a ferramenta A2 apresentaram os melhores resultados ao longo dos ensaios, como mostram as Figuras 5.33 e 5.34, que dizem respeito ao primeiro ensaio, e as Figuras 5.35 e 5.36, que representam um último ensaio realizado. Nestes ensaios, com a respetiva ferramenta, o parâmetro de corte *rough pass stepover* foi alterado para utilizar a zona de transição entre a broca e a fresa na sua totalidade.

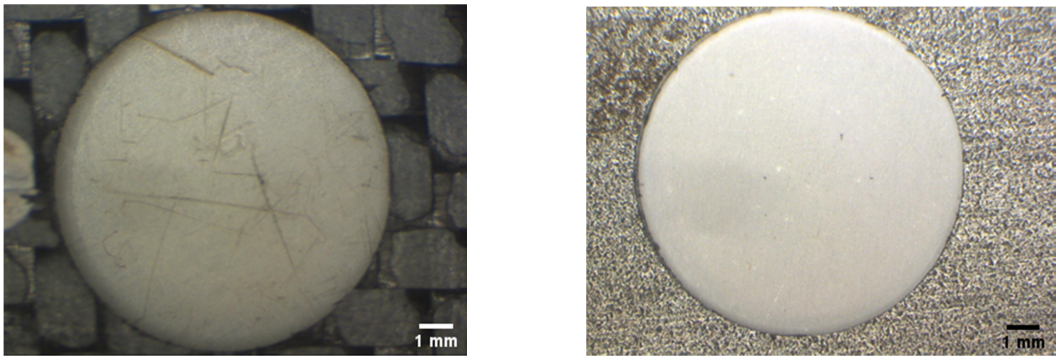


Figura 5.33 – Entrada (Esquerda) e saída (direita) do furo realizado (Ferramenta A2; Ensaio 1).

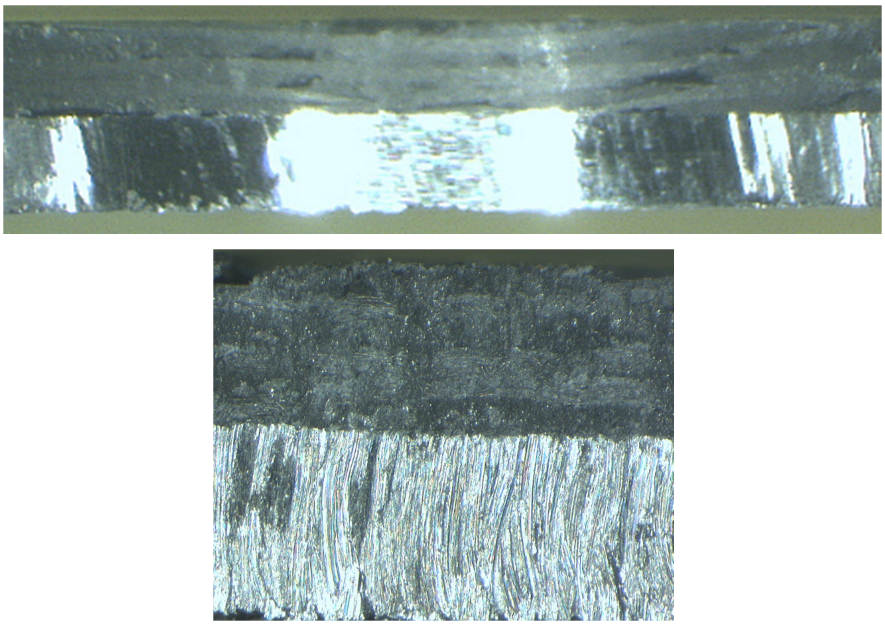


Figura 5.34 – Visualização ao microscópio do furo realizado (Ferramenta A2; Ensaio 1).

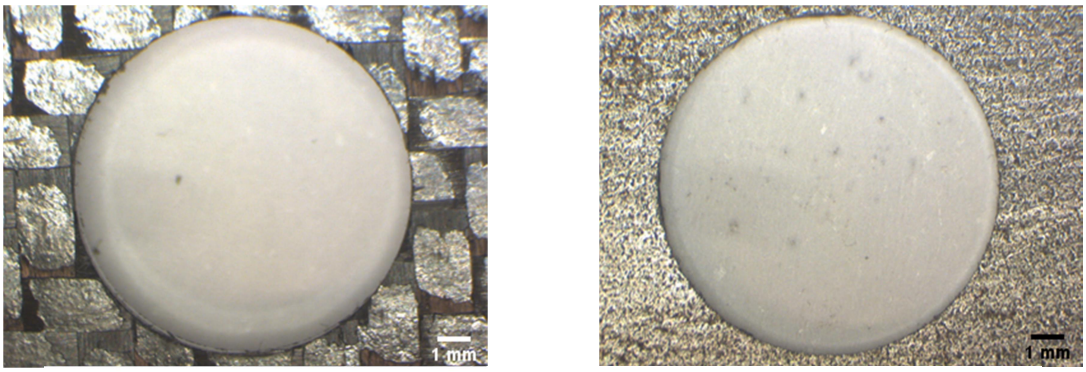
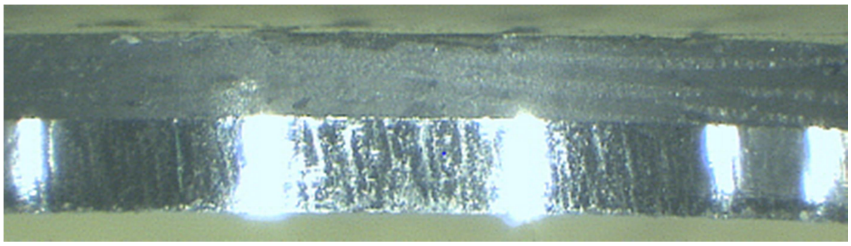


Figura 5.35 – Entrada (Esquerda) e saída (direita) do furo realizado (Ferramenta A2; Ensaio 10).



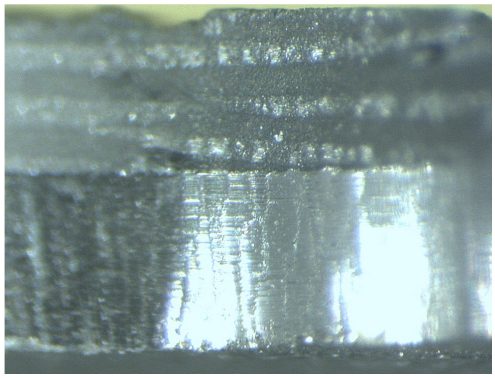


Figura 5.36 – Visualização ao microscópio do furo realizado (Ferramenta A2; Ensaio 10).

Ferramenta A3

Para os furos realizados com a ferramenta A3 o avanço por dente foi diminuído para melhorar a qualidade final do furo. Desta forma, os furos apresentaram uma melhoria na qualidade, ao longo dos ensaios. Contudo, comparativamente à ferramenta A2, mostram ser ligeiramente piores, como mostram as Figuras 5.37 e 5.48, que dizem respeito ao primeiro ensaio, e as Figuras 5.39 e 5.40, que representam um último ensaio realizado.

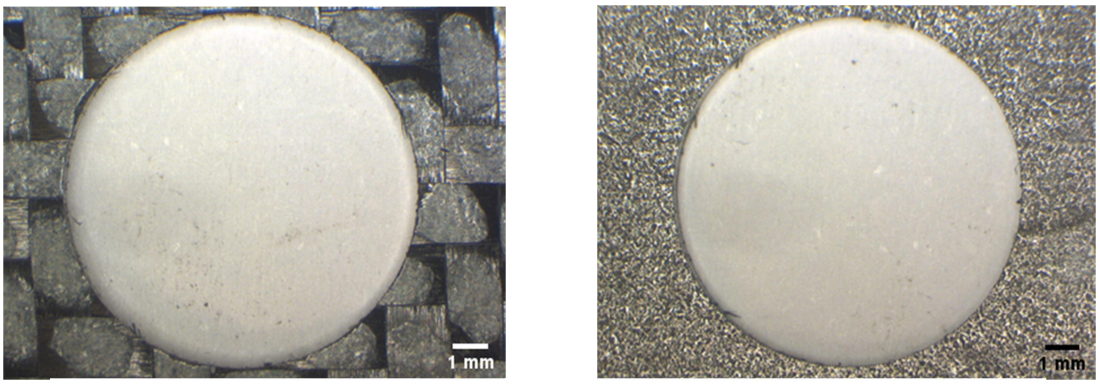
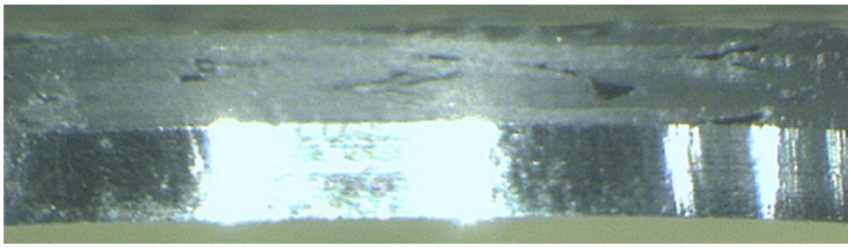


Figura 5.37 – Entrada (Esquerda) e saída (direita) do furo realizado (Ferramenta A3; Ensaio 1).



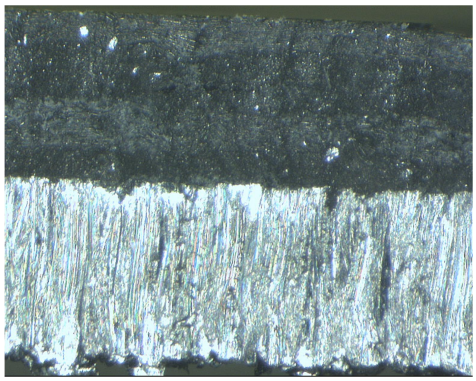


Figura 5.38 – Visualização ao microscópio do furo realizado (Ferramenta A3; Ensaio 1).

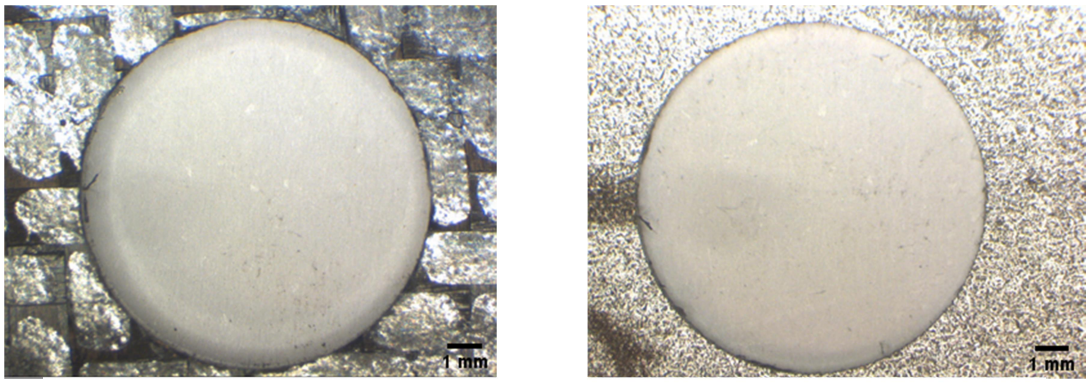


Figura 5.39 – Entrada (Esquerda) e saída (direita) do furo realizado (Ferramenta A3; Ensaio 10).

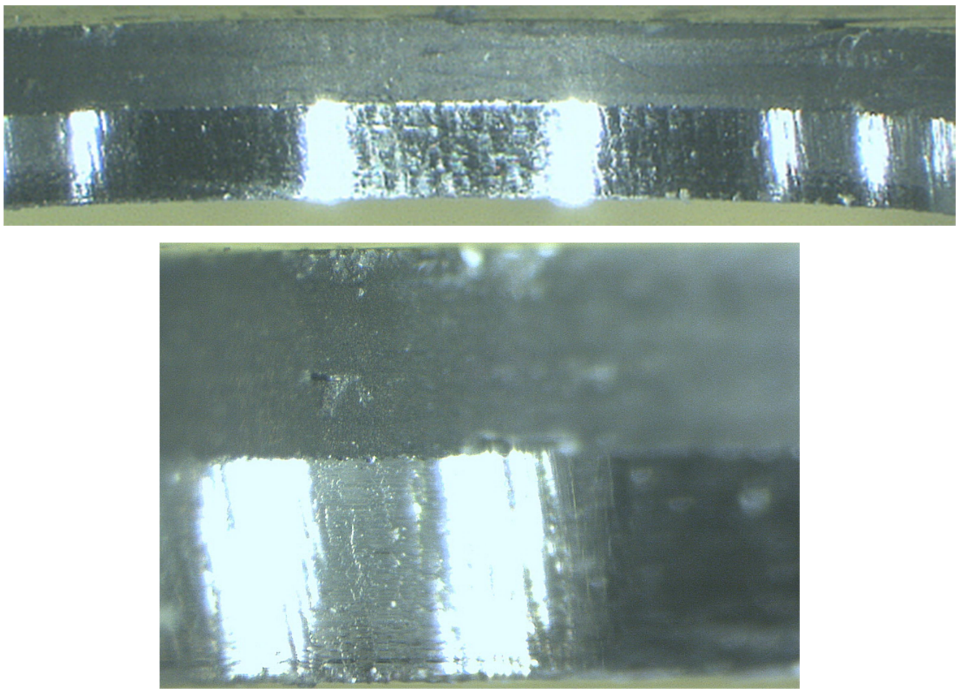


Figura 5.40 – Visualização ao microscópio do furo realizado (Ferramenta A3; Ensaio 10).

5.2.3. Desgaste das ferramentas

Nesta secção é abordado o desgaste das ferramentas utilizadas nos testes experimentais. A furação de materiais compósitos, mais concretamente com fibra de carbono, resulta num desgaste excessivo das ferramentas de corte, devido à natureza abrasiva destes, como já mencionado. Deste modo, é esperado um desgaste excessivo, sendo que o desenvolvimento das ferramentas de corte para este projeto teve por base diminuir o desgaste por meio de parâmetros de corte menos "agressivos" e melhorar a qualidade final do furo.

A análise do desgaste é feita de forma qualitativa, sendo que as ferramentas foram visualizadas antes dos ensaios, após a realização de 5 furos e por fim depois de efetuar 10 furos. Desta forma, é apresentado o aspeto das ferramentas nas etapas mencionadas.

De uma forma geral, o desgaste das ferramentas foi mais concentrado na zona de transição da ponta da broca para a fresa, sendo que esta é a zona principal de corte. É de mencionar, que o desgaste na hélice foi residual,

É de salientar, que das ferramentas analisadas a que mostrou melhores resultados, a nível do desgaste, qualidade do furo final e forças de corte foi a designada por A1. Desta forma, foram realizados mais ensaios para averiguar a influência dos parametros de corte na geometria das ferramentas do tipo A, sendo utilizadas as ferramentas A2 e A3 para o efeito. Note que as ferramentas A1, A2 e A3 são as mesmas ferramentas mas usadas com conjuntos de parametros de corte distintos.

Ferramenta A1

A Figura 5.41 apresenta a ferramenta A1 antes de realizar os ensaios. A Figura 5.42 apresenta a ferramenta A1 após a realização de 5 furos. É possivel verificar pouco desgaste nas arestas de corte da ponta da broca e adesão do aço à aresta de corte da ponta da ferramenta, sendo que esta zona de desgaste não influencia a qualidade final do furo, uma vez que é utilizada na 1ª etapa de furação e as subsequentes eliminam os danos causados por esta. Também é visualizada alguma adesão das fibras de carbono à ferramenta.

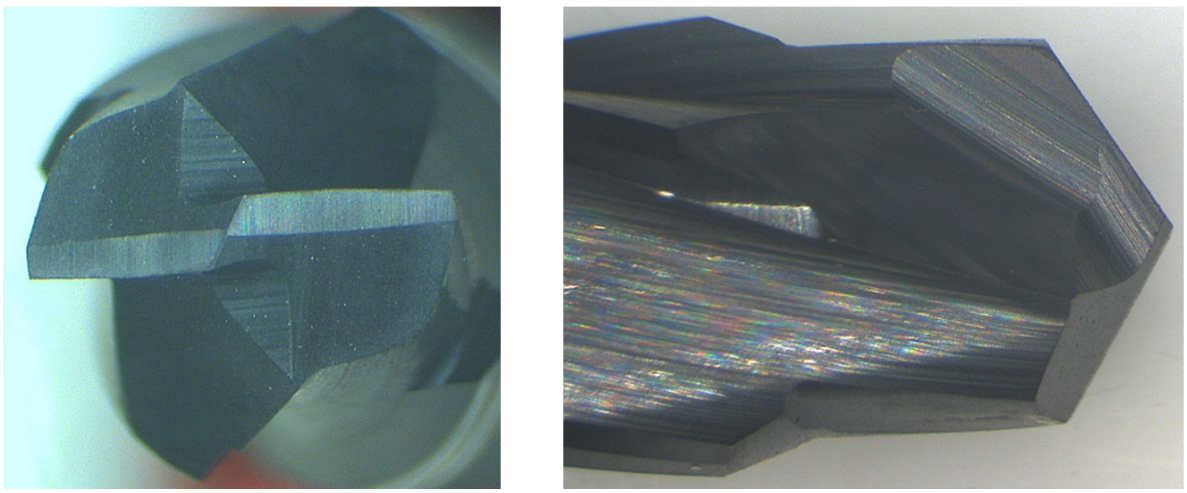


Figura 5.41 – Ferramenta A1 nova: vista de topo (Esquerda); vista lateral (Direita).

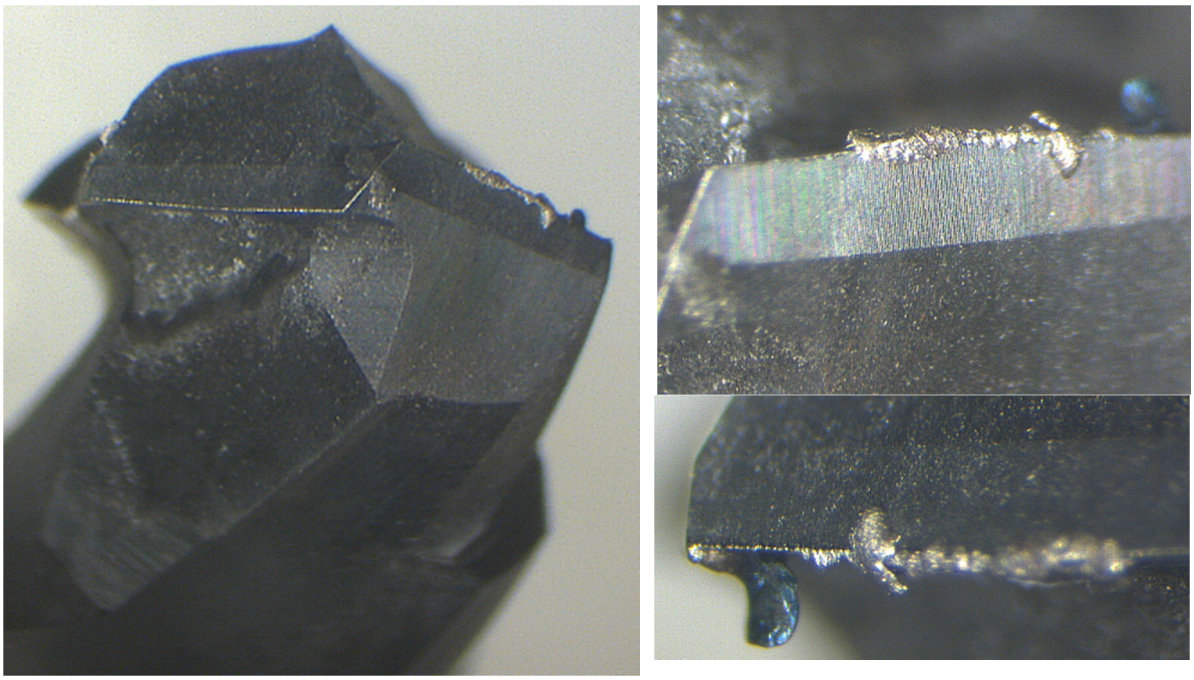


Figura 5.42 – Ferramenta A1 após 5 furos.

