

Estudo do comportamento mecânico de compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de cânhamo

HIAGO DOS REIS GOMES

Relatório Final de Dissertação apresentado à
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança

para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Industrial

Este Trabalho foi efetuado sob orientação de:
Doutor João Eduardo Pinto Castro Ribeiro
Doutor João da Rocha e Silva
Mestre Sérgio Mateus Brandão

BRAGANÇA

2020

HIAGO DOS REIS GOMES

Estudo do comportamento mecânico de compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de cânhamo

Dissertação apresentada ao Programa de Dupla Diplomação entre o Centro Universitário UniEvangélica e o Instituto Politécnico de Bragança, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Industrial – Ramo Engenharia Mecânica.

Orientador: Professor Doutor João Eduardo Pinto Castro Ribeiro

Co-orientador: Professor Mestre Sérgio Mateus Brandão

BRAGANÇA

2020

Resumo

Devido à busca por redução de custos, os compósitos de polímeros reforçados com fibras naturais têm sido alvo de estudos nos últimos anos. A adequação das propriedades mecânicas dos materiais compósitos a algumas aplicações contribuem para que, atualmente, sejam utilizados de uma forma generalizada.

Na presente dissertação foram fabricados e caracterizados compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras de cânhamo. Devido à grande variabilidade de propriedades e características das fibras vegetais, também foi realizado a caracterização mecânicas das fibras de cânhamo.

A técnica de correlação digital de imagem foi utilizada neste estudo para investigar a evolução das deformações das amostras durante os testes de tração. Os resultados mostram que é uma técnica adequada na caracterização do comportamento mecânico durante os ensaios realizados. Foi possível efetuar uma medição, sem contacto, do campo de deslocamentos e deformações. O objetivo principal é o de comparar as curvas de deslocamento obtidos da máquina de teste universal com o método de correlação digital de imagem.

Finalmente, as propriedades obtidas foram cuidadosamente analisadas de forma a melhor compreender o comportamento mecânico obtidos nos compósitos produzidos e apresentadas propostas para trabalhos futuros.

Palavras Chave: fibra de cânhamo, resina poliéster, compósitos, propriedades mecânicas, correlação digital de imagem.

Abstract

Due to the search for cost reduction, polymer composites reinforced with natural fibers have been the subject of studies in recent years. The adequacy of the mechanical properties of composite materials for some applications contributes to the fact that they are currently used in a generalized way.

In this dissertation, polyester matrix composites reinforced with hemp fibers were manufactured and characterized. Due to the great variability of properties and characteristics of vegetable fibers, mechanical characterization of hemp fibers was also carried out.

The digital image correlation technique was used in this study to investigate the evolution of sample deformations during the tensile tests. The results show that it is an adequate technique to characterize the mechanical behavior during the tests performed. It was possible to carry out a non-contact measurement of the displacement and deformation field. The main objective is to compare the displacement curves obtained from the universal testing machine with the digital image correlation method.

Finally, the properties obtained were carefully analyzed in order to better understand the mechanical behavior obtained in the composites produced and proposals for future work were presented.

Keywords: hemp fiber, polyester resin, composites, mechanical properties, digital image correlation.

ÍNDICE

<i>Resumo</i>	<i>iii</i>
<i>Abstract</i>	<i>iv</i>
<i>Lista de figuras</i>	<i>vii</i>
<i>Lista de tabelas</i>	<i>ix</i>
<i>Nomenclatura</i>	<i>x</i>
1 INTRODUÇÃO	12
1.1 <i>Considerações gerais</i>	12
1.2 <i>Objetivos da tese</i>	13
1.3 <i>Estrutura da Tese</i>	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 <i>Uso de fibras de cânhamo</i>	15
2.2 <i>Materiais Compósitos</i>	15
2.2.1 <i>Matriz</i>	17
2.2.2 <i>Reforço</i>	18
2.3 <i>Densidade de fibras naturais</i>	18
2.4 <i>Correlação digital de imagem (CDI)</i>	20
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	26
3.1 <i>Método experimental para determinação da densidade de fibras naturais</i>	26
3.1.2 <i>Preparação das amostras</i>	26
3.1.3 <i>Determinação da densidade da fibra pelo método do Picnômetro</i>	26
3.2 <i>Método experimental para ensaio de tração em monofilamentos</i>	30
3.2.1 <i>Preparação das amostras</i>	30
3.2.2 <i>Ensaio de tração de monofilamentos</i>	31
3.2.3 <i>Determinação da resistência à tração</i>	32
3.2.4 <i>Determinação do módulo de elasticidade</i>	32
3.3 <i>Método experimental para ensaio de tração da Resina de Poliéster</i>	34
3.3.1 <i>Geometria e dimensão dos provetes</i>	34
3.3.2 <i>Preparação das amostras</i>	34
3.3.3 <i>Parâmetros de Ensaio</i>	36
3.4 <i>Método experimental para fabricação do compósito</i>	37
3.4.1 <i>Preparação das amostras</i>	37
3.4.2 <i>Geometria e dimensão dos provetes</i>	39
3.4.3 <i>Parâmetros de Ensaio</i>	41

3.4.4	Determinação da fração de volume da fibra	42
3.5	<i>Procedimento experimental para Correlação Digital de Imagem</i>	42
3.5.1	Preparação dos provetes	43
3.5.2	Aquisição de dados.....	43
3.5.3	Análise de resultados.....	44
3.5.4	Sincronização de dados.....	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1	<i>Caracterização da fibra de cânhamo</i>	47
4.1.2	<i>Densidade da fibra pelo método do Picnômetro</i>	47
4.1.3	<i>Determinação da resistência à tração de monofilamentos</i>	49
4.1.4	<i>Determinação do módulo de elasticidade</i>	52
4.2	Caracterização da Resina Poliéster	54
4.3	Caracterização dos compósitos.....	55
4.3.1	<i>Determinação da fração volumétrica de fibras</i>	55
4.3.2	<i>Propriedades dos compósitos</i>	55
4.4	Correlação Digital de Imagem	56
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	64
5.1	<i>Conclusões</i>	64
5.2	<i>Linhas futuras de investigação</i>	65
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

Lista de figuras

Figura 1: Classificação dos vários tipos de compósitos (adaptado de [9]).	16
Figura 2: Classificação de materiais compósitos segundo o reforço [8].	18
Figura 3: Densidade média e desvio padrão para diferentes métodos de medida de uma mesma amostra (adaptado de [11]).	20
Figura 4: Esquema da montagem experimental típica para a técnica DIC-2D (adaptado de [20]).	21
Figura 5: Exemplo de três padrões estocásticos diferentes [22].	22
Figura 6: Representação da evolução das deformações no subset [19].	22
Figura 7. Amostra de fibras de cânhamo para teste de densidade.	26
Figura 8: Picnômetro para medida de densidade de sólidos.	27
Figura 9: Massa do picnômetro + água destilada + amostra de fibra seca.	28
Figura 10: Suporte de acordo com a ASTM C1557.	30
Figura 11: Ensaio de tração para fibras de cânhamo. A) Montagem antes do início do ensaio. B) Montagem após a ruptura da fibra.	32
Figura 12: Representação teórica do comportamento do gráfico para a determinação do módulo de elasticidade e complacência do sistema [26].	33
Figura 13: Geometria e dimensões (em mm) da amostra [27].	34
Figura 14: Molde para fabricação de provetes.	35
Figura 15: Provetes de Resina Poliéster.	36
Figura 16: Ensaio de tração para o provete de Resina Poliéster.	37
Figura 17: Fixação da placa em um mandril.	38
Figura 18: Prensagem do compósito.	38
Figura 19: Placa metálica com o compósito.	39
Figura 20: Máquina de corte a laser utilizada – X252 da GCC.	40
Figura 21: Provetes com as orientações indicadas.	40
Figura 22: Equipamento utilizado no teste de tração - Shimadzu Autograph AGS-X 10KN.	41
Figura 23: Amostra na garra do equipamento de ensaio de tração.	41
Figura 24: Provetes para correlação digital de imagem.	43
Figura 25: Sistema utilizado na realização dos ensaios.	44
Figura 26 - Densidade real das amostras analisadas.	48
Figura 27 - Densidade média das amostras analisadas.	48

Figura 28: Curva força x deslocamento dos monofilamentos de 40 mm.	50
Figura 29: Curva força x deslocamento dos monofilamentos de 50 mm.	50
Figura 30: Curva força x deslocamento dos monofilamentos de 60 mm.	50
Figura 31: Resultado experimental para determinação do módulo de elasticidade e complacência do sistema.	53
Figura 32: Curva força x deslocamento da resina poliéster.	54
Figura 33: Provete A1 orientado a (0°).	56
Figura 34: Provete A2 orientado a (0°).	57
Figura 35: Provete B1 orientado a (45°).	57
Figura 36: Provete B2 orientado a (45°).	58
Figura 37: Provete C1 orientado a (90°).	58
Figura 38: Provete C2 orientado a (90°).	59
Figura 39: Evolução da deformação no provete A1 (0°).	60
Figura 40: Evolução da deformação no provete A2 (0°).	60
Figura 41: Evolução da deformação no provete B1 (45°).	61
Figura 42: Evolução da deformação no provete B2 (45°).	61
Figura 43: Evolução da deformação no provete C1 (90°).	62
Figura 44: Evolução da deformação no provete C2 (90°).	62

Lista de tabelas

Tabela 1. Procedimento de calibração do Picnômetro	27
Tabela 2. Densidade da água destilada de acordo com a temperatura (adaptado de [24]).	29
Tabela 3. Massa da fibra seca, picnômetro vazio, picnômetro + água e picnômetro + água + fibra, todas em gramas (g).....	47
Tabela 4: Diâmetros das fibras de cânhamos ensaiadas medidos ao longo do seu comprimento.....	49
Tabela 5: Tensão de rotura das fibras de cânhamo.	51
Tabela 6: Propriedades obtidas na caracterização mecânica de um compósito de resina de poliéster reforçado com fibras de cânhamo.	55

Nomenclatura

Lista de Abreviaturas

2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CCD	<i>Charge Coupled Device</i>
CDI	Correlação Digital de imagem
DIC	<i>Digital Image Correlation</i>
ESTIG	Escola Superior de Tecnologia e Gestão
FAO	<i>Food and Agriculture Organisation</i>
IPB	Instituto Politécnico de Bragança
NCC	<i>Normalized Cross Correlation</i>
NSSD	<i>Normalized Sum of Squared Differences</i>
SSD	<i>Sum of Squared Differences</i>
VDIC	<i>Volumetric Digital Image Correlation</i>
ZNSSD	<i>Zero-Mean Normalised Sum of Squared Differences</i>
ZSSD	<i>Zero-Mean Sum of Squared Differences</i>

Lista de Unidades

°C	Grau Celsius
g	Gramma
GPa	Gigapascal
kN	KiloNewton
ml	Mililitro
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
N	Newton
Pa	Pascal
fps	Fotogramas por segundo – (<i>Frames per second</i>)

Lista de Símbolos

A	Área de secção transversal da amostra
d	Diâmetro do grão de speckle
dm	Densidade da Matriz
D	Deslocamento por exposição
df	Densidade da Fibra
ε_{xx}	Componente cartesiana linear de deformação segundo o eixo xx
ε_{yy}	Componente cartesiana linear de deformação segundo o eixo yy
F	Função intensidade de referência
F_c	Fator de correção
$F_{máx}$	Força máxima obtida pelo material durante o ensaio mecânico
G	Função intensidade deformada
l_0	Comprimento das Fibras
m_1	Massa da amostra seca
m_2	Média de massa do picnômetro limpo e seco
m_3	Média de massa do picnômetro com água destilada
m_4	Massa do picnômetro com água destilada e amostra seca
P	Número de pixels analisados
pf	Peso da Fibra
ρ_{H_2O}	Densidade da água destilada
ρ_{fibra}	Densidade da Fibra
u	Translação no eixo das abcissas
v	Translação no eixo das ordenadas
vf	Fração volumétrica a ser encontrado
x	Coordenada cartesiana das abcissas de referência
χ	Valor da função objetivo
x'	Coordenada cartesiana das abcissas deformada
y	Coordenada cartesiana das ordenadas de referência
y'	Coordenada cartesiana das ordenadas deformada
σ_t	Resistência a tração

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais

O aumento da conscientização ambiental levou a um crescente interesse para o uso de materiais sustentáveis. O potencial das fibras naturais como reforço em materiais compósitos é bem reconhecido devido às suas propriedades mecânicas que aumentam a possibilidade de produzir materiais ecológicos. A fibra de cânhamo é uma das fibras mais fortes e rígidas disponíveis, portanto, possui grande potencial para uso em materiais compósitos. No entanto, suas propriedades dependem das condições de cultivo, métodos de extração, tratamentos químicos e estrutura biológica.

As fibras naturais apresentam vantagens diante de suas propriedades tecnológicas, econômicas e ecológicas sobre as fibras sintéticas. Dentre as principais vantagens que as fibras naturais apresentam para serem utilizadas como reforço em um compósito polimérico são as suas propriedades mecânicas específicas, como seu elevado módulo de elasticidade; a sua baixa densidade, tornando os produtos mais leves; não ser abrasivo, o que reduz o desgaste das máquinas durante o processamento; o seu baixo custo e serem biodegradáveis. Os compósitos reforçados com fibras naturais têm sido aplicados em diversas indústrias como a construção civil, naval, aeroespacial, eletrônico e principalmente na automação.

As propriedades dos compósitos com fibras vegetais são funções das propriedades das fases constituintes, das suas quantidades relativas e da geometria da fase dispersa. Além desses fatores, a interface fibra-matriz também desempenha um papel importante nas propriedades mecânicas e físicas dos materiais compósitos. Uma vez que a transferência de tensão da matriz para a fibra ocorre através desta interface, a adesão da fibra na matriz polimérica influencia significativamente o comportamento micromecânico da interface. Portanto, se as interações entre as fases forem fracas, dificilmente será obtido um aumento da resistência do polímero a ser modificado, atuando as fibras com um caráter maior de defeitos do que de reforço.

Este trabalho apresenta como proposta o desenvolvimento de um compósito de matriz polimérica reforçado com fibras de cânhamo, orientadas em diferentes direções. As propriedades mecânicas dos referidos compósitos foram determinadas através de ensaios de tração.

A proposta também tem o intuito de utilizar o método de Correlação Digital de Imagem para medir os deslocamentos das amostras dos compósitos poliméricos reforçados com fibras de cânhamo desenvolvidos, bem como, realizar a comparação entre as medições feitas pela máquina de tração, mostrando a diferença entre esses métodos.

1.2 Objetivos da tese

O presente trabalho tem por objetivo o estudo do comportamento mecânico dos compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras de cânhamo submetidos a ensaios de tração. Os fatores experimentais, neste caso, foram o alinhamento das fibras de cânhamo, sendo orientadas em três direções diferentes: 0° , 45° e 90° em relação a direção do eixo do provete. Como as propriedades finais do compósito dependem, para além do modo de processamento, das propriedades dos elementos que as constituem e da interface fibra/matriz, também será feita a caracterização mecânica das fibras de cânhamo e da resina de poliéster.

