



ESTUDO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE MATERIAS COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA APÓS FURAÇÃO

FILIFE ALBERNAZ DE CARVALHO

julho de 2023

ESTUDO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE MATERIAIS COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA APÓS FURAÇÃO

Filipe Albernaz de Carvalho

Junho 2023

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

ESTUDO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE MATERIAIS COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA APÓS FURAÇÃO

Filipe Albernaz de Carvalho

1181158

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor Luís Miguel Pereira Durão e coorientação do Doutor João Emílio Raimundo Carrilho Matos.

2023

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

AGRADECIMENTOS

A conclusão desta dissertação marca o término de uma etapa percorrida ao longo dos últimos cinco anos. Desde já, gostaria de agradecer pôr todo o apoio recebido durante o meu percurso académico e durante a escrita desta dissertação, sem o qual, estes últimos anos teriam sido muito mais difíceis. Assim, sendo passo a expressar o meu mais profundo agradecimento:

Ao Doutor Luís Miguel Pereira Durão pela sua orientação, apoio e conhecimento compartilhado ao longo desta jornada, assim como todo o tempo disponibilizado.

Ao Doutor João Emílio Raimundo Carrilho Matos, pelo auxílio e contribuição valiosa para este trabalho, o meu maior reconhecimento.

Ao Eng. Victor Moreira, pela assistência dada no Laboratório de Tecnologia Mecânica e à Mestre Fátima Andrade que me cedeu o acesso às instalações do Laboratório de Ensaios Técnicos, e ainda, ao ISEP, o *mui nobre* Instituto que me acolheu estes cinco anos e me deu a oportunidade de desenvolver este trabalho.

Ao Doutor José Luís Soares Esteves e ao Doutor Federico Danzi, pela simpatia com que me receberam no INEGI, e pelo auxílio e conhecimento partilhados. Expresso ainda o meu mais profundo agradecimento ao INEGI e à FEUP pela cedência das suas instalações para o desenvolvimento deste projeto.

A todos os meus amigos, os quais me acompanharam lado a lado durante esses anos de estudo, compartilhando conhecimentos, apoiando, nos bons e maus momentos e proporcionando momentos felizes.

À minha querida Érica, por todo o companheirismo e ajuda durante todas as etapas desta monografia, em especial pela revisão da escrita e, mais importante, por estar ao meu lado nos momentos mais desafiantes.

Aos meus queridos pais, agradeço profundamente por todo o tempo, apoio e encorajamento que sempre proporcionaram ao longo desta jornada. Foram uma base sólida que me sustentou e uma fonte inesgotável de inspiração. Sem o vosso constante incentivo e sacrifícios, esta conquista não seria possível. Sou imensamente grato pela confiança que depositaram em mim e pelo amor incondicional que sempre demonstraram. Este sucesso é, sem dúvida, um reflexo do vosso apoio incansável. Obrigado por serem os melhores pais do mundo.

página propositadamente em branco

RESUMO

Os materiais compósitos de matriz polimérica estão cada vez mais presentes na engenharia devido à sua alta resistência específica, combinando boa resistência mecânica com baixo peso. Estas propriedades permitem o seu uso em várias áreas como a medicina, desporto, aeroespacial, defesa militar e indústria automóvel.

Embora a produção de peças em materiais compósitos seja vantajosa, a sua montagem em conjuntos exige, frequentemente, operações de maquinagem, tais como a furação. Durante o processo de furação, é comum que os materiais compósitos sofram danos que afetam negativamente as suas propriedades mecânicas e a confiabilidade geral do produto. Estes danos podem estar relacionados com diversos fatores, tais como, a velocidade de avanço, velocidade de rotação da broca e geometria da broca, sendo um dos mais frequentes a delaminação.

Esta investigação visa aferir a extensão da área danificada pela furação em laminados de resina de epóxido e fibra de carbono (material de matriz polimérica) e determinar a sua influência na resistência mecânica final.

Para tal, foi realizado um estudo utilizando 32 provetes de carbono/epóxido, nos quais foram efetuados furos. Foram realizados segundo 8 hipóteses experimentais, com duas velocidades de avanço e rotação distintas e brocas com 2 tipos de geometria diferente. Para determinar as propriedades iniciais do material foram fabricados 11 provetes: 4 com as fibras orientadas a 0°; 4 com as fibras orientadas a 90°; e a 3 *cross-ply*. Após realizada a furação, a área de dano foi calculada através das imagens resultantes da radiografia com líquido contrastante. Por fim, foram efetuados os ensaios destrutivos (*Pin Bearing e Bearing*) de modo a avaliar a resistência mecânica de cada uma das hipóteses e associá-las com a área de dano.

Após a análise dos resultados verificou-se que uma maior área de dano nem sempre representa uma diminuição direta da resistência mecânica final do material.

Um aumento na velocidade de avanço resultará em uma área de dano maior.

Das configurações usadas, a broca de geometria brad associada a uma velocidade de rotação de 1500 RPM e uma velocidade de avanço 0,1 mm/rev, é a escolha mais acertada para a obtenção do melhor acabamento e resistência *bearing* final.

PALAVRAS-CHAVE

Furação, Laminado reforçado com fibra de carbono, Delaminação, Radiografia, Ensaio *Pin-Bearing*, Ensaio *Bearing*.

página propositadamente em branco

ABSTRACT

Composite materials with a polymer matrix are increasingly present in engineering due to their high specific strength, combining good mechanical strength with low weight. These properties allow their use in various areas such as medicine, sports, aerospace, defense, and the automotive industry.

Although the production of composite material components is advantageous, their assembly into assemblies often requires machining operations such as drilling. During the drilling process, it is common for composite materials to suffer damage that negatively affects their mechanical properties and overall product reliability. These damages can be related to various factors such as feed rate, drill rotation speed, and drill geometry. One of the most well-known and frequent damages is delamination.

This study aims to assess the extent of the damaged area caused by drilling in epoxy resin and carbon fiber laminates (polymer matrix material) and determine its influence on the final mechanical strength.

This monograph will publish the study conducted on 32 carbon/epoxy specimens. In these specimens, the holes were made according to 8 hypotheses, with two different feed and rotation speeds, as well as 2 distinct drill geometries. Additionally, 11 specimens were fabricated to determine the initial properties of the material (4 with fibers oriented at 0° , 4 with fibers oriented at 90° , and 3 cross-ply). After drilling, the damage area was calculated using the images that resulted from X-ray examination with a contrasting liquid. Finally, destructive tests (Pin Bearing and Bearing) were performed to evaluate the mechanical strength of each hypothesis and associate them with the damage area.

After analyzing the results, was observed that a larger damage area does not always directly correlate with a decrease in the final mechanical strength of the material.

An increase in the feed rate leads to a larger damage area.

Among the tested configurations, the brad drill with a rotation speed of 1500 RPM and a feed rate of 0.1 mm/rev is the most suitable choice for achieving the best finishing and final bearing strength.

KEYWORDS

Drilling, Carbon fiber reinforced laminate, Delamination, Radiography, Pin-Bearing test, Bearing test.

página propositadamente em branco

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABELAS	IX
LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS.....	XI
1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Âmbito.....	13
1.2. Objetivos	14
1.3. Guia de leitura	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1. Materiais compósitos.....	15
2.1.1. Aplicação de materiais compósitos.....	20
2.2. Furação de materiais compósitos	25
2.2.1. Métodos não convencionais de furação	25
2.2.2. Método convencional de furação	29
2.2.3. Parâmetros que influenciam a furação convencional	29
2.2.4. Tipo de dano em materiais compósitos reforçados com fibras.....	32
2.3. Avaliação do dano	35
2.3.1. Critérios analíticos.....	35
2.3.2. Ensaio não destrutivo	37
2.3.3. Ensaio destrutivo	38
3. MÉTODOS E APLICAÇÃO	40
3.1. Preparação dos provetes.....	40
3.1.1. Fabrico do laminado.....	40
3.1.2. Propriedades do laminado.....	41
3.2. Plano de furação.....	43
3.2.1. Radiografias.....	44
3.2.2. Processamento de imagem.....	45
3.3. Ensaio mecânico.....	49
3.3.1. Bearing	49
3.3.2. Pin Bearing	50
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.1. Delaminação.....	51
4.2. Pin Bearing.....	55
4.3. Bearing.....	57
4.4. Parâmetros de furação	60
5. CONCLUSÃO	61
5.1. Conclusões finais	61

5.2. Proposta para trabalhos futuros	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
APÊNDICE A	68
APÊNDICE B	69
APÊNDICE C	70
APÊNDICE D	73
ANEXO A	77
ANEXO B	83
ANEXO C	85
ANEXO D	86
ANEXO e	89
ANEXO F	90
ANEXO G	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Segmentação de uma espada tradicional japonesa (14).	15
Figura 2 - Classificação dos diferentes tipos de reforço num material compósito (15).....	16
Figura 3 - Exemplo de resina de epóxido e diferentes constituintes.(17)	18
Figura 4 - Materiais compósitos usados na construção do EMB-170 (20).....	20
Figura 5 - Monocoque do carro C_two da Rimac (23).	21
Figura 6 - Várias aplicações de diferentes materiais compósitos na medicina. Imagem adaptada de (24).....	22
Figura 7 - Articulação de joelho produzida com um polímero PEEK da marca vicitrex. (27).....	23
Figura 8 - Antebraço e mão da companhia Psyonic (28).....	23
Figura 9 - Quadro de bicicleta feito com CFRP (30).	24
Figura 10 – Diagrama de um sistema de corte por jato de água abrasivo. Adaptado de (34).....	26
Figura 11 – Diagrama de funcionamento de uma máquina de furação por ultrassons. Adaptado de (36).....	26
Figura 12 - Avanços na furação de polímeros reforçados com fibras. Adaptado de (11).....	28
Figura 13 - Fatores que influenciam a furação em materiais compósitos.	29
Figura 14 - Broca helicoidal (48).....	31
Figura 15 – Diferentes geometrias de brocas. a) Helicoidal b) Bidiametral c) Brad d) Dagger e) Múltiplas faces f) Broca de núcleo (49).....	32
Figura 16 - Visão através de um microscópio de dois defeitos. a) fissura na matriz b) arrancamento de fibras da matriz (52).	33
Figura 17 –Representação dos mecanismos de delaminação e respetivos Modos I, II e III desenvolvidas pela ponta da broca: a) Delaminação peel-out ; b) push-out. (11,49).	33
Figura 18 - Exemplos de furação com back-up force. a) suporte sacrificial b) solenoide eletromagnética com <i>back-up force</i> variável (49).	34
Figura 19 - Visualização de fatores de delaminação iguais para áreas de dano diferentes (dano assinalado a vermelho) (55).....	35
Figura 20 - Furos com o mesmo fator de delaminação, mas áreas de dano diferentes. (a) Apenas uma fibra danificada (b) Múltiplas fibras danificadas (55).	35
Figura 21 – Esquema do Fator de Delaminação Equivalente.....	36
Figura 22 – Exemplo de máquina universal de ensaios da marca Biopdi®, bem como um pequeno esquema de um ensaio de tração (59).....	38
Figura 23 - Exemplo de um ensaio de flexão de 3 pontos (60).....	39
Figura 24 - Setup usado para o ensaio de tração dos provetes <i>cross-ply</i>	41
Figura 25 - Estado do provete <i>cross-ply</i> após o ensaio de tração.....	42
Figura 26 - Modelos de broca Bidiametral (cima) e Brad (baixo) usadas na furação (63,64).	43
Figura 27 - Localização dos furos nos provetes 135x36 mm.....	43
Figura 28 - Máquina CNC VF-2 (HAAS®, Alemanha) (esquerda) (65) e o <i>setup</i> de furação (direita).	44
Figura 29 - Configuração para a obtenção das radiografias.....	44
Figura 30 – Diferença entre o valor de <i>threshold</i> : 0,2 (esquerda), 0,48 automático (meio) e 0,9 (direita).....	46

Figura 31 - Várias etapas do tratamento de imagem. A) Radiografia B) Imagem Binária (diâmetro nominal do furo representado a vermelho) C) Definição da fronteira do dano.....	46
Figura 32 – Dimensões do provete para o ensaio <i>Bearing</i> segundo a norma D5961/D5961M - 17 (Procedure A) (8).....	49
Figura 33 - Suporte usado no ensaio <i>Bearing</i> (esquerda) (8). Máquina universal de ensaios AG-X Plus (Shimadzu, Japão) (direita) (69).....	49
Figura 34 – Rácio proposto por Wang <i>et al.</i> (7) para o ensaio <i>Pin Bearing</i>	50
Figura 35 -Modelo da montagem do provete e secção resistente ao esmagamento (vermelho) e <i>setup</i> usado no ensaio.	50
Figura 36 – Rácio de dano e fator de delaminação equivalente para a broca Brad.	51
Figura 37 – Rácio de dano e fator de delaminação equivalente para a broca Bidiametral.	52
Figura 38 - Gráfico resumo dos fatores de delaminação e rácio de dano	53
Figura 39 – Dano superficial na entrada (esquerda) e saída (direita), presente no provete 2 (Bidiametral 3000-0,1) lado B (30 mm da extremidade).	54
Figura 40 – Gráfico tensão-deslocamento obtido do ensaio <i>Pin Bearing</i> (Bidiametral 3000-0,1). .	55
Figura 41 – Gráfico com a tensão máxima e respetivos desvios padrão para o ensaio <i>Pin Bearing</i> da broca Brad.....	55
Figura 42 - Gráfico com a tensão máxima e respetivos desvios padrão para o ensaio <i>Pin Bearing</i> da broca Bidiametral.....	56
Figura 43 – Gráfico resumo do ensaio <i>Pin Bearing</i>	56
Figura 44 - Exemplo do gráfico obtido através do ensaio <i>Bearing</i>	57
Figura 45 - Gráfico com a tensão máxima e respetivos desvios padrão para o ensaio <i>Bearing</i> da broca Brad.....	58
Figura 46 - Gráfico com a tensão máxima e respetivos desvios padrão para o ensaio <i>Bearing</i> da broca Bidiametral.....	58
Figura 47 - Gráfico resumo do ensaio <i>Bearing</i>	59
Figura 48 - Comparação dos parâmetros de furação.....	60
Figura 49 – Exemplo da circunferência que contém o dano proposta por Silva (74).	63
Figura 50 - Radiografia do provete 25 furo B, ao alto.....	63

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Formas que o reforço pode apresentar (12).	16
Tabela 2 - Propriedades de fibras e materiais na forma maciça (15).	17
Tabela 3 - Principais propriedades de alguns termoendurecíveis e termoplásticos.(12,18).	19
Tabela 4 - Vantagens e Desvantagens da maquinagem a <i>laser</i> . Adaptado de (34).	25
Tabela 5 - Comparação dos processos de furação não convencional com o convencional. Adaptado de (34).	27
Tabela 6 - Resumo dos efeitos do avanço e velocidade de corte, segundo a seguinte literatura (43–46)	31
Tabela 7 - Visão geral dos principais ensaios não destrutivos (56,57).....	37
Tabela 8 - Distribuição dos provetes pelas placas.....	40
Tabela 9 – Propriedades dos provetes <i>cross-ply</i> e unidirecionais.	42
Tabela 10 - Diferentes parâmetros usados para a furação dos provetes de CFRP.	43
Tabela 11 – Dados recolhidos pelo programa MATLAB® em pixéis.....	47
Tabela 12 - Média dos valores de cada processo de furação convertido em mm e mm ²	48

página propositadamente em branco

LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS

Lista de Siglas

CFRP	<i>Carbon Fiber Reinforced Plastic</i>
Drat	Rácio de dano
Fd	Fator de delaminação
Fed	Fator de delaminação equivalente
FRC	<i>Fiber Reinforced Composites</i>
FRP	<i>Fiber Reinforced Polymer</i>
GFRP	<i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i>
HSS	<i>High Speed Steel</i>
INEGI	Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
LET	Laboratório de Ensaios Tecnológicos
LTM	Laboratório de Tecnologia Mecânica
NFRC	<i>Natural fiber reinforced composite</i>
PCR	Estudo da regressão de componentes principais
PEEK	Polietercetona
pH	Potencial hidrogeniônico
P.Porto	Instituto Politécnico do Porto
TRM	Taxa de remoção de material
ZTA/HAZ	Zona termicamente afetada / <i>Heat affected zone</i>

Lista de Símbolos

A	Área	mm^2
D	Diâmetro	mm
E	Módulo de elasticidade	Pa
f	Avanço	mm/rev
F_a	Força axial	N
F_{ct}	Força crítica para a delaminação	N
HDT	<i>Heat deflection temperature</i>	$^{\circ}\text{C}$
m	Massa	kg
n	Rotações por minuto	rpm
T	Temperatura	$^{\circ}\text{C}$
V_c	Velocidade de corte	mm/min
V_f	Velocidade de avanço	mm/min
σ_u	Tensão de rotura	Pa

página propositadamente em branco

1. INTRODUÇÃO

1.1. Âmbito

Os laminados de resina epóxico e de fibra de carbono são amplamente empregues em diversas áreas da indústria atual, como na indústria médica, desportiva, aeroespacial, militar e automóvel. Estes materiais apresentam vantagens como a alta resistência específica, leveza e boa resistência mecânica. Os compósitos de matriz polimérica podem ainda tomar formas complexas, dependendo das múltiplas possibilidades de produção que oferecem, quer seja pela combinação de diferentes reforços ou pela orientação dos mesmos, tendo assim características que os fazem ser considerados a família de materiais mais notória da atual época tecnológica (1).

Apesar de poderem ser moldados em formas complexas, reduzindo assim a necessidade de realizar processos de maquinagem, por vezes, os laminados necessitam de pequenas operações de corte ou furação.

As características distintas dos materiais compósitos constituem desafios significativos na furação dos mesmos, uma vez que este processo complexo pode originar um desgaste considerável na ferramenta e causar danos irreparáveis ao material, afetando negativamente as suas propriedades mecânicas.

Durante o processo de furação, é observado uma variedade de danos, sendo a delaminação o mais prevalente. Esse fenómeno ocorre tanto na entrada quanto na saída do furo, e caracteriza-se pela separação das camadas, no caso específico da furação a delaminação ocorre nas camadas superficiais do laminado (2), uma série de estudos têm vindo a abordar os danos resultantes da furação em materiais compósitos, desenvolvendo assim métodos e testes para caracterizar esses danos de forma mais precisa (3–10).

A presente dissertação surge da necessidade de investigar minuciosamente a resistência mecânica de materiais compósitos com matriz polimérica após a realização do processo de furação. Assim, serão revistos os fatores propostos por diversos autores, cimentando os conhecimentos relacionados aos parâmetros da furação já estabelecidos e amplamente aceites.

1.2. Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo a investigação experimental e o desenvolvimento de modelos de quantificação da propagação do dano que permitam o estudo e comparação da resistência mecânica em ensaios quase estáticos (*Pin Bearing* e *Bearing*). Para esse efeito foram necessários realizar diversos passos como:

- A quantificação do dano em volta do furo, de modo que seja possível calcular os respetivos indicadores (Rácio de dano e Fator de delaminação equivalente);
- Realizar ensaios destrutivos, para quantificar a influência dos diversos parâmetros associados à furação;
- Tecer os resultados obtidos na quantificação do dano com os dos ensaios destrutivos;
- Confirmar e relacionar os resultados obtidos com os de outros autores.

Os resultados obtidos neste estudo tornam-se pertinentes para a compreensão do comportamento dos materiais compósitos de matriz polimérica após a furação. Isso fornecerá *insights* valiosos sobre a perda da resistência mecânica destes materiais após a furação e os respetivos riscos associados.

1.3. Guia de leitura

A presente dissertação está estruturada em 4 capítulos. O Capítulo 1 introduz o trabalho, delineando o âmbito, objetivos e organização, fornecendo uma orientação para a sua leitura.

No Capítulo 2 são apresentadas informações pertinentes e abrangentes sobre os materiais compósitos, incluindo sua designação, propriedades, aplicações e composição. Nesse capítulo, também é abordada a temática da furação de materiais compósitos, com foco específico nos tipos de furação convencional e na caracterização e quantificação dos possíveis danos causados por esse processo. Além disso, é feita uma referência mais detalhada aos parâmetros envolvidos na furação.

No Capítulo 3, é descrito detalhadamente o procedimento experimental seguido, abrangendo os materiais e equipamentos utilizados. Em seguida, é explicado o processo de obtenção e processamento de imagem necessário para permitir a quantificação dos danos causados pela furação e, finalmente é feita uma elucidação do ensaio *Bearing* e *Pin Bearing*.

No Capítulo 4, os resultados obtidos são apresentados, analisados e discutidos, e as conclusões do trabalho são expostas. Nesse capítulo, também são abordadas as limitações encontradas durante o estudo e propostas para futuras pesquisas.

Por fim é apresentada a Bibliografia consultada e os devidos apêndices e anexos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo e subcapítulos visam definir o que são materiais compósitos, as suas aplicações, os diferentes tipos e as suas composições. Além do mais, serão abordados temas nos quais têm surgido inovações nos últimos anos, tais como, a furação convencional e não convencional (11).

Por fim, iremos aferir as consequências da furação usando critérios analíticos, ensaios não destrutivos e destrutivos.

2.1. Materiais compósitos

Um material diz-se compósito quando é o resultado da combinação de dois ou mais materiais distintos com o propósito de se obterem propriedades superiores às iniciais, inalcançáveis usando apenas um dos constituintes (12).

Os materiais reforçados com fibras são um exemplo clássico de um material compósito. Estes apresentam-se como a junção de fibras (material de reforço) com um material aglomerante (matriz), com propriedades inferiores a estas. A matriz tem como função dar forma à peça e transmitir a carga entre as fibras. Como existem diferentes tipos de matrizes, os materiais compósitos são frequentemente classificados consoante a matriz que os constitui (12).

O uso de fibras como material de reforço não é recente, já no Antigo Testamento se referia que os tijolos eram constituídos por uma matriz de lama reforçados com palha, ou, outro exemplo, o uso de diferentes tipos de aço no fabrico de espadas Japonesas (Figura 1), comprovando que os materiais compósitos têm vindo a ser usados ao longo dos anos, numa perspetiva de desenvolvimento de materiais com elevada resistência ao impacto e à flexão (13).

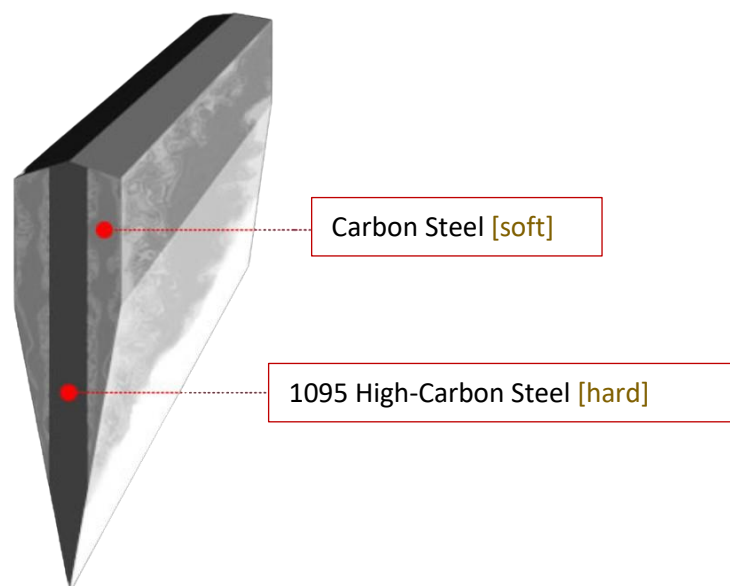


Figura 1 - Segmentação de uma espada tradicional japonesa (14).

Reforços

Um compósito pode ter dois tipos de reforço distintos, partículas ou fibras, sendo o mais comum o reforço por fibras. Sendo assim, dentro de cada tipo de reforço existem diferentes variações, como é demonstrado na Figura 2.

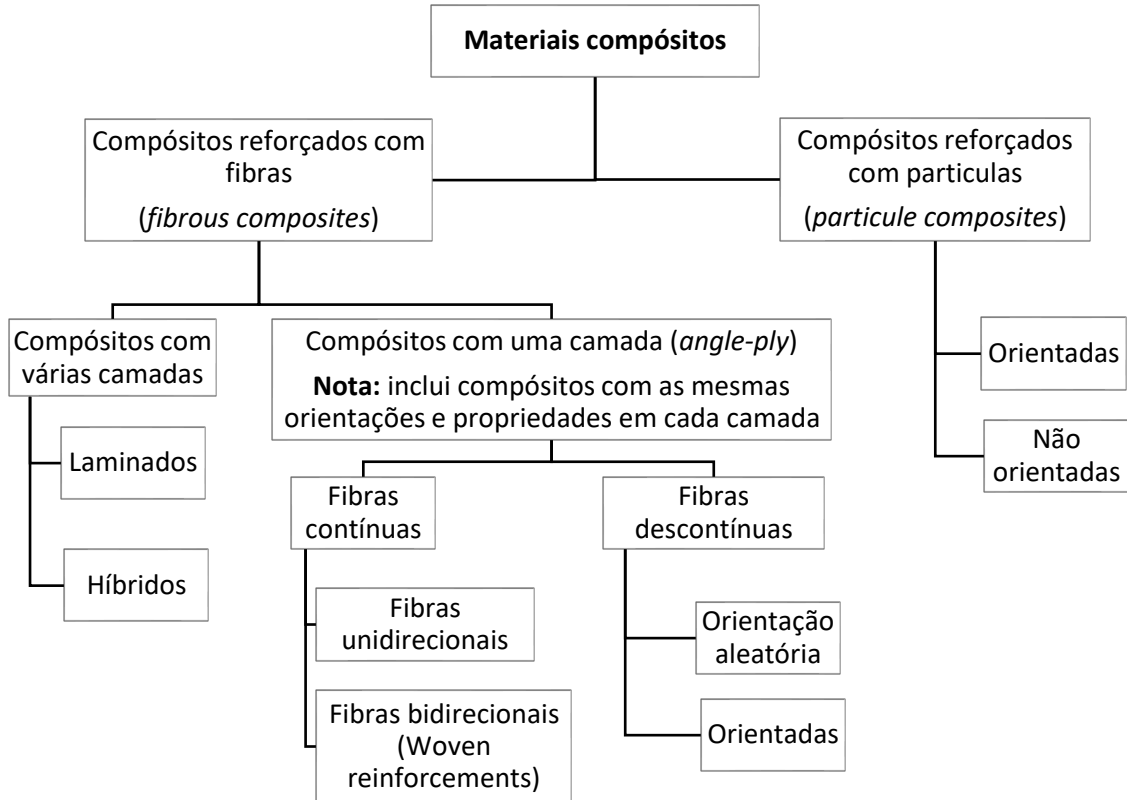


Figura 2 - Classificação dos diferentes tipos de reforço num material compósito (15).

Após sabermos como podemos classificar os diferentes tipos de reforços num compósito, é importante conhecer a forma que o reforço pode apresentar. Na Tabela 1, podemos observar as diferentes formas de reforço assim como uma breve descrição de cada uma.

Tabela 1 - Formas que o reforço pode apresentar (12).

Roving - Cordão de filamentos contínuo enrolado helicoidalmente em bobinas.	Entrelaçados – Normalmente mais caros que a manta pois necessitam de processo de confecção mais complexo.
Mantas - Manta onde as fibras são distribuídas aleatoriamente e ligadas com um ligante especial em emulsão ou pó.	Malhas (Knitted Fabrics) - Ligação sucessiva de fibras alinhadas.
Tecidos 3D – é obtido através de processos especiais de tecelagem que ligam múltiplas camadas.	Pré-Formas – As pré-formas são produzidas de duas formas, 2D ou 3D, e podem conter fibras curtas ou fibras contínuas.
Tecidos 2D – é a confecção de uma ligação entre feixes de fibras longas idênticas ou diferentes que originam um tecido para aplicações em que se exigem elevadas propriedades mecânicas.	<ul style="list-style-type: none"> • Tecidos entrelaçados (<i>Woven Fabrics</i>) • Tecidos quase unidirecionais • Tecidos híbridos

Os materiais compósitos apresentam propriedades extraordinárias, pois as propriedades mecânicas das fibras mostram-se muito superiores às dos materiais idênticos a estas, quando comparadas com a sua forma maciça, tal como demonstrou Griffith (16), quando constatou que fibras de vidro com apenas 20 μm de diâmetro atingiam tensões de rotura de 3500 MPa, enquanto o vidro possuía uma tensão de rotura de apenas 170 MPa.

Na Tabela 2 compara-se as principais propriedades das fibras mais comuns com os respetivos materiais maciços:

Tabela 2 - Propriedades de fibras e materiais na forma maciça (15).

