



Estudo dos Efeitos da Maquinagem nas Características Mecânicas de Materiais Compósitos

HUGO RAFAEL CARVALHO CERQUEIRA

julho de 2024

Estudo dos Efeitos da Maquinagem nas Características Mecânicas de Materiais Compósitos

Hugo Rafael Carvalho Cerqueira

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica, Área de Especialização em
Materiais e Tecnologias de Fabrico**

Orientador: Doutor Luís Miguel Pereira Durão

Coorientador: Doutor João Emílio Raimundo Carrilho Matos

Júri:

Presidente:

Doutor António Gonçalves Magalhães, Professor Coordenador, ISEP

Vogais:

Doutor Luís Miguel Pereira Durão, Professor Coordenador, ISEP

Doutora Carolina Furtado Pereira da Silva, Arguente, Professora Auxiliar, FEUP

Agradecimentos

Aqueles que nos rodeiam e com quem nos cruzamos ao longo do nosso percurso fazem de nós aquilo que somos. A realização e escrita desta dissertação foi possível graças a várias pessoas. Quero então agradecer:

Ao Prof. Dr. Luís Durão, orientador desta dissertação, pela orientação, ajuda e partilha de conhecimentos. Todos os momentos partilhados foram de amizade, cordialidade e boa disposição.

Ao Prof. Dr. João Matos, coorientador desta dissertação, pela cooperação e pela contribuição que prestou ao longo do trabalho.

Ao Prof. Dr. José Esteves e o Eng. Victor Moreira, dois importantes intervenientes nesta dissertação, pela colaboração e pelo auxílio prestado na execução do trabalho experimental.

Ao pai Armando, à mãe Amélia, ao irmão Ricardo, à cunhada Liliana e à sobrinha Camila por todo o apoio, motivação e inspiração; à Érica um agradecimento sentido por todos os momentos vividos; ao André um agradecimento pela amizade verdadeira.

Todos merecem e é-vos devido o meu sincero agradecimento.

Resumo

Os materiais compósitos são cada vez mais implementados em várias aplicações e soluções na Engenharia, desde aplicações mais convencionais, como o imobiliário, até às mais avançadas tecnologicamente, como componentes aeroespaciais. Esta crescente aplicação baseia-se nas excelentes propriedades mecânicas que estes possuem, como a elevada resistência mecânica e o baixo peso.

No entanto, há aplicações em que estes são acoplados a outros. Estas ligações podem ser através de juntas adesivas, por fusão ou aparafusadas. Dependendo da situação, as aparafusadas são as mais versáteis porque não são permanentes. Para concretizar este tipo de ligação, são utilizados diversos processos de maquinagem, com a furação a ser o mais utilizado. A furação provoca danos irreversíveis no material e por isso surge a necessidade de estudar o efeito deste tipo de maquinagem nas propriedades do material. É nesta necessidade que se baseia a presente dissertação.

Neste documento será apresentado um estudo efetuado a 48 placas de laminado tipo carbono/epóxico, nas quais foram efetuados dois furos em cada. Para as furações foram considerados três fatores de controlo: o tipo de broca, a velocidade de corte e o avanço. O desgaste das brocas nas furações foi considerado com um fator não controlável ou de ruído. Posteriormente, estes provetes foram submetidos a uma análise por radiografia com o objetivo de quantificar o dano. Foram também sujeitos a um ensaio Bearing para registar a tensão máxima de rotura. Estes dados foram analisados e comparados entre si. Recorreu-se ao método de Taguchi para delinear o planeamento experimental e para comprovar estatisticamente os resultados obtidos.

Dos resultados, foi possível concluir que um avanço reduzido e uma velocidade de corte elevada é a configuração de furação que imprime menos danos no material.

Palavras-chave: Materiais compósitos, Carbono/epóxico, Furação, Radiografia, Ensaio Bearing, Método de Taguchi.

Abstract

Composite materials are increasingly being implemented in various applications and solutions in Engineering, ranging from more conventional applications, such as furniture, to more technologically advanced ones, such as aerospace components. This increasing application is based on the excellent mechanical properties that these materials possess, such as high mechanical strength and low weight.

However, there are applications in which these materials are coupled with others. These connections can be made through adhesive joints, fusion, or bolting. Depending on the situation, bolted connections are the most versatile because they are not permanent. To achieve this type of connection, various machining processes are used, with drilling being the most common. Drilling causes irreversible damage to the material, which necessitates studying the effect of this type of machining on the material's properties. This necessity forms the basis of the present dissertation.

This document presents a study conducted on 48 carbon/epoxy laminate plates, each with two holes drilled in them. Three control factors were considered for the drilling: drill bit type, cutting speed, and feed rate. Drill bit wear during drilling was considered an uncontrollable or noise factor. Subsequently, these specimens were subjected to an X-ray analysis to quantify the damage. They were also subjected to a bearing test to record the maximum breaking stress. These data were analyzed and compared. The Taguchi method was used to design the experimental plan and to statistically validate the obtained results.

From the results, it was possible to conclude that a low feed rate and a high cutting speed is the drilling configuration that inflicts the least damage on the material.

Keywords: Composite materials, Carbon-epoxy, Drilling, Radiography, Bearing test, Taguchi method.

Índice

1. Introdução.....	1
1.1. Âmbito.....	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Guia de leitura.....	2
2. Revisão Bibliográfica	4
2.1. Materiais compósitos.....	4
2.1.1. Reforços	5
2.1.2. Matrizes	8
2.2. Aplicações de materiais compósitos	10
2.2.1. Indústria Automóvel	10
2.2.2. Mobiliário.....	12
2.2.3. Pás Eólicas	13
2.2.4. Desporto	13
2.2.5. Construção Naval	14
2.2.6. Procura.....	15
2.3. Maquinagem	16
2.4. Furação.....	18
2.4.1. Avanço.....	18
2.4.2. Velocidade de corte	19
2.4.3. Geometria da broca	19
2.5. Tipos de danos nos materiais compósitos	21
2.6. Classificação do dano	22
2.7. Ligações coladas e ligações por fusão	24
2.8. Ensaio não destrutivos.....	25
2.8.1. Radiografia	25
2.8.2. Tomografia computadorizada (CT-scan).....	26
2.8.3. Ultrassons	26
2.8.4. TeraHertz	27
2.8.5. Análise e tratamento de imagem	28
2.9. Ensaio destrutivos.....	28
2.9.1. Ensaio de Tração	28
2.9.2. Ensaio de Flexão.....	29
2.9.3. Ensaio de Compressão	29
2.9.4. Ensaio de Corte	30
2.9.5. Ensaio Bearing.....	31
2.10. Método de Taguchi	31

3. Métodos e Aplicação.....	34
3.1. Fabrico do compósito.....	34
3.2. Planeamento experimental.....	35
3.3. Método de Taguchi	35
3.4. Corte das placas	36
3.5. Identificação dos provetes	37
3.6. Brocas.....	38
3.6.1. Razão de diâmetros das brocas helicoidais	38
3.7. Plano de furação	38
3.8. Radiografia	40
3.9. Análise de imagem	41
3.10. Ensaio mecânicos.....	42
3.11. Análise do desgaste da broca.....	43
4. Resultados e Discussão	46
4.1. Apresentação de resultados.....	46
4.1.1. Ensaio de tração.....	46
4.1.2. Análise por radiografia.....	47
4.1.3. Ensaio Bearing.....	49
4.1.4. F_{ed} vs. Bearing.....	51
4.1.5. Broca nova vs. Broca desgastada.....	52
4.1.6. Análise do desgaste da broca	55
4.1.7. Análises pelo método de Taguchi	56
4.2. Discussão de resultados	60
5. Conclusão.....	62
5.1. Conclusões finais.....	62
5.1.1. Ensaio de Tração.....	62
5.1.2. Análise por Radiografia.....	62
5.1.3. Ensaio Bearing	62
5.1.4. Desgaste da Broca.....	63
5.1.5. Método de Taguchi	63
5.2. Limitações e trabalhos futuros.....	63
Apêndice A	74
Apêndice B	76
Apêndice C	78
Apêndice D.....	80
Apêndice E.....	86
Anexo A.....	92

Anexo B	98
Anexo C	100
Anexo D	102
Anexo E.....	104
Anexo F.....	108

Lista de Figuras

Figura 1 - Classificação dos materiais compósitos; adaptado de [1]	5
Figura 2 - Diferentes formas das fibras; adaptado de [3]	6
Figura 3 - Intervalos de temperaturas de serviço para compósitos com diferentes tipos de matriz; adaptado de [1]	8
Figura 4 - Resina epóxida disponível comercialmente [8]	10
Figura 5 - Jante 911 Turbo Carbon	10
Figura 6 - Constituintes de um pneu Continental OTR; adaptado de [10].....	11
Figura 7 - Diferentes tipos de MDF: A - Hidrófugo, B - Ignífugo, C - Alta Densidade [12]	12
Figura 8 - Processo de produção de uma pá de turbina eólica.....	13
Figura 9 - Aspeto final de uma pá de turbina eólica [15].....	13
Figura 10 - Prancha de Surf HardCork: A - vista ampliada; B - vista global [16]	14
Figura 11 - Secção completa de casco em material compósito	14
Figura 12 - Procura de Fibra de Carbono nos últimos anos; adaptado de [19]	15
Figura 13 - Avanços na maquinaria de polímeros reforçados com fibras; adaptado de [21] .	17
Figura 14 - Parâmetros que influenciam a furação em materiais compósitos; adaptado de [21]	18
Figura 15 – Constituintes de uma broca helicoidal; adaptado de [23].....	19
Figura 16 - Várias geometrias de brocas utilizadas na furação de compósitos poliméricos reforçado por fibras [21].....	20
Figura 17 – Mecanismos de delaminação: delaminação <i>peel-up</i> (A), delaminação <i>push-out</i> (B); adaptado de [21].....	21
Figura 18 - Dano de delaminação: A - dano uniforme, B – fissuras, C - dano com fissuras, D - dano com microfissuras (D); adaptado de [25]	24
Figura 19 – A - Ensaio de tração a material compósito [43], B - Esquema de provete com furo para ensaio de tração; adaptado de ASTM D 5766M-23 [42]	28
Figura 20 – A - Ensaio de flexão em 3 pontos, B - Ensaio de flexão em 4 pontos [46]	29
Figura 21 – A - Ensaio de compressão por força frontal [50]; B - Ensaio de compressão por cisalhamento: dispositivo de compressão com execução IITRI [51].....	29
Figura 22 – Ensaio de corte ASTM D 4255M-20: A - calha dupla, B - calha tripla; adaptado de [52].....	30
Figura 23 – Ensaio IOSIPESCU ASTM D 5379M-19 [2].....	30
Figura 24 – Esquema do provete para ensaio Bearing (procedimento A) [54].....	31
Figura 25 – A - prensa hidráulica de pratos quentes; B - disposição das placas na prensa	34
Figura 26 – Planeamento de experiência simples (Minitab®).....	36
Figura 27 – Planeamento de experiência completo (Minitab®)	36
Figura 28 – Esboço para corte das placas	37
Figura 29 – A - Broca bidiametral [57]; B - Broca helicoidal [58]	38
Figura 30 – Esboço de provete para ensaio Bearing com dois furos [54].....	39
Figura 31 – A - Centro de maquinaria HAAS VF-2 [60]; B - Provete no centro de maquinaria	39

Figura 32 – <i>Setup</i> para análise de radiografia.....	40
Figura 33 – Imagens de radiografia: A - dano reduzido; B - dano de grandes dimensões.....	40
Figura 34 – A - Imagem original de radiografia; B - imagem binária	41
Figura 35 – Seleção de pixels: A - fronteira do furo; B - fronteira do dano	42
Figura 36 - Resultado da análise de imagem; Área total (furo + dano)	42
Figura 37 – Adesivo ARALDITE 420-A/B [63].....	43
Figura 38 – A - ensaio de tração; B - ensaio <i>Bearing</i>	43
Figura 39 – A - <i>Setup</i> para análise por microscópio ótico; B - broca sobre plasticina	44
Figura 40 – <i>Setup</i> para análise por microscópio digital	44
Figura 41 – Gráfico do F_{ed} para broca FP.....	48
Figura 42 - Gráfico do F_{ed} para broca BI	49
Figura 43 – Exemplo do gráfico obtido através do ensaio <i>Bearing</i>	49
Figura 44 - Gráfico do ensaio <i>Bearing</i> da broca Furo Piloto	50
Figura 45 - Gráfico do ensaio <i>Bearing</i> da broca Bidiametral	51
Figura 46 – Gráfico da Tensão vs. F_{ed} da broca FP	51
Figura 47 - Gráfico da Tensão vs. F_{ed} da broca BI.....	52
Figura 48 - F_{ed} para as brocas novas.....	53
Figura 49 - F_{ed} para as brocas desgastadas	54
Figura 50 – Imagem obtida por microscópio ótico de broca de 6 mm	55
Figura 51 – Imagem obtida por microscópio digital: A - broca de 2,4 mm, B - broca de 6 mm	55
Figura 52 – Imagem obtida por microscópio digital: A - broca bidiametral nova, B – broca bidiametral desgastada.....	56
Figura 53 – Análise linear para médias de F_{ed} e para razões S/R	57
Figura 54 – Gráficos de efeitos principais para as razões S/R referentes ao F_{ed}	58
Figura 55 – Gráficos de efeitos principais para as médias referentes ao F_{ed}	58
Figura 56 - Análise linear para médias de ensaio <i>Bearing</i> e para razões S/R	59
Figura 57 – Gráficos de efeitos principais para as razões S/R referentes ao ensaio <i>Bearing</i>	59
Figura 58 - Gráficos de efeitos principais para as médias referentes ao ensaio <i>Bearing</i>	60

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Tipos de fibras utilizadas como reforços [2].....	5
Tabela 2 - Formas que os reforços apresentam [2]	6
Tabela 3 - Propriedades de fibras e respetivos materiais maciço [4]	7
Tabela 4 - Principais propriedades de matrizes termoendurecíveis e termoplásticas [2].....	9
Tabela 5 – Processos de maquinagem de materiais compósitos [20]	16
Tabela 6 - Fatores de delaminação e respetivas equações.....	23
Tabela 7 – Propriedades do compósito em estudo	46
Tabela 8 – Médias de valores para configuração de furação com broca Furo Piloto	47
Tabela 9 - Médias de valores para configuração de furação com broca Bidiametral.....	47
Tabela 10 - F_{ed} para cada configuração de furação	48
Tabela 11 – Resultados do ensaio Bearing.....	50
Tabela 12 - F_{ed} para as brocas novas	53
Tabela 13 - F_{ed} para as brocas desgastadas.....	54

Acrónimos e Símbolos

Lista de Acrónimos

2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
ANOVA	Análise de Variâncias
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CSM	<i>Chopped Strand Mat</i>
CRM	<i>Chopped Random Mat</i>
DOE	<i>Design of Experiments</i> ; Planeamento de Experiências
DGEBA	Diglicidil éter bisfenol A
DGEBF	Diglicidil éter bisfenol F
END	Ensaio Não Destrutivo
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
HDT	<i>Heat Deflection Temperature</i>
HM	<i>High Modulus</i>
HS	<i>High Strenght</i>
HSS	<i>High Speed Steel</i>
IM	<i>Intermediate Modulus</i>
INEGI	Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LET	Laboratório de Ensaios Tecnológicos
LMC	Laboratório de Materiais Compósitos
LMET	Laboratório de Metalografia
LTM	Laboratório de Tecnologia Mecânica
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i>
OTR	<i>Off-The-Road</i>
PAN	Poliacrilonitrilo
PEEK	Poli-éter-éter-cetona
PPS	Polisulfureto de fenileno
PRF	Polímero Reforçado com Fibra
PRFC	Polímero Reforçado com Fibra de Carbono
PRFV	Polímero Reforçado com Fibra de Vidro
S/R	Razão Sinal/Ruído
TRM	Taxa de Remoção de Material
UHM	<i>Ultra High Modulus</i>
ZTA	Zona Termicamente Afetada

Lista de Símbolos

A_d	Área de delaminação	mm^2
A_{nom}	Área do furo	mm^2
[C]	Concentração de Carbono	%
D	Diâmetro da broca	mm
D_{max}	Diâmetro máximo do furo	mm
D_{min}	Diâmetro mínimo do furo	mm
D_{nom}	Diâmetro nominal do furo	mm
E	Módulo de Elasticidade	GPa
f	Avanço	mm/rotação
F_a	Fator de delaminação bidimensional	-
F_d	Fator de delaminação	-
F_{da}	Fator de delaminação ajustado	-
$F_{d\text{min}}$	Fator de delaminação mínimo	-
F_{ed}	Fator de delaminação equivalente	-
F_v	Fator de delaminação tridimensional	-
k	Nº específico da camada delaminada	-
n	Rotações por minuto	rotação/minuto
p	Nº total de camadas delaminadas	-
R_m	Resistência tração	MPa
T_g	Temperatura transição vítrea	°C
T_m	Temperatura de fusão	°C
V_c	Velocidade de corte	mm/minuto
V_f	Velocidade de avanço	mm/minuto
ϵ_u	Deformação à rotura	%
ρ	Massa volúmica	Kg/m ³
σ_u	Tensão de rotura	MPa

1. Introdução

No presente capítulo é realizada uma introdução ao tema desta dissertação, referindo o âmbito, os objetivos e um guia para leitura deste documento.

1.1. Âmbito

Num mundo cada vez mais desenvolvido, os materiais com melhores propriedades são cada vez mais procurados. Estes materiais, especialmente os compósitos, são amplamente utilizados em diversas aplicações e indústrias.

Uma das vantagens dos materiais compósitos é as excelentes propriedades que estes têm, como por exemplo, a elevada resistência mecânica combinada com o baixo peso, resultando uma elevada resistência específica. Pela maneira como são produzidos, estes também se caracterizam pela facilidade em obter bons acabamentos superficiais e a sua geometria final não necessitar de grandes processos de maquinagem. No entanto, há situações em que, pela necessidade de unir peças estruturais, a maquinagem, especialmente a furação, é essencial. Este é um processo complexo que pode causar danos significativos, como a delaminação, que afetam negativamente as propriedades mecânicas do material.

Por isso, compreender e prever como a furação afeta os compósitos, é o mote desta dissertação. Para quantificar e qualificar os danos, é necessário analisar os furos com ensaios destrutivos e não destrutivos, de modo a determinar as áreas afetadas e as propriedades dos materiais após a maquinagem. A delaminação, que ocorre na entrada e saída do furo, é um dos principais danos a ser estudado.

Em resumo, os compósitos combinam leveza e são essenciais na tecnologia moderna. A pesquisa concentra-se na análise dos danos provocados pela furação em compósitos, com o objetivo de desenvolver métodos para minimizar estes efeitos adversos e preservar a qualidade das peças maquinadas.

1.2. Objetivos

Esta dissertação tem como principal objetivo estudar os efeitos da maquinagem nas características mecânicas de um material compósito, o carbono/epóxico.

Por isso, foram realizadas furações com diferentes configurações de furação. Foram escolhidas três propriedades da furação: o tipo de broca, o avanço e a velocidade de corte. A estas foram

Introdução

atribuídos dois níveis de variação. Foram então efetuadas furações com todas as combinações de propriedades e níveis possíveis. O planejamento experimental foi elaborado com recurso ao método de Taguchi. O material foi depois sujeito a análises por radiografia e a um ensaio mecânico para avaliar os efeitos da furação nas propriedades do material. O desgaste das brocas pelas furações foi um aspeto tido em atenção, sendo estas analisadas por microscopia. De seguida os dados obtidos foram tratados, analisados e validados estatisticamente pelo método referido acima.

Os resultados obtidos neste estudo tornam-se pertinentes para a compreensão do comportamento dos materiais compósitos de matriz polimérica após a furação. A perda de propriedades por parte destes materiais na furação é um flagelo para a Engenharia. Quanto mais célere for a sua compreensão, mais rapidamente estes materiais serão mais apreciados e a sua utilização mais segura e confiável.

1.3. Guia de leitura

Este documento está estruturado em cinco capítulos. No primeiro capítulo é realizada uma introdução ao tema, referindo o âmbito, os objetivos e ainda uma orientação para a sua leitura.

No segundo capítulo é apresentada a revisão bibliográfica. Inicia-se com uma introdução geral aos materiais compósitos e os seus constituintes. De seguida, são apresentadas algumas utilizações deste tipo de material em várias áreas, com exemplos práticos. Seguidamente, aborda-se a maquinagem deste material com maior incidência na furação. São apresentados os principais danos resultantes da mesma e a classificação destes é descrita. Em contrapartida, são apresentadas duas alternativas às ligações mecânicas. Com o objetivo de avaliar os danos, são abordados os de ensaios destrutivos e os não destrutivos utilizados acompanhados de exemplos de utilizações destas técnicas nos materiais compósitos. Por fim, é descrito o método de Taguchi, uma análise estatística utilizada neste trabalho.

No terceiro capítulo, é descrito o procedimento experimental implementado. Começa-se por descrever o fabrico do material seguido pela implementação do método de Taguchi. A partir deste é possível avançar para o corte e identificação dos provetes. São mencionados depois as brocas e o plano de furação é descrito. Por fim, abordam-se as análises e os ensaios realizados bem como os equipamentos utilizados.

No quarto capítulo são apresentados e discutidos os resultados. Inicialmente apresentam-se os obtidos pelos ensaios destrutivos e não destrutivos. De seguida, estes são analisados e comparados entre si. O desgaste da broca é também um ponto discutido neste capítulo. Por fim, o método de Taguchi valida os resultados e comprova as conclusões.

No quinto capítulo, são apresentadas as conclusões finais, são descritas as limitações encontradas durante o estudo e referidas as propostas para trabalhos futuros.

Por fim são apresentadas as referências bibliográficas consultadas bem como os apêndices e anexos.

2. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo será abordado o tema principal deste relatório, os materiais compósitos. Inicialmente será realizada uma introdução sobre estes materiais, apresentando algumas aplicações em diferentes áreas. De seguida, será realizado um estudo sobre a maquinaria deste material, os danos causados por esta operação e uma caracterização dos mesmos. Serão abordadas também as ligações coladas e por fusão. Por fim, serão apresentados ensaios destrutivos e não destrutivos utilizados para determinar e avaliar a extensão dos danos nos materiais compósitos.

2.1. Materiais compósitos

Um material compósito, por definição, resulta da combinação ou da mistura de dois ou mais materiais distintos, formando à escala macroscópica uma interface comum, com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas. As propriedades resultantes são superiores à dos seus constituintes iniciais.

Atualmente, conseguimos associar este nome a uma vasta gama de materiais, desde um material comum, como o betão armado, até um material avançado tecnologicamente, como um compósito de alto desempenho como um carbono/epóxico.

É possível distinguir dois macro constituintes deste tipo de material. Por um lado, temos a matriz, que é o material aglomerante, que confere estabilidade e coesão. Existem três principais tipos de matrizes: a polimérica, a metálica e a cerâmica. Por outro lado, temos o reforço, que tem como função conferir resistência mecânica ao material compósito. O reforço toma duas formas distintas: as fibras e as partículas. A ligação entre estes componentes dá-se durante a fase de fabricação do material compósito.

Não é possível atribuir uma data exata para o surgimento deste tipo de material. A associação de diferentes materiais e propriedades mecânicas é realizada pelo Homem há milénios. No entanto, o termo “compósito” é associado a materiais avançados tecnologicamente, o que não é totalmente verdade. Já os egípcios misturavam argila com palha para construir blocos mais resistentes; os romanos aprimoraram o betão misturando cal, cinza vulcânica e pedra. Por isso, os materiais compósitos são mais antigos do que se pensa. A evolução destes foi feita de forma intuitiva e iterável com o objetivo de obter materiais com melhores propriedades.

Por isso, a este material é dada uma classificação, como ilustra o esquema da Figura 1.

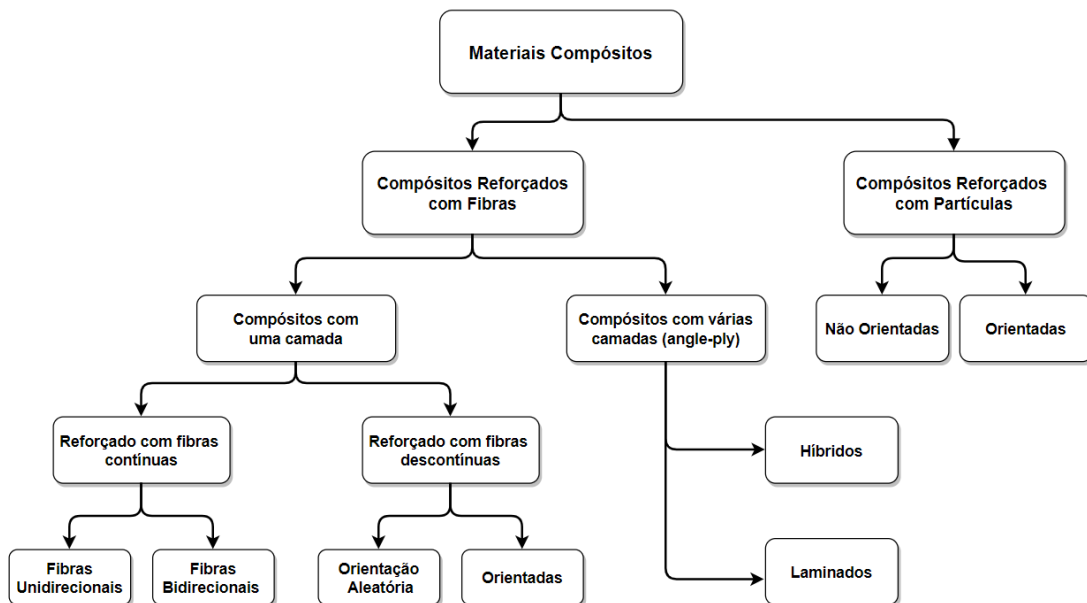


Figura 1 - Classificação dos materiais compósitos; adaptado de [1]

2.1.1. Reforços

As funções principais do reforço é conferir resistência mecânica, estabilidade térmica e outras propriedades estruturais ao compósito. Existem dois tipos de reforços: fibras e partículas. No entanto, para esta dissertação serão abordadas apenas as fibras. A Tabela 1 descreve os tipos de fibras utilizadas como reforços nos materiais compósitos.

Tabela 1 - Tipos de fibras utilizadas como reforços [2]

	Descrição
Fibra de Vidro	São o tipo de reforço mais utilizado; produzidas a partir de filamentos de vidro extremamente finos e flexíveis. Temperatura de fusão à volta de 1260°C. São produzidos três grandes tipos: fibras E, S e R. As duas últimas apresentam melhores propriedades, como módulo de elasticidade e tensão de rotura.
Fibra de Carbono	Existem 2 tipos de fibras de carbono: as de carbono (80%<[C]<95%) e as de grafite ([C]>95%). São produzidas através da decomposição térmica de três precursores orgânicos: a celulose, o alcatrão e o poliacrilonitrilo (PAN). O último é o mais utilizado atualmente.
Fibra Aramídicas	Produzidas a partir de poliamidas aromáticas, desenvolvidas em 1972. Existem dois tipos: as standards (do tipo Kevlar®29) e as de elevado módulo (do tipo Kevlar®49). Têm excelentes propriedades como boa resistência ao impacto e à fadiga. Apresentam ótima relação rigidez-peso.
Fibra de Boro	O boro em estado vapor é depositado sobre um substrato: fio de tungsténio ou cobre. Têm um módulo de elasticidade cinco vezes superior ao da fibra de vidro, sendo ligeiramente mais pesadas. Têm um elevado custo, pelo que são aplicadas sobretudo em aeronáutica.
Outras	Existem vários tipos como amianto, sisal, poliamidas, poliésteres, etc. São aplicadas em materiais que requeiram um menor desempenho mecânico.

Os reforços são um constituinte muito importante nos materiais compósitos. Têm a função principal de melhorar as propriedades mecânicas do produto final. No entanto, este tipo de constituinte pode apresentar várias formas. Estas são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Formas que os reforços apresentam [2]

	Descrição
Roving	Trata-se de um cordão de filamentos contínuos enrolados helicoidalmente em bobines. É destinado à produção de fibras curtas ou às formas de reforço indicadas no seguimento desta tabela.
Mantas	As fibras são dispostas aleatoriamente e agregadas com um ligante especial em emulsão ou pó, sendo este solúvel na impregnação. Distinguem-se por mantas de filamentos cortados (CSM – <i>Chopped Strand Mat</i>) e mantas de filamentos contínuos (CRM - <i>Chopped Random Mat</i>).
Tecidos 2D	Resultam da confeção de uma ligação entre feixes de fibras longas que originam um tecido indicado para aplicações em que se exigem elevadas propriedades mecânicas. Devida à diferente confeção são classificados como: tecidos entrelaçados, quase unidireccionais e híbridos.
Malhas (Knitted Fabrics)	Resultam da ligação sucessiva de camadas de fibras alinhadas, sendo as diferentes camadas cozidas em conjunto. Orientando as fibras diferenciadamente, obtém-se um reforço quase isotrópico.
Tecidos 3D	São produzidos através de processos especiais de tecelagem, ligando múltiplas camadas de fibras com orientações diversas.
Entrançados (Braids)	Semelhante às mantas, mas obtidos por um processo de confeção mais complexo, por isso são mais caros que as referidas.
Pré-formas	As pré-formas são produzidas de duas formas, 2D ou 3D, e podem conter fibras curtas ou contínuas. São utilizadas no fabrico de estruturas complexas.

Podemos então afirmar que as fibras podem apresentar diferentes formas, como ilustra a Figura 2.

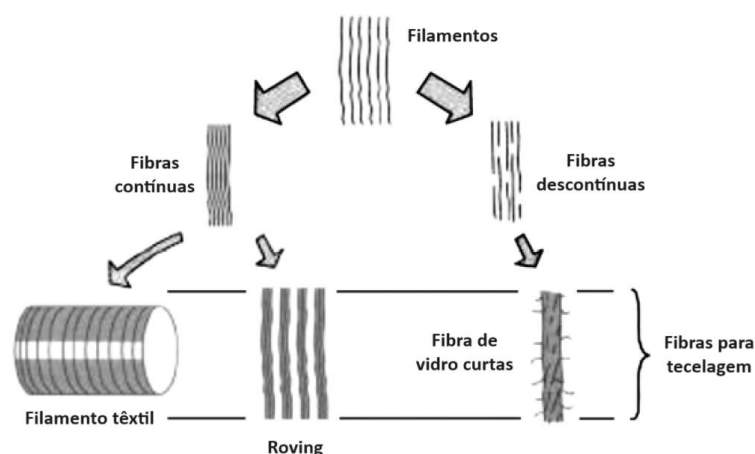


Figura 2 - Diferentes formas das fibras; adaptado de [3]

Os reforços são um constituinte de elevada importância pelas suas funções descritas anteriormente. Estas fibras apresentam propriedades mecânicas muito superiores aos materiais idênticos a estas, quando comparadas com a sua forma maciça.

Na Tabela 3, é possível comparar as principais propriedades das fibras mais comuns utilizadas nos materiais compósitos com os respectivos materiais em forma maciça.

Tabela 3 - Propriedades de fibras e respectivos materiais maciço [4]

	Material	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (GPa)	Massa volúmica (kg/dm ³)	Módulo específico (GPa.dm ³ /kg)	Resistência específica (GPa.dm ³ /kg)
Fibras	Vidro E	72	3,5	2,54	28,5	1,38
	Vidro S	87	4,3	2,49	35,0	1,70
	Carbono (H S*)	240,0	2,5	1,90	126,3	1,32
	Carbono (H M*)	390,0	2,1	1,90	205,3	1,11
	Boro	393,0	3,1	2,70	146	1,15
	Sílica	72,4	5,8	2,19	33	2,65
	Tungsténio	414,0	4,2	19,30	21	0,22
	Berílio	240,0	1,3	1,83	131	0,71
	Kevlar®49	131,0	3,6	1,45	90	2,48
	Material maciço	Aço	210,0	0,34-2,1	7,80	26,9
Ligas de Al		70,0	0,14-0,62	2,70	25,9	0,052-0,230
Vidro		70,0	0,7-2,1	2,50	28	0,280-0,840
Tungsténio		350,0	1,1-4,1	1,93	18,1	0,057-0,210
Berílio		300,0	0,7	1,83	164	0,380

*HS: *High Strenght*; HM: *High Modulus*

No contexto desta revisão bibliográfica, é importante referir as classificações segundo as quais as fibras de carbono podem ser produzidas e comercializadas, fazendo de seguida a respetiva enumeração:

- UHM (*Ultra High Modulus*): fibras com módulo de elasticidade superior a 500 GPa;
- HM (*High Modulus*): fibras com módulo de elasticidade superior a 300 GPa e rácio resistência mecânica/ módulo em tração inferior a 1%;
- IM (*Intermediate Modulus*): fibras com módulo de elasticidade até 300 GPa e rácio resistência mecânica/ módulo de cerca de 1%;
- Fibras de baixo módulo: com valores inferiores a 100 GPa;
- HS (*High Strenght*): fibras com resistência à tração superior a 3 GPa e rácio resistência/rigidez entre 0,015 e 0,02.