Pretende-se, também, utilizando a técnica ótica de Correlação Digital de Imagem, realizar a construção da curva tensão x deformação dos compósitos desenvolvidos. E, por fim, efetuar a comparação das curvas tensão x deformação, obtidas a partir dos dados da máquina de ensaio de tração com a técnica de correlação digital de imagem.

1.3 Estrutura da Tese

A estrutura do trabalho encontra-se dividida em 6 capítulos, os quais se encontram descritos da seguinte maneira:

O primeiro capítulo apresenta a introdução, a significância do estudo, o objetivo do trabalho e descrição da sua estrutura.

O segundo capítulo apresenta o enquadramento do trabalho dentro dos estudos já realizados, buscando o embasamento teórico de acordo com o que foi estudado pela comunidade científica.

O terceiro capítulo apresenta os procedimentos experimentais utilizado, desde aspectos da caracterização das fibras, medições de propriedades, passando pela preparação dos compósitos e preparação para a técnica de correlação digital de

imagem, considerações realizadas, equipamentos utilizados até o tratamento de dados.

O quarto capítulo apresenta os resultados experimentais após o tratamento de dados das fibras, da resina utilizada e dos compósitos de cânhamo, são informados valores para a tensão de ruptura, módulo de elasticidade, densidade. Neste capítulo os dados também são analisados, discutidos e comparados com os valores encontrados na literatura.

O quinto capítulo são apresentadas as conclusões obtidas pela interpretação dos dados de todo o trabalho, e, são propostos estudos para o desenvolvimento do tema.

Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas que serviram de base para o desenvolvimento da tese.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Uso de fibras de cânhamo

O cânhamo é uma planta nativa da Ásia Central e conhecida por ter crescido por mais de 12.000 anos. Provavelmente chegou à Europa central na Idade do Ferro e há evidências de seu crescimento no Reino Unido cultivado pelos Anglo Saxões entre 800 e 1000 a.C [1].

A China antiga utilizava o cânhamo para diversos fins, as fibras eram utilizadas para criar fio e fazer tecidos. Os tecidos de cânhamo eram a principal matéria prima para a confecção de roupas, até o algodão ser introduzido. As fibras de cânhamo também foram usadas para fazer papel. O cânhamo desintegrado e batido foi utilizado para fazer o pedaço de papel mais antigo encontrado em Xi'na na China [2]. Outros usos de extrema importância foram registrados em outros países na fabricação de outros produtos, por exemplo, livros, papel para dinheiro, bolsas de chá, roupa de cama e telas [3].

Na maioria dos países ocidentais, o cultivo de cânhamo desapareceu ou foi interrompido por décadas como resultado da competição com outras matérias-primas como algodão e fibras sintéticas, altos custos de mão-de-obra e proibição de cultivo devido ao uso de cannabis como um narcótico [4]. Atualmente, é cultivada principalmente na União Europeia, Ásia Central, Filipinas e China. De acordo com a *Food and Agriculture Organisation (FAO)*, quase metade do suprimento industrial de cânhamo é cultivado na China com a maior parte restante sendo cultivada no Chile, França, República da Coreia e Espanha [1].

Estima-se que o mercado global de cânhamo consiste em mais de 25.000 produtos em diversos campos, por exemplo, agroindustrial, têxtil, reciclagem, automotivo, mobília, alimentício, papel, materiais de construção, cuidados pessoais e indústria farmacêutica [5].

2.2 Materiais Compósitos

Segundo a norma ASTM D3878-95 [6], compósito é uma substância consistindo de dois ou mais materiais, insolúveis entre si, quando combinados tem a

finalidade de formar um material de engenharia útil, com certas propriedades que não se encontram nos materiais isoladamente.

Os materiais compósitos podem ser selecionados para fornecer combinações melhores de características mecânicas, tais como a rigidez, resistência, peso, desempenho em alta temperatura, resistência à corrosão, dureza ou condutividade [7].

Em geral, a forma mais usual de compósito são os materiais constituídos por um reforço de fibra embutido em uma matriz polimérica, apesar de existir diferentes formas. Os compósitos são classificados pelo material que forma a matriz, chamada de fase contínua, responsável por envolver a outra fase, chamada de reforço ou fase dispersa que atua melhorando as propriedades mecânicas da matriz. Os materiais compósitos recebem diferentes classificações conforme representado na Figura 1, dependendo do tipo de matriz, do tipo de reforço e da sua distribuição pela matriz [8].

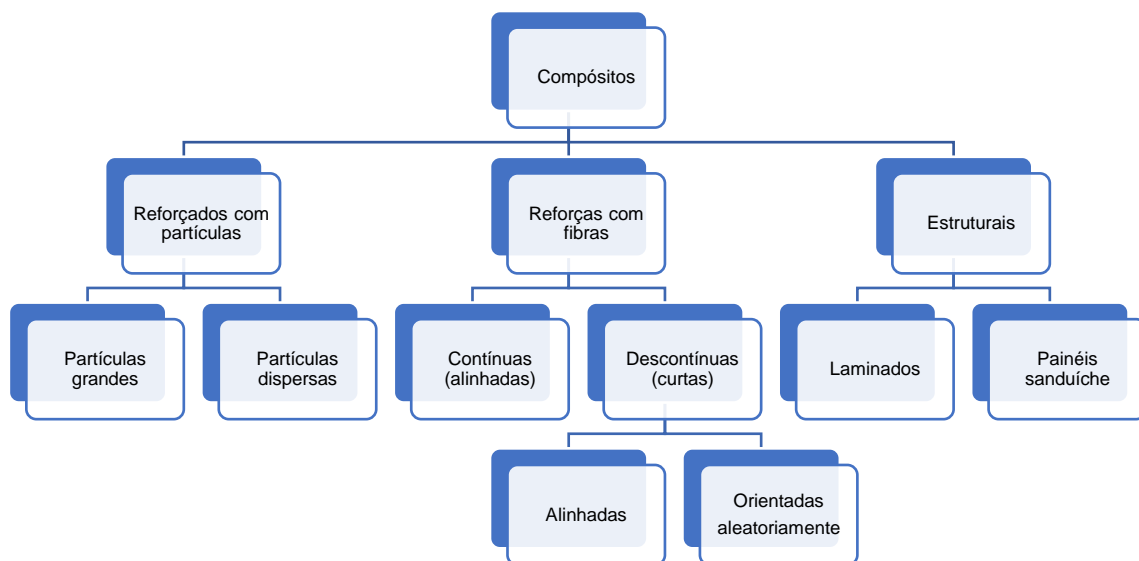


Figura 1: Classificação dos vários tipos de compósitos (adaptado de [9]).

A interface de um compósito é a região onde ocorre o contato entre os componentes fibra/matriz, sendo a responsável pela transferência da solicitação mecânica da matriz para o reforço. Na preparação de um compósito, a adesão interfacial entre a matriz e reforço, deve ocorrer de maneira adequada para otimizar a combinação das propriedades envolvidas. Se a adesão for inadequada entre as fases envolvidas, poderá provocar o início de falhas, comprometendo o desempenho do compósito [10].

2.2.1 Matriz

A matriz tem a função de aglomerar todo o material de reforço, tendo como principal objetivo manter a orientação das fibras e seu espaçamento, transmitir as forças de corte entre as camadas das fibras e proteger da ação do ambiente externo. Ela apresenta propriedades inferiores de densidade, rigidez e resistência, quando comparado com as fibras. Em termos de comportamento pode ser dúctil, elástica ou plástica, podendo ter ou não um comportamento linear mesmo a baixos níveis de deformação [9].

Os compósitos podem ser agrupados em três grupos no que diz respeito ao material que constitui a sua matriz, podendo esta ser uma matriz cerâmica, metálica ou polimérica, cada um com as suas limitações e especificidades [9].

- **Matriz metálica**

Geralmente, os metais mais utilizados em compósitos de matriz metálica são de alumínio, magnésio ou titânio. São normalmente ligados e tratados termicamente para melhorar as suas propriedades mecânicas. Os reforços aplicados não alteram muito a rigidez e a resistência do metal. Entretanto, melhoram a resistência ao desgaste, resistência à fluência e a estabilidade a alta temperatura [9].

- **Matriz cerâmica**

O principal objetivo para adicionar reforços a cerâmicos é o aumento da tenacidade e possuem uma elevada capacidade térmica por unidade de peso. Entretanto os cerâmicos são particularmente frágeis. Os reforços atuam como obstáculos à propagação da fenda, tendo a interface reforço-cerâmico um papel muito importante [9].

- **Matriz polimérica**

Tipo de matriz mais utilizada devido ao baixo custo, alta resistência e princípios simples de fabricação. Possuem uma grande facilidade de processamento, contendo boas propriedades mecânicas impregnando e aderindo aos elementos de reforço com facilidade. Possuem uma baixa densidade, e são processadas a baixa temperatura, permitindo a utilização de alguns reforços orgânicos. São divididos em duas categorias principais, os termoendurecíveis e termoplástico. Em geral, os termoendurecíveis são mais resistentes e mais rígidos, mas são mais frágeis quando comparados com os polímeros termoplásticos [9].

2.2.2 Reforço

Os elementos de reforço proporcionam resistência e rigidez ao composto e ajudam a suportar o esforço estrutural. As propriedades que se procuram nos reforços são as elevadas características mecânicas, baixa densidade, boa compatibilidade com as resinas, facilidade de manuseamento e baixo custo, por exemplo [8].

Os materiais compósitos são usualmente classificados segundo o tipo de material de reforço usado, destacando-se duas grandes classes: reforços de fibras e de partículas. Na Figura 2, são representados exemplos de distribuição de fibras e partículas em compósitos.

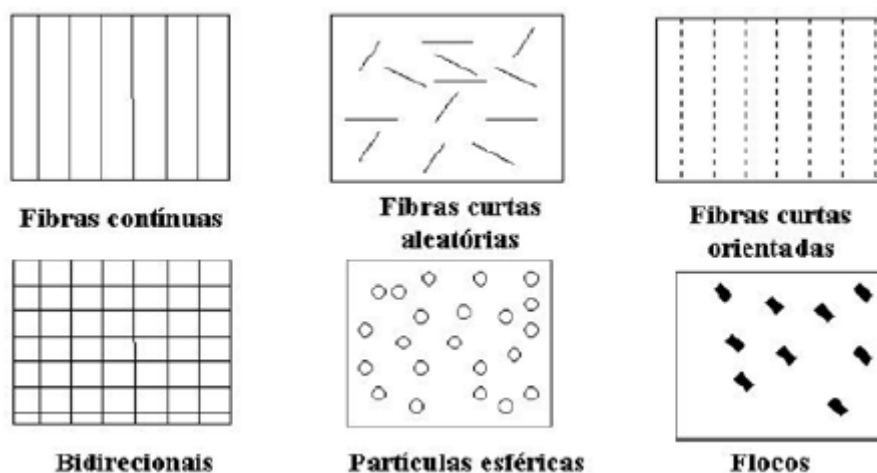


Figura 2: Classificação de materiais compósitos segundo o reforço [8].

2.3 Densidade de fibras naturais

Tradicionalmente, diferentes técnicas são usadas para medir a densidade das fibras naturais. Um estudo de Truong *et Al.* revisaram cinco métodos distintos de testes, sendo, medida linear do diâmetro; método de Arquimedes, Picnometria com hélio, coluna de gradiente e Picnometria com líquido [11].

O método de medida linear de densidade está incluído no padrão da norma ASTM-D1577 e ASTM-D2130 [12] [13]. Consiste na medida do diâmetro e comprimento das amostras de fibras, para o cálculo de seu volume e, posteriormente, determinar a densidade através da massa das fibras [11].

O método de Arquimedes, consiste em inserir em um recipiente as amostras de fibras do qual se pretende-se medir a densidade, ao ser imersas em um líquido de

densidade conhecida, a diferença entre a medida da massa das fibras secas e das fibras imersas em um líquido é a força de empuxo, conhecendo-se a força de empuxo é possível calcular o volume da fibra imersa e, conseqüentemente, encontrar a sua densidade. O procedimento completo pode ser verificado nas normas ASTM D3800 e ASTM D792 [14] [11].

O método de Picnometria com hélio, consiste em inserir em um recipiente fechado as amostras do material do qual pretende-se medir a densidade, outro recipiente de volume e pressão conhecidos deve ser utilizado para transferir o gás para o recipiente onde se encontram as amostras, a pressão restante no recipiente auxiliar é utilizada para determinar o volume das amostras ensaiadas [14].

O método de Picnometria com líquidos é semelhante aos métodos de Arquimedes e Picnometria com hélio, consiste em basicamente medir o volume de líquido que é ocupado pelas amostras inseridas no picnômetro. Como a amostra é pesada e depois colocada em um picnômetro, esse método permite uma medição direta do volume da amostra, ou seja, o líquido que é deslocado no picnômetro fornece uma leitura do volume da amostra, portanto pode-se determinar a densidade da amostra pela massa e volume. A picnometria com líquidos é útil apenas para materiais de densidade mais alta que o líquido utilizado. Um padrão para esse tipo de medição pode ser consultado na norma ASTM D792 [11].

Por fim, o método de Coluna de gradiente é geralmente utilizado adotando uma técnica descrita na norma ASTM D1505-03 [15]. A medição da densidade pode ser feita com a utilização de uma coluna de líquidos com diferentes densidades. Neste método, um gradiente de densidade é estabelecido em uma faixa de densidade pré-selecionada por escolha de líquidos miscíveis e apropriados de diferentes densidades, misturados em proporções continuamente variáveis ao longo do comprimento de uma coluna. A amostra, cuja densidade deve ser medida, afundará na coluna até descansar em uma posição considerada adequada à sua densidade [14].

Dentre os métodos apresentados alguns exibem vantagens consideráveis sobre outros, alguns são mais simples de executar, têm resultados com maior precisão e qualidade, apresentam resultados mais rapidamente e são mais seguros e convenientes. Valores de densidade de fibras de linho medidas com diferentes métodos podem ser vistos na Figura 3.