Na Figura 5.43 é possível ver algum desgaste na zona de transição com adesão de fibra de carbono, sendo previsível um maior desgaste nesta zona, pois representa a zona de corte principal das etapas de furação orbital.

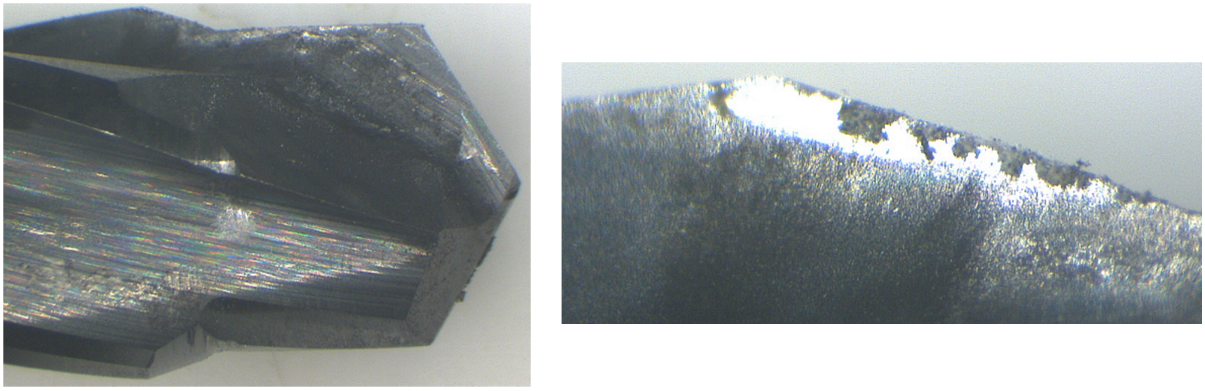


Figura 5.43 – Ferramenta A1 após 5 furos: Vista lateral (esquerda); Vista da zona de transição (direita).

A ferramenta A1 após realizar 10 furos é apresentada na Figura 5.44, onde é verificada a eliminação da adesão de aço com a ferramenta. A evolução do desgaste da ferramenta, dos 5 até aos 10 furos foi residual, concluindo que o avanço axial, de 0,1 mm/dente, escolhido para a 1ª etapa de furação obteve bons resultados a nível do desgaste da ferramenta.

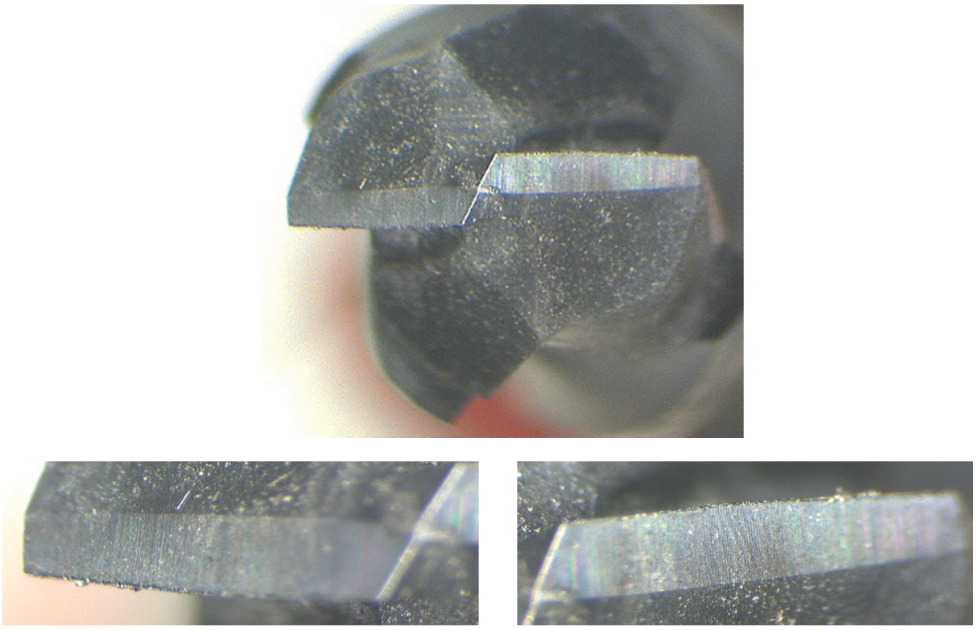


Figura 5.44 – Ferramenta A1 após 10 furos: Vista de topo (cima); Arestas de corte (baixo).

Ferramenta B1

A Figura 5.45 apresenta a ferramenta B1 antes de realizar os ensaios. A Figura 5.46 apresenta a ferramenta B1 após a realização de 5 furos. As arestas de corte da ponta da broca contêm resíduos de aço provenientes da adesão à ferramenta. De uma forma geral, as arestas de corte apresentam pouco desgaste, semelhante à ferramenta A1.

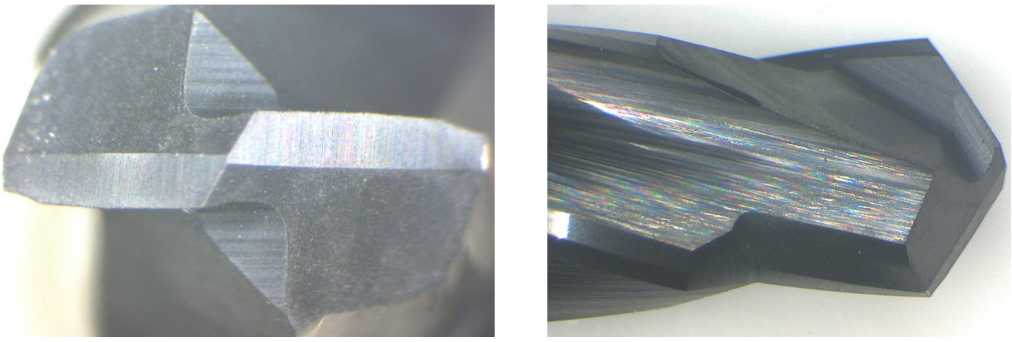


Figura 5.45 – Ferramenta B1 nova: vista de topo (Esquerda); vista lateral (Direita).

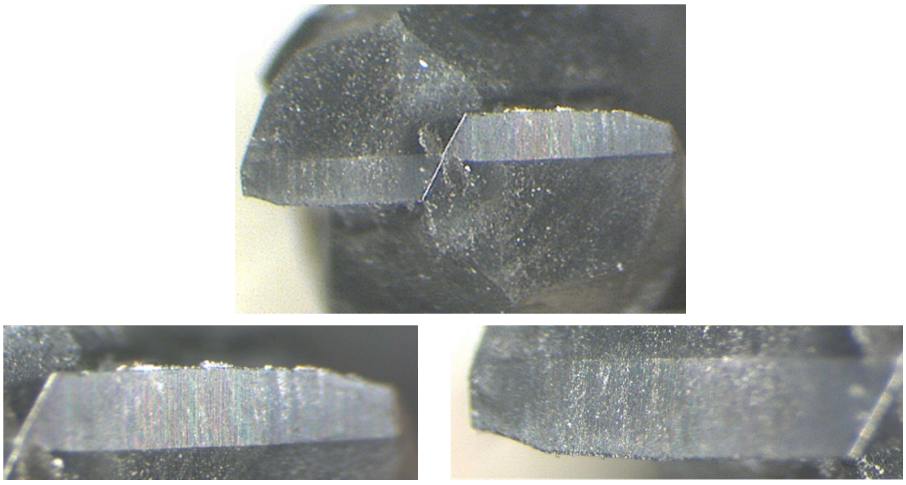


Figura 5.46 – Ferramenta B1 após 5 furos: Vista de topo (cima); Arestas de corte (baixo).

Na Figura 5.47 é possível visualizar fenómeno de *chipping* na zona de transição. A ocorrência deste dano resulta da combinação do ângulo de hélice com a zona de transição, que cria uma aresta viva. Esta aliada aos elevados esforços desenvolvidos durante a furação promove a concentração de tensões na zona em questão. Uma solução para este problema passa por acrescentar um "arredondamento" na aresta para permitir uma distribuição de tensões mais uniforme e eliminar a zona de fragilidade. Pela análise dos gráficos dos esforços nos eixos x e y (plano do provete), Figura 5.48, é possível concluir que a fractura da aresta de corte observada ocorreu durante a realização do ensaio 5, na zona de saída da ferramenta da placa de aço na 2ª etapa, assinalado por uma seta. O gráfico apresentado na Figura 5.49, contém as forças máximas nos eixos das três etapas, assinalados com uma circunferência com a cor correspondente a cada etapa. Os gráficos dos esforços são apresentados na secção seguinte.

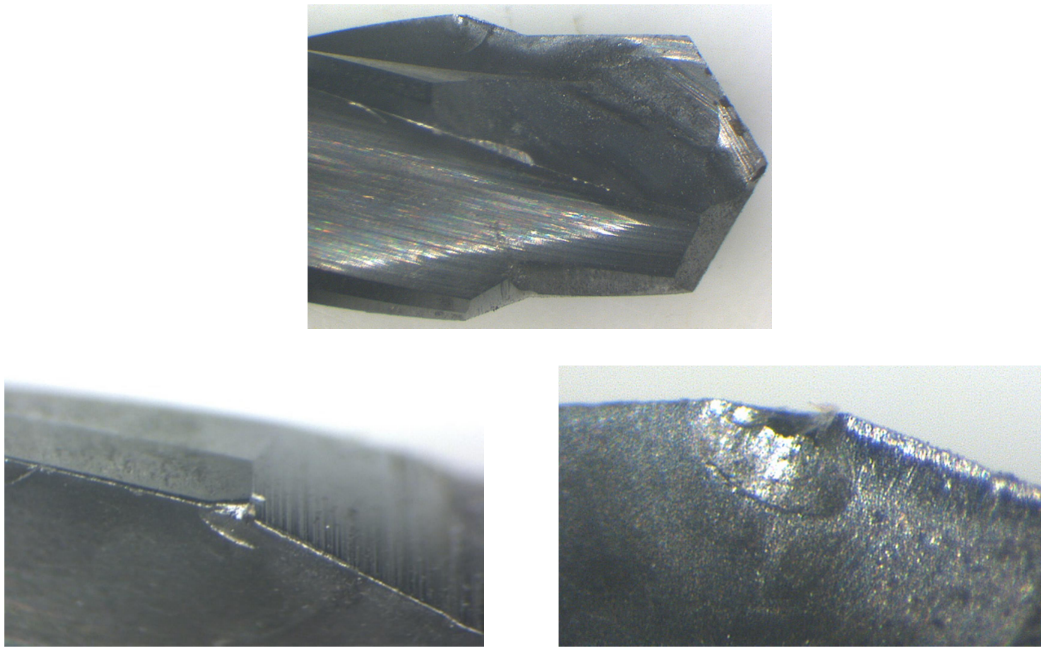


Figura 5.47 – Ferramenta B1 após 5 furos: Vista lateral (cima); Vista da zona de transição (baixo).

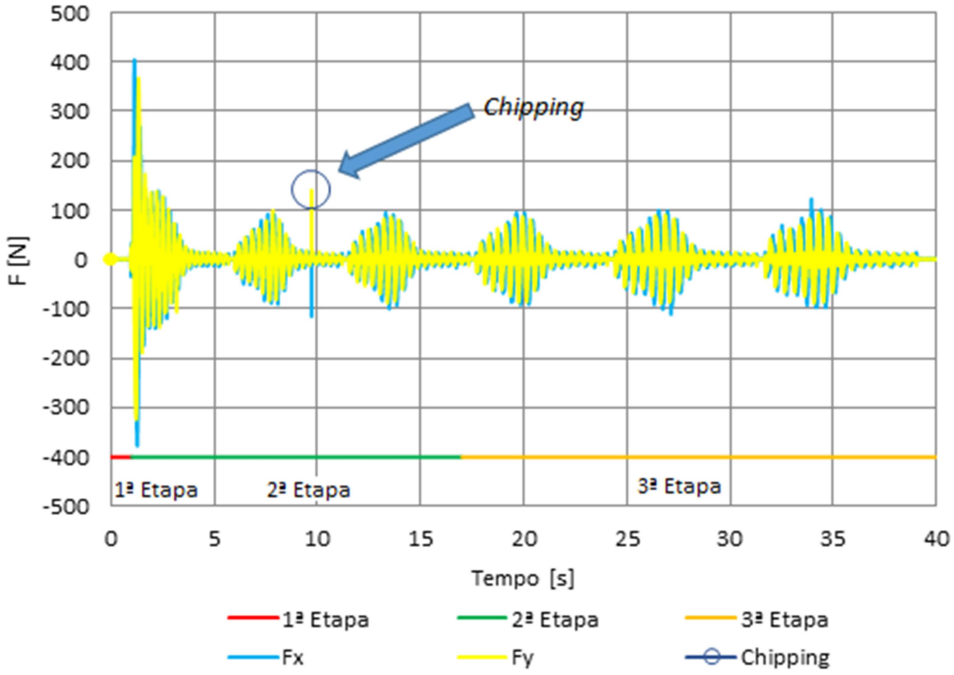


Figura 5.48 – Esforços segundo os eixos x e y, do ensaio 5 com a ferramenta B1 (visível pico de carga correspondente ao momento do *chipping*).

A Figura 5.49 apresenta a ferramenta B1 após a realização de 10 furos, onde é verificado alguma adesão de aço à ferramenta. O desgaste da ferramenta nas arestas de corte, dos 5 até aos 10 furos, apresentou pouco desenvolvimento. No entanto, a extensão do *chipping* aumentou com o decorrer dos ensaios, como visto na Figura 5.50.

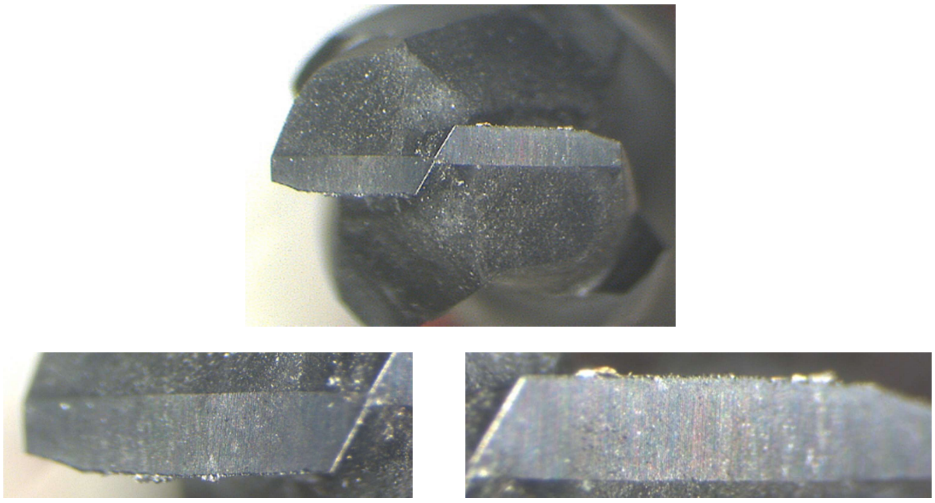


Figura 5.49 – Ferramenta B1 após 10 furos: Vista de topo (cima); Arestas de corte (baixo).

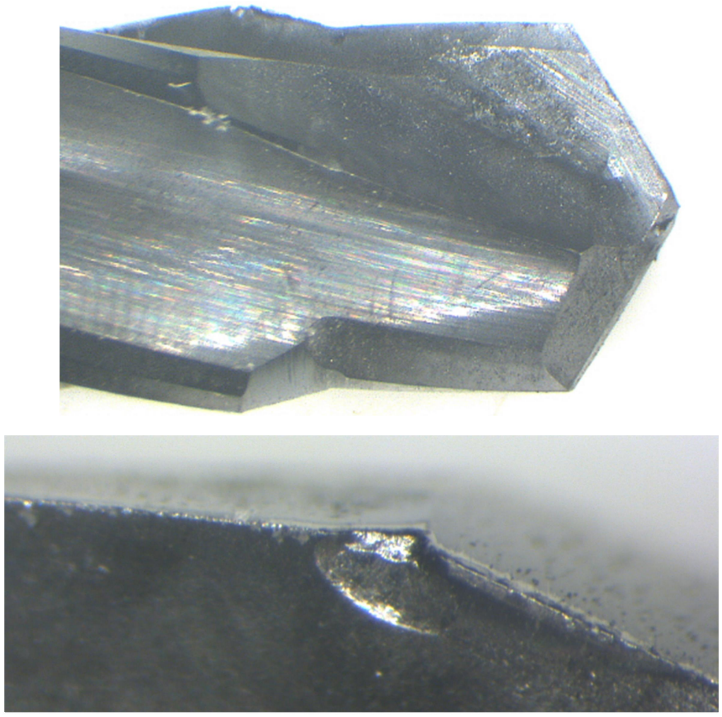


Figura 5.50 – Ferramenta B1 após 10 furos: Vista lateral (cima); Vista da zona de transição

Ferramenta C1

A Figura 5.51 apresenta a ferramenta C1 antes de realizar os ensaios. A Figura 5.52 apresenta a ferramenta C1 após a realização de 5 furos. As arestas de corte da ponta da broca contêm resíduos de aço provenientes da adesão à ferramenta. De uma forma geral, as arestas de corte apresentam pouco desgaste.

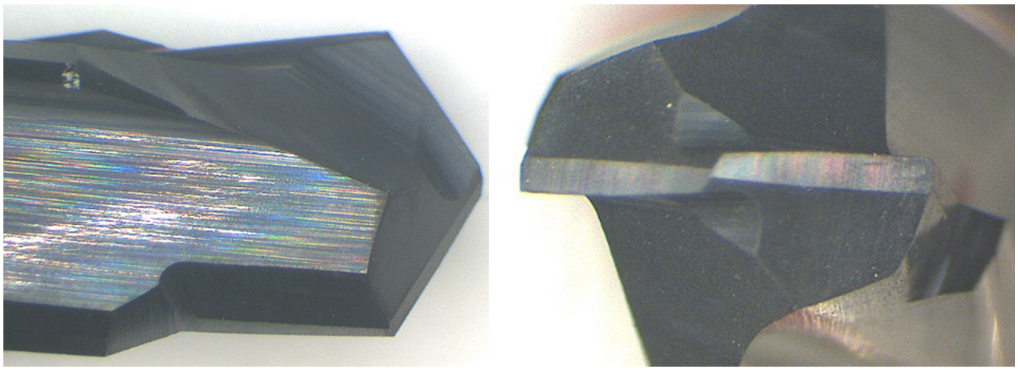


Figura 5.51 – Ferramenta C1 nova: Vista de topo (Esquerda); Vista lateral (Direita).

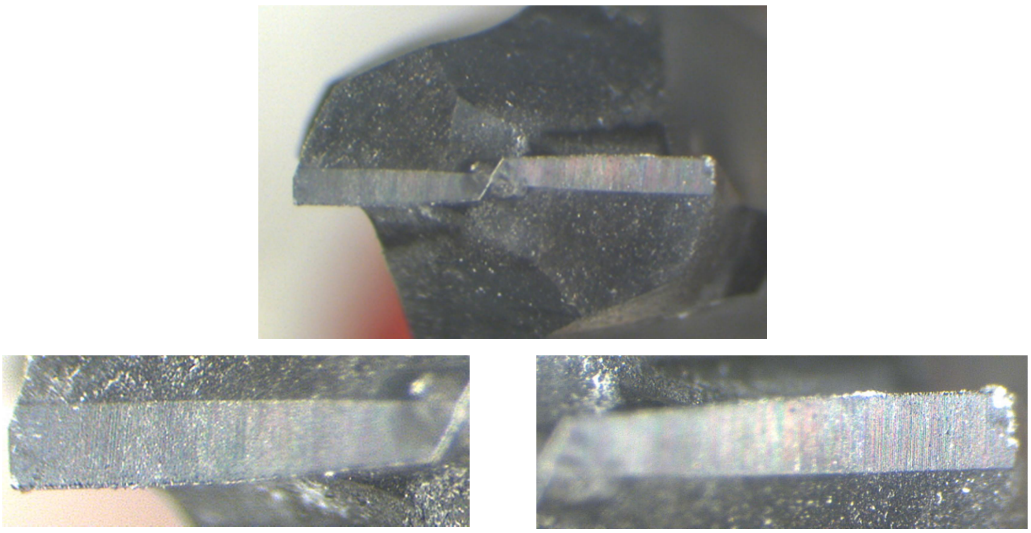


Figura 5.52 – Ferramenta C1 após 5 furos: Vista de topo (cima); Arestas de corte (baixo).