2.1.2. Matrizes

Devido à sua pequena secção transversal, as fibras não podem ser solicitadas diretamente. E quando estas são solicitadas não conseguem distribuir a carga entre elas. Por isso, é necessário que exista um elemento ligante e agregador, a matriz. Esta tem como principais funções dar forma estável ao compósito, transferir as cargas entre as fibras e protegê-las dos agentes ambientais. Garante também um bom acabamento superficial. O material da matriz influencia as propriedades mecânicas do compósito. São elas o módulo de elasticidade, a resistência a esforços transversais, de cisalhamento e de compressão, entre outras.

Os materiais compósitos são distinguidos pelo tipo de matriz que os constitui. Existem três tipos de matriz: a polimérica, a metálica e a cerâmica cimentosa. O material da matriz é também responsável por determinar a temperatura de serviço do compósito que o compõe. Este é o primeiro elemento a perder propriedades mecânicas com o aumento da temperatura. A Figura 3 ilustra os intervalos de temperaturas de serviço associados a cada material compósito consoante o tipo de matriz que o constitui.

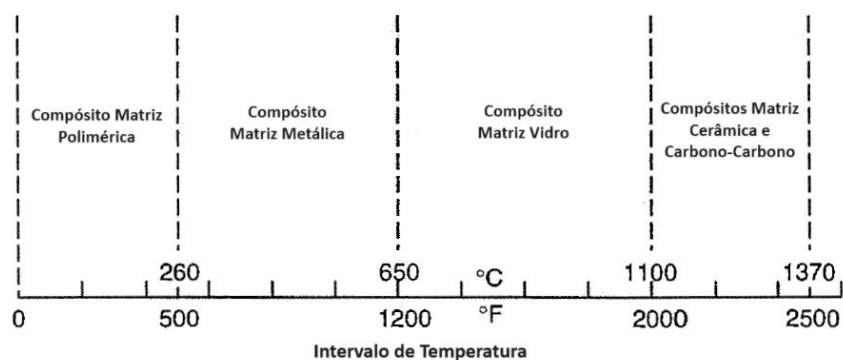


Figura 3 - Intervalos de temperaturas de serviço para compósitos com diferentes tipos de matriz; adaptado de [1]

Os materiais compósitos de matriz polimérica são os mais comuns e utilizados. Os compósitos de matriz metálica incluem as ligas de alumínio reforçadas com fibras de alumina, fibras de boro e fibras de grafite. São utilizados em componente de motores de avião e na indústria aeroespacial, respetivamente. As matrizes cerâmicas são utilizadas para fabricar ferramentas de corte para maquinagem [5].

As matrizes poliméricas dividem-se em duas categorias principais, as termoplásticas e as termoendurecíveis. Os polímeros termoplásticos realizam uma transição de estado quando aquecidos a uma temperatura específica, passando de uma condição rígida para uma mais flexível. Isto acontece devido à quebra das ligações intermoleculares existentes. Esse ponto é conhecido como temperatura de transição vítrea (T_g). Podem inclusive, atingir um estado líquido viscoso ao alcançar a temperatura de fusão (T_m). Geralmente, estes apresentam maior resistência ao impacto e tenacidade em comparação com os termoendurecíveis.

Por outro lado, os polímeros termoendurecíveis não apresentam deformações tão pronunciadas quanto os termoplásticos quando expostos a altas temperaturas, embora

também possuem uma temperatura de transição vítrea. Uma vez aquecidos, esses polímeros mantêm uma forma permanente e não possuem uma temperatura de fusão. Assim, quando sujeitos a temperaturas elevadas, sofrem degradação de forma irreversível, atingindo um estado em que já não é possível serem reutilizados. Devido à diferença entre estes materiais, na Tabela 4 é feita uma comparação de propriedades entre vários exemplos de matrizes termoendurecíveis e termoplásticas [6].

Tabela 4 - Principais propriedades de matrizes termoendurecíveis e termoplásticas [2]

Matrizes			HDT (°C)	E (GPa)	σ_u (MPa)	ϵ_u (%)
Termoendurecíveis	Poliéster	Ortoftálica	66-95	3,3-3,6	55-70	2,2-3,5
		Isoftálica	93-125	3,7-4,1	55-60	1,5-2,5
	Fenólicas	Ressol	250	2,0	32	1,8
		Bisfenol A	102	3,5	82	6,0
	Viniléster	Novolac	150	3,5	68	3,5
		Epóxida DGEBA*		62-121	3,0-3,2	62-90
Termoplásticas		Epóxida DGEBF*	110	4,1	125	5,0
		Policarbonato	132-149	2,4-9,0	65-131	2,5-125
		Polipropileno	54-151	1,5-5,9	34-83	2,3-400
		Poliamida 66	90-252	2,9-9,0	83-172	4-200
		Polietermidas	204-210	9,0	200	-
		PPS*	137-265	3,3-11	74-130	1-110
	PEEK*	148-286	9,0	98-190	-	

* DGEBA: baseada em diglicidil éter bisfenol A; DGEBF: baseada em diglicidil éter bisfenol F; PPS: Polisulfureto de fenileno; PEEK: Poli-éter-éter-cetona.

A *Heat Deflection Temperature* (HDT) é a temperatura de deflexão térmica e é uma propriedade crucial dos polímeros. Esta determina a capacidade de o polímero manter a sua forma e rigidez quando sujeito a altas temperaturas e sob carga constante. É um indicador essencial da temperatura máxima que o material pode suportar em aplicações estruturais. Acima desta, a função que desempenha estará comprometida. Esta propriedade do material está estabelecida e determinada segundo a norma ASTM D 648-18.

Para efeitos deste documento, e na direção do trabalho realizado posteriormente, serão abordadas mais aprofundadamente as matrizes poliméricas, nomeadamente a termoendurecível epóxida.

Este é um tipo de matriz que é mais utilizado em aplicações técnicas. Isto porque apresenta uma grande variedade de formulações químicas. A matriz epóxida tem algumas variações nos seus constituintes, mas a maioria delas têm por base o diglicidil éter bisfenol A. Esta possui melhores características que o poliéster e pode ser formulada de maneira a obter diferentes variações com diferentes propriedades, nomeadamente a rigidez. Esta matriz apresenta custos elevados, podendo atingir duas vezes mais o preço do viniléster e quatro vezes mais o do poliéster.

A matriz epóxida apresenta excelentes propriedades mecânicas, como a resistência mecânica e química, grande estabilidade dimensional e resistência à abrasão. A temperatura de serviço desta matriz atinge o valor máximo de cerca de 200°C. Para realizar a cura desta matriz, é necessário que o material atinja uma temperatura entre os 120°C e os 175°C. A que é curada a temperatura superior é utilizada em aplicações mais exigentes, como a indústria aeronáutica. A que é curada a temperatura inferior é utilizada em aplicações menos exigentes, como artigos de desporto [7]. A Figura 4 ilustra uma resina epóxida usada como matriz e apresenta os diferentes formatos disponíveis comercialmente.



Figura 4 - Resina epóxida disponível comercialmente [8]

2.2. Aplicações de materiais compósitos

Neste subcapítulo serão apresentados alguns exemplos de aplicações dos materiais compósitos em diferentes áreas da Engenharia.

2.2.1. Indústria Automóvel

A indústria automóvel tem vindo ao longo dos anos a aumentar a utilização de materiais compósitos na fabricação de componentes para equipar os veículos. Isto acontece devido às características que estes materiais apresentam e à melhoria que impregnam nas novas peças produzidas. Estes promovem a redução de peso e a melhoria da resistência mecânica.

A Porsche AG® (www.porsche.com) foi uma das marcas pioneiras de automóveis a utilizar estes materiais nos seus componentes. Inicialmente, o seu uso era restrito a componentes para alta competição, como carros de corrida. No entanto, atualmente fabrica vários componentes em material compósito, nomeadamente fibra de carbono. A Figura 5 ilustra uma jante desenvolvida pela marca neste material.



Figura 5 - Jante 911 Turbo Carbon

O construtor afirma que há uma redução do peso em cerca de 20% e são igualmente 20% mais robustas em relação às jantes de liga leve de série. Devido a estes fatores, os pneus aderem melhor ao piso e há uma distribuição de forças mais uniforme, resultando numa aceleração e travagem mais dinâmicas [9].

Dentro da indústria automóvel, os materiais compósitos tomam diversas aplicações, como são exemplo os pneus, que resultam da combinação de vários tipos de materiais. Malha de aço, tecido têxtil e borracha são os principais componentes que associados formam um pneu.

A Continental Mabor® (www.continentalmabor.pt), é uma indústria de pneus e tem dentro da sua gama de produção os pneus OTR. Esta sigla significa “*Off The Road*”, e estes são pneus de grandes dimensões destinados a aplicações especiais. São concebidos para laborarem em condições de trabalho hostis suportando cargas pesadas. Os pneus OTR são utilizados em camiões *dumper*, veículos de portos marítimos, veículos de construção e minas, entre outros. São feitos para serem excecionalmente robustos, com uma elevada resistência aos danos e ao desgaste. A Figura 6 ilustra os diferentes materiais utilizado num pneu OTR.



Figura 6 - Constituintes de um pneu Continental OTR; adaptado de [10]

A Figura 6 é legendada da seguinte maneira:

1 – Piso (*tread*): secção do pneu que fica em contacto com o solo. É projetado para resistir ao desgaste, à abrasão e ao calor;

2 – Cinta Têxtil (*steelcord belt*): é um conjunto de várias telas metálicas que são sobrepostas em diferentes direções, que conferem rigidez estrutural ao pneu;

3 – Ombro (*belt cushion*): este componente fornece estabilidade ao pneu e reduz o seu aquecimento durante o movimento;

4 - Parede Lateral (*sidewall*): é um revestimento de borracha no lado exterior do pneu. Tem como função proteger dos impactos e permitir um certo nível de amortecimento ao piso irregular;

5 – Carcaça (*steeltcord carcass*): é responsável por suportar a pressão e absorver os impactos. É constituída por várias malhas de aço dispostas em ângulos distintos. Apresenta alta flexibilidade, bom amortecimento e resistência ao rolamento;

6 – *Innerliner*: camada estanque que constitui todo o interior do pneu;

7 – Talão (*apex, chafer, bead and wire cores*): constituído por vários componentes, representa o aro do pneu e está em contacto direto com a jante. O núcleo do talão é composto por espiras de arame de aço impregnado com borracha, formando um anel [10].

2.2.2. Mobiliário

A utilização de materiais compósitos na indústria do mobiliário surge pelo facto de estes serem materiais mais leves, resistentes e ecológicos. E para exemplo temos o *Medium Density Fiberboard* ou MDF. Este material é o resultado da combinação de fibras de madeira com resina sintética curada a alta temperatura e pressão. O produto final apresenta um perfil de densidade homogénea. Este é muito competente a nível de estabilidade e resistência, o que permite a maquinação de padrões complexos e com tolerâncias precisas. Apresenta também uma superfície lisa, suave e sem nós ou grãos. Este material é utilizado em favor da madeira pelas suas características e pela facilidade de manuseamento e maquinação [11].

Existem muitas variantes a este material, segundo o fabricante Finsa® (www.finsa.com). Temos por exemplo MDF hidrófugo, ou seja, é um tipo de MDF que é impermeável. Este tipo de MDF é utilizado em ambientes em que há elevada humidade ou está em contacto com água. Existe também MDF ignífugo, ou seja, é um MDF que apresenta resistência à combustão ou ignição. A sua utilização é aconselhada em ambientes secos, que solicitem uma melhor reação ao fogo. Existe também MDF de elevada densidade, que apresenta este um acabamento superior em trabalhos exigentes a nível de maquinação ou lixagem. Os diferentes tipos de MDF referidos anteriormente são ilustrados na Figura 7.



Figura 7 - Diferentes tipos de MDF: A - Hidrófugo, B - Ignífugo, C - Alta Densidade [12]

Este tipo de material tem a sua maior utilização na fabricação de mobiliário para escritórios e residências, armários de cozinha, portas, componentes de marcenaria, acabamentos e molduras interiores, entre outros.

É um material muito utilizado devido às suas propriedades. A maquinação deste material é mais eficiente quando comparado com outros porque tem um desperdício de aparas muito inferior. Por este material ser feito de fibras de madeira, como aparas e lascas, é mais barato do que qualquer tipo de madeira [13].

2.2.3. Pás Eólicas

Atualmente, a produção de energia renovável representa 59% do consumo de energia em Portugal, da qual 26% é energia eólica [14]. Esta energia renovável é obtida pela conversão da energia cinética do vento em energia elétrica através de uma turbina eólica.

As turbinas eólicas são geralmente constituídas por três pás e estas são construídas com recurso a materiais compósitos. Segundo um fabricante de turbinas eólicas, a ENERCON *GmbH*[®] (www.enercon.de), as pás são fabricadas através de um processo de moldação a vácuo. Deste processo resulta um compósito do tipo sandwich. As fibras de vidro são colocadas no molde e são impregnadas com resina. Recorrem ao vácuo para compactar e estruturar as mesmas. São ainda aplicados revestimentos na superfície das pás para as proteger dos elementos climáticos e da radiação UV, entre outros. A Figura 8 representa a produção de uma pá eólica nas instalações do fabricante.



Figura 8 - Processo de produção de uma pá de turbina eólica

Posteriormente, dá-se a união com a outra metade da pá e são realizados tratamentos mecânicos e superficiais. O processo é finalizado com o balanceamento da pá. A Figura 9 representa o produto final, uma pá eólica produzida pela pelo fabricante referido. Este fabricante produz pás eólicas com comprimentos entre os 41 m e os 87,5 m.



Figura 9 - Aspeto final de uma pá de turbina eólica [15]

2.2.4. Desporto

Os materiais compósitos são igualmente muito utilizados em várias modalidades do desporto, como por exemplo no surf. A prática deste desporto, que consiste em aproveitar a energia das ondas do mar para gerar movimento em cima de uma prancha, remonta a culturas antigas. O surf como é conhecido hoje, tem origens no início do século XX no Havai. Inicialmente, as pranchas começaram por ser fabricadas em madeira, sendo substituídas por umas mais leves, feitas em espuma de poliuretano reforçado com fibra de vidro. Atualmente, existem pranchas

de *surf* feitas em material compósito, como ilustra a seguinte Figura 10. Esta representa um modelo produzido pela Surfactory (www.surfactory.pt), fabricante português de pranchas de *surf*.



Figura 10 - Prancha de Surf HardCork: A - vista ampliada; B - vista global [16]

Este modelo nasce da junção de grânulos de cortiça, fibras naturais (de cânhamo ou linho) e bio resinas termoendurecíveis (resinas ecológicas). Estes materiais são todos renováveis e naturais. A fabricação da prancha é feita da seguinte forma: as fibras são embebidas em resina e são prensadas sob vácuo com uma mistura de pequenos grânulos de cortiça e fibras naturais. Neste caso, a cortiça fornece boa capacidade de amortecimento e reduz as vibrações. Por outro lado, as fibras naturais e a resina fornecem uma elevada resistência mecânica. Daqui resulta um material muito leve, resistente ao impacto, à tração, à compressão e resistente aos raios UV [17].

2.2.5. Construção Naval

Os materiais compósitos são utilizados na construção naval devido às suas excelentes propriedades como a resistência à corrosão, baixo peso, elevada resistência mecânica e durabilidade. Já são fabricados cascos de embarcações de pequenas dimensões em material compósito há vários anos. No entanto, nenhum atingiu a dimensão do construído ao abrigo do projeto RAMSSES. Este projeto foi desenvolvido na empresa DSNS (www.damen.com), na Holanda, que construiu uma secção completa do casco de um navio feito em material compósito, intitulado de "*Custom Made Hull for Offshore Vessel*", como ilustra a Figura 11.

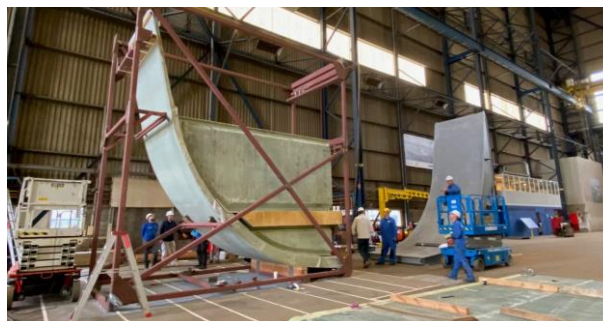


Figura 11 - Secção completa de casco em material compósito

A utilização de materiais compósitos na construção naval contribui para uma maior eficiência e sustentabilidade devido às propriedades dos mesmos. O construtor afirma que um casco de um navio feito integralmente neste material poderia pesar cerca de 60% o peso de um equivalente

feito em aço. Através da redução de peso, é possível reduzir o consumo de combustível em até 25%. As emissões e o conseqüente potencial de aquecimento global também são reduzidos.

Atualmente, as regulamentações permitem a construção naval com materiais compósitos para embarcações de até 500 toneladas ou 25 metros de comprimento. Um dos objetivos deste projeto foi também alterar estas regulamentações, aumentando as dimensões permitidas. Foi utilizada uma técnica pioneira de infundir laminados espessos com até 6 metros de altura. Com este projeto, demonstraram ser possível realizar a construção de um casco em material compósito em um estaleiro naval convencional [18].

2.2.6. Procura

Nos últimos anos, os materiais compósitos têm visto a sua procura a aumentar, como comprova o exemplo relativo à fibra de carbono na Figura 12. Devido às suas propriedades como a leveza e resistência mecânica, são capazes de realizar várias funções e tomar formas distintas. Por isso, foi realizado um estudo pela Statista Inc. (www.statista.com), uma plataforma online de dados e *business intelligence*, com o objetivo de caracterizar a procura global de fibra de carbono desde 2010.

A seguinte figura ilustra o resultado do estudo, no qual é possível analisar que houve uma crescente procura deste material ao longo dos últimos anos. O valor associado ao ano de 2022, quase quadruplicou o de 2010.

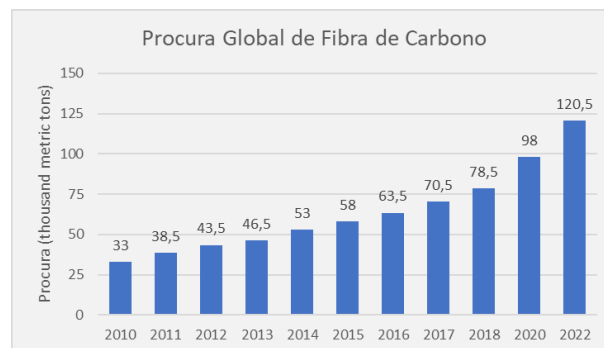


Figura 12 - Procura de fibra de carbono nos últimos anos; adaptado de [19]

Apesar de este gráfico ser referente à procura global de fibra de carbono, é possível extrapolar estes valores para a procura de materiais compósitos, justificando uma crescente procura dos mesmos ao longo dos últimos anos.

2.3. Maquinagem

Nas últimas décadas, os materiais compósitos têm sido utilizados numa crescente variedade de áreas. Isto acontece devido às excelentes propriedades mecânicas deste material como o baixo peso, a elevada resistência mecânica e a rigidez. No entanto, precisam de sofrer processos de maquinagem para operarem e cumprirem a função que lhes é destinada. Geralmente, os compósitos são produzidos na sua forma quase final. Aplicam-se os processos de maquinagem para lhes dar um acabamento final e as tolerâncias corretas. Existem vários processos de maquinagem para estes materiais. Estes são divididos em processos de maquinagem convencional e não convencional. Entende-se por maquinagem convencional os processos menos avançados tecnologicamente e que são controlados por operadores, utilizam-se máquinas ou ferramentas. Já a não convencional abrange os processos que são mais avançados tecnologicamente e automatizados com recurso a controlo numérico. Estes processos são listados de seguida na Tabela 5.

Tabela 5 – Processos de maquinagem de materiais compósitos [20]

Maquinagem	
Convencional	Não Convencional
Corte	Laser
Torneamento	Jato de água
Fresagem	Ultrassom
Retificação	Eletroerosão
Furação	Feixe de Eletrões

Os processos convencionais de maquinagem já estão estabelecidos e amplamente estudados. No entanto, são passíveis de alterações e desenvolvimentos na área dos materiais e das ferramentas utilizadas. De todos os processos de maquinagem, o corte e a furação são os mais utilizados. Isto porque permitem a realização de furos para rebites ou parafusos e assim promover as ligações mecânicas em detrimento das permanentes como as adesivas ou por fusão. Daqui é possível obter ligações em estruturas mais complexas e juntas mais resistentes, características muito importantes para as utilizações deste tipo de material. Neste relatório será abordada mais detalhadamente a furação dos materiais compósitos.

Os processos de maquinagem não convencionais são mais recentes e a Figura 13 ilustra os avanços que estes tiveram ao longo das últimas décadas.

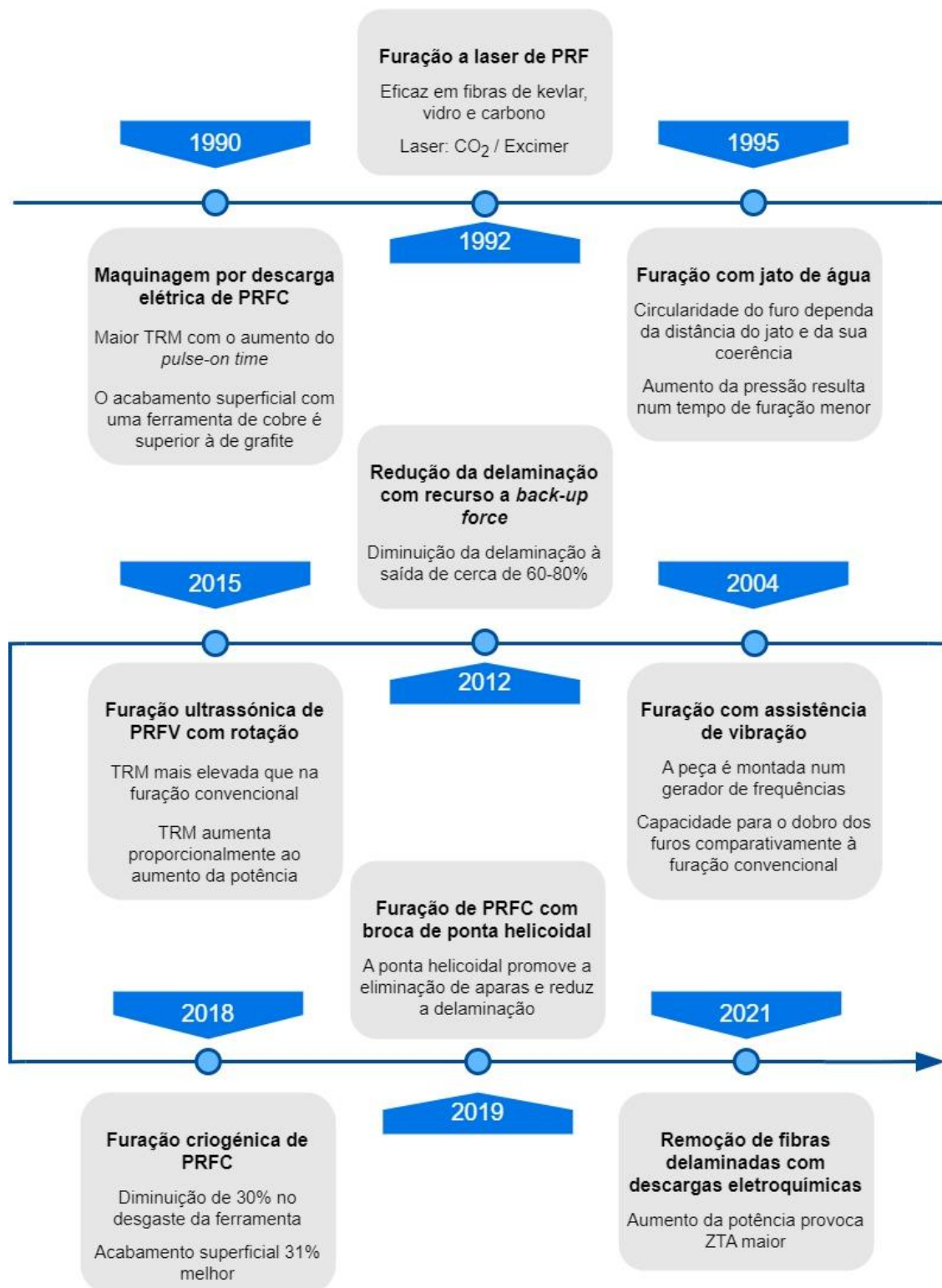


Figura 13 - Avanços na maquinagem de polímeros reforçados com fibras; adaptado de [21]

2.4. Furação

Na furação, a remoção de material ocorre devido ao contacto e à rotação da broca na peça a maquinar. O material é expelido na forma de aparas através da hélice da broca. A força exercida na direção perpendicular à peça é a força axial (F_a). Esta é dependente do material e da geometria da broca, dos parâmetros da furação e do material em questão. A F_a é medida através de um dinamómetro e é o principal responsável pelos danos causados. A Figura 14 esquematiza os principais fatores que influenciam a furação em materiais compósitos.

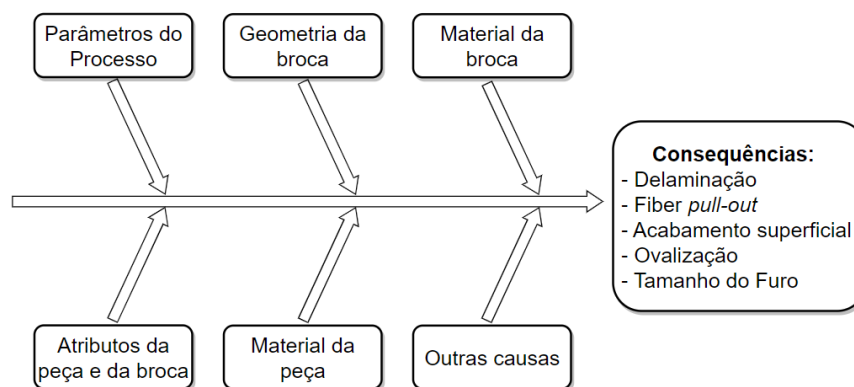


Figura 14 - Parâmetros que influenciam a furação em materiais compósitos; adaptado de [21]

Pela análise da figura acima, é possível concluir que há muitos parâmetros que condicionam e alteram a furação realizada num material compósito. No entanto, os principais parâmetros que influenciam a furação convencional são o avanço, a velocidade de corte e a geometria broca. Destes parâmetros, o mais importante é o avanço porque define o dano provocado na furação. A velocidade de corte é o segundo parâmetro mais importante dos mencionados acima [22].

2.4.1. Avanço

O avanço é definido como o deslocamento por rotação que a ferramenta executa na peça a maquinar, realizado no sentido perpendicular à mesma. Este parâmetro está associado à velocidade de rotação da broca e a sua unidade é o mm/min. A velocidade de avanço (V_f) é calculada através da Equação (1) definida de seguida.

$$V_f = f \times n \quad (1)$$

O f é o avanço em mm por rotação e o n são as rotações por minuto da broca. A rugosidade na superfície maquinada é muito influenciada pelo avanço da broca porque é o parâmetro onde é possível controlar a rugosidade final. Na furação, o avanço é responsável pelo tempo de maquinagem e pela força exercida na superfície da peça a maquinar. Deste parâmetro advém dois defeitos muito relevantes na maquinagem de materiais compósitos.

2.4.2. Velocidade de corte

A velocidade de corte (V_c) é definida como a velocidade linear entre a superfície de corte e a superfície da peça a maquinar. Este parâmetro da furação é calculado pela equação (2) definida seguidamente.

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

A V_c depende do n (número de rotações por minuto) da broca e do diâmetro da mesma (D). Apesar da velocidade de corte não ter a mesma importância na furação como o avanço, a V_c é o segundo parâmetro mais importante. É possível afirmar que quanto maior a velocidade de corte, menor será a força axial criada. Para obter melhor resultado de rugosidade superficial, deve-se reduzir a velocidade de corte e o avanço [22].

2.4.3. Geometria da broca

Designa-se por broca a ferramenta utilizada na furação convencional. A Figura 15 ilustra uma broca helicoidal.

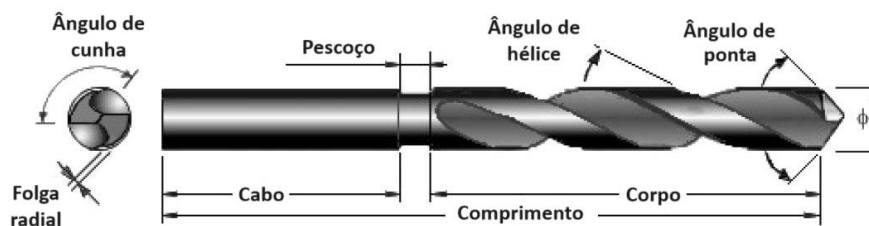


Figura 15 – Broca helicoidal; adaptado de [23]

A broca é constituída por três partes: a ponta, o corpo e o cabo como ilustra a Figura 15. O cabo é a secção que segura e acopla a broca à máquina. Geralmente, é cilíndrico, mas pode apresentar outras formas, como nas brocas de encaixe rápido. O corpo da ferramenta é caracterizado pelas hélices da broca. Estas possuem um ângulo característico, que é influenciado pelo ângulo de ponta e pelo material a maquinar. Para maquinar materiais macios, devem-se utilizar brocas com um ângulo de hélice maior. Por outro lado, para maquinar materiais mais duros, devem-se utilizar brocas com um ângulo de hélice menor. Um ângulo de hélice menor origina aparas curtas e o contrário é válido [23].

Existem muitas variantes de cabos e corpos das brocas. No entanto, a ponta da broca é a que apresenta mais variações. Esta é concebida segundo vários parâmetros. O material de que é feita tem muita importância, porque esta pode ser de aço rápido (HSS) ou de metal duro, entre outros. O tipo de material precede as características pretendidas, pois podemos necessitar de uma elevada resistência ao desgaste ou de uma elevada condutividade térmica, entre outras. O tipo de material que a broca vai maquinar também é importante pois esta pode ser utilizada em aço, madeira, alvenaria, ou como no caso deste relatório em materiais compósitos. Por isso, a escolha da broca deve ser feita tendo em conta a sua utilização, o material de que é feita e as

características pretendidas. Tem existido um avanço no que a este assunto diz respeito. Há uma grande variedade de brocas utilizadas para maquinagem de materiais compósitos. A Figura 16 ilustra vários tipos de geometrias de brocas utilizadas para a furação de materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras.



Figura 16 - Várias geometrias de brocas utilizadas na furação de compósitos poliméricos reforçado por fibras [21]

2.5. Tipos de danos nos materiais compósitos

Os materiais compósitos são constituídos por duas fases distintas: a matriz e o reforço. Por isso, este material pode ser caracterizado como anisotrópicos, ou seja, é um material que apresenta diferentes propriedades mecânicas quando solicitado em diferentes direções, ou quasi-isotrópico, dependendo da orientação das fibras ao longo da sequência de empilhamento. Quando o material é solicitado na direção das fibras, apresenta melhores propriedades mecânicas do que quando é solicitado na direção perpendicular às fibras.

Durante a maquinagem os materiais compósitos sofrem danos. De todos os ocorridos, os mais comuns são a delaminação, o arrancamento de fibras ou *fiber pull-out*, o deslocamento entre fibra e matriz, fissuras interlaminares e os danos térmicos causados pelo calor proveniente da maquinagem.