Material	Módulo de elasticidade E (GPa)	Resistência à tração σ_u (GPa)	Massa volúmica ρ (g/m ³)	Módulo específico E/ρ	Resistência específica σ_u/ρ
Fibras					
Vidro E	72,4	3,5	2,54	28,5	1,38
Vidro S	85,5	4,6	2,48	34,5	1,85
Carbono (<i>High Strength</i>)	240,0	2,5	1,90	126	1,30
Carbono (<i>High modulus</i>)	390,0	2,1	1,90	205	1,10
Boro	385,0	2,8	2,63	146	1,10
Sílica	72,4	5,8	2,19	33,0	2,65
Tungsténio	414,0	4,2	19,30	21,0	0,22
Berílio	240,0	1,3	1,83	131	0,71
Kevlar®49	130,0	2,8	1,50	87,0	1,87
Materiais convencionais					
Aço	210	0,34-2,1	7,80	26,9	0,043-0,220
Ligas de alumínio	70,0	0,14-0,62	2,70	25,9	0,052-0,220
Vidro	70,0	0,7-2,1	2,50	28,0	0,280-0,840
Tungsténio	350	1,1-4,1	19,3	18,1	0,057-0,200
Berílio	300	0,7	1,83	164	0,380

De realçar que existem inúmeras variações para uma fibra de determinado material, como por exemplo, as fibras de carbono podem ser confeccionadas e comercializadas segundo as seguintes classificações (12):

UHM (*ultra high modulus*) - para fibras com módulos superiores a 500 GPa;

HM (*high modulus*) - para fibras com módulos superiores a 300 GPa e rácio resistência mecânica/módulo em tração inferior a 1%;

IM (*intermediate modulus*) - para fibras com módulos até 300 GPa e rácio resistência mecânica/módulo de cerca a 1%;

HS (*high strength*) – para fibras de resistência à tração superiores a 3 GPa e rácio resistência/rigidez entre 0.015 e 0.02;

Fibras de baixo módulo – Com valores inferiores a 100 GPa.

Matrizes

Apesar de desempenharem um papel importante, as fibras isoladas não podem ser usadas em aplicações estruturais na engenharia, sendo necessária a presença de uma matriz, que tem como objetivo proteger as fibras e distribuir a carga, reduzindo o efeito da concentração de tensões.

Os materiais compósitos são classificados mais frequentemente pela sua matriz, sendo diferenciados por matriz metálica, cerâmica cimentosa e polimérica. Este trabalho focar-se-á nos materiais compósitos de matriz polimérica, devido à sua facilidade de processamento, baixa densidade e ampla utilização na indústria.

Dentro das matrizes poliméricas existem dois grandes grupos, as termoplásticas e as termoendurecíveis. As matrizes termoplásticas são constituídas maioritariamente pelos designados plásticos técnicos, e são muito úteis pela sua capacidade de quebrar temporariamente as suas ligações intermoleculares quando aquecidos, sendo então possível o seu reprocessamento (12).

Já as matrizes termoendurecíveis são constituídas por polímeros em que as moléculas formam estruturas tridimensionais rígidas, não podendo ser reprocessados, pois uma vez solidificados assumem uma forma permanente. Consequentemente, para a sua utilização é, frequentemente, necessário misturar dois ou mais componentes, tais como, resina, catalisador e acelerador. Só após a junção de todos os constituintes é que se inicia o processo de solidificação (12).



Figura 3 - Exemplo de resina de epóxido e diferentes constituintes.(17)

As matrizes poliméricas termoendurecíveis mais usadas são (15):

- Resinas de epóxido;
- Resinas de viniléster;
- Resinas fenólicas;
- Poliéster insaturado;
- Poliimidaz termoendurecíveis.

Na *Tabela 3*, estão apresentadas as principais propriedades de alguns termoendurecíveis e ainda alguns termoplásticos de modo a comparar as duas famílias de polímeros.

Tabela 3 - Principais propriedades de alguns termoendurecíveis e termoplásticos.(12,18).

Resinas termoendurecíveis	HDT (°C)	E (GPa)	σ_u (MPa)	E_{rot} (%)	
Poliéster	Ortoftálica	66-95	3,3-3,6	55-70	2,2-3,5
	Isoftálica	93-125	3,7-4,1	55-65	1,5-2,5
Fenólicas	Ressol	250	2,0	32	1,8
Viniléster	Bisfenol A	102	3,5	82	6,0
	Novolac	150	3,5	68	3,5
Epóxidas DGEBA	Tc=20°C	62	3,2	62	2,0
	Tc=120°C	121	3,0	90	8,0
Epóxidas DGEBF	Tc=20°C	101	4,1	125	5,0
Termoplásticos					
Policarbonato	132-149	2,4-9,0	65-131	125-2,5	
Polipropileno	53-151	1,4-5,9	34-83	400-2,3	
PEEK	148-186	9,0	98-190	-	

As matrizes com resina epóxido são as mais utilizadas em aplicações técnicas devido à vasta variedade de formulações, sendo que a maioria das resinas epóxido têm como base o diglicidil éter de bisfenol A (DGEBA)(19).

Apesar do custo ser, aproximadamente, quatro vezes maior que o das resinas de poliéster e duas vezes maior que o das resinas de viniléster, a resina epóxido apresenta uma elevada resistência mecânica, resistência à abrasão, resistência química (sobretudo em meios alcalinos), boas propriedades de adesão à fibra, processo de cura sem libertação de voláteis, grande estabilidade dimensional, baixa absorção de água e temperaturas de funcionamento entre 100 e 220 °C (12).

A cura da resina de epóxido pode ser feita à temperatura ambiente ou por aquecimento, essa decisão é feita conforme os agentes de cura e o ambiente de aplicação da resina, ou seja, se for necessário produzir um artigo desportivo para o quotidiano, uma cura à temperatura ambiente é suficiente, já se pretendermos alcançar um elevado desempenho a uma temperatura mais elevada deverá ser feita uma cura na gama de temperaturas de 120°C a 175°C (19).

2.1.1. Aplicação de materiais compósitos

Neste subcapítulo serão abordadas as áreas da indústria nas quais os materiais compósitos têm um papel mais relevante.

Aeronáutica

O uso de materiais compósitos na indústria aeronáutica arrancou após a descoberta da fibra de carbono pela *Royal Aircraft Establishment* em *Farnborough, UK, 1964* (20), sendo que, só no final dos anos 60, é que os materiais compósitos foram utilizados pela primeira vez para realizar elementos de aviões militares, como portas, lemes e rotores, que seriam instalados posteriormente, por exemplo, nos modelos F-14, F-15 e F-16.

Atualmente, podemos encontrar diversos componentes fabricados com materiais compósitos numa aeronave, como por exemplo, na EMB-170 da Embraer:

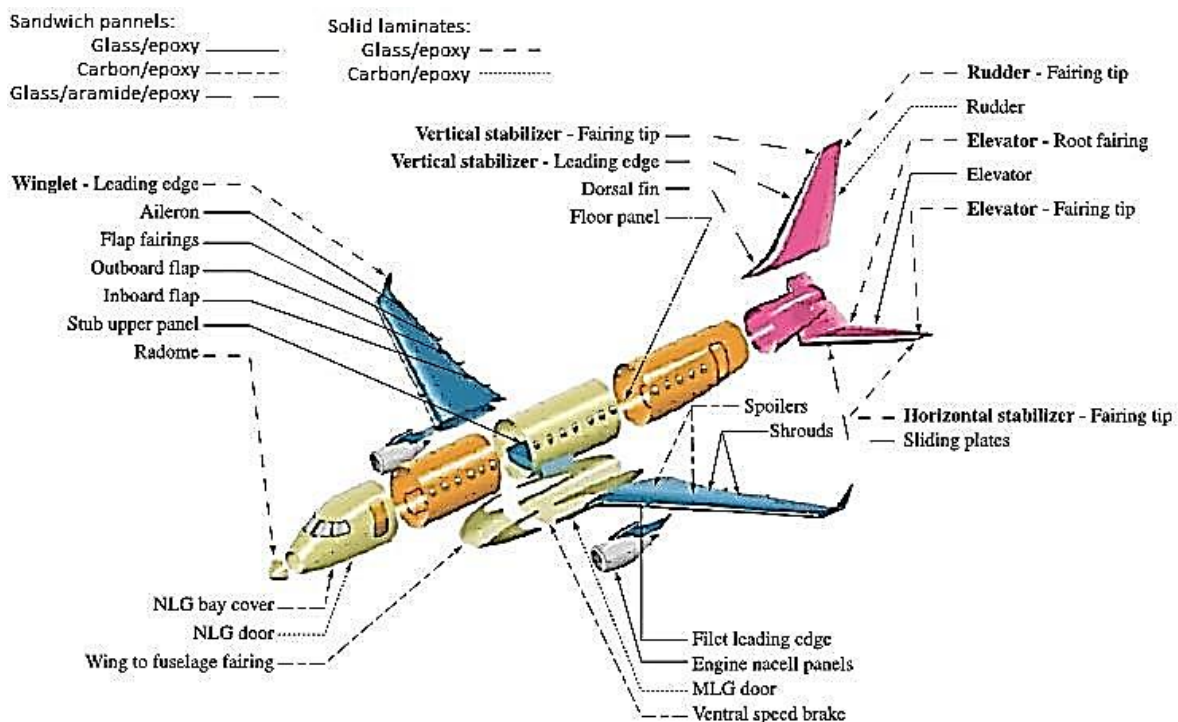


Figura 4 - Materiais compósitos usados na construção do EMB-170 (20).

Como podemos observar na Figura 4, são usados desde painéis *sandwich* a laminados com diversos tipos de reforço, tais como fibra de vidro, fibra de carbono ou aramida.

Na indústria aeronáutica, os desafios tecnológicos são permanentes e específicos, resultado de uma produção em pequena escala, em que os elevados custos de fabrico podem ser compensados por menores custos operacionais (12).

O objetivo de usar materiais compósitos é conseguir estruturas de elevada resistência e leveza, que estão associadas a uma enorme liberdade de conceção de produto.

Automóvel

A Fórmula 1 e outros desportos motorizados de alto rendimento impulsionaram o uso de materiais compósitos na indústria automóvel. Atualmente, devido à crise energética que se tornou evidente no início do século XXI, o uso de materiais compósitos tomou um papel de relevância na indústria (21).

Com o objetivo de reduzir o consumo de combustível e, conseqüentemente, as emissões de dióxido de carbono (CO₂), foi necessário arranjar maneiras de tornar os automóveis mais leves. Para tal, muitas marcas adotaram o uso de CFRP que, segundo Isaiah, a substituição de aço por CFRP pode reduzir o peso de um veículo em cerca de 60% (22).

Nos dias que correm, são inúmeras as partes de um veículo produzidas em CFRP, tais como: chassis, para-choques, tejadilhos, braços de direção, veios de transmissão e bielas. Apesar de todos os avanços, tanto na eficiência de produção como na redução de material, as peças de CFRP não são usadas em todos os automóveis, sendo exclusivas de automóveis de gama média-alta, enquanto extras.



Figura 5 - Monocoque do carro C_two da Rimac (23).

O novo carro da Rimac é um dos exemplos de pico (Figura 5) da indústria automóvel atual. A empresa croata desenvolveu um *monocoque* com 2200 camadas de fibra de carbono e 222 folhas de alumínio, resultado de um processo de construção com duração de dois meses e de vários processos de cura numa câmara de vácuo, obtendo-se um monocoque que não ultrapassa os 200 quilogramas de peso (23).

Médica

Na indústria médica existem inúmeras aplicações para os materiais compósitos, quer seja, na área médico-dentária, na ortopedia, cardiologia, entre outras. Todos os compósitos usados devem ser biocompatíveis, ou seja, os materiais não devem ser rejeitados pelo corpo humano. Para tal, o material escolhido deve ter a mesma resistência mecânica, pH e dureza que o biomaterial a substituir (24).

Na Figura 6 podemos ver as principais aplicações desses materiais:

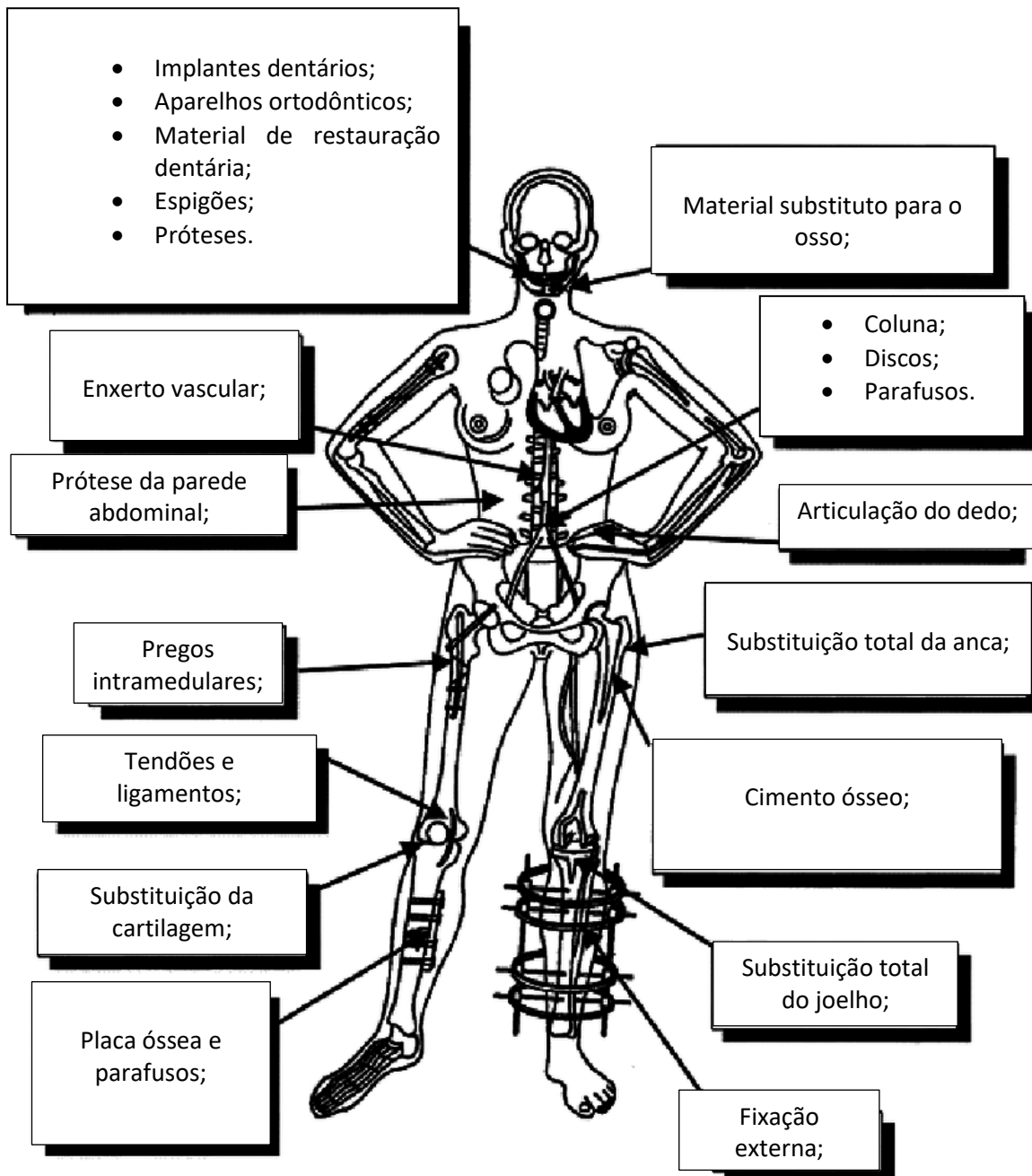


Figura 6 - Várias aplicações de diferentes materiais compósitos na medicina. Imagem adaptada de (24).

Outro exemplo do uso destes materiais na indústria médica é o uso de nano materiais compósitos, utilizados para implantes, imagiologia médica, administração controlada e específica de medicamentos e como biossensores (25) ou, ainda, os compósitos de matriz de PEEK, frequentemente usados em implantes ortopédicos. Os compósitos PEEK possuem boa biocompatibilidade, resistência mecânica e acabamento superficial e são úteis para a confecção de articulações com baixo atrito, constituindo um ótimo substituto para o titânio, uma vez que, tem propriedades semelhantes e densidade menor (26).



Figura 7 - Articulação de joelho produzida com um polímero PEEK da marca vicitrex. (27)

Os materiais compósitos têm também um papel importante na reabilitação de indivíduos com a ausência de um membro. A confecção de membros prostéticos com *CFRP* têm inúmeros benefícios, como a leveza, resistência mecânica e conformidade no acoplamento, graças à possibilidade de moldar os *CFRP* em formas complexas. A empresa Psyonic, desenvolveu uma prótese (Figura 8), com o antebraço e palma da mão feitos em *CFRP*, que é capaz de oferecer a sensação de toque através da vibração (28).

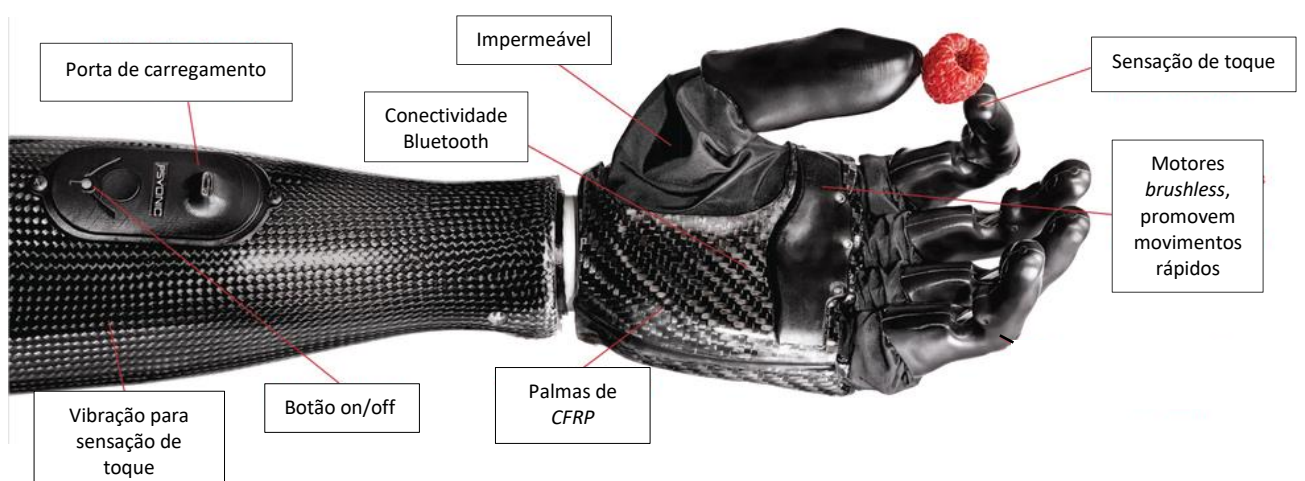


Figura 8 - Antebraço e mão da companhia Psyonic (28).

Desporto

Na indústria desportiva, os materiais compósitos, mais especificamente os *FRC*, são altamente procurados devido às suas propriedades clássicas, como a leveza, alta resistência mecânica, boa resistência ao choque e bom acabamento superficial. A indústria desportiva e de lazer é a terceira indústria que mais utiliza compósitos, seguida pela aeroespacial/defesa e a de elastómetros (29).

Como na maioria dos desportos, os equipamentos são movidos através da força humana, pelo que, um dos seus principais requisitos é a leveza. Tendo isso em conta, a equipa de ciclismo dos *USA*, nos *Pan American Games* de 1995, usou bicicletas feitas com peças *CFRP*, substituindo as de metal, conseguindo assim três recordes do encontro e um record mundial. Atualmente, os compósitos de *CFRP* são os mais utilizados para a construção de quadros de bicicletas, quer sejam de estrada, montanha ou pista (29).



Figura 9 - Quadro de bicicleta feito com *CFRP* (30).

Esta metodologia é aplicada a muitos outros desportos, como a canoagem e a vela, onde embarcações mais leves e finas são mais fáceis de deslocar. Desportos que utilizam raquetes, sticks e tacos também são beneficiados pelas propriedades dos materiais compósitos, uma vez que equipamentos mais leves diminuem a fadiga muscular. A natação também faz uso destes materiais na construção dos blocos de partida e em fatos de banho impregnados com excertos de fibras de carbono (29).

2.2. Furação de materiais compósitos

Devido às suas mais valias, os materiais compósitos ganharam popularidade, o que levou à necessidade de desenvolver processos de maquinagem adequados a estes “novos” materiais.

Esta dissertação focar-se-á no processo maquinagem denominado furação, o mais utilizado atualmente. A furação permite a realização de ligações mecânicas, que unem peças de uma maneira mais segura, sendo possível escolher se esta ligação é ou não permanente, ao contrário do que acontece com as ligações adesivas que só podem ser permanentes.

O acabamento de cada furo realizado num material compósito pode estar relacionado com a segurança deste, por exemplo, um avião comercial necessita cerca de 1,5 a 3 milhões de furos, enquanto um caça, sendo um avião mais pequeno, apenas necessita de, aproximadamente, 300 000 furos (31).

A furação de compósitos reforçados com fibras apresenta desafios devido à sua heterogeneidade e propriedades anisotrópicas, fatores que contribuem para o aparecimento de defeitos não desejáveis, que levam o material a sofrer alterações nas suas propriedades mecânicas, o que pode provocar falhas (31).

2.2.1. Métodos não convencionais de furação

Com o avanço das tecnologias de fabrico, a exigência de furos com um diâmetro menor a 0.1 mm aumentou, nomeadamente na indústria automóvel e aeroespacial. Um furo desta dimensão é necessário, por exemplo, no fabrico de pás de turbinas e bicos de injeção. Realizar estes micro furos em materiais de natureza frágil e com elevada dureza pode ser muito desafiante ou, em alguns casos, mesmo impossível para a maioria dos métodos de furação convencionais, devido ao desgaste da ferramenta, à formação de aparas e ainda à baixa TRM. Além disso, estão associados altos custos na sua produção, quer seja pela troca frequente de ferramentas, ou pela necessidade de mão de obra especializada. Assim, numa perspetiva de melhoria, surgiram os métodos não convencionais (32).

Laser

O *laser* é um processo térmico que consiste num feixe de luz de alta potência, coerente, transversal, focalizado e posicionado, capaz de produzir, sem contacto, um furo de alta qualidade. Este método também é adequado para cortar, contornar e marcar materiais com fraca maquinabilidade. Os *lasers* mais frequentes são os de YAG (*Ytrium, Aluminium e Garnet*)/Nd (*Neodymium*) e CO₂ e consomem em média 500 W e 1500 W, respetivamente. O *laser* de YAG é utilizado no corte de matrizes metálicas (sem matriz orgânica) já o de CO₂ em fibras de vidro, carbono e Kevlar[®] (aramidas) (33).

Tabela 4 - Vantagens e Desvantagens da maquinagem a *laser*. Adaptado de (34).

Vantagens	Desvantagens
Elevada precisão e repetibilidade do processo	Existência de uma ZTA / HAZ (<i>heat affected zone</i>)
Cadência de produção elevada	Necessidade de ventilação (gera partículas nocivas à saúde)
Furos sem rebarba nem aparas	Degradação térmica, impossibilitando o seu uso em alguns materiais

Jato de água com ou sem abrasivo

A maquinação com jato de água consiste na projeção de água a alta pressão (100-400 MPa), com ou sem adição de material abrasivo, por um bocal. A sua principal vantagem é permitir que o corte ou furo sejam iniciados em qualquer parte da peça, sem gerar uma ZTA ou produzir poeiras/partículas cuja inalação possa ser perigosa. Contudo, é apenas rentável para um número restrito de peças pois a TRM é baixa, aumentando o tempo de furação da peça. No entanto, não requer a troca frequente de ferramentas, como no caso da maquinação convencional, o que pode tornar o investimento vantajoso (35).

Para obter furos de qualidade (boa circularidade e sem delaminação), é necessário adaptar a distância do jato à peça, pressão da água e quantidade de abrasivo (35). Na Figura 10, podemos observar um esquema de funcionamento de um sistema de corte por jato de água abrasivo.

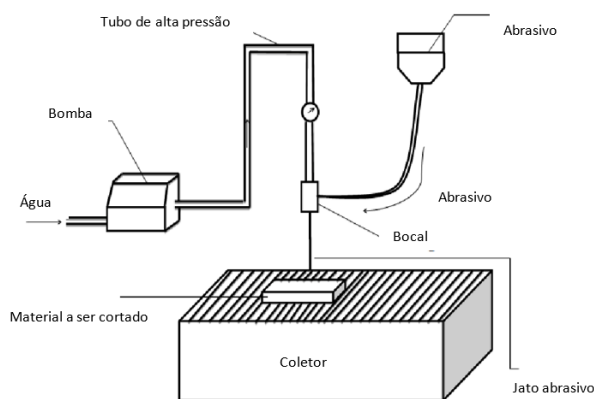


Figura 10 – Diagrama de um sistema de corte por jato de água abrasivo. Adaptado de (34).

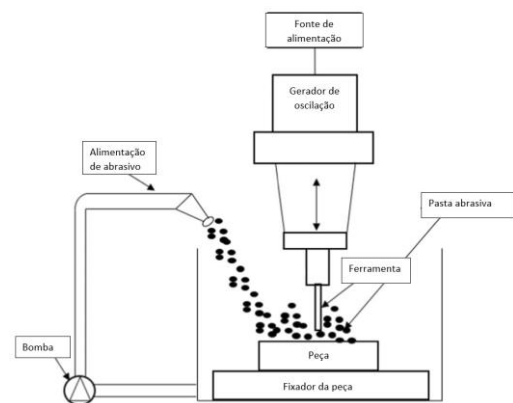


Figura 11 – Diagrama de funcionamento de uma máquina de furação por ultrassons. Adaptado de (36).

Ultrassons

A maquinação por ultrassons associa o princípio da maquinação convencional, na qual se usa uma broca em movimento rotacional para a remoção do material, a uma vibração no sentido perpendicular à peça com uma frequência de 20 a 30 kHz (34). Além da vibração, é também utilizada uma pasta abrasiva que embate com alta velocidade na peça, auxiliando a furação. A aplicação da maquinação de ultrassons resulta na redução da força de corte, momento, e rugosidade superficial. Quando comparada com a maquinação convencional, verifica-se uma redução da força na ordem de 30% e do fator de dano em cerca de 70% (37).

Electro-erosão

O processo realizado por electro-erosão é considerado um processo termoelétrico de micro-maquinação, realizado numa câmara de vácuo, sem contacto, em que a remoção de material é feita através de descargas elétricas, que fundem ou vaporizam pequenas partículas entre a peça e o eléctrodo, sendo, por isso, praticamente exclusiva para materiais condutores (38).

Eletroquímica

A maquinação eletroquímica é o inverso da eletrodeposição, pelo que é feita a remoção de material em peças eletricamente condutoras por dissolução anódica. As principais vantagens são a sua capacidade de ser utilizada em formas complexas, ranhuras e furos pequenos. Além disso não apresenta uma zona termicamente afetada (34,39).

Comparação dos processos

A Tabela 5 estabelece uma comparação entre os principais métodos de maquinação não convencional, referidos anteriormente, com a maquinação convencional.

Tabela 5 - Comparação dos processos de furação não convencional com o convencional. Adaptado de (34).

	<i>Laser</i>	Jato de água	Ultrassons	Electro erosão	Eletroquímica	Convencional
Custo	Elevado	Ferramenta e elevada MO	Elevado	Ferramentas caras	<i>Set-up</i> simples	Ferramentas substituídas frequentemente
Tipo de materiais	Não refletores e condutores	Quase todos, incluindo condutores	Dureza elevada incluindo condutores	Só materiais condutores	Só materiais condutores	Todos os materiais
Desgaste da ferramenta	Não	Desgaste dos bocais	Sim	Sim	Não	Sim
Dano na furação	ZTA, fusão localizada	Delaminação, circularidade	Sem ZTA	ZTA	Sem ZTA	Libertação das aparas podem provocar dano
Taxa de remoção de material (cm³/s)	0,0001	0,0001	0,005	0,1	1	14
Energia específica de corte (GJ/m³)	150 000	10 000	150	150	500	3

Apesar de poderem proporcionar vantagens como melhor acabamento superficial, circularidade e a ausência de desgaste da ferramenta ou zona termicamente afetada, os processos de furação não convencionais não são tão eficientes como o convencional, que utiliza 50 vezes menos energia por metro cúbico que os métodos não convencionais mais eficientes. Para além disso, é capaz de remover 14 vezes mais material por segundo do que o método não convencional com maior TRM.

Sendo assim, a furação convencional continua a ter um papel importante na atualidade, estando em constante atualização, com o objetivo de unir as vantagens dos métodos não convencionais com a eficiência da furação convencional.

Na Figura 12, estão representados os progressos alcançados ao longo dos últimos anos na área da furação de polímeros reforçados com fibras, pela forma convencional ou não convencional.