Na Figura 5.53 é possível visualizar a zona de transição com desgaste residual, que, desta forma, apresenta melhores resultados a nível de desgaste, após 5 furos, quando comparado com os resultados obtidos pelas ferramentas A1 e B1.

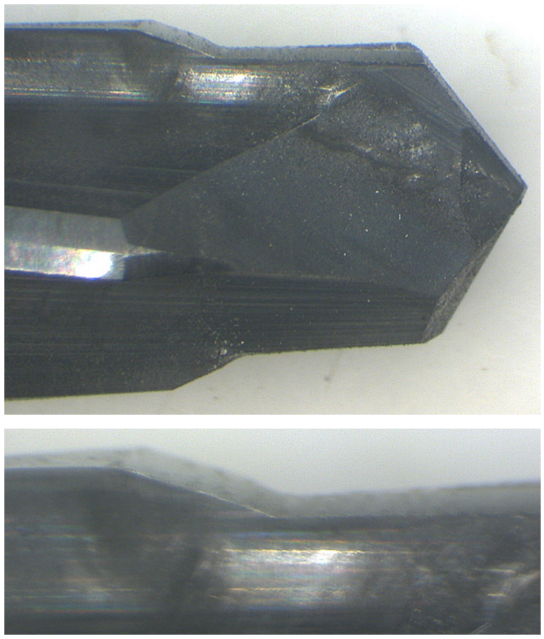


Figura 5.53 – Ferramenta C1 após 5 furos: Vista lateral (cima); Vista da zona de transição (baixo).

A Figura 5.54 apresenta a ferramenta C1 após a realização de 10 furos, onde é verificado alguma apara aderente de aço. O desgaste da ferramenta nas arestas de corte, dos 5 até aos 10 furos, apresentou pouco desenvolvimento.

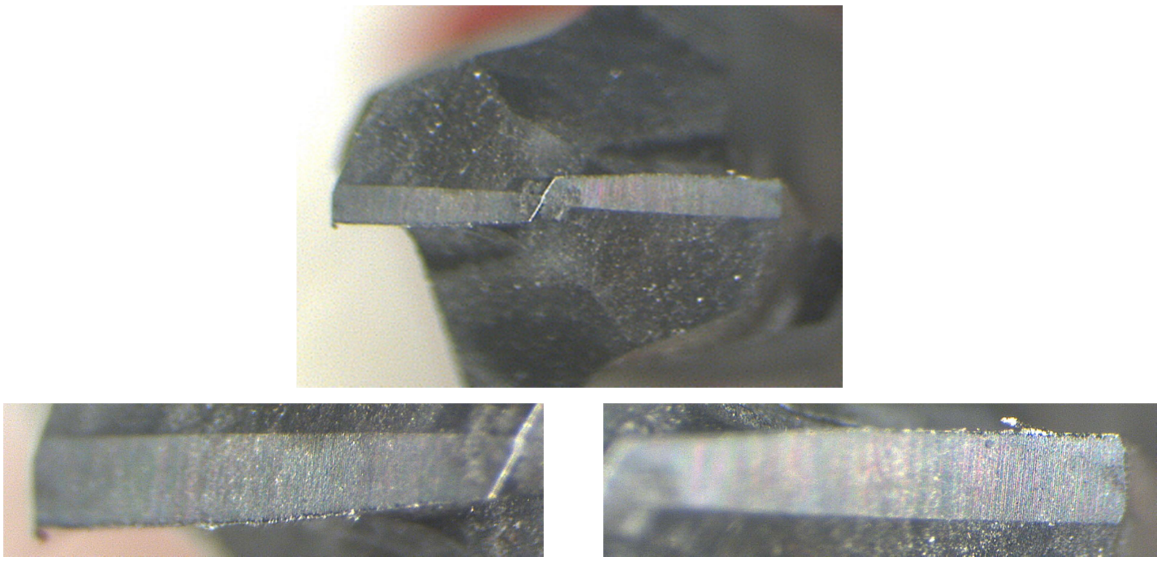


Figura 5.54 – Ferramenta C1 após 10 furos: Vista de topo (cima); Arestas de corte (baixo).

Na Figura 5.55 é possível visualizar a zona de transição com algum desgaste, semelhante ao desgaste apresentado pela ferramenta A1, sendo sobretudo uma abrasão ao nível do revestimento.

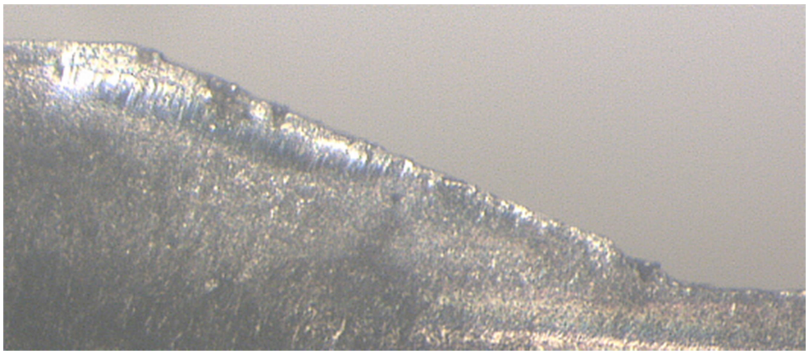


Figura 5.55 – Ferramenta C1 após 10 furos: Vista da zona de transição.

Ferramenta D1

A Figura 5.56 apresenta a ferramenta D1 antes de realizar os ensaios. A Figura 5.57 apresenta a ferramenta D1 após efetuar 5 furos. As arestas de corte da ponta da broca contêm resíduos de aço provenientes da adesão à ferramenta. De uma forma geral, as arestas de corte apresentam pouco desgaste.

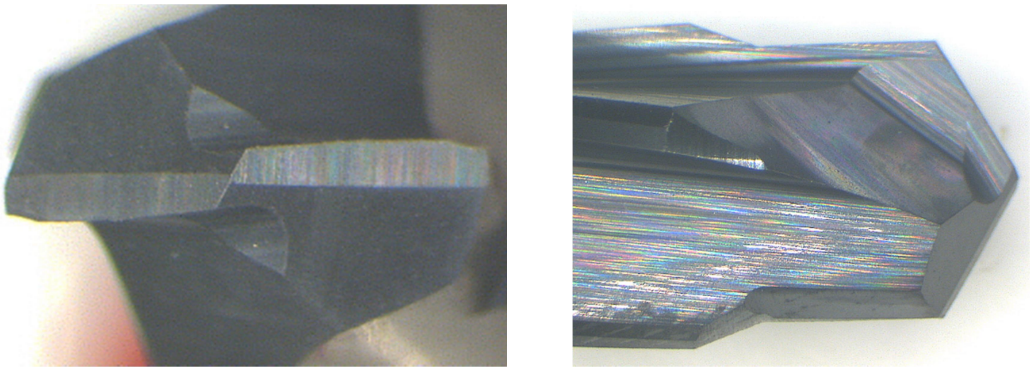


Figura 5.56 – Ferramenta D1 nova: Vista de topo (Esquerda); Vista lateral (Direita).

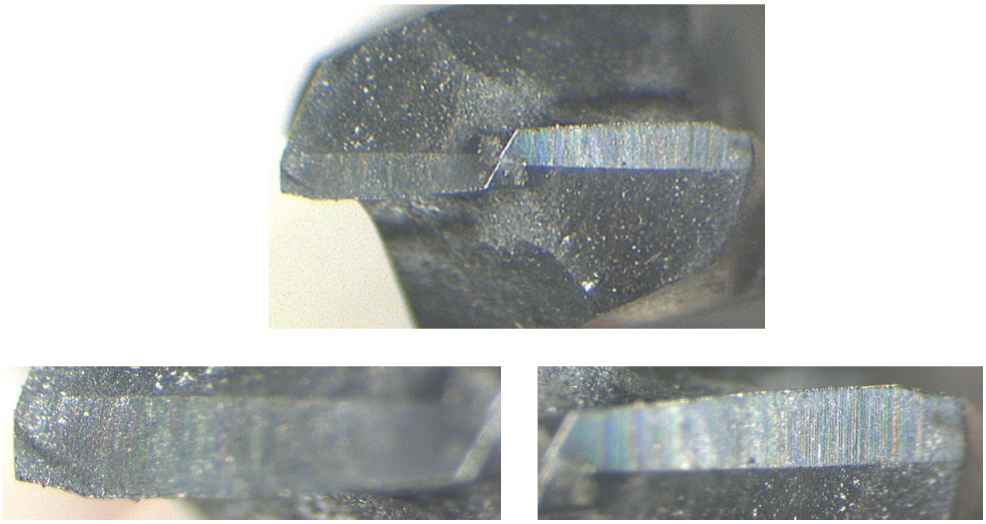


Figura 5.57 – Ferramenta D1 após 5 furos: Vista de topo (cima); Arestas de corte (baixo).

Na Figura 5.58 é possível visualizar a zona de transição com algum desgaste e remoção do revestimento. Também, é possível ver adesão das fibras de carbono à ferramenta. Das ferramentas em questão, esta apresenta os piores resultados, a nível de desgaste após executar os 5 furos. A Figura 5.59 apresenta a ferramenta D1 após a realização de 10 furos, onde é verificado alguma apara aderente de aço. O desgaste da ferramenta nas arestas de corte, dos 5 até aos 10 furos, apresentou pouco desenvolvimento.

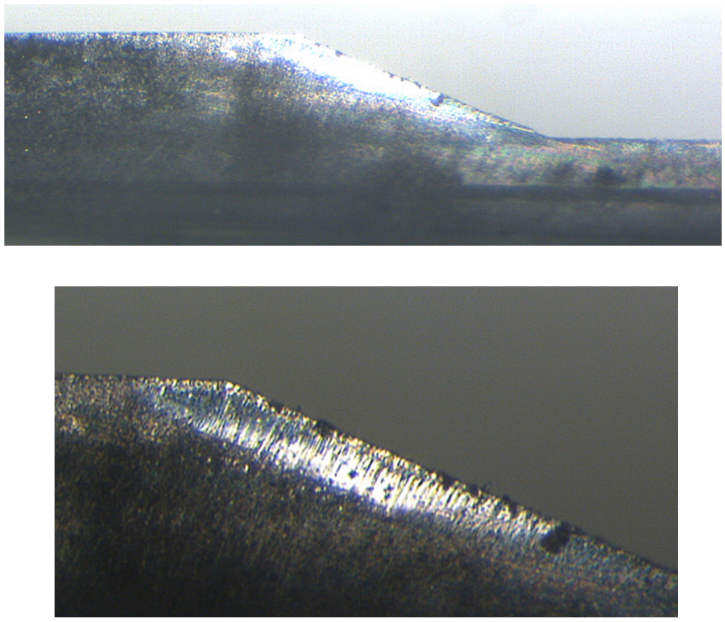


Figura 5.58 – Ferramenta D1 após 5 furos: Vista lateral (cima); Vista do chanfro (baixo).

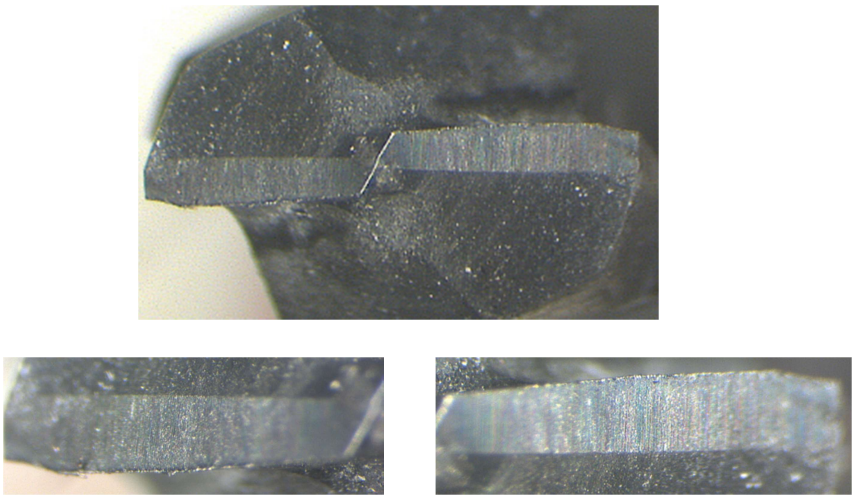


Figura 5.59 – Ferramenta D1 após 10 furos: Vista de topo (cima); Arestas de corte (baixo).

Ferramenta A2

A ferramenta A2 apresenta as mesma características que a ferramenta A1. Posto isto, a Figura 5.60 apresenta a ferramenta após efetuar 10 furos. As arestas de corte da ponta da broca contêm resíduos de aço provenientes da adesão à ferramenta. De uma forma geral, as arestas de corte apresentam pouco desgaste, sendo este semelhante à ferramenta A1.

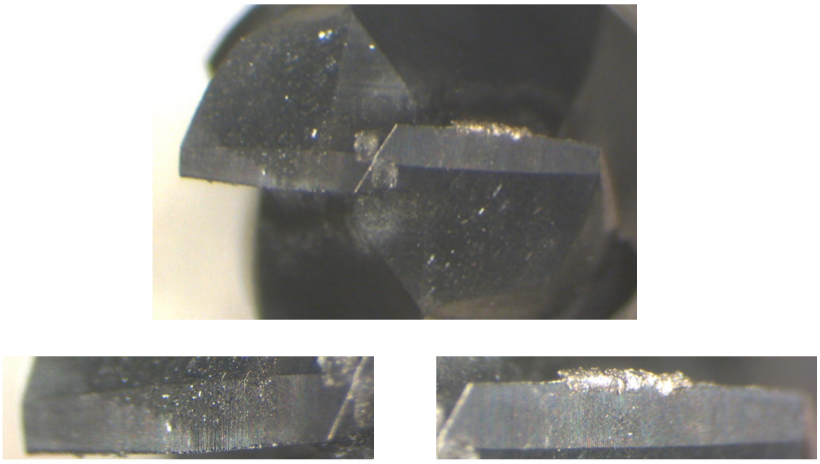


Figura 5.60 – Ferramenta A2 após 10 furos: Vista de topo (cima); Arestas de corte (baixo).

Na Figura 5.61 é possível visualizar a zona de transição com pouco desgaste e início da remoção do revestimento. Também, é possível ver adesão das fibras de carbono à ferramenta, mais concretamente na ponta da ferramenta. Das ferramentas em questão, esta apresenta resultados idênticos aos das ferramentas A1 e C1, a nível de desgaste após executar os 10 furos.

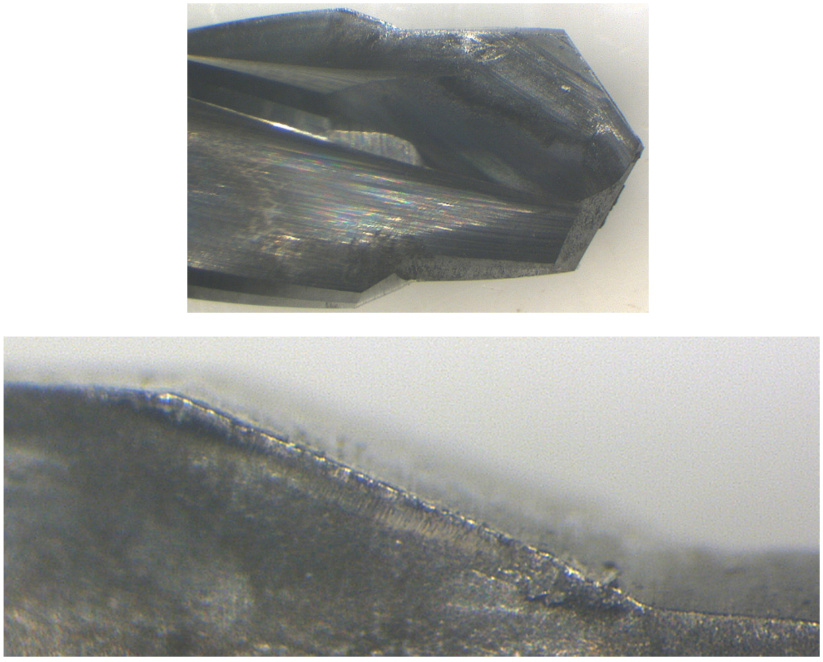


Figura 5.61 – Ferramenta A2 após 10 furos: Vista lateral (cima); Vista do chanfro (baixo).

Ferramenta A3

A Figura 5.62 apresenta a ferramenta A3 após efetuar 10 furos. As arestas de corte da ponta da broca contêm resíduos de aço provenientes da adesão à ferramenta. De uma forma geral, as arestas de corte apresentam pouco desgaste, como verificado em todas as ferramentas com a designação A.

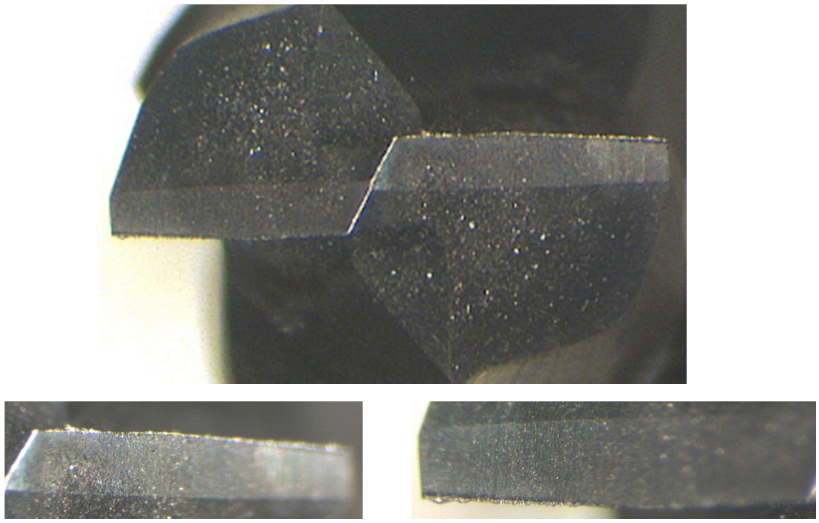


Figura 5.62 – Ferramenta A3 após 10 furos: Vista de topo (cima); Arestas de corte (baixo).

Na Figura 5.63 é possível visualizar a zona de transição com pouco desgaste e início da remoção do revestimento. Também, é possível ver adesão das fibras de carbono à ferramenta, mais concretamente na ponta da ferramenta. Em relação aos ensaios com as ferramentas do tipo A, as escolhas dos parâmetros de corte para os ensaios com as ferramentas A2 e A3, não apresentaram alterações significativas em relação aos ensaios com a ferramenta A1.