Entende-se por delaminação o deslocamento de camadas adjacentes do laminado do material compósito. Este tipo de dano é um dos mais frequentes e mais crítico porque existe uma perda de propriedades mecânicas quando ocorre. Tal como os restantes danos, é importante que sejam controlados e diminuídos [24].

A delaminação ocorre de duas formas distintas. Por um lado, temos a delaminação *peel-up*. Esta acontece na superfície superior do compósito. Quando ocorre o contacto entre a broca e o compósito, é gerada uma tensão de corte tangencial. Esta tensão faz com que a broca arranque as camadas superiores do laminado, como ilustra a Figura 17 (A).

Por outro lado, existe a delaminação *push-out*. Esta acontece à saída do furo maquinado. Quando a broca se aproxima das últimas camadas do laminado, a força de avanço que exerce é superior à resistência das ligações entre as camadas do laminado e dá-se a rotura destas, como ilustra a Figura 17 (B).

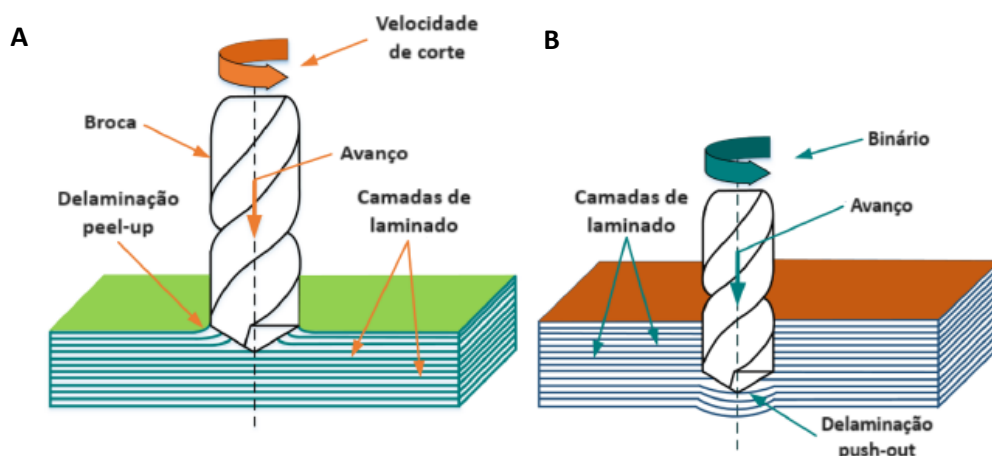


Figura 17 – Mecanismos de delaminação: delaminação *peel-up* (A), delaminação *push-out* (B); adaptado de [21]

Outro dano significativo que ocorre durante a furação deste material, é o arrancamento de fibras (*fiber pull-out*). Este fenômeno acontece porque as forças criadas na furação quebram as ligações entre a matriz e as fibras. Como consequência, as fibras são puxadas e arrancadas da peça, provocando espaços vazios no material. Quando este for solicitado, é possível o aparecimento de fissuras por fadiga e a consequente falha do compósito [21].

De maneira geral, estes tipos de danos podem ser colmatados através da definição correta dos parâmetros de corte e do tipo de broca utilizada. A utilização de um suporte sacrificial, colocado na parte inferior à peça durante a furação, evita que as camadas finais sejam pressionadas, evitando assim mais delaminação. É possível também reduzir o dano através da redução da velocidade de avanço ao longo da furação, na direção de saída do furo. A realização de um furo piloto também se mostrou como uma estratégia para evitar a delaminação, nomeadamente a *peel-up*. Em suma, o grau de delaminação está diretamente relacionado com o avanço. Os autores defendem que existe uma força de avanço crítica, que abaixo da qual não existe delaminação. Por isso, esta pode ser usada como um limite para o avanço na furação de materiais compósitos para não ocorrer delaminação [25].

2.6. Classificação do dano

A classificação do dano causado pela furação de materiais compósitos é de grande importância porque permite a avaliação da extensão da delaminação e controlar os fatores que a podem causar. Para a classificação do dano é necessário obter uma imagem do furo e da sua área envolvente, aquela onde a delaminação ocorre. Para obter esta imagem são utilizados vários métodos como a microscopia, radiografia de radiação X, padrão de Moiré, *digital scanning* e ultrassons (*ultrasonic c-scan*), entre outros. Consoante a dimensão a analisar, os parâmetros propostos para a quantificação da delaminação podem ser definidos como fator de delaminação unidimensional, fator de delaminação bidimensional, fator de delaminação combinado e fator de delaminação tridimensional.

O fator de delaminação (F_d) mais utilizado é o unidimensional. Este é definido como a razão entre o diâmetro máximo da área de delaminação (D_{max}) e o diâmetro nominal do furo (D_0). Os furos a quais estes diâmetros se referem são concêntricos [26]. A equação para o cálculo do fator de delaminação unidimensional é a seguinte:

$$F_d = \frac{D_{max}}{D_0} \quad (3)$$

Através do fator unidimensional de delaminação é possível calcular valores aceitáveis para a delaminação. No entanto, este fator é apenas aplicável a furos com padrão regular. Na maquinaria de materiais compósitos, raramente os furos efetuados são perfeitos. Existem sempre irregularidades em termos de fraturas e fissuras, delaminações, arrancamento de

fibras, danos térmicos, circularidade dos furos, entre outros. A Tabela 6 descreve vários fatores de delaminação desenvolvidos e as respectivas equações para o seu cálculo.

Tabela 6 - Fatores de delaminação e respectivas equações

Fator de delaminação	Equação	Referência
Fator mínimo de delaminação (F_{dmin})	$F_{dmin} = \frac{D_{min}}{D_{nom}}$	[27]
Fator de delaminação bidimensional (F_a)	$F_a = \left(\frac{A_d}{A_{nom}} \right) \%$	[28]
Fator de delaminação ajustado (F_{da})	$F_{da} = F_d + \frac{A_d(F_d^2 - F_d)}{A_{max} - A_{nom}}$	[29]
Fator de delaminação equivalente (F_{ed})	$F_{ed} = \frac{1}{D_{nom}} \sqrt{\frac{4(A_d + A_{nom})}{\pi}}$	[30]
Fator de delaminação tridimensional (F_v)*	$F_v = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p \frac{A_d^k}{A_{nom}}$	[31]

*p é o número total de camadas delaminadas; k é o número que especifica a camada delaminada

Foram realizados avanços neste sentido e surgiu o fator mínimo de delaminação. Este considera o diâmetro da área mínima em vez do diâmetro máximo de delaminação. O valor deste é mais satisfatório quando a área afetada não se encontra uniformemente ao redor do furo como mostra a Figura 18 A. No entanto, apresenta limitações porque não considera a área danificada [27].

Para alternativa, o fator de delaminação bidimensional tem já em conta a área de delaminação, mas apresenta limitação em situações com fissuras longas, como ilustra a Figura 18 C [28].

Como melhoria, foram propostos o fator de delaminação ajustado e o de delaminação equivalente. Estes têm por objetivo superar as limitações dos anteriores, mas apresentam limitações quando ocorrem microfissuras, como mostra a Figura 18 D [29], [30].

Recentemente, foi desenvolvido o fator de delaminação tridimensional, que considera o volume acumulado das camadas que sofreram delaminação. Este apresenta um avanço comparado com os anteriores, mas não tem em conta o comprimento máximo de fissura [31].

Todos estes fatores foram desenvolvidos para controlar a delaminação, quantificar a área danificada e avaliar o dano causado. Em futuras pesquisas é necessário aprimorar a avaliação da delaminação, tendo em conta a gravidade do dano, como a área e a profundidade da delaminação bem como o comprimento e largura das fissuras criadas [25].

A Figura 18 ilustra quatro exemplos de delaminação ocorridos em furação e as siglas utilizadas nas equações da Tabela 6.

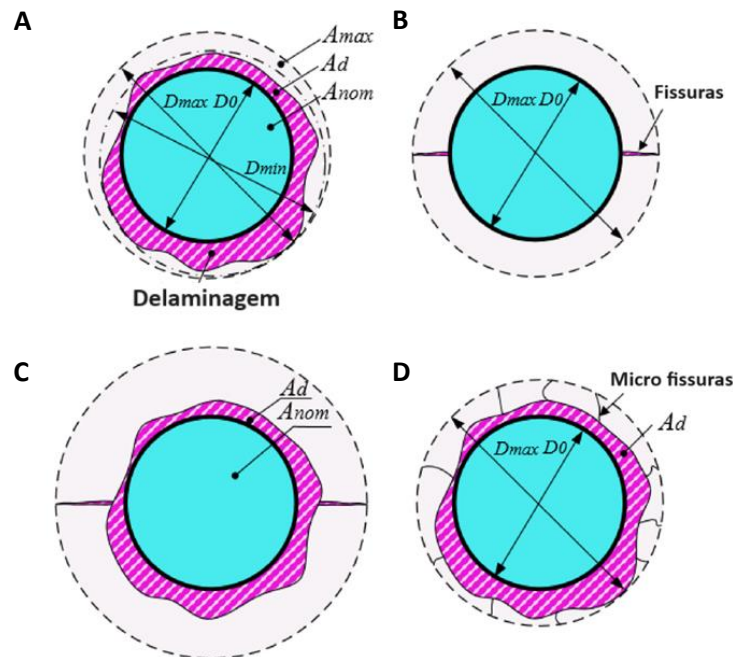


Figura 18 - Dano de delaminação: A - dano uniforme, B – fissuras, C - dano com fissuras, D - dano com microfissuras (D); adaptado de [25]

Para legendar a Figura 18: D_0 ou D_{nom} significa o diâmetro do furo; o D_{min} entende-se por o diâmetro da circunferência menor que abrange toda a delaminação, não sendo concêntrica com a circunferência de diâmetro D_0 ; D_{max} representa o diâmetro da circunferência que abrange toda a área delaminada; A_d como a área de delaminação e A_{nom} como a área do furo.

2.7. Ligações coladas e ligações por fusão

O objetivo da maquinagem e da furação mais especificamente nos materiais compósitos, é a de criar uma ligação que não seja definitiva, ou seja, uma ligação reversível. No entanto, há ligações que não o são. É o caso das ligações coladas e por fusão, utilizadas em materiais compósitos.

As ligações coladas definem-se pela junção de dois substratos através de um adesivo. Tomam várias aplicações, sendo a mais exigente, a indústria aeronáutica. Este tipo de ligação permite uma distribuição de cargas mais uniforme, promove o amortecimento, veda e isola termicamente. Geralmente é um processo mais económico e rápido que outras ligações. No entanto, este tipo de ligação necessita de limpeza e tratamento prévio da superfície. A cura poderá ter de ser feita em forno ou autoclave, o que limita o tamanho dos substratos. Esta ligação é de difícil inspeção e sensível a fatores externos. Existem outras desvantagens sendo a mais crítica o carácter definitivo desta ligação.

As ligações por fusão são um tipo de ligação exclusivo dos materiais compósitos de matriz termoplástica. Esta matriz caracteriza-se pelo facto de quando sujeita a temperatura, não se

decompõe comparativamente à termoendurecível. Por isso, é necessário a aplicação de pressão e temperatura de maneira que o polímero se difunda pela interface dos substratos a ligar. Tem por vantagens a similaridade dos materiais do substrato e da junta porque não há adição de material. Esta ligação apresenta boa ductilidade, durabilidade e é facilmente reparável. Tem por principais desvantagens o facto de ser uma ligação exclusiva a compósitos de matriz termoplástica e a necessidade de fornecer calor e pressão no processo de ligação [2].

2.8. Ensaios não destrutivos

Os ensaios não destrutivos, ou END, são particularmente importantes na avaliação e caracterização dos materiais. Estes tipos de ensaios são característicos pela sua natureza não destrutiva, ou seja, a sua implementação não acarreta qualquer tipo de dano ao material em estudo. Os materiais compósitos, devido à sua natureza e à presença de diferentes fases na sua constituição, podem ser avaliados e caracterizados através destes ensaios. Algumas dos END mais utilizados nestes materiais são os ultrassons, a termografia, a radiografia, emissão acústica, entre outros. Na redação deste relatório, serão abordados os de maior interesse para o trabalho realizado em seguida.

2.8.1. Radiografia

A radiografia utiliza radiação ionizante para realizar ensaios não destrutivos. Para inspecionar materiais compósitos, existem dois tipos de radiação: a radiação X e a radiação gama. O princípio básico desta ferramenta é o de distinguir partes da peça analisada que têm propriedades de absorção de radiação distintas. Assim, é formada uma imagem que é o resultado das alterações causadas pelos diversos componentes do material na radiação. Por isso, são detetados descontinuidades e danos no material [32].

A radiografia mais utilizada é a de radiação X. Esta divide-se em radiografia convencional e melhorada. A convencional utiliza apenas o feixe de radiação para analisar as peças. No entanto, na radiografia melhorada são aplicados líquidos, denominados de contraste, para realçar as imagens radiográficas. Estes líquidos podem ser de origem orgânica ou inorgânica e ajudam na deteção de falhas de pequenas dimensões que não estejam à superfície do material em análise. Nos materiais compósitos, devidos aos diferentes constituintes que os compõem, é difícil obter um bom contraste. Por isso, recorre-se à radiação X de baixa energia, com potência entre os 10kV e os 50kV [33].

Associado a este ensaio, existem vários aspetos em a ter em conta. Este método destaca-se pela sua capacidade de detetar delaminações. No entanto, a orientação do feixe de radiação é fundamental porque esta pode influenciar a deteção de danos. A existência de variações de densidade no material também é importante porque estas são também identificadas. Através da radiografia é possível avaliar a qualidade da fabricação do material como defeitos nas fibras, espaços vazios e outros danos que comprometam a integridade do material. A espessura do material a analisar deve ser tida em conta.

A radiografia convencional é mais eficaz quando as peças têm uma espessura moderada, nem muito finas nem muito espessas. Para peças finas, com 1 a 5 mm, é utilizada a radiografia de baixa voltagem. No entanto a radiografia com raios gama é aconselhável para peças mais espessas porque este tipo de radiação tem um comprimento de onda mais curto [34].

Este END é utilizado nos materiais compósitos para avaliar a qualidade da produção, para identificar defeitos e danos internos. Também é utilizado para estudar o comportamento dos materiais durante ensaios mecânicos destrutivos. Por exemplo, foi utilizado um sistema de radiografia com radiação X com 450 kV de potência para estudar a deformação de um projétil de chumbo de 9 mm e um alvo de fibra de vidro E reforçada com epóxido. Com este estudo, foi possível determinar a espessura ideal de penetração de radiação X neste material, caracterizar os padrões de deformação do projétil e os danos no alvo. As imagens obtidas pela radiografia e as deformações dos materiais foram comparadas com valores de simulação numérica e os resultados foram muito satisfatórios [35].

2.8.2. Tomografia computadorizada (CT-scan)

A tomografia computadorizada por radiação X, tem registado um crescimento na sua utilização enquanto técnica para ensaio não destrutivo. Esta técnica permite a reconstrução tridimensional da peça. Os materiais compósitos caracterizam-se pela sua heterogeneidade de constituintes e a avaliação dos danos presentes no interior dos mesmos é de difícil compreensão. Por isso, a imagem 3D permite analisar e avaliar a evolução dos defeitos existentes e assim garantir a integridade estrutural.

Esta técnica baseia-se na reconstrução computacional de uma imagem 3D, obtida pelos feixes de radiação feita a partir de vários ângulos de uma peça. O contraste da imagem obtida resulta das alterações sofridas pelo radiação X ao atravessar o material. Proporciona imagens nítidas e claras sobre a fabricação e a degradação do material, com detalhes em várias escalas. É possível analisar desde a peça como um todo até às fibras do material [36].

Esta técnica tem vindo a ser desenvolvida e é cada vez mais utilizada nos materiais compósitos. Na produção de compósitos entrançados em 3D (*3D braided*), os vazios na sua estrutura são inevitáveis. Por isso, foi desenvolvido um método de análise com o objetivo de investigar os danos neste tipo de material. Através de *machine learning*, de imagens de tomografia computadorizada e da análise dos danos, foi possível reconstruir com sucesso este tipo de compósito à microescala. Este método permitiu criar modelos 3D do material e determinar a os danos existentes nas fibras e na matriz. Foi então provado que este método fornece informações válidas para a análise dos materiais compósitos entrançados em 3D [37].

2.8.3. Ultrassons

O ensaio por ultrassons é uma técnica de análise não destrutiva usada para avaliar vários tipos de materiais, incluindo os compósitos. A partir desta técnica é possível detetar defeitos internos que não seriam visíveis por inspeção visual, sem causar danos ao material. Os defeitos mais

comuns nos materiais compósitos são a rotura de fibras, as inclusões, a fissuração da matriz e a delaminação.

Este método baseia-se na incidência de ondas sonoras de alta frequência, entre os 20 kHz até aos GHz, no material a analisar. Devido a danos ou defeitos no material, parte das ondas sonora são refletidas de volta para o transdutor e as restantes continuam a propagar-se. Através da análise da energia que é refletida e recebida pelo transdutor, é possível determinar a localização, a profundidade e a dimensão das irregularidades. Devido às propriedades dos materiais compósitos, aplicam-se frequências entre os 1 e os 5 MHz.

Num estudo e dissertação recentes, os ultrassons foram utilizados para analisar materiais compósitos de matriz polimérica. Para este estudo, foram produzidos dois tipos de laminados. Inicialmente produziu-se laminados com defeitos, como furos e inclusões e foram utilizadas diferentes brocas e diferentes inclusões. Foi depois produzido outro tipo de laminado sem defeitos, e este foi sujeito a danos mecânicos provocados por impacto e flexão. Todos os laminados foram analisados por ultrassons e foi possível identificar e caracterizar os diferentes danos existentes. Este trabalho destaca a importância desta técnica na caracterização de defeitos nos compósitos, contribuindo para a melhoria da qualidade e segurança desses materiais em aplicações estruturais [38].

2.8.4. TeraHertz

Esta técnica de END resume-se na incidência de ondas eletromagnéticas no material a analisar. Estas ondas situam-se entre os 300 GHz e os 3 THz, com comprimentos de onda entre 1 mm e 100 μm .

Esta técnica caracteriza-se por utilizar radiação não ionizante em detrimento das ionizantes, como a radiação X. Assim garante a segurança do operador e a sua utilização em materiais ou amostras biológicas. Os Terahertz demonstram eficácia na penetração de materiais não condutores, como cerâmicos e plásticos, sendo um ponto muito favorável a esta técnica. No entanto, não apresentam bom desempenho em materiais condutores ou líquidos polares, como a água, porque a radiação é refletida ou absorvida respetivamente. Dependendo do ponto de vista, esta característica pode ser benéfica ou prejudicial. A presença de um destes elementos será facilmente notável no resultado do ensaio, detetando por exemplo metal ou água no material analisado.

Os Terahertz têm sido aplicados em diversas áreas, como a inspeção de materiais compósitos, possibilitando a deteção de defeitos e a avaliação da sua integridade estrutural, na medicina e em dispositivos de segurança [39]. Esta técnica tem sido utilizada nomeadamente em materiais compósitos para uso militar, como por exemplo, componentes para a aeronáutica e para equipamentos de defesa. Estes componentes são utilizados em situações extremas e é necessária a sua total integridade estrutural. Por isso, recorrem à análise de TeraHertz para avaliar e detetar os defeitos intrínsecos do material sem o danificar. Além da crescente utilização desta, estão a ser desenvolvidos sistemas e técnicas de imagem de TeraHertz específicas para aplicações militares, com o objetivo de melhorar a precisão e a eficiência desta inspeção [40].

2.8.5. Análise e tratamento de imagem

No seguimento do trabalho em que este relatório se baseia, as imagens obtidas por radiografia serão analisadas e tratadas com recurso a um programa desenvolvido no software *MatLab*[®] pelo coorientador deste trabalho. Este software será utilizado para converter as imagens radiográficas em imagens binárias composta por pixéis pretos e brancos. A esta imagem, é aplicado um *threshold*, que tem por função definir o valor a partir do qual cada pixel toma o valor de 1 ou 0. Por isso, é formada a imagem binária a preto e branco, em que 0 equivale a preto e 1 equivale a branco. Posteriormente, é selecionada a fronteira entre os pixéis da zona danificada e da não danificada. A partir deste ponto, o programa calcula os valores do perímetro, da área do furo, da área do dano, raio da circunferência envolvente ou outros parâmetros geométricos que sejam entendidos como úteis [4].

2.9. Ensaios destrutivos

Os ensaios destrutivos são realizados com o objetivo de avaliar as propriedades mecânicas e estruturais dos materiais. Estes são também utilizados nos materiais compósitos. Os ensaios mais utilizados para estes materiais são o de tração, compressão, flexão e corte. Serão descritos no seguimento deste subcapítulo.

2.9.1. Ensaio de Tração

Os ensaios de tração são principalmente aplicados a compósitos unidirecionais com orientação das fibras a 0 e 90°. Neste ensaio são determinados o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson e a resistência à tração. Este está regulamentado pelas normas ASTM D 3039M-17 [41]. Esta regulariza o ensaio de tração tradicional e a norma ASTM D 5766M-23 estabelece o mesmo ensaio para provetes com um furo no centro ou na sua extremidade [42]. A Figura 19 (A) exhibe um ensaio de tração a um provete de material compósito, enquanto a (B) representa o esquema de um provete com furo para ensaio de tração.

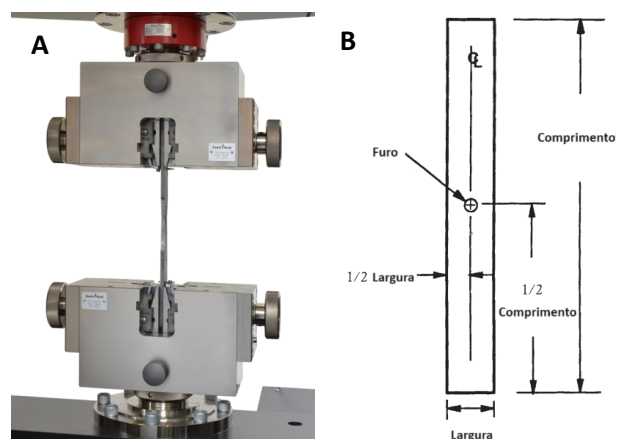


Figura 19 – A - Ensaio de tração a material compósito [43], B - Esquema de provete com furo para ensaio de tração; adaptado de ASTM D 5766M-23 [42]

2.9.2. Ensaio de Flexão

Os ensaios de flexão são muito utilizados nos materiais compósitos devido à simplicidade dos procedimentos e dos equipamentos necessários. O objetivo deste ensaio é determinar o módulo de elasticidade à flexão. Existem dois tipos de ensaios de flexão: o de três pontos e o de quatro pontos. Esta diferença baseia-se no número total de suportes e de pontos de carga. Destes dois, o de quatro pontos é o mais vantajoso porque cria um momento fletor constante e sem corte transversal na zona entre os pontos de aplicação da força [2]. Este ensaio está estabelecido e regulamentado pela norma ASTM D 790-17 [44] e pela norma ISO 14125:1998 [45]. A Figura 20 representa o ensaio de flexão de três e quatro pontos respetivamente.

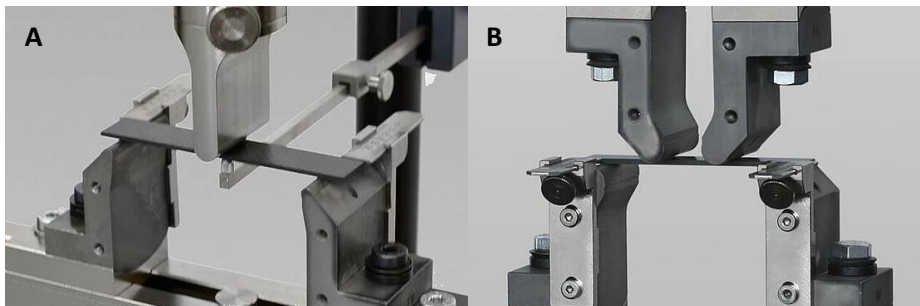


Figura 20 – A - Ensaio de flexão em 3 pontos, B - Ensaio de flexão em 4 pontos [46]

2.9.3. Ensaio de Compressão

A determinação da resistência à compressão tem-se revelado um dos problemas mais complicados no estudo dos materiais compósitos. Isto deve-se ao fenómeno de encurvadura que acontece durante este ensaio. Existem duas variantes a este ensaio: o ensaio de compressão com aplicação de força frontal e com aplicação de força por cisalhamento. Estes estão regulamentados segundo as normas ASTM D 695-23 [47] e segundo a ISO 14126:2023 [48] ou ASTM D 3410M-16 [49], respetivamente. Para melhorar este ensaio e os seus resultados foram desenvolvidos dispositivos de suporte e guias para os provetes para colmatar o fenómeno de encurvadura. A Figura 21 ilustra dois dispositivos desenvolvidos para este efeito segundo normas diferentes.

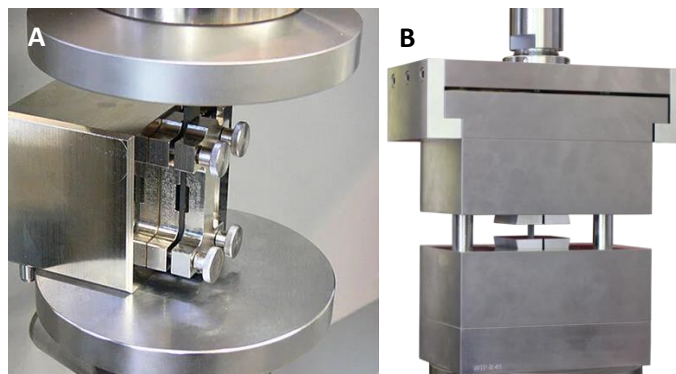


Figura 21 – A - Ensaio de compressão por força frontal [50]; B - Ensaio de compressão por cisalhamento: dispositivo de compressão com execução IITRI [51]

2.9.4. Ensaio de Corte

O ensaio de corte é um método importante para determinar a resistência ao corte, aplicado em materiais compósitos. Através da aplicação de carga que provoca o cisalhamento e a deslizamento entre camadas, é possível entender o comportamento do material.

Os ensaios de corte possuem uma limitação, uma vez que não conseguem gerar um estado de corte puro em um volume de material suficientemente representativo. Existem vários métodos normalizados, mas nenhum é universalmente aceite devido a esta limitação. Por isso, serão abordados dois tipos de ensaios de corte: o ensaio de corte em calha e o ensaio IOSIPESCU.

O ensaio de corte em calha está normalizado segundo a norma ASTM D 4225M-20 [52]. Esta norma propõe duas configurações para os ensaios. São elas em calha dupla e em calha tripla, como ilustra a Figura 22.

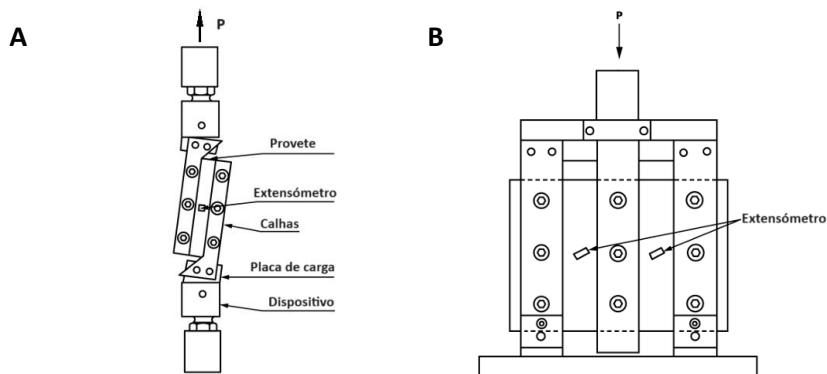


Figura 22 – Ensaio de corte ASTM D 4255M-20: A - calha dupla, B - calha tripla; adaptado de [52]

O ensaio IOSIPESCU é realizado para determinar características de alguns materiais quando sujeitos a uma solitação de corte. Para laminados compósitos, este está normalizado pela norma ASTM D 5379M-19. Para realizar este ensaio, é necessário recorrer a um dispositivo que entalha duplamente o provete, através de cunhas. A carga é aplicada sobre o pino de alinhamento [53]. A Figura 23 representa o ensaio IOSIPESCU e o dispositivo utilizado para a realização do mesmo.

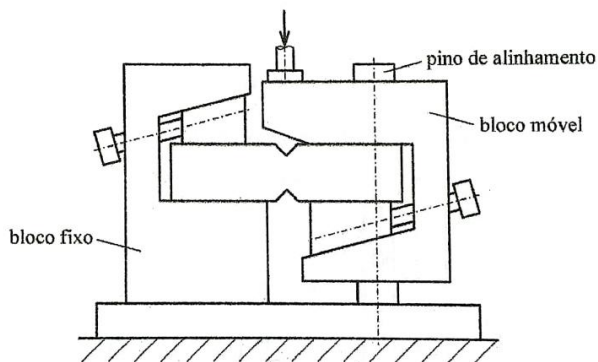


Figura 23 – Ensaio IOSIPESCU ASTM D 5379M-19 [2]

2.9.5. Ensaio Bearing

O ensaio Bearing é realizado com o objetivo de avaliar a resistência Bearing de juntas aparafusadas ou com um pino, em compósitos multidirecionais de matriz polimérica. Na realização do ensaio, a força é exercida através de um pino inserido no furo que está ligado por um dispositivo à máquina de ensaios. Deste modo, a região abaixo do pino está a sofrer tração, enquanto a região acima sofre compressão. A partir desta dualidade de tensões exercidas no material é possível determinar o comportamento deste e obter a tensão máxima que este suporta. Este ensaio está regulamentado pela norma ASTM D5961/D5961M – 17 e a Figura 24 ilustra um esquema do provete para o ensaio Bearing.

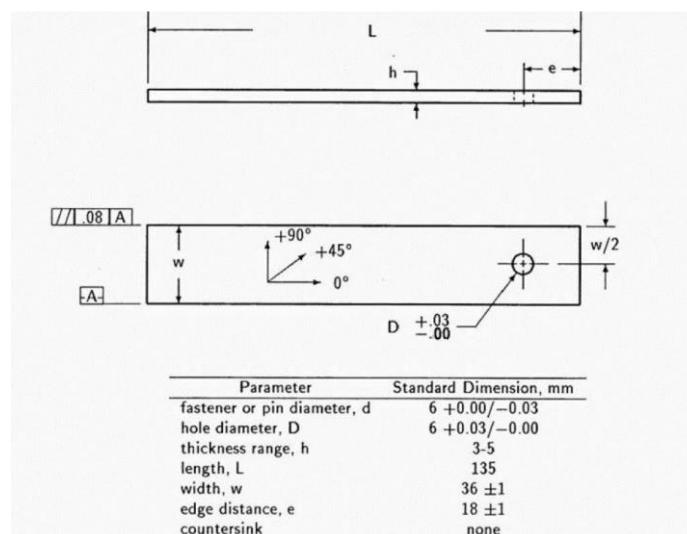


Figura 24 – Esquema do provete para ensaio Bearing (procedimento A) [54]

2.10. Método de Taguchi

O método de Taguchi foi desenvolvido pelo engenheiro e estatístico Genichi Taguchi. Este é um método de controlo da qualidade centrado no projeto do produto e do processo, que se tornou popular por permitir melhorias significativas na qualidade do produto com uma relação custo-benefício atrativa. Tem como principal objetivo minimizar a variabilidade dos resultados.

Na sua aplicação, o planeamento das experiências é feito através de matrizes ortogonais. Deste modo, é feita a análise de múltiplos fatores com o menor número possível de experiências. Assim é possível otimizar os custos e o tempo para obter resultados favoráveis [55].

Cada experiência corresponde a uma combinação específica de níveis de fatores controláveis e é repetida para diferentes condições das variáveis não controláveis. Os resultados permitem identificar os fatores que mais afetam a variabilidade e definir valores de modo a minimizá-la.

Este método considera uma função-perda que é uma função de custo associada ao desvio entre o valor da característica da qualidade e o correspondente valor-alvo. Por esta função, são calculados quociente SN (sinal-para-ruído).

Revisão Bibliográfica

Para o implementar, é necessário identificar o problema, selecionar as características a melhorar e identificar os fatores de controlo e os de ruído. Obtido o planeamento das experiências, passa-se à realização da componente experimental e à obtenção de resultados através de ANOVA (análise de variância). Daqui resulta a configuração ideal dos fatores considerados [56].