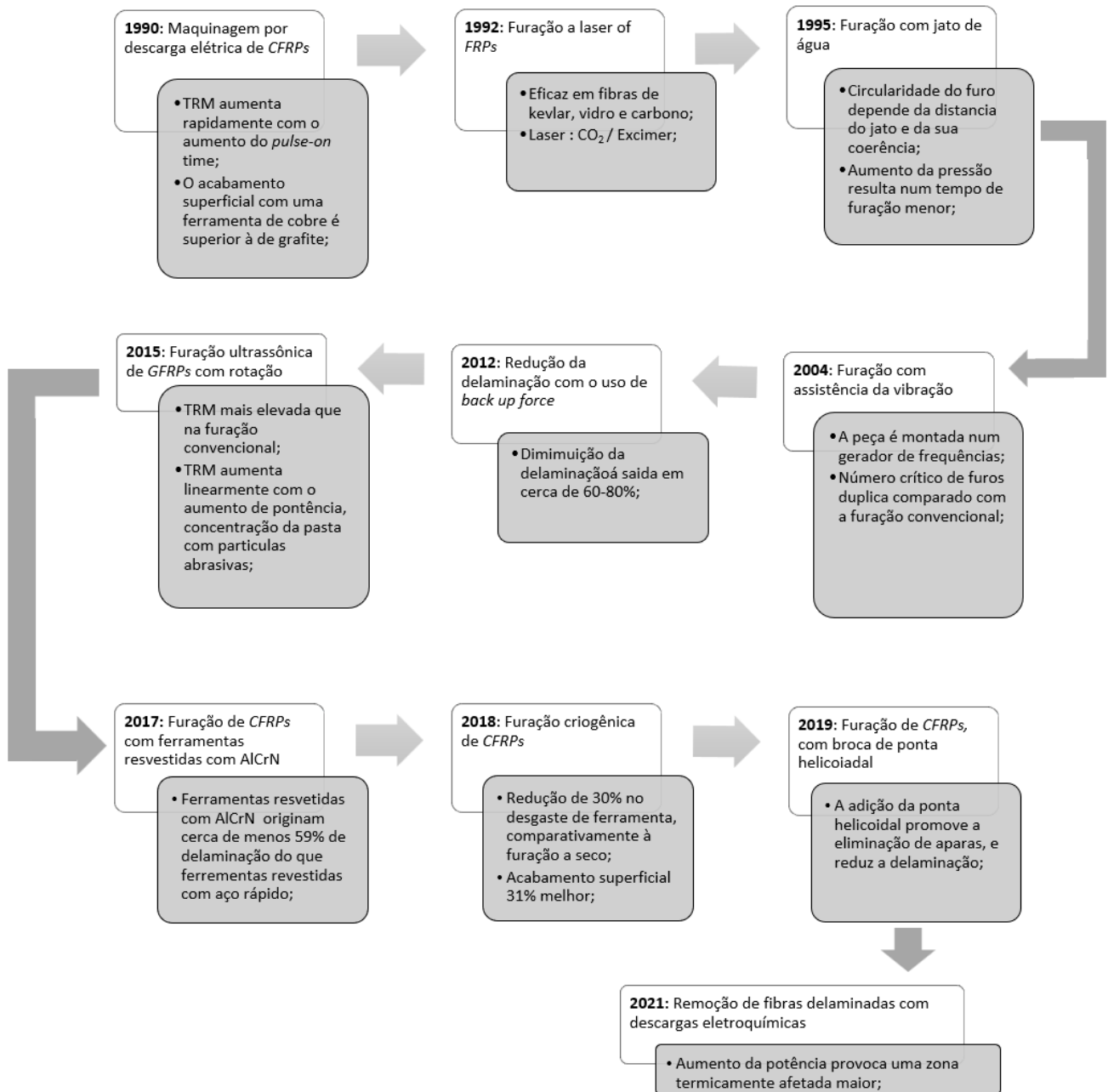


Figura 12 - Avanços na furação de polímeros reforçados com fibras. Adaptado de (11).

2.2.2. Método convencional de furação

Na furação convencional, a remoção de material ocorre graças ao contacto e rotação da ferramenta (broca) na peça, expelindo o material na forma de aparas, através da hélice da broca. A força exercida na direção perpendicular à peça, tem o nome de força de axial (F_a) e esta é dependente do material e geometria da broca, dos parâmetros do processo de furação e do material da peça. Os danos causados pela furação são principalmente originados pela geração da F_a , a mesma, é medida por um dinamómetro (11).

No próximo subcapítulo iremos abordar os diferentes parâmetros que influenciam a furação.

2.2.3. Parâmetros que influenciam a furação convencional

Os principais parâmetros que influenciam a furação convencional são:

- Avanço;
- Velocidade de corte;
- Lubrificação;
- Material e geometria da broca.

De todos os parâmetros o mais importante é o avanço, pois é este que define o tipo de dano provocado na furação de compósitos fibrosos, sendo seguido pela velocidade de corte (2).

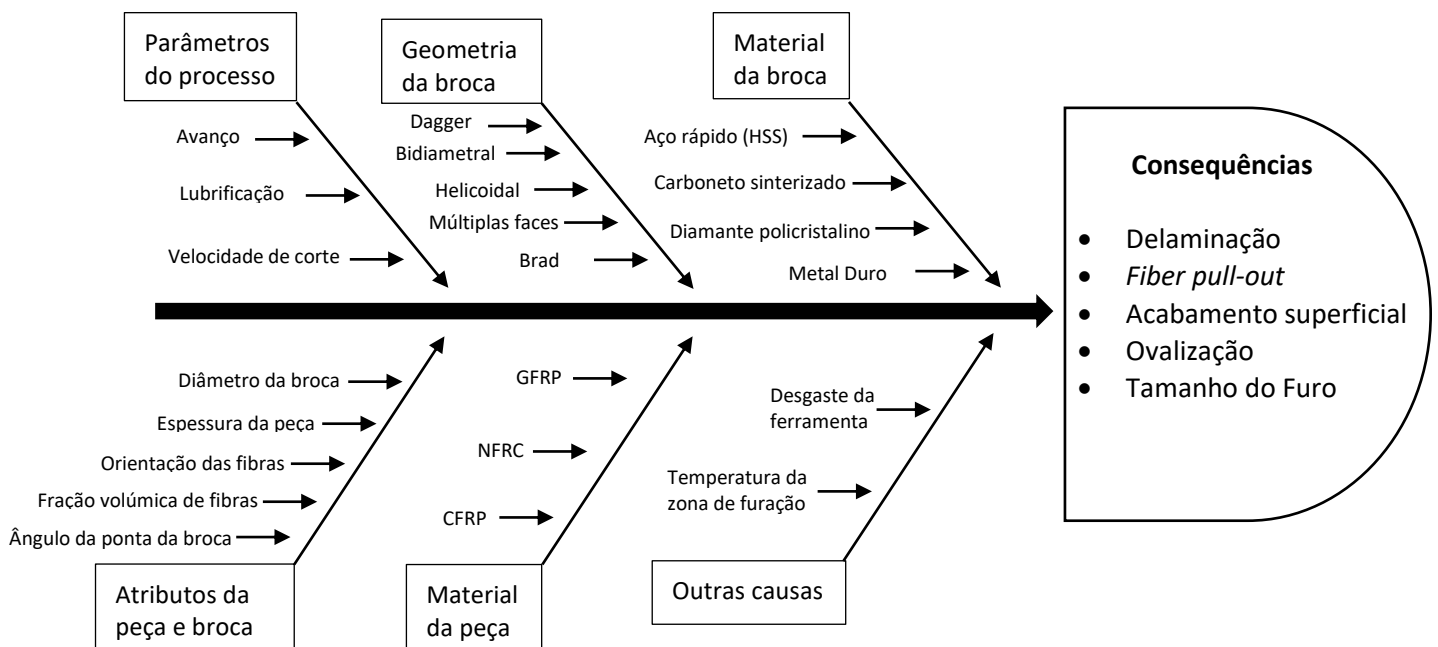


Figura 13 - Fatores que influenciam a furação em materiais compósitos.

Avanço

O avanço é definido como o deslocamento que a ferramenta faz ao longo do seu eixo, no sentido de percorrer a peça a maquinar. Normalmente o avanço está associado a uma velocidade de rotação, assim a unidade corrente é mm/min (40). Podemos calcular a velocidade de avanço (V_f) pela seguinte **Equação 1**, onde f é o avanço em mm por rot e n as rotações por min (rpm).

Equação 1

$$V_f = f \times n \text{ (mm/min)}$$

Ao longo dos últimos anos, muitos autores têm vindo a provar que o avanço é o fator mais importante na furação, Yaşar *et al.* (41) afirma que o avanço é o parâmetro que mais afeta a rugosidade com 78% de PCR.

Goncalves *et al.* (42), conclui que a velocidade de avanço é diretamente proporcional à força axial, ou seja, quanto menor for o avanço, menor será a F_a e a delaminação gerada no compósito. Na Tabela 6 estão evidenciados outros estudos que obtiveram conclusões semelhantes.

Velocidade de corte

A velocidade de corte (V_c) consiste na velocidade linear entre a superfície de corte e a superfície da peça. Sendo assim a V_c depende do número de rotações por min a que a ferramenta é submetida (n) e do diâmetro da mesma (D). A velocidade de corte pode ser calculada da seguinte forma:

Equação 2

$$V_c = \frac{\pi \times D \times n}{1000} \text{ (mm/min)}$$

Apesar da velocidade de corte não ter a mesma importância na furação como o avanço, a V_c têm uma influência de 10% no estudo da regressão de componentes principais do acabamento superficial de um furo (41), sendo o segundo parâmetro mais importante.

De uma forma geral, pode dizer-se que quanto maior for a velocidade de corte, menor será a força axial gerada, sempre tendo em conta as limitações de cada broca, de modo a escolher uma V_c adequada.

A Tabela 6 serve de sumário a outros artigos consultados sobre o tema de velocidade de corte e avanço e da sua relação com a força axial e, conseqüentemente, com a delaminação.

Tabela 6 - Resumo dos efeitos do avanço e velocidade de corte, segundo a seguinte literatura (43–46)

Matriz	Fibra	Geometria da broca	Diâmetro da broca (mm)	Avanço (mm/min)	Velocidade de corte (rpm)	Conclusão
Epóxico	Carbono	Helicoidal	0,3/0,4/0,5	1 - 3	800 - 1300	- A Fa e a delaminação aumentam com o ϕ da broca - O melhor furo foi obtido usando a broca de 0,3 mm, 1100 rpm e 1 mm/min.
Epóxico	Carbono	Core Saw	10	8 - 16	800 - 1200	- A Vf tem influência máxima na Fa. - Uma combinação de uma menor Vf e Vc elevada obtiveram o melhor furo.
Epóxico	Vidro	Helicoidal	6	300 - 700	3000 - 7000	- Arrefecimento criogénico diminui o fator de delaminação em cerca de 72%.
Resina de poliéster	Sisal Vidro	Múltiplas faces Bidiametral	8	0,04 – 0,08 (mm/rev)	1860	- A Fa aumenta com o aumento do avanço.

Broca

Designa-se por broca a ferramenta usada na furação convencional, que corta através de um movimento de rotação conjugado com um avanço perpendicular à peça (40).

Normalmente, as brocas possuem três partes: a ponta, o corpo e o cabo (Figura 14). O cabo é o elo entre a ferramenta e a máquina, costuma apresentar uma forma cilíndrica, mas pode ter outra forma, como por exemplo cônica. No corpo encontramos as hélices da broca, estas possuem um ângulo específico que depende do ângulo de ponta e do material a maquinar (40). É usado um ângulo maior em materiais macios, de modo a obter aparas maiores e um ângulo menor em materiais duros ou quando se pretende obter aparas curtas. Segundo Heisel *et al.* (47), para a mesma velocidade de avanço e ângulos de ponta diferentes podemos esperar que com o aumento do ângulo de ponta, a força axial aumente, mas que a qualidade da entrada do furo melhore (menos delaminação), apesar de na saída se esperar um agravamento da delaminação em relação ao ângulo de ponta menor.

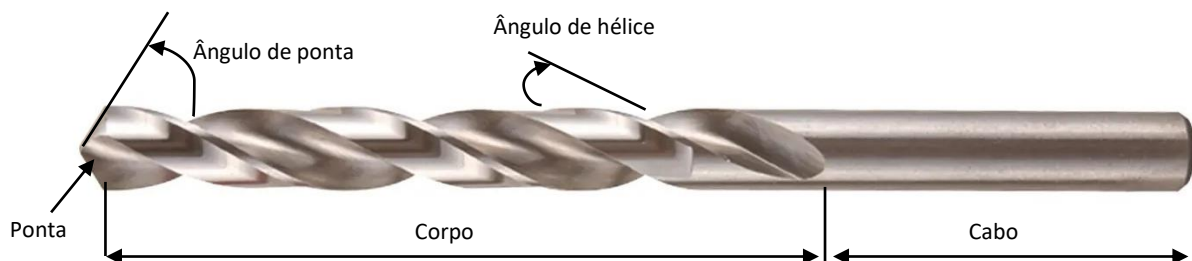


Figura 14 - Broca helicoidal (48).

A maioria das brocas possuem duas arestas de corte, sendo que este número pode variar consoante a aplicação da broca. A geometria das flutes e da ponta pode variar conforme o material a que se destina a broca. Esses fatores, o material e o revestimento da peça influenciam diversos aspetos da furação como a rapidez, a precisão e o acabamento. Na Figura 15, encontram-se representadas algumas das geometrias usadas na furação de compósitos.

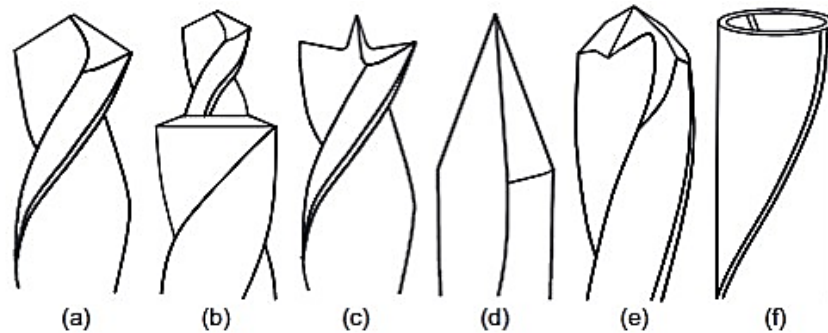


Figura 15 – Diferentes geometrias de brocas. a) Helicoidal b) Bidiametral c) Brad d) Dagger e) Múltiplas faces f) Broca de núcleo (49).

As brocas são normalmente feitas de HSS, carboneto sintetizado e metal duro (50) e, posteriormente, podem ser revestidas por outros materiais, como titânio, zircônio e diamante policristalino, todos com a finalidade de melhorar a durabilidade e eficiência da ferramenta. As características mais importantes numa broca são:

- Resistência ao desgaste;
- Elevada dureza a frio e a quente;
- Elevada tenacidade e condutividade térmica.

Lubrificação e refrigeração

A lubrificação e a refrigeração têm como benefícios a menor geração (ação lubrificante) e a maior dissipação (ação refrigerante) do calor gerado durante o processo de furação, que, por sua vez, proporciona um melhor acabamento. Porém, a sua utilização tem um impacto ambiental e financeiro que não pode ser ignorado (51). Como exemplo de lubrificantes e refrigerantes mais usados na furação de materiais compósitos temos o ar comprimido (2°C), a furação criogênica (LN₂) e os lubrificantes líquidos (51).

2.2.4. Tipo de dano em materiais compósitos reforçados com fibras

A furação de *FRP* é mais complicada do que a furação típica de metais e ligas devido às suas características estruturais referidas no Cap.1.1 (presença de uma matriz com fibras, criando um meio anisotrópico). Deste modo os defeitos mais comuns são:

- Delaminação;
- Arrancamento de fibras da matriz (*fiber pull-out*);
- Zona termicamente afetada;
- Fissuras interlaminares.

Os defeitos que mais afetam a performance do furo são o arrancamento de fibras da matriz e a delaminação (11). Os defeitos provocados fazem-se notar de forma negativa nas propriedades mecânicas em redor do furo, sobretudo quando uma peça é sujeita a cargas externas, momento no qual é de elevada importância um bom acabamento do material para que este preserve ao máximo as suas características de resistência mecânica.

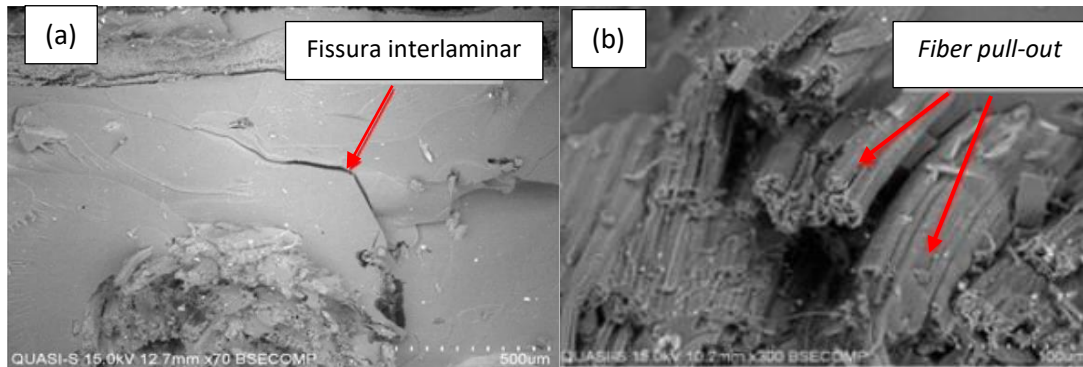


Figura 16 - Visão através de um microscópio de dois defeitos. a) fissura na matriz b) arrancamento de fibras da matriz (52).

Delaminação

A delaminação é um fenômeno que ocorre entre as camadas dos compósitos reforçados com fibras durante a furação e consiste na separação das camadas de um laminado. Este defeito é considerado um dos maiores problemas, pois as camadas ao serem separadas pela ação de rotação da broca alteram as propriedades do laminado (11).

A delaminação ocorre mais frequentemente na entrada e saída do furo e pode ser de dois tipos (11):

- **Peel-up:** ocorre na superfície superior do laminado, quando a broca entra em contacto com o compósito, uma força tangencial ao perímetro da broca faz com que as flutes da broca puxem as camadas superiores do laminado (Figura 17(a)).
- **Push-out:** ocorre na saída do furo, quando a broca se aproxima do fim da espessura do laminado, sendo que em algum momento a força axial excede a força de ligação entre as camadas do laminado, fazendo com que estas se separem. Com o avanço da broca as camadas são movidas para a saída do furo (Figura 17(b)).

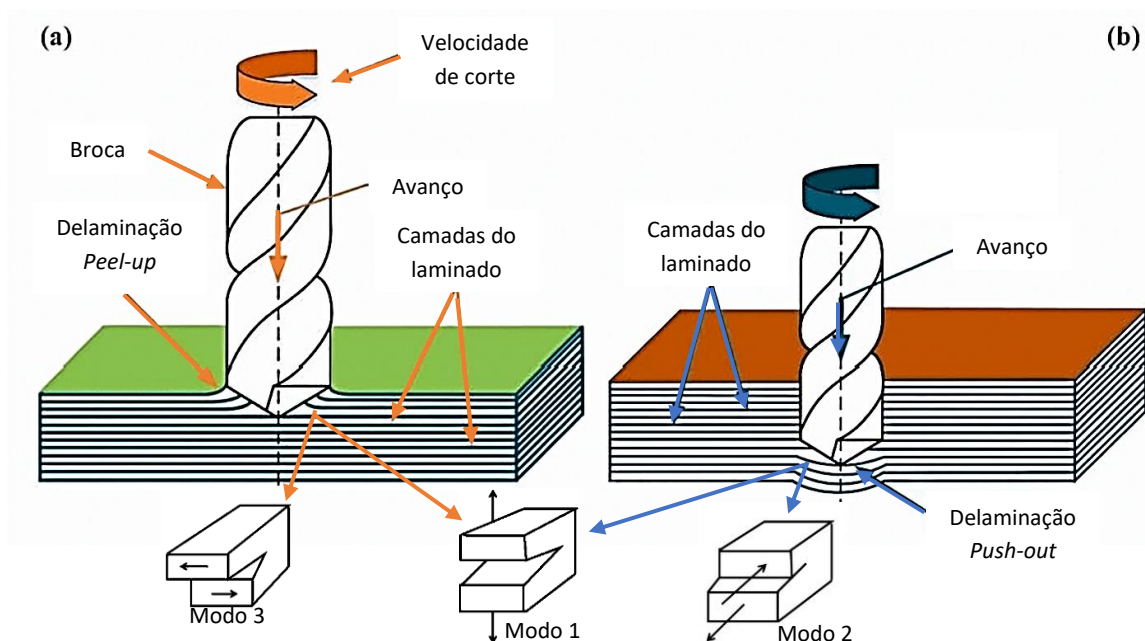


Figura 17 –Representação dos mecanismos de delaminação e respectivos Modos I, II e III desenvolvidas pela ponta da broca: a) Delaminação peel-out ; b) push-out. (11,49).

Em 1990, Hocheng e Dhara (53) formularam uma equação capaz de obter a força crítica a partir da qual ocorre a delaminação na furação com brocas helicoidais. A força crítica (F_{ct}) é calculada usando a taxa crítica de libertação de energia em modo de fratura I (G_{ic}), pela espessura (h) das placas que não foram furadas, pelo rácio dos coeficientes de Poisson (ν_{12}) e pelo módulo de elasticidade do compósito na direção um (E_1).

Equação 3

$$F_{ct} = \pi \times \left[\frac{8G_{ic}Eh^3}{3(1-\nu_{12}^2)} \right]^{\frac{1}{2}} \text{ (N)}$$

Atualmente, já existem inúmeras maneiras de conter a delaminação, para além da correta seleção dos parâmetros de corte, a utilização de um suporte de sacrifício na zona de saída do furo faz com que exista uma *back-up force*, que previne a delaminação na saída do furo. Outras opções passam por realizar uma furação criogênica onde a peça é previamente arrefecida numa solução de nitrogénio líquido (LN₂) e ainda seleccionar um revestimento adequado para a broca, tal como uma liga de alumínio, cromo e níquel (AlCrN).

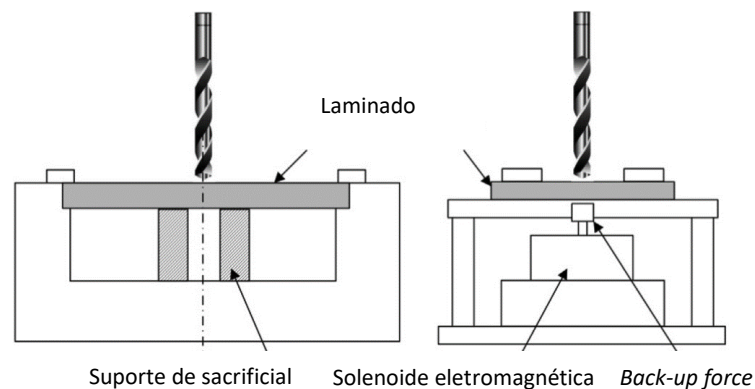


Figura 18 - Exemplos de furação com back-up force. a) suporte sacrificial b) solenoide eletromagnética com *back-up force* variável (49).

2.3. Avaliação do dano

De modo a garantir a qualidade de peça após a furação é necessário por vezes quantificar o dano causado. Para esse efeito são normalmente usados ensaios não destrutivos que permitem quantificar a área danificada. Porém, quando é necessário descobrir o limite de uma peça, recorre-se aos ensaios destrutivos, de modo a perceber e determinar as suas características mecânicas. Este capítulo visa aprofundar avaliação do dano em FRP.

2.3.1. Critérios analíticos

Como referido anteriormente, a delaminação é um dos principais danos originados pela furação sendo, por isso necessário quantificar esse defeito para aferir de que forma os vários parâmetros da furação afetam a delaminação.

Para que seja possível avaliar o dano originado pela delaminação, é primeiro necessário obter uma imagem do furo e da sua periferia. Existem inúmeras técnicas para obter uma imagem da zona danificada (54), tais como: tomografia de raio-x computadorizada, radiografia com recurso a raio-x, padrão de Moiré, fotografia digital, varrimento de ultrassons, termografia, estereomicroscopia e fotografia microscópica podem ser utilizadas.

Tendo em vista a área danificada do furo, Chen (3) propôs um fator de delaminação, (F_d), que é obtido através do rácio entre o diâmetro máximo da área danificada (D_{max}) e o diâmetro nominal do furo (D_0) **Equação 4**.

Equação 4

$$F_d = \frac{D_{max}}{D_0}$$

Apesar de ser uma boa tentativa, este fator é apenas unidimensional, não considerando a área danificada, sendo possível obter o mesmo fator de delaminação para dois furos com áreas de dano diferentes (Figura 19 e Figura 20). Sendo assim Davim *et al.* (10) realizou um ajuste ao fator originalmente proposto por Chen, atribuindo-lhe o nome de Fator de delaminação ajustado (F_{da}).

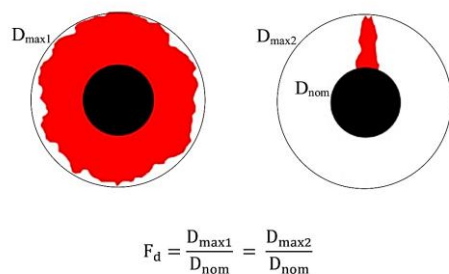


Figura 19 - Visualização de fatores de delaminação iguais para áreas de dano diferentes (dano assinalado a vermelho) (55).

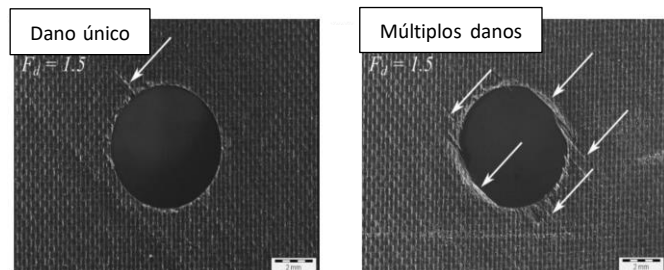


Figura 20 - Furos com o mesmo fator de delaminação, mas áreas de dano diferentes. (a) Apenas uma fibra danificada (b) Múltiplas fibras danificadas (55).

O fator desenvolvido por Davim *et al.* (10) é dado então pela Equação 5, onde (A_0) corresponde à área nominal do furo com diâmetro (D_0) e (A_{max}) à área do círculo cujo diâmetro é (D_{max}). Os parâmetros (α) e (β) são uma ponderação do peso de cada membro da equação e a soma de ambos deve ser um.

Equação 5

$$F_{da} = \alpha \frac{D_{max}}{D_0} + \beta \frac{A_{max}}{A_0}, \alpha + \beta = 1$$

Mesmo assim, outros autores ainda insatisfeitos com a avaliação e extensão da delaminação, procuraram determinar uma melhor solução. Tsao *et al.* (4) desenvolveram o Fator de Delaminação Equivalente, **Equação 6**, que procura relacionar a área nominal (A_0) do furo com a área de delaminação equivalente (A_d), este fator apesar de *ter* dados de difícil obtenção, como (A_d) área delaminada em redor do furo, acaba por ser mais preciso. Na Figura 21 podemos visualizar um esquema da F_{ed} .

Equação 6

$$F_{ed} = \frac{D_e}{D_0} \text{ onde } D_e = \left(\frac{4(A_d + A_0)}{\pi} \right)^{0.5}$$

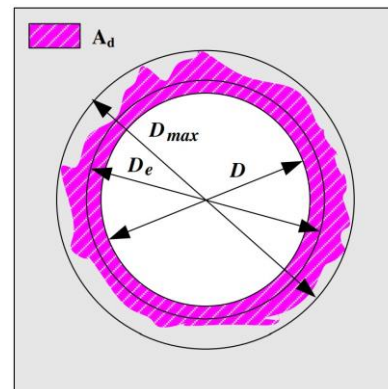


Figura 21 – Esquema do Fator de Delaminação Equivalente.

Mehta *et al.* (5) e Faraz *et al.* (6), propuseram ainda outros modelos para a avaliação do dano. Mehta *et al.* (5) propõem um indicador denominado Rácio de Dano, (D_{Rat}), que consiste no rácio entre a área de danificada na periferia do furo, ($D_{mar} = A_d$), e a área nominal do furo ($A_{AVG} = A_0$) (**Equação 7**).

Já Faraz *et al.* (6) afirma que o fator de delaminação (F_d) deve ser da mesma forma pela razão da subtração da área delaminada (A_d) com a área nominal pela área nominal do furo (A_0) e o resultado é apresentado em percentagem (Equação 8).

Equação 7

$$D_{Rat} = \frac{D_{mar}}{A_{AVG}}$$

Equação 8

$$F_d = \left(\frac{A_d - A_0}{A_0} \right) \%$$

2.3.2. Ensaios não destrutivos

De modo a garantir a qualidade após a furação, a segurança e qualidade do material, é necessário verificar a existência de defeitos no material, utilizando para tal diversos métodos não destrutivos. permitem que a peça seja avaliada e que continue apta para desempenhar a sua função. A avaliação e deteção de danos nos materiais compósitos são desafiantes, pois estes são anisotrópicos o que faz com que os danos possam aparecer em qualquer localização. A Tabela 7 dá-nos uma visão dos principais ensaios não destrutivos usados em materiais compósitos.

Tabela 7 - Visão geral dos principais ensaios não destrutivos (56,57).