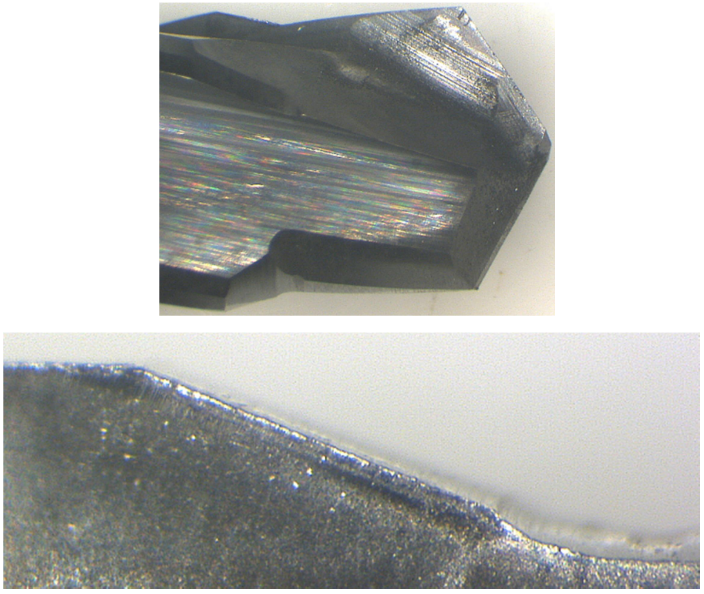


Figura 5.63 – Ferramenta A3 após 10 furos: Vista lateral (cima); Vista do chanfro (baixo).

5.2.3. Esforços de corte

Nesta secção são analisados os esforços de corte provenientes do processo de furação, sendo, para tal, apresentados os gráficos das forças nos três eixos ortogonais *x*, *y* e *z*. Os gráficos dos binários não serão representados, visto que os valores registados em todos os ensaios apresentam valores muito semelhantes e reduzidos.

De uma forma geral, os esforços gerados pelas ferramentas a nível axial diminuíram da primeira etapa, furação direta, para as etapas de furação orbital, como era de prever, visto que as últimas etapas permitem recorrer ao corte periférico ao invés da extrusão do material. No entanto, na 1ª etapa são verificados elevados valores de esforços axiais. Da segunda para a terceira etapa a diminuição do parâmetro de corte *rough pass stepover,* para 0,25 mm nos ensaios realizados com as ferramentas A1, B1, C1 e D1, revelou ser eficaz na redução dos esforços axiais. Os esforços axiais mais elevados na segunda e terceira etapa foram registados com a ferramenta C1, enquanto os valores mais baixos foram registados com a ferramenta A1. Também, é observado que os esforços axiais, nas etapas mencionadas, aumentam com a diminuição do ângulo de ataque, visto que ocorre um aumento dos esforços nos ensaios realizados com a ferramenta A1 para a B1 e de forma semelhante da ferramenta C1 para a D1.

Os esforços tangenciais aumentaram da primeira etapa para a segunda e diminuíram da segunda para a terceira etapa, para as ferramentas A1, B1, C1 e D1. Os valores são muito superiores na segunda etapa, em relação às outras etapas. A diminuição do *rough pass stepover* na terceira etapa, para as ferramentas A1, B1, C1 e D1, também teve influência na redução dos esforços tangenciais, da segunda para a terceira etapa. A ferramenta A1 apresentou os menores esforços tangenciais nas duas últimas etapas, sendo que possui um ângulo de hélice de 20º e um ângulo de ataque de 18º. Para os esforços tangenciais o ângulo de ataque teve maior influência que o ângulo de hélice, uma vez que as maiores variações ocorrem nas ferramentas A1 e B1, durante a segunda etapa. No entanto, os esforços tangenciais foram reduzidos para valores muito parecidos na terceira etapa. É de notar que estes ângulos são da fresa e só têm influência nas etapas de furação orbital.

Como os parâmetros de corte são diferentes nos ensaios realizados com as ferramentas A2 e A3, a comparação dos esforços com as restantes, a nível da geometria, é afetada. Deste modo, não será analisada a influência da geometria nos esforços. Nos ensaios realizados com a ferramenta A2, os valores dos esforços tangenciais foram relativamente semelhantes nas duas últimas as etapas, excepto no segundo ensaio. É de salientar, que o valor do *rough pass stepover* permaneceu constante da segunda para a terceira etapa, ao contrário dos ensaios realizados com as ferramentas A1, B1, C1 e D1. Os ensaios realizados com a ferramenta A3, onde o avanço por dente diminui, para 0,01 mm/dente, os esforços tangenciais diminuíram ligeiramente em relação aos ensaios realizados com as ferramentas A1 e A2, principalmente na segunda etapa.

Os esforços axiais e tangenciais aumentaram ligeiramente, com o aumento do número de furos realizados, em todas as ferramentas utilizadas nos ensaios. Este aumento é influenciado pela evolução do desgaste da ferramenta.

Das Figuras 5.64 à 5.69 são apresentados os gráficos dos esforços de corte resultantes do segundo ensaio realizado com a ferramenta A1, em função do tempo, como também a distinção das diferentes etapas e transição do material. Os gráficos dos ensaios com as restantes ferramentas não serão apresentados, pois apresentam um comportamento muito

semelhante aos ensaios realizados com a ferramenta A1, com a diferença nos valores dos esforços.

Das Figuras 5.70 à 5.75 são apresentados os gráficos dos esforços axiais e tangenciais máximos das ferramentas utilizadas nos ensaios. Como o processo de furação é realizado em três etapas, os gráficos contêm uma divisão de etapas, feita por cores.

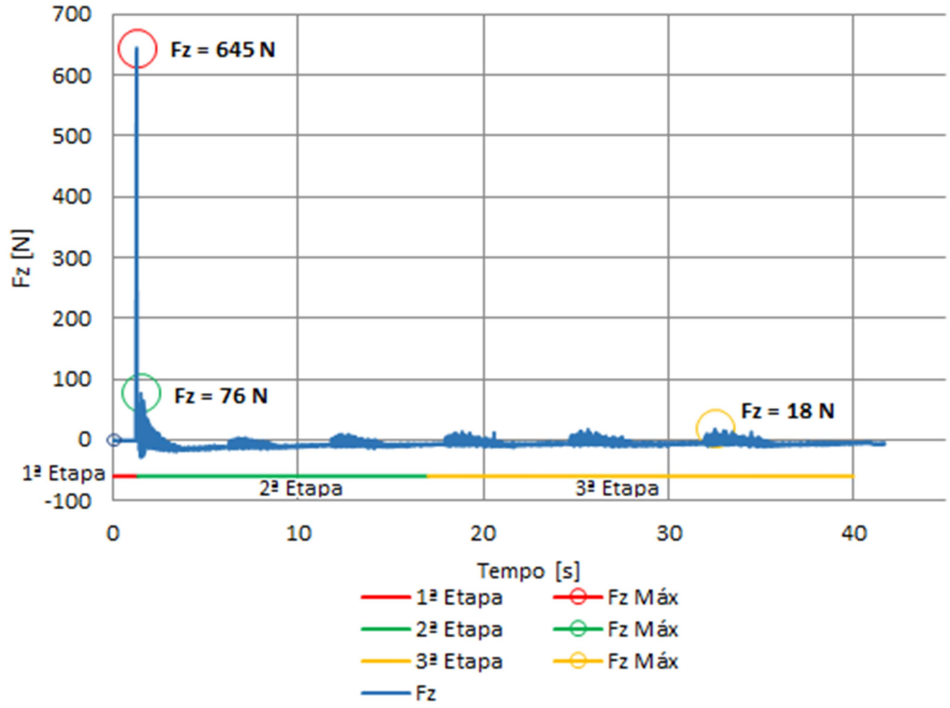


Figura 5.64 – Gráfico dos esforços axiais em função do tempo no ensaio 2 realizado com a ferramenta A1.

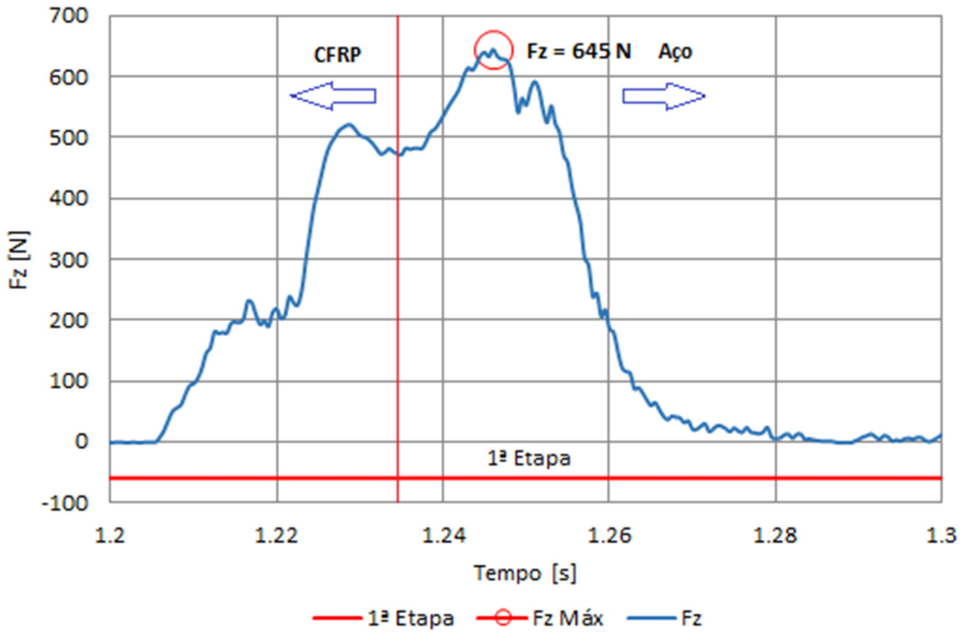


Figura 5.65 – Gráfico dos esforços axiais em função do tempo, da primeira etapa, no ensaio 2 realizado com a ferramenta A1.

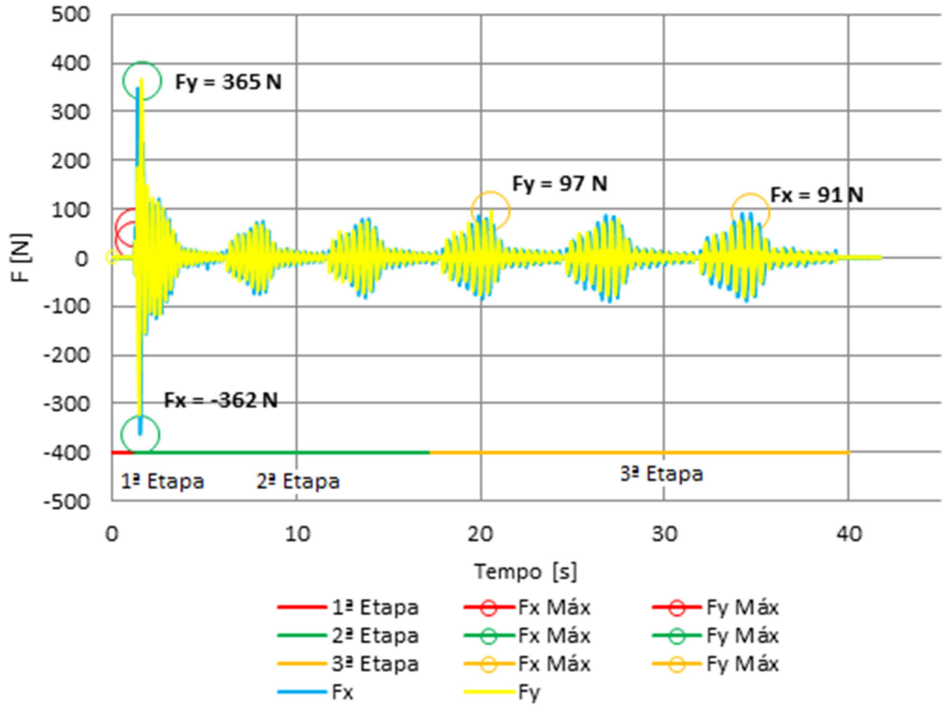


Figura 5.66 – Gráfico dos esforços tangenciais em função do tempo no ensaio 2 realizado com a ferramenta A1.

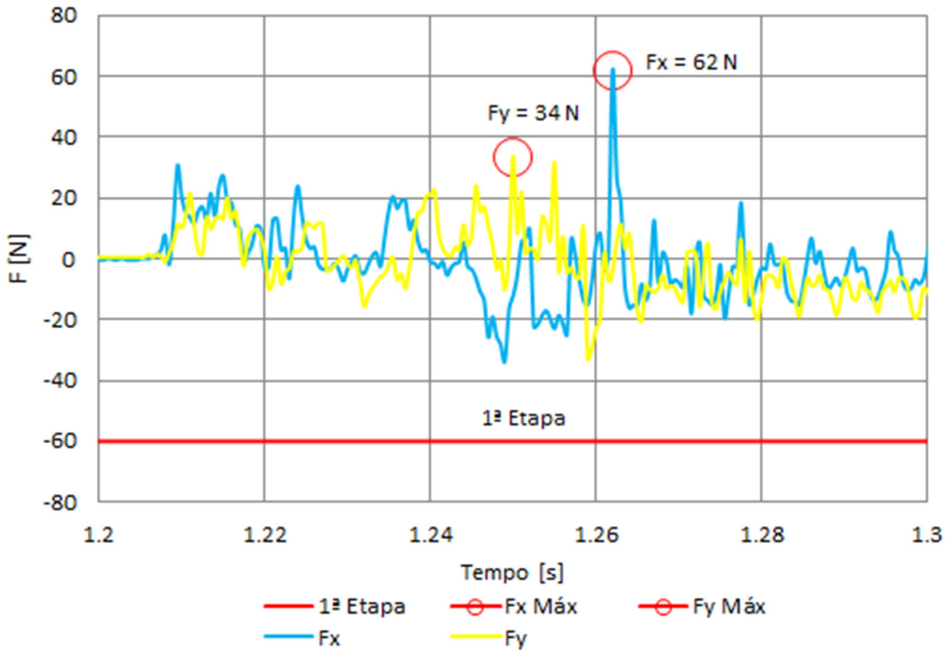


Figura 5.67 – Gráfico dos esforços tangenciais em função do tempo, da primeira etapa, no ensaio 2 realizado com a ferramenta A1.

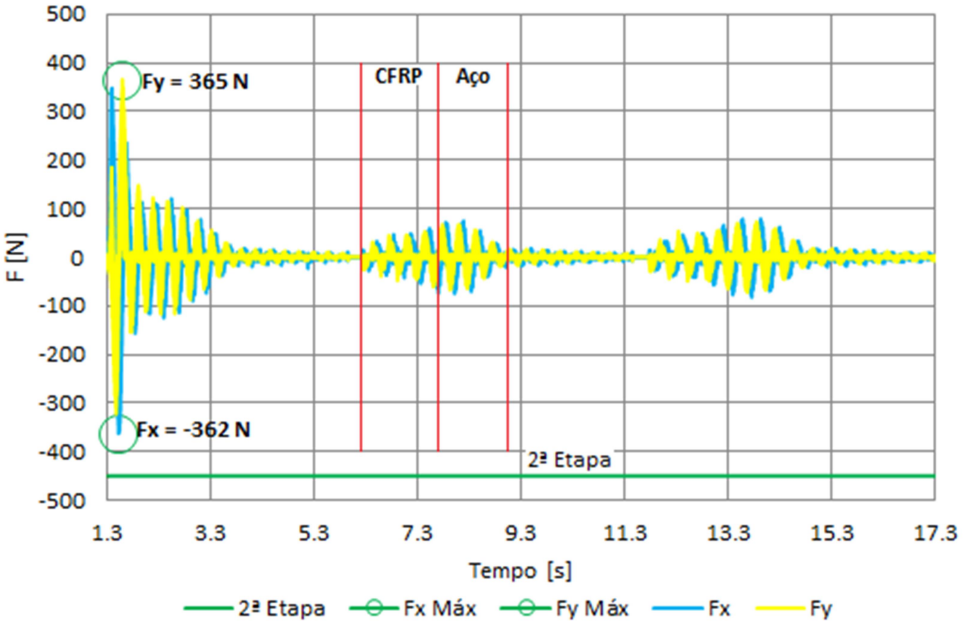


Figura 5.68 – Gráfico dos esforços tangenciais em função do tempo, da segunda etapa, no ensaio 2 realizado com a ferramenta A1.

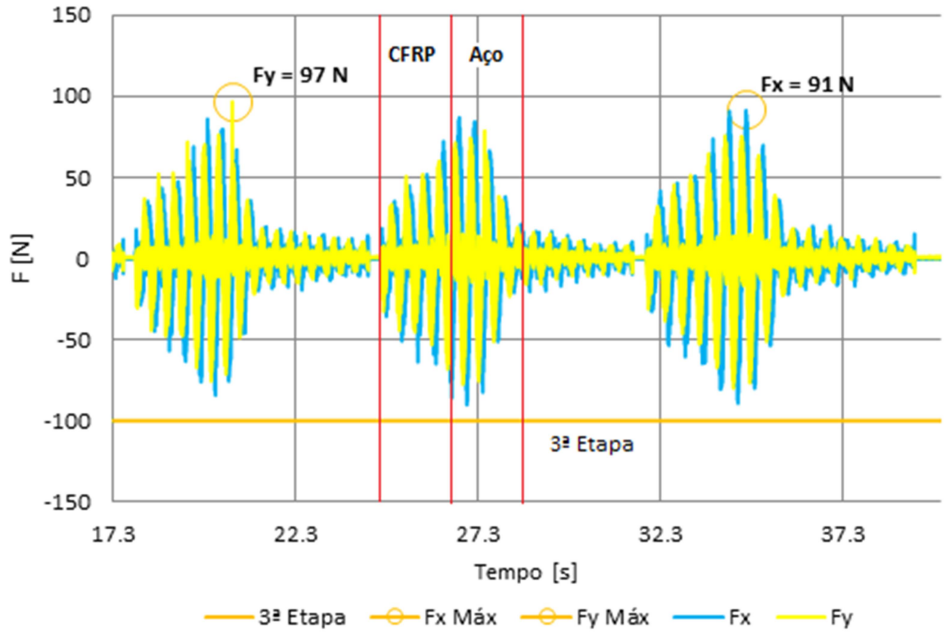
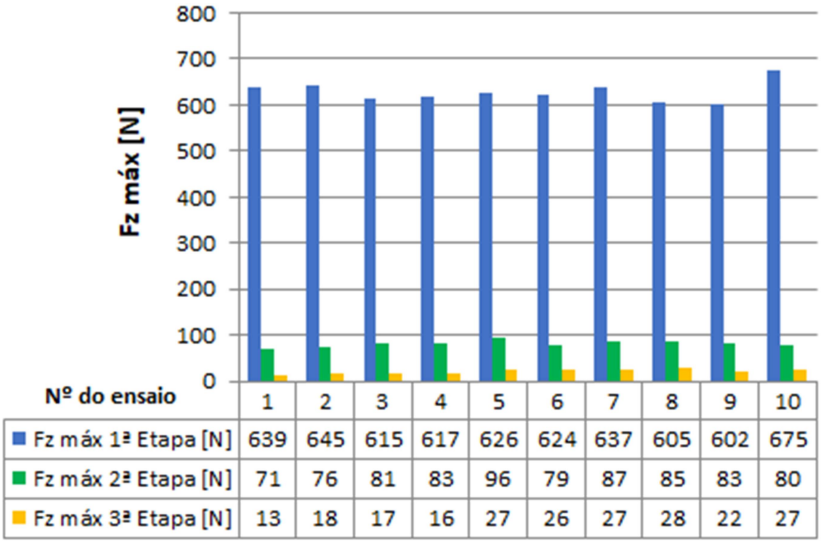
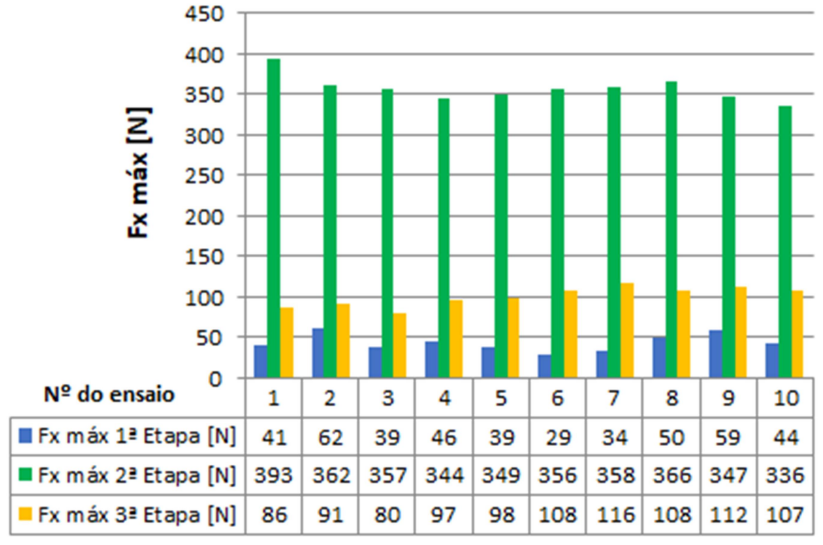


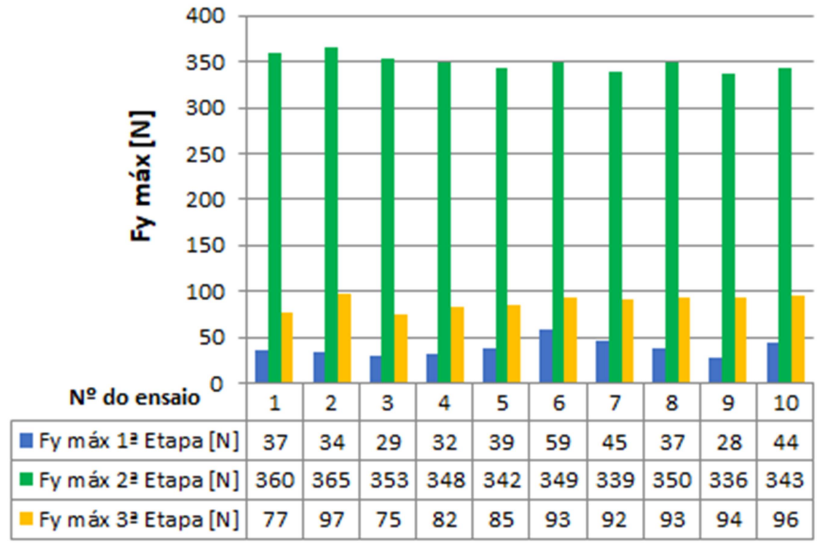
Figura 5.69 – Gráfico dos esforços tangenciais em função do tempo, da terceira etapa, no ensaio 2 realizado com a ferramenta A1.