3. Métodos e Aplicação

Neste capítulo, é descrito o procedimento experimental implementado. Começa-se por descrever o fabrico do material seguido pela implementação do método de Taguchi. A partir deste é possível avançar para o corte e identificação dos provetes. São mencionados depois as brocas e o plano de furação é descrito. Por fim, abordam-se as análises e os ensaios realizados bem como os equipamentos utilizados.

3.1. Fabrico do compósito

As placas de material compósito foram produzidas com um pré-impregnado do fabricante HEXCEL[®], EUA. Este é composto por fibras de carbono AS4 12K (HexTow[®]) e resina de epóxico 8552 (HexPly[®]). O pré-impregnado tem um volume nominal de fibras de 57 %.

Foram produzidas quatro placas de laminado e cada uma foi constituída por doze camadas de pré-impregnado. Estas foram empilhadas de forma simétrica e equilibrada. O laminado produzido foi do tipo *cross-ply*, e o alinhamento das fibras foi o seguinte: $0^{\circ}, 90^{\circ}, 0^{\circ}, 90^{\circ}, 0^{\circ}, 90^{\circ}/90^{\circ}, 0^{\circ}, 90^{\circ}, 0^{\circ}, 90^{\circ}, 0^{\circ}$. O corte das camadas e o empilhamento do laminado foi realizado nas instalações do INEGI.

Ao fim do empilhamento das placas, estas foram curadas numa prensa hidráulica de pratos quentes desenvolvida pela Gislótica, Portugal, situada no Laboratório de Materiais Compósitos (LMC), no ISEP, ilustrada na Figura 25. Em cada processo, foi possível curar duas placas de cada vez. A cura foi realizada segundo as informações dadas pelo fornecedor do material. Estas informações podem ser consultadas no Anexo A.



Figura 25 – A - prensa hidráulica de pratos quentes; B - disposição das placas na prensa

As placas produzidas tinham uma dimensão de cerca de 300 mm de largura e de comprimento e de 2,2 mm de espessura.

3.2. Planeamento experimental

Inicialmente houve um debate de ideias entre o autor e o orientador de maneira a balizar e estruturar o que seria o trabalho numa maneira global.

Por isso, para avaliar o efeito da furação nos materiais compósitos, e tendo em conta a informação recolhida na pesquisa bibliográfica, foram escolhidos os principais parâmetros da furação. Escolheu-se então o avanço, a velocidade de corte e o tipo de broca a utilizar. A estas características atribuíram-se dois níveis possíveis. Para o avanço estabeleceu-se os valores de 0,05 e de 0,2 mm por rotação. A escolha destes valores baseou-se na pesquisa bibliográfica, na análise de dissertações e artigos científicos da área realizada anteriormente. Estes valores estão dentro de uma gama de valores aceitáveis de furação para o material compósito e a partir dos quais são previsíveis resultados satisfatórios. Para a velocidade de corte, os valores de 500 e 2000 rotações por minuto. Para o tipo de broca, escolheu-se furação com broca bidiametral ou escalonada e furação através de furo piloto com recurso a duas brocas helicoidais. As brocas escolhidas são capazes de furar material compósito e estão dentro de uma gama que tem vindo a ser avaliada neste tipo de estudo.

De seguida, foi escolhido o tipo de ensaios a realizar aos provetes após a furação. Para o ensaio não destrutivo não houve qualquer dúvida uma vez que a análise por radiografia já estava dinamizada e o uso desta técnica já vinha na sequência de trabalhos anteriores. Para o ensaio destrutivo, foram considerados dois ensaios: o Bearing e o Pin-Bearing. Estes são semelhantes, mas foi escolhido o ensaio Bearing porque se assemelha mais com situações reais e neste é possível analisar o comportamento do material numa ligação aparafusada ou com um pino.

3.3. Método de Taguchi

Depois de definidas as variáveis, avançou-se para o método de Taguchi, com o objetivo de este fornecer inicialmente as matrizes ortogonais com as diferentes configurações segundo os fatores requeridos e numa fase final a análise estatística dos resultados. Para isso, recorreu-se ao *software* Minitab®.

Como fatores de controlo e *inputs* temos o tipo de broca, a velocidade de corte e o avanço. A cada uma destas características foram definidos dois níveis, como está descrito no subcapítulo anterior. Associado a isto temos também um fator de ruído que definimos como sendo o desgaste da broca. É possível existirem outros, mas este consideramos o mais relevante. Como *outputs* do plano experimental e dados importantes para o *software* numa fase mais avançada, consideramos o fator de delaminação e os valores de tensão máxima obtidos pelo ensaio mecânico.

Através do *software*, foi criado uma DOE (planeamento de experiência) para o método de Taguchi e obtivemos dois planos diferentes. Um é mais simples, apenas com quatro configurações dos fatores de controlo, o que resulta num espaço amostral de quatro, ilustrado de seguida.

↓	C1-T	C2	C3
	Geometria	Avanço	Velocidade
1	2 Diâmetros	0,05	500
2	2 Diâmetros	0,20	2000
3	Furo Piloto	0,05	2000
4	Furo Piloto	0,20	500

Figura 26 – Planeamento de experiência simples (Minitab®)

No entanto, para a análise estatística realizada posteriormente, um espaço amostral de quatro foi considerado muito reduzido. Por isso, foi elaborado outro DOE, desta vez com todas as configurações dos fatores possíveis, o que resultou num espaço amostral de oito, como ilustra a seguinte figura.

↓	C1-T	C2	C3
	Geometria	Avanço	Velocidade
1	Furo Piloto	0,05	500
2	Furo Piloto	0,05	2000
3	Furo Piloto	0,20	500
4	Furo Piloto	0,20	2000
5	2 Diâmetros	0,05	500
6	2 Diâmetros	0,05	2000
7	2 Diâmetros	0,20	500
8	2 Diâmetros	0,20	2000

Figura 27 – Planeamento de experiência completo (Minitab®)

Uma vez que a quantidade de material disponível era considerável, optou-se por avançar com o planeamento completo, mesmo que este não fosse o mais simples e económico em termos de material. No entanto, como consideramos o desgaste da broca como o fator de ruído, tivemos de repetir o planeamento para verificar e comprovar os resultados obtidos.

3.4. Corte das placas

O corte das placas de laminado foi realizado no LMC, no ISEP. Foi feito segundo os ensaios determinados anteriormente. Estes estão regulamentados por normas e as dimensões dos provetes estão definidas. Por isso, com a ajuda do *software SolidWorks®*, foram feitos alguns esboços com a distribuição de provetes sobre uma placa de laminado. A opção mais satisfatória foi uma na qual era possível extrair doze provetes para o ensaio Bearing e dois provetes para o ensaio de tração, como ilustra a seguinte figura.

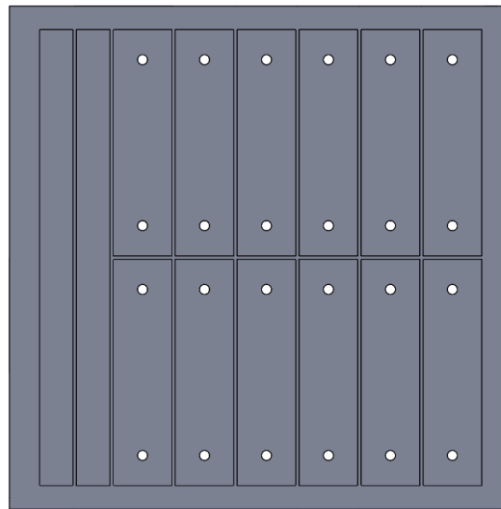


Figura 28 – Esboço para corte das placas

Obtivemos então 48 provetes divididos em dois planos de furação: o inicial e a repetição do mesmo, o que nos deixou com 24 provetes para cada plano. Como temos oito configurações de furação, conseguimos três provetes para cada configuração de fatores.

3.5. Identificação dos provetes

Para avançar com a furação, foi necessário identificar cada um dos provetes para os distinguir ao longo do trabalho futuro. De antemão, realizar-se-ão dois furos em cada extremidade dos provetes destinados ao ensaio Bearing, por isso a codificação criada permitiu identificar um total de 96 furos.

A codificação criada foi a seguinte: $X-YY.Z.S_T.P$

Em que:

- X - Plano experimental: 1º ou 2º plano
- YY - Tipo de broca: FP (furo piloto) ou BI (bidiametral)
- Z – Avanço da broca: 1 (0,05 mm/rot) ou 2 (0,2 mm/rot)
- S – Velocidade de corte: 1 (500 rpm) ou 2 (2000 rpm)
- T - Letra da placa para igual configuração: A, B ou C
- P - Posição do furo: T (Top) ou B (Bottom)

Temos então dois exemplos como demonstração:

- $1-FP.1.1_A.T$ - placa do 1º plano, furação com broca furo piloto, com avanço de 0,05 mm/rot, velocidade de 500 rpm, placa A, furo superior.
- $2-BI-2.2_C.B$ - placa do 2º plano, furação com broca bidiametral, avanço de 0,2 mm/rot, 2000 rpm, placa C, furo inferior.

3.6. Brocas

Os furos realizados têm um diâmetro nominal de 6 mm. Por isso, para realizar as furações foram usadas três brocas diferentes: uma bidiametral com referência 850.037.00, duas helicoidais com referência 701.024.000 e 701.060.000. Estas caracterizam-se como brocas de metal duro. As helicoidais têm um ângulo de ponta de 118°, uma com 2,4 mm e outra com 6 mm de diâmetro. Já a bidiametral tem um ângulo de ponta de 140°, o seu diâmetro inicial é de 3,7 mm e apresenta um revestimento de TiAlN (titânio-alumínio-nitreto). Todas foram fornecidas pela InovaTools®, Alemanha e as suas informações estão descritas no Anexo C. A imagem seguinte ilustra os dois tipos de brocas usadas.



Figura 29 – A - Broca bidiametral [57]; B - Broca helicoidal [58]

3.6.1. Razão de diâmetros das brocas helicoidais

Para a realização do furo piloto, foi necessário determinar o diâmetro nominal da broca mais pequena. No entanto, a razão de diâmetros das brocas helicoidais utilizadas não foi arbitrária.

A razão entre os diâmetros das brocas foi determinada segundo a seguinte equação [59].

$$\xi = \frac{2b}{d} \quad (4)$$

Sabe-se que quanto maior o valor de ξ , menor será a força de avanço necessária para a seguinte furação, porque quanto maior o furo piloto, maior será a quantidade de material retirada. Ou seja, no furo seguinte a quantidade de material a retirar é menor o que tem como consequência uma menor força de avanço. No entanto deve haver um equilíbrio entre os diâmetros das brocas que realizam o furo piloto e o furo completo para justificar a utilização deste tipo de furação.

Foi por isso considerada uma razão ξ de 0,4 e um diâmetro nominal (d) de 6 mm. Obteve-se assim um diâmetro ($2b$) de 2,4 mm para a broca do furo piloto.

3.7. Plano de furação

Os furos apresentam um diâmetro nominal de 6 mm. A escolha do diâmetro prendeu-se no facto de este ser um requisito para o ensaio Bearing. Para a furação tivemos disponíveis quatro brocas de cada tipo. Com a intenção de avaliar o impacto do desgaste da broca, foram realizados dois furos em cada provete, um com a broca nova e outro com a broca desgastada. Isto resulta que cada broca foi utilizada para furar seis provetes, num total de doze furos. Os seis primeiros foram realizados com a broca nova no topo do provete e os restantes com a

broca desgastada no fundo do provete. A figura seguinte ilustra o posicionamento do furo no provete para ensaio Bearing.

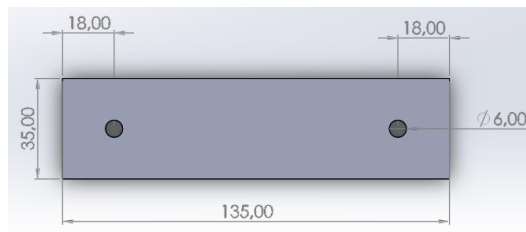


Figura 30 – Esboço de provete para ensaio Bearing com dois furos [54]

Para imprimir um maior desgaste às brocas entre estes furos, cada broca realizou 34 furos numa placa de sacrifício com 3,5 mm de espessura.

Inicialmente uma broca realizou seis furos no topo de cada provete. Ao fim destes furos, cada broca sofreu um desgaste equivalente, realizando 34 furos numa placa de sacrifício do mesmo material com 3,5 mm de espessura. Este procedimento repetiu-se para todas as brocas utilizadas. Depois de uniformizado o desgaste das brocas, cada uma realizou um furo no fundo de cada provete. No segundo plano, que consiste na repetição do primeiro, este procedimento repetiu-se. Como foi descrito anteriormente, definiram-se dois níveis para o avanço: 0,05 e 0,2 mm/rotação. Para a velocidade de corte 500 e 2000 rotações por minuto.

A furação dos provetes foi realizada no centro de maquinagem de controle numérico por computador VF-2, do fabricante HAAS®, EUA. Este equipamento encontra-se no Laboratório de Tecnologia Mecânica (LTM), no ISEP. As informações desta máquina estão descritas no Anexo B.

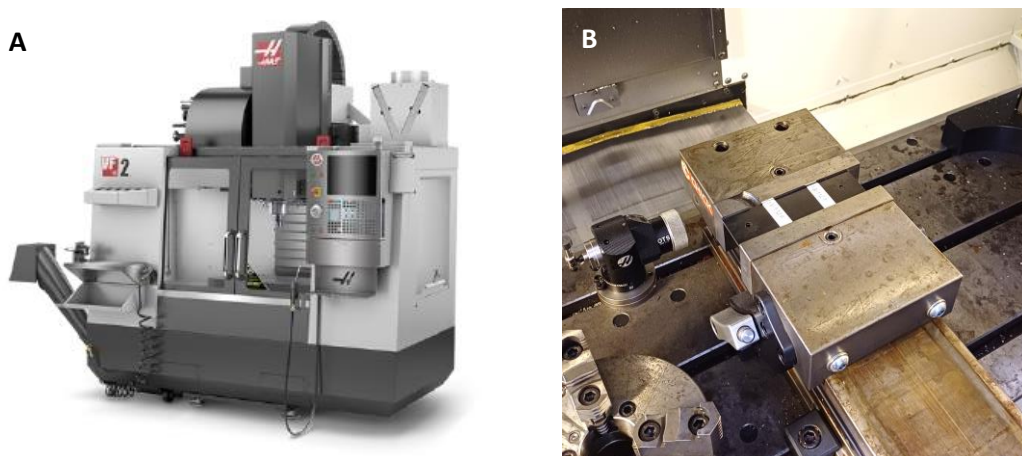


Figura 31 – A - Centro de maquinagem HAAS VF-2 [60]; B - Provet no centro de maquinagem

Os dois planos de furação elaborados e realizados estão documentados no Apêndice A. Neles é possível analisar todos os furos realizados pela sua codificação e os parâmetros de furação de cada um.

3.8. Radiografia

Ao fim das furações, procedeu-se à análise de radiografia com contraste todos os furos criados. Esta tem por objetivo identificar a extensão do dano na periferia do furo. Com esta técnica é possível analisar toda a profundidade do furo, uma vez que a imagem resultante é uma projeção num plano de todos os danos. Esta análise foi realizada nas instalações da FEUP.

Para realçar os danos do furo, recorreu-se a um banho dos provetes num líquido contrastante durante dez minutos, de maneira que os furos estivessem submersos na totalidade. O líquido utilizado foi Di-iodometano $\geq 99.4\%$ estabilizado, produzido pela AnalAR NORMAPUR®, França. As informações deste estão descritas no Anexo D.

Após a submersão dos provetes no líquido contrastante, deu-se início à realização das radiografias com o equipamento intraoral de radiação X X-MIND DC, fabricado pela SATELEC ACTEON®, França. Utilizou-se em conjugação o sensor digital de radiografia RVG 5100, produzido pela Kodak®, EUA. O tempo de exposição dos provetes à radiação foi de 0,16 segundos. A figura seguinte ilustra o *setup* para a análise de radiografia. As informações destes equipamentos estão descritas nos Anexos E e F.



Figura 32 – *Setup* para análise de radiografia

Em todas as análises, foi utilizado um arame para que fosse possível identificar qual a orientação da imagem. A imagem produzida pela radiografia, foi guardado no formato .bmp (*Windows Bit Map*), pois este formato garante que a qualidade da imagem não seja alterada ou deteriorada. Outro aspeto importante é que este formato permite tratar os pixéis como uma matriz, o que é vantajoso para o processamento posterior através do software *MatLab*®. Na figura seguinte é possível visualizar duas imagens obtidas por radiografia com danos distintos.

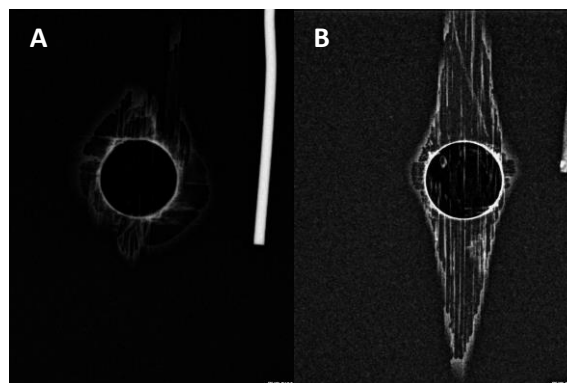


Figura 33 – Imagens de radiografia: A - dano reduzido; B - dano de grandes dimensões

3.9. Análise de imagem

Para a análise das imagens produzidas pela análise de radiografia, recorreu-se a um *script* de *MatLab*[®] desenvolvido pelo coorientador desta dissertação. Através deste, é possível quantificar o dano causado pela furação em cada furo. Temos como principais *outputs* do programa a área do furo, a área do dano, o raio da circunferência envolvente do dano e a dimensão dos lados de um quadrado que inclua todo o dano causado. É possível determinar mais características do dano através do processamento de imagem com este *software*. No entanto, para esta dissertação, determinou-se que estes seriam os mais importantes e eram os que iam mais de encontro com os objetivos.

Para executar o programa, o primeiro passo é o de introduzir o ficheiro de imagem da radiografia. Este ficheiro é uma imagem em escala de cinzentos, em que cada pixel assume um valor entre 0 e 255 [61].

Esta é recortada de modo a reduzir o tempo de processamento através da seleção de dois vértices de um quadrado que incluam toda a região do dano, como ilustra a Figura 34 A. Esta será convertida para uma imagem binária composta por pixéis pretos e brancos, como ilustra a Figura 34 B. Os pixéis na imagem binária assumem o valor de 0 (preto) e 1 (branco). No entanto, para haver esta conversão de uma imagem de escala de cinzentos para binária, é necessário atribuir um valor a partir do qual estes passam de 0 para 1. A este valor dá-se o nome de *threshold* [62]. Quanto maior for este valor, maior será a quantidade de pixéis pretos presentes na imagem. O *script* desenvolvido tem uma funcionalidade que determina este valor automaticamente. No entanto, existem casos em que este valor não está correto e é necessário determiná-lo manualmente. Para isto, recorre-se a um processo de iteração sensível, chegando às décimas da milésima para o valor de *threshold*. Estas iterações prendem-se no facto de que para avançar com a análise, é necessário que haja uma circunferência completa formada por pixéis na imagem binária.

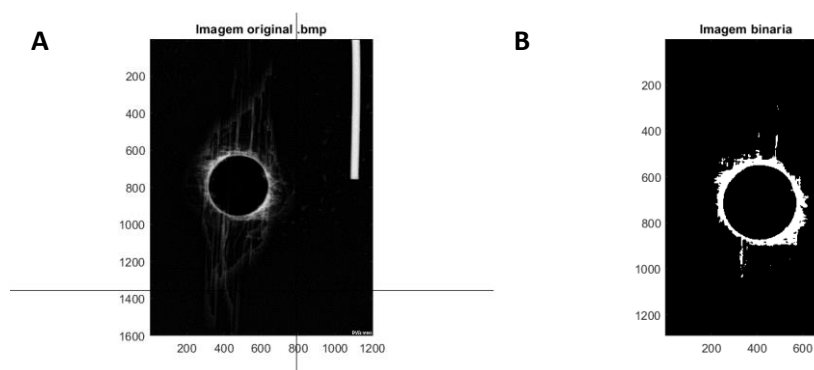


Figura 34 – A - Imagem original de radiografia; B - imagem binária

Depois de definido o *threshold*, manual ou automaticamente, é necessário selecionar primeiro a fronteira interior do furo e de seguida a fronteira do dano com o restante material, como ilustra a Figura 35.

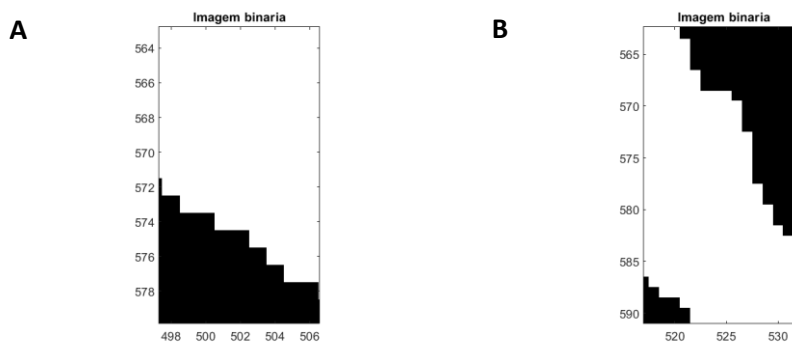


Figura 35 – Seleção de pixéis: A - fronteira do furo; B - fronteira do dano

Depois da seleção de pixéis, o programa gera uma imagem binária da área total do furo em adição com a do dano, como ilustra a seguinte imagem.



Figura 36 - Resultado da análise de imagem; Área total (furo + dano)

Por fim, é gerado um ficheiro Excel com os dados da análise de imagem em pixéis. É possível depois calcular a área de dano através de conversão de pixéis para mm^2 , porque um pixel corresponde a $0,00034375 \text{ mm}^2$ [7].

3.10. Ensaios mecânicos

Nesta dissertação foram realizados dois ensaios mecânicos: o ensaio de tração e o ensaio Bearing. Estes ensaios são do tipo destrutivo, e tal como o seu nome indica, foram realizados na última fase do trabalho experimental. Através do de tração, foi possível determinar o módulo de elasticidade do material e a tensão máxima de rotura. Pelo ensaio Bearing, é possível determinar a tensão de esmagamento do material através de uma união aparafusada ou por um pino. Para os ensaios mecânicos, recorreu-se à máquina de ensaios disponível no Laboratório de Ensaios Tecnológicos (LET), situado no ISEP. A máquina em questão foi a AG-X Plus 100 kN do fabricante Shimadzu®, Japão.

Para realizar os ensaios mecânicos foi necessário colar, nos provetes *tabs* metálicos através de juntas adesivas. O adesivo utilizado foi a ARALDITE 420-A/B fabricado pela Huntsman Corporation®, EUA. Este é um adesivo epóxico de dois componentes e a sua mistura é feita na proporção de 0,4 partes de catalisador para 1 parte de resina. Este apresenta uma elevada

resistência ao cisalhamento e ao descolamento e é aconselhável para situações exigentes em que está sujeito a elevadas tensões, como é o caso em questão.



Figura 37 – Adesivo ARALDITE 420-A/B [63]

Os *tabs* garantem que não há escorregamento do provete, uma vez que criam uma secção com maior espessura e são feitos de um material que proporciona mais atrito entre o provete e o dispositivo de ensaio. A seguinte imagem ilustra os ensaios mecânicos e os *setups* utilizados.

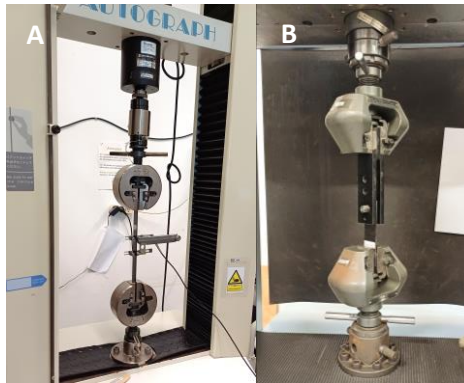


Figura 38 – A - ensaio de tração; B - ensaio Bearing

3.11. Análise do desgaste da broca

A última fase do trabalho experimental, foi analisar o desgaste das brocas com o objetivo de qualificar o desgaste das arestas cortantes da broca. Foi realizada no Laboratório de Metalografia (LMET), no ISEP O objetivo principal não foi o de quantificar o desgaste, mas sim qualificá-lo e compará-lo entre as várias brocas. Era esperado que todas as brocas tivessem um desgaste semelhante, porque todas realizaram o mesmo trabalho em corte. Todas realizaram doze furos nos provetes e 34 furos na placa sacrificial, o que resulta em 145,4 mm de distância percorrida em trabalho.

Através de um microscópio ótico e de uma câmara fotográfica foi possível obter imagens ampliadas da superfície e das arestas cortantes de todas as brocas. O microscópio permitiu uma ampliação de x20,16 (0,63x32). A Figura 39 representa o *setup* para a análise por microscópio das brocas e a posição destas para a respetiva análise. Recorreu-se a plasticina para colocar a broca na posição ideal de maneira que não houvesse reflexão de luz contra a lente e fosse visível a zona preferencial de análise.

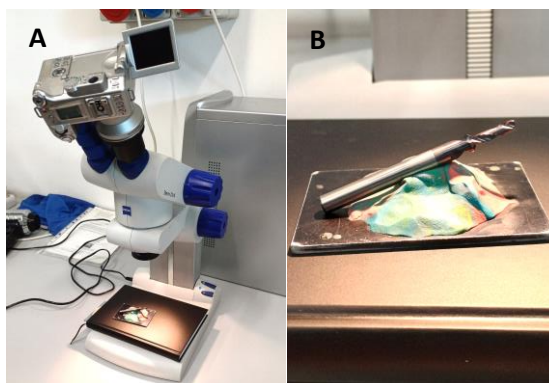


Figura 39 – A - Setup para análise por microscópio ótico; B - broca sobre plasticina

No entanto, foi utilizado outro método para analisar o desgaste da broca. Recorreu-se a um microscópio digital, o DinoCapture 2.0 do fabricante Dino-Lite Digital Microscopes®, EUA, com o objetivo de analisar a broca de uma vista de topo. Assim foi possível visualizar com mais detalhe a superfície de topo e as arestas cortantes. A imagem seguinte ilustra o *setup* utilizado para a análise através do microscópio digital.

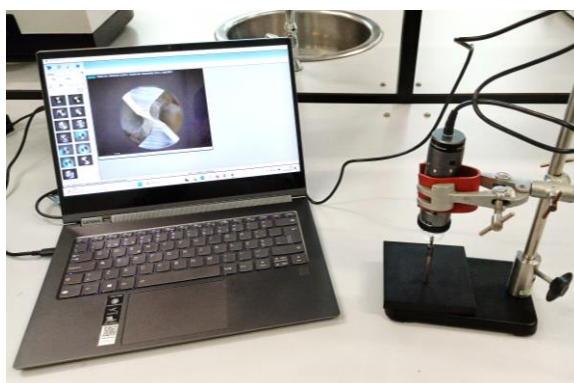


Figura 40 – Setup para análise por microscópio digital

4. Resultados e Discussão

Neste capítulo serão descritos os resultados obtidos dos ensaios realizados. Inicialmente serão apresentados os resultados do ensaio de tração para caracterizar o material. De seguida, serão descritos os valores obtidos por radiografia e os fatores de delaminação calculados. Depois, serão apresentados os resultados dos ensaios Bearing. Os resultados são analisados e comparados entre si. O desgaste da broca é também um ponto discutido e por fim, o método de Taguchi valida os resultados e comprova as conclusões.

4.1. Apresentação de resultados

4.1.1. Ensaio de tração

Os resultados de maior interesse para esta dissertação são os obtidos pela análise de radiografia, os do ensaio Bearing e os do ensaio de tração.

Para determinar o módulo de elasticidade do material em estudo, foram selecionados quatro dos oito provetes dedicados. Estes foram ensaiados à tração a uma velocidade de 1 mm/min até a um valor de 8 kN de força. De seguida, alterou-se a velocidade para 2 mm/min e o ensaio prosseguiu até à rotura destes. Assim foi possível determinar as duas propriedades pretendidas com o número mínimo de ensaios.

Tabela 7 – Propriedades do compósito em estudo

Provete	Módulo de Elasticidade, E (GPa)	Tensão máxima de rotura, R _m (MPa)
1.1	62,694	827,700
1.2	-	1029,726
2.1	66,672	879,793
2.2	-	909,753
3.1	68,488	1023,887
3.2	-	1047,183
4.1	68,358	1065,713
4.2	-	987,734
Média	66,553	971,436
Desvio padrão	2,340	82,085

Durante a cura do primeiro par de placas, a fase de arrefecimento foi interrompida porque a prensa abriu antes do tempo indicado. Esta questão foi rapidamente resolvida, mas este incidente levou a que o arrefecimento fosse mais acelerado do que devia. Voltou-se a fechar a prensa e reiniciou-se o processo, mas se houve algum dano no laminado este era irreversível. Ao fim de realizados os ensaios mecânicos, é possível analisar que os provetes 1.1, 1.2, 2.1 e 2.2 apresentam propriedades de menor valor, tanto para módulo de elasticidade como para tensão

máxima de rotura. Estes provetes correspondem ao par de placas cuja cura foi interrompida. No decorrer do trabalho, esta diferença de propriedades não foi notória, mas este ponto deve ser referido.

4.1.2. Análise por radiografia

A análise de radiografia permitiu quantificar os danos causados pela furação. Através de tratamento de dados, foi possível chegar aos seguintes resultados. A totalidade dos resultados obtidos por radiografia estão no Apêndice B. Estes foram tratados no MatLab®, convertidos para unidades de comprimento e de área e estão representados nas seguintes tabelas.

Tabela 8 – Médias de valores para configuração de furação com broca Furo Piloto

	Perímetro (mm)	Área furo (mm ²)	Área dano (mm ²)	Raio circ. env. (mm)	Lado1 env. furo (mm)	Lado2 env. furo (mm)
FP 0,05x500	22,256	28,227	1,312	3,695	5,999	5,970
FP 0,05x2000	19,601	28,456	0,759	3,388	6,005	6,001
FP 0,2x500	24,971	28,566	1,552	4,305	6,043	6,001
FP 0,2x2000	21,501	28,547	1,097	3,967	6,036	6,021
Média	22,082	28,449	1,180	3,839	6,021	6,003

Tabela 9 - Médias de valores para configuração de furação com broca Bidiametral

	Perímetro (mm)	Área furo (mm ²)	Área dano (mm ²)	Raio circ. env. (mm)	Lado1 env. furo (mm)	Lado2 env. furo (mm)
BI 0,05x500	24,424	28,248	1,694	4,299	5,989	5,999
BI 0,05x2000	20,677	28,365	1,154	3,732	6,012	5,992
BI 0,2x500	25,133	28,492	1,832	4,621	6,032	6,038
BI 0,2x2000	21,001	28,571	1,121	4,001	6,034	6,034
Média	22,809	28,419	1,450	4,164	6,016	6,016

Pela análise dos valores médios calculados entre brocas, os furos com broca FP apresentam valores mais satisfatórios principalmente na área e no raio da circunferência envolvente do dano. Estes apresentam valores menores o que caracteriza um dano menor.

Com os valores obtidos pelas radiografias, é possível agora calcular o fator de delaminação. Inicialmente foi escolhido o fator de delaminação tridimensional (F_v), no entanto, para a sua aplicação é necessário identificar a camada do laminado em que ocorre a delaminação. Para isso, seria necessário utilizar outro método para o ensaio não destrutivo no qual fosse possível reconstruir tridimensionalmente o laminado. Para obter estes dados, a análise implementada seria a tomografia computadorizada. Na impossibilidade de realizar esta análise, foi escolhido o fator de delaminação equivalente (F_{ed}), estando a equação para o seu cálculo na Tabela 6, no subcapítulo 2.6.

Resultados e Discussão

Os valores de F_{ed} foram calculados a partir dos valores da área do dano e da área nominal do furo. A partir deste fator é possível avaliar a quantidade de delaminação que ocorreu entre as camadas do laminado. O seu valor mínimo é 1 e isto ocorre quando não existe dano, por isso, quanto maior for o dano, maior será o valor do fator delaminação e o contrário também é válido. Os valores de F_{ed} calculados são apresentados na seguinte tabela.