Técnica	Capacidades	Limitações	Como funcionam
Inspeção visual	Falhas macroscópicas na superfície	Pequenas falhas superficiais são difíceis de detetar, impossível detetar falhas abaixo da superfície	Avaliação visual da peça
Microscopia	Pequenas falhas superficiais	Não é aplicável a grandes estruturas, impossível detetar falhas abaixo da superfície	Avaliação da peça através de um microscópio
Radiografia	Falhas subsuperficiais	Só consegue detetar falhas com um tamanho equivalente a 2% da espessura da peça	Um conjunto de raios-X é bombardeado numa peça, que é posicionada em frente a alvo sensível à radiação, ficando assim impressa no alvo uma imagem a 2D da peça e os seus defeitos
Ultrassom	Falhas subsuperfícies	O material deve ser um bom condutor de som	Um pulso de energia ultrassónica é lançado na direção perpendicular à peça, o pulso é então refletido por fronteiras bem definidas como o outro lado da peça ou por falhas no material. Comparando os tempos de retorno de cada pulso é então possível detetar falhas no interior do material
<i>Shearography</i>	Falhas superficiais e altamente portátil	Só é capaz de analisar a superfície da peça	Consiste num sensor de medição avançado associado a um sistema de excitação. Quando é aplicada uma carga ou tensão a uma superfície, esta deforma-se mais do que o material principal já que os defeitos isolados provocam uma pressão localizada na estrutura. Quando a forma da superfície muda, o padrão estocástico também muda. Subtraído a imagem pré e apos excitação é possível detetar falhas isoladas
Emissão acústica	Capaz de analisar a estrutura completa	Equipamentos de elevado custo e difícil interpretação	Um conjunto de ondas sonoras são aplicadas à peça, sendo então possível detetar se a mesma possui falhas através da sua resposta.

2.3.3. Ensaio destrutivos

Com os avanços na área dos materiais compósitos e a introdução de novas matrizes com mais cargas e reforços diferentes, foi necessário comparar as propriedades entre os materiais. Analogamente aos materiais metálicos, foram desenvolvidos ensaios mecânicos destrutivos de modo a quantificar essas alterações. Os materiais compósitos são submetidos aos seguintes ensaios:

- Ensaio Tração;
- Ensaio de Compressão;
- Ensaio de Flexão;
- Ensaio de Impacto.

Ao contrário dos materiais metálicos, os compósitos têm ensaios adaptados, ou seja, com procedimentos e especificações diferentes. Contudo esses ensaios são normalizados.

Ensaio de tração

O ensaio de tração é realizado num provete normalizado que é submetido a uma força uniaxial que o deforma até à fratura. Durante esse processo, os valores de força aplicada e de deformação são registados consoante a uma frequência de aquisição, de modo a serem analisados posteriormente para a obtenção do módulo de elasticidade e do coeficiente de *Poisson*.

A norma ASTM D3039 (58) normaliza o ensaio de tração tradicional e a norma ASTM D5766 (9) normaliza o mesmo ensaio para provetes fragilizados com furo no centro ou extremidade. Ainda com o foco na testagem após a furação de materiais compósitos, iremos aprofundar o ensaio *Bearing* com a norma ASTM D5961 (8) que define diretrizes para avaliação das propriedades do material quando está sujeito a uma ligação mecânica e se encontra sobre um esforço de tração. Neste ensaio o provete é acoplado a um suporte duplo através de um pino e a carga é então aplicada diretamente no furo para determinar a capacidade de sustentação do mesmo.

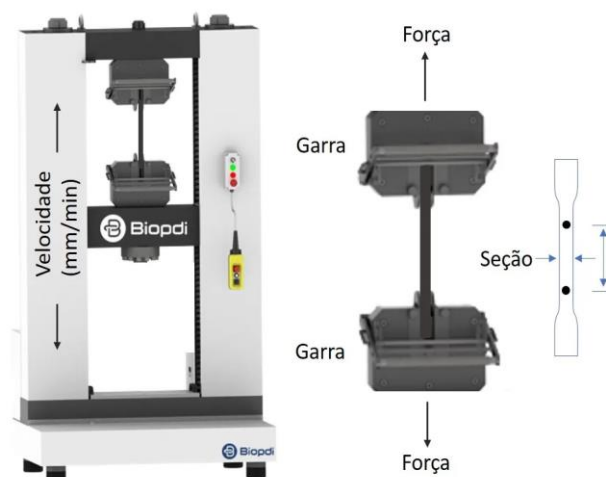


Figura 22 – Exemplo de máquina universal de ensaios da marca Biopdi®, bem como um pequeno esquema de um ensaio de tração (59).

Ensaio de flexão

Este ensaio tem como objetivo a determinação do módulo de flexão e a resistência à flexão de um material. Para a realização do mesmo, os provetes foram posicionados horizontalmente sobre dois apoios e, em seguida, foi exercida uma força na secção central através de um ou dois pontos de contacto, como é possível ver na Figura 23.



Figura 23 - Exemplo de um ensaio de flexão de 3 pontos (60).

Para realizar este ensaio em peças com um furo na secção central, deve-se usar o ensaio de flexão de três pontos, pois, este permite analisar uma zona específica invés de uma área, como no de quatro pontos de contato.

Segundo Magalhães (12), os ensaios de flexão não permitem obter valores de propriedades que possam ser usados no projeto. Isto resulta naturalmente do facto de o estado de tensão no provete não ser uniforme e da forte sensibilidade dos resultados a pequenas variações nas dimensões dos provetes. No entanto, os ensaios de flexão são extremamente úteis para o controlo de qualidade, sem os custos de preparação e de instrumentação dos ensaios de tração.

3. MÉTODOS E APLICAÇÃO

O presente capítulo tem o objetivo descrever detalhadamente o fabrico dos provetes e a metodologia dos ensaios mecânicos a realizar, com o objetivo de obter respostas para as questões levantadas no Cap. 2.

Primeiramente, será descrito processo de fabrico dos provetes e as suas propriedades iniciais. Essas propriedades foram comprovadas experimentalmente pela realização de ensaios de tração em provetes com fibras orientadas unidireccionalmente e em cross-ply.

Seguidamente, será referido o plano de furação realizado nos provetes obtidos, bem como uma descrição detalhada da realização das radiografias dos furos, para a quantificação da área danificada.

Por fim, serão descritos os ensaios destrutivos realizados para avaliar a perda de propriedades mecânicas após a furação. Esses ensaios serão o de *Pin-Bearing* (8) e o ensaio desenvolvido por Wang *et al.* (7).

3.1. Fabrico do laminado

As placas foram confeccionadas com um pré-impregnado (*Prepreg*) da marca HEXCEI® composto por fibras de carbono AS4 12K (HexTow®, EUA) e resina de epóxido 8552 (HexPly®, EUA). O *prepreg* têm um volume nominal de fibras de 57 %e foi curado numa prensa de pratos quentes, com um ciclo de três horas (uma hora a 110 C° e duas horas a 180 C°). Todas as informações referentes ao seu fabrico podem ser consultadas no ANEXO A.

3.1.1. Preparação dos provetes

Os provetes foram fabricados no INEGI. Para gerar todos os provetes necessários para os ensaios fabricou-se cinco placas, que posteriormente foram cortadas da seguinte forma:

Tabela 8 - Distribuição dos provetes pelas placas.

Placa	Após corte
Uma placa com 250x160 mm unidireccional com 18 camadas (fibras orientadas na direção 250 mm)	Seis provetes retangulares de 250x24mm com as fibras orientadas a 0°.
Uma placa com 160x250 mm unidireccional com 18 camadas (fibras orientadas na direção 160 mm)	Seis provetes retangulares de 250x24mm com as fibras orientadas a 90°.
Três placas com 300x300 mm <i>cross-ply</i> com 20 camadas [0°/90°] _s	Seis provetes 250x24 mm e trinta e cinco 135x36 mm

3.1.2. Propriedades do laminado

Após o fabrico dos laminados, para confirmar a qualidade e similaridade do *CFRP*, foram realizados ensaios de tração a três provetes *cross-ply* (um de cada placa) e a quatro provetes de cada placa unidirecional, fibras orientadas a 0° e a 90°. Os provetes foram testados na máquina AG-X Plus (Shimadzu, Japão) (Figura 33), no LET do ISEP, a uma velocidade de 2 mm/min e segundo a norma D3039 (58).

Após o ensaio dos provetes, os valores mostraram-se dispersos, pelo que foi necessária uma nova testagem com os provetes restantes. Uma vez que apenas sobraram dois provetes unidirecionais de cada tipo, só se realizaram novos testes nas três restantes placas *cross-ply*, sendo que os resultados obtidos no LET para os provetes unidirecionais se encontram no APÊNDICE D.

Os novos ensaios de tração aos provetes *cross-ply* foram realizados no INEGI e seguiram a norma D3039 – *Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials* (58). A máquina universal de ensaios usada foi a 5900R (Instron®, EUA) com uma capacidade de carga de 200 kN.

Para determinar a deformação do provete foi necessário utilizar um sistema de captação de imagem, utilizando a câmara ace (Basler®, Alemanha), cujas informações podem ser encontradas no ANEXO G. O *setup* dos ensaios pode ser observado na Figura 24.



Figura 24 - Setup usado para o ensaio de tração dos provetes *cross-ply*.

Após a obtenção das imagens e com o auxílio do programa Dice (*Digital Image Correlation Engine*), foi possível obter a deformação do provete para cada *frame*, sendo que a captura de imagem foi feita a 1 Hz (1 *frame* por segundo).

Posteriormente, com o auxílio de um código desenvolvido em MatLab®, foi automatizada a aglomeração da deformação proveniente de cada imagem, gerando-se como *output* do programa um gráfico de deformação do provete em x e y, em função do tempo (APÊNDICE C). Após a obtenção dos tempos correspondentes ao momento em que ocorre a deformação de 0,5 % e de 2,5% e do

cruzamento destes com os dados obtidos pela máquina universal de ensaios, é possível calcular o coeficiente de Poisson e o módulo de elasticidade.

A Tabela 9 mostra os resultados obtidos para as três placas *cross-ply* e para as oito unidirecionais.

Tabela 9 – Propriedades dos provetes *cross-ply* e unidirecionais.

	<i>Cross-ply</i>		Unidirecional 0°		Unidirecional 90°	
	E₁ (Gpa)	Poisson (ν)	E₁ (Gpa)	Poisson (ν)	E₁ (Gpa)	Poisson (ν)
1ª Placa	62,41	0,047	106,42	0,268	8,94	0,024
2ª Placa	60,25	0,038	100,44	0,204	9,13	0,059
3ª Placa	60,64	0,054	128,39	0,304	9,26	0,040
4ª Placa	-	-	116,54	0,282	8,97	0,021
Média	61,10	0,046	112,95	0,265	9,05	0,032
Erro relativo %	1,88	17,002	10,85	16,18	1,63	55,42

Como podemos verificar pelos resultados obtidos através dos ensaios de tração, todos os provetes *cross-ply* e, conseqüentemente, as placas apresentam valores muito próximos para o módulo de elasticidade, com erro percentual dos resultados menor do que 2%. Todos os provetes apresentaram o mesmo tipo de rotura XGT (*explosive; gage; top*), sendo que, o primeiro caractere corresponde ao tipo de falha (*explosive*), o segundo à área onde ocorreu a falha (*gage*) e o terceiro a localização (*top*) da mesma.

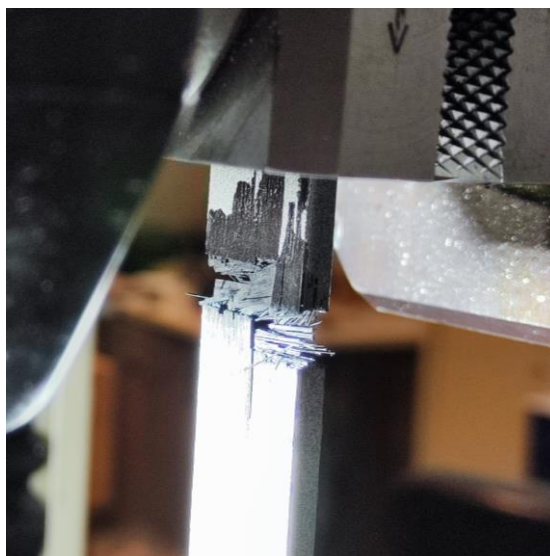


Figura 25 - Estado do provete *cross-ply* após o ensaio de tração.

Em relação ao coeficiente de Poisson, o erro obtido foi de 17%, o que indica um valor significativamente mais alto em comparação em comparação com o erro obtido para o módulo de elasticidade. Essa discrepância pode ser atribuída à anisotropia típica dos materiais compósitos. No entanto, é possível confirmar que qualquer das placas apresenta valores semelhantes. Além disso, ao utilizar provetes provenientes de diferentes placas para as mesmas condições de furação, nenhum dos resultados será afetado pelas pequenas discrepâncias provenientes do material inicial.

3.2. Plano de furação

Após a produção dos provetes, foi necessário planejar a sua furação. Sendo assim, foram aferidas quais as melhores geometrias para a broca e os respectivos parâmetros de corte, através dos seguintes artigos (61,62). Foram usadas duas brocas, uma de geometria Brad ref: 1149 (Guhring®, Alemanha) e outra Bidiametral ref: 850.037.00 (InovaTools®, Alemanha), ambas com diâmetro nominal de 6 mm. Esta escolha permite comprovar a eficiência das brocas Brad e, ainda, comparar os resultados com uma broca inovadora especialmente desenvolvida para a furação de *CFRP*. No Anexo B, encontra-se a brochura de ambas as brocas.



Figura 26 - Modelos de broca Bidiametral (cima) e Brad (baixo) usadas na furação (63,64).

Para os parâmetros de corte foram criadas oito condições, entre elas estão as recomendadas pelo fabricante (assinaladas a cinzento) e ainda seis variações que pretendem realçar padrões originados pela velocidade de corte e avanço. Estas condições visam aferir a influência de cada parâmetro no dano causado pela furação de *CFRP*. A Tabela 10, mostra todas as oito condições:

Tabela 10 - Diferentes parâmetros usados para a furação dos provetes de *CFRP*.

	RPM	Avanço (mm/rev)
Bidiametral	3000	0,3
		0,1
	1500	0,3
		0,1
Brad	3000	0,3
		0,1
	1500	0,3
		0,1

De modo a serem realizados todos os ensaios destrutivos pretendidos foi escolhida a seguinte localização para os dois furos a realizar nos provetes de 135x36 mm (Figura 27).

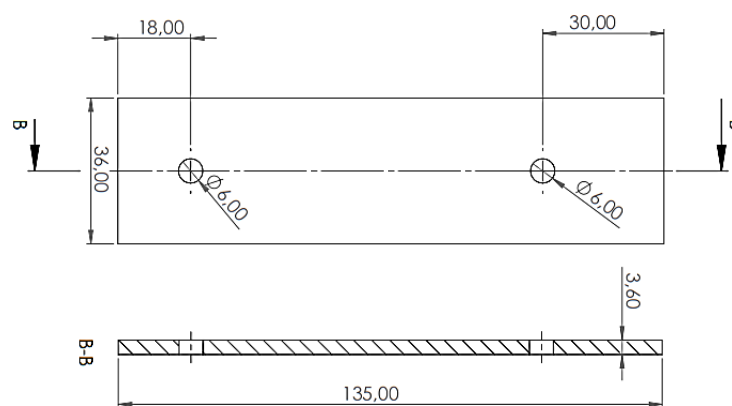


Figura 27 - Localização dos furos nos provetes 135x36 mm.

A furação dos provetes foi realizada na máquina de controle numérico por computador VF-2 (HAAS®, Alemanha) (Figura 28), pelo técnico superior Víctor Moreira, no LTM do ISEP. A furação foi feita sem um suporte sacrificial ou uma solenóide eletromagnética com *back force* variável. As especificações da máquina encontram-se no ANEXO F.

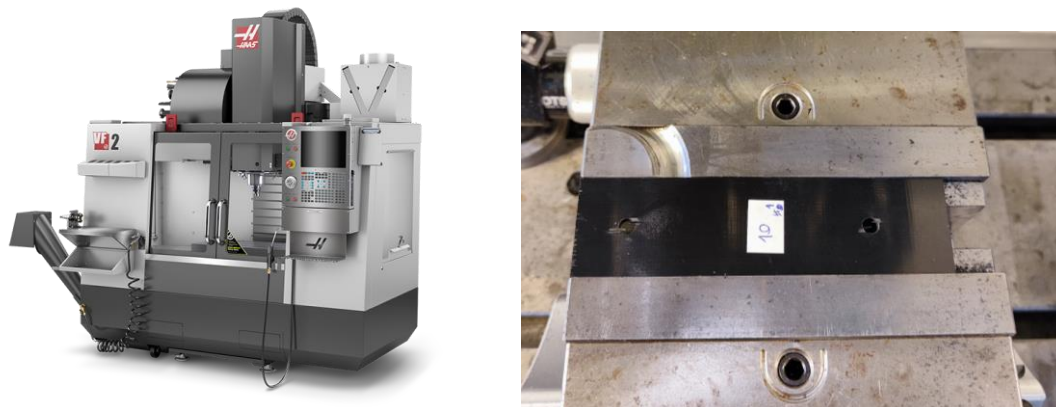


Figura 28 - Máquina CNC VF-2 (HAAS®, Alemanha) (esquerda) (65) e o *setup* de furação (direita).

3.2.1. Radiografias

As radiografias a serem realizadas após a furação e previamente aos ensaios destrutivos, visam avaliar a extensão do dano na periferia do furo. Esta técnica destaca a zona danificada, tanto na saída como na entrada do furo. Ao contrário de outras técnicas, como a de ultrassons, que é capaz de avaliar o dano ao longo de toda a profundidade do furo.

Para que seja possível realçar os danos presentes em ambas as faces, é necessário submergir o provete num líquido contrastante, neste caso, usou-se o Analar (NORMAPUR®, França) que apresenta uma concentração maior ou igual a 99,4% de Di-iodometano (ANEXO C).

Após a submersão do provete no líquido contrastante, deu-se início à realização das radiografias com o equipamento intraoral de raio-x X-MIND DC (SATELEC ACTEON®, França) em conjugação com o sensor digital de radiografia RVG 5100 (Kodak®, EUA). Como representado na Figura 29. Ambos os manuais dos aparelhos se encontram nos ANEXOS D e E respetivamente.

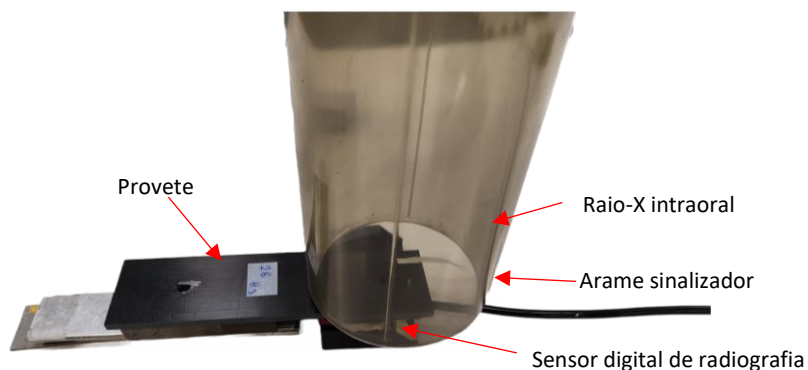


Figura 29 - Configuração para a obtenção das radiografias.

Para todos os provetes, foi utilizado um arame sinalizador de modo que fosse possível posteriormente reconhecer a orientação do mesmo. Para além disso, todas as radiografias foram feitas com a face de entrada da broca voltada para cima.

A imagem foi guardada num ficheiro .bmp (Windows Bit Map), uma vez que este formato proporciona uma imagem sem qualquer tipo de compressão, não ocorrendo perda de resolução. Este formato permite ainda tratar os pixéis como uma matriz, sendo uma mais-valia para o posterior processamento de imagem.

3.2.2. Processamento de imagem

De modo a otimizar o processamento de imagem, foi usado um programa desenvolvido em *MATLAB*[®] pelo Prof. Dr. João Emílio Carrilho de Matos. Este programa é capaz de obter:

- Perímetro do furo;
- Área do furo;
- Área do dano;
- Raio circular envolvente;

Os parâmetros mencionados são obtidos de forma autónoma, sendo apenas necessário definir a área de um pixel e a área nominal do furo e realizar alguns *inputs* com o rato.

Ao executar o programa, o primeiro passo é introduzir o ficheiro de imagem obtido pela radiografia. Esse ficheiro é uma imagem em escala de cinzentos que, após sofrer um corte de modo a reduzir o tempo de processamento, irá ser convertido para uma imagem binária composta apenas por pixéis brancos e pretos.

No caso das imagens em escala de cinzentos, cada pixel assume um valor entre 0 e 255 (66), já na imagem binária, como o nome indica cada pixel assume o valor de 0 (preto) ou 1 (branco). Sendo assim, para que se possa converter uma imagem de escala de cinzentos para binária, é necessário definir a partir de que valor os pixéis passam a ser representados pelo valor 1 e não 0. A esse valor dá-se o nome de *threshold* (67), o *threshold* é um valor contido entre 0 e 1, pelo que, quanto maior o valor do *threshold*, maior a quantidade de pixéis pretos presentes na imagem. O programa realiza o processo descrito acima automaticamente, dando a opção de corrigir o valor do *threshold* manualmente, caso seja necessário. A Figura 30, apresenta três imagens com diferentes níveis de *threshold*: um automático, um maior e um menor.

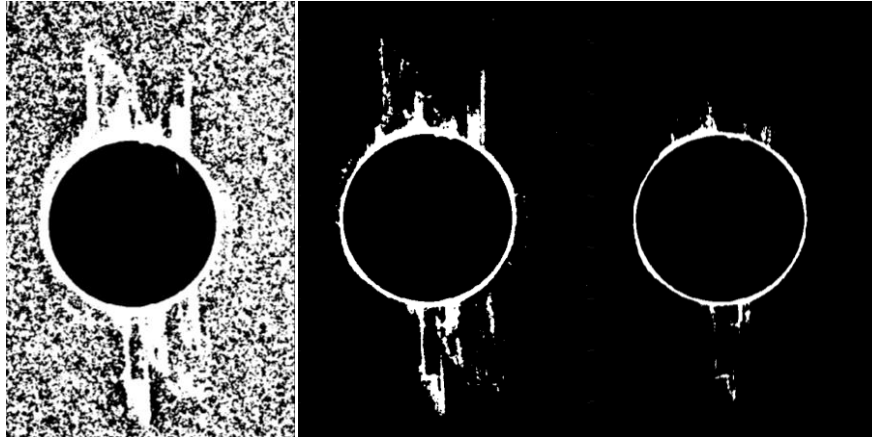


Figura 30 – Diferença entre o valor de *threshold*: 0,2 (esquerda), 0,48 automático (meio) e 0,9 (direita).

Essa intervenção pode ser necessária caso a imagem contenha zonas mais iluminadas, ou quando a zona danificada não esteja bem representada, pois, este método só depende da intensidade luminosa, não existindo qualquer outro parâmetro a ser analisado em cada pixel (68).

Finalmente, ao seleccionar um pixel presente na fronteira do dano (a branco), o programa irá definir a fronteira entre a zona danificada e não danificada e fazer todos os cálculos referidos anteriormente.

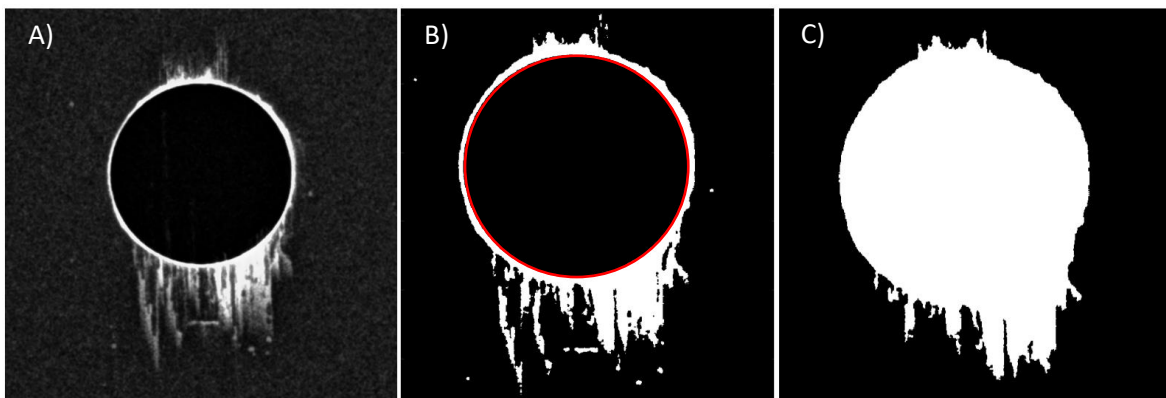


Figura 31 - Várias etapas do tratamento de imagem. A) Radiografia B) Imagem Binária (diâmetro nominal do furo representado a vermelho) C) Definição da fronteira do dano

Dos 35 provetes cortados apenas foram usados 32 (4 por cada condição referida na Tabela 10), sobrando 3 para repetir algum ensaio, se necessário. Para uma melhor organização e distinção dos provetes, estes foram numerados e identificados com a terminologia “b” para evidenciar o furo localizado a 30 mm da borda. Todos os valores apresentados são em pixéis, à exceção, dos do nível de *threshold*. Com o intuito de proporcionar uma melhor orientação, todos os dados apresentados foram devidamente legendados da seguinte maneira: primeiro o tipo de broca, seguido pela velocidade de rotação e, por fim, a velocidade de avanço. A Tabela 11 apresenta todos os dados recolhidos após o processamento de imagem dos 32 provetes utilizando o programa MATLAB®. De notar que algumas das imagens foram repetidas com o objetivo de confirmar discrepâncias nos valores, melhorando assim a precisão dos resultados.

Tabela 11 – Dados recolhidos pelo programa MATLAB® em pixéis.

Prov.	Tipo de thres.	Nível do thres.	Perímetro	Área do furo	Área do dano	Raio circ. env.	Lado 1 env. furo	Lado 2 env. furo	
1	man.	0,550	1558	81872	11758	286	324	319	
2	man.	0,600	1217	81235	5262	202	319	320	
3	man.	0,700	1314	82081	7326	278	323	323	
4	man.	0,680	1484	83438	5198	240	328	325	Bidiametral
b1	man.	0,600	1091	82480	5228	219	324	324	3000-0,1
b2	man.	0,500	1673	81686	12970	341	325	321	
b3	man.	0,700	1128	82450	4487	186	322	324	
b4	man.	0,700	1330	83795	4900	186	327	327	
5	man.	0,450	1765	84031	8953	410	327	328	
6	man.	0,500	1676	82654	9684	274	325	323	
7	man.	0,550	2280	82259	9948	310	323	323	
8	man.	0,700	1146	83121	5505	185	326	325	Bidiametral
b5	man.	0,700	1318	84045	4856	183	327	329	1500-0,1
b6	man.	0,650	1346	82814	5799	261	325	324	
b7	man.	0,070	1117	83051	4528	227	325	326	
b8	man.	0,350	1468	83374	7316	207	324	327	
9	aut.	0,110	2510	83855	13470	544	326	328	
10	man.	0,450	1906	83648	10516	418	326	327	
11	aut.	0,390	4902	83442	25954	594	324	326	
12	aut.	0,460	2860	83522	16895	378	326	326	Bidiametral
b9	man.	0,080	3193	82087	18107	397	323	323	3000-0,3
b10	man.	0,070	2169	81721	11993	279	321	323	
b11	man.	0,070	3562	81341	30979	800	320	322	
b12	man.	0,070	2791	81851	17284	600	321	323	
13	aut.	0,435	3083	82628	22432	418	325	322	
14	man.	0,280	3631	83092	30052	551	326	326	
15	aut.	0,482	2343	83090	15652	348	324	325	
16	aut.	0,435	2546	83038	16469	441	326	323	Bidiametral
b13	man.	0,065	3446	82876	22752	472	325	325	1500-0,3
b14	man.	0,450	2422	82287	16772	264	324	324	
b15	man.	0,060	3428	83396	20957	438	325	326	
b16	aut.	0,521	2355	82748	15603	502	326	323	
17	man.	0,500	2135	84413	11694	236	329	331	
18	man.	0,500	1574	83999	12484	239	327	327	
19	aut.	0,494	2294	82807	13035	293	324	325	
20	man.	0,600	1651	83780	8303	206	326	326	Brad
b17	man.	0,450	2588	82049	16609	248	322	323	3000-0,1
b18	aut.	0,509	1811	83480	11793	265	326	325	
b19	aut.	0,494	2091	83708	13935	324	326	326	
b20	aut.	0,509	1718	83227	9481	214	323	327	

21	aut.	0,490	2302	82159	11113	268	323	323	
22	aut.	0,117	1355	83213	5926	212	325	325	
23	aut.	0,074	1542	83331	5818	241	325	325	
24	aut.	0,168	1930	82595	7393	357	324	324	Brad
b21	man.	0,055	1572	83803	7267	191	324	335	1500-0,1
b22	man.	0,550	1508	83535	7309	209	324	327	
b23	aut.	0,109	2326	83317	13370	311	322	328	
b24	aut.	0,423	2533	83165	16181	361	325	324	
25	aut.	0,427	2863	83310	25284	442	325	326	
26	aut.	0,482	2564	83350	17372	379	325	326	
27	aut.	0,466	2476	83009	24031	350	325	325	
28	aut.	0,427	5410	82908	28683	522	324	324	Brad
b25	aut.	0,454	2908	83363	20617	446	326	326	3000-0,3
b26	aut.	0,482	2452	83069	19899	331	325	326	
b27	aut.	0,470	2920	82614	20760	358	324	325	
b28	aut.	0,407	3139	82528	28594	381	326	323	
29	aut.	0,403	3412	83239	26003	413	324	325	
30	aut.	0,392	3993	82789	28326	399	324	324	
31	aut.	0,411	3275	83333	25409	466	325	326	
32	aut.	0,505	2415	82887	19631	346	324	325	Brad
b29	aut.	0,427	3561	82814	22702	511	324	326	1500-0,3
b30	aut.	0,439	2484	82282	18629	398	322	323	
b31	aut.	0,458	2122	83354	24292	395	324	325	
b32	aut.	0,427	1907	83729	18704	272	325	326	

Após uma análise cuidadosa dos dados, foram calculadas as médias para cada cenário de furação de modo a resumir a tendência central dos dados e, posteriormente, toda a informação foi convertida de pixels para mm e mm², considerando que um pixel tem 0,0003438 mm² e 0,0185405 mm de lado (valores retirados do manual do sensor digital de radiografia).