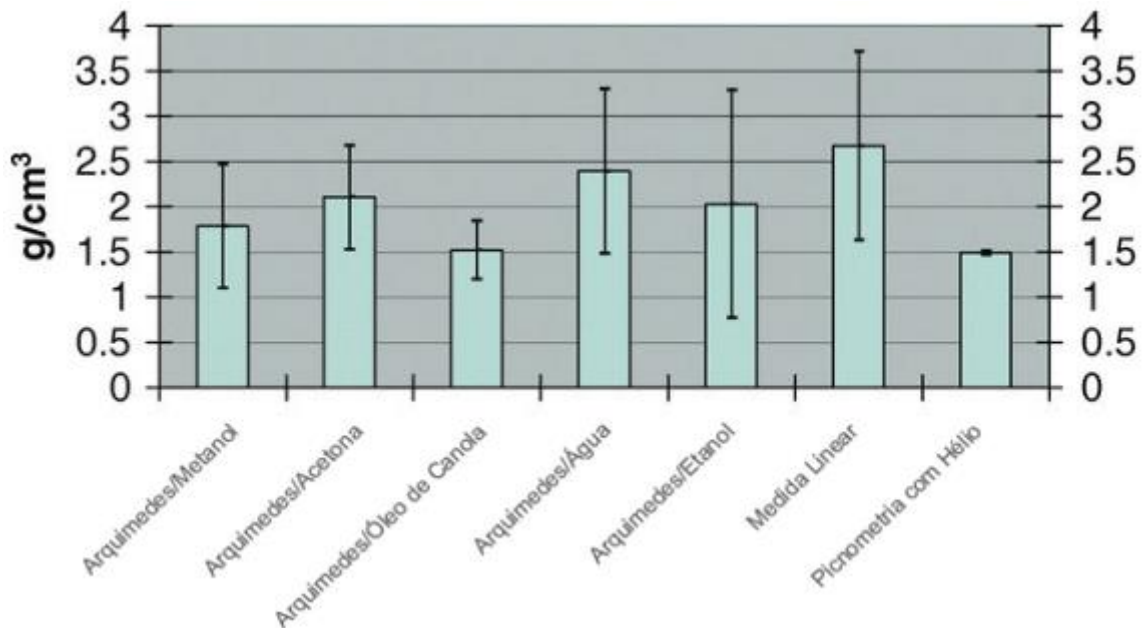


Figura 3: Densidade média e desvio padrão para diferentes métodos de medida de uma mesma amostra (adaptado de [11]).

O método de Picnometria com hélio é capaz de fornecer resultados de maior qualidade, devido ser o mais preciso de todos, apresentando resultados com alta repetibilidade e segurança na execução, pois este método não envolve substâncias perigosas. O método de Arquimedes com o uso de óleo de canola é um método simples, requer menor quantidade de tempo para ser realizado e barato para uso geral, apresentando resultados aceitáveis para a maioria das aplicações [11]. Os métodos que utilizam Picnometria com água têm a principal desvantagem de que não podem ser utilizados para a medição de materiais com densidade menor que o líquido utilizado [14].

2.4 Correlação digital de imagem (CDI)

Correlação digital de imagem (CDI), ou *digital image correlation* (DIC) em inglês, é uma técnica de medição sem contato desenvolvida por Sutton [16] e Bruck [17]. Os princípios fundamentais da técnica consistem na comparação de imagens obtidas, adquiridas em diferentes estados, uma antes da deformação e outra após a deformação, também podem ser designadas como imagem de referência (antes da deformação) e imagem deformada (após a deformação) [18].

Estas imagens podem ser captadas por uma câmara/CCD inserida numa montagem adequada e que permita a visualização da superfície sob análise. Por forma a ser possível realizar medições com esta técnica, o objeto deve apresentar na sua superfície padrões aleatórios de intensidade. Caso a textura natural não possua um padrão adequado à medição, a solução passa então pela aplicação de um *speckle* aleatório, que poderá ser aplicado artificialmente, através, por exemplo, de uma tinta que adira à superfície e se deforme com esta sem interferir com as propriedades mecânicas do material em estudo. A iluminação deve ser abundante, uniforme e constante [19] [20]. Na Figura 4 está representado um esquema da montagem experimental habitualmente usado nas medições com a técnica DIC-2D.

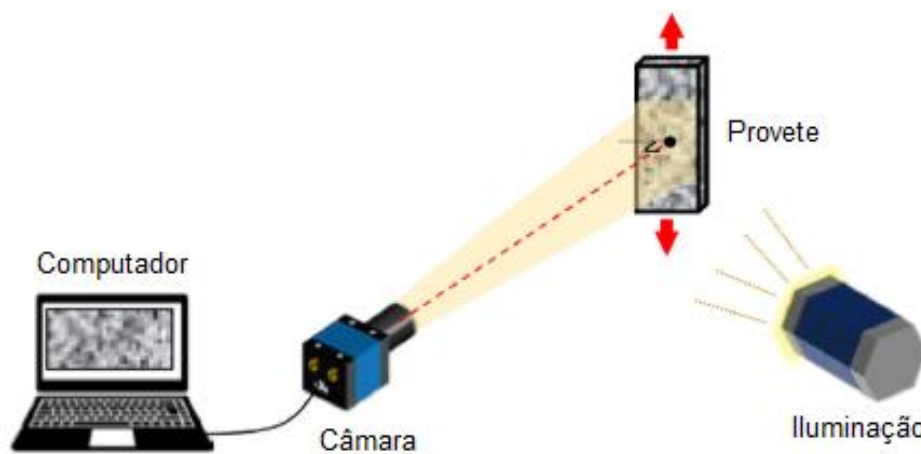


Figura 4: Esquema da montagem experimental típica para a técnica DIC-2D (adaptado de [20]).

Recolhidas as imagens necessárias, o objetivo do método passa por selecionar um ponto na imagem digital não deformada, e determinar a nova posição desse mesmo ponto nas imagens seguintes [21].

No entanto, realizar o processo de correlação com base na intensidade de um pixel não é possível, dado que, na imagem da configuração deformada, poderão existir centenas de pixels com a intensidade procurada, o que impossibilita correlacionar a localização de um pixel entre as várias imagens. Este fenómeno é denominado por problema de abertura (*The Aperture Problem*) [19] [21]. Além disso, esta abordagem só permite determinar deslocamentos superiores à dimensão do pixel.

Para ultrapassar este problema, em vez de se utilizar apenas um pixel de referência, utiliza-se uma vizinhança de $[m \times n]$ pixels em torno desse. Esta região é

normalmente denominada por *subset*, que devido à maior quantidade de pixels analisados e respetivo gradiente de intensidade aumenta a sua singularidade.

Porém, mesmo recorrendo-se à utilização de um *subset*, a correspondência na imagem deformada não é assegurada na presença de um padrão repetitivo ou na ausência de qualquer padrão speckle, este fenómeno é conhecido como Problema de Correspondência.

Percebe-se assim, a importância da aplicação de um padrão estocástico na superfície do corpo, caracterizando-se principalmente pela dimensão dos grãos, pela sua distribuição, isotropia, contraste, adesão, estabilidade e cobertura.



Figura 5: Exemplo de três padrões estocásticos diferentes [22].

Desta forma, toda a superfície possui informação suficiente para se realizar o processo de correspondência. A comparação entre *subsets* de intensidade é realizada com recurso à minimização ou maximização de uma função objetivo, representativa das similaridades entre *subsets*.

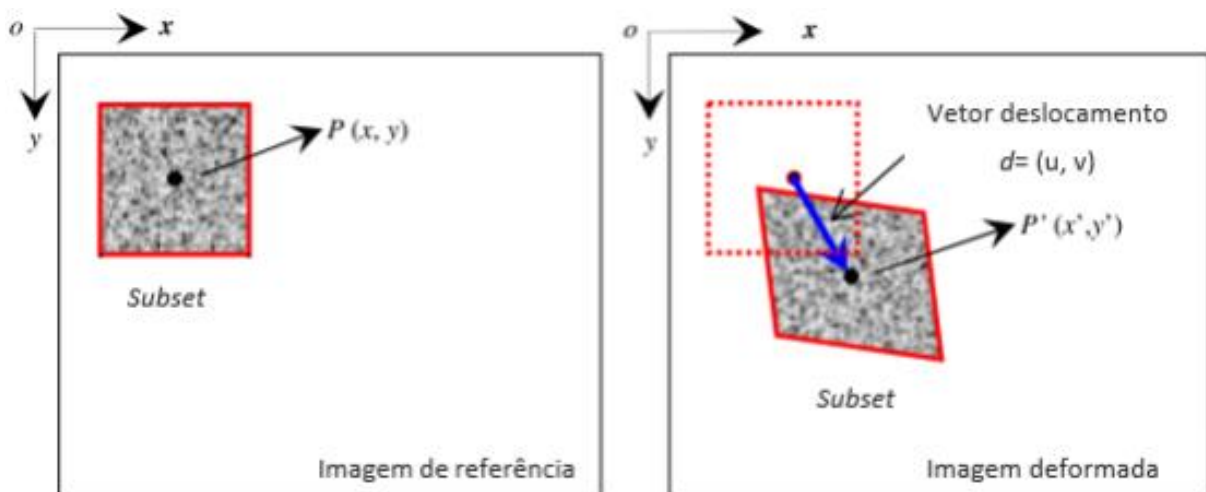


Figura 6: Representação da evolução das deformações no subset [19].

Atualmente, existem vários algoritmos baseados na comparação e identificação da distribuição de intensidades com maior similaridade entre *subsets* de imagens distintas. A evolução destes algoritmos conduziu a que atualmente sejam usados diferentes funções objetivo, das quais se destacam a *Sum of Squared Differences* (SSD), a *Normalized Cross Correlation* (NCC), a *Zero-Mean Sum of Squared Differences* (ZSSD), a *Normalized Sum of Squared Differences* (NSSD) e a *Zero-Mean Normalised Sum of Squared Differences* (ZNSSD), sendo esta última a mais utilizada pela sua elevada robustez. Estas funções são descritas pelas seguintes expressões [19] [21].

$$\chi^2 NCC: 1 - \frac{\sum F(x, y)G(x', y')}{\sqrt{\sum F(x, y)^2 \sum G(x', y')^2}} \quad (1)$$

$$\chi^2 SSD: \sum (F(x, y)^2 - G(x', y')^2) \quad (2)$$

$$\chi^2 ZSSD: \sum ((G(x', y')^2 - \bar{G}) - (F(x, y) - \bar{F}))^2 \quad (3)$$

$$\chi^2 NSSD: \sum \left(\frac{\sum F(x, y)G(x', y')}{\sum G(x', y')^2} G(x', y') - F(x, y) \right)^2 \quad (4)$$

$$\chi^2 ZNSSD: \sum \left(\left(\frac{\sum \bar{F} \bar{G}}{\sum \bar{G}^2} G(x', y') - \bar{G} \frac{\sum \bar{F} \bar{G}}{\sum \bar{G}^2} \right) - F(x, y) + \bar{F} \right)^2 \quad (5)$$

Onde $F(x, y)$ e $G(x', y')$ representam o campo de intensidades antes e após a deformação respectivamente, \bar{F} e \bar{G} correspondem ao respetivo valor médio. As coordenadas na imagem de referência (x, y) e no estado de deformação (x', y') estão relacionadas pelos parâmetros u e v , que representam a translação decorrida [19]:

$$x' = x + u \quad (6)$$

$$y' = y + v \quad (7)$$

A minimização ou maximização da função objetivo, χ , é alcançada quando existe uma boa correspondência entre os *subsets* das imagens entre dois estados do objeto. Contudo, quando um corpo está sujeito não só a uma translação, mas também a rotação, corte ou deformações internas, dificultam significativamente o processo de correlação. Para contornar esta dificuldade é permitido ao *subset*, inicialmente quadrado, sofrer distorções para melhor ser correlacionado com o padrão de intensidades referente ao estado deformado do objeto. Com base nestas distorções é possível determinar as deformações ocorridas na superfície do corpo, entre dois estados, sendo as deformações no plano definidas de acordo com as equações.

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (8)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (9)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (10)$$

A partir daí, o *software* compara as imagens e seus estados distintos, com base nas alterações ocorridas na superfície, e, por consequência, se determina os deslocamentos e deformações [21]. As possibilidades de utilização são muitas, sendo capaz de medir pequenas deformações em escala micro e nano, assim como elevados deslocamentos. De fato, a aplicação dessa técnica óptica sofreu uma expansão explosiva nas últimas três décadas, variando de metal regular ou materiais poliméricos a materiais compósitos e tecidos biológicos [20].

Tornou-se uma ferramenta popular e poderosa para medição de deformação em campo completo na comunidade de mecânica experimental, e é amplamente utilizada em vários setores. Além de suas capacidades de medição de campo inteiro e sem contato, as técnicas DIC oferecem vários recursos distintos quando comparada com outras técnicas de avaliação de deformação, como uma configuração experimental simples e barata, fácil implementação, ampla aplicabilidade com resoluções espaciais e temporais ajustáveis e robustez contra vibrações ambientais, bem como variações de luz ambiente [20] [23].

Em termos gerais, as técnicas de DIC podem ser divididas em três categorias principais, dependendo da sua aplicação. A técnica bidimensional (DIC-2D), um sistema que necessita apenas de uma câmera para aquisição de imagens, limitado à medição de deformações no plano e em superfícies com pequena curvatura. Se a superfície do objeto de teste não for plana ou se ocorrer deformação 3D após o carregamento, o método 2D-DIC não será mais aplicável. Sendo aplicada a técnica tridimensional (DIC-3D), também conhecido como estéreo-DIC, que normalmente utiliza duas câmeras sincronizadas, sendo possível também uma única câmera com um sistema de divisão de luz, ambos podem medir com precisão deformações no espaço, de superfícies planas e curvas. A outra técnica, conhecida como correlação digital de imagem volumétrica (VDIC), é uma evolução da técnica DIC-2D, permite efetuar medições de deslocamentos e deformações no interior de corpos opacos, como ossos, madeira, rocha e tecidos orgânicos, com a recolha de imagens internas do corpo ao longo de qualquer eixo [20].

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Método experimental para determinação da densidade de fibras naturais

3.1.2 Preparação das amostras

Para a determinação da densidade das fibras naturais foram utilizadas amostras de fibras de cânhamo, conforme representadas na Figura 7. Para melhor uniformidade dos testes a seleção das amostras foi feita nas mesmas condições de temperatura e humidade para todos os ensaios, com um peso mínimo de, aproximadamente, 0,5 g de fibras secas. Os ensaios foram realizados no laboratório de Processos Químicos da ESTIG-IPB em Bragança – Portugal.

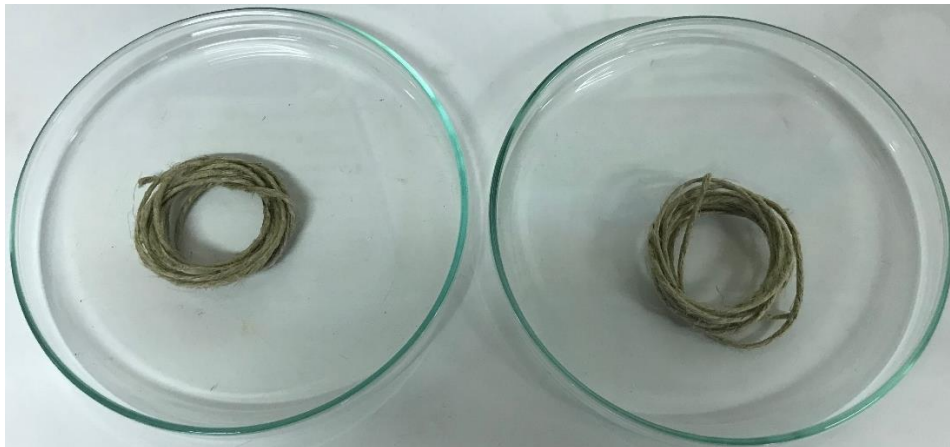


Figura 7. Amostra de fibras de cânhamo para teste de densidade.