Tabela 10 - F_{ed} para cada configuração de furação

	F_{ed}	Desvio padrão
FP 0,05x500	1,0228	0,0159
FP 0,05x2000	1,0133	0,0071
FP 0,2x500	1,0271	0,0051
FP 0,2x2000	1,0192	0,0042
BI 0,05x500	1,0294	0,0146
BI 0,05x2000	1,0202	0,0098
BI 0,2x500	1,0318	0,0163
BI 0,2x2000	1,0284	0,0236

A Figura 41 e a Figura 42 representam os gráficos de F_{ed} de cada uma das brocas, com os respectivos desvios padrão assinalados pela escala vermelha.

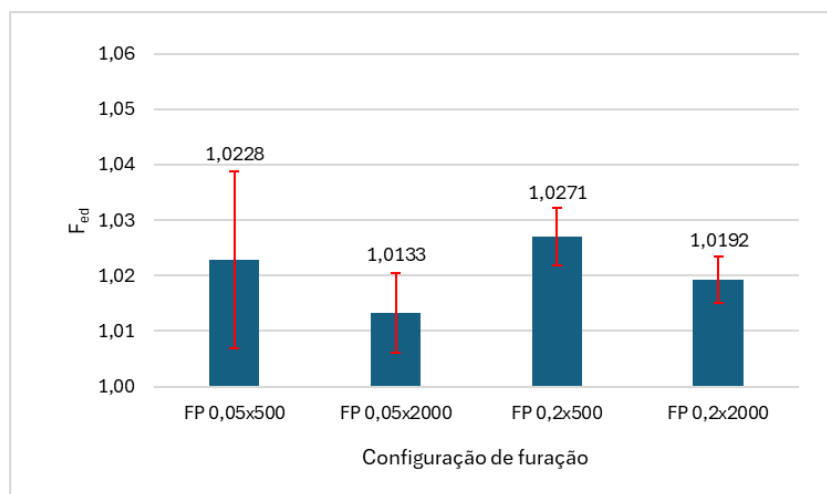


Figura 41 – Gráfico do F_{ed} para broca FP

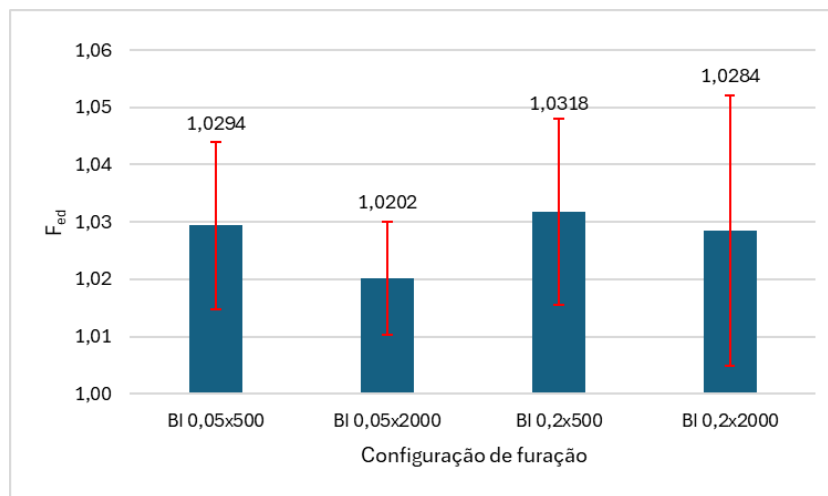


Figura 42 - Gráfico do F_{ed} para broca BI

Pela análise destes gráficos, é possível concluir que uma velocidade de rotação maior e um avanço menor causam menos dano, com a velocidade de rotação maior comum nos dois melhores casos.

Da conjugação destes para ambas as brocas, resulta que a configuração que tem um maior fator de delaminação é a que apresenta um avanço elevado e uma velocidade de rotação baixa. Por outro lado, a que apresenta um menor fator de delaminação é a que apresenta um avanço lento e uma velocidade de rotação elevada.

4.1.3. Ensaio Bearing

O ensaio Bearing foi realizado nos 48 provetes a ele dedicados. Destes provetes, metade foram ensaiados no furo feito por uma broca nova. A outra metade foram ensaiados no furo feito por uma broca desgastada. Este ensaio procura saber a tensão máxima que o furo suporta antes da rotura, dando origem a um gráfico, como exemplifica a Figura 43.

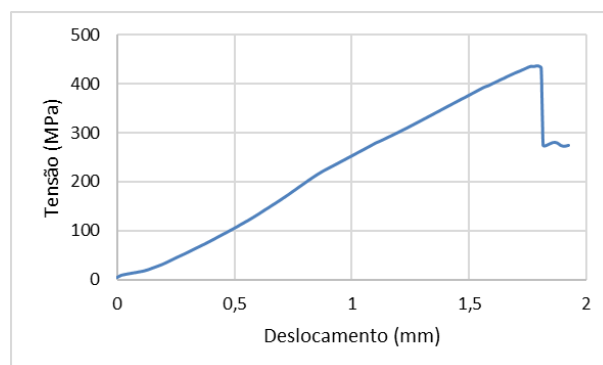


Figura 43 – Exemplo do gráfico obtido através do ensaio Bearing

Para cada configuração de furação estavam disponíveis 6 provetes. Por isso, foram calculados os valores médios de tensão e desvio padrão para cada conjunto de provetes. Os dados obtidos por este ensaio estão descritos na seguinte tabela.

Tabela 11 – Resultados do ensaio Bearing

	Tensão média (MPa)	Desvio padrão
FP 0,05x500	411,27	20,84
FP 0,05x2000	415,04	14,93
FP 0,2x500	378,61	25,26
FP 0,2x2000	408,35	15,60
BI 0,05x500	406,53	24,44
BI 0,05x2000	415,06	34,28
BI 0,2x500	381,86	19,99
BI 0,2x2000	395,42	20,24

A partir dos resultados do ensaio Bearing podem-se retirar os valores de tensão. Neste caso, estes estão interligados ao dano do provete, porque um provete com uma maior delaminação entre as suas camadas, irá suportar um menor esforço quando solicitado. Por isso, quanto maior a tensão registada, menor seria o dano que este provete teria, dano este que está relacionado com a furação prévia.

Para visualizar os resultados, foi elaborado um gráfico para cada tipo de broca com os respetivos valores de tensão bem como os desvios padrão. Estes estão ilustrados nas Figura 44 e Figura 45.

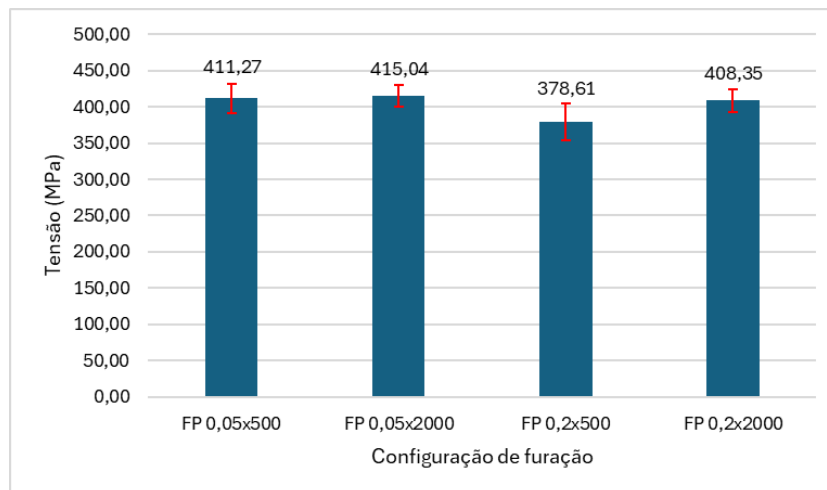


Figura 44 - Gráfico do ensaio *Bearing* da broca Furo Piloto

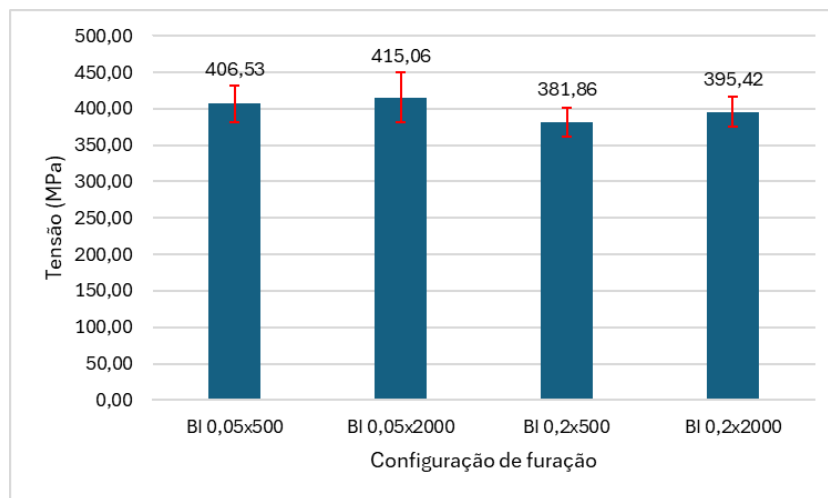


Figura 45 - Gráfico do ensaio *Bearing* da broca Bidiametral

Pela análise dos gráficos resultantes do ensaio *Bearing*, é possível analisar que a configuração de furação que teve melhores resultados foi a de avanço lento e velocidade de rotação elevada, com o avanço menor comum nos dois melhores casos.

Da conjugação destes para ambas as brocas, resulta que a configuração que regista maior tensão é a que apresenta um avanço baixo e uma velocidade de rotação elevada. Por outro lado, a que regista menor tensão é a que apresenta um avanço elevada e uma velocidade de rotação baixa.

4.1.4. F_{ed} vs. *Bearing*

Para avaliar a relação entre estas duas características do material, foram construídos dois gráficos, um para cada tipo de broca. A cada valor de tensão obtido para cada furo pelo ensaio *Bearing*, é-lhe associado o respetivo valor de F_{ed} . Por isso, para cada broca temos representados no mesmo gráfico os valores dos furos feitos com as brocas novas e desgastadas. Neste caso o elemento coercivo é os dados do ensaio *Bearing*. Os gráficos seguintes ilustram a comparação descrita.

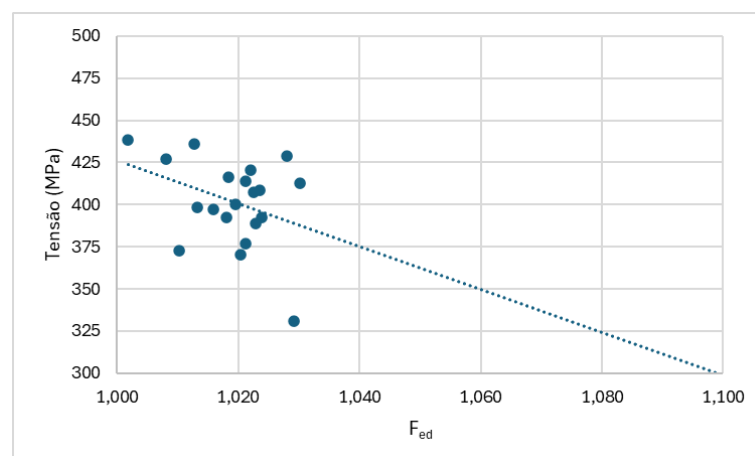


Figura 46 – Gráfico da Tensão vs. F_{ed} da broca FP

Resultados e Discussão

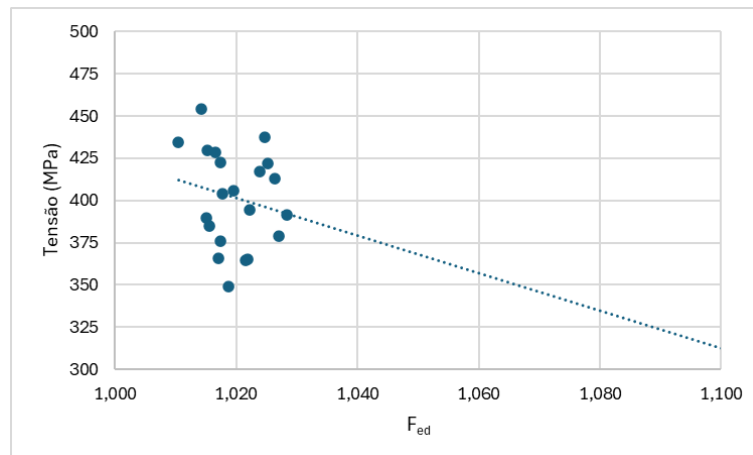


Figura 47 - Gráfico da Tensão vs. F_{ed} da broca BI

Pela análise dos gráficos acima ilustrados, é possível concluir que ambos apresentam uma linha de tendência com declive negativo. Ou seja, um aumento do valor de F_{ed} representa um decréscimo do valor de tensão registrado no ensaio Bearing.

Esta tendência é representativa das duas brocas e os resultados vão de encontro com o esperado. Um maior fator de delaminação representa um maior dano presente no material que por sua vez origina uma menor resistência deste às tensões que lhe são impostas.

Pela análise dos gráficos presentes nas Figura 46 Figura 47, é possível visualizar que todos os pontos estão muito dispersos. Estes têm, no entanto, uma linha de tendência com o declive negativo como era esperado, mas com uma correlação muito baixa. Para combater esta dispersão de valores e obter melhores resultados, era necessário aumentar o número de provetes disponíveis de modo a obter mais dados para analisar.

4.1.5. Broca nova vs. Broca desgastada

Com o objetivo de avaliar o efeito dos danos na broca, ao fim de um determinado número de furos, no resultado global da qualidade dos furos, os dados obtidos foram analisados de maneira diferente. Agora, distinguir-se-ão os furos que foram realizados no lado topo do provete dos furos do fundo do provete.

Consideramos a broca nova aquela que realizou os primeiros seis furos nos provetes no lado do topo. De seguida cada uma delas, foi sujeita a 36 furos numa placa sacrificial do mesmo material. Consideramos uma broca desgastada, a que executou os restantes 6 furos no lado do fundo do provete.

Os dados são os mesmos analisados anteriormente, mas agora de um ponto de vista diferente. Neste caso, a comparação é possível apenas para o fator de delaminação, porque os dados analisados do ensaio Bearing, já têm esta nuance intrínseca. Ou seja, no primeiro plano e na repetição deste, o ensaio foi realizado no furo feito com broca nova e no furo com a broca desgastada respetivamente. Por isso, não é possível fazer esta comparação para o ensaio destrutivo. Para o fator de delaminação, é possível porque todos os furos foram analisados por

radiografia, e uma vez que estão todos identificados, é possível fazer esta análise entre os estados da broca.

Então, os dados foram analisados e o resultado estão expressos no seguinte gráfico. Os resultados para o fator de delaminação desta análise para as brocas novas estão descritos de seguida.

Tabela 12 - F_{ed} para as brocas novas

	F_{ed}	Desvio padrão
FP 0,05x500	1,0101	0,0056
FP 0,05x2000	1,0083	0,0050
FP 0,2x500	1,0277	0,0041
FP 0,2x2000	1,0188	0,0034
BI 0,05x500	1,0181	0,0067
BI 0,05x2000	1,0135	0,0037
BI 0,2x500	1,0256	0,0025
BI 0,2x2000	1,0213	0,0041

A partir destes valores foi elaborado um gráfico para representar e ilustrar os mesmos, como mostra a seguinte figura.

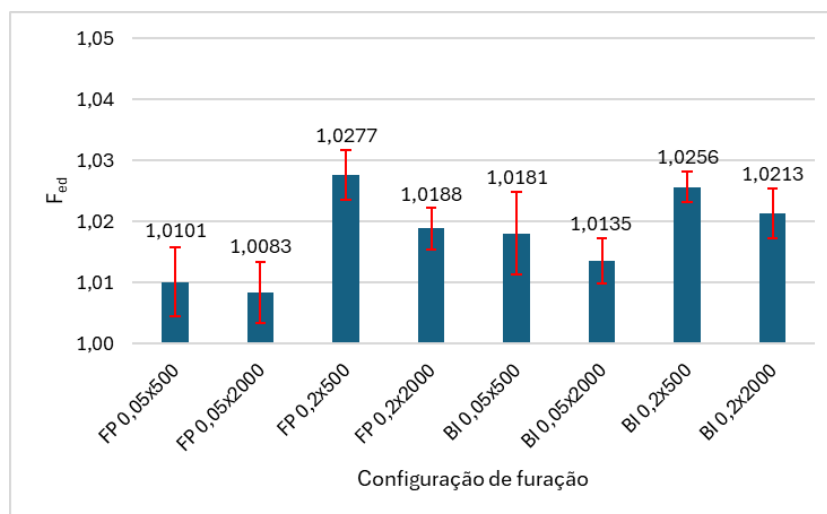


Figura 48 - F_{ed} para as brocas novas

Pela análise dos dados referidos na tabela e na figura acima, conclui-se que os resultados do fator de delaminação são semelhantes aos valores deste referidos no subcapítulo 4.1.2 para cada tipo de broca. Em concordância com o que foi dito anteriormente, os valores de F_{ed} são mais elevados para furos feitos com avanço elevado e baixa velocidade de rotação. Os desvios padrão associados a cada configuração de furação apresentam valores reduzidos, o que caracteriza furos semelhantes e pouco irregulares entre si. Como era de prever, a broca está em bom estado, o que permite furos de boa qualidade e com menor dano. De uma maneira

Resultados e Discussão

geral, os valores do fator de delaminação são baixos e a broca que tem os piores resultados é a broca bidiametral.

Os resultados para o fator de delaminação desta análise para as brocas desgastadas estão descritos de seguida.

Tabela 13 - F_{ed} para as brocas desgastadas

	F_{ed}	Desvio padrão
FP 0,05x500	1,0355	0,0124
FP 0,05x2000	1,0173	0,0060
FP 0,2x500	1,0265	0,0059
FP 0,2x2000	1,0196	0,0049
BI 0,05x500	1,0385	0,0128
BI 0,05x2000	1,0268	0,0096
BI 0,2x500	1,0394	0,0220
BI 0,2x2000	1,0356	0,0315

A partir destes valores foi elaborado um gráfico para representar e ilustrar os mesmos, como mostra a seguinte figura.

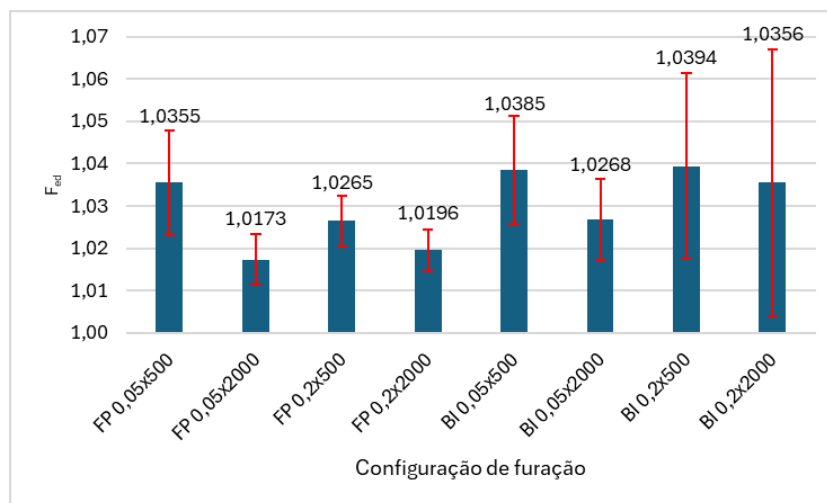


Figura 49 - F_{ed} para as brocas desgastadas

Neste caso, os resultados do fator de delaminação são semelhantes aos valores deste referidos no subcapítulo 4.1.2 para cada tipo de broca. Pela análise do gráfico, avanços lentos e velocidades de rotação elevadas promovem um F_{ed} menor. Neste caso, os valores do desvio padrão são mais elevados, o que caracteriza furos irregulares e com danos distintos entre si. O que significa que, e como expectável, brocas desgastadas promovem furações mais instáveis e com maior dano. De maneira geral, os valores do fator de delaminação são mais elevados que os da broca nova e a broca que tem os piores resultados é a broca bidiametral.

4.1.6. Análise do desgaste da broca

Através de um microscópio ótico e de um digital, foi possível observar o desgaste das brocas no topo e na aresta cortante das mesmas, com o objetivo de o qualificar. As brocas foram todas analisadas ao fim de concluírem todas as furações.

Pelo microscópio ótico obtiveram-se imagens da aresta cortante da broca enquanto pelo microscópio ótico obtiveram-se imagens do topo das brocas. A imagem ilustra uma broca helicoidal de 6 mm que fez furações com um avanço de 0,2 mm por rotação. Estava responsável por realizar o furo completo da furação com furo piloto.

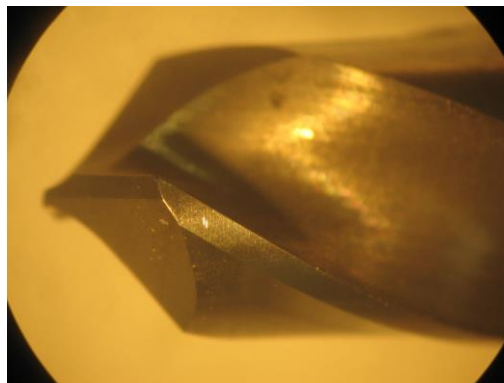


Figura 50 – Imagem obtida por microscópio ótico de broca de 6 mm

A partir da análise da imagem, é possível identificar desgaste na broca, nomeadamente sulcos perpendiculares ao eixo de rotação na aresta cortante. Na imagem acima, vêm-se zonas brilhantes resultante de reflexão da luz, nas quais são visíveis o desgaste em questão. Esta análise foi realizada a todas as brocas, sendo este o melhor exemplo de imagem para explicar o pretendido. Os resultados foram pouco conclusivos, no entanto foi possível observar que todas apresentavam desgaste.

Numa abordagem diferente e com recurso ao microscópio digital, obtiveram-se imagens de topo das brocas. A partir destas, é possível também analisar o desgaste que as brocas sofreram. Foram analisadas igualmente todas as brocas. Com este microscópio a ampliação é facilmente alterável. No entanto, para as broca de 2,4 mm a ampliação foi de cerca de 70x. Para as de 6 mm, a ampliação foi de cerca de 40x. A figura seguinte ilustra a análise realizada.

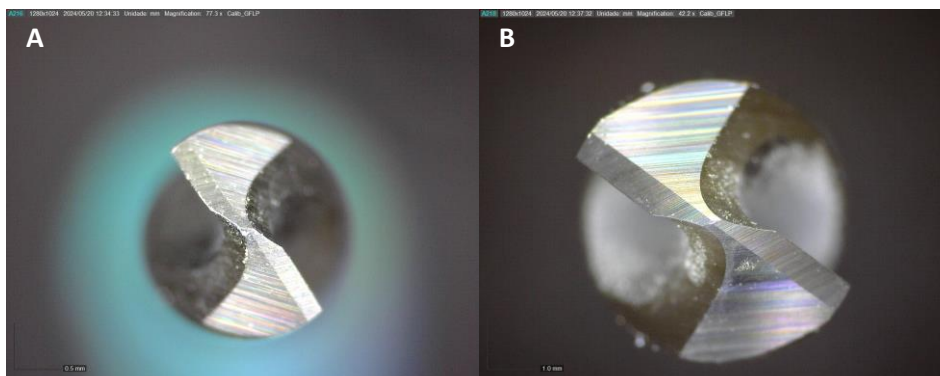


Figura 51 – Imagem obtida por microscópio digital: A - broca de 2,4 mm, B - broca de 6 mm

Resultados e Discussão

As imagens ilustradas acima são as que realizaram os furos piloto. Destas as que apresentavam maior desgaste foram as de menor diâmetro, as de 2,4 mm. Isto porque estas estão sujeitas a uma maior concentração de tensões especialmente na ponta da broca. As que fazem o segundo passo e furo completo de 6 mm não apresentam tanto desgaste porque não têm a sua ponta sujeita a qualquer tipo de tensão. Devido ao primeiro furo, a força axial a que esta está sujeita também é menor o que perfaz uma menor concentração de tensões, por isso menos desgaste. Neste caso, apenas a zona periférica do topo da broca está em contacto com o material. De todas as imagens recolhidas, foi possível analisar que as brocas mais desgastadas são as cujas furações foram realizadas com um avanço mais rápido. As visivelmente mais desgastadas são as de 2,4 mm.

As brocas bidiametrais também foram sujeitas a análise e o seus danos são visíveis. Nestas, as que apresentam maior dano são também as que realizaram furações com um avanço elevado. Para perceber o desgaste a que as brocas estão sujeitas, foi analisada uma broca nova deste tipo nova e comparada com uma broca desgastada. Esta comparação está ilustrada na seguinte figura.

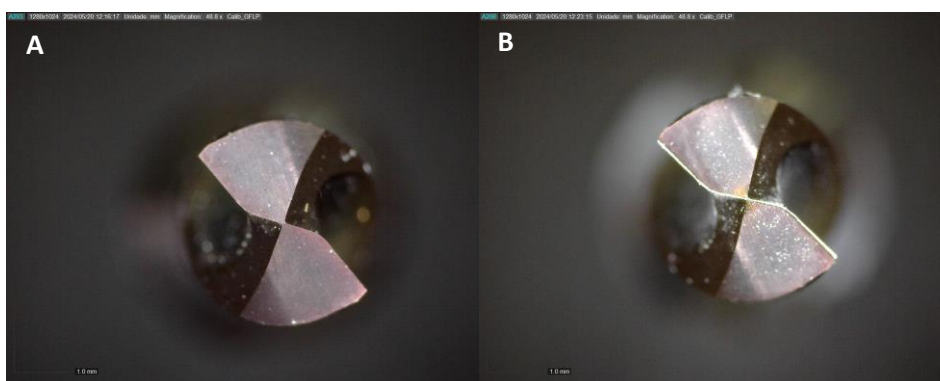


Figura 52 – Imagem obtida por microscópio digital: A - broca bidiametral nova, B – broca bidiametral desgastada

Pela análise da figura acima, consegue-se visualizar as diferenças de desgaste da broca nova e da desgastada. A aresta cortante de topo, está visivelmente danificada e é identificada por uma zona que reflete luz emitida pelo equipamento.

De forma geral, as brocas após as furações apresentam um desgaste considerável e visível. Pela análise das imagens e da comparação entre estas, as brocas que apresentavam mais desgaste foram as brocas que realizaram furações com os avanços mais elevados. Esta análise não foi conclusiva quanto ao dano causado por diferentes velocidades de rotação.

4.1.7. Análises pelo método de Taguchi

Por fim, concluiu-se a aplicação do método de Taguchi com o objetivo de validar os resultados e identificar a melhor configuração de furação. Com este método é possível também avaliar as interações que os diferentes fatores têm entre si e a significância que cada um deles representa para o resultado. Os dados de ensaio Bearing e do fator de delaminação foram analisados

separadamente. Para os do F_{ed} foi considerado o desgaste da broca como fator de ruído. Por isso foram inseridos os valores deste fator para a brocas novas e para as desgastadas.

Para analisar os resultados obtidos por este método, temos de identificar o melhor nível para cada fator de controlo. Através da razão S/R (sinal/ruído) identificam-se as configurações do fator de controlo que minimizam a variabilidade provocada pelo fator de ruído.

Na análise linear do modelo, são calculados vários coeficientes sendo o mais importante o fator-p. Este é calculado para cada fator de controlo e para as interações entre cada um destes fatores considerados. O fator-p determina a significância estatística de cada fator de controlo na resposta. Geralmente é-lhe atribuído um nível de significância α de 5%. Um nível de significância de 0,05 indica um risco de 5% de se concluir que existe uma significância quando na verdade não existe. Se o valor-p for menor ou igual ao nível de significância, é possível concluir que o fator em questão é significativo estatisticamente para a resposta. Se o valor-p for maior ou igual ao nível de significância, não é possível concluir que haja significância entre os envolvidos [64].

Num primeira instância analisaremos os resultados do método para o fator de delaminação e de seguida os do ensaio Bearing. Para a análise de F_{ed} , a razão escolhida para a razão S/R foi a de "menor é melhor", porque queremos minimizar a resposta do objetivo da experiência que neste caso são os valores de F_{ed} . Apesar de se ter considerado o quociente S/R "quanto menor melhor", a escolha dos níveis ótimos deve ser feita de forma que o valor de S/R seja máximo. Isto porque a minimização da função-perda está associada à maximização da razão S/R, portanto quanto maior o valor da razão, melhor. A próxima imagem representa a análise linear para as médias do fator de delaminação e para as razões S/R.

Coeficientes de Modelo Estimados para Médias				Coeficientes de Modelo Estimados para Razões S/R					
Termo	Coef	EP de Coef	T	P	Termo	Coef	EP de Coef	T	P
Constante	1,02391	0,000234	4366,507	0,000	Constante	-0,205302	0,001916	-107,136	0,006
Broca FP	-0,00343	0,000234	-14,641	0,043	Broca FP	0,029172	0,001916	15,223	0,042
Avanço 0,05	-0,00290	0,000234	-12,353	0,051	Avanço 0,05	0,024470	0,001916	12,769	0,050
Velocida 500	0,00376	0,000234	16,044	0,040	Velocida 500	-0,032056	0,001916	-16,728	0,038
Broca*Avanço FP 0,05	0,00023	0,000234	0,989	0,504	Broca*Avanço FP 0,05	-0,001955	0,001916	-1,020	0,494
Broca*Velocida FP 500	0,00071	0,000234	3,016	0,204	Broca*Velocida FP 500	-0,006144	0,001916	-3,206	0,192
Avanço*Velocida 0,05 500	0,00077	0,000234	3,295	0,188	Avanço*Velocida 0,05 500	-0,006743	0,001916	-3,519	0,176

Figura 53 – Análise linear para médias de F_{ed} e para razões S/R

Pela análise das tabelas contidas nas imagens acima, é possível concluir que para as médias do F_{ed} , a broca e a velocidade são significativas porque têm um fator-p menor que 0,05. No entanto, o menor valor é o da velocidade, por isso este fator de controlo é o mais significativo, seguido do tipo de broca. O avanço tem um valor de 0,051, o que o caracteriza não significativo, mas este valor está muito próximo do limite. Para as interações entre os fatores de controlo, todos apresentam um fator-p superior a 0,05 o que significa que estas não apresentam significância estatística para as médias calculadas para o F_{ed} . Para as razões S/R, os fator-p dos fatores de controlo são todos significativos para o resultado. Por outro lado, as interações entre estes não têm significância estatisticamente.

Para uma melhor interpretação destes resultados, o *software* elabora vários gráficos que estão ilustrados de seguida.

Resultados e Discussão

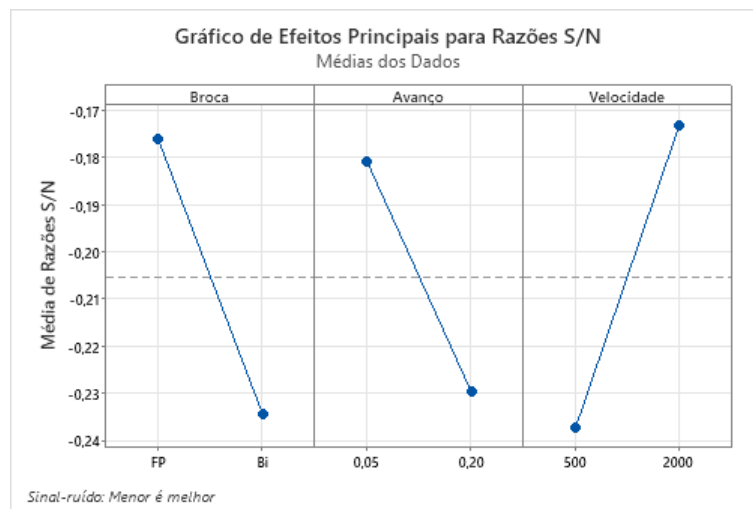


Figura 54 – Gráficos de efeitos principais para as razões S/R referentes ao F_{ed}

Como foi dito anteriormente, o objetivo é o de maximizar o valor da razão S/R. Por isso, a configuração que permite esta premissa é a furação com broca FP, com avanço de 0,05 mm/rot e uma velocidade de rotação de 2000 rpm.