Tabela 12 - Média dos valores de cada processo de furação convertido em mm e mm².

	Perímetro (mm)	Área do furo (mm ²)	Área do dano (mm ²)	Raio circ. env. (mm)	Lado1 env. furo (mm)	Lado2 env. furo (mm)
Bidiametral 3000-0,1	25,0181	28,3180	2,4548	4,4887	6,0071	5,9863
Bidiametral 1500-0,1	28,0796	28,5892	2,4316	4,7621	6,0303	6,0373
Bidiametral 3000-0,3	55,3735	28,4224	6,2390	9,2932	5,9955	6,0210
Bidiametral 1500-0,3	53,8926	28,4949	6,9046	7,9550	6,0280	6,0118
Brad 3000-0,1	36,7612	28,6801	4,1823	4,6926	6,0326	6,0488
Brad 1500-0,1	34,9210	28,5793	3,1959	4,9818	6,0071	6,0512
Brad 3000-0,3	57,3180	28,5377	7,9595	7,4364	6,0257	6,0280
Brad 1500-0,3	53,6956	28,5496	7,8932	7,4155	6,0071	6,0257

Numa primeira análise, é possível notar algumas tendências e diferenças entre os diferentes tipos de brocas e as configurações de velocidade. Por exemplo, a área do dano tende a variar significativamente, demonstrando uma influência mais pronunciada dos parâmetros de corte.

3.3. Ensaios mecânicos

3.3.1. Bearing

Para este ensaio foi seguida a norma D5961/D5961M – 17 (*Procedure A*) (8), que visa avaliar a resistência *bearing* de juntas aparafusadas ou com pino, de compósitos multidirecionais de matriz polimérica. A norma refere que um provete deve ter as seguintes dimensões e geometria:

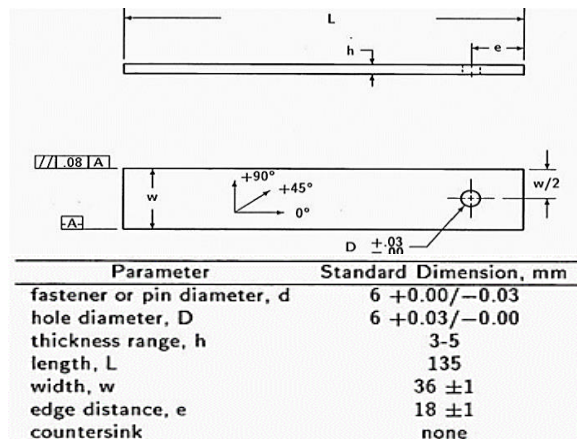


Figura 32 – Dimensões do provete para o ensaio *Bearing* segundo a norma D5961/D5961M - 17 (*Procedure A*) (8).

Como podemos observar na Figura 27, o provete respeita todos os critérios descritos na Figura 32, e ainda apresenta um furo extra, de modo que se possa realizar o ensaio *Pin Bearing*, descrito no subcapítulo seguinte. O ensaio foi realizado na máquina AG-X Plus (Shimadzu, Japão) (Figura 33), no LET, a uma velocidade de 2 mm/min e foi finalizado mal foi notada uma descida notória na força sustentada pelo material. Para fixar o provete utilizou-se o suporte presente na Figura 33.

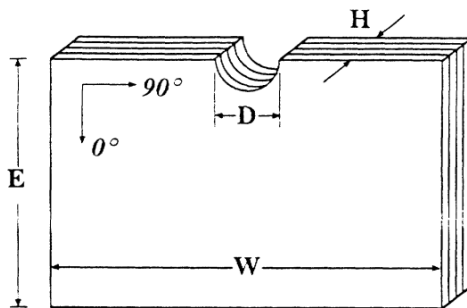
Todos os resultados obtidos, podem ser consultados numa tabela presente no APÊNDICE B.



Figura 33 - Suporte usado no ensaio *Bearing* (esquerda) (8). Máquina universal de ensaios AG-X Plus (Shimadzu, Japão) (direita) (69).

3.3.2. Pin Bearing

O ensaio *Pin Bearing* foi realizado de acordo com o ensaio proposto por Wang *et al.* (7). Desta forma, os provetes foram cortados pelo centro do furo localizado a 30 mm da extremidade. Ao realizar este corte foram assegurados os rácios necessários para o ensaio (Figura 34), de modo que a rotura seja realizada por compressão pura, e não haja qualquer tipo de flexão no espécime.



$$\frac{E}{D} = 5 \quad (E = 30 \text{ mm e } D = 6 \text{ mm})$$

$$\frac{W}{D} = 6 \quad (W = 36 \text{ mm e } D = 6 \text{ mm})$$

Figura 34 – Rácio proposto por Wang *et al.* (7) para o ensaio *Pin Bearing*.

O ensaio realizou-se no LET e utilizou-se uma cunha com uma extremidade em formato semicircular ($R=3,175 \text{ mm}$) para esmagar os provetes. A cunha foi aplicada no semicírculo resultante do corte feito na zona central do furo e a velocidade de avanço adotada foi de $1,27 \text{ mm/min}$.

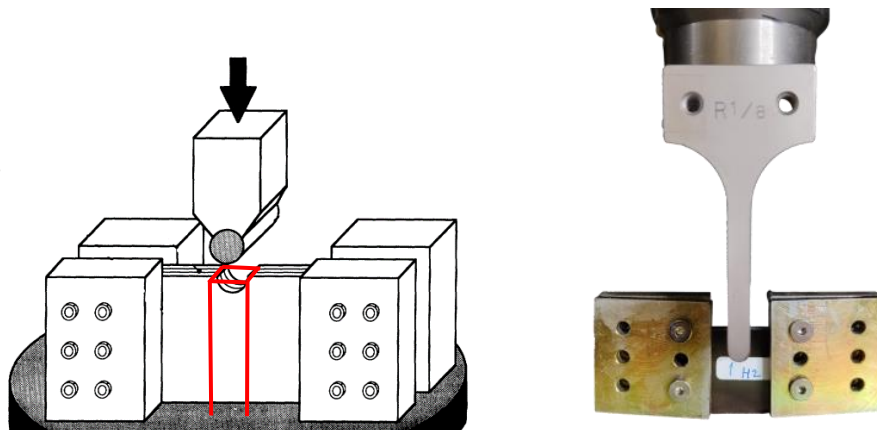


Figura 35 -Modelo da montagem do provete e seção resistente ao esmagamento (vermelho) e *setup* usado no ensaio.

Para o posterior cálculo da tensão, a seção resistente ao esmagamento irá ser calculada multiplicando-se o diâmetro do furo (6mm) pela espessura do provete na região do furo, medida essa adquirida com o auxílio de um paqmetro. Cada teste foi encerrado quando ocorria uma queda brusca na força, indicando a rotura do material. Todos os resultados obtidos, podem ser consultados numa tabela presente no APÊNDICE C.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo, são analisados e discutidos os resultados obtidos para todos os estudos descritos no Capítulo 3. Inicialmente, serão apresentados os dados relativos à delaminação com base nos diferentes conjuntos de parâmetros e ferramentas utilizadas. Em seguida, serão discutidos os resultados obtidos no estudo da relação entre a área de dano e a perda de propriedades mecânicas.

Todos os resultados foram submetidos a análises estatísticas a fim de destacar comportamentos, relações e tendências. Essa análise foi conduzida utilizando o MS Excel®.

4.1. Delaminação

Com o objetivo de uma representação mais precisa da delaminação, serão apresentados dois parâmetros: o fator de delaminação equivalente (**Equação 6**) e o rácio de dano (**Equação 7**). No entanto, o fator de delaminação será excluído, uma vez que, conforme demonstrado no Capítulo 2, não descreve adequadamente a delaminação.

Inicialmente, os resultados serão apresentados por geometria e, posteriormente, em conjunto, o que facilita a interpretação e discussão dos resultados.

Os resultados estão dispostos por ordem crescente, sendo que os valores de menor dano se apresentam à esquerda.

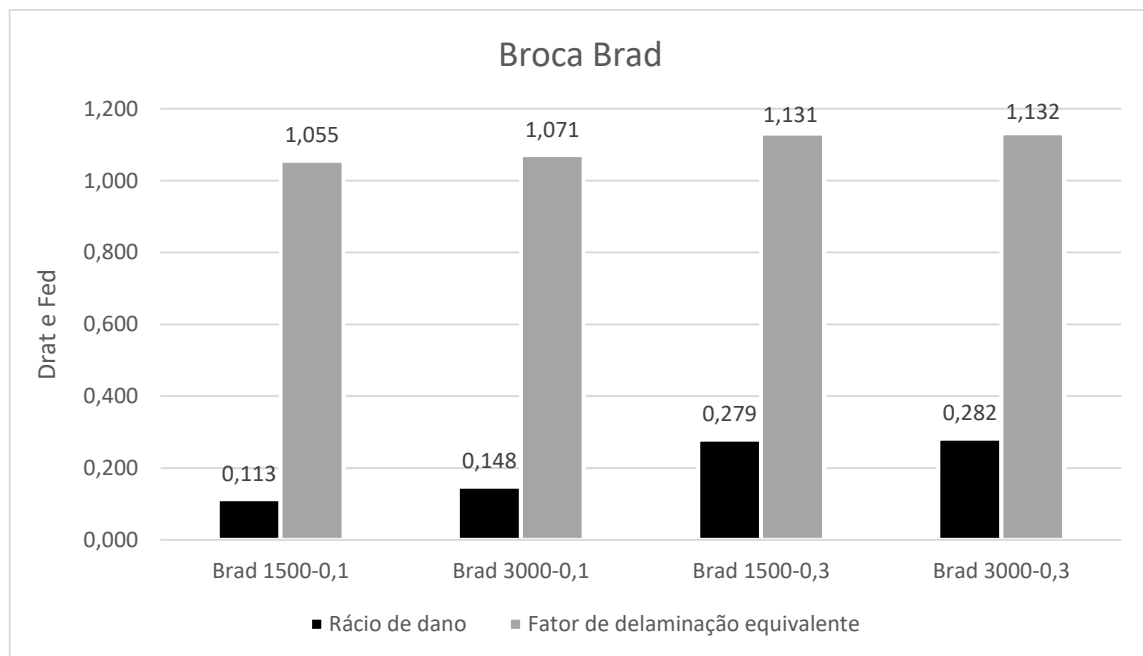


Figura 36 – Rácio de dano e fator de delaminação equivalente para a broca Brad.

Ao analisar os parâmetros rácio de dano e fator de delaminação equivalente, presentes na Figura 36, com base nas diferentes velocidades de rotação e avanço das brocas Brad, podemos aferir os seguintes resultados:

1. Variação do rácio de dano (Drat):

- A configuração “Brad 3000-0,3” apresenta a maior rácio de dano ($Drat = 0,282$), seguida pela configuração “Brad 1500-0,3” ($Drat = 0,279$);
- As configurações “Brad 3000-0,1” e “Brad 1500-0,1” têm valores menores de Drat, indicando uma área de dano relativamente menor em comparação com as configurações “Brad 3000-0,3” e “Brad 1500-0,3”;

2. Variação do fator de delaminação equivalente (Fed):

- A configuração “Brad 3000-0,3”, apresenta a maior fator de delaminação equivalente ($Fed = 1,132$), seguida pela configuração “Brad 1500-0,3” ($Fed = 1,131$);
- As configurações “Brad 1500-0,1” e “Brad 3000-0,1” têm valores menores de Fed, indicando uma área de dano relativamente menor em comparação com as configurações “Brad 1500-0,3” e “Brad 3000-0,3”;

Conforme Davim *et al.* (70) concluiu, verifica-se que, para as brocas de geometria Brad, um aumento do avanço (0,1 para 0,3 mm/rev) tende a resultar numa maior área danificada. Além disso, um aumento na velocidade de rotação (1500 para 3000 rpm) também contribuiu para uma maior delaminação, o que segundo a literatura não era de esperar. Essas observações indicam que as velocidades de rotação e avanço têm um efeito significativo na magnitude do dano causado pela furação em materiais compósitos de matriz polimérica. É de notar que, a velocidade de avanço apresenta um peso significativamente maior em comparação à velocidade de rotação. Mais especificamente, a velocidade de avanço tem um peso 7 vezes maior do que a velocidade de corte no estudo da área de dano realizado à broca Brad.

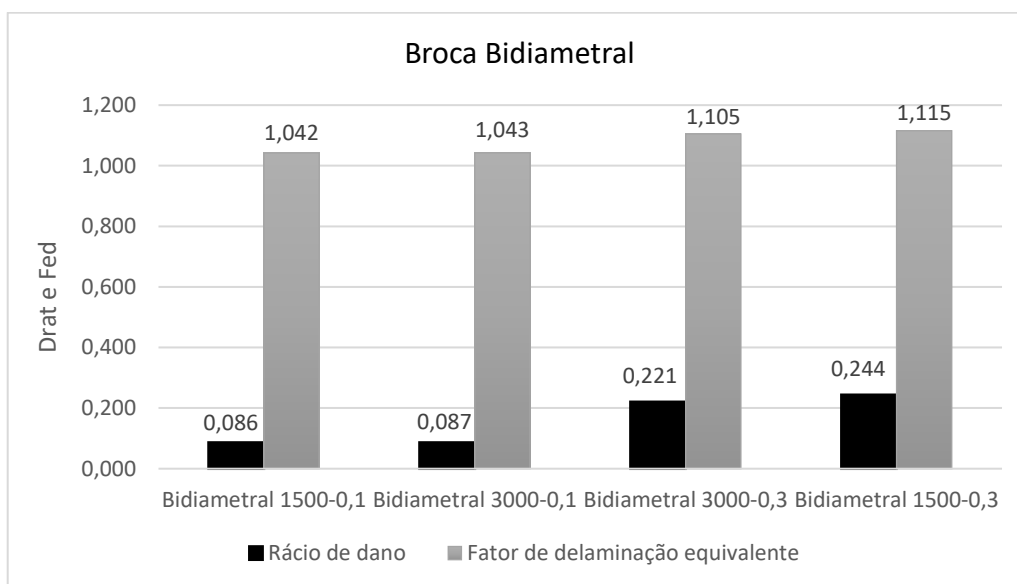


Figura 37 – Rácio de dano e fator de delaminação equivalente para a broca Bidiametral.

Já na broca Bidiametral, ao analisar os mesmos parâmetros presentes na Figura 37, podemos notar que os resultados são semelhantes:

1. Variação do rácio de dano (Drat):

- A configuração "Bidiametral 1500-0,3" apresenta a maior rácio de dano (Drat = 0,244), seguida pela configuração " Bidiametral 3000-0,3" (Drat = 0,221);
- As configurações "Bidiametral 3000-0,1" e "Bidiametral 1500-0,1" têm valores menores de Drat, indicando uma área de dano relativamente menor em comparação com as configurações "Bidiametral 3000-0,3" e "Bidiametral 1500-0,3";

2. Variação do fator de delaminação equivalente (Fed):

- A configuração "Bidiametral 1500-0,3", apresenta a maior fator de delaminação equivalente (Fed = 1,115), seguida pela configuração "Bidiametral 3000-0,3" (Fed = 1,105);
- As configurações "Bidiametral 1500-0,1" e "Bidiametral 3000-0,1" têm valores menores de Fed, indicando uma área de dano relativamente menor em comparação com as configurações "Bidiametral 1500-0,3" e "Bidiametral 3000-0,3";

A broca Bidiametral também apresenta uma área de dano maior quando o avanço aumenta de 0,1 para 0,3 mm/rev, indicando uma tendência consistente da influência da velocidade de avanço. No entanto, relativamente à velocidade de rotação, as conclusões não são tão diretas. Ao contrário da broca Brad, o aumento das RPM nem sempre resulta em um dano maior, como pode ser observado nos casos dos furos feitos com maior velocidade de avanço "Bidiametral 1500-0,3" e "Bidiametral 3000-0,3".

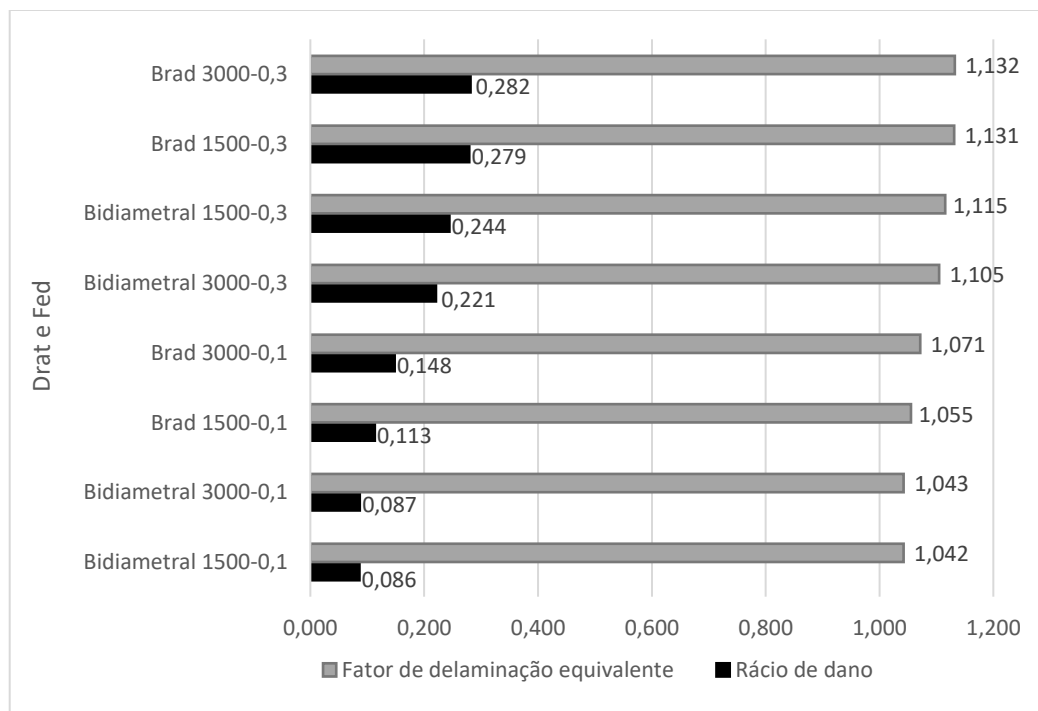


Figura 38 - Gráfico resumo dos fatores de delaminação e rácio de dano

Após a análise da Figura 38, conclui-se que: a broca Bidiametral apresenta consistentemente um melhor acabamento, comparativamente à broca Brad para os mesmos parâmetros de furação. Isso reflete-se numa área de dano menor, conforme indicado pelos valores mais baixos de Drat e Fed.

Observamos que o aumento do avanço de 0,1 para 0,3 mm/rev, resulta em um aumento tanto no rácio de dano quanto no fator de delaminação equivalente. Isso indica que o aumento da velocidade de avanço está diretamente relacionado a uma maior área de dano.

Após uma análise mais aprofundada, é importante destacar que os danos superficiais apresentados acima, se referem especificamente à superfície de entrada e saída da broca. Devido a esta limitação já referida por Xu *et al.* (71), não é feita uma representação do estado ao longo da profundidade do furo. De notar que, nos materiais compósitos de matriz polimérica, as camadas superficiais tendem a ter uma influência relativamente menor na resistência mecânica final do material, pois, estas encontram-se ligadas a apenas uma camada ao contrário das camadas interiores. Portanto, é necessário considerar a natureza específica do material compósito e o seu comportamento estrutural global ao interpretar os resultados desses danos superficiais. Nesse prisma, foram então realizados os ensaios destrutivos *Pin Bearing* e *Bearing*.

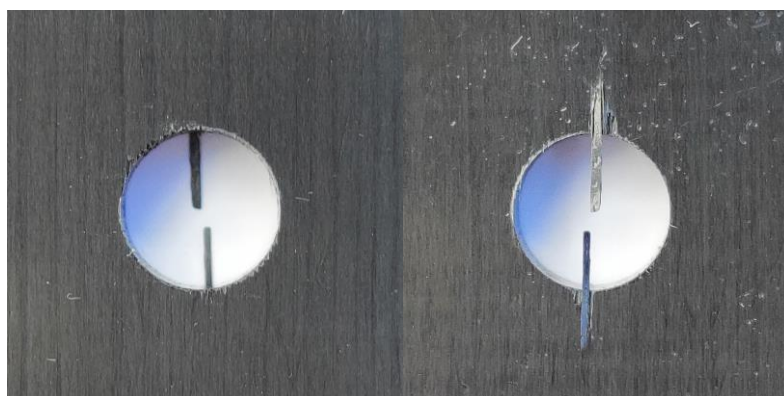


Figura 39 – Dano superficial na entrada (esquerda) e saída (direita), presente no provete 2 (Bidiametral 3000-0,1) lado B (30 mm da extremidade).

4.2. Pin Bearing

Como referido no Cap. 3.3.2, o ensaio *Pin Bearing* tem como objetivo avaliar a capacidade de um material compósito em suportar cargas *bearing* concentradas, como aquelas aplicadas por pinos ou elementos de fixação mecânica. O ensaio serve para determinar a resistência mecânica do material nessa região específica. A Figura 40, apresenta o gráfico tipicamente obtido do ensaio *Pin Bearing* e ilustra claramente a queda abrupta da tensão que marca o fim do ensaio.

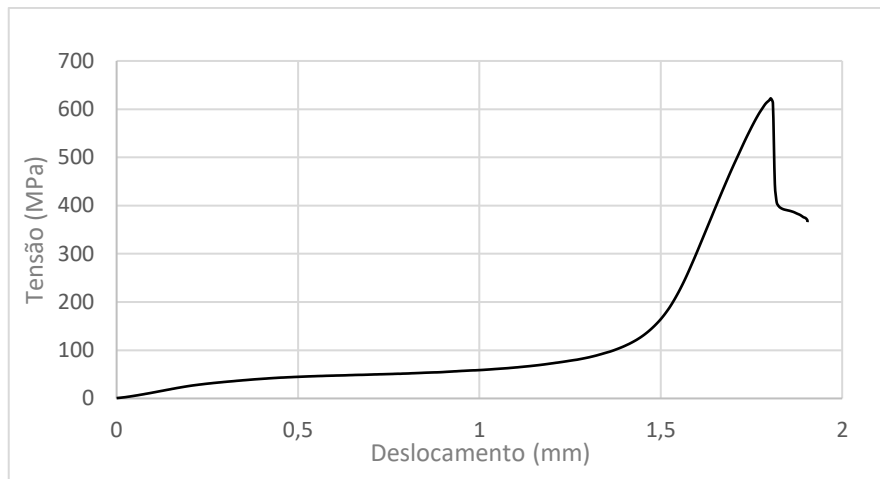


Figura 40 – Gráfico tensão-deslocamento obtido do ensaio *Pin Bearing* (Bidiametral 3000-0,1).

Tal como no subcapítulo anterior, os resultados serão apresentados inicialmente de acordo com a geometria da broca e em seguida, um gráfico resumo será exibido para facilitar a comparação das informações.

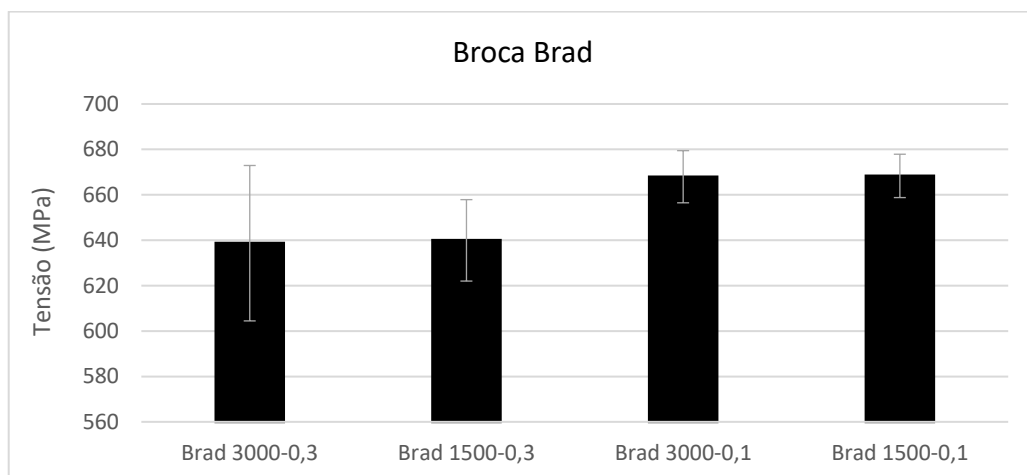


Figura 41 – Gráfico com a tensão máxima e respetivos desvios padrão para o ensaio *Pin Bearing* da broca Brad.

Ao examinar os resultados, nota-se uma diminuição na tensão máxima, quando há um aumento da velocidade de avanço, realçando a importância deste parâmetro na realização do processo de furação. Já a diferença na resistência mecânica final entre as duas velocidades de rotação é mínima

que é impossível chegar a uma conclusão. Por fim, é importante salientar o erro associado aos ensaios “Brad 3000-0,3”, que obtiveram valores bastantes distintos, revelando assim uma fraca previsibilidade da resistência final do furo. De salientar ainda a enorme variação no desvio padrão para a broca “Brad 3000-0,3”.

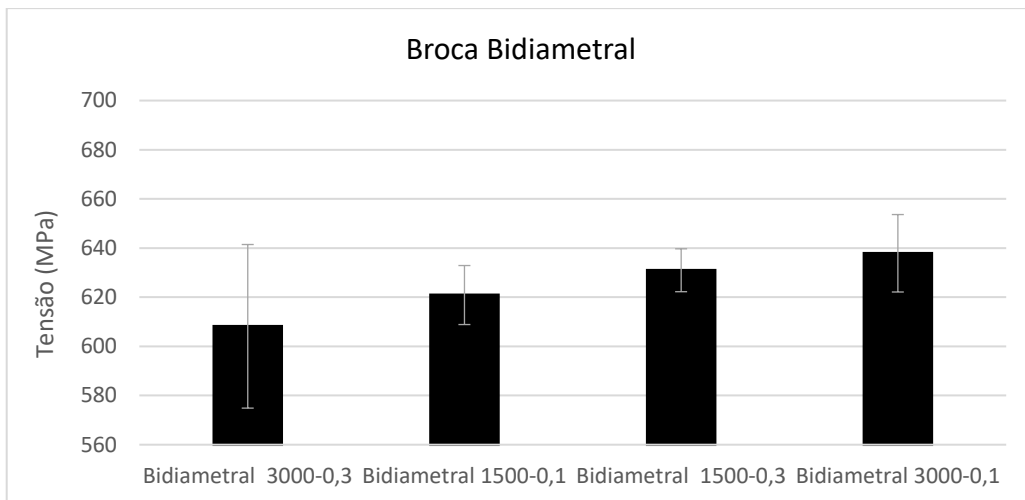


Figura 42 - Gráfico com a tensão máxima e respectivos desvios padrão para o ensaio *Pin Bearing* da broca Bidiametral.

Na broca Bidiametral, tal como na broca Brad existe um erro elevado associado aos ensaios realizados a 3000 RPM e 0,3 mm/rev, sustentando a imprevisibilidade desta conjugação de parâmetros. Além disso, como podemos observar na coluna “Bidiametral 1500-0,1” e “Bidiametral 1500-0,3”, o maior avanço não se traduziu na diminuição da tensão máxima. Mesmo assim, os ensaios realizados a 3000 RPM, mantiveram o padrão de uma maior V_f significa uma diminuição da tensão final máxima do furo em resposta *Bearing*.