3.1.3 Determinação da densidade da fibra pelo método do Picnômetro

Para a determinação da densidade da fibra de cânhamo o método escolhido foi o de Picnometria de água, devido à disponibilidade dos equipamentos nas instalações da ESTIG, com auxílio de um Picnômetro de 50 ml, uma balança analítica com precisão digital de 0,0001 da marca KERN&SOHN e modelo ABS 220-4N.

Afim de garantir as mesmas condições de temperatura e humidade para todos os ensaios, estes foram implementados em três etapas. A primeira etapa, consistiu na calibração do Picnômetro para verificar a sua correta massa, a segunda etapa, na estimativa do fator de correção das massas e teor de humidade contida na amostra,

a terceira etapa, na determinação da densidade relativa da fibra de cânhamo em relação à água por meio do método do Picnômetro.



Figura 8: Picnômetro para medida de densidade de sólidos.

Primeiramente, foi necessário realizar a calibração do Picnômetro para, deste modo, verificar o peso correto do Picnômetro vazio e Picnômetro com água destilada. Para tal procedimento, foi necessário medir a massa do Picnômetro vazio (m_2) previamente limpo e seco em estufa a 100°C e arrefecido no dessecador, a seguir, efetuou-se a medição da massa do Picnômetro cheio de água destilada (m_3), foram realizadas cinco medidas, o valor determinado foi a partir da média das cinco medidas feitas. Os valores calculados experimentalmente, estão dispostos na Tabela 1.

Tabela 1. Procedimento de calibração do Picnômetro

Amostra	m_2 (g)	m_3 (g)
1	26,7879	76,0925
2	26,8063	76,1026
3	26,8176	76,1122
4	26,8280	76,0975
5	26,8245	76,1015
Média (g)	26,8129	76,1013

Para determinar o Fator de correção (F_c), pesou-se numa balança analítica uma quantidade de amostra inicial, que foi levada à estufa a uma temperatura de 105°C por 48 horas, após esse procedimento, colocou-se a amostra seca num dessecador por alguns minutos para o arrefecimento e, posteriormente, realizou-se a pesagem da amostra seca.

Após o procedimento encontrou-se a relação entre a massa da amostra inicial sobre a massa da amostra seca em gramas. Para o cálculo do Fator de correção utilizou-se a seguinte Equação 11:

$$F_c = \frac{(\text{amostra inicial}/\text{amostra seca}) \times 100}{\text{amostra seca}} \quad (11)$$

Para a determinação da densidade relativa da fibra de cânhamo, o líquido utilizado como padrão foi a água destilada. O valor da densidade da água destilada (ρ_{H_2O}) foi obtido de acordo com a temperatura durante o ensaio, para isso, foram utilizados os valores de acordo com a Tabela 2.

Para tal procedimento, é necessário a determinação da massa das amostras de fibras seca que serão utilizadas (m_1). Após esse procedimento as fibras devem ser inseridas no picnômetro, deve ser adicionado água destilada no picnômetro até transbordar, secar a água que molha a superfície externa do mesmo e, em seguida, deve-se se medir o peso total, ou seja, a massa do picnômetro com água destilada e amostra de fibra seca (m_4).



Figura 9: Massa do picnômetro + água destilada + amostra de fibra seca.

A densidade das fibras (ρ_{fibra}) foi calculado utilizando a Equação 12. Para se obter uma maior precisão, foram analisadas quatro amostras seguindo o mesmo procedimento e em seguida os valores experimentais foram coletados utilizando *software* Excel, a partir dos dados experimentais foi calculado a média das quatro medidas feitas.

$$\rho_{fibra} = \frac{m_1}{\frac{(m_3 - m_2) - (m_4 - m_2 - m_1)}{\rho_{H2O}}} \quad (12)$$

Onde:

m_1 é a massa da amostra seca (g);

m_2 é a média de massa do picnômetro limpo e seco (g);

m_3 é a média de massa do picnômetro com água destilada (g);

m_4 é a massa do picnômetro com água destilada e amostra seca (g);

ρ_{H2O} é a densidade da água destilada.

Tabela 2. Densidade da água destilada de acordo com a temperatura (adaptado de [24]).

Temperatura (°C)	Densidade (g/cm ³)
15	0,9991
16	0,9989
17	0,9988
18	0,9986
19	0,9984
20	0,9982
21	0,9980
22	0,9978
23	0,9975
24	0,9973
25	0,9970

3.2 Método experimental para ensaio de tração em monofilamentos

3.2.1 Preparação das amostras

A metodologia utilizada no ensaio de tração das fibras de cânhamo baseou-se na norma ASTM C1557. Para melhor uniformidade dos testes a seleção das amostras utilizadas foram escolhidas com espessura e largura semelhantes.

Neste ensaio, a fibra é submetida a uma força de tração uniaxial ao longo do seu eixo, até à rotura. No decorrer do ensaio são registrados a força de tração e o deslocamento do travessão móvel da máquina.

Inicialmente, foram utilizados suportes de papel como demonstrado na Figura 10, o suporte estava causando o deslizamento das fibras no sistema de fixação e, conseqüentemente, provocando leituras equivocadas dos dados experimentais. Como tentativa de solução para o problema, as fibras foram montadas no sistema de fixação sem a utilização do suporte, porém, as fibras eram danificadas nas garras do equipamento e o deslizamento das fibras ainda era um problema constante.

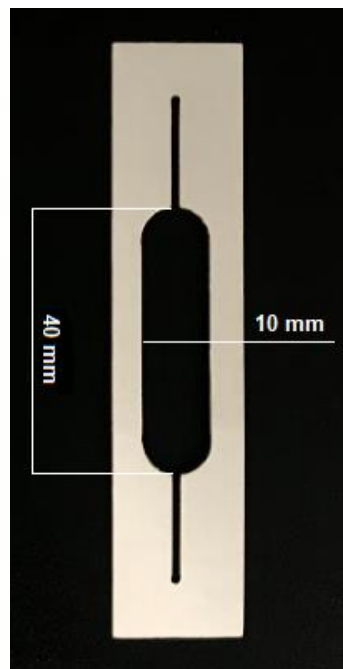


Figura 10: Suporte de acordo com a ASTM C1557.

Dessa maneira, a solução encontrada foi a utilização de um apoio de placas metálicas, revestido com uma lixa de papel para melhor fixação das fibras, por forma a que os ensaios possam realizar-se sem que as fibras sejam prematuramente

danificadas, como sugerido por Ribeiro et. Al [25]. Após as mudanças realizadas no sistema de fixação, o deslizamento das fibras foi reduzido consideravelmente e foram obtidos melhores resultados. Para os ensaios foram utilizados 3 lotes de amostras, sendo 5 amostras para cada comprimento, sendo, 40 mm, 50 mm e 60 mm para cada tipo de fibra ensaiado.

A medida da área das fibras foi realizada com a utilização de um paquímetro, devido a variabilidade de dimensões e geometria que ocorre ao longo de cada fibra, foram realizadas três medições (extremidades e centro) de espessura para cada uma das amostras, o valor médio foi utilizado para a determinação da área da secção transversal da fibra. É importante ressaltar que este método de medição da área não é o adequado devido à precisão do equipamento, para além disso, também não considerar as imperfeições no interior. As fibras possuem espessuras variáveis e diâmetros inconstantes, e podem conter fibras de pequena dimensão aderentes à superfície das mesmas.

3.2.2 Ensaio de tração de monofilamentos

Os testes foram realizados utilizando uma máquina de ensaio universal modelo Shimadzu Autograph AGS-X 10KN. De acordo com a norma ASTM C1557 a amostra tem que sofrer a rotura dentro de 30 segundos, portanto, a velocidade de ensaio avaliado pelo movimento do travessão móvel foi de 5 mm/min. Foi realizado uma pré-carga de 1N para todos os ensaios e foram armazenadas os valores de força e deslocamento. Os ensaios foram realizados no laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais da ESTIG-IPB em Bragança – Portugal. A montagem do ensaio pode ser vista na Figura 11. A Figura 11 A mostra a montagem da fibra de cânhamo antes do início do ensaio e a Figura 11 B apresenta a montagem após a realização do ensaio e ruptura da fibra.

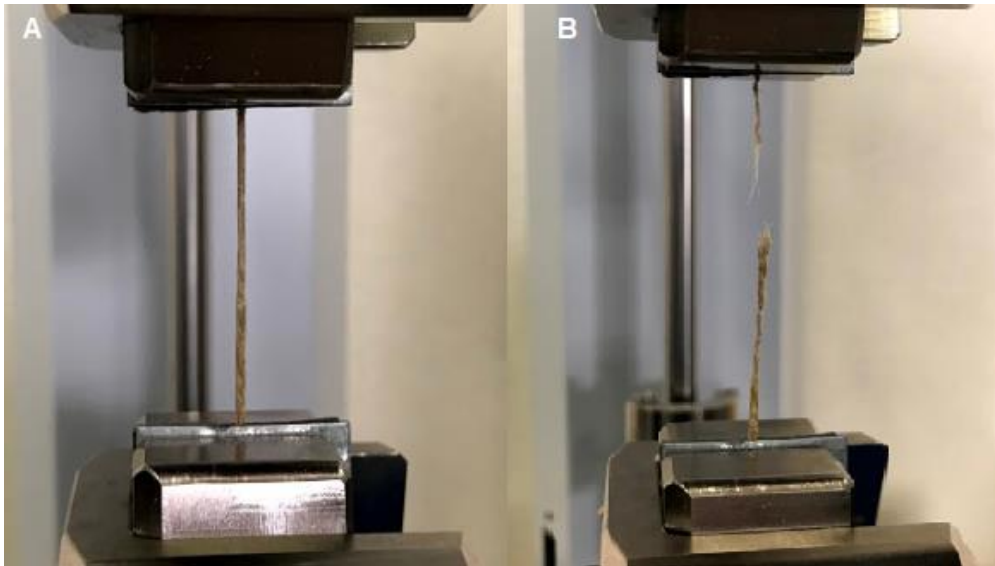


Figura 11: Ensaio de tração para fibras de cânhamo. A) Montagem antes do início do ensaio. B) Montagem após a ruptura da fibra.

3.2.3 Determinação da resistência à tração

Para a determinação da resistência à tração de cada fibra, foi utilizado a Equação 13, onde é dividido o valor da força máxima obtida durante o ensaio mecânico pela área da seção transversal da amostra.

$$\sigma_t = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A} \quad (13)$$

Onde:

σ_t = resistência à tração, [Pa],

$F_{m\acute{a}x}$ = força máxima obtida pelo material durante o ensaio mecânico, [N],

A = área de seção transversal da amostra, [m²].

3.2.4 Determinação do módulo de elasticidade

Para a determinação do módulo de elasticidade das fibras, utilizaram-se os dados dos ensaios realizados para determinação do limite de resistência à tração. Todos os testes foram feitos de acordo com a norma ASTM C1577. Segundo a norma, os ensaios podem ser feitos sem a utilização de um extensômetro, para isso deve-se

analisar a deformação das fibras considerando a complacência do sistema (*System Compliance*).

A complacência do sistema deve ser determinada experimentalmente para uma determinada máquina de ensaio, sistema de fixação e tipo de fibra. Para a determinação da complacência do sistema as fibras utilizadas deveriam ser testadas com, pelo menos, três valores de comprimento (l_0). Conforme indicado na secção 3.2.3, foram utilizados comprimentos de 40mm, 50 mm e 60 mm, e, a área das fibras foi determinada através da média das espessuras.

Para a determinação do módulo de elasticidade foi determinado o inverso da inclinação ($\Delta L/F$) para o gráfico de força [N] por deslocamento [m] para cada amostra. Em seguida, foi encontrado a reta que descreve o comportamento do gráfico ($\Delta L/F$) por l_0/A . Para o gráfico $\Delta L/F$ por l_0/A a intersecção com o eixo $\Delta L/F$ é a complacência do sistema e o inverso da inclinação da reta é o módulo de elasticidade (E) das fibras. Uma representação do comportamento esperado para a curva $\Delta L/F$ por l_0/A pode ser visto na Figura 12.

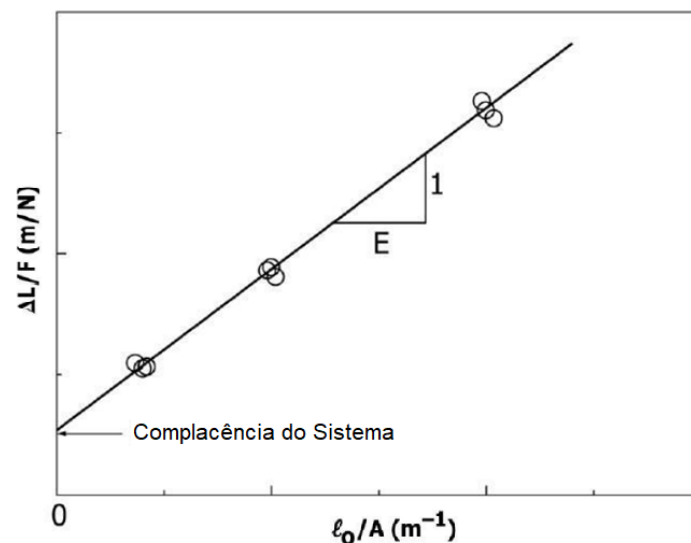


Figura 12: Representação teórica do comportamento do gráfico para a determinação do módulo de elasticidade e complacência do sistema [26].

Foram utilizados três comprimentos diferentes (40 mm, 50 mm e 60 mm) e cada um dos comprimentos com cinco corpos de prova, totalizando 15 ensaios. Sendo assim, pode-se realizar o procedimento descrito acima individualmente para todas as

amostras juntas, resultando em um valor de módulo de elasticidade e complacência do sistema com um valor médio para as 15 amostras.

3.3 Método experimental para ensaio de tração da Resina de Poliéster

3.3.1 Geometria e dimensão dos provetes

Para a obtenção dos provetes para os testes de tração, as dimensões e a geometria das amostras foram escolhidas de acordo com a norma BS 2782 [27], conforme visto na Figura 13.