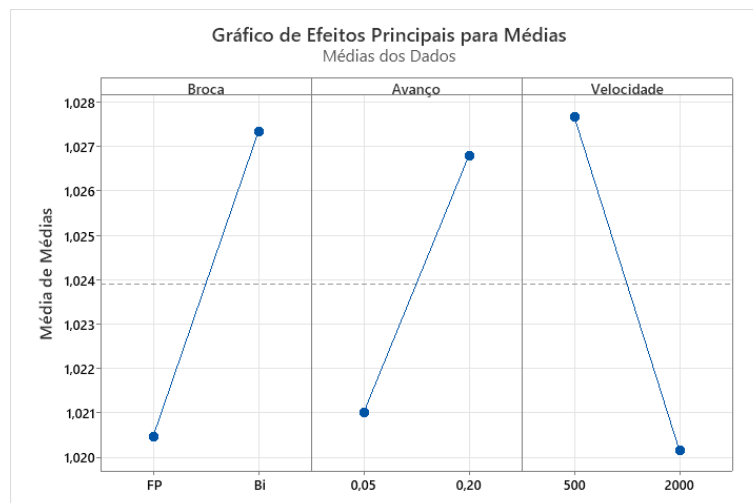


Figura 55 – Gráficos de efeitos principais para as médias referentes ao F_{ed}

Em relação às médias de F_{ed} , a configuração que permite que os valores do fator de delaminação sejam menores, corresponde à broca FP, com um avanço de 0,05 mm/rot e uma velocidade de rotação de 2000 rpm. A análise completa realizada pelo *software* Minitab para o fator de delaminação F_{ed} encontra-se descrita no Apêndice D.

Em relação ao ensaio Bearing, a análise do método baseia-se nos mesmos princípios. No entanto, neste caso não consideramos o desgaste da broca como fator de ruído. Neste caso, a razão escolhida para a razão S/R foi a de “maior é melhor”, porque queremos minimizar a resposta do objetivo da experiência que neste caso são os valores obtidos pelo ensaio Bearing. Do *software* resulta a seguinte imagem que contém a análise linear para as médias dos dados do ensaio e para as razões S/R.

Coefficientes de Modelo Estimados para Médias

Termo	Coef	EP	de Coef	T	P
Constante	401,783	2,284	175,941	0,004	
Broca FP	1,465	2,284	0,641	0,637	
Avanço 0,05	10,312	2,284	4,516	0,139	
Velocida 500	-7,095	2,284	-3,107	0,198	
Broca*Avanço FP 0,05	-1,367	2,284	-0,598	0,657	
Broca*Velocida FP 500	-2,175	2,284	-0,952	0,516	
Avanço*Velocida 0,05 500	4,139	2,284	1,813	0,321	

Coefficientes de Modelo Estimados para Razões S/N

Termo	Coef	EP	de Coef	T	P
Constante	52,0747	0,04976	1046,541	0,001	
Broca FP	0,0311	0,04976	0,624	0,645	
Avanço 0,05	0,2250	0,04976	4,522	0,139	
Velocida 500	-0,1555	0,04976	-3,125	0,197	
Broca*Avanço FP 0,05	-0,0290	0,04976	-0,582	0,664	
Broca*Velocida FP 500	-0,0475	0,04976	-0,954	0,515	
Avanço*Velocida 0,05 500	0,0932	0,04976	1,873	0,312	

Figura 56 - Análise linear para médias de ensaio Bearing e para razões S/R

Pela análise das tabelas contidas na imagem acima, é possível concluir que para as médias dos valores de tensão do ensaio Bearing, nenhum dos fatores de controlo têm um valor-p igual ou inferior a 0,05. As interações entre os fatores de controlo apresentam a mesma característica. Por isso, é possível afirmar que não apresentam qualquer significância para o resultado. Para as razões S/R, tanto os fator-p para os fatores de controlo como para as interações entre estes, apresentam todos valores superiores a 0,05. Isto significa que nenhum tem significância para o resultado. Para uma melhor interpretação destes resultados, o *software* elabora vários gráficos que estão ilustrados de seguida.

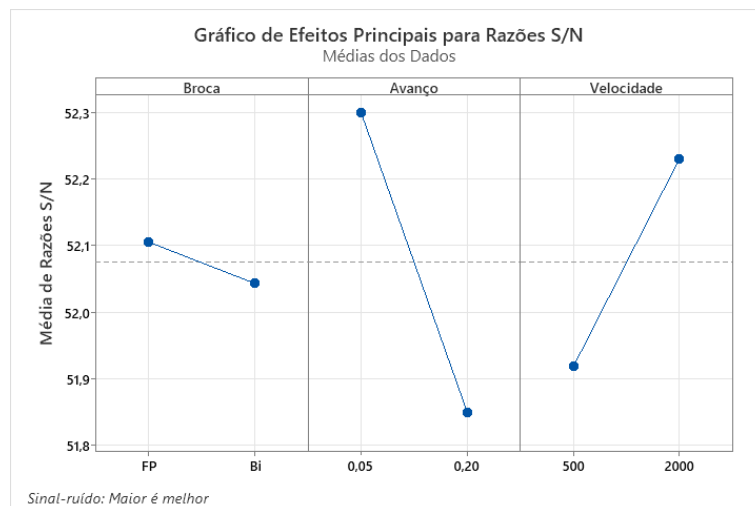


Figura 57 – Gráficos de efeitos principais para as razões S/R referentes ao ensaio Bearing

Como foi dito anteriormente, o objetivo é o de maximizar o valor da razão S/R. Por isso, a configuração que permite esta premissa é a furação com broca FP, com avanço de 0,05 mm/rot e uma velocidade de rotação de 2000 rpm.

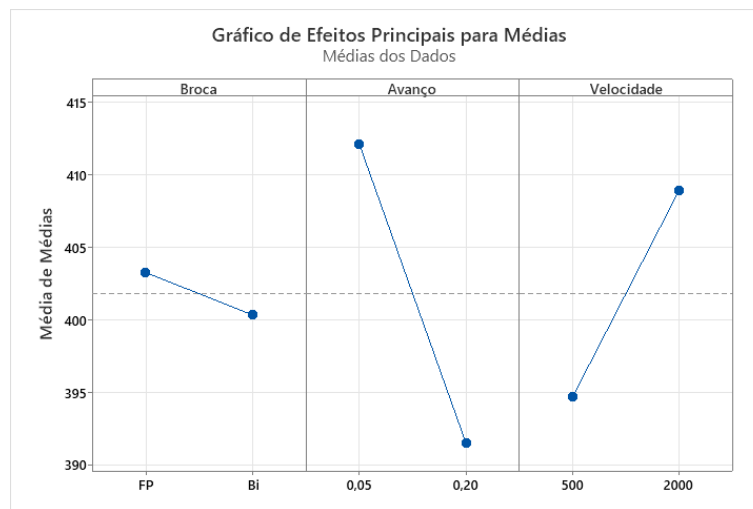


Figura 58 - Gráficos de efeitos principais para as médias referentes ao ensaio Bearing

Em relação às médias, a configuração que permite que os valores do ensaio Bearing sejam maiores, corresponde à broca FP com um avanço de 0,05 mm/rot e uma velocidade de rotação de 2000 rpm. A análise completa realizada pelo *software* Minitab para o ensaio Bearing encontra-se descrita no Apêndice E.

4.2. Discussão de resultados

No subcapítulo anterior foram apresentados os resultados, estes foram comentados e discutidos ao longo da sua descrição. No entanto, serão agora recapitulados. Os primeiros resultados apresentados foram os do ensaio de tração. Foram ensaiados 8 provetes e calculados os módulos de elasticidade e tensão máxima de rotura. Houve alguma diferença de valores entre provetes, no entanto esta situação é justificada pelo facto de o processo de cura ter sido interrompido previamente num conjunto de placas de laminado.

Após as furações, foram realizadas análises de radiografias aos 96 furos e os dados foram tratados e analisados. Numa primeira abordagem calculou-se o F_{ed} para cada configuração para cada tipo de broca, concluiu-se que a que causa menor delaminação é a FP. Para o ensaio Bearing, foram ensaiados 48 furos e os seus dados trabalhados. Do Bearing resultou que a broca que causa menos danos e consequentemente resiste a maior tensão de rotura é a FP. Destas duas análises, concluiu-se que uma velocidade de rotação elevada e um avanço lento resultam em resultados mais satisfatórios. Foram também comparados os valores calculados de F_{ed} com os valores de tensão do ensaio Bearing e elaborados gráficos. Estes caracterizavam-se com uma grande dispersão de valores, no entanto a linha de tendência obtida tinha um declive negativo como era esperado. A questão da furação com broca nova ou desgastada foi também comparada para o F_{ed} . Por isso, é possível afirmar que os valores do fator de delaminação são inferiores na furação com a broca nova do que com a desgastada. À broca desgastada estão associados também maiores desvios padrão que caracterizam uma furação mais irregular.

Todas as brocas utilizadas foram analisadas com recurso a microscópio ótico e digital com o objetivo de avaliar o seu desgaste. Pelas imagens obtidas, foi possível concluir que brocas com menor diâmetro são as que apresentam o maior desgaste. E este desgaste é mais evidente nas brocas que realizaram furações com um avanço elevado.

Por fim e para validar os resultados, recorreu-se ao método de Taguchi onde foi possível identificar quais fatores de controlo eram mais significativos e avaliar as interações entre estes. Para os dados F_{ed} podemos considerar que todos os fatores são significativos, com a velocidade de corte como o fator mais significativo. Para os dados do ensaio Bearing nenhum dos fatores de controlo são significativos. Para os dois casos estudados, a configuração de furação ideal é a realizado com a broca FP, com avanço de 0,02 mm/rot e uma velocidade de corte de 2000 rpm.

5. Conclusão

Neste capítulo, são apresentadas as conclusões finais, são descritas as limitações encontradas durante o estudo e referidas as propostas para trabalhos futuros.

5.1. Conclusões finais

Esta dissertação tinha como objetivo estudar os efeitos da maquinagem, mais concretamente da furação, nas características mecânicas de um material compósito, o carbono/epóxico. Neste estudo, foram realizados diversos ensaios para caracterizar e analisar o desempenho do carbono/epóxico a diferentes condições de furação. O trabalho desenvolvido incluía ensaios de tração, análise por radiografia, ensaios Bearing, e uma análise detalhada do desgaste das brocas. A aplicação do método de Taguchi foi crucial para validar os resultados e identificar as melhores configurações de furação.

5.1.1. Ensaio de Tração

Os ensaios de tração revelaram propriedades importantes do compósito em estudo. A média do módulo de elasticidade foi de 66,55 GPa, enquanto a tensão máxima de rotura média foi de 971,43 MPa. Foi observada uma variação significativa nos resultados dos provetes 1.1, 1.2, 2.1 e 2.2, que apresentaram valores inferiores, justificável devido a uma interrupção durante o processo de cura. Esta variação, embora pequena, é relevante e deve ser considerada.

5.1.2. Análise por Radiografia

A análise por radiografia permitiu quantificar os danos causados pela furação. A broca FP demonstrou melhor desempenho em termos de menor área de dano e menor raio da circunferência envolvente do dano. Foi calculado o fator de delaminação equivalente (F_{ed}), que indicou que uma velocidade de corte maior e um avanço menor resultam numa menor quantidade de danos. Este resultado foi consistente para ambas as brocas testadas.

5.1.3. Ensaio Bearing

Nos ensaios Bearing, observou-se que a tensão máxima suportada pelos furos estava diretamente relacionada com o nível de delaminação. Configurações de furação com avanço lento e velocidade de corte elevada apresentaram melhores resultados. Isso foi refletido nos

Conclusão

valores de tensão, onde os furos realizados nessas condições suportaram maiores tensões antes da rotura.

5.1.4. Desgaste da Broca

O desgaste das brocas foi analisado usando microscópios ótico e digital. As brocas que realizaram furações com avanços mais elevados mostraram um desgaste mais significativo. A análise indicou que brocas desgastadas promovem furações mais instáveis e com maior dano. Assim foi possível confirmar a importância de monitorizar e substituir ferramentas desgastadas para manter a qualidade da furação.

5.1.5. Método de Taguchi

A aplicação do método de Taguchi validou os resultados experimentais e identificou a melhor configuração de furação. Foi concluído que a combinação de broca FP, avanço de 0,05 mm/rotação e velocidade de corte de 2000 rpm proporcionou os melhores resultados em termos de menor fator de delaminação. A análise estatística mostrou que a velocidade de rotação e o tipo de broca são fatores significativos, enquanto o avanço apresentou uma significância menor.

Este estudo demonstrou que os parâmetros de furação escolhidos para a furação influenciam os danos em materiais compósitos. Através de uma abordagem experimental detalhada e a aplicação de métodos estatísticos, como o método de Taguchi, foi possível identificar as configurações de furação que melhoram a qualidade dos furos. No entanto, estas conclusões são válidas segundo as condições que foram escolhidas e trabalhadas. A alteração do plano experimental pode levar a conclusões distintas.

5.2. Limitações e trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, existem várias propostas que visam melhorar os resultados obtidos nesta dissertação. Estas serão descritas de seguida.

A medição da força axial durante a furação, é um proposta pois permite avaliar a resistência que o material oferece e identificar os parâmetros que culminam com o melhor resultado. A utilização de tomografia computadorizada (CT-scan) também pode ser explorada pois permite uma análise tridimensional do dano presente no material e da integridade estrutural deste. A partir desta análise, é possível aplicar o fator de delaminação tridimensional e obter resultados mais precisos.

Em adição a estas, o aumento do número de provetes testados é benéfico pois permite aumentar a base de dados disponível. Assim a dispersividade de resultados é reduzida e a fiabilidade das conclusões é melhor.

Conclusão

Para trabalhos futuros, as configurações de furação e os fatores de controlo também podem ser alterados de maneira a analisar e perceber o impacto destas alterações no resultado, ou seja, o dano resultante da furação.

É possível também efetuar um estudo semelhante, mas a materiais compósitos diferentes, com fibras e matrizes distintas, com laminados e pré-impregnados diferentes. Se o estudo for sobre o carbono/epóxico, é possível variar o número de camadas, o empilhamento e a direção das fibras.

Estas propostas para trabalhos futuros serão um contributo para o entendimento do comportamento mecânico destes materiais. Assim, será possível prever e reduzir os efeitos da maquinação nos materiais compósitos.

Conclusão

Referências

- [1] B. D. Agarwal, L. J. Broutman, and K. Chandrashekhara, *Analysis and performance of fiber composites, Third edition*. 2006. [Online]. Available: www.wiley.com/go/permissions.
- [2] Marcelo F. S. F. de Moura, Alfredo B. de Moraes, and António G. de Magalhães, *Materiais Compósitos - Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*, 2ª Edição. 2011.
- [3] D. Gay, S. V. (Suong V.) Hoa, and S. W. Tsai, *Composite materials : design and applications*. CRC Press, 2003.
- [4] F. Carvalho, “Estudo da resistência mecânica de materiais compósitos de matriz polimérica após furação,” Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2023.
- [5] J. Silva, “Estudo da delaminação em compósitos de epóxido reforçado com fibra de carbono,” Porto, Oct. 2016.
- [6] P. Silva, “Análise e quantificação do dano em materiais compósitos de matriz polimérica,” Porto, Oct. 2016.
- [7] L. Devesa, “Avaliação experimental dos efeitos da furação em laminados carbono epóxi com empilhamento cruzado (cross-ply),” Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2020.
- [8] Easy Composites Ltd, “IN2 Epoxy Infusion Resin - Easy Composites.” Accessed: Dec. 07, 2023. [Online]. Available: <https://www.easycomposites.eu/in2-epoxy-infusion-resin>
- [9] “Porsche Jogo completos de jantes 911 Turbo Carbon - Porsche Portugal.” Accessed: Oct. 26, 2023. [Online]. Available: <https://www.porsche.com/portugal/accessoriesandservice/tequipment/specials/summer-tyres/carbon/>
- [10] Continental, “Off-The-Road Tires OTR Tire Portfolio Introduction 5 Application Matrix Port / Material Handling 6 Application Matrix Earthmoving Classification of OTR Tires,” 2019.
- [11] A. Zimmer and S. Bachmann, “Challenges for recycling medium-density fiberboard (MDF),” *Results in Engineering*, vol. 19, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.rineng.2023.101277.
- [12] Finsa, “Fibrapan.” Accessed: Oct. 20, 2023. [Online]. Available: <https://www.finsa.com/pt/fg/fibrapan>

Referências

- [13] “MDF Panels | Medium Density Fiberboard | Composite Panel Association.” Accessed: Oct. 20, 2023. [Online]. Available: <https://www.compositepanel.org/products/medium-density-fiberboard/>
- [14] “REN Data Hub.” Accessed: Oct. 26, 2023. [Online]. Available: <https://datahub.ren.pt/>
- [15] ENERCON GmbH, “Production.” Accessed: Oct. 26, 2023. [Online]. Available: <https://www.enercon.de/en/company/production/>
- [16] HARDCORK®, “Hardcork Surfboards by Bufo.” Accessed: Nov. 16, 2023. [Online]. Available: <https://surfbunker.com/blog/bufos-new-hardcork-surfboards>
- [17] HARDCORK®, “Surfboards | HARDCORK® Surfboards.” Accessed: Nov. 16, 2023. [Online]. Available: <https://hardcork-surfboards.com/>
- [18] Damen Shipyards, “RAMSSES project’ significant milestone towards sustainable composite ship construction | Damen - Damen.” Accessed: Nov. 16, 2023. [Online]. Available: <https://www.damen.com/insights-center/articles/ramsses-project-reaches-milestone-towards-sustainable-composite-ship>
- [19] Statista, “Global demand for carbon fiber from 2010 to 2022”, Accessed: Nov. 02, 2023. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/380538/projection-demand-for-carbon-fiber-globally/>
- [20] L. M. P. Durão, “Machining of hybrid composites,” 2005.
- [21] Rampal, G. Kumar, S. M. Rangappa, S. Siengchin, and S. Zafar, “A review of recent advancements in drilling of fiber-reinforced polymer composites,” *Composites Part C: Open Access*, vol. 9. Elsevier B.V., Oct. 01, 2022. doi: 10.1016/j.jcomc.2022.100312.
- [22] N. Yaşar, M. Erdi Korkmaz, and M. Günay, “Investigation on hole quality of cutting conditions in drilling of CFRP composite.”
- [23] L. Magalhães, “Processos de fabrico II Texto de apoio às aulas,” Porto, 2016.
- [24] L. M. P. Durão, D. J. S. Gonçalves, V. H. C. De Albuquerque, and J. M. R. S. Tavares, “Avaliação de ferramentas para a furação de laminados.”
- [25] D. Geng *et al.*, “Delamination formation, evaluation and suppression during drilling of composite laminates: A review,” *Composite Structures*, vol. 216. Elsevier Ltd, pp. 168–186, May 15, 2019. doi: 10.1016/j.compstruct.2019.02.099.
- [26] W.-C. Chen, “SOME EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS IN THE DRILLING OF CARBON FIBER-REINFORCED PLASTIC (CFRP) COMPOSITE LAMINATES,” 1997.
- [27] D. Silva, “Image processing methodology for assessment of drilling induced damage in CFRP,” Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013.

Referências

- [28] A. Faraz, D. Biermann, and K. Weinert, "Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates," *Int J Mach Tools Manuf*, vol. 49, no. 15, pp. 1185–1196, Dec. 2009, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2009.08.002.
- [29] J. P. Davim, J. C. Rubio, and A. M. Abrao, "A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates," *Compos Sci Technol*, vol. 67, no. 9, pp. 1939–1945, Jul. 2007, doi: 10.1016/j.compscitech.2006.10.009.
- [30] C. C. Tsao, K. L. Kuo, and I. C. Hsu, "Evaluation of a novel approach to a delamination factor after drilling composite laminates using a core-saw drill," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 59, no. 5–8, pp. 617–622, Mar. 2012, doi: 10.1007/S00170-011-3532-Y.
- [31] J. Xu, C. Li, S. Mi, Q. An, and M. Chen, "Study of drilling-induced defects for CFRP composites using new criteria," *Compos Struct*, vol. 201, pp. 1076–1087, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.compstruct.2018.06.051.
- [32] M. Waqar, A. M. Memon, M. Sabih, and L. M. Alhems, "Composite pipelines: Analyzing defects and advancements in non-destructive testing techniques," *Eng Fail Anal*, vol. 157, p. 107914, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.engfailanal.2023.107914.
- [33] A. Kapadia, *National Composites Network Best Practice Guide Non Destructive Testing of Composite Materials*. National Composites Network. [Online]. Available: <http://www.twi.co.uk/j32k/index.xtp>
- [34] S. Gholizadeh, "A review of non-destructive testing methods of composite materials," in *Procedia Structural Integrity*, Elsevier B.V., 2016, pp. 50–57. doi: 10.1016/j.prostr.2016.02.008.
- [35] B. Venkata Ramudu, C. J. Reddy, and V. Madhu, "Flash X-ray radiography technique to study the high velocity impact of soft projectile on E-glass/epoxy composite material," *Defence Technology*, vol. 15, no. 2, pp. 216–226, Apr. 2019, doi: 10.1016/J.DT.2018.08.014.
- [36] S. C. Garcea, Y. Wang, and P. J. Withers, "X-ray computed tomography of polymer composites," *Composites Science and Technology*, vol. 156. Elsevier Ltd, pp. 305–319, Mar. 01, 2018. doi: 10.1016/j.compscitech.2017.10.023.
- [37] X. Song *et al.*, "Trans-scale analysis of 3D braided composites with voids based on micro-CT imaging and unsupervised machine learning," *Compos Sci Technol*, vol. 249, p. 110494, Apr. 2024, doi: 10.1016/J.COMPSCITECH.2024.110494.
- [38] B. Coelho, "Deteção de defeitos em materiais compósitos usando tecnologia de ultrassons," Universidade do Minho, 2020. Accessed: May 23, 2024. [Online]. Available: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/65770>

Referências

- [39] N. Catapirra, “Ensaio não destrutivo para materiais compósitos de matriz polimérica produzidos por manufatura aditiva,” Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2021.
- [40] M. Strag and W. Świdorski, “Non-destructive inspection of military-designated composite materials with the use of Terahertz imaging,” *Compos Struct*, vol. 306, p. 116588, Feb. 2023, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2022.116588.
- [41] ASTM International, *Designation: ASTM D3039/D3039M-17 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials1*. 2017.
- [42] ASTM International, *Designation: ASTM D5766/D5766M-23 Standard Test Method for Open Hole Tensile Strength of Polymer Matrix Composite Laminates 1*. 2023.
- [43] ZwickRoell, “ISO 527-4 | ISO 527-5 Ensaio de tração em compósitos | ZwickRoell.” Accessed: Jan. 03, 2024. [Online]. Available: <https://www.zwickroell.com/pt/setores-da-industria/compositos/iso-527-4-iso-527-5-ensaio-de-tracao-em-materiais-compositos-de-fibra/>
- [44] ASTM International, *Designation: ASTM D790-17 Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials 1*. 2017.
- [45] ISO - International Organization for Standardization, *ISO 14125:1998 Fibre-reinforced plastic composites Determination of flexural properties*. 1998.
- [46] ZwickRoell, “Ensaio de flexão | ZwickRoell.” Accessed: Jan. 03, 2024. [Online]. Available: <https://www.zwickroell.com/pt/setores-da-industria/compositos/ensaios-de-flexao/#c920>
- [47] ASTM International, *Designation: ASTM D695-23 Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics 1*. 2023.
- [48] ISO - International Organization for Standardization, *ISO 14126:2023 Fibre-reinforced plastic composites Determination of compressive properties in the in-plane direction*. 2023.
- [49] ASTM International, *Designation: ASTM D3410/D3410M-16e1 Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading*. 2016.
- [50] ZwickRoell, “ASTM D695: | ZwickRoell.” Accessed: Jan. 03, 2024. [Online]. Available: <https://www.zwickroell.com/pt/setores-da-industria/compositos/end-loading-compression-astm-d695/>
- [51] ZwickRoell, “ISO 14126 | ASTM D3410: Shear Loading Compression | ZwickRoell.” Accessed: Jan. 03, 2024. [Online]. Available: <https://www.zwickroell.com/pt/setores-da-industria/compositos/shear-loading-compression-iso-14126-astm-d3410/>

Referências

- [52] ASTM International, *Designation: ASTM D4255/D4255M-20e1 Standard Test Method for In-Plane Shear Properties of Polymer Matrix Composite Materials by the Rail Shear Method 1*. 2020.
- [53] ASTM International, *Designation: ASTM D5379/D5379M-19e1 Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method*. 2019.
- [54] ASTM International, “Designation: D5961/D5961M-10 Standard Test Method for Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates,” 2010, doi: 10.1520/D5961_D5961M-10.
- [55] “A Primer on the Taguchi Method - Ranjit K. Roy - Google Livros.” Accessed: May 24, 2024. [Online]. Available: <https://books.google.pt/books?id=OUI54mrYdqIC&printsec=frontcover&hl=pt-PT#v=onepage&q&f=false>
- [56] S. Ramos, “Método de Taguchi - Uma alternativa ao desenho estatístico de experiências (DOE),” Sep. 2022. [Online]. Available: <https://sixsigmastudyguide.com/taguchi-robust-design/>
- [57] “Inovatools.” Accessed: May 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.inovatools.eu/V4/en/produkte/detail/850---->
- [58] “Inovatools.” Accessed: May 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.inovatools.eu/V4/en/produkte/detail/701-6---->
- [59] G. D. Wang and M. S. Kirwa, “Comparisons of the use of twist, pilot-hole and step-drill on influence of carbon fiber-reinforced polymer drilling hole quality,” *J Compos Mater*, vol. 52, no. 11, pp. 1465–1480, May 2018, doi: 10.1177/0021998317726366/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_0021998317726366-FIG17.JPEG.
- [60] “VF-2 | Fresadora de Cones ISO40 | Fresadoras verticais – Máquinas CNC Haas.” Accessed: May 30, 2024. [Online]. Available: <https://www.haascnc.com/pt/machines/vertical-mills/vf-series/models/small/vf-2.html>
- [61] T. Kumar and K. Verma, “A Theory Based on Conversion of RGB image to Gray image,” *Int J Comput Appl*, vol. 7, no. 2, pp. 5–12, Sep. 2010, doi: 10.5120/1140-1493.
- [62] S. V. Chhaya, S. Khera, and P. Kumar, “Basic geometric shape and primary colour detection using image processing on MatLab.” [Online]. Available: <http://www.ijret.org>
- [63] “Adesivo epóxi Huntsman Advanced Araldite 420 A/B.” Accessed: Jun. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.aerospheres.com/products/adhesives/araldite-420-a-b-1-4-kg-kit/>

Referências

- [64] “Tabela Coeficientes para Análise de Experimento Taguchi”.

Declaração de Integridade

Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à sua elaboração.

Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim.

Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO.

NOME: Hugo Rafael Carvalho Cerqueira

ISEP, Porto, 14 de junho de 2024

APÊNDICE A

Planos de furação

1º Plano					
Placa	Provete	Código	Geometria	Avanço (mm/rot)	Velocidade (rpm)
4	1	1-FP.1.1_A.T	Furo Piloto	0,05	500
		1-FP.1.1_A.B	Furo Piloto	0,05	500
	2	1-FP.1.1_B.T	Furo Piloto	0,05	500
		1-FP.1.1_B.B	Furo Piloto	0,05	500
	3	1-FP.1.1_C.T	Furo Piloto	0,05	500
		1-FP.1.1_C.B	Furo Piloto	0,05	500
	4	1-FP.1.2_A.T	Furo Piloto	0,05	2000
		1-FP.1.2_A.B	Furo Piloto	0,05	2000
	5	1-FP.1.2_B.T	Furo Piloto	0,05	2000
		1-FP.1.2_B.B	Furo Piloto	0,05	2000
	6	1-FP.1.2_C.T	Furo Piloto	0,05	2000
		1-FP.1.2_C.B	Furo Piloto	0,05	2000
	7	1-FP.2.1_A.T	Furo Piloto	0,2	500
		1-FP.2.1_A.B	Furo Piloto	0,2	500
	8	1-FP.2.1_B.T	Furo Piloto	0,2	500
		1-FP.2.1_B.B	Furo Piloto	0,2	500
	9	1-FP.2.1_C.T	Furo Piloto	0,2	500
		1-FP.2.1_C.B	Furo Piloto	0,2	500
	10	1-FP.2.2_A.T	Furo Piloto	0,2	2000
		1-FP.2.2_A.B	Furo Piloto	0,2	2000
	11	1-FP.2.2_B.T	Furo Piloto	0,2	2000
		1-FP.2.2_B.B	Furo Piloto	0,2	2000
	12	1-FP.2.2_C.T	Furo Piloto	0,2	2000
		1-FP.2.2_C.B	Furo Piloto	0,2	2000
3	13	1-BI.1.1_A.T	Bidiametral	0,05	500
		1-BI.1.1_A.B	Bidiametral	0,05	500
	14	1-BI.1.1_B.T	Bidiametral	0,05	500
		1-BI.1.1_B.B	Bidiametral	0,05	500
	15	1-BI.1.1_C.T	Bidiametral	0,05	500
		1-BI.1.1_C.B	Bidiametral	0,05	500
	16	1-BI.1.2_A.T	Bidiametral	0,05	2000
		1-BI.1.2_A.B	Bidiametral	0,05	2000
	17	1-BI.1.2_B.T	Bidiametral	0,05	2000
		1-BI.1.2_B.B	Bidiametral	0,05	2000
	18	1-BI.1.2_C.T	Bidiametral	0,05	2000
		1-BI.1.2_C.B	Bidiametral	0,05	2000
	19	1-BI.2.1_A.T	Bidiametral	0,2	500
		1-BI.2.1_A.B	Bidiametral	0,2	500
	20	1-BI.2.1_B.T	Bidiametral	0,2	500
		1-BI.2.1_B.B	Bidiametral	0,2	500
	21	1-BI.2.1_C.T	Bidiametral	0,2	500
		1-BI.2.1_C.B	Bidiametral	0,2	500
	22	1-BI.2.2_A.T	Bidiametral	0,2	2000
		1-BI.2.2_A.B	Bidiametral	0,2	2000
	23	1-BI.2.2_B.T	Bidiametral	0,2	2000
		1-BI.2.2_B.B	Bidiametral	0,2	2000
	24	1-BI.2.2_C.T	Bidiametral	0,2	2000
		1-BI.2.2_C.B	Bidiametral	0,2	2000