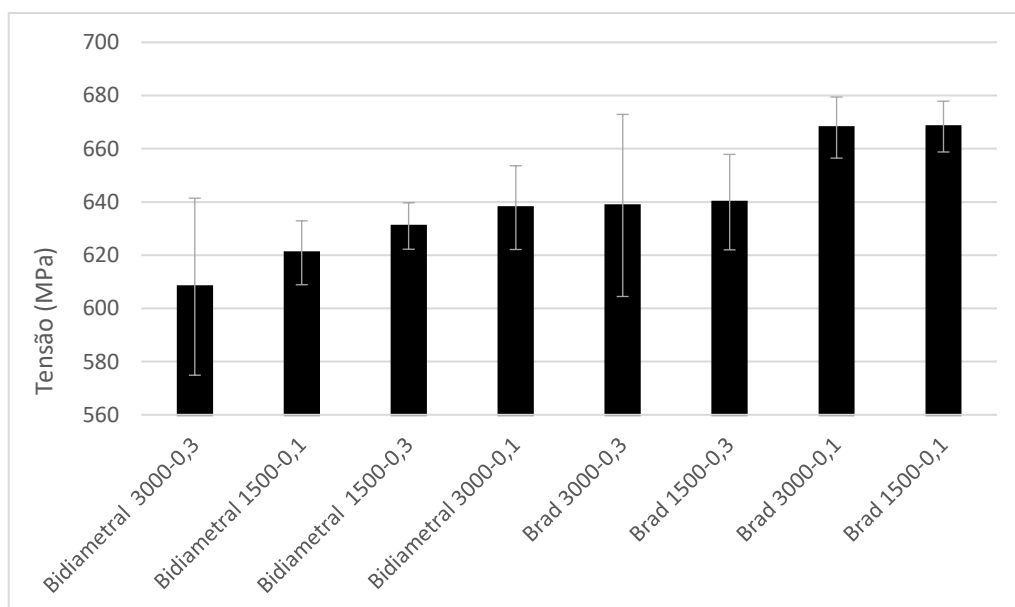


Figura 43 – Gráfico resumo do ensaio *Pin Bearing*

A primeira observação clara é a fraca performance da broca Bidiametral, que apresenta todos os valores de tensão máxima inferiores aos da broca Brad. Isto demonstra que a broca Brad apesar de gerar uma área de dano maior, comparativamente à broca Bidiametral, não se reflete numa resistência menor no ensaio de esmagamento *Pin Bearing*. Sendo assim, os fatores obtidos pelas radiografias (Drat e Fed), não são representativos da resistência final do material para este ensaio. Estes resultados contraditórios podem ser devidos a uma maior extensão do dano ao longo da profundidade do furo. De notar ainda que o melhor desempenho foi alcançado pela configuração “Brad 1500-0,1”.

4.3. Bearing

O ensaio *Bearing*, tal como o *Pin Bearing* procura saber a tensão máxima que o furo suporta antes da rotura. O ensaio dá origem ao gráfico da Figura 44.

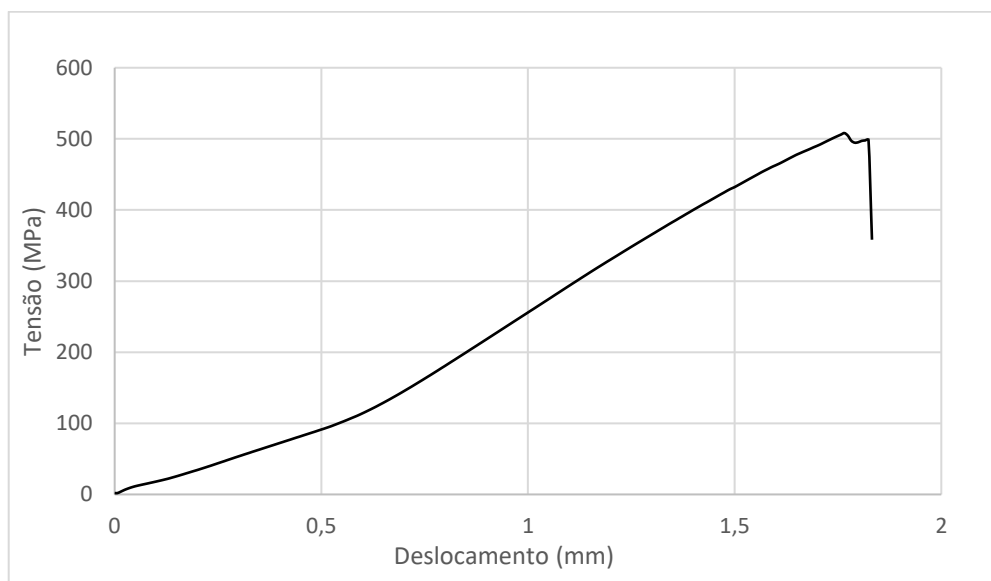


Figura 44 - Exemplo do gráfico obtido através do ensaio *Bearing*.

Mais uma vez, os dados serão apresentados individualmente e, posteriormente, num quadro resumo. É esperado dados similares aos do ensaio *Pin Bearing*, não em termos de magnitude, mas no que toca à correlação entre os parâmetros de furação e a tensão máxima suportada pelo material

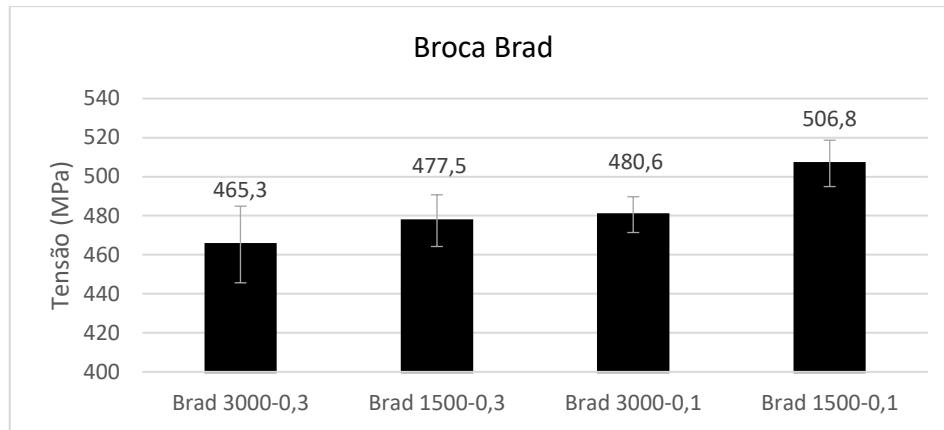


Figura 45 - Gráfico com a tensão máxima e respectivos desvios padrão para o ensaio *Bearing* da broca Brad.

A broca Brad apresenta uma redução na tensão máxima sustentada quando há um aumento na velocidade de avanço, sendo mais um indicador da influência deste parâmetro. Já a velocidade de corte tem o efeito contrário, quanto maior for, menor será a tensão máxima final alcançada pelo provete.

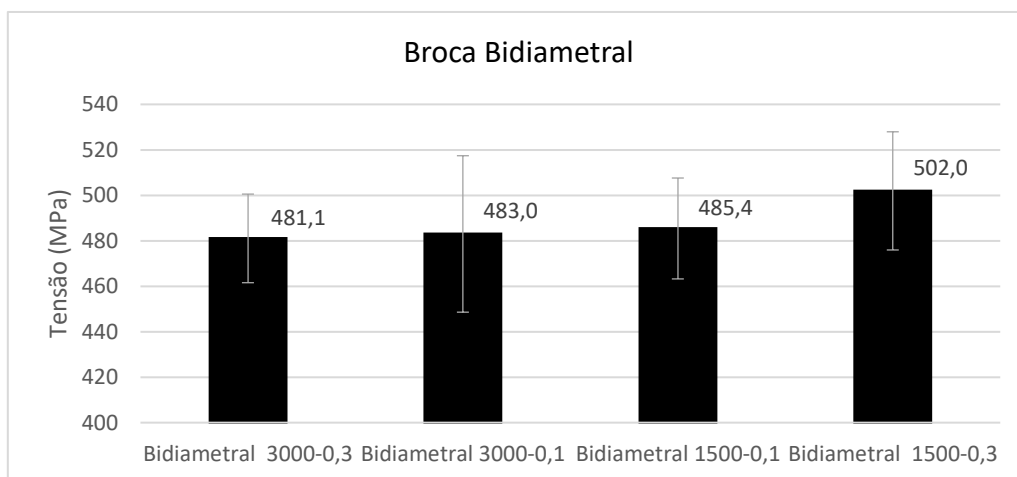


Figura 46 - Gráfico com a tensão máxima e respectivos desvios padrão para o ensaio *Bearing* da broca Bidiametral.

A broca Bidiametral apresenta resultados muito próximos, com exceção no caso “Bidiametral 1500-0,3”, em que a tensão máxima é de 501,96 MPa. Este dado difere dos demais, uma vez que uma maior velocidade de avanço não resultou numa redução correspondente na tensão máxima, em comparação com os outros parâmetros.

Os restantes resultados estão contidos entre 481,05 e 485,42 MPa, sendo assim difícil tirar conclusões claras dos mesmos.

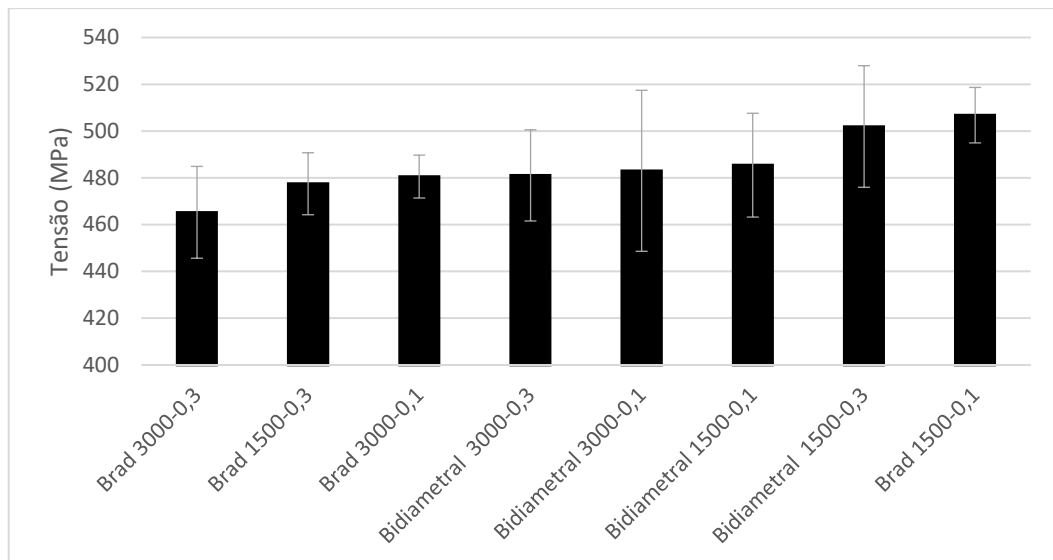


Figura 47 - Gráfico resumo do ensaio *Bearing*.

Numa análise inicial do gráfico resumo (Figura 47), é importante destacar que, ao contrário do observado no ensaio de *Pin Bearing*, a broca Bidiametral não apresenta todos os valores inferiores aos da broca Brad. Isto, pode dever-se ao facto de o ensaio *Pin Bearing* avaliar apenas a resistência à compressão pura, ou seja, sem qualquer tipo de flexão na peça. Já no ensaio *Bearing*, o provete apresenta sempre alguma margem de manobra, devido ao alinhamento manual na montagem do conjunto (72) e ao aperto manual do pino. Estudos anteriores, como o de Caprino *et al.* (73), comprovam que um maior binário de aperto pode levar a uma tensão máxima mais elevada. Assim, questiona-se qual dos métodos é o mais correto para a da resistência mecânica final do material.

É de salientar que, mais uma vez, a configuração “Brad 1500-0,1” apresentou o melhor desempenho com uma tensão máxima de 506,79 MPa, seguida pela “Bidiametral 1500-0,3”.

4.4. Parâmetros de furação

Neste subcapítulo, serão apresentados os resultados de uma perspectiva diferente. Não será feita a distinção da geometria da broca, portanto, a única distinção ocorre pela variação da velocidade de avanço e rotação. Os valores apresentados são uma média de todos os dados recolhidos para cada condição.

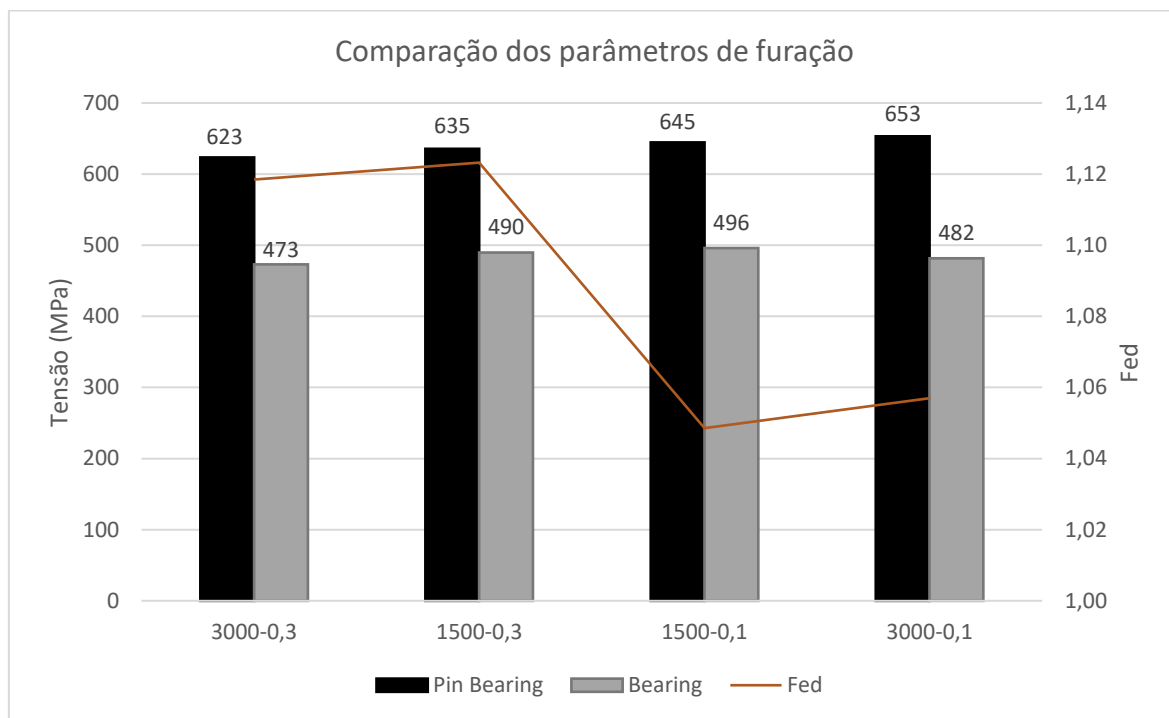


Figura 48 - Comparação dos parâmetros de furação.

Assim, podemos claramente constatar que, tal como Davim *et al.* (70) concluiu, a velocidade de avanço é o fator com maior influência na tensão máxima e na área de dano após a perfuração de materiais compósitos de matriz polimérica. A velocidade de rotação, apesar de ter menos influência, ainda demonstra alguns padrões interessantes:

- Para um avanço de 0,3 mm/rev, observou-se que a menor velocidade de rotação resultou no maior fator de delaminação equivalente e numa tensão máxima mais elevada;
- Para um avanço de 0,1 mm/rev, a menor velocidade de rotação proporcionou o menor fator de delaminação, mas os valores obtidos nos ensaios *Bearing* e *Pin Bearing* não nos permitem tirar uma conclusão;

5. CONCLUSÃO

5.1. Conclusões finais

Neste capítulo estão descritas as conclusões tiradas a partir dos resultados e serão também apresentadas algumas sugestões e orientações para trabalhos futuros.

Ao utilizar os indicadores fator de delaminação equivalente e rácio de dano propostos por Tsao C *et al.* (4) e Mehta M *et al.* (5), respetivamente, pode-se concluir que:

- Uma maior velocidade de avanço resulta numa maior área de dano e, conseqüentemente, num valor maior de Fed e Drat, independentemente da geometria da broca (Bidiametral ou Brad);
- Para a broca de geometria Brad, uma maior velocidade de rotação (3000 RPM) originou áreas delaminadas maiores, nas duas velocidades de avanço testadas;
- Para a broca de geometria Bidiametral os valores não apresentam nenhuma tendência em relação à velocidade de rotação;
- O melhor acabamento, ou seja, valores de Fed, Drat e área de dano menores foram obtidos pela broca Bidiametral, quando a velocidade de rotação e avanço foram menores (1500 RPM e 0,1 mm/rev). Os melhores resultados para a broca Brad foram obtidos nas mesmas condições;
- A geometria Bidiametral é mais eficaz na redução da área de dano superficial durante o processo de furação, quando comparada com a broca Brad.

Após realizar o ensaio *Pin Bearing*, proposto por Wang H. (7), podemos tirar as seguintes conclusões:

- Para a broca de geometria Brad, uma velocidade de avanço menor, proporciona uma resistência mecânica final mais elevada. Não sendo possível concluir o efeito da velocidade de avanço, devido à proximidade dos valores;
- A broca de geometria Bidiametral apresenta resultados próximos, sendo difícil obter algum padrão sobre a influência da velocidade de avanço ou rotação na resistência mecânica final do material;
- Para a geometria Brad, todos os valores de tensão máxima foram superiores a qualquer valor obtido pela broca Bidiametral, indicando uma superioridade da mesma;
- No caso da broca Bidiametral, a área de dano e os indicadores associados (Fed e Drat) não possuem uma relação direta com a resistência mecânica do material;

- Na broca Brad, observa-se uma correlação direta entre a área de dano e a tensão máxima final suportada pelo material. Quanto menor a área de dano, maior é a resistência mecânica final;

Após a testagem de todos os provetes, segundo a norma D5961/D5961M – 17 (*Procedure A*) (8), as seguintes conclusões podem ser tiradas:

- Para a broca de geometria Brad, existe uma relação direta entre o avanço e a tensão final máxima. Quanto menor a velocidade de avanço, maior será a tensão suportada;
- A broca Bidiametral apresenta resultados muito próximos para todos os parâmetros, o que não permite uma conclusão clara de qualquer tendência;
- O melhor resultado foi obtido pela configuração Brad 1500-0,1;

Ao conjugar toda a informação, conclui-se que:

- Uma maior área de dano nem sempre representa uma diminuição direta da resistência mecânica final do material;
- Um aumento na velocidade de avanço resultará em uma área de dano maior;
- Das configurações usadas, a broca de geometria Brad, associada a uma velocidade de rotação de 1500 RPM e um avanço de 0,1 mm/rev, é a escolha mais acertada para a obtenção do melhor acabamento e resistência *bearing* final.

Assim, considerando o objetivo desta investigação experimental - o desenvolvimento de modelos de quantificação da propagação do dano que permitissem o estudo e comparação da resistência mecânica em ensaios quase estáticos (*Pin Bearing* e *Bearing*) – pode concluir-se que o objetivo foi cumprido.

5.2. Proposta para trabalhos futuros

Neste subcapítulo serão apresentadas propostas e sugestões de melhoramento para os diferentes aspectos desta dissertação.

Seria interessante verificar como a área de dano irá progredir ao aumentar a velocidade de rotação da broca Brad, visto que Tsao (45) verificou que ao aumentar a velocidade da broca de geometria core-saw, o fator de delaminação equivalente diminuiu, bem como a força axial durante o processo.

Como o dano não foi sempre representativo da resistência final do material, pode ser feita outra abordagem usando outro indicador desenvolvido por Silva (74), que de forma similar a Chen (3), realiza a circunferência que contem o dano, só que por sua vez esta não contém o mesmo centro que o furo, como pode ser observado na Figura 49.

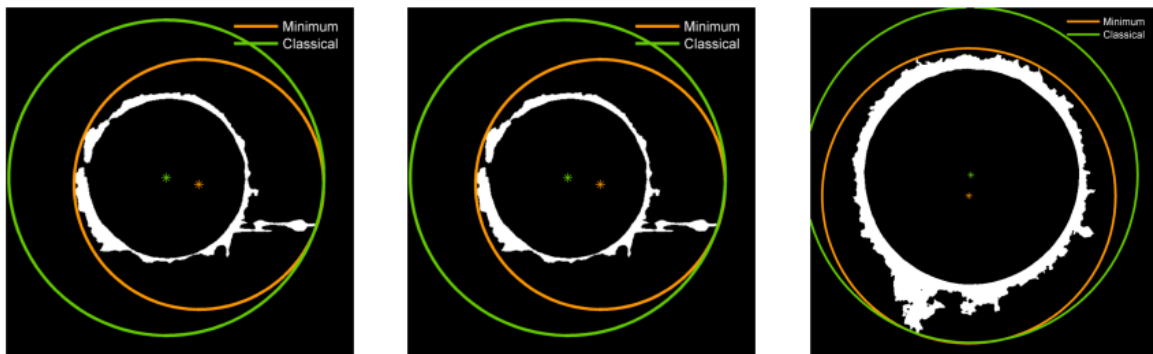


Figura 49 – Exemplo da circunferência que contém o dano proposta por Silva (74).

Existe ainda a hipótese de realizar duas radiografias no plano perpendicular ao eixo do furo, como demonstra a Figura 50. Essas radiografias teriam de ser realizadas em provetes quadrangulares e em eixos ortogonais distintos. Em seguida, através do processamento de imagem, poderia ser feita uma representação a três dimensões do dano. Com estas novas informações, poderiam ser realizados estudos da influência do dano ao longo do furo na resistência final do material e ainda ser desenvolvidos fatores para a relação entre o dano superficial e nas paredes do furo.

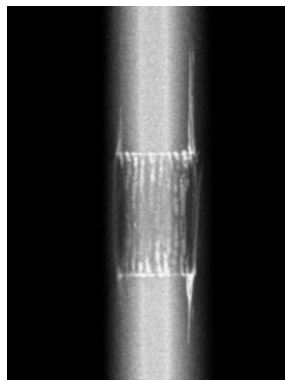


Figura 50 - Radiografia do provete 25 furo B, ao alto.

Como os valores obtidos nos ensaios realizados foram muito dispersos no caso da broca de geometria Bidiametral, ou muito próximos, seria assertivo a realização de uma análise estatística mais aprofundada. Para isto seria necessária, uma amostra maior com o objetivo de diminuir o erro percentual associado aos resultados. Essa amostra poderia ser constituída por um mínimo de 8 provetes por hipótese, totalizando assim 64, quantidade inexequível com o material disponibilizado para esta monografia.

De forma a melhorar a coerência entre os resultados *Pin Bearing* e *Bearing*, poderá ser desenvolvido algum método ou dispositivo que garanta o correto alinhamento, binário de aperto e tolerâncias do provete e pino durante todo o ensaio *Bearing*.

Por fim, ao usar-se diferentes coletâneas de parâmetros durante a furação (geometria, velocidade de avanço e rotação), pode evidenciar novas tendências e conclusões com interesse científico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Durão LMP, Tavares JMRS, de Albuquerque VHC, Marques JFS, Andrade ONG. Drilling damage in composite material. *Materials*. 2014;7(5).
2. Tamura S, Matsumura T. Delamination-free drilling of carbon fiber reinforced plastic with variable feed rate. *Precis Eng*. Julho de 2021;70:70–6.
3. Chen WC. Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates. *Int J Mach Tools Manuf*. 1997;37(8).
4. Tsao CC, Kuo KL, Hsu IC. Evaluation of a novel approach to a delamination factor after drilling composite laminates using a core-saw drill. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 28 de Março de 2012;59(5–8):617–22.
5. Mehta M, Reinhart TJ, Soni AH, Srivatsan TS, Bowden DM. Effect of Fastener Hole Drilling Anomalies on Structural Integrity of PMR-15/Gr Composite Laminates, Symposium, Machining of composite materials. Em: *Machining of composite materials, MACHINING OF COMPOSITE MATERIALS, Symposium, Machining of composite materials* [Internet]. Materials Park, OH: ASM International; ; 1992. p. 113–26. Disponível em: <https://www.tib.eu/de/suchen/id/BLCP%3ACN005443880>
6. Faraz A, Biermann D, Weinert K. Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates. *Int J Mach Tools Manuf*. 2009;49(15).
7. Wang HS, Hung CL, Chang FK. Bearing failure of bolted composite joints. Part I: Experimental characterization. *J Compos Mater*. 1996;30(12).
8. ASTM D5961/D5961M-17. Standard test method for bearing response of polymer matrix composite laminates. American Society for Testing of Materials. 2017;(1).
9. ASTM. Standard Test Method for Open-Hole Tensile Strength of Polymer Matrix Composite (D5766/D5766M-11). Vol. 03, American Society for Testing and Materials. 2011.
10. Davim JP, Rubio JC, Abrao AM. A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates. *Compos Sci Technol*. 2007;67(9).
11. Rampal, Kumar G, Rangappa SM, Siengchin S, Zafar S. A review of recent advancements in drilling of fiber-reinforced polymer composites. *Composites Part C: Open Access* [Internet]. 2022;9:100312. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666682022000755>
12. Moura MFSF, Morais AB, Magalhães AG. Materiais Compósitos: Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico. Vol. 1, 2009. *مجلة اسيوط للدراسات البيئية*.
13. Gay D, Hoa S v., Tsai SW. *Composite materials: Design and applications*. Composite Materials: Design and Applications. 2002.
14. Consultado a 18/11/2022. <https://www.brandonswords.com>.
15. Bhagwan D. Agarwal, Lawrence J. Broutman, K. Chandrashekhara. *ANALYSIS AND PERFORMANCE OF FIBER COMPOSITES*. Third Edition. 2015.
16. Griffith AA. The phenomena of rupture and flow in solids, Griffith.pdf. *Philos Trans R Soc Lond*. 1921;221.
17. Consultado a 19/11/2022. <https://www.easycomposites.eu/el2-epoxy-laminating-resin>.
18. J.L. Clarke. *Structural Design of Polymer Composites*. Clarke JL, editor. CRC Press; 2003.
19. Isaac M. Daniel, Ori Ishai. *Engineering Mechanics of Composite Materials*. Vol. 13. 2006. 0–411 p.
20. Soutis C. *Fibre reinforced composites in aircraft construction*. Vol. 41, *Progress in Aerospace Sciences*. 2005.

21. Consultado a 19/11/2022. <https://www.automotiveworld.com/articles/carbon-fibre-the-fabric-of-the-future/>.
22. Ahmad H, Markina AA, Porotnikov M v., Ahmad F. A review of carbon fiber materials in automotive industry. Em: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020.
23. Consultado a 19/11/2022. <https://www.roadandtrack.com/new-cars/car-technology/a26885102/what-makes-rimacs-carbon-fiber-monocoque-unique/>.
24. Ramakrishna S, Mayer J, Wintermantel E, Leong KW. Biomedical applications of polymer-composite materials: a review. *Compos Sci Technol*. 1 de Julho de 2001;61(9):1189–224.
25. Akgöl S, Ulucan-Karnak F, kuru Cİ, Kuşat K. The usage of composite nanomaterials in biomedical engineering applications. *Biotechnol Bioeng*. 8 de Agosto de 2021;118(8):2906–22.
26. Ma H, Suonan A, Zhou J, Yuan Q, Liu L, Zhao X, et al. PEEK (Polyether-ether-ketone) and its composite materials in orthopedic implantation. *Arabian Journal of Chemistry*. 1 de Março de 2021;14(3):102977.
27. Consultado 19/11/2022. <https://www.victrex.com/en/news/2021/01/peek-knee>.
28. Consultado a 21/11/2022. <https://www.popularmechanics.com/technology/robots/a39799600/worlds-mostbadass-prosthetic-arm/>.
29. Sreejith M, Rajeev RS. Fiber reinforced composites for aerospace and sports applications. *Fiber Reinforced Composites: Constituents, Compatibility, Perspectives and Applications*. 1 de Janeiro de 2021;821–59.
30. Consultado a 21/11/2022. <https://www.bicycling.com/bikes-gear/a20029412/the-10-things-you-didnt-know-about-carbon-fiber>.
31. Aamir M, Tolouei-Rad M, Giasin K, Nosrati A. Recent advances in drilling of carbon fiber–reinforced polymers for aerospace applications: a review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019;105(5–6).
32. Singh P, Pramanik A, Basak AK, Prakash C, Mishra V. Developments of non-conventional drilling methods—a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 17 de Janeiro de 2020;106(5–6):2133–66.
33. Norkey G. LASER DRILLING BY Nd:YAG OF COMPOSITES: A REVIEW. *J Emerg Technol Innov Res*. 2019;
34. Durão L. Apontamentos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica «Maquinagem de materiais compósitos de matriz polimérica reforçado por fibras». ISEP; 2022.
35. Gulia V, Nargundkar A. Experimental investigations of abrasive water jet machining on hybrid composites. *Mater Today Proc*. 1 de Janeiro de 2022;65:3191–6.
36. Consultado a 29/11/2022. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-019-04749-0/figures/39>.
37. ZHANG S, WANG W, XIONG Y, HUANG B, JIANG R. Investigation on defect suppression mechanism of ultrasonic vibration-assisted drilling carbon fiber/bismaleimide composite. *Chinese Journal of Aeronautics*. Outubro de 2022;
38. Nonabrasive Finishing Methods. Em: *Surface Engineering*. ASM International; 1994. p. 110–7.
39. Sathish T. Experimental investigation of machined hole and optimization of machining parameters using electrochemical machining. *Journal of Materials Research and Technology*. 1 de Setembro de 2019;8(5):4354–63.
40. Magalhães A. PROCESSOS DE FABRICO II TEXTO DE APOIO ÀS AULAS. ISEP Porto; 2021.
41. Yaşar N, Korkmaz ME, Günay M. Investigation on hole quality of cutting conditions in drilling of CFRP composite. Em: *MATEC Web of Conferences*. 2017.