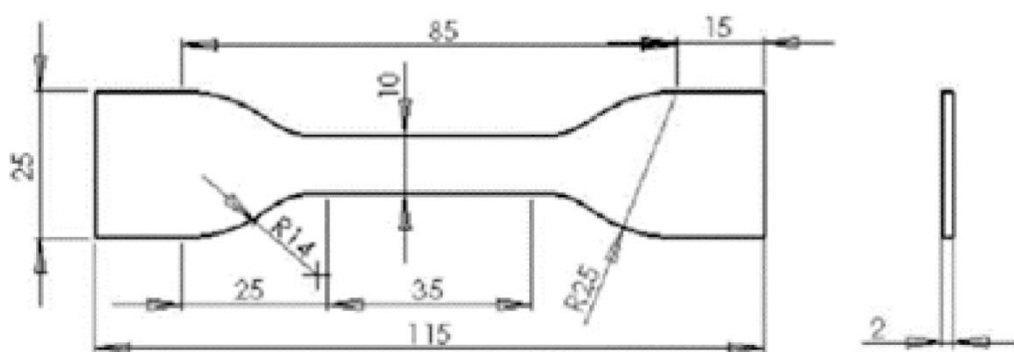


Figura 13: Geometria e dimensões (em mm) da amostra [27].

3.3.2 Preparação das amostras

Os ensaios experimentais foram realizados de acordo com a norma BS 2782 [27]. A preparação dos provetes para o ensaio de tração envolveu o fabrico de moldes metálicos (liga de alumínio 6082) sobre os quais se vazou, posteriormente, a resina de poliéster em estado líquido. A maquinagem dos moldes foi efetuada no laboratório de Tecnologia Mecânica da ESTIG-IPB em Bragança – Portugal. Na Figura 14 podem ser vistos os moldes prontos para serem utilizados.



Figura 14: Molde para fabricação de provetes.

Inicialmente, colocou-se uma camada de desmoldante nos moldes, de forma a auxiliar a extração final dos provetes dos respectivos moldes. A resina poliéster pré-processada e o agente de cura foram misturados com auxílio uma espátula por, aproximadamente, 2 minutos, sendo (98,5% de resina com 1,5% de catalisador). O recipiente com a mistura foi colocado num dessecador que se encontrava conectado a uma bomba de vácuo para remover todas as bolhas de ar existentes. Esta mistura foi, depois, vertida nos moldes. Os provetes foram curados à temperatura ambiente (valor médio de 19°C), sendo desmoldados 24 horas depois da resina ter sido vertida no molde.

Foram produzidos 5 provetes para ser realizado o ensaio de tração, na Figura 15 é possível observar alguns dos provetes fabricados.



Figura 15: Provetes de Resina Poliéster.

3.3.3 Parâmetros de Ensaio

Os testes foram realizados utilizando uma máquina de ensaio universal modelo Shimadzu Autograph AGS-X 10kN. A velocidade de ensaio, avaliados pelo movimento do travessão móvel foi de 5 mm/min. Para todos os ensaios foi realizado uma pré-carga de 5N e foram medidos força e deslocamento.

Após a montagem da amostra na máquina de tração, foi verificado o alinhamento da amostra relativamente à direção do teste e se não ocorria escorregamento entre a superfície da amostra e a superfície de contato das garras. Os ensaios foram realizados no laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais da ESTIG-IPB em Bragança – Portugal. A montagem do ensaio pode ser vista na Figura 16.



Figura 16: Ensaio de tração para o provete de Resina Poliéster.

3.4 Método experimental para fabricação do compósito

3.4.1 Preparação das amostras

O fabrico das placas de compósito foi realizado de acordo com o método descrito por Rocha *et al.* [28]. Para a preparação da placa compósita, primeiramente, colocou-se uma camada de desmoldante numa placa de aço ($200 \times 150 \times 2 \text{ mm}^2$), de forma a auxiliar a extração final do compósito da placa, em seguida, com o auxílio de um torno mecânico a mesma foi fixada na bucha ajustando o eixo a uma rotação muito lenta enquanto as fibras de cânhamo estavam sendo enroladas em torno da placa, conforme representadas na Figura 17. Durante o processo, foi garantido que as fibras estivessem próximas e alinhadas em uma única direção.

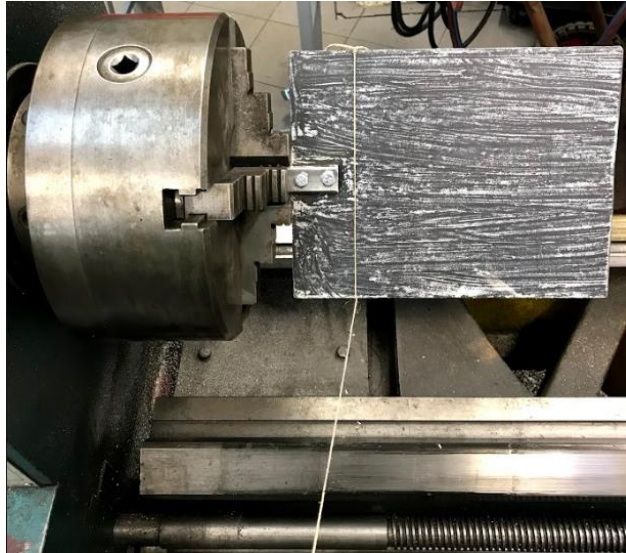


Figura 17: Fixação da placa em um mandril.

Posteriormente, a placa metálica com as fibras foi imersa na resina poliéster (98,5% de resina com 1,5% de catalisador) durante, aproximadamente, 1 minuto, enquanto não polimerizada foi colocada em um molde de duas partes. Este molde foi colocado numa prensa sob pressão, à temperatura ambiente, conforme representando na Figura 18.



Figura 18: Prensagem do compósito.

Após 24 horas de polimerização na prensa, o compósito foi removido do molde, como pode ser visto na Figura 19, em seguida, a placa metálica foi retirada do meio do compósito com auxílio de uma rebarbadora. Ao cortar o conjunto de compósitos pelo mesmo plano de direção das fibras, foi possível obter duas placas de compósito.

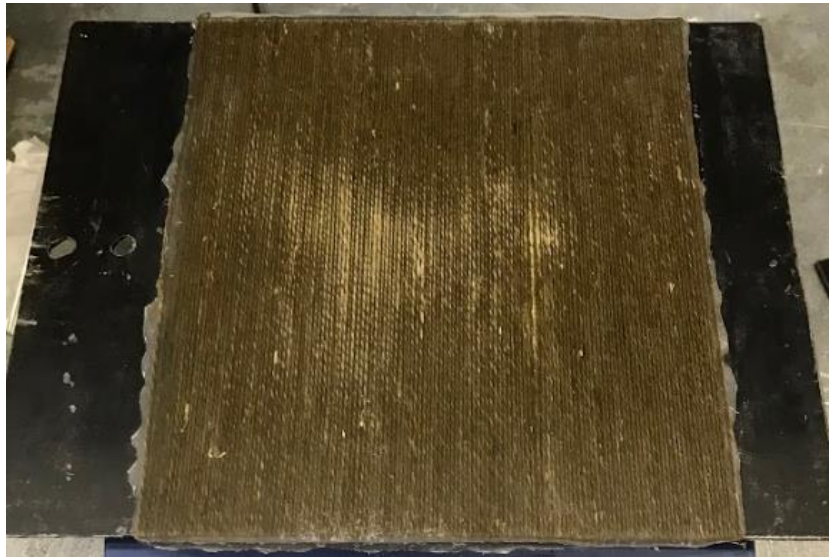


Figura 19: Placa metálica com o compósito.

3.4.2 Geometria e dimensão dos provetes

As dimensões e a geometria dos provetes foram escolhidos de acordo com a norma ASTM D 3039M. A preparação dos provetes realizou-se após um tempo de cura de 72 horas, desta forma, tem-se a garantia de que a resina ficou totalmente curada.

Para se obter um corte preciso da amostra do compósito, foi necessário a utilização de um sistema de laser (X252 da GCC), conforme visto na Figura 20.



Figura 20: Máquina de corte a laser utilizada – X252 da GCC.

Foram produzidos 10 provetes para cada orientação, sendo orientadas axialmente (0°) e a 90° com o comprimento (eixo axial) dos provetes, e, orientadas a 45° com o eixo axial dos provetes. Na Figura 21, é possível observar alguns exemplos usados para os testes de tração com as orientações indicadas.

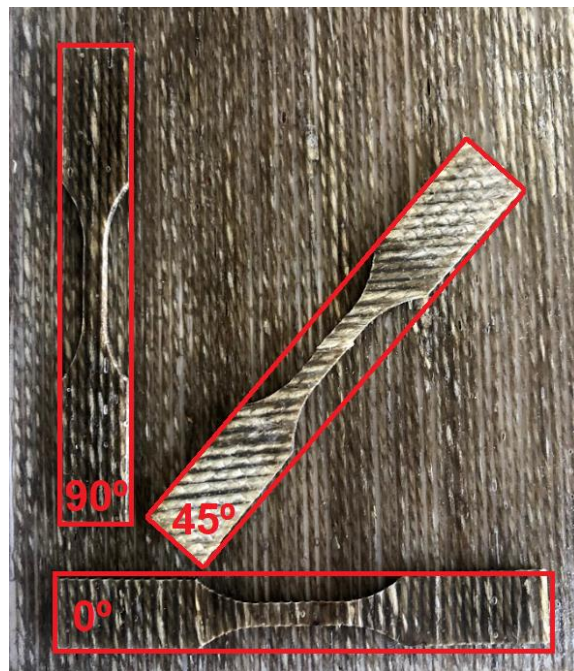


Figura 21: Provetes com as orientações indicadas.

3.4.3 Parâmetros de Ensaio

O ensaio de tração foi realizado utilizando uma máquina de ensaio universal modelo Shimadzu Autograph AGS-X 10KN, conforme visto na Figura 22, no laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais da ESTIG-IPB em Bragança – Portugal, segundo a norma ASTM D 3039M. A velocidade padrão sugerida pela norma para testes onde a velocidade do travessão é constante a uma taxa de deslocamento padrão, é de 2 mm/min. A velocidade de ensaio utilizada, avaliados pelo movimento do travessão móvel foi de 1 mm/min.

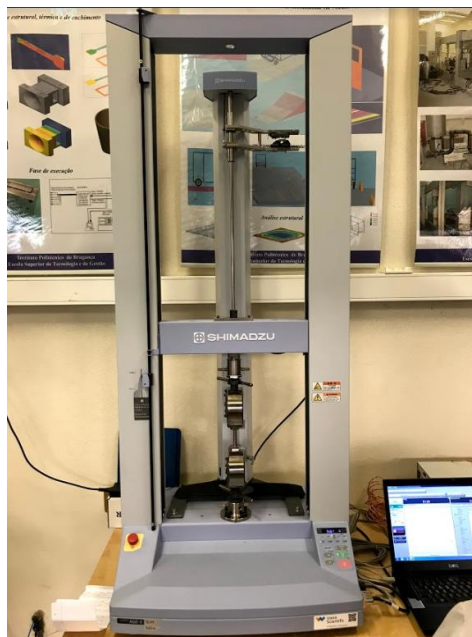


Figura 22: Equipamento utilizado no teste de tração - Shimadzu Autograph AGS-X 10KN.

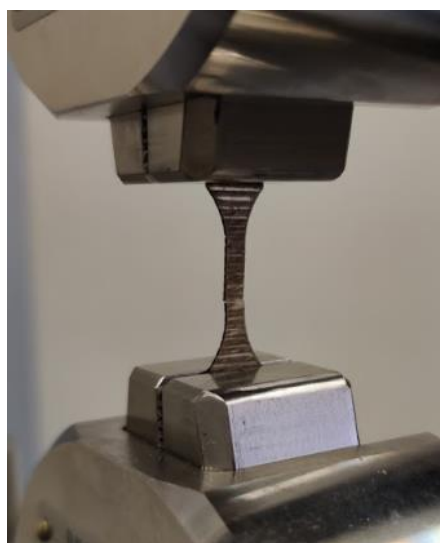


Figura 23: Amostra na garra do equipamento de ensaio de tração.

3.4.4 Determinação da fração de volume da fibra

No modelo teórico, o aumento do volume das fibras em compósitos poliméricos, levará ao aumento da propriedade de resistência à tração desses materiais, ou seja, há uma relação proporcional. Mas do ponto de vista experimental, o aumento da fração de volume (v_f) das fibras num compósito pode deteriorar as suas propriedades, ou seja, comprometendo as propriedades mecânicas do compósito final. Além disso, a literatura reporta, em muitos estudos, que na fração de volume acima de 50%, as fibras tendem a agregar-se no compósito, enfraquecendo a região de interface fibra/matriz. Para cada tipo de fibra, existe um valor de fração de volume ideal, que está diretamente relacionado com a natureza das fibras naturais e suas características em termos de resistência, adesão interfacial, propriedade física, etc. Para a fibra de cânhamo, a fração de volume ideal é em torno de 40-50%, capaz de proporcionar propriedades de resistência à tração satisfatórias [29].

Conforme visto, pode-se variar a fração de volume da fibra dependendo das suas características individuais, assim, a fração volumétrica de fibra de cânhamo utilizado neste trabalho, foi determinada usando a seguinte Equação 14 [30].

$$v_f = \frac{d_m \cdot p_f}{d_f \cdot p_f + d_m \cdot p_f} \quad (14)$$

Onde:

v_f = fração de volume a ser determinada (%)

p_f e d_f = peso (g) e a densidade da fibra (g/cm^3), respectivamente

d_m = peso (g) e a densidade da matriz (g/cm^3).

3.5 Procedimento experimental para Correlação Digital de Imagem

O procedimento experimental para a implementação desta técnica divide-se, essencialmente, em três tarefas principais: a preparação dos provetes, a aquisição de dados e a análise de resultados.

3.5.1 Preparação dos provetes

Para a preparação dos provetes para Correlação Digital de Imagem foi escolhido a técnica de pulverização de tinta spray, sendo, provavelmente, o processo mais utilizado para aplicar um padrão estocástico devido à sua simplicidade, baixo custo e rapidez de aplicação.

As tintas spray selecionadas foram uma branca e preta, ambas com acabamento mate, para minimizar o reflexo da iluminação.

Inicialmente, aplicou-se sobre a superfície dos provetes uma fina camada de tinta branca, após a tinta secar, foi criado um *speckle* com pontos pretos efetuando a aplicação de tinta em spray preta colocada a uma distância considerável do provete, por forma a garantir uma distribuição mais uniforme possível. O resultado do processo está presente na Figura 24.



Figura 24: Provetes para correlação digital de imagem.

3.5.2 Aquisição de dados

O sistema desenvolvido para técnica DIC apresenta uma configuração compacta e portátil. Este é constituído apenas por alguns elementos, os quais, foram citados anteriormente na secção 2.4. Na Figura 25 é apresentada uma perspectiva global do sistema e da máquina de tração universal Shimadzu, utilizados na realização dos ensaios de tração dos provetes.



Figura 25: Sistema utilizado na realização dos ensaios.

Para a aquisição de dados durante a realização dos ensaios de tração, o método utilizado para a obtenção da sequência de imagens foi a da realização de um vídeo. Os ensaios foram filmados por uma câmara fotográfica CanEOS EOS 7D de 18 Megapixel com uma lente de 17-55 mm. A taxa de aquisição de imagens foi de 1500 frames por minuto.