Apêndice D

2º Plano					
Placa	Provete	Código	Geometria	Avanço (mm/rot)	Velocidade (rpm)
2	25	2-FP.1.1_A.T	Furo Piloto	0,05	500
		2-FP.1.1_A.B	Furo Piloto	0,05	500
	26	2-FP.1.1_B.T	Furo Piloto	0,05	500
		2-FP.1.1_B.B	Furo Piloto	0,05	500
	27	2-FP.1.1_C.T	Furo Piloto	0,05	500
		2-FP.1.1_C.B	Furo Piloto	0,05	500
	28	2-FP.1.2_A.T	Furo Piloto	0,05	2000
		2-FP.1.2_A.B	Furo Piloto	0,05	2000
	29	2-FP.1.2_B.T	Furo Piloto	0,05	2000
		2-FP.1.2_B.B	Furo Piloto	0,05	2000
	30	2-FP.1.2_C.T	Furo Piloto	0,05	2000
		2-FP.1.2_C.B	Furo Piloto	0,05	2000
	31	2-FP.2.1_A.T	Furo Piloto	0,2	500
		2-FP.2.1_A.B	Furo Piloto	0,2	500
	32	2-FP.2.1_B.T	Furo Piloto	0,2	500
		2-FP.2.1_B.B	Furo Piloto	0,2	500
	33	2-FP.2.1_C.T	Furo Piloto	0,2	500
		2-FP.2.1_C.B	Furo Piloto	0,2	500
	34	2-FP.2.2_A.T	Furo Piloto	0,2	2000
		2-FP.2.2_A.B	Furo Piloto	0,2	2000
35	2-FP.2.2_B.T	Furo Piloto	0,2	2000	
	2-FP.2.2_B.B	Furo Piloto	0,2	2000	
36	2-FP.2.2_C.T	Furo Piloto	0,2	2000	
	2-FP.2.2_C.B	Furo Piloto	0,2	2000	
1	37	2-BI.1.1_A.T	Bidiametral	0,05	500
		2-BI.1.1_A.B	Bidiametral	0,05	500
	38	2-BI.1.1_B.T	Bidiametral	0,05	500
		2-BI.1.1_B.B	Bidiametral	0,05	500
	39	2-BI.1.1_C.T	Bidiametral	0,05	500
		2-BI.1.1_C.B	Bidiametral	0,05	500
	40	2-BI.1.2_A.T	Bidiametral	0,05	2000
		2-BI.1.2_A.B	Bidiametral	0,05	2000
	41	2-BI.1.2_B.T	Bidiametral	0,05	2000
		2-BI.1.2_B.B	Bidiametral	0,05	2000
	42	2-BI.1.2_C.T	Bidiametral	0,05	2000
		2-BI.1.2_C.B	Bidiametral	0,05	2000
	43	2-BI.2.1_A.T	Bidiametral	0,2	500
		2-BI.2.1_A.B	Bidiametral	0,2	500
	44	2-BI.2.1_B.T	Bidiametral	0,2	500
		2-BI.2.1_B.B	Bidiametral	0,2	500
	45	2-BI.2.1_C.T	Bidiametral	0,2	500
		2-BI.2.1_C.B	Bidiametral	0,2	500
	46	2-BI.2.2_A.T	Bidiametral	0,2	2000
		2-BI.2.2_A.B	Bidiametral	0,2	2000
47	2-BI.2.2_B.T	Bidiametral	0,2	2000	
	2-BI.2.2_B.B	Bidiametral	0,2	2000	
48	2-BI.2.2_C.T	Bidiametral	0,2	2000	
	2-BI.2.2_C.B	Bidiametral	0,2	2000	

APÊNDICE B

Resultados das análises de radiografia

Furo	Threshold type	Threshold lvl	Perímetro	Área do furo	Área do dano	Raio circ env	Lado1 env. furo	Lado2 env. furo
1-FP.1.1_A.T	manual	0,035	967	82866	1116	171,28	324	326
1-FP.1.1_A.B	automatico	0,031	1388	81464	6493	206,62	322	323
1-FP.1.1_B.T	manual	0,035	991	82678	1325	175,70	324	324
1-FP.1.1_B.B	manual	0,042	1400	79814	7893	224,14	321	317
1-FP.1.1_C.T	automatico	0,035	1077	83043	1682	185,15	325	325
1-FP.1.1_C.B	manual	0,039	1508	79637	9296	233,26	321	315
1-FP.1.2_A.T	manual	0,074	979	82056	306	173,11	324	323
1-FP.1.2_A.B	automatico	0,039	1025	82862	2472	177,55	324	324
1-FP.1.2_B.T	manual	0,255	2604	91948	59583	281,15	362	327
1-FP.1.2_B.B	automatico	0,082	1028	81813	1153	177,00	322	321
1-FP.1.2_C.T	manual	0,038	1123	82652	2635	187,00	325	323
1-FP.1.2_C.B	automatico	0,055	1140	82128	3738	190,06	323	322
1-FP.2.1_A.T	manual	0,065	1340	82822	5031	222,52	324	325
1-FP.2.1_A.B	automatico	0,055	1678	82826	6271	252,69	325	324
1-FP.2.1_B.T	manual	0,050	1533	82950	4859	256,97	325	326
1-FP.2.1_B.B	automatico	0,075	1515	82041	5128	267,56	324	319
1-FP.2.1_C.T	manual	0,058	1218	82916	3806	229,17	326	326
1-FP.2.1_C.B	manual	0,062	1226	82058	4206	210,05	326	322
1-FP.2.2_A.T	manual	0,054	1059	82654	3260	191,13	326	326
1-FP.2.2_A.B	manual	0,073	1311	82872	4816	251,87	325	324
1-FP.2.2_B.T	manual	0,039	1170	81897	3959	206,53	324	324
1-FP.2.2_B.B	automatico	0,067	1197	82984	3368	214,72	325	325
1-FP.2.2_C.T	manual	0,075	1060	82708	2111	200,42	325	326
1-FP.2.2_C.B	manual	0,054	1043	83010	2631	188,13	326	325
1-BI.1.1_A.T	manual	0,208	2470	85686	41993	268,11	340	326
1-BI.1.1_A.B	automatico	0,067	1310	80971	7877	212,85	319	323
1-BI.1.1_B.T	manual	0,035	1381	82692	2950	248,34	325	324
1-BI.1.1_B.B	automatico	0,106	1708	80983	9098	246,95	323	324
1-BI.1.1_C.T	automatico	0,039	1497	82510	4099	341,72	323	325
1-BI.1.1_C.B	automatico	0,075	1513	80666	7597	260,02	321	318
1-BI.1.2_A.T	automatico	0,039	1146	83026	2536	214,40	325	325
1-BI.1.2_A.B	automatico	0,063	1129	81769	5943	207,18	323	321
1-BI.1.2_B.T	automatico	0,043	1067	82834	1724	209,40	324	324
1-BI.1.2_B.B	automatico	0,094	1101	81537	4059	175,60	323	322
1-BI.1.2_C.T	automatico	0,051	1154	82433	2354	204,20	324	322
1-BI.1.2_C.B	automatico	0,051	1098	80774	7310	186,68	324	322
1-BI.2.1_A.T	manual	0,047	1482	83094	4734	293,44	327	328
1-BI.2.1_A.B	automatico	0,106	2120	81014	11956	364,54	321	320
1-BI.2.1_B.T	manual	0,062	1254	83353	3984	229,39	328	328
1-BI.2.1_B.B	automatico	0,075	1423	81660	8415	294,31	323	322
1-BI.2.1_C.T	manual	0,062	1366	83273	4504	243,09	327	326
1-BI.2.1_C.B	automatico	0,235	2245	82203	34551	281,22	326	323
1-BI.2.2_A.T	manual	0,082	1124	82578	2823	216,84	326	324
1-BI.2.2_A.B	automatico	0,071	2943	81676	42904	498,13	324	326
1-BI.2.2_B.T	manual	0,045	1215	82999	4381	221,00	325	326
1-BI.2.2_B.B	automatico	0,157	1680	83175	15478	268,56	326	324
1-BI.2.2_C.T	manual	0,054	1078	83312	2893	191,32	326	327
1-BI.2.2_C.B	automatico	0,180	4393	82806	55401	454,63	328	329

Apêndice D

Furo	Threshold type	Threshold lvl	Perímetro	Área do furo	Área do dano	Raio circ env	Lado1 env. furo	Lado2 env. furo
2-FP.1.1_AT	manual	0,045	1162	82635	3580	190,56	323	324
2-FP.1.1_BT	manual	0,062	1033	82532	1738	184,23	324	321
2-FP.1.1_CT	manual	0,075	989	83059	604	184,45	325	323
2-FP.1.2_AT	manual	0,054	1013	83241	1431	183,31	324	325
2-FP.1.2_BT	automatico	0,047	988	83134	1148	175,28	324	323
2-FP.1.2_CT	manual	0,152	6488	87751	98002	501,83	344	326
2-FP.2.1_AT	manual	0,094	1238	83888	4811	213,78	328	325
2-FP.2.1_BT	manual	0,074	1420	84106	5581	245,37	327	327
2-FP.2.1_CT	manual	0,094	1156	84135	3600	207,04	328	327
2-FP.2.2_AT	automatico	0,098	1222	83797	3069	237,74	327	326
2-FP.2.2_BT	manual	0,078	1204	83607	3462	203,38	327	323
2-FP.2.2_CT	manual	0,082	1122	84247	2894	211,40	328	326
2-FP.1.2_CB	automatico	0,078	1087	83874	3917	185,22	323	327
2-FP.1.2_BB	manual	0,132	3949	85485	40260	325,96	335	331
2-FP.1.2_AB	automatico	0,086	1132	83268	3059	196,01	326	325
2-FP.1.1_CB	automatico	0,071	1254	82685	3754	212,19	325	322
2-FP.1.1_BB	automatico	0,067	1365	82416	4667	222,04	324	321
2-FP.1.1_AB	automatico	0,051	1271	82567	3662	202,12	325	323
2-FP.2.2_CB	manual	0,071	1163	82796	3009	218,01	325	323
2-FP.2.2_BB	manual	0,082	1237	82930	3525	236,21	324	324
2-FP.2.2_AB	automatico	0,090	1128	83034	2199	208,24	325	325
2-FP.2.1_CB	manual	0,082	1278	82894	3529	231,11	326	323
2-FP.2.1_BB	automatico	0,086	1291	83203	3984	232,81	325	326
2-FP.2.1_AB	manual	0,081	1269	83380	3385	216,95	327	326
2-BI.1.1_AT	automatico	0,055	1356	82837	3751	238,44	326	321
2-BI.1.1_BT	automatico	0,227	1610	84342	18328	204,62	328	327
2-BI.1.1_CT	automatico	0,063	1003	83302	1212	176,24	324	328
2-BI.1.2_AT	automatico	0,075	1242	83181	2229	228,28	325	325
2-BI.1.2_BT	automatico	0,059	1347	82875	3266	252,96	325	320
2-BI.1.2_CT	automatico	0,055	1031	82723	1322	191,05	324	324
2-BI.2.1_AT	manual	0,058	1337	83653	4549	224,96	326	328
2-BI.2.1_BT	automatico	0,286	1944	84527	28076	242,56	330	328
2-BI.2.1_CT	manual	0,054	1048	83192	3598	187,86	325	327
2-BI.2.2_AT	manual	0,215	2166	84232	29496	254,78	328	327
2-BI.2.2_BT	manual	0,062	1207	83171	4070	230,52	326	327
2-BI.2.2_CT	manual	0,234	1739	84302	27205	239,27	331	327
2-BI.1.2_CB	automatico	0,098	992	82631	2753	173,12	323	325
2-BI.1.2_BB	automatico	0,098	1027	83046	3094	178,07	325	324
2-BI.1.2_AB	automatico	0,094	1049	83353	3687	194,74	326	324
2-BI.1.1_CB	automatico	0,298	4659	81519	33976	796,02	324	322
2-BI.1.1_BB	automatico	0,078	1080	82949	4183	185,53	323	325
2-BI.1.1_AB	automatico	0,075	1008	82670	3574	176,98	323	324
2-BI.2.2_CB	automatico	0,098	1013	83256	2509	195,92	325	325
2-BI.2.2_BB	automatico	0,090	1089	83363	2892	215,93	324	325
2-BI.2.2_AB	automatico	0,078	1203	83124	3257	239,03	326	324
2-BI.2.1_CB	automatico	0,090	1054	83168	2580	205,53	326	325
2-BI.2.1_BB	automatico	0,047	5361	82043	69410	710,22	323	324
2-BI.2.1_AB	automatico	0,075	1116	83563	3638	200,26	325	327

APÊNDICE C

Resultados dos ensaios Bearing

1º Plano									
Broca Furo Piloto					Broca Bidiametral				
	0,05 x 500	0,05x2000	0,2x500	0,2x2000		0,05 x 500	0,05x2000	0,2x500	0,2x2000
A	269,18	438,23	412,85	400,24		195,59	429,38	391,19	365,65
B	426,98	227,32	330,67	322,96		404,25	434,62	417,15	412,82
C	372,52	397,48	388,57	436,19		437,69	454,04	378,60	375,78
Média	356,225	354,344	377,363	386,465		420,970	439,348	395,643	384,752
Desv Pad	65,440	91,344	34,474	47,243		107,117	10,609	16,049	20,273

2º Plano									
Broca Furo Piloto					Broca Bidiametral				
	0,05 x 500	0,05x2000	0,2x500	0,2x2000		0,05 x 500	0,05x2000	0,2x500	0,2x2000
A	407,07	408,37	376,61	392,63		404,22	428,72	384,95	389,69
B	429,07	253,70	392,39	414,13		421,98	349,25	354,16	422,64
C	420,70	416,09	370,57	398,55		364,49	394,36	365,15	405,91
Média	418,946	359,383	379,856	401,770		396,895	390,775	368,085	406,078
Desv Pad	9,07	74,80	9,20	9,07		24,03	32,54	12,74	13,45

APÊNDICE D

Análise de Taguchi para o fator de delaminação (F_{ed})

☒ FED

Análise Taguchi: Fed broca nova; Fed broca desgastada versus Broca; Ava...

Análise Linear do Modelo: Razões S/N versus Broca; Avanço; Velocidade

Coefficientes de Modelo Estimados para Razões S/N

Termo	Coef	EP de Coef	T	P
Constante	-0,205302	0,001916	-107,136	0,006
Broca FP	0,029172	0,001916	15,223	0,042
Avanço 0,05	0,024470	0,001916	12,769	0,050
Velocida 500	-0,032056	0,001916	-16,728	0,038
Broca*Avanço FP 0,05	-0,001955	0,001916	-1,020	0,494
Broca*Velocida FP 500	-0,006144	0,001916	-3,206	0,192
Avanço*Velocida 0,05 500	-0,006743	0,001916	-3,519	0,176

Sumário do Modelo

S	R-quad.	R-quad.(aj)
0,0054	99,86%	99,00%

Análise de Variância para Razões S/N

Fonte	GL	SQ Seq	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	F	P
Broca	1	0,006808	0,006808	0,006808	231,74	0,042
Avanço	1	0,004790	0,004790	0,004790	163,06	0,050
Velocidade	1	0,008221	0,008221	0,008221	279,83	0,038
Broca*Avanço	1	0,000031	0,000031	0,000031	1,04	0,494
Broca*Velocidade	1	0,000302	0,000302	0,000302	10,28	0,192
Avanço*Velocidade	1	0,000364	0,000364	0,000364	12,38	0,176
Erro de Resíduos	1	0,000029	0,000029	0,000029		
Total	7	0,020544				

Análise Linear do Modelo: Médias versus Broca; Avanço; Velocidade

Coefficientes de Modelo Estimados para Médias

Termo	Coef	EP de Coef	T	P
Constante	1,02391	0,000234	4366,507	0,000
Broca FP	-0,00343	0,000234	-14,641	0,043
Avanço 0,05	-0,00290	0,000234	-12,353	0,051
Velocida 500	0,00376	0,000234	16,044	0,040
Broca*Avanço FP 0,05	0,00023	0,000234	0,989	0,504
Broca*Velocida FP 500	0,00071	0,000234	3,016	0,204
Avanço*Velocida 0,05 500	0,00077	0,000234	3,295	0,188

Sumário do Modelo

S	R-quad.	R-quad.(aj)
0,0007	99,85%	98,92%

Apêndice D

Análise de Variância para Médias

Fonte	GL	SQ Seq	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	F	P
Broca	1	0,000094	0,000094	0,000094	214,36	0,043
Avanço	1	0,000067	0,000067	0,000067	152,60	0,051
Velocidade	1	0,000113	0,000113	0,000113	257,40	0,040
Broca*Avanço	1	0,000000	0,000000	0,000000	0,98	0,504
Broca*Velocidade	1	0,000004	0,000004	0,000004	9,09	0,204
Avanço*Velocidade	1	0,000005	0,000005	0,000005	10,86	0,188
Erro de Resíduos	1	0,000000	0,000000	0,000000		
Total	7	0,000284				

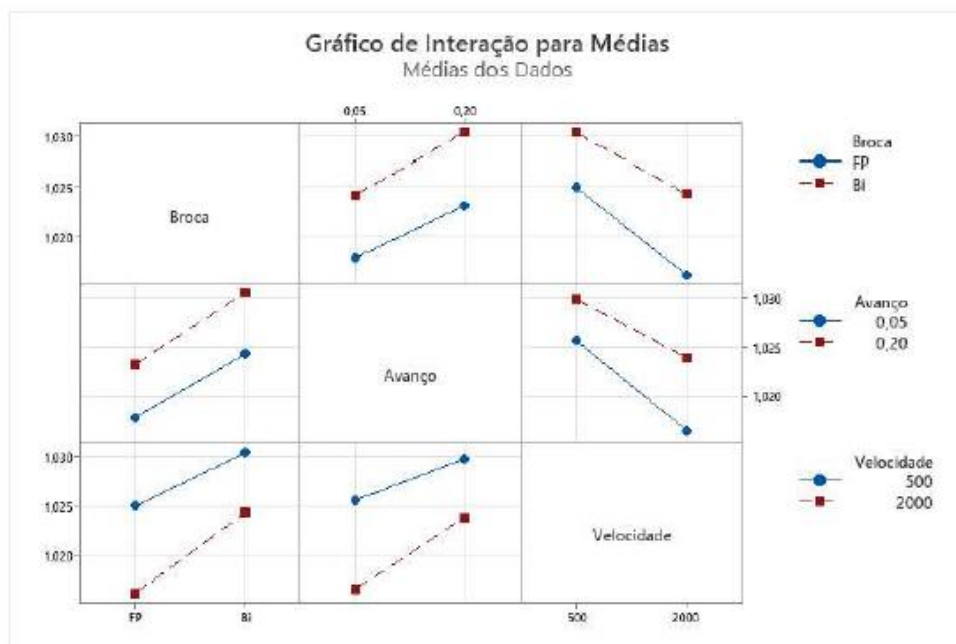
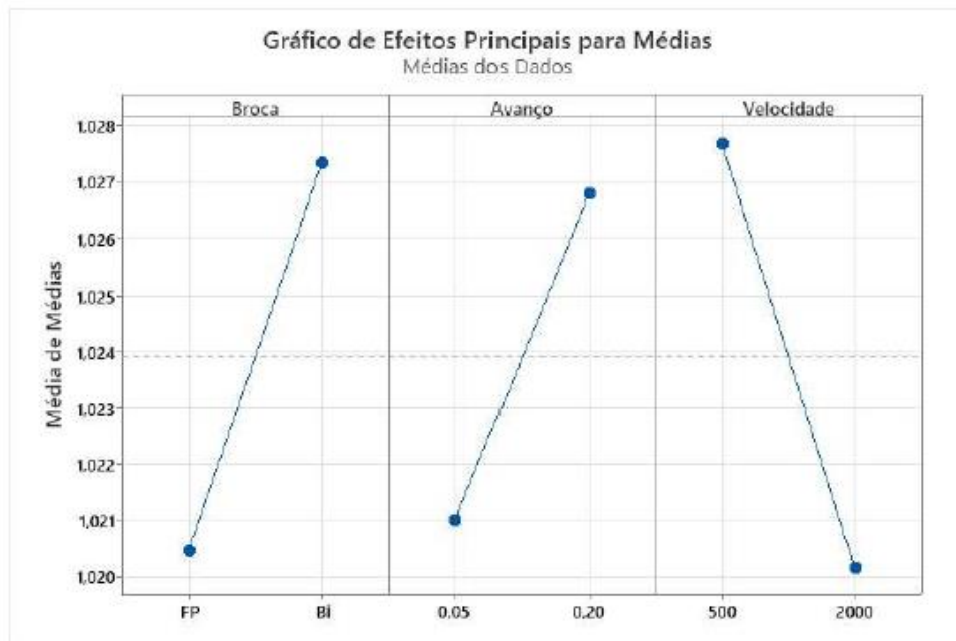
Tabela de Resposta para Razões sinal-ruído

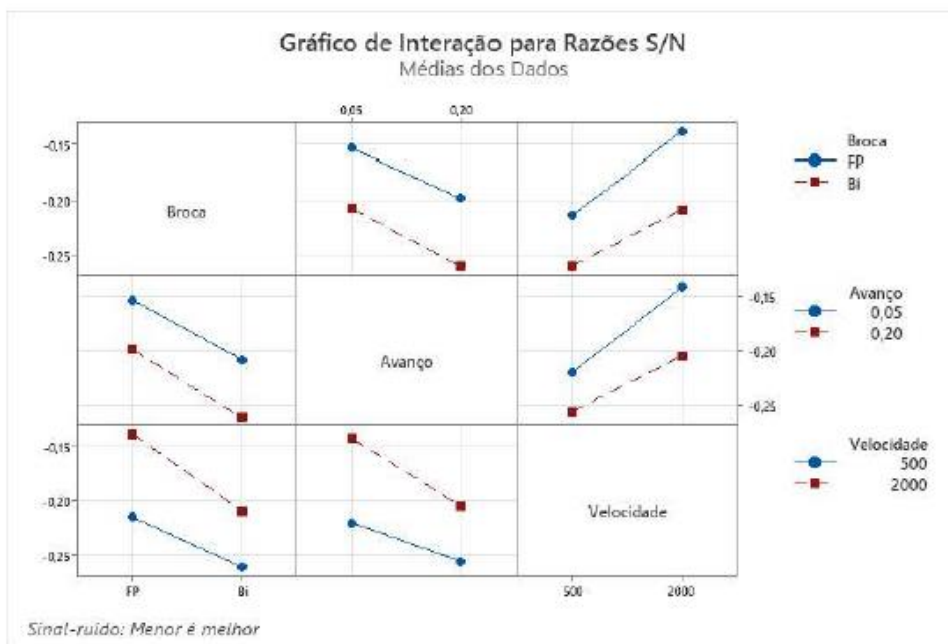
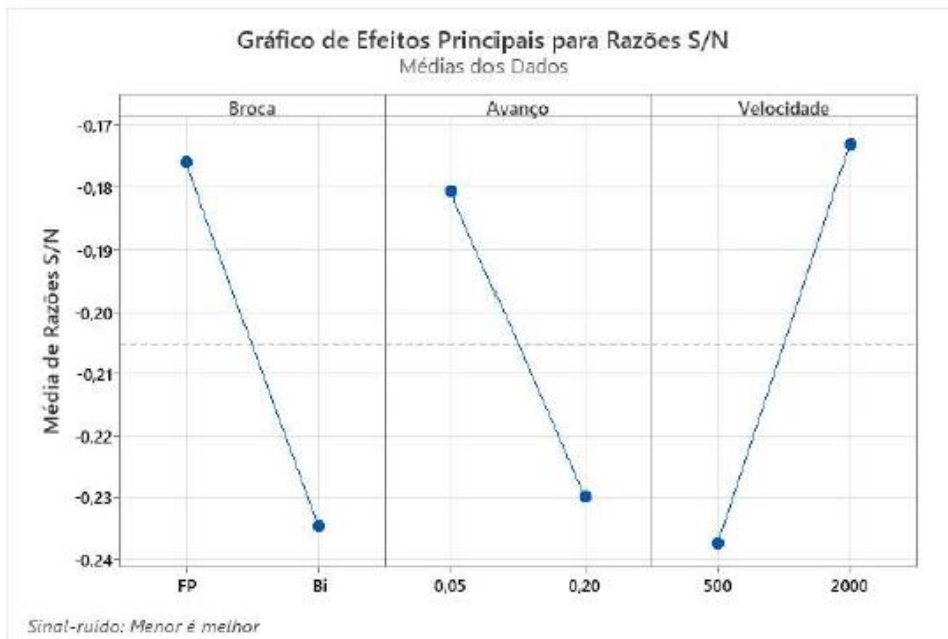
Menor é melhor

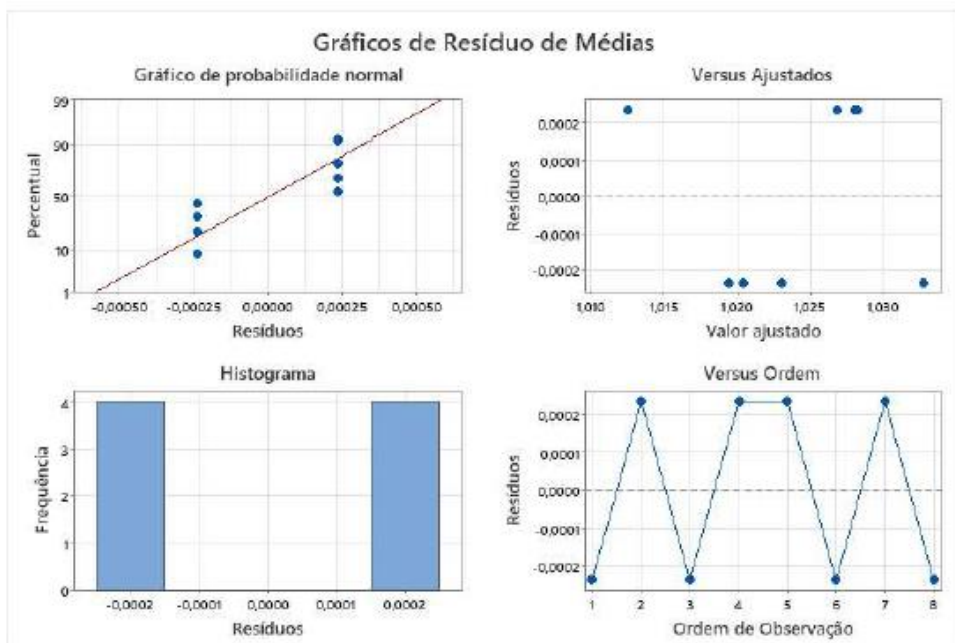
Nível	Broca	Avanço	Velocidade
1	-0,1761	-0,1808	-0,2374
2	-0,2345	-0,2298	-0,1732
Delta	0,0583	0,0489	0,0641
Posto	2	3	1

Tabela de Resposta para Médias

Nível	Broca	Avanço	Velocidade
1	1,020	1,021	1,028
2	1,027	1,027	1,020
Delta	0,007	0,006	0,008
Posto	2	3	1







APÊNDICE E

Análise de Taguchi para o ensaio Bearing

BEARING 2

Análise Taguchi: Bearing versus Broca; Avanço; Velocidade

Análise Linear do Modelo: Razões S/N versus Broca; Avanço; Velocidade

Coefficientes de Modelo Estimados para Razões S/N

Termo	Coef	EP de Coef	T	P
Constante	52,0747	0,04976	1046,541	0,001
Broca FP	0,0311	0,04976	0,624	0,645
Avanço 0,05	0,2250	0,04976	4,522	0,139
Velocida 500	-0,1555	0,04976	-3,125	0,197
Broca*Avanço FP 0,05	-0,0290	0,04976	-0,582	0,664
Broca*Velocida FP 500	-0,0475	0,04976	-0,954	0,515
Avanço*Velocida 0,05 500	0,0932	0,04976	1,873	0,312

Sumário do Modelo

S	R-quad.	R-quad.(aj)
0,1407	97,25%	80,75%

Análise de Variância para Razões S/N

Fonte	GL	SQ Seq	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	F	P
Broca	1	0,007717	0,007717	0,007717	0,39	0,645
Avanço	1	0,405121	0,405121	0,405121	20,45	0,139
Velocidade	1	0,193385	0,193385	0,193385	9,76	0,197
Broca*Avanço	1	0,006718	0,006718	0,006718	0,34	0,664
Broca*Velocidade	1	0,018013	0,018013	0,018013	0,91	0,515
Avanço*Velocidade	1	0,069456	0,069456	0,069456	3,51	0,312
Erro de Resíduos	1	0,019808	0,019808	0,019808		
Total	7	0,720218				

Análise Linear do Modelo: Médias versus Broca; Avanço; Velocidade

Coefficientes de Modelo Estimados para Médias

Termo	Coef	EP de Coef	T	P
Constante	401,783	2,284	175,941	0,004
Broca FP	1,465	2,284	0,641	0,637
Avanço 0,05	10,312	2,284	4,516	0,139
Velocida 500	-7,095	2,284	-3,107	0,198
Broca*Avanço FP 0,05	-1,367	2,284	-0,598	0,657
Broca*Velocida FP 500	-2,175	2,284	-0,952	0,516
Avanço*Velocida 0,05 500	4,139	2,284	1,813	0,321

Sumário do Modelo

S	R-quad.	R-quad.(aj)
6,4591	97,22%	80,56%

Análise de Variância para Médias

Fonte	GL	SQ Seq	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	F	P
Broca	1	17,16	17,16	17,16	0,41	0,637
Avanço	1	850,73	850,73	850,73	20,39	0,139
Velocidade	1	402,69	402,69	402,69	9,65	0,198
Broca*Avanço	1	14,94	14,94	14,94	0,36	0,657
Broca*Velocidade	1	37,84	37,84	37,84	0,91	0,516
Avanço*Velocidade	1	137,06	137,06	137,06	3,29	0,321
Erro de Resíduos	1	41,72	41,72	41,72		
Total	7	1502,14				

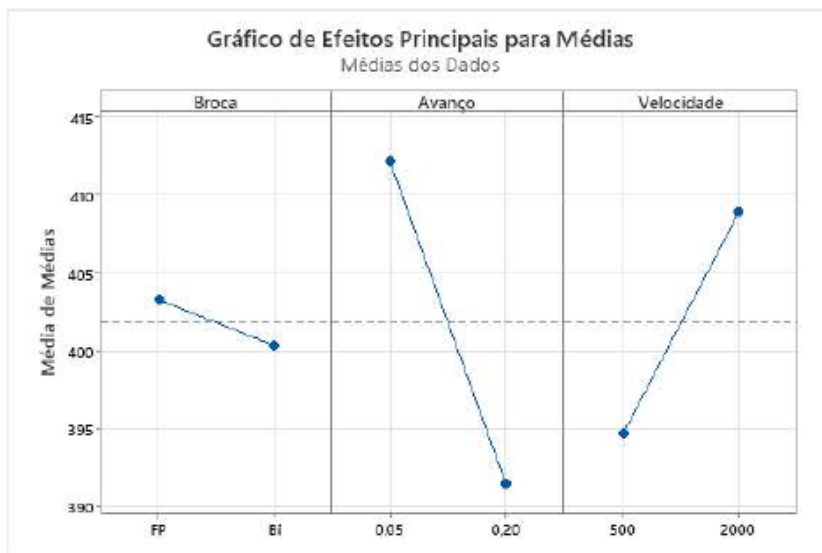
Tabela de Resposta para Razões sinal-ruído

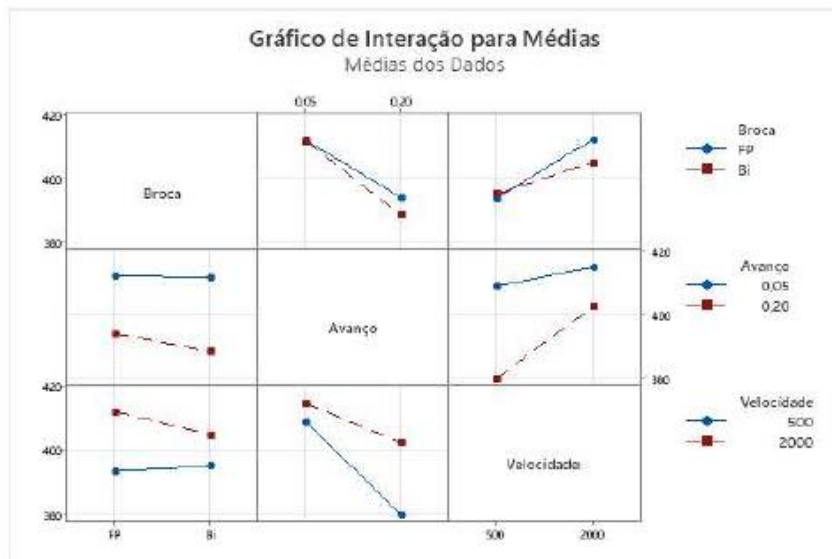
Maior é melhor

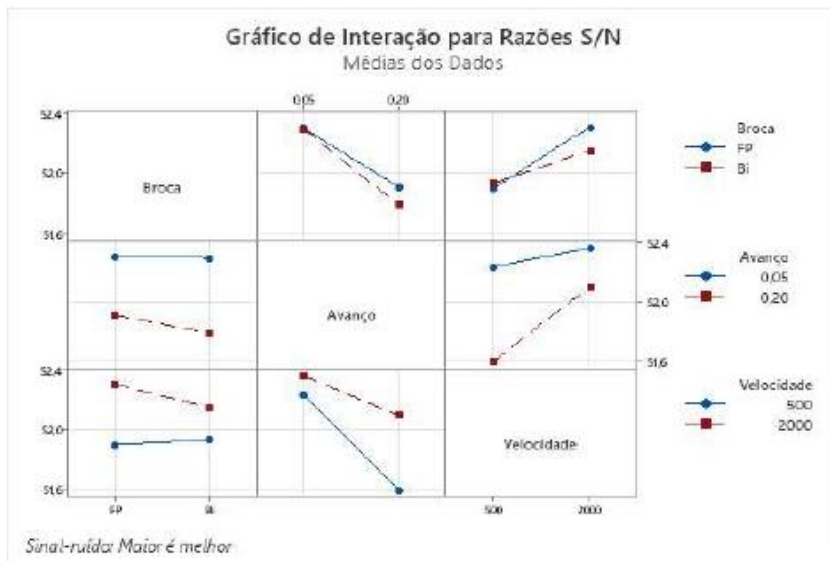
Nível	Broca	Avanço	Velocidade
1	52,11	52,30	51,92
2	52,04	51,85	52,23
Delta	0,06	0,45	0,31
Posto	3	1	2

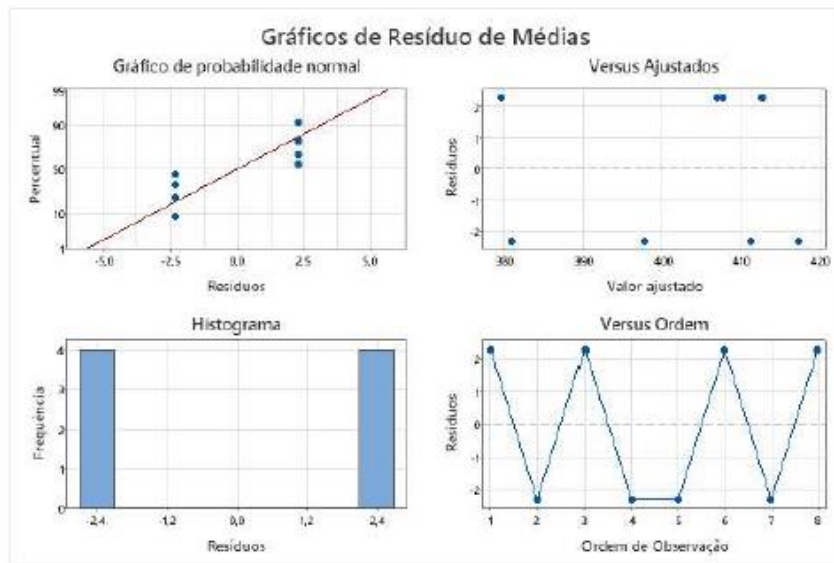
Tabela de Resposta para Médias

Nível	Broca	Avanço	Velocidade
1	403,2	412,1	394,7
2	400,3	391,5	408,9
Delta	2,9	20,6	14,2
Posto	3	1	2









ANEXO A



HexPly® 8552
Epoxy matrix (180°C/356°F curing matrix)



Product Data Sheet

Description

HexPly® 8552 is a high performance tough epoxy matrix for use in primary aerospace structures. It exhibits good impact resistance and damage tolerance for a wide range of applications.