Nº do ensaio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fz máx 1ª Etapa [N]	639	645	615	617	626	624	637	605	602	675
Fz máx 2ª Etapa [N]	71	76	81	83	96	79	87	85	83	80
Fz máx 3ª Etapa [N]	13	18	17	16	27	26	27	28	22	27

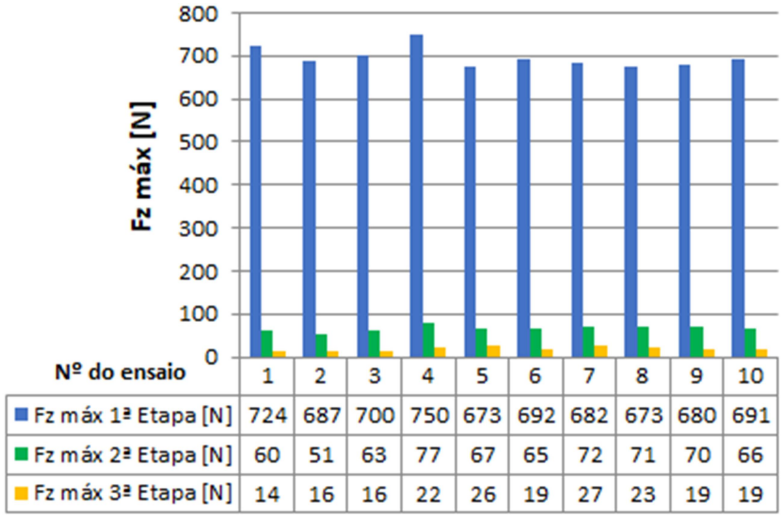


Nº do ensaio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fx máx 1ª Etapa [N]	41	62	39	46	39	29	34	50	59	44
Fx máx 2ª Etapa [N]	393	362	357	344	349	356	358	366	347	336
Fx máx 3ª Etapa [N]	86	91	80	97	98	108	116	108	112	107

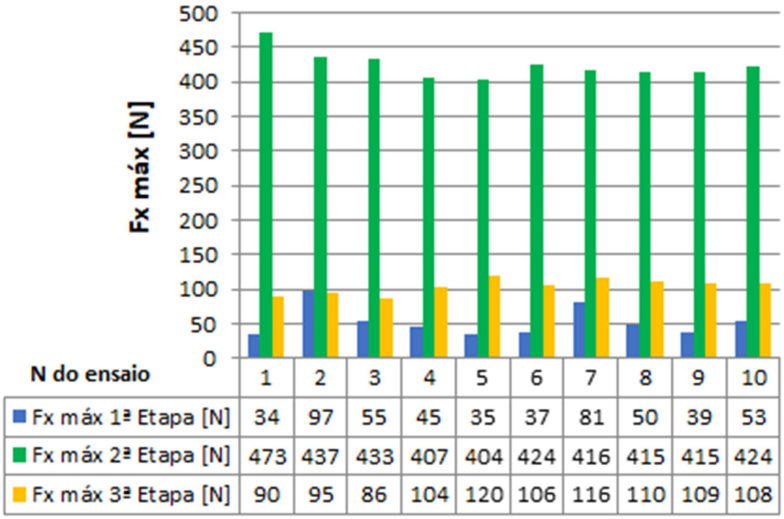


Nº do ensaio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fy máx 1ª Etapa [N]	37	34	29	32	39	59	45	37	28	44
Fy máx 2ª Etapa [N]	360	365	353	348	342	349	339	350	336	343
Fy máx 3ª Etapa [N]	77	97	75	82	85	93	92	93	94	96

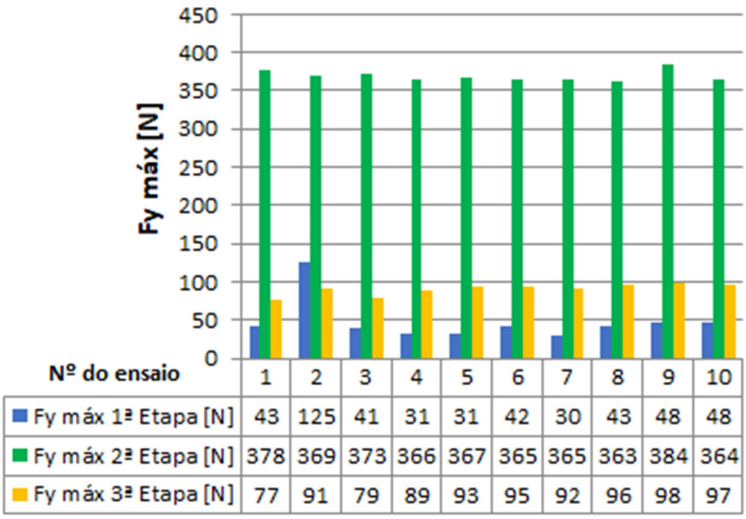
Figura 5.70 – Esforços máximos registados em cada etapa e furo realizado com a ferramenta A1.



Nº do ensaio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fz máx 1ª Etapa [N]	724	687	700	750	673	692	682	673	680	691
Fz máx 2ª Etapa [N]	60	51	63	77	67	65	72	71	70	66
Fz máx 3ª Etapa [N]	14	16	16	22	26	19	27	23	19	19

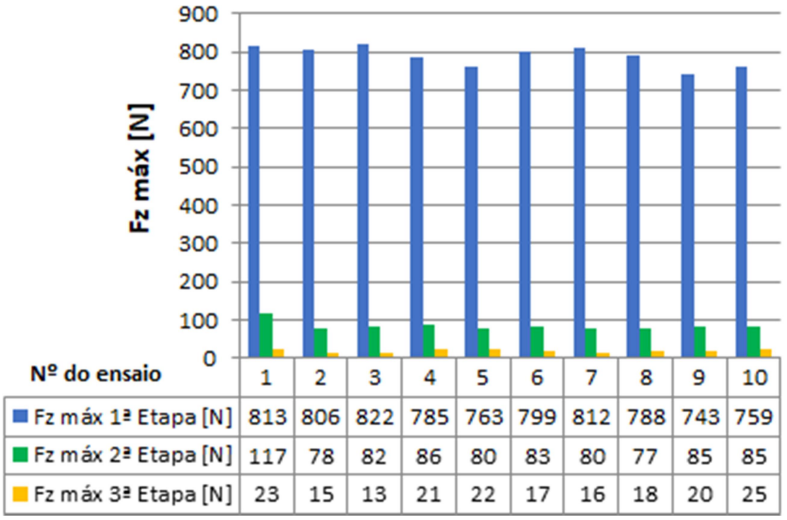


N do ensaio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fx máx 1ª Etapa [N]	34	97	55	45	35	37	81	50	39	53
Fx máx 2ª Etapa [N]	473	437	433	407	404	424	416	415	415	424
Fx máx 3ª Etapa [N]	90	95	86	104	120	106	116	110	109	108

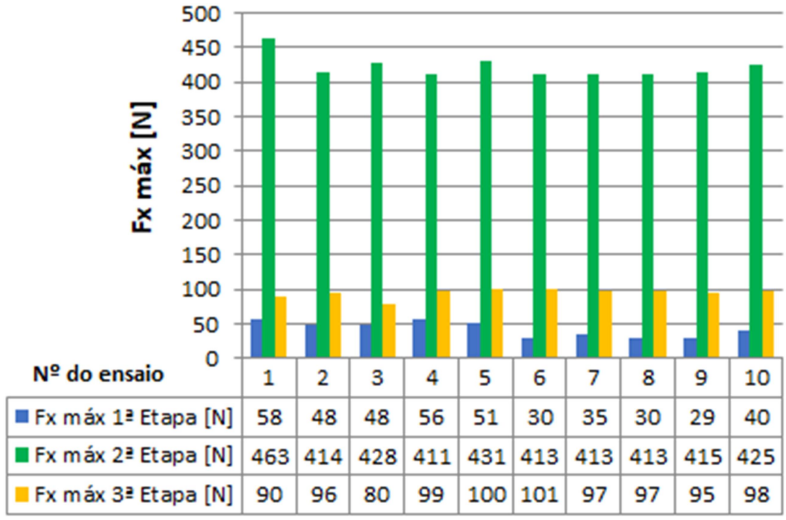


Nº do ensaio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fy máx 1ª Etapa [N]	43	125	41	31	31	42	30	43	48	48
Fy máx 2ª Etapa [N]	378	369	373	366	367	365	365	363	384	364
Fy máx 3ª Etapa [N]	77	91	79	89	93	95	92	96	98	97

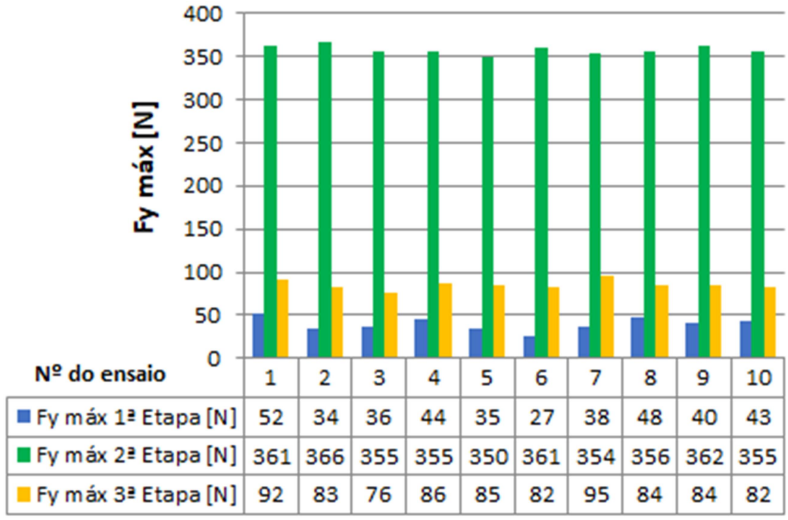
Figura 5.71 – Esforços máximos registados em cada etapa e furo realizado com a ferramenta B1.



Nº do ensaio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fz máx 1ª Etapa [N]	813	806	822	785	763	799	812	788	743	759
Fz máx 2ª Etapa [N]	117	78	82	86	80	83	80	77	85	85
Fz máx 3ª Etapa [N]	23	15	13	21	22	17	16	18	20	25

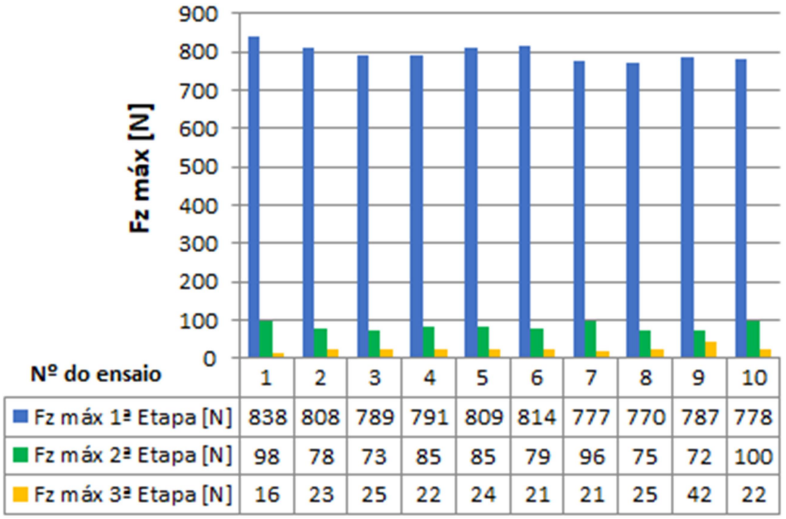


Nº do ensaio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fx máx 1ª Etapa [N]	58	48	48	56	51	30	35	30	29	40
Fx máx 2ª Etapa [N]	463	414	428	411	431	413	413	413	415	425
Fx máx 3ª Etapa [N]	90	96	80	99	100	101	97	97	95	98

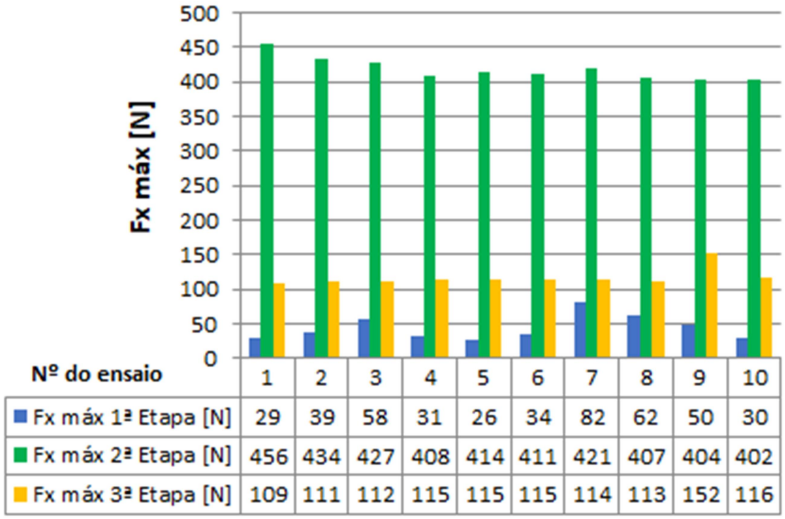


Nº do ensaio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fy máx 1ª Etapa [N]	52	34	36	44	35	27	38	48	40	43
Fy máx 2ª Etapa [N]	361	366	355	355	350	361	354	356	362	355
Fy máx 3ª Etapa [N]	92	83	76	86	85	82	95	84	84	82

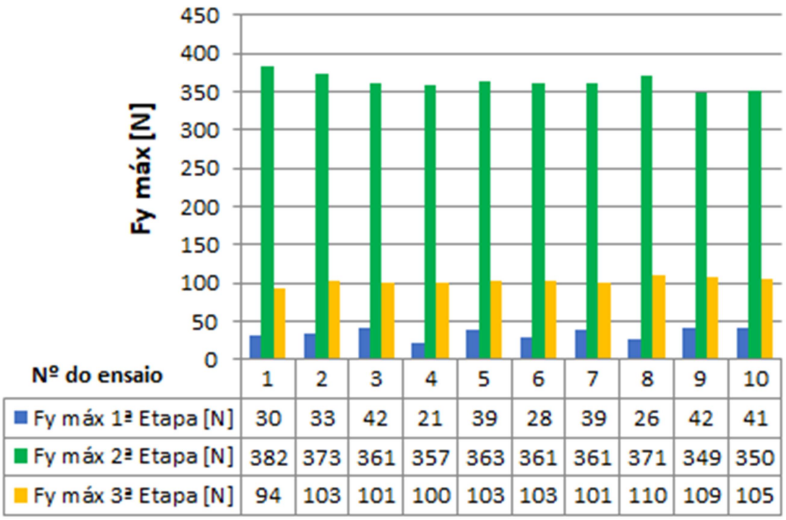
Figura 5.72 – Esforços máximos registados em cada etapa e furo realizado com a ferramenta C1.



Nº do ensaio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fz máx 1ª Etapa [N]	838	808	789	791	809	814	777	770	787	778
Fz máx 2ª Etapa [N]	98	78	73	85	85	79	96	75	72	100
Fz máx 3ª Etapa [N]	16	23	25	22	24	21	21	25	42	22

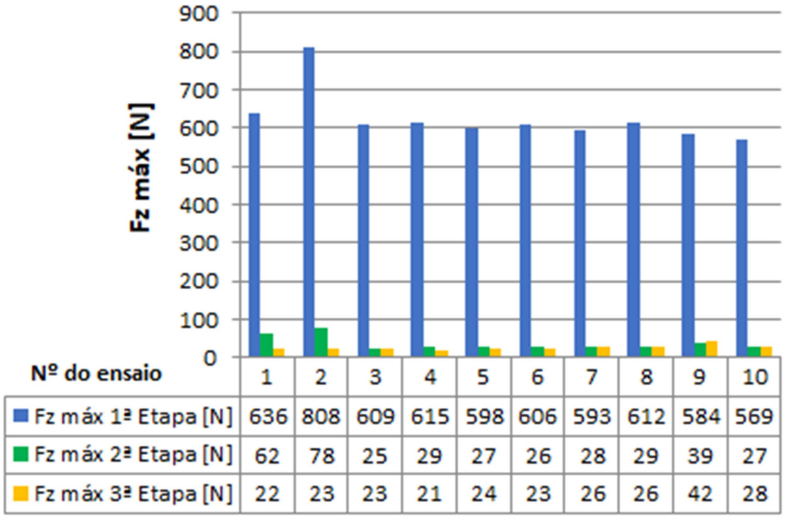


Nº do ensaio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fx máx 1ª Etapa [N]	29	39	58	31	26	34	82	62	50	30
Fx máx 2ª Etapa [N]	456	434	427	408	414	411	421	407	404	402
Fx máx 3ª Etapa [N]	109	111	112	115	115	115	114	113	152	116

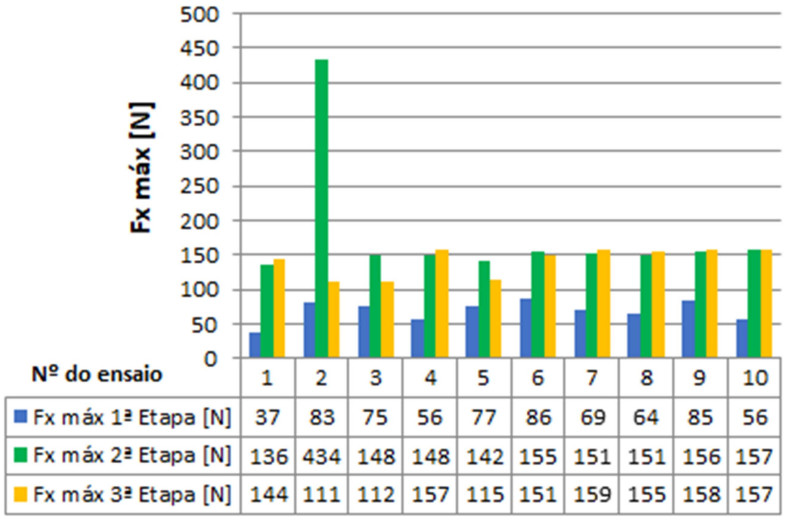


Nº do ensaio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fy máx 1ª Etapa [N]	30	33	42	21	39	28	39	26	42	41
Fy máx 2ª Etapa [N]	382	373	361	357	363	361	361	371	349	350
Fy máx 3ª Etapa [N]	94	103	101	100	103	103	101	110	109	105

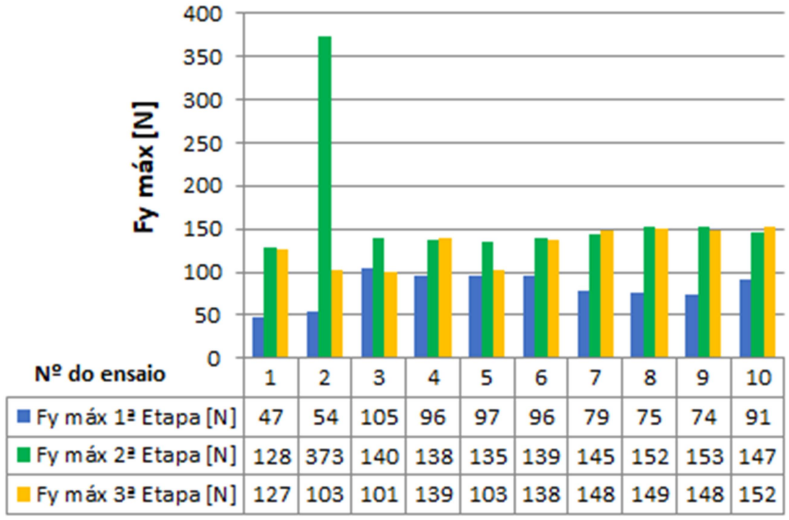
Figura 5.73 – Esforços máximos registados em cada etapa e furo realizado com a ferramenta D1.