3.5.3 Análise de resultados

Após os ensaios, foi necessário realizar o pós-processamento das imagens e dos sinais adquiridos, de modo a poderem ser processadas pelo programa de correlação digital de imagem.

Atualmente, existem empresas que disponibilizam programas comerciais, como *Avizo®*, *Correlated Solutions®*, *GOM®*, *CorreliSTC®*, *Image Systems®*, *Imetrum®*, *LaVision®*, *MatchID®*, *EikoSim®*, entre outras.

O software escolhido para a análise de dados foi o *GOM Correlate 2D*, da empresa *GOM®*, devido a mesma ter disponível uma versão gratuita para correlação

digital de imagem, o qual somente permite determinar o campo de deslocamentos e de deformação no plano (DIC-2D).

3.5.4 Sincronização de dados

Durantes os ensaios, a máquina de tração universal Shimadzu registra, sensivelmente, 3 entradas a cada 0,01 segundo de parâmetros como: tempo, força, deslocamento.

Com o *software* GOM foram obtidos os seguintes parâmetros: tempo e deslocamento. Sendo que, através do vídeo realizado para a obtenção das sequências de imagens, se obtém a captura de imagem de 0,04 em 0,04 segundos.

Durante os ensaios, os dados obtidos em comum entre o *software* e a máquina de tração são valores de tempo e deslocamento. A máquina de ensaio de tração registra os dados de 0,01 em 0,01 segundo, sendo que para um ensaio de um minuto, a máquina registra cerca de 6000 dados por parâmetro. Com o *software* é possível obter a captura de vídeo com extração de 1 frame de 0,04 em 0,04 segundo, registrando assim 1500 dados por minuto.

Apesar de ser indicado que a gravação de dados do ensaio e a captura de imagens devem ser iniciadas ao mesmo tempo, não foi possível realizar, simultaneamente, o início do ensaio e a gravação, devido ao atraso entre o iniciar da ação e a escrita de dados pelo computador.

Para facilitar o tratamento e compreensão dos dados obtidos, primeiramente, é criado um gráfico de dispersão entre os dados em comum (tempo x deslocamento), afim de sincronizar e eliminar o atraso do início da ação de gravação do vídeo com o início do ensaio na máquina de tração. Após o pareamento dos dados de (tempo x deslocamento), criou-se uma função no Excel que extrai os dados da máquina e interpola os valores de deslocamento da garra máquina em um tempo estipulado pelo utilizador, nesse caso inicia nos zeros e incrementa de 0,04 em 0,04 segundos, sendo o tempo de captura de vídeo obtida pelo *software*. Com esta função, pretende-se facilitar o procedimento experimental e o tratamento dos resultados, obtendo a melhor aproximação possível.

Por fim, com a sincronização dos valores de força, obtêm-se os gráficos de (força x deslocamento) para cada provete.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização da fibra de cânhamo

4.1.2 Densidade da fibra pelo método do Picnômetro

Os dados experimentais foram tratados conforme indicado na secção 3.2.1.

O valor para determinação do Fator de correção (F_c), conforme indicado na Equação 11, possibilitou estimar o teor de humidade contido na amostra, 6.52%.

Paralelo a essa etapa, realizou-se as pesagens das cinco amostras, sendo, massa de fibra seca (m_1), do picnômetro vazio (m_2), do picnômetro + água destilada (m_3) e do picnômetro + água destilada + amostra seca (m_4), foram mensuradas e reportadas na Tabela 3.

Tabela 3. Massa da fibra seca, picnômetro vazio, picnômetro + água e picnômetro + água + fibra, todas em gramas (g).

Amostra	Fibra seca (m_1)	Picnômetro vazio (m_2)	Picnômetro + água (m_3)	Picnômetro + água + fibra (m_4)
	g	g	g	g
1	0,6495	26,8129	76,1013	76,2968
2	0,6025	26,8129	76,1013	76,2680
3	0,6601	26,8129	76,1013	76,3028
4	0,8205	26,8129	76,1013	76,3800
Média	0,6832	26,8129	76,1013	76,3119
DP*	0,0949	0	0	0,0479

Nota *: Desvio Padrão

Para cada amostra em análise foi calculado algebricamente, de acordo com a Equação 12, a densidade real da fibra de cânhamo em relação à água. Logo as seguintes densidades foram estimadas, como pode ser observado na Figura 26.

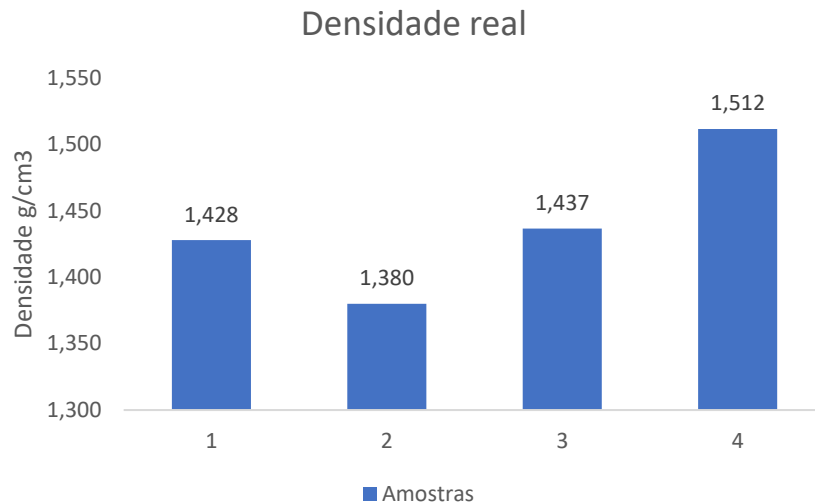


Figura 26 - Densidade real das amostras analisadas.

- ✓ Avaliando todas as amostras estudadas o valor de densidade relativa da fibra de cânhamo encontrado é de aproximadamente $1,439 \text{ g/cm}^3$, como observado na Figura 27.

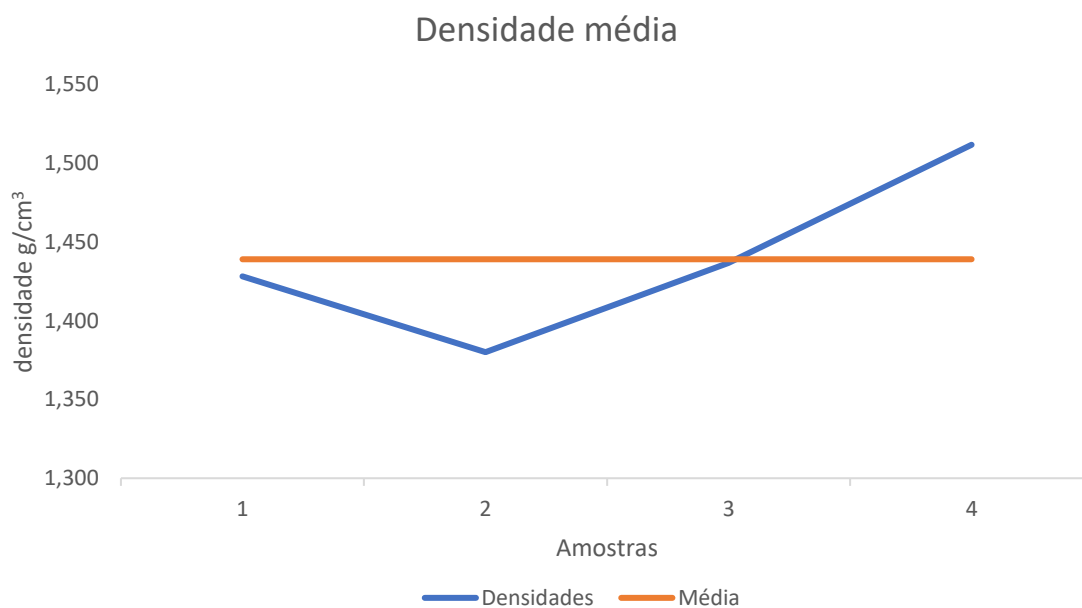


Figura 27 - Densidade média das amostras analisadas.

O valor de densidade estimado está de acordo com os valores mencionados na literatura, podendo variar de $1,14 \text{ g/cm}^3$ a $1,50 \text{ g/cm}^3$ [31].

4.1.3 Determinação da resistência à tração de monofilamentos

A Tabela 4 resume os valores dos diâmetros medidos ao longo do comprimento de cada fibra, sendo utilizado o valor médio para determinação da área transversal de cada fibra, conforme indicado na secção 3.2.1.

Tabela 4: Diâmetros das fibras de cânhamos ensaiadas medidos ao longo do seu comprimento.

Comprimento do filamento [mm]	Nº Provete	Diâmetro 1 [mm]	Diâmetro 2 [mm]	Diâmetro 3 [mm]	Média [mm]
40 mm	1_40	0,90	0,85	0,90	0,88
	2_40	0,70	0,80	0,85	0,78
	3_40	0,90	0,75	0,80	0,82
	4_40	0,90	0,95	1,00	0,95
	5_40	0,85	0,95	0,95	0,92
Média ± Desvio Padrão					0,87 ± 0,069
50 mm	1_50	0,88	0,78	0,75	0,80
	2_50	1,01	0,89	0,75	0,88
	3_50	1,02	0,95	0,84	0,94
	4_50	0,99	0,89	0,95	0,94
	5_50	1,01	0,98	0,99	0,99
Média ± Desvio Padrão					0,91 ± 0,072
60 mm	1_60	0,89	0,78	0,81	0,83
	2_60	0,78	0,82	0,85	0,82
	3_60	0,90	1,01	1,02	0,97
	4_60	0,85	0,90	0,75	0,83
	5_60	0,80	0,75	0,80	0,78
Média ± Desvio Padrão					0,85 ± 0,073

Quando representados graficamente, o conjunto de valores de força e deslocamentos medidos durante o ensaio apresentam o aspecto típico representando nas Figuras 28, 29 e 30, respectivamente, para fibras de cânhamo com comprimento de 40mm, 50 mm e 60 mm.

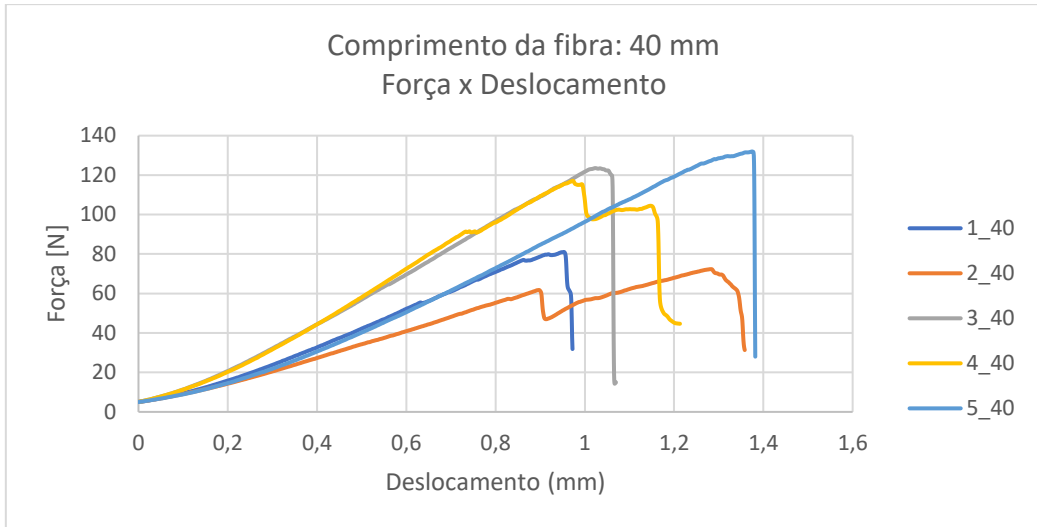


Figura 28: Curva força x deslocamento dos monofilamentos de 40 mm.

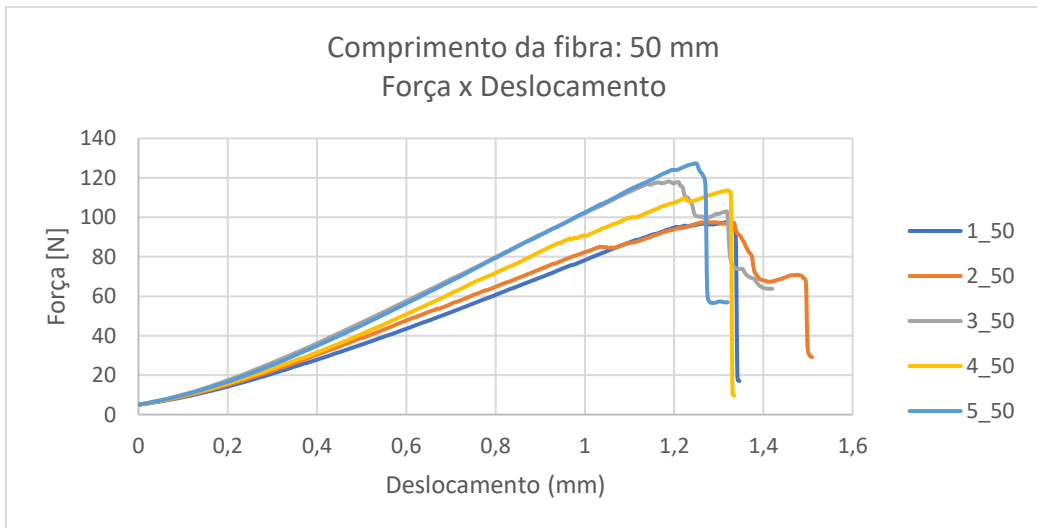


Figura 29: Curva força x deslocamento dos monofilamentos de 50 mm.

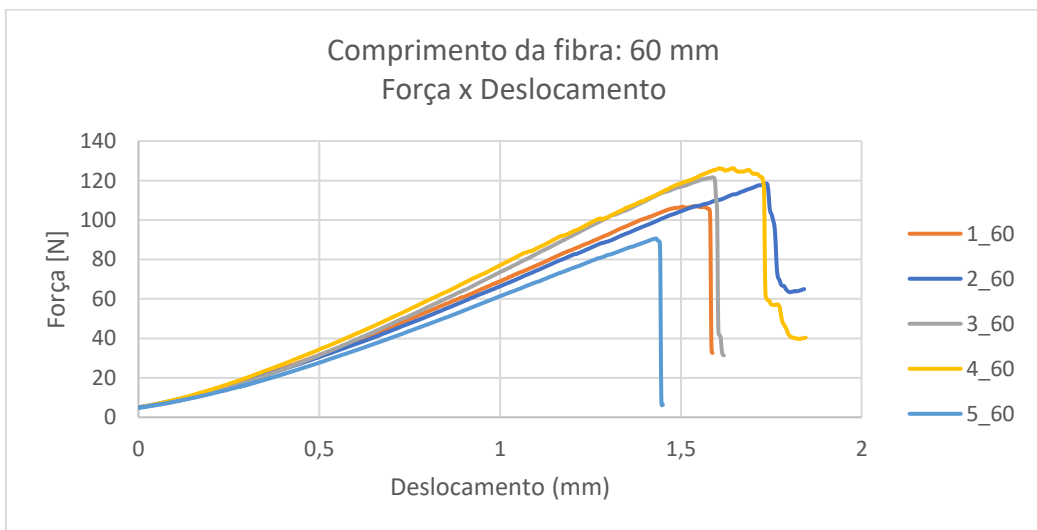


Figura 30: Curva força x deslocamento dos monofilamentos de 60 mm.