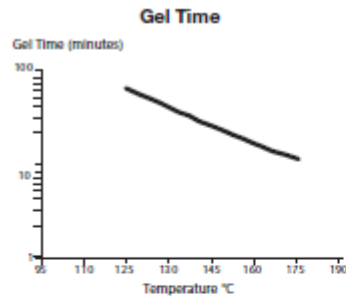
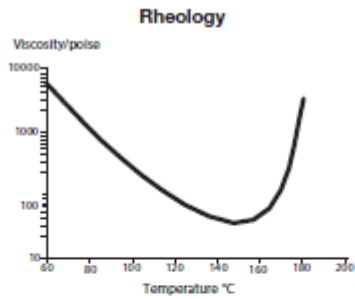
HexPly® 8552 is an amine cured, toughened epoxy resin system supplied with unidirectional or woven carbon or glass fibres.

HexPly® 8552 was developed as a controlled flow system to operate in environments up to 121°C (250°F).

Benefits and Features

- Toughened epoxy matrix with excellent mechanical properties
- Elevated temperature performance
- Good translation of fibre properties
- Controlled matrix flow in processing
- Available on various reinforcements
- Excellent drape and tack

Resin Matrix Properties





HexPly® 8552
Epoxy matrix (180°C/356°F curing matrix)



Product Data Sheet

Prepreg Properties - HexPly® 8552 UD Carbon Prepregs

Physical Properties

	Units	AS4	IM7
Fibre Density	g/cm ³ (lb/in ³)	1.79 (0.065)	1.77 (0.064)
Filament count/tow		12K	12K
Resin density	g/cm ³ (lb/in ³)	1.30 (0.047)	1.30 (0.047)
Nominal Cured Ply Thickness 8552 /35%/134	mm (inch)	0.130 (0.0051)	0.131 (0.0052)
Nominal Fibre Volume	%	57.42	57.70
Nominal Laminate Density	g/cm ³ (lb/in ³)	1.58 (0.057)	1.57 (0.057)

Mechanical Properties

Test	Units	Temp °C (°F)	Condition	AS4	IM7
0° Tensile Strength	MPa (ksi)	-55 (-67)	Dry	1903 (267)	2572 (373)
		25 (77)	Dry	2207 (320)	2724 (395)
		91 (195)	Dry	-	2538 (368)*
90° Tensile Strength	MPa (ksi)	-55 (-67)	Dry	-	174 (25.3)
		25 (77)	Dry	81 (11.7)	64 (9.3)
		93 (200)	Dry	75 (10.9)	92 (13.3)*
0° Tensile Modulus	GPa (msi)	-55 (-67)	Dry	134 (19.4)	163 (23.7)
		25 (77)	Dry	141 (20.5)	164 (23.8)
		91 (195)	Dry	-	163 (23.7)*
90° Tensile Modulus	GPa (msi)	-	-	-	-
		25 (77)	Dry	10 (1.39)	12 (1.7)
		93 (200)	Dry	8 (1.22)	10 (1.5)*
0° Compression Strength	MPa (ksi)	-55 (-67)	Dry	1586 (230)	-
		25 (77)	Dry	1531 (222)	1690 (245)
		91 (195)	Dry	1296 (184)	1483 (215)
0° Compression Modulus	GPa (msi)	-55 (-67)	Dry	124 (18)	-
		25 (77)	Dry	128 (18.6)	150 (21.7)
		91 (195)	Dry	122 (17.7)	162 (23.5)
0° ILSS (Shortbeam shear)	MPa (ksi)	-55 (-67)	Dry	164 (23.8)	-
		25 (77)	Dry	128 (18.5)	137 (19.9)
		91 (195)	Dry	122 (14.7)	94 (13.6)*
		25 (77)	Wet	117 (16.9)	115 (16.7)
		71 (160)	Wet	84 (12.2)	80 (11.6)**
		91 (195)	Wet	78 (11.3)	-
In-plane Shear Strength	MPa (ksi)	25 (77)	Dry	114 (16.6)	120 (17.4)
		93 (200)	Dry	105 (15.2)	106 (15.4)*

Bold 93°C (200°F) Bold* 104°C (220°F) Bold 82°C (180°F)**



HexPly® 8552
Epoxy matrix (180°C/356°F curing matrix)



Product Data Sheet

Prepreg Properties - HexPly® 8552 Woven Carbon Prepregs (AS4 Fibre)

Physical Properties

	Units	AGP193-PW	AGP 280-5H
Fibre Type	-	AS4 3K	AS4 3K
Fibre density	g/cm ³ (lb/in ³)	1.77 (0.065)	1.77 (0.065)
Weave	-	Plain	5HS
Mass	g/m ² (oz/yd ²)	193 (5.69)	286 (8.44)
Weight Ratio, Warp : Fill		50 :50	50 :50
Nominal cured ply thickness @ 37% resin content	mm (inch)	0.195 (0.0076)	0.289 (0.0114)
Nominal Fibre Volume	%	55.29	55.29
Nominal Laminate Density	g/cm ³ (lb/in ³)	1.57 (0.057)	1.57 (0.057)

Mechanical Properties

Test	Units	Temp°C (°F)	Condition	AGP193-PW	AGP280- 5H
0° Tensile Strength	MPa (ksi)	-55 (-67)	Dry	766 (111)	828 (120)
		25 (77)	Dry	828 (120)	876 (127)
		91 (195)	Dry	-	903 (131)
90° Tensile Strength	MPa (ksi)	-55 (-67)	Dry	710 (103)	752 (109)
		25 (77)	Dry	793 (115)	800 (116)
		93 (200)	Dry	759 (110)	772 (112)
0° Tensile Modulus	GPa (msi)	-55 (-67)	Dry	66 (9.5)	70 (10.2)
		25 (77)	Dry	68 (9.8)	67 (9.7)
		91 (195)	Dry	-	69 (10)
90° Tensile Modulus	GPa (msi)	-55 (-67)	Dry	66 (9.6)	67 (9.7)
		25 (77)	Dry	66 (9.5)	66 (9.5)
		93 (200)	Dry	68 (9.8)	65 (9.4)
0° Compression Strength	MPa (ksi)	-55 (-67)	Dry	959 (139)	-
		25 (77)	Dry	883 (128)	924 (134)
		91 (195)	Dry	759 (110)	752 (109)
0° Compression Modulus	GPa (msi)	-55 (-67)	Dry	60 (8.7)	-
		25 (77)	Dry	60 (8.7)	64 (9.3)
		91 (195)	Dry	61 (8.8)	67(9.7)
0° ILSS (Shortbeam shear)	MPa (ksi)	-55 (-67)	Dry	101 (14.6)	-
		25 (77)	Dry	84 (12.2)	79 (11.4)
		91 (195)	Dry	70 (10.2)	-
		-55 (-67)	Wet	75 (10.9)	69 (10)
		25 (77)	Wet	72 (10.4)	-
		91 (195)	Wet	59 (8.5)	-

Bold 93°C (200°F) Bold* 104°C (220°F) Bold 82°C (180°F)**



HexPly® 8552
Epoxy matrix (180°C/356°F curing matrix)



Product Data Sheet

Prepreg Properties - HexPly® 8552 Woven Carbon Prepregs (IM7 Fibre)

Physical Properties

	Units	SPG 196-P	SPG 370-8H
Fibre Type	-	IM7 6K	IM7 6K
Fibre density	g/cm ³ (lb/in ³)	1.77 (0.064)	1.77 (0.064)
Weave	-	Plain	8HS
Mass	g/m ² (oz/yd ²)	196 (5.78)	374 (11.03)
Weight Ratio, Warp : Fill		50 :50	49 :51
Nominal cured ply thickness @ 37% resin content	mm (inch)	0.199 (0.0078)	0.380 (0.0150)
Nominal Fibre Volume	%	55.57	55.57
Nominal Laminate Density	g/cm ³ (lb/in ³)	1.56 (0.056)	1.56 (0.056)

Mechanical Properties

Test	Units	Temp°C (°F)	Condition	SPG 196-PW	SPG 370-SH
0° Tensile Strength	MPa (ksi)	-55 (-67)	Dry	979 (142)	965 (140)
		25 (77)	Dry	1090 (158)	1014 (147)
		91 (195)	Dry	-	-
90° Tensile Strength	MPa (ksi)	-55 (-67)	Dry	862 (125)	903 (131)
		25 (77)	Dry	945 (137)	959 (139)
		93 (200)	Dry	979 (142)*	879 (130)*
0° Tensile Modulus	GPa (msi)	-55 (-67)	Dry	85 (12.3)	86 (12.5)
		25 (77)	Dry	85 (12.3)	86 (12.4)
		91 (195)	Dry	-	-
90° Tensile Modulus	GPa (msi)	-55 (-67)	Dry	80 (11.6)	81 (11.7)
		25 (77)	Dry	80 (11.6)	81 (11.7)
		93 (200)	Dry	79 (11.5)*	79 (11.5)*
0° ILSS (Shortbeam shear)	MPa (ksi)	-55 (-67)	Dry	-	-
		25 (77)	Dry	88 (12.7)	90 (13)
		91 (195)	Dry	69 (10)*	74 (10.8)*
		25 (77)	Wet	80 (11.6)	83 (12.1)
		71 (160)	Wet	61 (8.8)**	63 (9.1)**
		91 (195)	Wet	-	-

Bold 93°C (200°F) Bold* 104°C (220°F) Bold 82°C (180°F)**

Typical Neat Resin Data

Colour	Yellow	
Density	1.301 g/cc	(0.0470 lb/in ³)
Glass Transition Temperature, T _g dry	200°C	(392°F)
Glass Transition Temperature, T _g wet	154°C	(309°F)
Tensile Strength	121 MPa	(17.5 ksi)
Tensile Modulus	4670 MPa	(0.677 msi)



HexPly® 8552
Epoxy matrix (180°C/356°F curing matrix)



Product Data Sheet

Curing Conditions

Cure cycle for monolithic components

1. Apply full vacuum (1 bar).
2. Apply 7 bar gauge autoclave pressure.
3. Reduce the vacuum to a safety value of 0.2 bar when the autoclave pressure reaches approximately 1 bar gauge.
4. Heat at 1- 3°C/min (2-5°F/min) to 110°C ± 5°C (230°F ± 9°F)
5. Hold at 110°C ± 5°C (230°F ± 9°F) for 60 minutes ± 5 minutes.
6. Heat at 1-3°C/min (2-5°F/min) to 180°C ± 5°C (356°F ± 9°F)
7. Hold at 180°C ± 5°C (356°F ± 9°F) for 120 minutes ± 5 minutes.
8. Cool at 2 - 5°C (4-9°F) per minute
9. Vent autoclave pressure when the component reaches 60°C (140°F) or below.

Cure cycle for honeycomb sandwich components

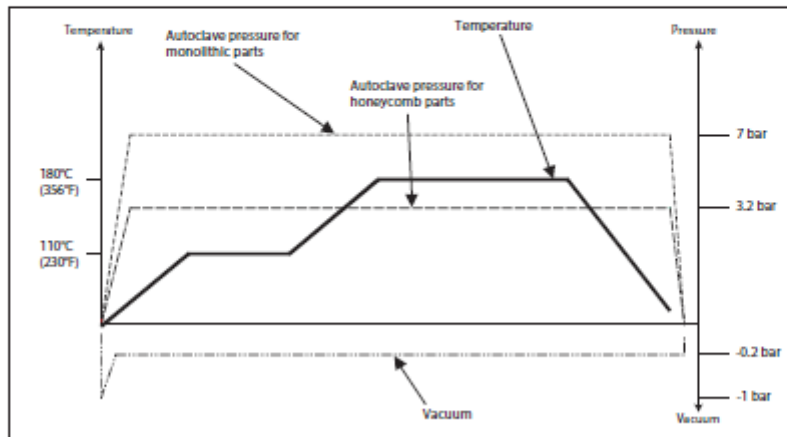
1. Apply full vacuum (1 bar).
2. Apply 3.2 bar gauge autoclave pressure.
3. Reduce the vacuum to a safety value of 0.2 bar when the autoclave pressure reaches approximately 1 bar gauge.
4. Heat at 1- 3°C/min (2-5°F/min) to 110°C ± 5°C (230°F ± 9°F)
5. Hold at 110°C ± 5°C (230°F ± 9°F) for 60 minutes ± 5 minutes.
6. Heat at 1-3°C/min (2-5°F/min) to 180°C ± 5°C (356°F ± 9°F)
7. Hold at 180°C ± 5°C (356°F ± 9°F) for 120 minutes ± 5 minutes.
8. Cool at 2 - 5°C (4-9°F) per minute
9. Vent autoclave pressure when the component reaches 60°C (140°F) or below.

Note: For both cure cycles – at each stage, use the temperature shown by the leading thermocouple.

Heat-up rates are dependent on component thickness, eg, slow heat-up rates should be used for thicker components and large tools. Accurate temperature measurements of the component should be made during the cure cycles by using thermocouples.

Performance testing should accompany alternative cure cycles to ensure suitability for the particular application.

Curing Cycle for Honeycomb and Monolithic Components



Copyright © 2021 - Hexcel Corporation - All Rights Reserved

5



HexPly® 8552
Epoxy matrix (180°C/356°F curing matrix)



Product Data Sheet

Storage Life

- Tack Life: 10 days at RT (23°C/73°F)
- Out Life: 30 days at RT (23°C/73°F)
- Shelf Life: 12 months at -18°C(0°F) (maximum, from date of manufacture)

Definitions:

- Shelf Life: The maximum storage life for HexPly® prepreg, upon receipt by the customer, when stored continuously, in a sealed moisture-proof bag, at -18°C(0°F). To accurately establish the exact expiry date, consult the box label.
- Tack Life: The time, at room temperature, during which prepreg retains enough tack for easy component lay-up.
- Out Life: The maximum accumulated time allowed at room temperature between removal from the freezer and cure.

Precautions for Use

The usual precautions when handling uncured synthetic resins and fine fibrous materials should be observed, and a Safety Data Sheet is available for this product. The use of clean disposable inert gloves provides protection for the operator and avoids contamination of material and components.

For more information

Hexcel is a leading worldwide supplier of composite materials to aerospace and industrial markets. Our comprehensive range includes:

- HexTow® carbon fibers
- HexFlow® RTM resins
- Engineered core
- HexForce® reinforcements
- HexBond® adhesives
- Engineered products
- HiMax® multiaxial reinforcements
- HexTool® tooling materials
- Polyspeed® laminates & pultruded profiles
- HexPly® prepreps
- HexWeb® honeycomb
- HexAM® additive manufacturing
- HexMC®-i molding compounds
- Acousti-Cap® sound attenuating honeycomb

For U.S. quotes, orders and product information call toll-free 1-800-688-7734. For other worldwide sales office telephone numbers and a full address list, please go to:

<https://www.hexcel.com/contact>

©2023 Hexcel Corporation – All rights reserved. Hexcel Corporation and its subsidiaries ("Hexcel") believe that the technical data and other information provided herein was materially accurate as of the date this document was issued. Hexcel reserves the right to update, revise or modify such technical data and information at any time. Any performance values provided are considered representative but do not and should not constitute a substitute for your own testing of the suitability of our products for your particular purpose. Hexcel makes no warranty or representation, express or implied, including but not limited to the implied warranties of merchantability and fitness for a particular purpose, and disclaims any liability arising out of or related to, the use of or reliance upon any of the technical data or information contained in this document.

FPA-070-0023

ANEXO B

FEEDRATES	S.A.E	METRIC
Corte máximo	650 ipm	16.5 m/min
Rápidos em X	1000 ipm	25.4 m/min
Rápidos em Y	1000 ipm	25.4 m/min
Rápidos em Z	1000 ipm	25.4 m/min

AXIS MOTORS	S.A.E	METRIC
Impulso máximo X	2550 lbf	11343 N
Impulso máximo Y	2550 lbf	11343 N
Impulso máximo Z	4200 lbf	18683 N

TOOL CHANGER	S.A.E	METRIC
Tipo	SMTC	SMTC
Capacidade	30+1	30+1
Diâmetro máximo da ferramenta (cheio)	2.5 in	64 mm
Diâmetro máximo da ferramenta (adjacente vazio)	5.0 in	127 mm
Comprimento máximo da ferramenta (a partir da linha do indicador)	11 in	279 mm
Peso máximo da ferramenta	12.0 lb	5.4 kg
Ferramenta a ferramenta (média)	2.80 s	2.80 s
Limalha a limalha (média)	3.60 s	3.60 s

CURSOS	S.A.E	METRIC
Eixo X	30.00 in	762 mm
Eixo Y	16.00 in	406 mm
Eixo Z	20.00 in	508 mm
Nariz do spindle à placa magnética (- máx.)	24.0 in	610 mm
Do nariz do spindle à mesa (- mín)	4.0 in	102 mm

SPINDLE	S.A.E	METRIC
Valor nominal máximo	30.0 hp	22.4 kW
Velocidade máxima	10000 rpm	10000 rpm
Torque máximo	90.0 ft-lbf @ 2000 rpm	122.0 Nm @ 2000 rpm
Sistema de comando	Inline Direct-Drive	Inline Direct-Drive
Cone	CT40 BT40 HSK-A63	CT40 BT40 HSK-A63
Lubrificação do casquilho	Air / Oil Injection	Air / Oil Injection
Líquido de refrigeração	Liquid Cooled	Liquid Cooled

Anexo C

MESA	S.A.E	METRIC
Comprimento	36.0 in	914 mm
Largura	14.0 in	356 mm
Largura da ranhura T	0.626 in to 0.630 in	15.90 mm to 16.00 mm
Distância do centro da ranhura T	4.92 in	125 mm
Número de ranhuras T padrão	3	3
Peso máximo na mesa (distribuição uniforme)	3000 lb	1361 kg

GERAL	S.A.E	METRIC
Capacidade de refrigeração	55 gal	208 L

AIR REQUIREMENTS	S.A.E	METRIC
Ar necessário	4 scfm @ 100 psi	113 L/min @ 6.9 bar
Tubo de ar em linha	3/8 in	3/8 in
Transmissor de binário (Ar)	3/8 in	3/8 in
Pressão min. do ar	80 psi	80 psi

DIMENSIONS - SHIPPING	S.A.E	METRIC
Paleta doméstica	103.0 in x 102.0 in x 106.0 in	262 cm x 259 cm x 269 cm
Paleta de exportação	98.0 in x 92.0 in x 101.0 in	249 cm x 234 cm x 257 cm
Peso	7800 lb	3550.0 kg

ANEXO C

701.024.000 Solid carbide drill 3xD



Art. Nr.: 701.024.000

Shopping Cart

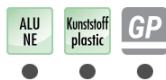
Stock:



Tool Data



Tool Recommendation



Capabilities



eCl@ss 7.1

21 18 01 01 Full drill (non-detachable cutting edges)

D1 (Diameter):	2,40
D2 (Shaft diameter):	2,40
L2 (Length of cut):	14
L1 (Total length):	43
Shank design:	HA

701.060.000 Broca helicoidal de metal duro 3xD



Item número.: 701.060.000

carrinho de compras

Acampamento:



Dados da ferramenta



Recomendação de ferramenta



Possíveis usos



eCl@ss 7.1

21 18 01 01 Broca sólida (arestas de corte não liberáveis)

D1 (diâmetro da aresta de corte) :	6h00
D2 (diâmetro do eixo) :	6h00
L2 (comprimento da aresta de corte) :	28
L1 (comprimento total) :	66
Projeto do eixo:	HA

Anexo C

850.037.00 Solid carbide step drill for tapping drillhole



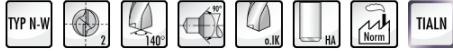
Art. Nr.: 850.037.00

Shopping Cart

Stock:



Tool Data



Tool Recommendation



Capabilities



eCl@ss 7.1

21 18 01 02 Stepped drill (non-detachable cutting edges)

D1 (Diameter):	3,70
D2 (Shaft diameter):	6,00
L2 (Length of cut):	24
L1 (Total length):	66
B1 (Step length):	14,00
B2 (Distance step):	15,82
Shank design:	HA
Coating:	TIALN

ANEXO D



Product Specification

Material	25633.186
Material description	Diiodomethane
Grade	AnalaR NORMAPUR for mineralogy
CAS Number	75-11-6
Molecular formula	CH ₂ I ₂
Molecular mass	267.84

Characteristics	Specifications
Assay (on anhydrous substance)	≥ 99.4 %
Stabilizer (Copper)	About 45 g/l
Acidity	≤ 0.003 meq/g
Density (20/4)	3.310 - 3.322
Solidification point	5.0 - 6.2 °C

Signature

We certify that this batch conforms to the specifications listed above.

This document has been produced electronically and is valid without a signature.

Isabelle Habay, Head of Laboratory - Briare
VWR International S.A.S.; Z.I. de Vaugereau; FR-45250
Briare; France

For Professional use in Laboratory or Manufacturing. Not for use as an Active Pharmaceutical Ingredient or Food or Animal Feed. Suitability and intended use of the product remains the responsibility of the user.

VWR International LLC, Radnor Corporate Center, Building One, Suite 200, 100 Matsonford Road, Radnor, PA

19087, USA

VWR International bv, Haasrode Research Park Zone 2020, Geldenaaksebaan 464, 3001 Leuven, Belgium

25633.186 - Page 1 / 1

ANEXO E

13. SYSTEM TECHNICAL DATA

POWER SUPPLY CHARACTERISTICS

◆ TYPE OF POWER SUPPLY	at constant potential	
◆ NOMINAL VOLTAGE	230 V	115 V
◆ MAXIMUM VOLTAGE VARIATION	± 15 %	± 15 %
◆ NOMINAL CURRENT	6A	12 A
◆ FREQUENCY	50/60Hz	50/60Hz
◆ POWER EMITTED	1.4 kVA	1.4 kVA
◆ APPARENT LINE RESISTANCE	0.5 Ω	0.2 Ω
◆ PROTECTIVE FUSES (F1 - F2 - F3 - F4) (quick fuse)	8AF - 250 V	12..5AF - 250 V
◆ CIRCUIT PROTECTIVE FUSES (LOCATED ON THE SECONDARY OF THE	(F5) n° 1 mini-fuse 630 mA to 125V axial (F6) n° 1 mini-fuse 500 mA to 125V axial	

X-RAY SYSTEM - TECHNICAL DATA

◆ GENERATOR	at constant potential at 200 kHz frequency		
◆ HIGH NOMINAL VOLTAGE	60 kV - 70 kV		
◆ NOMINAL CURRENT	4 mA - 8 mA		
◆ NOMINAL ELECTRIC POWER AT 0...1 sec	560 W	70 kV	8 mA
	480 W	60 kV	8 mA
	280 W	70 kV	4 mA
	240 W	60 kV	4 mA
◆ REFERENCE CURRENT-TIME PRODUCT	0.8 mAs	8 mA	0.1 sec
	0.4 mAs	4 mA	0.1 sec
◆ INTENSITY OF RADIATION IN THE AIR	>30 µGy/h at 1 meter away from focal spot		
◆ TOTAL FILTRATION	equivalent to 2 mm Al at 70kV		
◆ HALF VALUE LAYER (HVL) AT 70 kV	> 1.6 mm Al		
◆ RADIATION LEAKAGE	less than 0..25 mGy/h at 1 meter from focal spot		
◆ LINEARITY	10 %		
◆ REPRODUCIBILITY	0.05		
◆ ELECTRICAL CLASSIFICATION	Class "I" - Type "B" - Intermittent Service		

MEASUREMENT CONDITIONS

- ◆ kVp non-invasive measurement
- ◆ mAs direct measurement with digital instrument
- ◆ EXPOSURE TIME (sec) "non-invasive" measurement with digital

ACCURACY OF TECHNICAL DATA

- ◆ NOMINAL VOLTAGE OF X-RAY TUBE ± 10 %
- ◆ NOMINAL CURRENT OF THE X-RAY TUBE ± 10 %
- ◆ SELECTED EXPOSURE TIME ± 0.005 from 0.020 to 0.1 sec
± 5 from 0.125 to 3.2 sec

WEIGHT

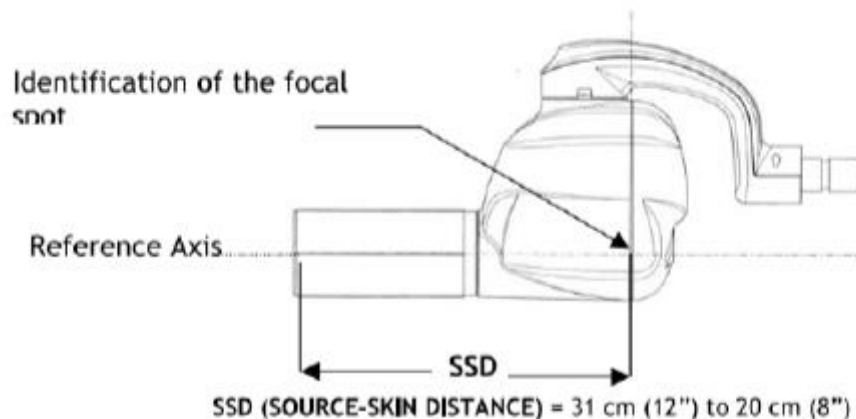
- ◆ TOTAL WEIGHT 25 Kg.
- ◆ WEIGHT OF TUBEHEAD 5.5 Kg.

ENVIRONMENTAL CHARACTERISTICS

- ◆ OPERATING TEMPERATURE +5° C +40° C
- ◆ WAREHOUSE TEMPERATURE -15° C +50° C
- ◆ HUMIDITY 25 % - 75 %

TECHNICAL CONE DATA

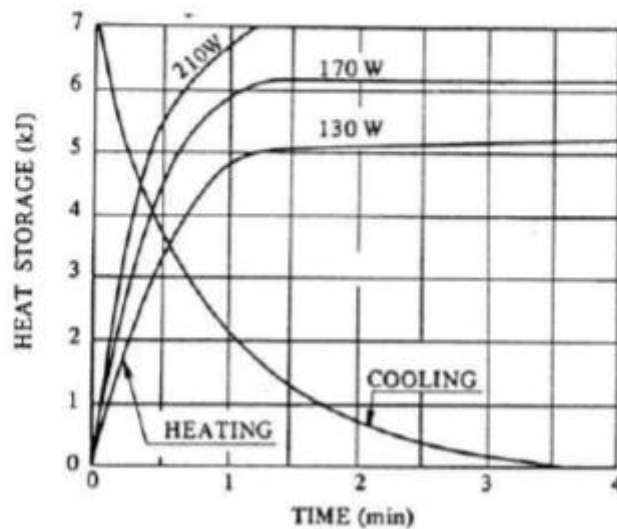
- ◆ SOURCE-SKIN DISTANCE (SSD)
 - SHORT 8" CONE 20 cm (8")
 - LONG 12" CONE 31 cm (12")
 - RECTANGULAR CONE 31 cm (12")
- ◆ DIAMETER OF X-RAY BEAM
 - WITH 8" OR 12" CONE ≤ 60 mm
 - WITH RECTANGULAR CONE 44x35 mm



X-RAY TUBE TECHNICAL DATA

◆ X-RAY TUBE	TOSHIBA DG-0738-DC
◆ SIZE OF FOCAL SPOT	0.7 - (IEC 336/1993)compliant
◆ NOMINAL ANODE VOLTAGE	70 kV
◆ NOMINAL ANODE CURRENT	8 mA
◆ NOMINAL ANODE POWER	560 W (70 kV - 8 mA - form factor = 1)
◆ EXPOSURE TIME	0.08 ÷ 3.2 sec in 17 steps
◆ NOMINAL HIGH VOLTAGE AND MAXIMUM CURRENT	70kV - 8 mA ±10 %
◆ TUBE INHERENT FILTRATION	equivalent to 0.8 mm Al
◆ ANODE MATERIAL	tungsten
◆ ANODE INCLINATION	20°
◆ ANODE HEAT LOAD	7 KJ (10 kHU)
◆ MAXIMUM CONTINUOUS HEAT	17.5 W
◆ OPERATING CYCLE	1:32

ANODE THERMAL CHARACTERISTICS



ANEXO F

Designed to make your life easier.

Technology you can rely on.

The technology behind the RVG 5100 system is the result of decades of experience in digital radiography systems engineering. Innovative sensor technology with optical fiber yields high image resolution to help you make confident diagnoses every time. The technology also provides greater exposure latitude to help you capture the right image the first time.

Simple sophistication.

Complete integration.

Simple, efficient and intuitive, Carestream Dental's imaging software provides all the tools to manipulate, print and easily archive your images. What's more, you will be able to integrate other Carestream Dental dental

imaging systems and solutions and therefore minimize the learning curve for your staff. Also, images integrate easily into your practice management software.

Count on Carestream Dental for ongoing support and guidance.

At Carestream Dental, we're committed to providing the ongoing guidance and support you need to get the most out of your imaging system. A wide network of authorized distributors and Carestream Dental product experts are ready to answer your questions. They're prepared to help you capture the highest quality radiographs from day one – and maximize your return on investment.



Technical Specifications

True image resolution	14 lp/mm	
Theoretical sensor resolution	27.03 lp/mm	
Technology	RVG sensor technology with optical fiber	
Connection	USB 2 – high speed	
	Sensor Size 1	Sensor Size 2
	All-purpose sensor providing the best compromise between ease of use and active area	Designed with a larger surface - active area is 60% greater than size 1 sensor for Bite Wing images.
Outside dimensions	27.5 x 37.7 mm	32.2 x 44.1 mm
Dimensions of active area	22 x 30 mm	27 x 36 mm
Matrix dimension	1200 x 1600	1440 x 1920

Would you like to know more?

www.carestreamdental.com

Alternatively, contact your local authorised dealer.

Want to subscribe to our newsletter?

E-mail dentalnews@carestream.com.