Nº do ensaio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fz máx 1ª Etapa [N]	636	808	609	615	598	606	593	612	584	569
Fz máx 2ª Etapa [N]	62	78	25	29	27	26	28	29	39	27
Fz máx 3ª Etapa [N]	22	23	23	21	24	23	26	26	42	28

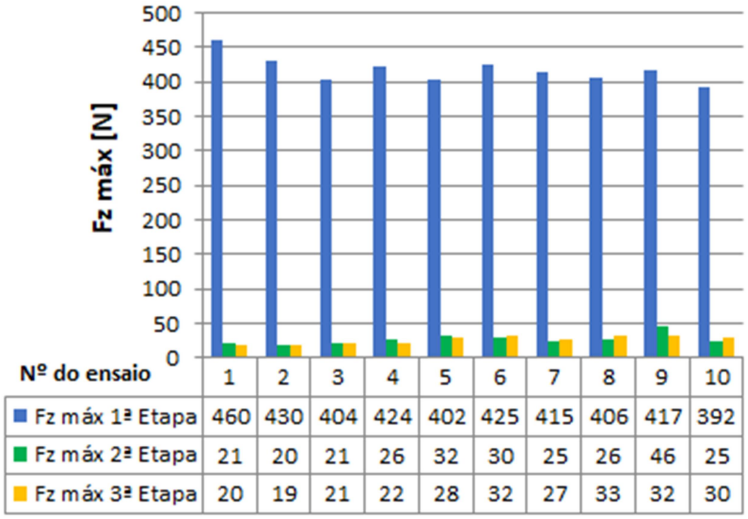


Nº do ensaio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fx máx 1ª Etapa [N]	37	83	75	56	77	86	69	64	85	56
Fx máx 2ª Etapa [N]	136	434	148	148	142	155	151	151	156	157
Fx máx 3ª Etapa [N]	144	111	112	157	115	151	159	155	158	157

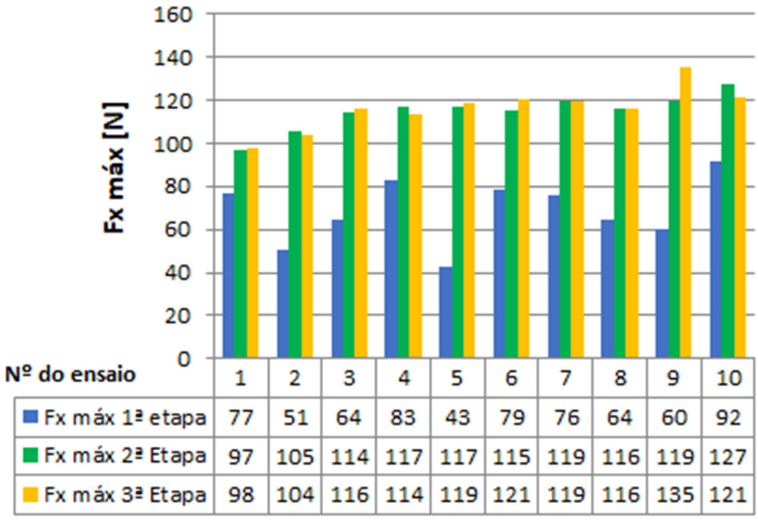


Nº do ensaio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fy máx 1ª Etapa [N]	47	54	105	96	97	96	79	75	74	91
Fy máx 2ª Etapa [N]	128	373	140	138	135	139	145	152	153	147
Fy máx 3ª Etapa [N]	127	103	101	139	103	138	148	149	148	152

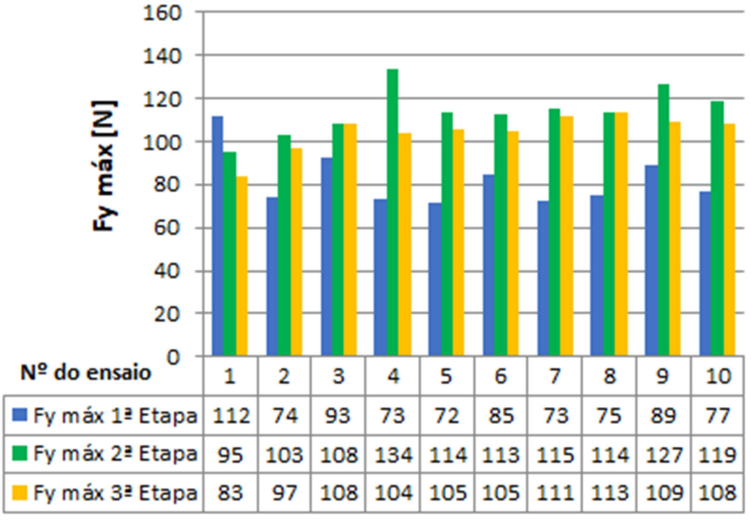
Figura 5.74 – Esforços máximos registados em cada etapa e furo realizado com a ferramenta A2.



Nº do ensaio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fz máx 1ª Etapa	460	430	404	424	402	425	415	406	417	392
Fz máx 2ª Etapa	21	20	21	26	32	30	25	26	46	25
Fz máx 3ª Etapa	20	19	21	22	28	32	27	33	32	30



Nº do ensaio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fx máx 1ª etapa	77	51	64	83	43	79	76	64	60	92
Fx máx 2ª Etapa	97	105	114	117	117	115	119	116	119	127
Fx máx 3ª Etapa	98	104	116	114	119	121	119	116	135	121



Nº do ensaio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fy máx 1ª Etapa	112	74	93	73	72	85	73	75	89	77
Fy máx 2ª Etapa	95	103	108	134	114	113	115	114	127	119
Fy máx 3ª Etapa	83	97	108	104	105	105	111	113	109	108

Figura 5.75 – Esforços máximos registados em cada etapa e furo realizado com a ferramenta A3.

6. Conclusões e Trabalhos Futuros

6.1. Conclusões

Nesta dissertação foi investigada uma estratégia de furação de híbridos aço/CFRP com ferramentas desenvolvidas que incorporam a possibilidade de realizar a furação direta e furação orbital numa estratégia de maquinagem em múltiplas etapas. Desta forma, a estratégia de furação permite realizar furos por etapas, sendo que nestas foram selecionados parâmetros de corte para as diferentes etapas com o objetivo de minimizar os danos associados à furação de híbridos aço/CFRP, como também diminuir o desgaste das ferramentas. Para tal, foi proposto quatro combinações de parâmetros geométricos para averiguar a influência dos ângulos de hélice e ataque na qualidade dos furos obtidos, no desgaste das ferramentas e nos esforços de corte associados ao processo.

Dos resultados, ficou evidente que as ferramentas do tipo A obtiveram os melhores resultados em praticamente todos os aspetos, incluindo os esforços de corte, a qualidade dos furos e o desgaste da ferramenta. Por outro lado, a ferramenta do tipo D apresentou os piores resultados, pois exibiu os valores dos esforços mais elevados e uma má qualidade dos furos, demonstrando uma dificuldade em maquinar híbridos aço/CFRP.

Os esforços axiais diminuíram da primeira etapa para as etapas de furação orbital. Os maiores valores de esforços axiais foram registados na segunda e terceira etapas com a ferramenta C1, enquanto os valores mais baixos foram registados com a ferramenta A1. Nas etapas mencionadas os esforços axiais aumentam com a diminuição do ângulo de ataque, visto que ocorre um aumento, dos ensaios realizados com a ferramenta A1 para a B1 e de forma semelhante da ferramenta C1 para a D1.

Os esforços tangenciais aumentaram da primeira etapa para a segunda e diminuíram da segunda para a terceira etapa. Para os esforços tangenciais, o ângulo de ataque teve maior influência que o ângulo de hélice, uma vez que as maiores variações ocorrem nas ferramentas A1 e B1.

Das ferramentas do tipo A, os furos realizados com a ferramenta A2 apresentaram os melhores resultados ao longo dos ensaios, a nível do desgaste da ferramenta, dos esforços de corte e da qualidade do furo. Nestes ensaios o parâmetro de corte *rough pass stepover* foi alterado para 0,5 mm, na última etapa com o objetivo de utilizar a zona de transição na sua totalidade.

Para os furos realizados com a ferramenta A3 o avanço por dente foi diminuído para 0,01 mm/dente, com o intuito de melhorar a qualidade final do furo. Desta forma, os furos apresentaram uma melhoria na qualidade, ao longo dos ensaios. Contudo, comparativamente à ferramenta A2 mostram ser ligeiramente piores.

Foi possível reduzir os tempos de maquinagem de 3 minutos para 50 segundos, através do aumento na variação do diâmetro entre a broca e a fresa.

É de notar que devido à maquinagem a seco, as elevadas temperaturas geradas no processo de furação levaram à adesão de aparas de aço às arestas de corte das ferramentas.

6.2. Trabalhos Futuros

De forma a melhorar a investigação feita sobre a furação de híbridos aço/CFRP com ferramentas especializadas, são propostos algumas alterações ao projeto, para dar continuação ao desenvolvimento e optimização do processo de furação e da ferramenta idealizada:

- Realizar uma análise ANOVA para averiguar a influência dos parâmetros geométricos nos esforços de corte;
- Ampliar a seleção dos parâmetros geométricos para ângulos maiores e investigar a influência no desgaste das ferramentas, na qualidade do furo e nos esforços de corte;
- Adicionar um raio associado à zona de transição do diâmetro para não ocorrer danos por *chipping* como verificado no decorrer desta investigação;
- Analisar a rugosidade obtida na superfície interior dos furos e apurar a influência dos parâmetros geométricos neste aspeto;
- Optimizar os parâmetros de corte para as diferentes etapas;
- Realizar uma análise do desgaste das ferramentas de forma quantitativa, como referido em [47];
- Efetuar uma simulação, recorrendo ao Método dos Elementos Finitos, do movimento helicoidal e melhorar as trajetórias de furação.
- Analisar uma comparação entre a ferramenta desenvolvida e uma ferramenta fabricada para realizar somente furação orbital.
- Os futuros estudos a desenvolver devem ser realizados com novo CFRP/Aço com qualidade de produção superior, visto que o usado neste estudo apresentava diversos poros que tornam a análise da qualidade dos furos mais desafiante.

Referências

1. Altin Karataş, M. and H. Gökkaya, *A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials.* Defence Technology, 2018. **14**(4): p. 318-326.
2. S, P., et al., *Fiber Reinforced Composites - A Review*. Vol. 06. 2017: Journal of Material Science & Engineering.
3. Wang, W.X., et al., *Effects of curing conditions on the short time co-cure of CFRP-steel hybrid laminates.* Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2015. **34**(10): p. 819-829.
4. Miguel Silva, J., et al., *Correlation of drilling damage with mechanical strength: A geometrical approach.* Composite Structures, 2017. **181**: p. 306-314.
5. Losch, D., et al. *An Industry 4.0-based repair concept for structural CFRP components in the automotive sector*. in *2016 2nd IEEE International Symposium on Robotics and Manufacturing Automation, ROMA 2016*. 2017.
6. Moura, M., A.B.d. Morais, and A.G. Magalhães, *Materiais Compósitos - Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*. 2006, Porto: Publindustria.
7. Chandramohan, D. and J. Bharanichandar, *Natural fiber reinforced polymer composites for automobile accessories.* American Journal of Environmental Sciences, 2014. **9**(6): p. 494-504.
8. Akovali, G., *Handbook of composite fabrication*. 2001, Shawbury: Rapra Technology.
9. Masuelli, M., *Introduction of Fibre-Reinforced Polymers − Polymers and Composites: Concepts, Properties and Processes*. 2013. 3-40.
10. Mallick, P.K., *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design, Second Edition*. 1993: Taylor & Francis.
11. Durão, L., *Machining of hybrid composites.* 2005.
12. Strong, A.B. *Fundamentals of composites manufacturing : materials, methods and applications*. 2008 2018-18-12 2018-18-12]; Available from: http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=882330.
13. Daniel, I.M. and O. Ishai, *Engineering Mechanics of Composite Materials*. 2006: Oxford University Press.
14. Edwards, K.L., *An overview of the technology of fibre-reinforced plastics for design purposes.* Materials and Design, 1998. **19**(1-2): p. 1-10.
15. naturais, t.f.
16. ruben, t.
17. Callister, W.D. and D.G. Rethwisch. *Fundamentals of Materials Science and Engineering : an Integrated Approach, 5th Edition*. 2015; Available from: http://public.eblib.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=4745418.
18. Sinmazçelik, T., et al., *A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods.* Materials and Design, 2011. **32**(7): p. 3671-3685.
19. Lee, D.-W., et al., *Fabrication of high-stiffness fiber-metal laminates and study of their behavior under low-velocity impact loadings.* Composite Structures, 2018. **189**: p. 61-69.
20. Asundi, A. and A.Y.N. Choi, *Fiber metal laminates: An advanced material for future aircraft.* Journal of Materials Processing Technology, 1997. **63**(1): p. 384-394.
21. Logesh, K., et al., *Review on manufacturing of fibre metal laminates and its characterization techniques.* International Journal of Mechanical Engineering and Technology, 2017. **8**(10): p. 561-578.
22. Bikakis, G., et al. *Ballistic impact response of steel fiber-metal laminates*. in *MATEC Web of Conferences*. 2018.
23. Lauter, C., T. Tröster, and C. Reuter, *Hybrid Structures Consisting of Sheet Metal and Fibre Reinforced Plastics for Structural Automotive Applications*, in *Advanced Composite Materials for Automotive Applications: Structural Integrity and Crashworthiness*. 2013. p. 149-174.
24. El-Hofy, H.A.G., *Fundamentals of Machining Processes: Conventional and Nonconventional Processes*. 2006: Taylor & Francis.
25. miguel, t.
26. Ahmad, J., *Machining of Polymer Composites*. 2009: Springer US.
27. Walker, J.R., *Machining Fundamentals*. 2004: Goodheart-Willcox.

28. Groover, M.P., *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*. 2010: John Wiley & Sons.
29. Das, G. and P. Das, *Cutting Forces in Drilling Operation: Measurement and Modeling for Medium-scale Manufacturing Firms.* 2015.
30. Qin, X., et al., *Delamination analysis of the helical milling of carbon fiber-reinforced plastics by using the artificial neural network model.* Journal of Mechanical Science and Technology, 2014. **28**(2): p. 713-719.
31. Haiyan, W., et al., *Analysis of cutting forces in helical milling of carbon fiber-reinforced plastics.* Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2013. **227**(1): p. 62-74.
32. Pereira, R.B.D., et al., *A review of helical milling process.* International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2017. **120**: p. 27-48.
33. Wang, G.D., et al., *Research on milling strategies to reduce delamination damage during machining of holes in CFRP/Ti stack.* Composite Structures, 2018. **200**: p. 679-688.
34. Palbit, *Catálogo Palbit*. 2018.
35. Wang, H., et al., *A comparative study on helical milling of CFRP/Ti stacks and its individual layers.* International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016. **86**(5-8): p. 1973-1983.
36. Denkena, B., D. Boehnke, and J.H. Dege, *Helical milling of CFRP-titanium layer compounds.* CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2008. **1**(2): p. 64-69.
37. Geier, N. and T. Szalay, *Optimisation of process parameters for the orbital and conventional drilling of uni-directional carbon fibre-reinforced polymers (UD-CFRP).* Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 2017. **110**: p. 319-334.
38. Wang, H., et al., *Optimization of Cutting Parameters in Helical Milling of Carbon Fiber Reinforced Polymer.* Transactions of Tianjin University, 2018. **24**(1): p. 91-100.
39. Liu, J., et al., *An investigation of workpiece temperature variation of helical milling for carbon fiber reinforced plastics (CFRP).* International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014. **86**: p. 89-103.
40. Wang, H., X. Qin, and H. Li, *Machinability analysis on helical milling of carbon fiber reinforced polymer.* Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing, 2015. **9**(5).
41. Tsao, C.C., *2 - Drilling processes for composites*, in *Machining Technology for Composite Materials*, H. Hocheng, Editor. 2012, Woodhead Publishing. p. 17-64.
42. Girot, F., F. Dau, and M.E. Gutiérrez-Orrantia, *New analytical model for delamination of CFRP during drilling.* Journal of Materials Processing Technology, 2017. **240**: p. 332-343.
43. Heisel, U. and T. Pfeifroth. *Influence of point angle on drill hole quality and machining forces when drilling CFRP*. in *Procedia CIRP*. 2012.
44. Gaitonde, V.N., et al., *A study aimed at minimizing delamination during drilling of CFRP composites.* Journal of Composite Materials, 2011. **45**(22): p. 2359-2368.
45. Murphy, C., G. Byrne, and M.D. Gilchrist, *The performance of coated tungsten carbide drills when machining carbon fibre-reinforced epoxy composite materials.* Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2002. **216**(2): p. 143-152.
46. Gaugel, S., et al., *A comparative study on tool wear and laminate damage in drilling of carbon-fiber reinforced polymers (CFRP).* Composite Structures, 2016. **155**: p. 173-183.
47. Faraz, A., D. Biermann, and K. Weinert, *Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates.* International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009. **49**(15): p. 1185-1196.
48. Wang, H., X. Zhang, and Y. Duan, *Effects of drilling area temperature on drilling of carbon fiber reinforced polymer composites due to temperature-dependent properties.* International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018. **96**(5-8): p. 2943-2951.
49. Krishnamoorthy, A., et al. *Delamination Analysis of Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) Composite plates by Thermo graphic technique*. in *Materials Today: Proceedings*. 2015.
50. Ramirez, C., et al. *Tool wear monitoring and hole surface quality during CFRP drilling*. in *Procedia CIRP*. 2014.
51. Wang, F., et al., *Secondary cutting edge wear of one-shot drill bit in drilling CFRP and its impact on hole quality.* Composite Structures, 2017. **178**: p. 341-352.
52. Bonnet, C., et al., *CFRP drilling model: Fiber orientation influence on mechanical load and delamination*, in *Advanced Materials Research*. 2011. p. 111-121.