No início do ensaio, em ambas as curvas, verifica-se que a força suportada pela fibra varia de uma forma não linear com o deslocamento. Este comportamento inicial deve-se ao facto da fibra não estar perfeitamente alinhada.

A Tabela 5 apresenta o valor médio e desvio padrão da resistência à tração das fibras de cânhamo.

Tabela 5: Tensão de rotura das fibras de cânhamo.

Comprimento do filamento [mm]	Nº Provete	F _r [N]	ΔL _r [mm]	σ _r [MPa]
40 mm	1_40	81,04	0,9533	133,24
	2_40	72,33	1,2834	151,38
	3_40	123,55	1,0233	233,95
	4_40	117,11	0,9733	165,21
	5_40	131,96	1,3751	198,51
50 mm	1_50	97,90	1,3225	194,77
	2_50	97,69	1,2759	160,62
	3_50	118,19	1,1883	170,31
	4_60	113,60	1,3200	163,69
	5_60	127,36	1,2484	165,45
60 mm	1_60	107,11	1,5442	197,97
	2_60	118,52	1,7366	224,43
	3_60	121,66	1,5874	164,63
	4_60	126,28	1,6450	233,40
	5_60	90,62	1,4308	189,65
Valor Médio		109,66	1,3272	183,15
Desvio Padrão		17,95	0,2366	30,44
Valor mínimo		72,33	0,9533	133,24
Valor máximo		131,96	1,7366	233,95

Da análise dos valores apresentados na Tabela 5 pode concluir-se que:

- ✓ considerando todas as amostras analisadas o valor médio do limite de resistência à tração foi de 183,15 ± 30,44 MPa.

Este resultado é bastante inferior aos valores relatados na literatura para a resistência à ruptura das fibras de cânhamo, podendo variar entre 270 MPa e 1040 MPa [1].

Existem alguns fatores que podem influenciar os valores das propriedades mecânicas, determinadas experimentalmente, que devem ser levados em consideração, tais como:

- o valor elevado do desvio padrão confirma a grande variabilidade de propriedades físicas e mecânicas das fibras vegetais;

- apesar dos ajustes realizados, durante o ensaio verificou-se existir um pequeno escorregamento das amostras em relação às amarras, devido às dimensões reduzidas dos monofilamentos.

- durante a realização dos ensaios de tração não foi utilizado um extensômetro, e, por isso, o deslocamento medido é o deslocamento do travessão móvel da máquina de ensaios. Desta forma, a rigidez do sistema de tração pode influenciar os resultados obtidos.

- o procedimento para a medição de diâmetro utilizada neste trabalho, foi feito com um paquímetro, que não é a técnica que garanta uma precisão elevada.

- observando o comportamento das fibras durante o ensaio e as seções rompidas, notou-se que muitas fibras desfibrilavam durante o ensaio, isso causou uma redução da seção resistente considerada inicialmente.

- a fibra utilizada é produzida por método de fiação, esses fios tendem a ser altamente torcidos, o que leva ao desalinhamento das fibras devido às trajetórias helicoidais em torno do eixo do fio.

4.1.4 Determinação do módulo de elasticidade

Como já foi referido anteriormente, o cálculo do módulo de elasticidade necessita da determinação da complacência do sistema. O gráfico utilizado para a determinação do módulo de elasticidade das 15 amostras pode ser visto na Figura 31, o inverso da inclinação da reta fornece o módulo de elasticidade e a intersecção com o eixo $\Delta L/F$ fornece a complacência do sistema.

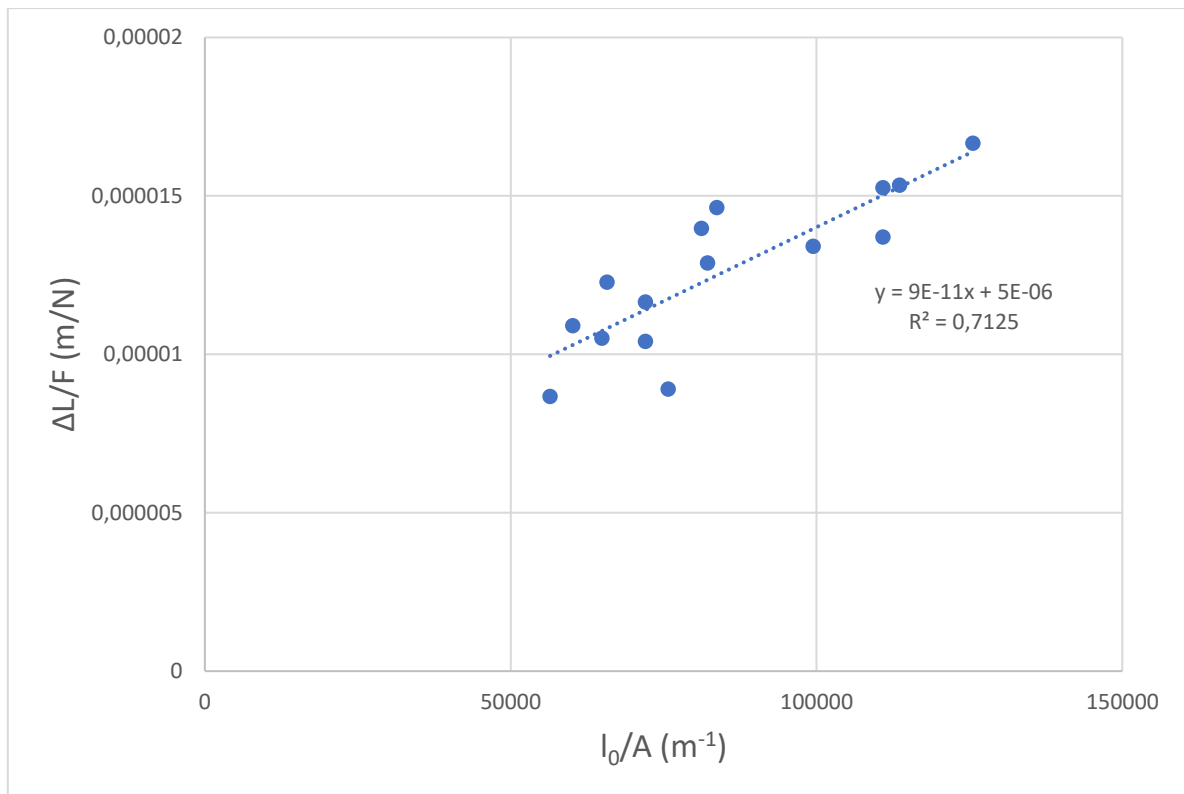


Figura 31: Resultado experimental para determinação do módulo de elasticidade e complacência do sistema.

- ✓ Para as amostras analisadas o valor médio do módulo de elasticidade foi de 11,1 GPa, o valor da complacência do sistema foi determinado com a norma ASTM C1557, para as amostras o valor médio foi de $5,0 \times 10^{-6}$ m/N.

Com base no valor apresentado pode concluir-se que:

- o valor do módulo elasticidade das fibras são inferiores aos encontrados na bibliografia consultada, variando de 20 GPa a 70 GPa [1]. Este facto pode ser, de novo, justificado pela grande variabilidade das fibras vegetais, que depende de fatores tais como a região de cultivo, condições climáticas, grau de maturidade da planta e processos de extração das fibras do caule.

- a utilização dos valores de área média, determinados a partir da técnica de medição utilizada, conduziram sempre a diferenças no módulo de elasticidade que podem ser consideradas significativas.

4.2 Caracterização da Resina Poliéster

Os dados experimentais foram tratados conforme indicado na secção 3.3.

Inicialmente foram realizados ensaios mecânicos no polímero utilizado como matriz. A Figura 32 mostra um gráfico de força deslocamento da resina utilizada.

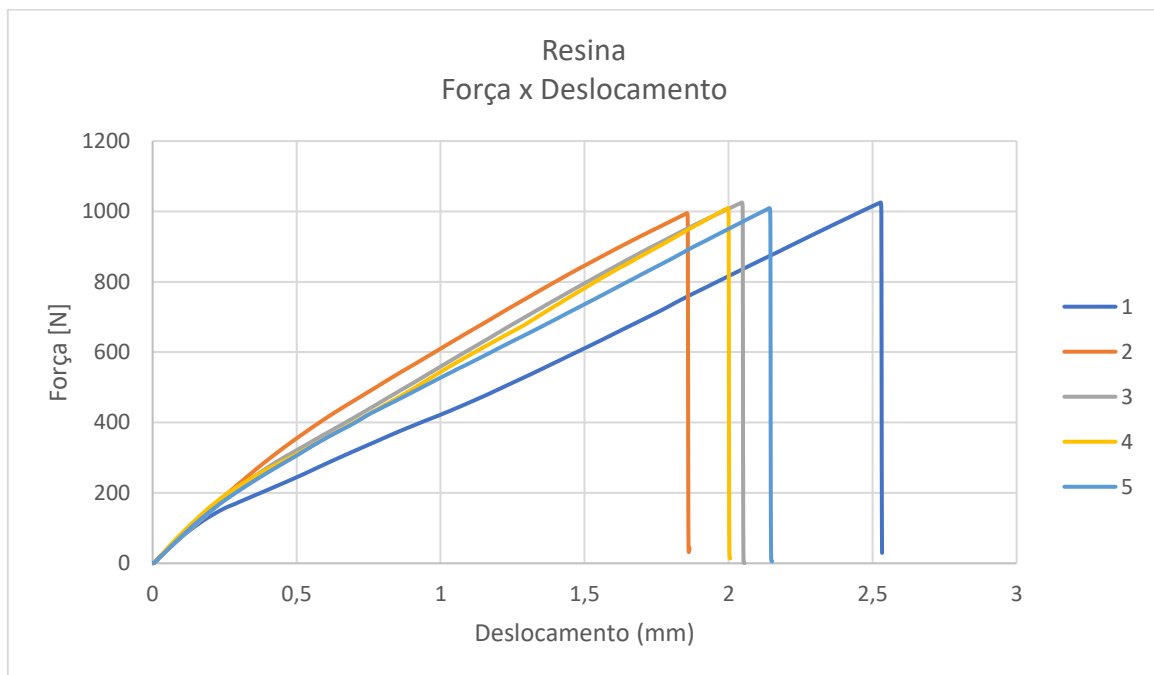


Figura 32: Curva força x deslocamento da resina poliéster.

Para o ensaio de tração, os resultados obtidos na caracterização da resina poliéster são os seguintes:

- ✓ Considerando as amostras analisadas o valor médio do limite de resistência à tração foi de $50,64 \pm 0,64$ MPa e módulo de elasticidade de $1,81 \pm 0,19$ GPa.

O valor médio para o limite de resistência a tração e o módulo de elasticidade estimado está de acordo com os valores mencionados na literatura, podendo variar de 40 MPa a 90 MPa para o limite de resistência a tração, e de 2.0 GPa a 4.4 GPa para o módulo de elasticidade [7].

4.3 Caracterização dos compósitos

4.3.1 Determinação da fração volumétrica de fibras

Os dados experimentais foram tratados conforme indicado na secção 3.4.4.

Como já visto, o volume da fibra pode variar de acordo com suas características individuais, como densidade e peso, para determinação da fração volumétrica de fibras, utilizou-se a Equação 14, possibilitando estimar a fração volumétrica da fibra de cânhamo utilizado nesse trabalho, sendo, 45.60%. Esse valor da fração volumétrica é ideal para a fibra de cânhamo, assim como citado na secção 3.4.4, o valor é em torno de 40-50%, capaz de proporcionar propriedades de resistência à tração satisfatórias [29].

4.3.2 Propriedades dos compósitos

Na Tabela 6, apresentam-se as propriedades mecânicas obtidas através dos ensaios de tração em provetes cortados das placas compósitas reforçadas com fibras de cânhamos nas diferentes orientações.

Tabela 6: Propriedades obtidas na caracterização mecânica de um compósito de resina de poliéster reforçado com fibras de cânhamo.

Orientação	Tensão de Rotura [MPa]	Módulo de Elasticidade [GPa]
90°	97,46 ± 14,60	3,04 ± 0,57
45°	4,44 ± 0,93	0,66 ± 0,18
0°	2,40 ± 0,29	0,32 ± 0,07

Com base nos valores apresentados pode concluir que:

- ✓ Quando comparado aos valores obtidos na caracterização da resina pura, sendo, o valor médio do limite de resistência à tração de $50,64 \pm 0,64$ MPa e módulo de elasticidade de $1,81 \pm 0,19$ GPa. Pode-se observar que a resistência à tração e o módulo de elasticidade dos compósitos orientados a 90° tem um aumento significativo. Esse aumento ocorre quando a força aplicada tem a direção do eixo da fibra, verificando-se um aumento significativo na resistência e rigidez do compósito e, conseqüentemente, o aumento no módulo de tração.

- ✓ Os resultados obtidos para os compósitos orientados a 0° e 45° eram previsíveis, dada a fraca adesão interfacial entre as duas fases (fibra e matriz), ao invés de se comportar como reforço passou a fragilizar a matriz comportando-se como falhas, comprovando a diminuição significativa da resistência à tração e do módulo de elasticidade.

4.4 Correlação Digital de Imagem

Os dados experimentais foram tratados conforme indicado na secção 3.5.

Os gráficos de força x deslocamento obtidos nos 6 testes para as diferentes orientações (0° , 45° e 90°) estão representados nas Figuras 33 à 38.