42. Goncalves DJS, Durão LMP, de Albuquerque VHC, Tavares JMRS, Baptista AM. Avaliação de Ferramentas na Furação de laminados Compósitos. Vol. 23. 2011.
43. Giasin K, Barouni A, Dhakal HN, Featherson C, Redouane Z, Morkavuk S, et al. Microstructural investigation and hole quality evaluation in S2/FM94 glass-fibre composites under dry and cryogenic conditions. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 14 de Abril de 2021;40(7–8):273–93.
44. Rajkumar D, Ranjithkumar P, Jenarathanan MP, Sathiya Narayanan C. Experimental investigation and analysis of factors influencing delamination and thrust force during drilling of carbon-fibre reinforced polymer composites. *Pigment and Resin Technology*. 2017;46(6).
45. Tsao CC. Thrust force and delamination of core-saw drill during drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP). *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2008;37(1–2).
46. Ramesh M, Palanikumar K, Reddy KH. Influence of Tool Materials on Thrust Force and Delamination in Drilling Sisal-glass Fiber Reinforced Polymer (S-GFRP) Composites. *Procedia Materials Science*. 2014;5.
47. Heisel U, Pfeifroth T. Influence of point angle on drill hole quality and machining forces when drilling CFRP. Em: *Procedia CIRP*. 2012.
48. Consultado a 07/12/2022. https://res.cloudinary.com/rsc/image/upload/b_auto.
49. Geng D, Liu Y, Shao Z, Lu Z, Cai J, Li X, et al. Delamination formation, evaluation and suppression during drilling of composite laminates: A review. Vol. 216, *Composite Structures*. 2019.
50. Consultado a 07/12/2022. <https://uk.rs-online.com/web/generalDisplay.html?id=ideas-and-advice/drill-bit-setsguide>.
51. Devitte C. Aspetos da utilização de meios lubrificantes na furação de materiais compósitos. 2022;
52. Aisyah HA, Paridah MT, Khalina A, Sapuan SM, Wahab MS, Berkalp OB, et al. Effects of fabric counts and weave designs on the properties of Laminated Woven Kenaf/Carbon fibre reinforced epoxy hybrid composites. *Polymers (Basel)*. 2018;10(12).
53. Ho-Cheng H, Dharan CKH. Delamination during drilling in composite laminates. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*. 1990;112(3).
54. Silva D, Pamies Teixeira J, Machado CM. Methodology analysis for evaluation of drilling-induced damage in composites. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014;71(9–12).
55. Lissek F, Tegas J, Kaufeld M. Damage Quantification for the Machining of CFRP: An Introduction about Characteristic Values Considering Shape and Orientation of Drilling-induced Delamination. *Procedia Eng*. 1 de Janeiro de 2016;149:2–16.
56. Dwivedi SK, Vishwakarma M, Soni PA. Advances and Researches on Non Destructive Testing: A Review. Em: *Materials Today: Proceedings*. 2018.
57. Kapadia AS. Non-Destructive Testing of Composite Materials. Em 2007.
58. ASTM. D3039. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. *Korrozios Figyelo*. 1995;35(2).
59. Consultado a 19/12/2022. <https://biopdi.com.br/artigos/ensaio-de-tracao/>.
60. Oliveira L. Dissertação e Tese em Ciências e Tecnologia segundo Bolonha. Lisboa: Lidel; 2011.
61. Grilo TJ, Paulo RMF, Silva CRM, Davim JP. Experimental delamination analyses of CFRPs using different drill geometries. *Compos B Eng*. 1 de Fevereiro de 2013;45(1):1344–50.

62. Jia Z yuan, Zhang C, Wang F ji, Fu R, Chen C. An investigation of the effects of step drill geometry on drilling induced delamination and burr of Ti/CFRP stacks. *Compos Struct.* 1 de Março de 2020;235:111786.
63. Consultado a 04/05/2023. <https://inoshop.inovatools.eu/index.php?page=product&info=21899&article=850.037.00>.
64. Consultado a 04/05/2023. <https://navigator.guehring.de/navigator/index.php?sorte=1149&mod=dat>.
65. Consultado a 04/03/2023. <https://www.haascnc.com/pt/machines/vertical-mills/vf-series/models/small/vf-2.html>.
66. Kumar T, Verma K. A Theory Based on Conversion of RGB image to Gray image. *Int J Comput Appl.* 2010;7(2).
67. . SVC. BASIC GEOMETRIC SHAPE AND PRIMARY COLOUR DETECTION USING IMAGE PROCESSING ON MATLAB. *Int J Res Eng Technol.* 2015;04(05).
68. Bangare SL, Dubal A, Bangare PS, Patil ST. Reviewing otsu's method for image thresholding. *International Journal of Applied Engineering Research.* 2015;10(9).
69. Consultado a 24/04/2023. <https://asteriadis.gr/en/product/scientific-equipment/quality-control-research/materials-testing-inspection/ags-x-standard-universal-tester-series/>.
70. Davim JP, Reis P. Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave-experimental and statistical study. *Mater Des.* 2003;24(5).
71. Xu J, Geier N, Shen J, Krishnaraj V, Samsudeensadham S. A review on CFRP drilling: fundamental mechanisms, damage issues, and approaches toward high-quality drilling. *Journal of Materials Research and Technology.* Maio de 2023;24:9677–707.
72. Abdullah MS, Abdullah AB, Hassan MH, Samad Z. Bearing strength and progressive failure analysis of the punched hole of CFRP under tensile loading. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 2018;97(5–8).
73. Caprino G, Giorleo G, Nele L, Squillace A. Pin-bearing strength of glass mat reinforced plastics. *Compos Part A Appl Sci Manuf.* 2002;33(6).
74. Silva DNR da. Image processing methodology for assessment of drilling induced damage in CFRP. [Lisboa]: Faculdade de Ciências e Tecnologia; 2013.

APÊNDICE A

Dados obtidos no ensaio Pin Bearing:

Prov.	h (mm)	Área de secção (mm ²)	Tensão máx. (MPa)		Média (MPa)	Desvio Padrão
1	3,70	22,20	622,02	Bidiametral 3000-0,1	637,87	15,74
2	3,69	22,14	622,29			
3	3,81	22,86	655,02			
4	3,77	22,62	652,15			
5	3,75	22,50	638,55	Bidiametral 1500-0,1	620,88	12,00
6	3,69	22,14	609,03			
7	3,82	22,92	610,67			
8	3,87	23,22	625,29			
9	3,80	22,80	568,24	Bidiametral 3000-0,3	608,15	33,28
10	3,62	21,72	583,55			
11	3,74	22,44	631,68			
12	3,85	23,10	649,13			
13	3,70	22,20	625,50	Bidiametral 1500-0,3	630,96	8,72
14	3,74	22,44	633,25			
15	3,58	21,48	621,04			
16	3,80	22,80	644,04			
17	3,88	23,28	658,35	Brad 3000-0,1	667,96	11,48
18	3,81	22,86	656,78			
19	3,86	23,16	685,23			
20	3,88	23,28	671,46			
21	3,79	22,74	681,07	Brad 1500-0,1	668,32	9,54
22	3,78	22,68	662,55			
23	3,73	22,38	673,33			
24	3,85	23,10	656,35			
25	3,81	22,86	636,89	Brad 3000-0,3	638,68	34,22
26	3,74	22,44	583,45			
27	3,86	23,16	665,48			
28	3,74	22,44	668,91			
29	3,86	23,16	615,04	Brad 1500-0,3	639,94	17,93
30	3,82	22,92	656,61			
31	3,79	22,74	Inválido			
32	3,60	21,60	648,16			

APÊNDICE B

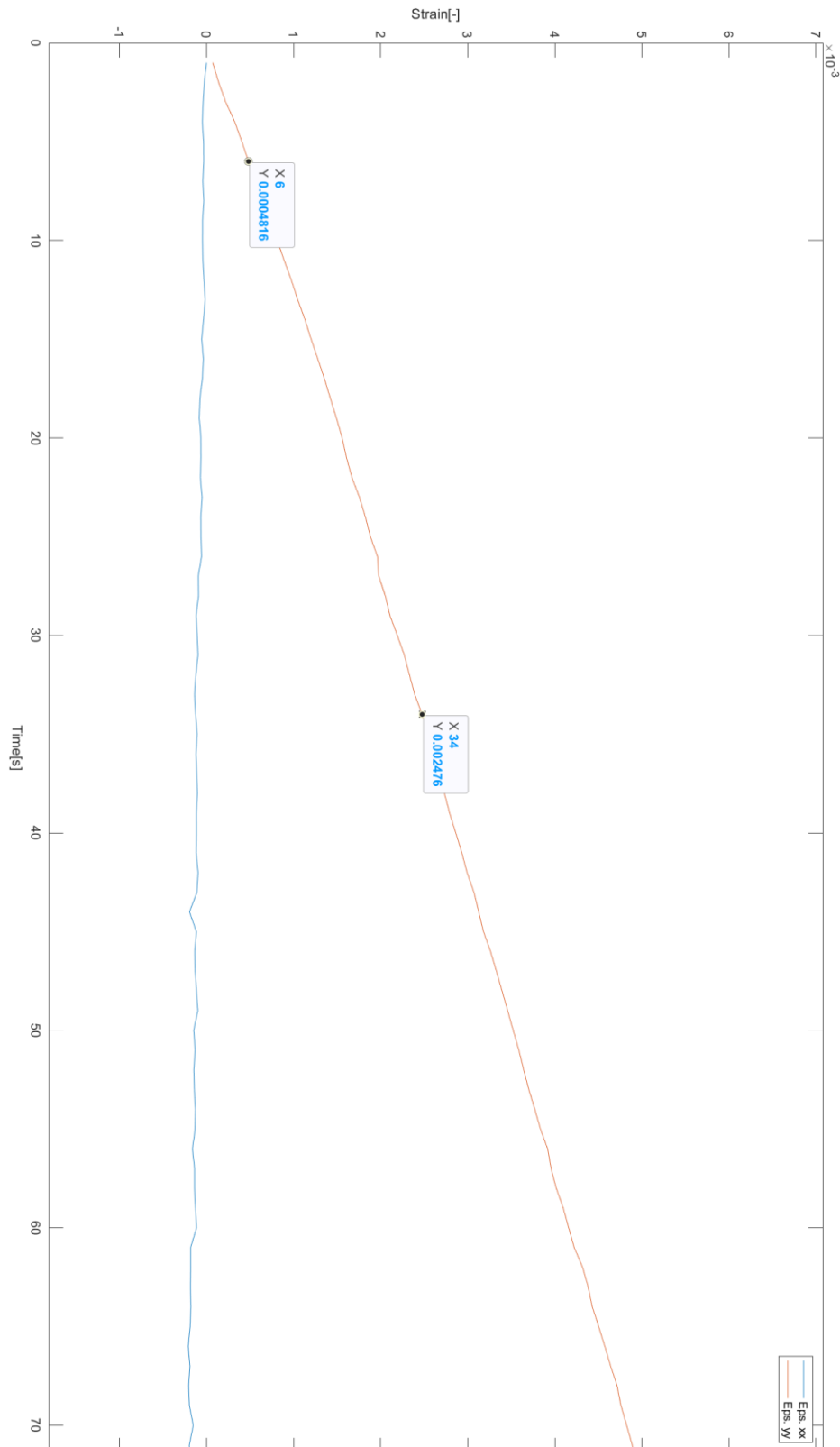
Dados obtidos no ensaio Bearing:

Prov.	h (mm)	Área de secção (mm ²)	Tensão máx. (MPa)		Média (MPa)	Desvio Padrão
1	3,70	22,20	483,70	Bidiametral 3000-0,1	483,00	34,40
2	3,69	22,14	513,55			
3	3,81	22,86	426,67			
4	3,77	22,62	508,09			
5	3,75	22,50	486,49	Bidiametral 1500-0,1	485,41	22,18
6	3,69	22,14	514,44			
7	3,82	22,92	452,03			
8	3,87	23,22	488,69			
9	3,80	22,80	467,23	Bidiametral 3000-0,3	481,05	19,48
10	3,62	21,72	497,91			
11	3,74	22,44	502,31			
12	3,85	23,10	456,73			
13	3,70	22,20	487,81	Bidiametral 1500-0,3	501,95	25,99
14	3,74	22,44	507,13			
15	3,58	21,48	541,33			
16	3,80	22,80	471,53			
17	3,88	23,28	481,72	Brad 3000-0,1	480,55	9,17
18	3,81	22,86	481,63			
19	3,86	23,16	492,30			
20	3,88	23,28	466,55			
21	3,79	22,74	525,85	Brad 1500-0,1	506,79	11,86
22	3,78	22,68	496,12			
23	3,73	22,38	507,61			
24	3,85	23,10	497,57			
25	3,81	22,86	493,43	Brad 3000-0,3	465,25	19,62
26	3,74	22,44	469,84			
27	3,86	23,16	458,59			
28	3,74	22,44	439,15			
29	3,86	23,16	495,84	Brad 1500-0,3	477,47	13,25
30	3,82	22,92	459,69			
31	3,79	22,74	482,10			
32	3,60	21,60	472,25			

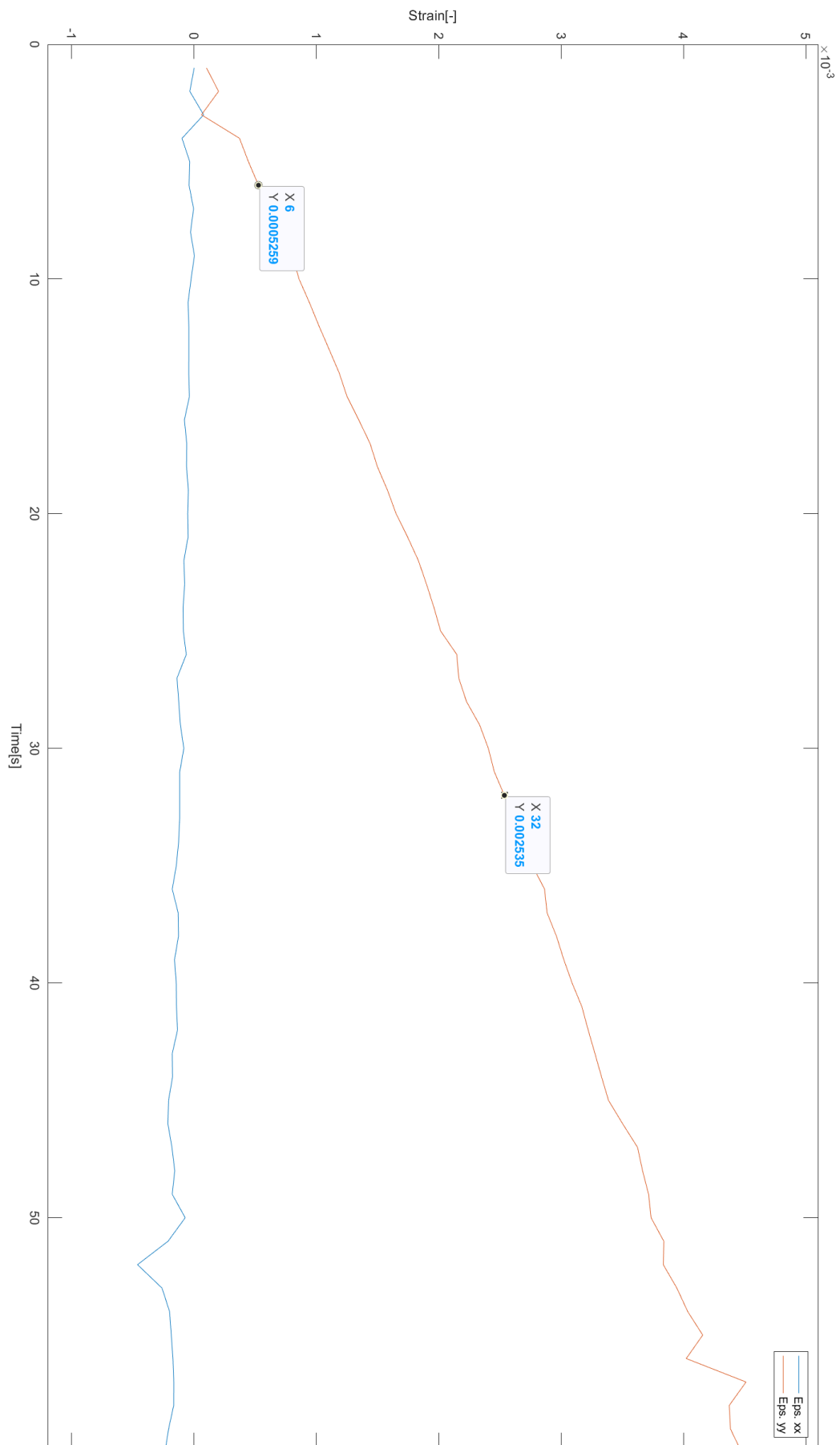
APÊNDICE C

Gráficos obtidos após o processamento de imagem e dados, Eps xx corresponde à deformação em y e Eps yy à deformação em x do provete:

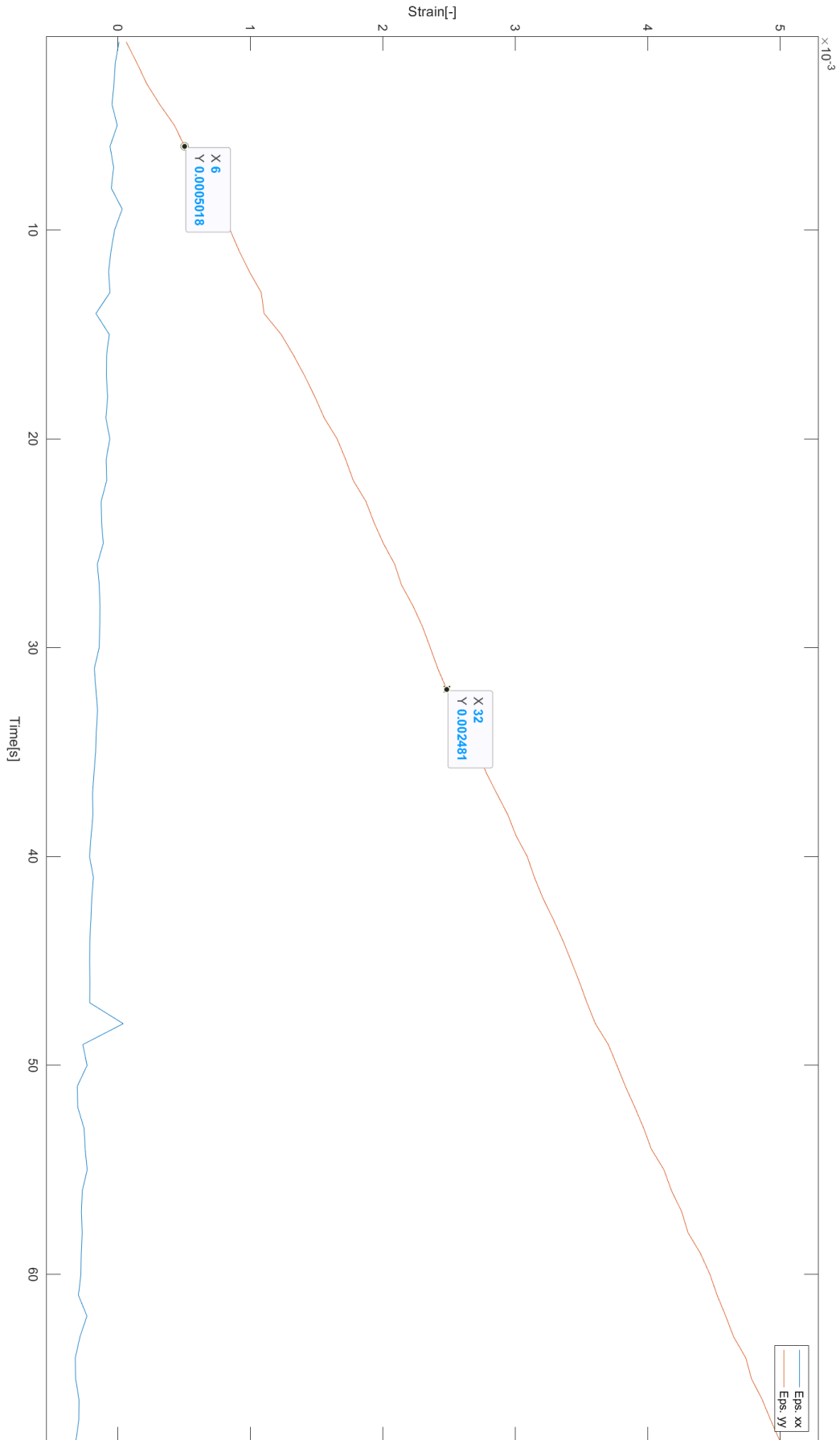
Provete 1



Provete 2

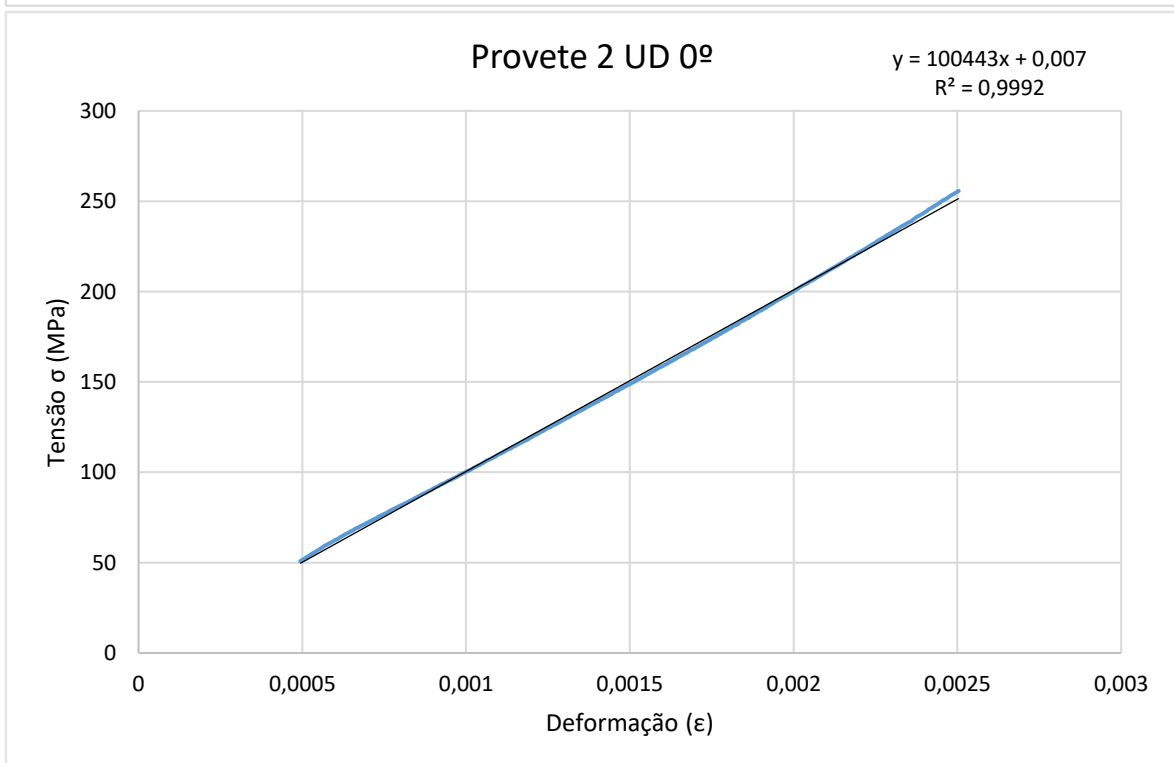
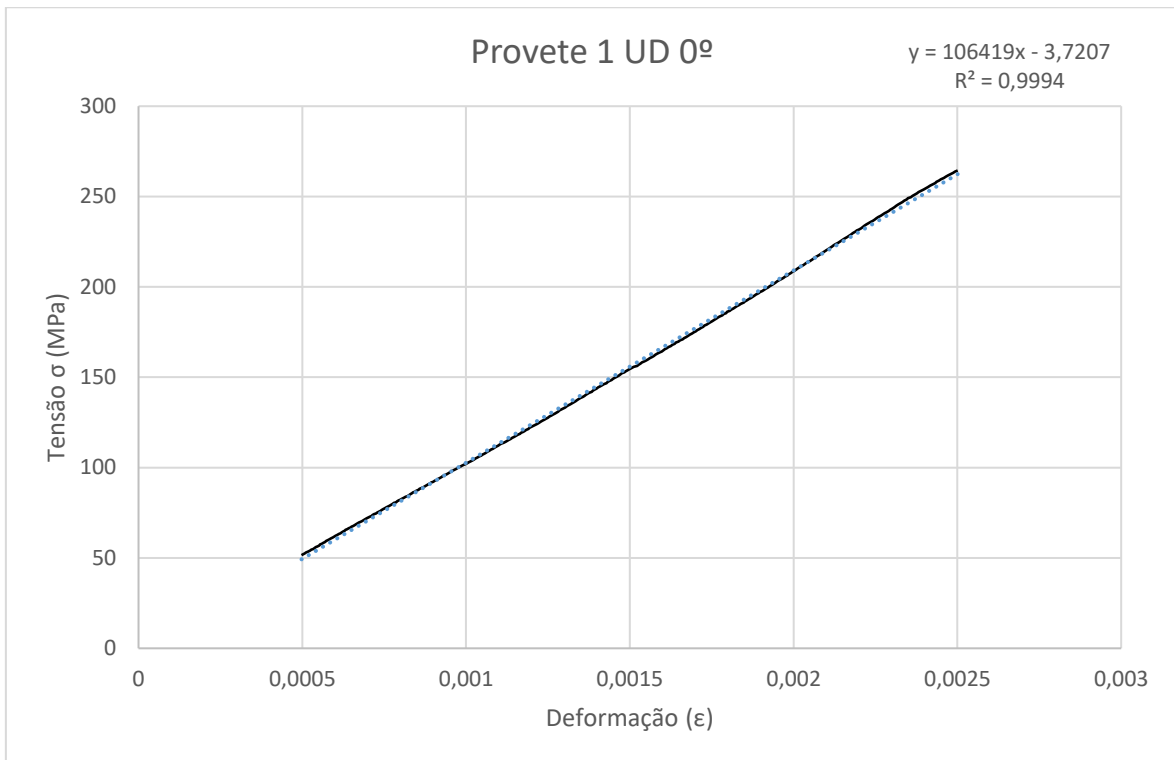


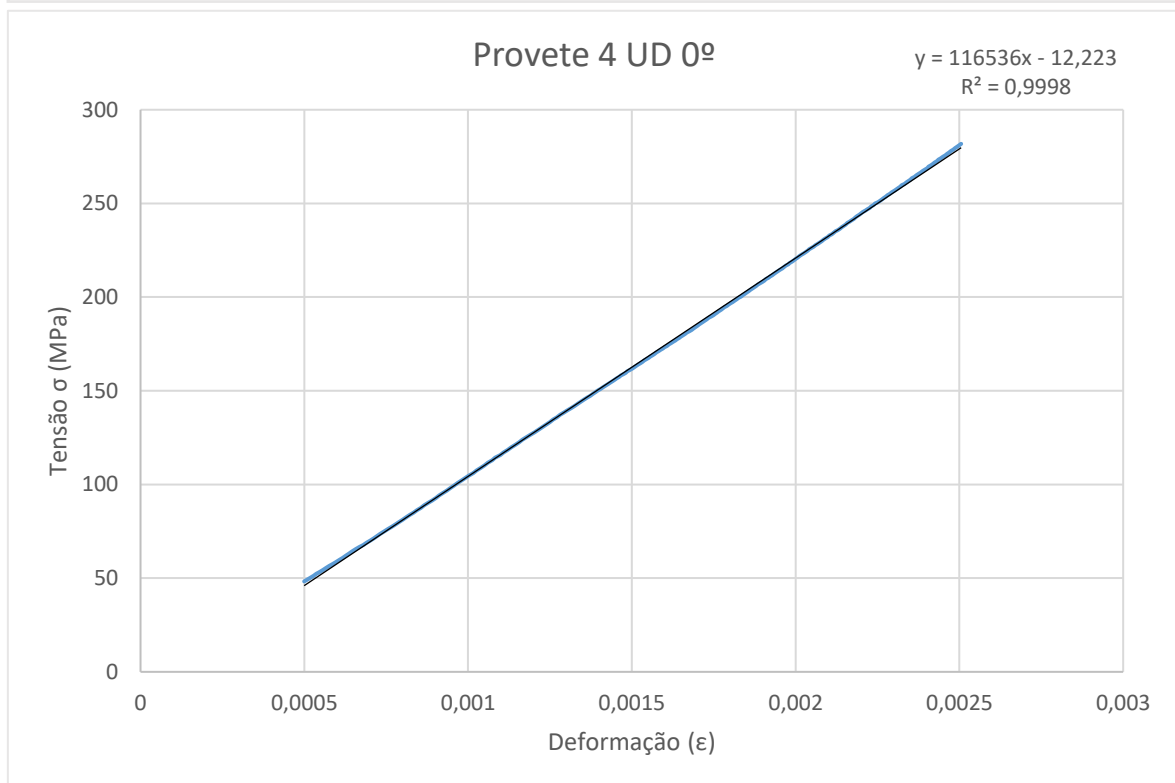
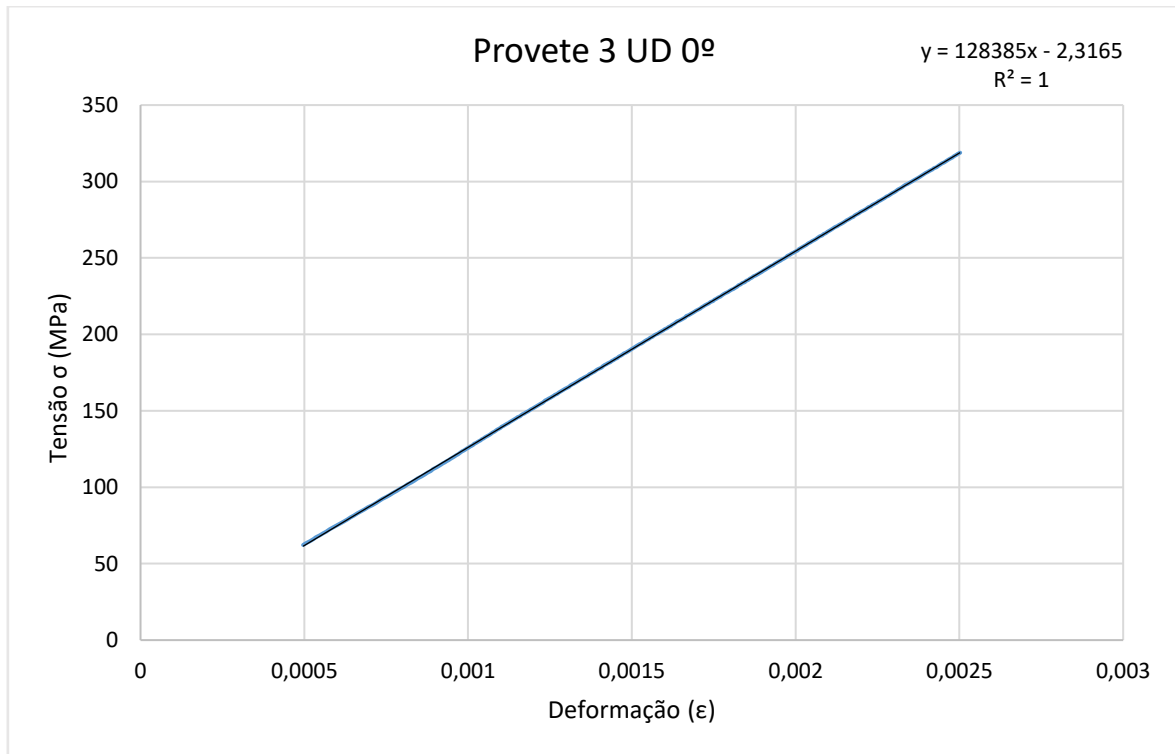
Provete 3