53. Voss, R., M. Henerichs, and F. Kuster, *Corrigendum to "Comparison of conventional drilling and orbital drilling in machining carbon fibre reinforced plastics (CFRP)" [CIRP Annals - Manufacturing Technology 65 (2016) 137–140](S0007850616300014)(10.1016/j.cirp.2016.04.001).* CIRP Annals, 2017. **66**(1): p. 559.
54. Voss, R., M. Henerichs, and F. Kuster, *Comparison of conventional drilling and orbital drilling in machining carbon fibre reinforced plastics (CFRP).* CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2016. **65**(1): p. 137-140.
55. Caggiano, A., I. Improta, and L. Nele, *Characterization of a new dry drill-milling process of Carbon Fibre Reinforced Polymer laminates.* Materials, 2018. **11**(8).
56. Hosokawa, A., et al., *High-quality machining of CFRP with high helix end mill.* CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2014. **63**(1): p. 89-92.
57. Waqar, S., et al. *Optimization of cutting tool geometric parameters in milling of CFRP laminates*. in *ICCM International Conferences on Composite Materials*. 2017.
58. Rahim, E.A., et al., *Performance of tools design when helical milling on carbon fiber reinforced plastics (CFRP) aluminum (Al) stack*, in *Applied Mechanics and Materials*. 2014. p. 1075-1079.
59. He, G., et al., *Helical milling of CFRP/Ti-6Al-4V stacks with varying machining parameters.* Transactions of Tianjin University, 2015. **21**(1): p. 56-63.
60. Li, S., et al., *A comparative study of hole-making performance by coated and uncoated WC/Co cutters in helical milling of Ti/CFRP stacks.* International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018. **94**(5-8): p. 2645-2658.
61. Senthilkumar, M., A. Prabukarthi, and V. Krishnaraj, *Machining of CFRP/Ti6Al4V stacks under minimal quantity lubricating condition.* Journal of Mechanical Science and Technology, 2018. **32**(8): p. 3787-3796.
62. Khairusshima, M.K.N. and I.S.S. Sharifah. *Study on Tool Wear during Milling CFRP under Dry and Chilled Air Machining*. in *Procedia Engineering*. 2017.
63. Eneyew, E.D. and M. Ramulu, *Experimental study of surface quality and damage when drilling unidirectional CFRP composites.* Journal of Materials Research and Technology, 2014. **3**(4): p. 354-362.
64. Wang, G.D., et al., *Experimental research in CFRP/Ti stack through different helical milling strategies.* International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018. **98**(9-12): p. 3251-3267.
65. Wang, G.D., S.K. Melly, and N. Li, *Experimental studies on a two-step technique to reduce delamination damage during milling of large diameter holes in CFRP/Al stack.* Composite Structures, 2018. **188**: p. 330-339.
66. Kolesnyk, V., et al., *The effect of cutting temperature on carbide drilling life in the process of CFRP/steel stacks drilling.* Manufacturing Technology, 2015. **15**(3): p. 357-362.
67. Bleicher, F., et al., *Vibration assisted drilling of CFRP/metal stacks at low frequencies and high amplitudes.* Production Engineering, 2018. **12**(2): p. 289-296.
68. Liu, D., Y. Tang, and W.L. Cong, *A review of mechanical drilling for composite laminates.* Composite Structures, 2012. **94**(4): p. 1265-1279.
69. Persson, E., I. Eriksson, and L. Zackrisson, *Effects of hole machining defects on strength and fatigue life of composite laminates.* Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 1997. **28**(2): p. 141-151.
70. Durão, L.M.P., et al., *Damage evaluation of drilled carbon/epoxy laminates based on area assessment methods.* Composite Structures, 2013. **96**: p. 576-583.
71. Durão, L.M.P., et al., *Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates.* Composite Structures, 2010. **92**(7): p. 1545-1550.
72. Schulze, V., et al., *Machining strategies for hole making in composites with minimal workpiece damage by directing the process forces inwards.* Journal of Materials Processing Technology, 2011. **211**(3): p. 329-338.
73. Hocheng, H. and C.C. Tsao, *The path towards delamination-free drilling of composite materials.* Journal of Materials Processing Technology, 2005. **167**(2-3): p. 251-264.
74. König, W., et al., *Machining of Fibre Reinforced Plastics.* CIRP Annals - Manufacturing Technology, 1985. **34**(2): p. 537-548.
75. Chen, W.C., *Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates.* International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1997. **37**(8): p. 1097-1108.
76. Campos Rubio, J.C., et al., *Delamination in high speed drilling of Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP).* Journal of Composite Materials, 2008. **42**(15): p. 1523-1532.

77. Sorrentino, L., S. Turchetta, and C. Bellini, *A new method to reduce delaminations during drilling of FRP laminates by feed rate control.* Composite Structures, 2018. **186**: p. 154-164.
78. Krishnaraj, V., et al., *Optimization of machining parameters at high speed drilling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates.* Composites Part B: Engineering, 2012. **43**(4): p. 1791-1799.
79. Durão, L.M.P., et al., *Damage assessment of fibre reinforced laminates.* Composite Structures, 2015. **133**: p. 939-946.
80. Mehta, M., T. Reinhart, and A. Soni, *Effect of fastener hole drilling anomalies on structural integrity of PMR-15/Gr composite laminates.* Machining of composite materials(A 95-15178 02-37), Materials Park, OH, ASM International, 1992, 1992: p. 113-126.
81. Davim, J.P., J.C. Rubio, and A.M. Abrao, *A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates.* Composites Science and Technology, 2007. **67**(9): p. 1939-1945.
82. Dharan, C.K.H., *Fracture mechanics of composite materials.* Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME, 1978. **100**(3): p. 233-247.
83. Ho-Cheng, H. and C.K.H. Dharan, *Delamination during drilling in composite laminates.* Journal of engineering for industry, 1990. **112**(3): p. 236-239.
84. Tsao, C.C. and H. Hocheng, *Effect of tool wear on delamination in drilling composite materials.* International Journal of Mechanical Sciences, 2007. **49**(8): p. 983-988.
85. Jain, S. and D.C. Yang, *Effects of feedrate and chisel edge on delamination in composites drilling.* Journal of engineering for industry, 1993. **115**(4): p. 398-405.
86. Jain, S. and D.C. Yang, *Delamination-free drilling of composite laminates.* Journal of engineering for industry, 1994. **116**(4): p. 475-481.
87. Wang, G.D. and S.K. Melly, *Three-dimensional finite element modeling of drilling CFRP composites using Abaqus/CAE: a review.* International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018. **94**(1-4): p. 599-614.
88. Phadnis, V.A., A. Roy, and V.V. Silberschmidt. *Finite element analysis of drilling in carbon fiber reinforced polymer composites*. in *Journal of Physics: Conference Series*. 2012.
89. Wu, M., et al. *Carbon Fiber Composite Materials Finite Element Simulation Analysis of Cutting Force*. in *Procedia CIRP*. 2016.
90. Durão, L.M.P., M.F.S.F. de Moura, and A.T. Marques, *Numerical simulation of the drilling process on carbon/epoxy composite laminates.* Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2006. **37**(9): p. 1325-1333.
91. Katiyar, P.K., et al., *Modes of failure of cemented tungsten carbide tool bits (WC/Co): A study of wear parts.* International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2016. **54**: p. 27-38.
92. Shipway, P.H. and J.J. Hogg, *Dependence of microscale abrasion mechanisms of WC-Co hardmetals on abrasive type.* Wear, 2005. **259**(1-6): p. 44-51.
93. J.M.d.S, M., *Sistema Híbrido Metal/Compósito*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2018, Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade do Porto.
94. Neto, F., *tese Neto.*
95. Feito, N., et al., *Experimental and numerical analysis of step drill bit performance when drilling woven CFRPs.* Composite Structures, 2018. **184**: p. 1147-1155.
96. Li, M., et al. *Study on tool wear and workpiece surface integrity following drilling of CFRP laminates with variable feed rate strategy*. in *Procedia CIRP*. 2018.

Anexo A – Ficha técnica do Aço SSAB Docol 600 DP

DOCOL®
THE AUTOMOTIVE STEEL

Data sheet 2102 Docol 600DP 2017-04-19

Docol 600DP

General Product Description

Docol 600DP dual-phase steel has good formability and weldability and is suitable for car safety components such as seat racks. This steel undergoes special heat treatment in a continuous annealing line, producing a two-phase structure. Ferrite that imparts unique forming properties represents one phase, and martensite that accounts for the strength represents the other phase.

Dimension range

Docol CR350Y600T-DP / UC: thickness 0.50-2.10 mm, width up to 1527 mm, length up to 8500 mm.

Slitting to narrow coils and cutting to sheets are available upon request.

Mechanical Properties

Steelgrade	Coating	Yield strength $R_{p0,2}$ (MPa)	Tensile strength R_m (MPa)	Elongation A_{80} (min %)	Min. inner bending radius for 90 °
Docol CR350Y600T -DP	UC	350- 450	600- 700	16	0.0xt

The mechanical properties are tested transverse to the direction of rolling.

Chemical Composition

C (max %)	Si (max %)	Mn (max %)	P (max %)	S (max %)	Al (min %)	Nb+Ti (max %)
0.12	0.40	1.00	0.025	0.010	0.015	0.10

Tolerances

Cold-rolled (UC): Tolerances in accordance to EN10131.

Customized dimensional and shape tolerances are available on request.

Coatings and surface treatments

Surface treatments

All surface treatments are in accordance with RoHS directive (2011/65/EU) and do not contain Chromium VI (Cr6+). Surface treatments provide only temporary surface protection during transportation and storage. In order to avoid corrosion damages, care must be taken to keep the products dry during transportation and storage. If they become wet, they must be separated and situated so that they are dried quickly.

Surface coating	Available surface treatment
UC (Cold-rolled)	Oiled
UC (Cold-rolled)	Unprotected

Fabrication and Other Recommendations

For information concerning fabrication, see SSAB's brochures on www.ssab.com or consult Tech Support, techsupport@ssab.com.

Appropriate health and safety precautions must be taken when bending, welding, cutting, grinding or otherwise working on the product.

Contact Information

www.ssab.com/contact

The English version of this document shall prevail in case of discrepancy. Download the latest version of this document at www.ssab.com
SSAB, Strenx, Hardox, Docol, GreenCoat, Toolox, Armox, Ramor, Domex, Laser, Raex, Duroxite are trademarks owned by the SSAB group of companies.

SSAB

Anexo B – Ficha Técnica do Pré-Impregnado Utilizado

MITSUBISHI RAYON CO.,LTD. — PYROFIL™

Mechanical Properties of PYROFIL™ Woven Fabric Composite

Product Description	:TR3523 361GMP
Fabric Style	:2x2 Twill
Carbon Fiber	:TR 30S 3L
Resin	:#361
FAW	:200g/m^2
Resin Content	:40 weight %
Curing Condition	:Compression molding for 5 minutes at 140°C pressure 4MPa (Gauge)

Mechanical Properties		Unit	Value	Method
Tensile Properties				
[0°/90°]	Strength	MPa	624	
Warp direction	Modulus	GPa	60	ASTM D 3039
	Strain	%	1.0	
[90°/0°]	Strength	MPa	590	
Fill direction	Modulus	GPa	61	ASTM D 3039
	Strain	%	0.9	
Compressive Properties				
[0°/90°]	Strength	MPa	563	
Warp direction	Modulus	GPa	53	ASTM D 3410
	Strain	%	1.2	
[90°/0°]	Strength	MPa	570	
Fill direction	Modulus	GPa	55	ASTM D 3410
	Strain	%	1.2	
Flexual Properties				
[0°/90°]	Strength	MPa	808	ASTM D 790 L/d=40
Warp direction	Modulus	GPa	54	
	Strain	%	1.7	
[90°/0°]	Strength	MPa	805	ASTM D 790 L/d=40
Fill direction	Modulus	GPa	55	
	Strain	%	1.8	
Shear Properties				
In-Plane	Shear Strength	MPa	85	ASTM D 3518
	Shear Modulus	GPa	3.7	
Interlaminar	Shear Strength	MPa	54	ASTM D 2344 L/D=4

Note) Test environment 23±2°C, 50±5%RH
Mechanical properties are calculated at actual of thickness.

MITSUBISHI RAYON CO., LTD.
Carbon Fiber and Composite Materials Division

Headquarter Office:1-1, Marunouchi 1-Chome, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8253, Japan
phone:+81-3-6748-7512 facsimile +81-3-3286-1380

Product data and parameters cited in this publications have been obtained in Mitsubishi Rayon Co., Ltd. laboratories using the material under carefully controlled conditions. The information, therefore, is believed to be indicative of representative properties obtainable. Mitsubishi Rayon Co., Ltd. can not accept responsibility for the misapplication of these products nor for their use under controlled conditions. Numerical values resulting from the application of this material are dependent on processing details. It is recommended that the users develop his/her own application techniques and generate data consistent with his/her specific applications and process.

Anexo C – Ficha Técnica da Resina epóxido PYROFIL #360/361

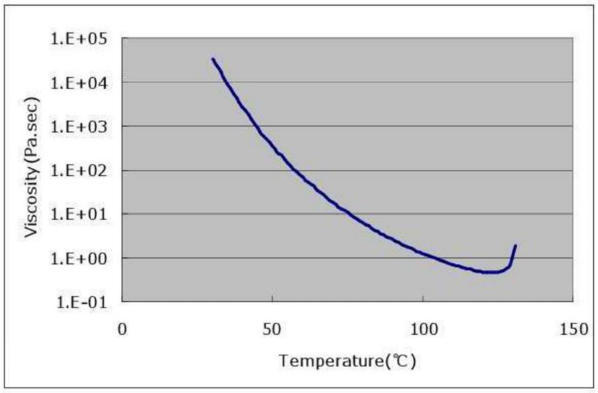
2. NeatResinProperties

·Properties of PYROFIL™ #360 / #361

Properties		Unit	Value
Gel time at 130℃		sec	200
Cured Resin ※	G'-T_g	℃	170
	Density	g/cm^3	1.20

※ Curing condition : 10min. at 140℃

·Viscosity (Rheometric)



Product data and parameters cited in this publication have been obtained in Mitsubishi Rayon Co., Ltd. laboratories using the material under carefully controlled conditions. The information, therefore, is believed to be indicative of representative properties obtainable. Mitsubishi Rayon Co., Ltd. can not accept responsibility for the misapplication of these products nor for their use under controlled conditions. Numerical values resulting from the application of this material are dependent on processing details. It is recommended that the users develop his/her own application techniques and generate data consistent with his/her specific applications and process.

4. Curing Conditions

The recommended cure cycle is 5 min at 140°C, at a pressure between 3 and 10 MPa. Alternative cure cycles can be used:

	Curing temp.	Hold time
#1	120℃	15min
#2	130℃	7min
#3	140℃	5min
#4	150℃	3min

With any condition #1 through #4, PYROFIL™ #360 / #361 can be cured in the same way as our conventional curing conditions (for example, 130℃ for 60 min.).

5. ShelfLife

The material should be used within the shelf lives described below to keep good processability (tackiness and drapability).

Storage Temp.	Shelf Life
20℃	2 weeks
0℃	3 months
-18℃	6 months

Product data and parameters cited in this publication have been obtained in Mitsubishi Rayon Co., Ltd. laboratories using the material under carefully controlled conditions. The information, therefore, is believed to be indicative of representative properties obtainable. Mitsubishi Rayon Co., Ltd. can not accept responsibility for the misapplication of these products nor for their use under controlled conditions. Numerical values resulting from the application of this material are dependent on processing details. It is recommended that the users develop his/her own application techniques and generate data consistent with his/her specific applications and process.

Anexo D – Ficha Técnica da Composição da Ferramenta em Metal Duro

palbit HARDMETAL TOOLS SOLUTIONS	Especificação Técnica / Technical Specification			
Revisão:	10	Data de Aprovação:	15-06-2015	Pág. 1/1

Designação do Grau/ *Grade designation*: **PH0910**

Campo de Aplicação ISO/ *ISO application field*:
Grau quimicamente e metalurgicamente enquadrado no campo **ISO K10-K20.**
Este grau com revestimento e geometria bem definidos também pode ser utilizado nos campos **ISO P, M, H, N e S.** Com acabamento superficial polido é muito utilizado no campo **N.**
Chemically and metallurgically grade framed in K10-K20 ISO field.
With a suitable geometry and coating this grade can be used in the P, M, H, N and S ISO fields.
It's also very used in the N ISO field when the surface finishing is polished.

Aplicação e regime de utilização/ *Use system and application*:
Este grau com elevada TRS e dureza tem uma aplicação bastante abrangente em operações de corte com arranque de apara. É utilizado particularmente no campo K, M e P em operações de acabamento e semi-desbaste em regimes de altas e médias velocidades de corte.
Com acabamento superficial polido e na geometria adequada também é muito utilizado no campo N.
Em situações específicas também pode ser utilizado no campo H e S e em peças anti-desgaste.
With a high TRS and hardness this grade has a wide application in the cutting operations with chipping. It's specially used in the K, M and P ISO field for finishing and semi roughing operations in medium/high cutting speed use systems.
With surface finishing polished and with the suitable geometry it's also very used in the N ISO field.
In specially situations it can be also used in the H and S ISO field and in anti-wear parts.

Composição Química/Chemical Composition:

Em Peso/ by weight			
% Co	7,00 ± 0,20	% γ (TaC+NbC+TiC)+Outros/Others	(1,0-2,0)
% WC	Balanço para 100%/Balance to 100%		

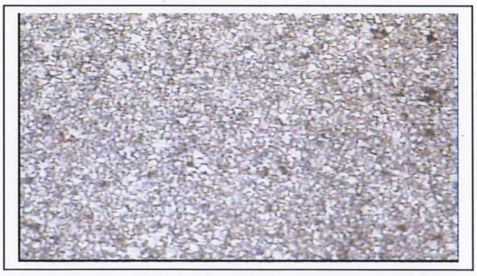
Granulometria do WC utilizado/Granulometry of WC used:

Fisher (Fsss) µm
Micrograo/Micrograin (≈0,8µm)

Propriedades Físicas e Mecânicas em Sinterizado/Phisical and Mechanical Properties in Sintered:

Dureza/Hardness	1730 ± 50	HV10	Tamanho Grão ASTM ASTM Grain Size	Micrograo/Micrograin
TRS (B)	3280	N/mm²	Porosidade/Porosity	<A02 <B02 C00

Fotografia/Photography:



Micro-estrutura Sinterizada:
Sintered Micro Structure:

Tamanho de Grão/Grain Size: **Micrograo/Micrograin**

Ligante/Bind: **Disperso/Dispersed**

Fase Gama/Gama Phase: **Fina/Thin**

Origem: Produzido em Portugal com matérias-primas provenientes fora das zonas de conflito identificadas no **DFWSRCP.**
Origin**: Produced in Portugal with raw materials from outside the conflict zones identified in **DFWSRCP.

Na ótica da melhoria contínua, a PALBIT poderá fazer pequenas revisões a esta especificação, sem que se obrigue a comunicar aos seus detentores.
In a continuous improvement view, Palbit can do minor revisions to this specification without committing to inform third parties.