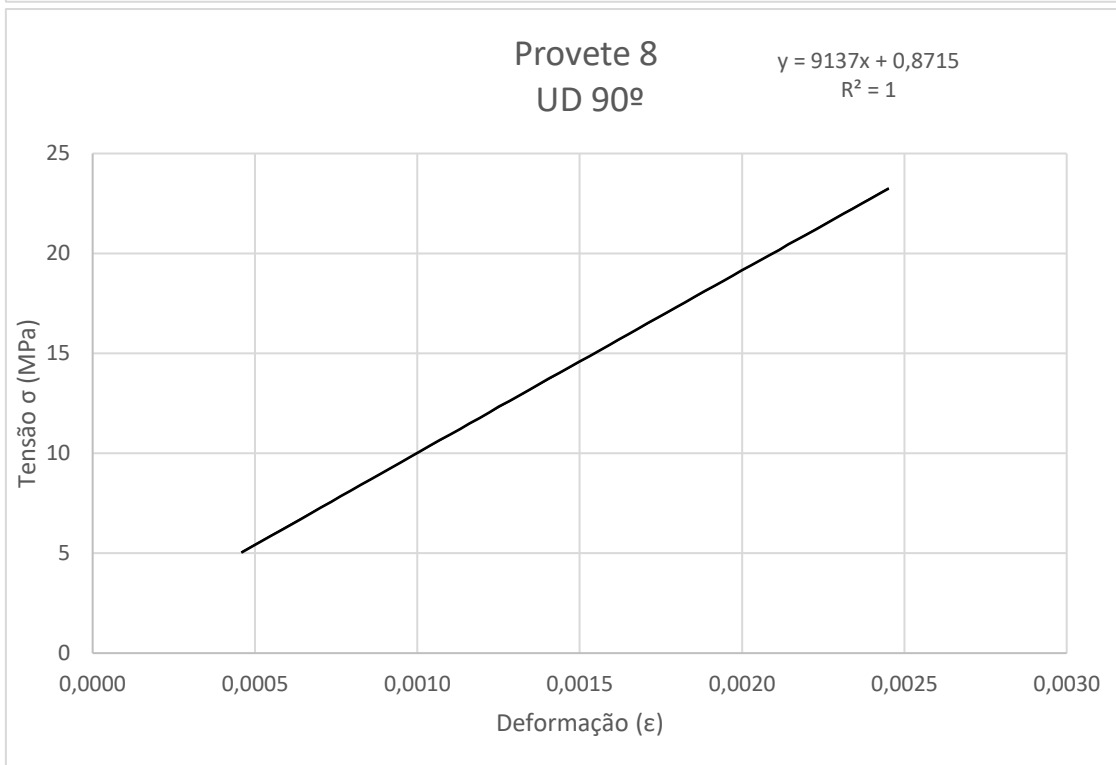
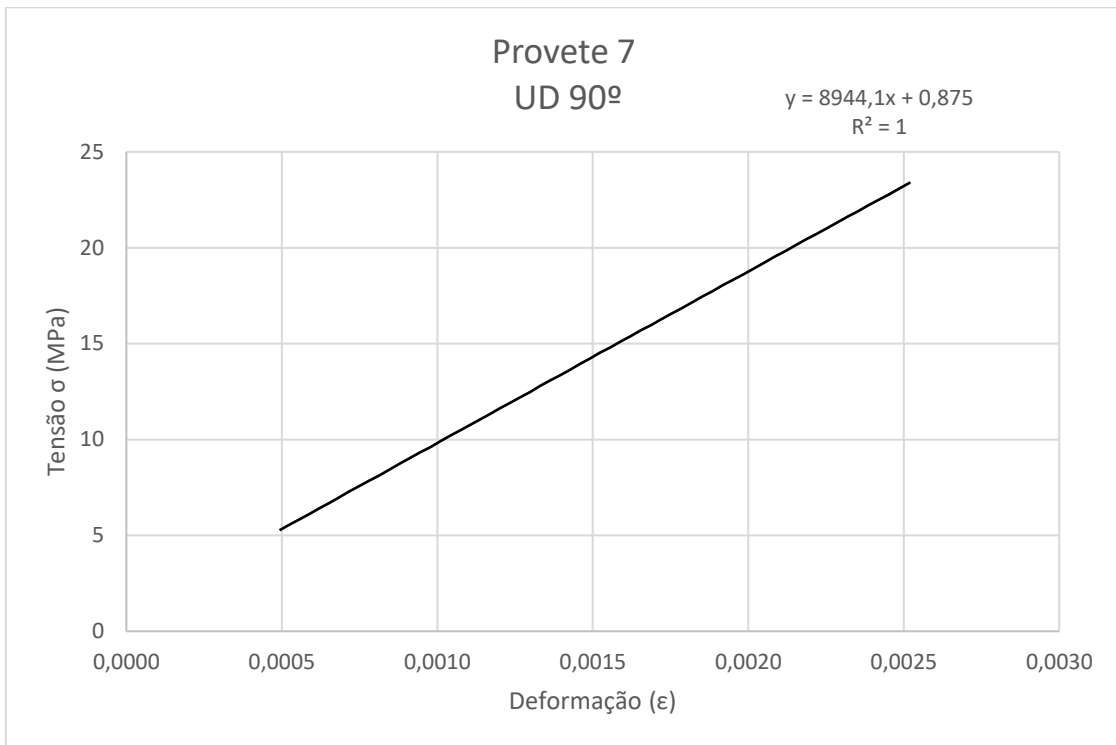


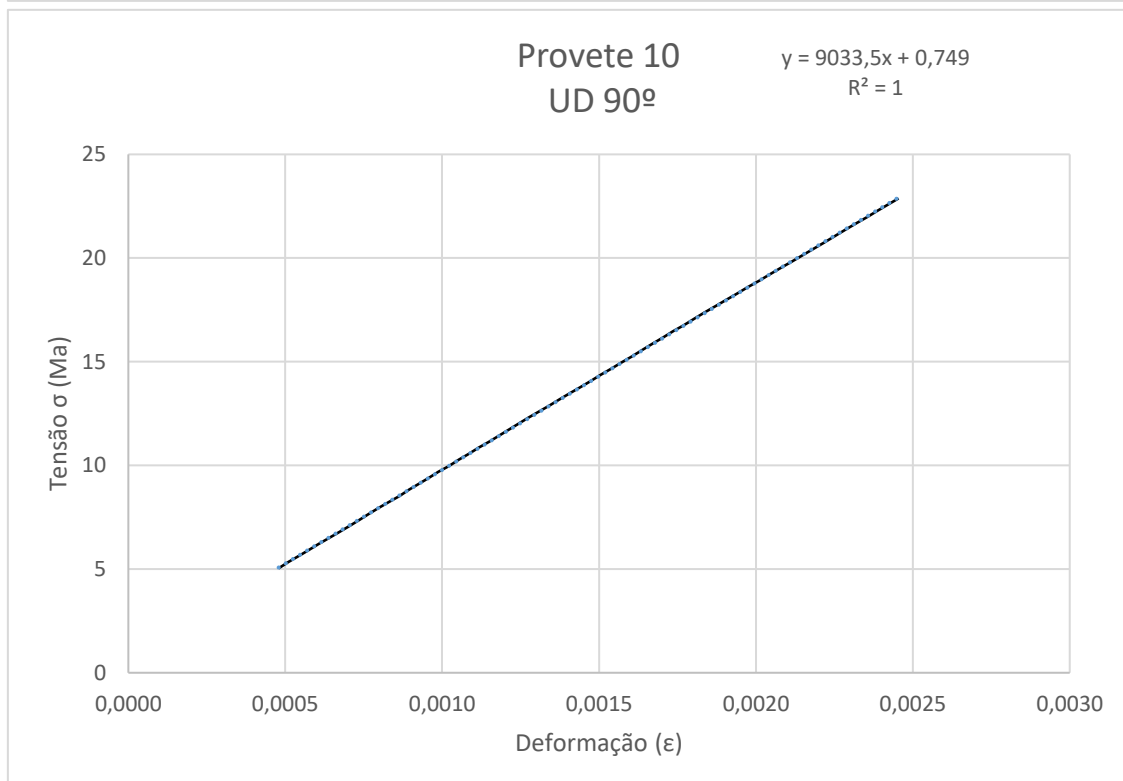
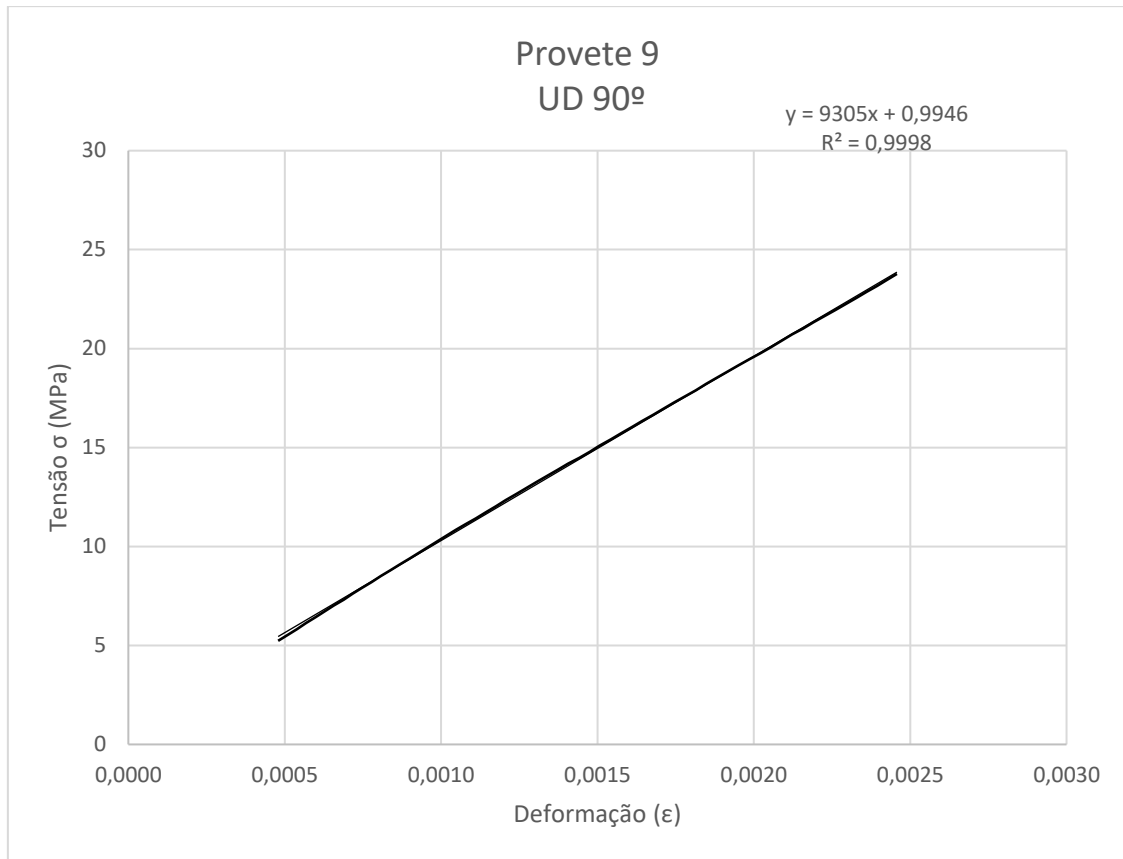
APÊNDICE D

Provetes Unidirecionais 0°:





Provetes unidirecionais 90°:



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.

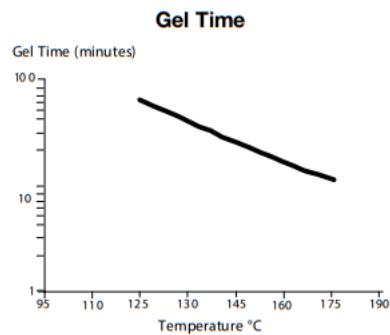
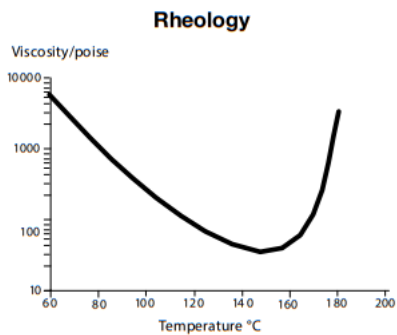
HexPly® 8552 is an amine cured, toughened epoxy resin system supplied with unidirectional or woven carbon or glass fibres.

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 (2-8°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 (2-8°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

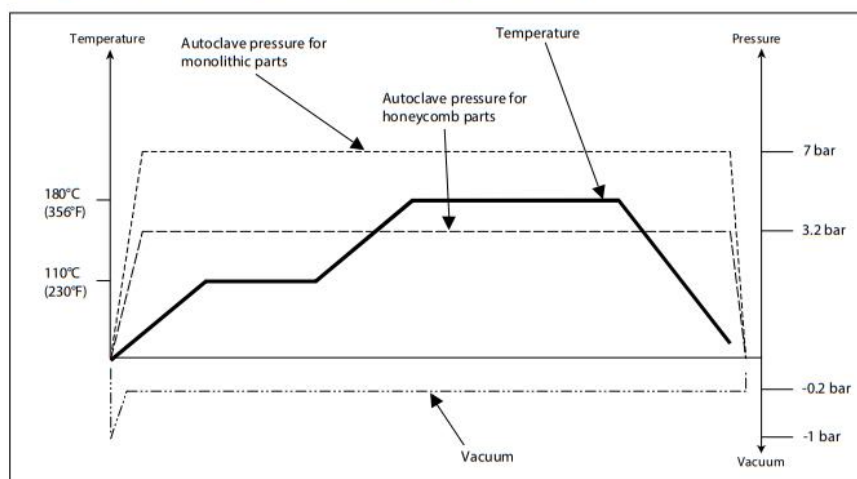
1. Apply full vacuum (1 bar).
2. Apply 3.2 bar gauge autoclave pressure.
3. Reduce the vacuum to a safety value of 0.2 bar when the autoclave pressure reaches approximately 1 bar gauge.
4. Heat at 1- 3°C/min (2-8°F/min) to 110°C ± 5°C (230°F ± 9°F)
5. Hold at 110°C ± 5°C (230°F ± 9°F) for 60 minutes ± 5 minutes.
6. Heat at 1-3°C/min (2-8°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 © 2020 – 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
- HexForce® reinforcements
- HiMax® multiaxial reinforcements
- HexPly® prepregs
- HexMC®-i molding compounds
- HexFlow® RTM resins
- HexBond™ adhesives
- HexTool® tooling materials
- HexWeb® honeycombs
- Acousti-Cap® sound attenuating honeycomb
- Engineered core
- Engineered products
- Polyspeed® laminates & pultruded profiles
- HexAM® additive manufacturing

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>

©2020 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.

FTA-012-MY20

6

ANEXO B

04/05/23, 09:35

Gühring Navigator

GUHRING Navigator

data sheet 1149



cutting rates

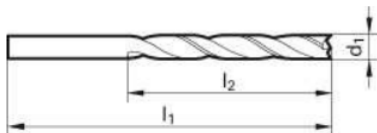
Main group	Subgroup	Hardness <=	Cutting speed V _c [m/min]	VRC
Plastics	aramid fibre re-inforced	1000 N/mm ²	150	1

Feed

f _u [mm]	VRC
d1 [mm] <= 1	
2.5	0.025
3.15	0.032
4	0.04
5	0.04
6.3	0.05
8	0.063
10	0.08
12.5	0.08

Master data

Description	Kevlar drills
Standard	Gühring standard
Surface finish	bright
Cutting direction	right hand
Tool material	Carbide
on shank	Straight
Coolant	none
Type	N
Tolerance zone	h8
Discount group	102



Dimensions

d1 [mm]	l1 [mm]	Flute length [mm]	No. of slots	Shank Ø d2 [mm]	shank length [mm]	d1 [inch]	Protruding length [mm]
2.380	43	14	2	2.38	29	3/32	19
2.500	43	14	2	2.5	29		19
2.780	46	16	2	2.78	30	7/64	21
3.000	46	16	2	3	30		21
3.200	49	18	2	3.2	31		23
3.570	52	20	2	3.57	32	9/64	25
4.000	55	22	2	4	33		27
4.500	58	24	2	4.5	34		29
4.760	62	26	2	4.76	36	3/16	31

<https://navigator.guehring.de/navigator/index.php?sorte=1149&mod=dat>

1/2

04/05/23, 09:35

Gühring Navigator

d1 [mm]	l1 [mm]	Flute length [mm]	No. of slots	Shank Ø d2 [mm]	shank length [mm]	d1 [inch]	Protruding length [mm]
4.850	62	26	2	4.85	36		31
5,000	62	26	2	5	36		31
5.950	66	28	2	5.95	38	15/64	33
6.000	66	28	2	6	38		33
6.350	70	31	2	6.35	39	1/4	36
7.000	74	34	2	7	40		39
7.140	74	34	2	7.14	40	9/32	39
7.940	79	37	2	7.94	42	5/16	42
8.000	79	37	2	8	42		42
9.520	89	43	2	9.52	46	3/8	48
10.000	89	43	2	10	46		48
10.320	89	43	2	10.32	46	13/32	48
11.510	95	47	2	11.51	48	29/64	52
11.910	102	51	2	11.91	51	15/32	56
12.000	102	51	2	12	51		56



Art. Nr.: 850.037.00

Shopping Cart

Stock:



Tool Data



eCl@ss 7.1

21 18 01 02 Stufenbohrer (nicht lösbare Schneiden)

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 C

Diiodomethane $\geq 99.4\%$ stabilised, AnalaR NORMAPUR® analytical reagent, for mineralogy

Supplier: VWR Chemicals

Synonyms: Methylene iodide

Stabilization: Stabilised with copper ~ 45 g/l



Formula: CH_2I_2
 MW: 267,84 g/mol
 Boiling Pt: 182 °C (1013 hPa)
 Melting Pt: 6 °C
 Density: 3,32537 g/cm³ (20 °C)
 Flash Pt: 110 °C (closed cup)
 Storage Temperature: Ambient

MDL Number: MFCD00001079
 CAS Number: 75-11-6
 EINECS: 200-841-5
 UN: 2810
 ADR: 6.1,III
 Merck Index: 12,06143



Specification Test Results

Assay (on anhydrous substance)	Min. 99.4 %
Stabilizer (Cu)	about 45 g/l
Acidity	Max. 0.003 meq/g
Density (20/4)	3.310 - 3.322
Solidification point	5.6 - 6.2 °C

ORDER

VWR Catalog Number	Price	Quantity	Pack type	Pk
VWRC25633.186	\$292.00		Glass bottle	100 mL

[MSDS](#) [MSDS](#)
[Certificates](#)

ANEXO D

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 480 W 280 W 240 W	70 kV 60 kV 70 kV 60 kV	8 mA 8 mA 4 mA 4 mA
◆ REFERENCE CURRENT-TIME PRODUCT	0.8 mAs 0.4 mAs	8 mA 4 mA	0.1 sec 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 $\pm 10 \%$
- ◆ NOMINAL CURRENT OF THE X-RAY TUBE $\pm 10 \%$
- ◆ SELECTED EXPOSURE TIME ± 0.005 from 0.020 to 0.1 sec
 ± 5 from 0.125 to 3.2 sec

WEIGHT

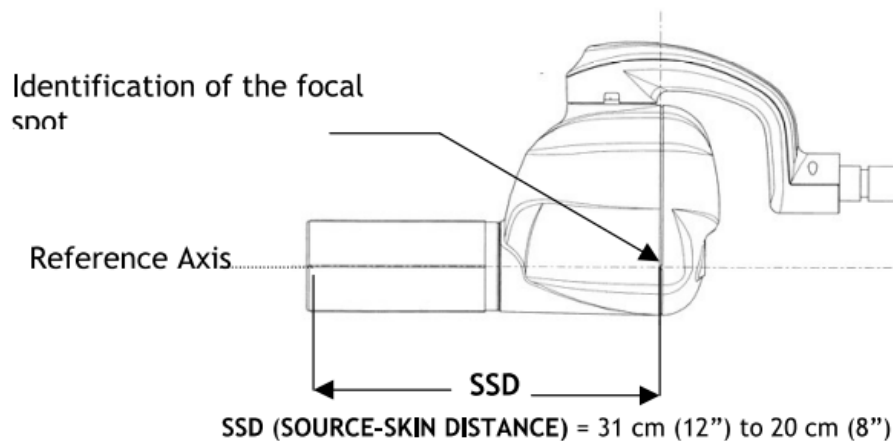
- ◆ TOTAL WEIGHT 25 Kg.
- ◆ WEIGHT OF TUBEHEAD 5.5 Kg.

ENVIRONMENTAL CHARACTERISTICS

- ◆ OPERATING TEMPERATURE $+5^{\circ}\text{C}$ $+40^{\circ}\text{C}$
- ◆ WAREHOUSE TEMPERATURE -15°C $+50^{\circ}\text{C}$
- ◆ HUMIDITY 25 % - 75 %

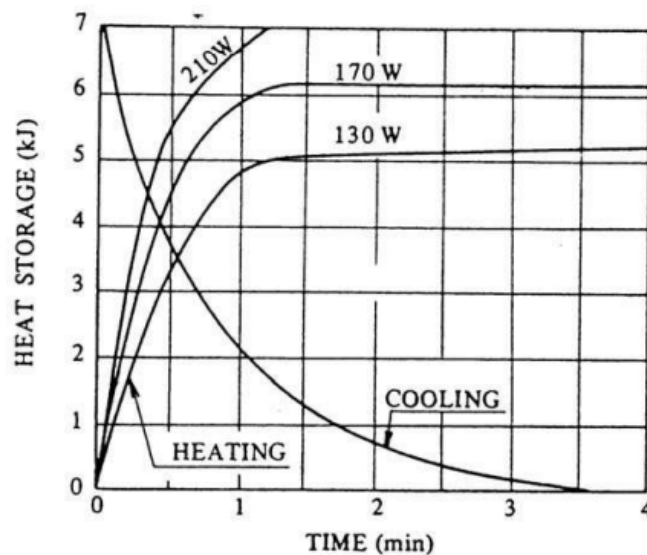
TECHNICAL CONE DATA

- ◆ 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-073B-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 E

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.

ANEXO F

TRAVELS	S.A.E	METRIC
X Axis	30.0 in	762 mm
Y Axis	16.0 in	406 mm
Z Axis	20.0 in	508 mm
Spindle Nose to Table (~ max)	24.0 in	610 mm
Spindle Nose to Table (~ min)	4.0 in	102 mm

SPINDLE	S.A.E	METRIC
Max Rating	30.0 hp	22.4 kW
Max Speed	8100 rpm	8100 rpm
Max Torque	90.0 ft-lbf @ 2000 rpm	122.0 Nm @ 2000 rpm
Max Torque w/opt Gearbox	250 ft-lbf @ 450 rpm	339 Nm @ 450 rpm
Drive System	Inline Direct-Drive	Inline Direct-Drive
Taper	CT40 BT40 HSK-A63	CT40 BT40 HSK-A63
Bearing Lubrication	Air / Oil Injection	Air / Oil Injection
Cooling	Liquid Cooled	Liquid Cooled

TABLE	S.A.E	METRIC
Length	36.0 in	914 mm
Width	14.0 in	356 mm
T-Slot Width	0.626 in to 0.630 in	15.90 mm to 16.00 mm
T-Slot Center Distance	4.92 in	125 mm
Number of Std T-Slots	3	3
Max Weight on Table (evenly distributed)	3000 lb	1361 kg

FEEDRATES	S.A.E	METRIC
Max Cutting	650 ipm	16.5 m/min
Rapids on X	1000 ipm	25.4 m/min
Rapids on Y	1000 ipm	25.4 m/min
Rapids on Z	1000 ipm	25.4 m/min

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

TOOL CHANGER	S.A.E	METRIC
Type	Carousel	Carousel
Capacity	20	20
Max Tool Diameter (full)	3.5 in	89 mm
Max Tool Weight	12 lb	5.4 kg
Tool-to-Tool (avg)	4.2 s	4.2 s
Chip-to-Chip (avg)	4.5 s	4.5 s

GENERAL	S.A.E	METRIC
Coolant Capacity	55 gal	208 L

AIR REQUIREMENTS	S.A.E	METRIC
Air Required	4 scfm @ 100 psi	113 L/min @ 6.9 bar
Inline Air Hose	3/8 in	3/8 in
Coupler (Air)	3/8 in	3/8 in
Air Pressure Min	80 psi	5.5 bar

DIMENSIONS - SHIPPING	S.A.E	METRIC
Domestic Pallet	101 in x 99 in x 101 in	257 cm x 251 cm x 257 cm
Export Pallet	98 in x 92 in x 100 in	249 cm x 232 cm x 254 cm
Weight	7800 lb	3539.0 kg

ELECTRICAL SPECIFICATION	S.A.E	METRIC
Spindle Speed	8100 rpm	8100 rpm
Drive System	Inline Direct-Drive	Inline Direct-Drive
Spindle Power	30.0 hp	22.4 kW
Input AC Voltage (3 Phase) - Low	220 VAC	220 VAC
Full Load Amps (3 Phase) - Low	70 A	70 A
Input AC Voltage (3 Phase) - High*	440 VAC	440 VAC
Full Load Amps (3 Phase) - High*	35 A	35 A

ANEXO G

Sensor

Sensor Vendor	Sony
Sensor	IMX250
Shutter	Global Shutter
Sensor Format	2/3"
Sensor Type	CMOS
Sensor Size	8.4 mm x 7.1 mm
Resolution (HxV)	2448 px x 2048 px
Resolution	5 MP
Pixel Size (H x V)	3.45 μm x 3.45 μm
Frame Rate	75 fps
Mono/Color	Mono

EMVA Data

EMVA Quantum Efficiency (typical)	68.0 %
Dark Noise (typical)	2.4 e^-
Saturation Capacity (typical)	10.7 ke^-
Dynamic Range (typical)	73.1 dB
Signal-to-Noise Ratio (typical)	40.3 dB

Camera Data

Interface	USB 3.0
Pixel Bit Depth	10 or 12 bits
Synchronization	<ul style="list-style-type: none"> ▪ free-run ▪ hardware trigger ▪ software trigger
Exposure Control	<ul style="list-style-type: none"> ▪ hardware trigger ▪ programmable via the camera API
Digital Input	1
Digital Output	1
General Purpose I/O	2
Power Supply	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Via USB 3.0 interface
Power Requirements (typical)	3.2 W

Housing

Housing Type	Box
Housing Size (L x W x H)	29.3 mm x 29 mm x 29 mm
Lens Mount	<ul style="list-style-type: none"> ▪ C-mount
Operating Temperature	0 - 50°C
Weight (typical)	80g

Conformity

Conformity	<ul style="list-style-type: none"> ▪ RoHS ▪ CE ▪ IP30 ▪ GenICam ▪ USB3 Vision ▪ FCC ▪ KC ▪ UL ▪ EAC
------------	--