Elaborado/Elaborated: **Octávio Letra/Edite Neves**	Verificado/Aprovado-Verified/Aproved: **Baptista Pires**

QL286-2

Anexo E – Ficha Técnica da Composição da Revestimento da Ferramenta

palbit HARDMETAL TOOLS SOLUTIONS	Especificação Técnica/Technical Specification			
Revisão:	0	Data de Aprovação:	26-10-2016	Pág. 1/1

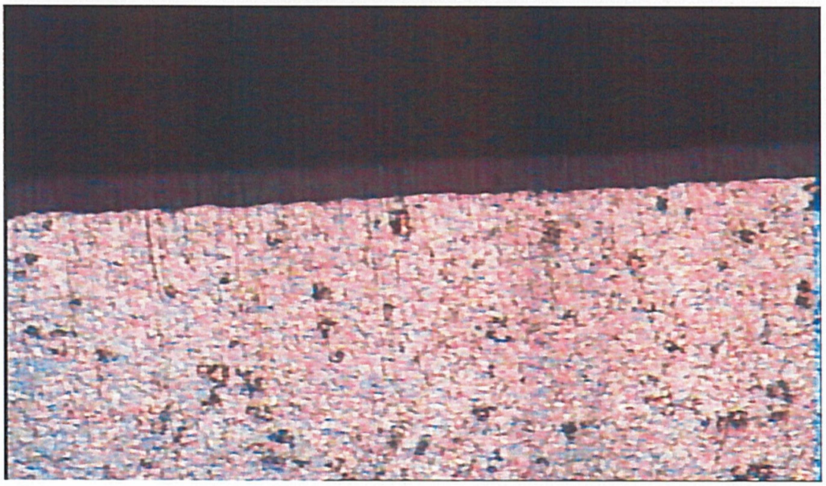
Produto: **Revestimento AlTiN (3µm) – Super Nitreto de Alumínio Titânio com formação de Al_2O_3 no topo**

Principal Aplicação: Fresagem e torneamento em regimes médios de ligas de aço, aço inoxidável e ligas de níquel

CARACTERÍSTICAS:

Cor	Cinzento Rosado
Micro-Dureza (HV)	≅ 3600
Revestimento	AlTiN+"Al_2O_3"
Espessura (µm)	2 – 4
Processo	PVD - Deposição Física em Vapor

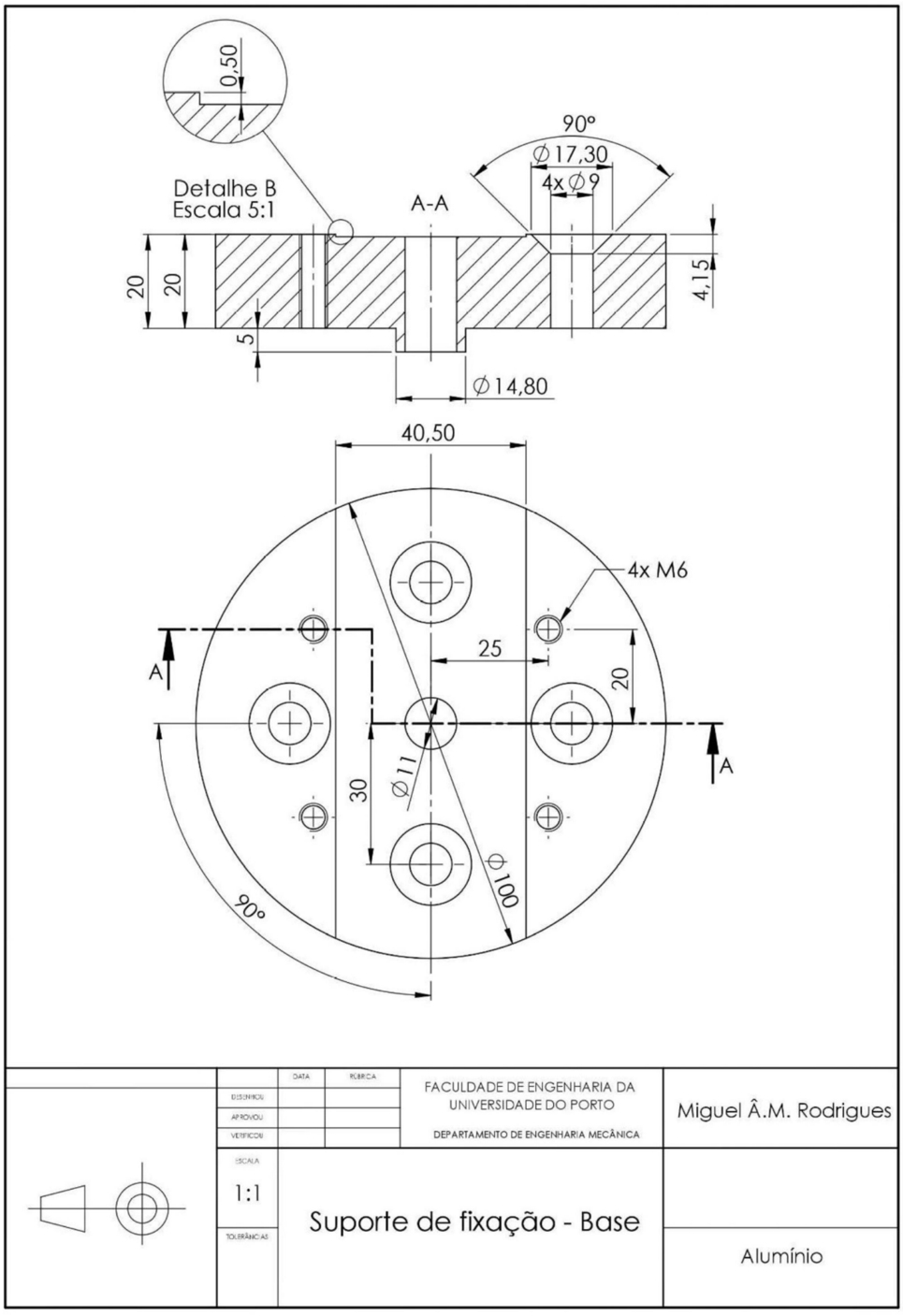
MICRO ESTRUTURA (1500X)

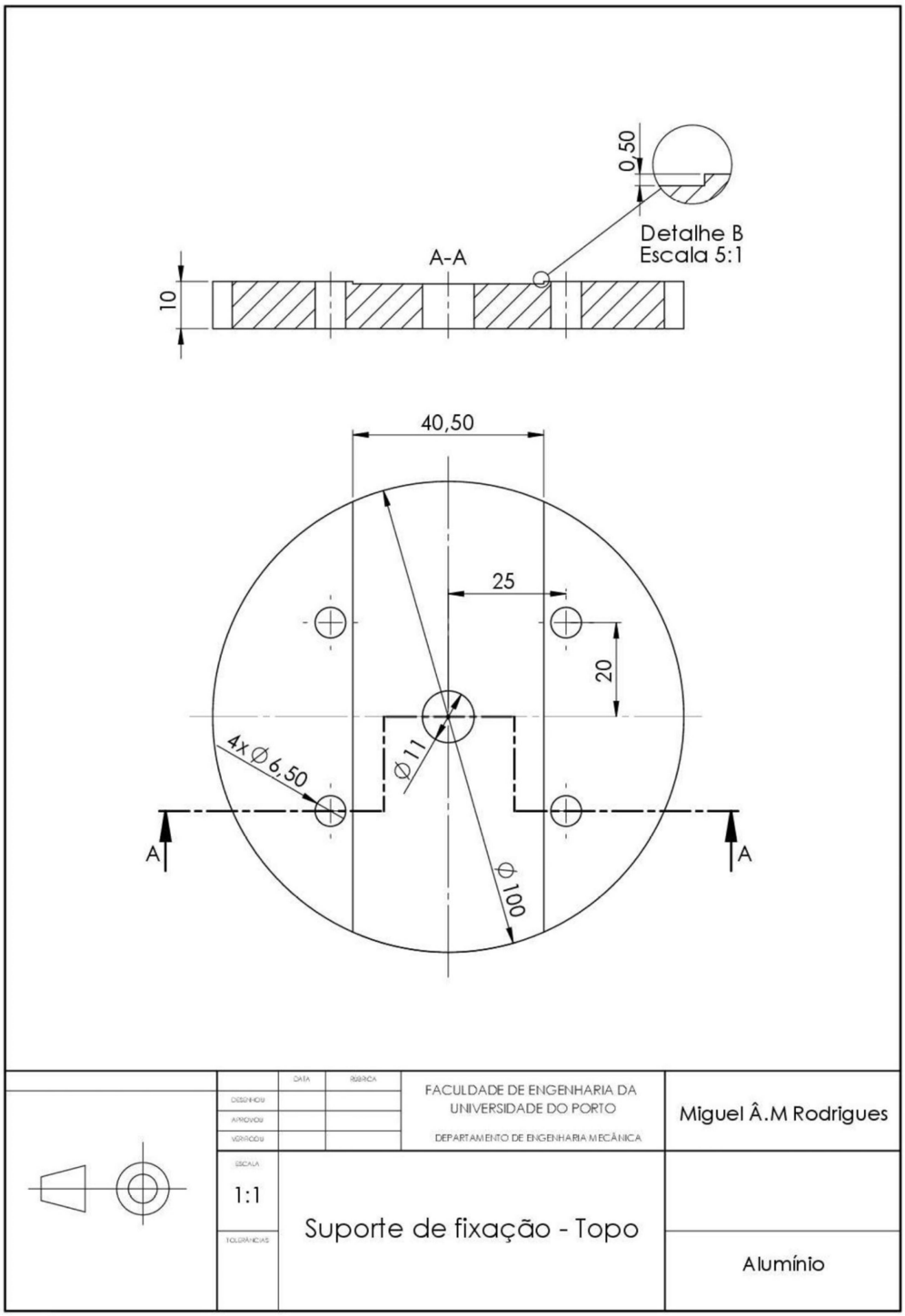


Elaborado: Octávio Letra/Edite Neves	Verificado/Aprovado: Daniel Figueiredo

QL286-2

Anexo F – Ficha técnica das Peças de Fixação dos Provetes




0,50
Detalhe B
Escala 5:1
A-A
10
40,50
25
20
4x Ø 6,50
Ø 11
Ø 100
A
A
DATA
RUBRICA
DESENHOU
APROVOU
VERIFICOU
FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
Miguel Â.M Rodrigues
ESCALA
1:1
TOLERÂNCIAS
Suporte de fixação - Topo
Alumínio

Anexo G – Ficha técnica da célula de carga KISTLER 9272

Force

KISTLER
measure. analyze. Innovate.

4-Component Dynamometer

Type 9272

for Cutting Force Measurement in Drilling

Four-component dynamometer for measuring a torque M_z and the three orthogonal components of a force.
The dynamometer has a great rigidity and consequently a high natural frequency. Its high resolution enables the smallest dynamic changes in large forces and torques to be measured.

- Compact and robust multicomponent force measuring instrument
- Suitable for cutting force measurements when drilling
- Universal use

Description

The dynamometer consists of a four component sensor fitted under high preload between a base plate and a top plate.
The four components are measured practically without displacement.
It must be taken into account that combined and eccentric loads may reduce the measuring ranges.
The sensor is mounted ground-isolated. Therefore ground loop problems are largely eliminated.
The dynamometer is rustproof and protected against penetration of splash water and cooling agents.
Together with the connecting cable Type 1677A5/1679A5 it corresponds to the protection class IP 67.

Application Examples

- Measuring feed force, deflective force and moment when drilling, threadcutting etc.
- Cutting force measurements while milling and grinding
- Cutting force measurements while turning
- Testing torque wrenches
- Testing springs (torsion)
- Measurements on small thrust bearings, friction clutches etc.
- Measuring starting torques on fractional horsepower and stepping motors
- Ergonomic measurements

Technical Data

Measuring range	F_x, F_y	kN	–5 … 5 [1]
	F_z	kN	–5 … 20 [2]
	M_z	N·m	–200 … 200
Calibrated measuring range			
100 %	F_x, F_y	kN	0 … 5
	F_z	kN	0 … 20
	M_z	N·m	0 … 200
			0 … –200
10 %	F_x, F_y	kN	0 … 0,5
	F_z	kN	0 … 2
	M_z	N·m	0 … 20
			0 … –20
Overload	F_x, F_y	kN	–6/6
	F_z	kN	–6/24
	M_z	N·m	–240/240
Max. bending moment	M_x, M_y	N·m	–400 … 400
Threshold	F_x, F_y	N	<0,01
	F_z	N	<0,02
	M_z	mN·m	<0,2
Sensitivity	F_x, F_y	pC/N	≈–7,8
	F_z	pC/N	≈–3,5
	M_z	pC/N·m	≈–160
Linearity, all ranges		% FSO	≤±1
Hysteresis, all ranges		% FSO	≤1

9272_000-153e-11.05

This information corresponds to the current state of knowledge. Kistler reserves the right to make technical changes. Liability for consequential damage resulting from the use of Kistler products is excluded.

©2005, Kistler Instrumente AG, PO Box, Eulachstr. 22, CH-8408 Winterthur
Tel +41 52 224 11 11, Fax +41 52 224 14 14, info@kistler.com, www.kistler.com

4-Component Dynamometer – for Cutting Force Measurement in Drilling, Type 9272

KISTLER
measure. analyze. Innovate.

Crosstalk	$F_x \leftrightarrow F_y$	%	≤±2
	$F_z \rightarrow F_{x,y}$	%	≤±1
	$F_{x,y} \rightarrow F_z$	%	≤±2
	$F_z \rightarrow M_t$	mN·m/N	≤±0,2
	$M_x \rightarrow F_z$	N/N·m	≤±1
	$F_{x,y} \rightarrow M_t$	mN·m/N	≤±0,7
	$M_x \rightarrow F_{x,y}$	N/N·m	≤±0,5
Rigidity	c_x, c_y	kN/µm	≈0,4
	c_z	kN/µm	≈2
	cM_z	N·m/µrad	≈0,7
Natural frequency (mounted on rigid base)	f_n (x,y)	kHz	≈3,1
	f_n (z)	kHz	≈6,3
	f_n (M_t)	kHz	≈4,2

Operating temperature range		°C	0 ... 70
Temperature coefficient of sensitivity		%/°C	–0,02
Capacitance	F_x, F_y, F_z	pF	185
	M_t	pF	420
Insulation resistance (20 °C)		Ω	$>10^{13}$
Ground isolated		Ω	$>10^{8}$
Connector		Fischer flange 9-pole neg.	
Degree of protection EN60529		–	IP67 [3]
Weight		kg	4,2

[1] Force application point inside and max. 25 mm above top plate area
[2] Force application point max. 20 mm from center
[3] With connecting cable Types 1677A5, 1679A5

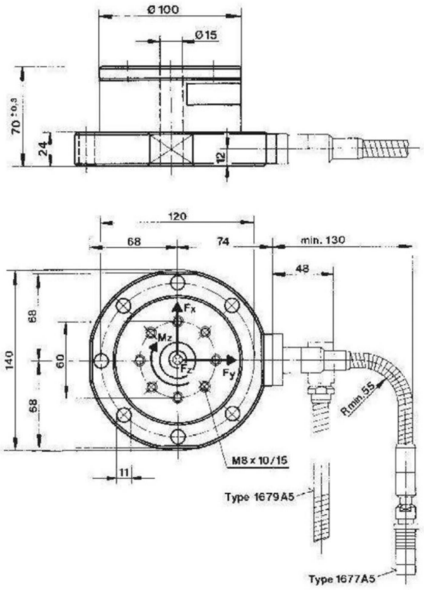


Fig. 1: Dimensions Dynamometer Type 9272

Technical Data

Dynamometer Type 9272 with Mounted Tool Holder Type 9404

for turning; force acting onto point A

Range	F_x, F_y	kN	–2 ... 2
	F_z	kN	0 ... 4
Crosstalk	$F_x \leftrightarrow F_y$	%	≤±5
	$F_z \rightarrow F_{x,y}$	%	≤±2
	$F_{x,y} \rightarrow F_z$	%	≤±5
Natural frequency (mounted on flanges) with tool holder	f_n (x,y)	kHz	≈1,5
	f_n (z)	kHz	≈4

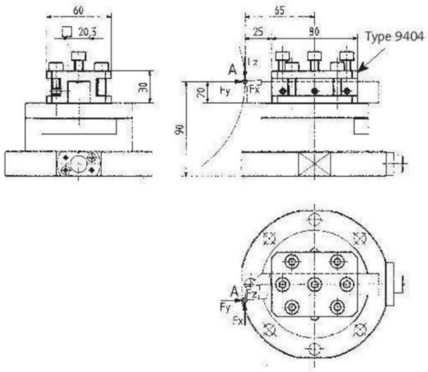


Fig. 2: Dimensions Dynamometer Type 9272 with mounted tool holder Type 9404

9272_000-153e-11.05

This information corresponds to the current state of knowledge. Kistler reserves the right to make technical changes. Liability for consequential damage resulting from the use of Kistler products is excluded.

©2005, Kistler Instrumente AG, PO Box, Eulachstr. 22, CH-8408 Winterthur
Tel +41 52 224 11 11, Fax +41 52 224 14 14, info@kistler.com, www.kistler.com

KISTLER
measure. analyze. Innovate.

4-Component Force-Torque Measurement M_z, F_x, F_y, F_z with 4-Channel Charge Amplifier

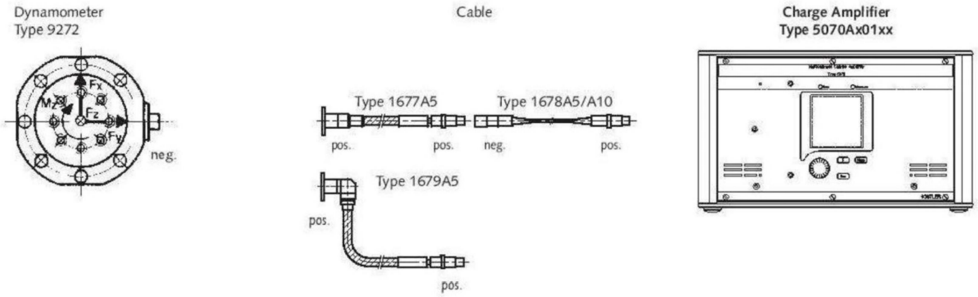


Fig. 3: Example of a measuring system with dynamometer Type 9272

Mounting

The dynamometer may be mounted with screws or claws on any clean, face-ground supporting surface, such as the table of a machine tool for example. Uneven supporting surface may set up internal stresses, which will impose severe additional loads on the sensor and may also increase crosstalk.

For mounting the force-introducing components, such as lathe tools and workpieces, eight M8 mm threaded holes in the cover plate are available. The supporting surfaces for the force-introducing parts must be face-ground to obtain good mechanical coupling to the cover plate.

For satisfactory mounting of lathe tools up to 20x20 mm shank cross section, the tool holder Type 9404 may be used.

This holder is not included in the standard accessories and must therefore be ordered separately.

Signal Conditioning

In addition to the dynamometer, a four-component measuring system needs a multi-core high-insulation connecting cable and four charge amplifier channels.

These convert the charge signals from the dynamometer into output voltages. The output voltage is proportional to the forces and moments occurring.

The multichannel charge amplifier Type 5070A... is ideal for this purpose. For details, see the data sheet 5070A_000-485.

Data Acquisition and Evaluation

Kistler DynoWare is an easy to use universal software and is ideal for multi-component force measurement with dynamometers. For details, see the data sheet 2825A_000-371.

Optional Accessories	**Type**
• Connecting cable (8 leads)	1677A5
	1679A5
• Extension cable (8 leads)	1678A5
	1678A10
• Tool holder	9404

Ordering Key	**Type**
• 4-Component Dynamometer for Cutting Force Measurement in Drilling	9272

9272_000-153e-11.05

This information corresponds to the current state of knowledge. Kistler reserves the right to make technical changes. Liability for consequential damage resulting from the use of Kistler products is excluded.

©2005, Kistler Instrumente AG, PO Box, Eulachstr. 22, CH-8408 Winterthur
Tel +41 52 224 11 11, Fax +41 52 224 14 14, info@kistler.com, www.kistler.com

Anexo H – Diâmetros dos furos

Designação	*Nº do provete/Ensaio*	*Média do Diâmetro do furo [mm]*									
		1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*
A1	19	10.008	10.007	10.006	10.006	10.002	10.003	10.006	10.002	10.003	10.002
B1	18	10.005	10.003	10.005	10.001	10.004	10.004	10.005	10.006	10.007	10.004
C1	17	10.004	10.004	10.007	10.005	10.006	10.006	10.005	10.007	10.003	10.004
D1	16	10.009	10.007	10.004	10.004	10.003	10.007	10.004	10.006	10.006	10.007
A2	15	10.005	10.003	10.003	10.008	10.005	10.004	10.007	10.003	10.007	10.006
A3	14	9.990	9.989	9.99	9.997	9.994	9.991	9.988	9.992	9.993	9.998