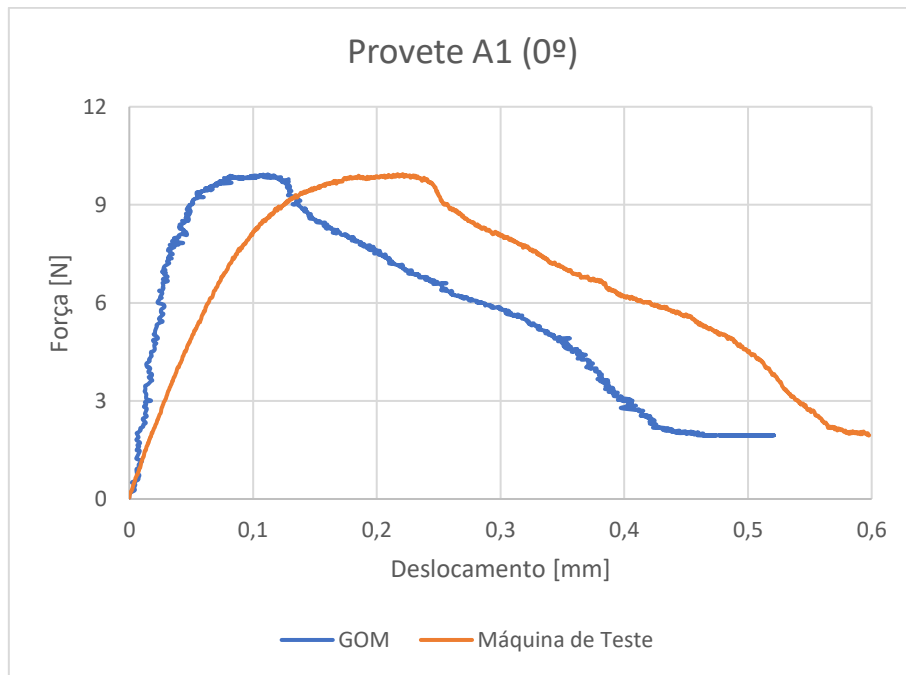


Figura 33: Provete A1 orientado a (0°).

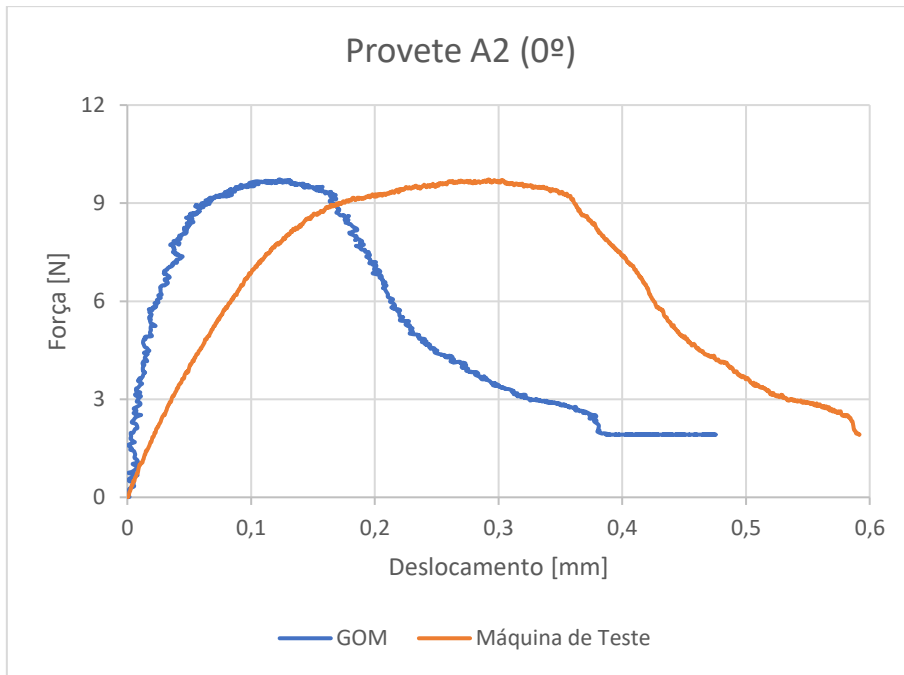


Figura 34: Provete A2 orientado a (0°).

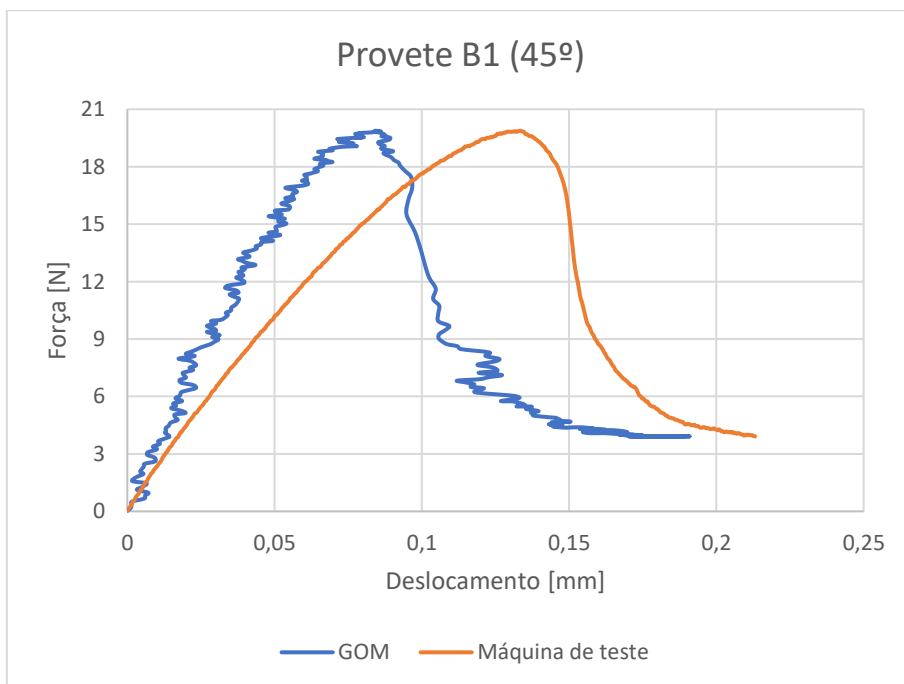


Figura 35: Provete B1 orientado a (45°).

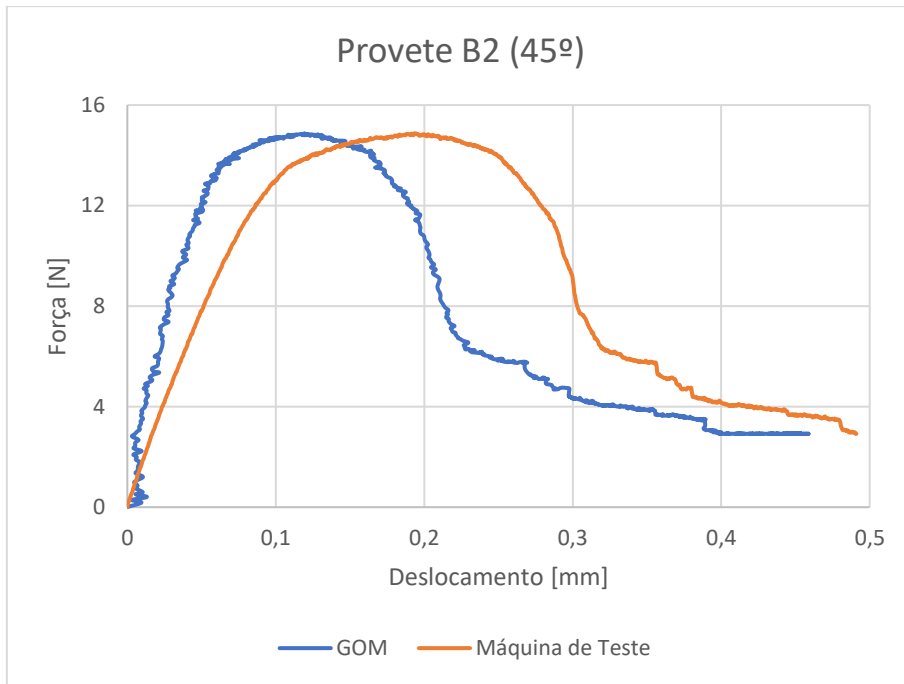


Figura 36: Provete B2 orientado a (45°).

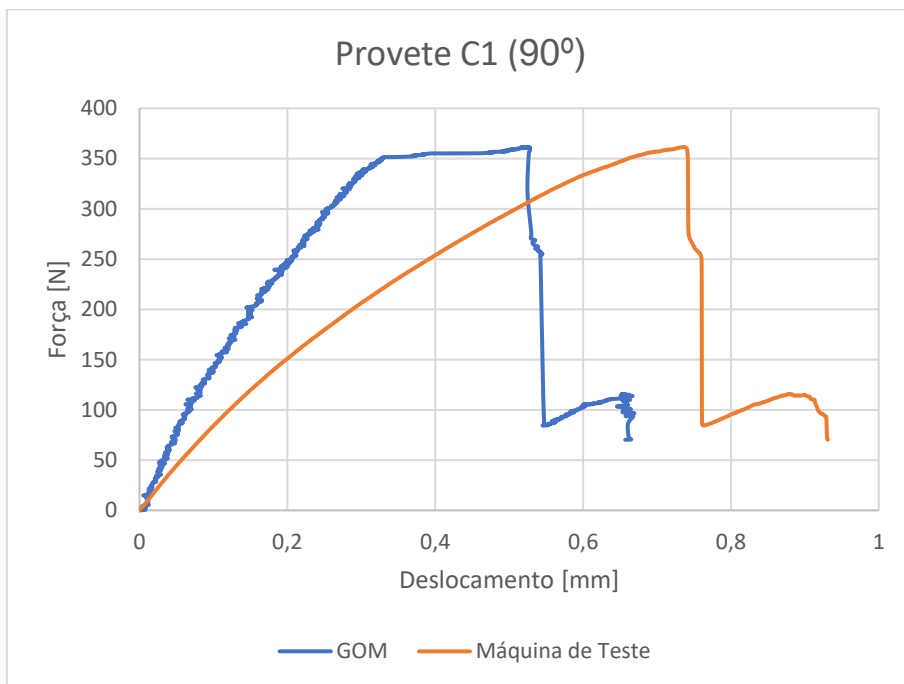


Figura 37: Provete C1 orientado a (90°).

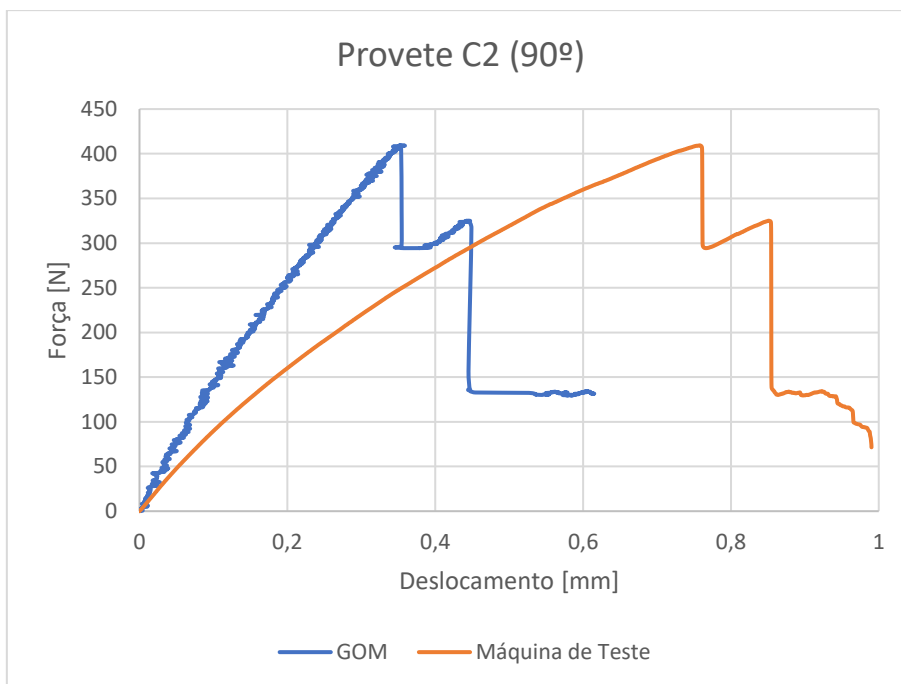


Figura 38: Provete C2 orientado a (90°).

Para as curvas apresentadas nas Figuras 33 à 38, é possível observar que há uma diferença quando comparado força x deslocamento registrada pelo método de DIC (sem contacto) com os resultados da máquina de teste com apenas os dados de deslocamento. Como as inclinações das curvas são diferentes, isso implica que o módulo de elasticidade também será diferente para cada método de medição, observando-se que o maior valor ocorre sempre para as observações medidas com o sistema DIC.

Uma importante avaliação a fazer com base dos resultados da correlação digital de imagem é a evolução do campo de deformações ao longo dos ensaios de tração. Assim, observando as Figuras 39 à 44 é possível analisar a evolução do campo de deformações dos provetes. Observa-se que a deformação não é uniforme no material, a partir de um determinado valor de deformação constatasse que esta passa a estar concentrada numa só região, correspondente à região de rompimento do provete.

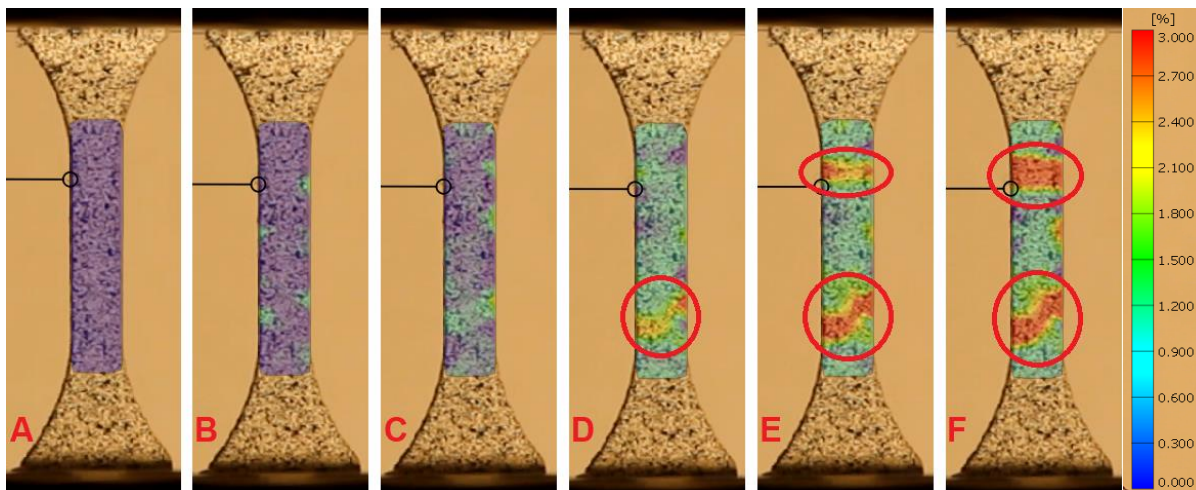


Figura 39: Evolução da deformação no provete A1 (0°).

A Figura 39 mostra a evolução das deformações para o provete orientado a 0°. A sequência dos valores de força são as seguintes: A- 0 N, B- 2.02 N, C- 7.60 N, D- 9.94 N, E- 8.36 N, F- 7.22 N. Observa-se o início da deformação na figura D, orientado a 45°, e a evolução nas marcações inferiores na Figura 39 D e F, mas a fratura ocorre na marcação superior indicada em E e F, orientado na direção das fibras.

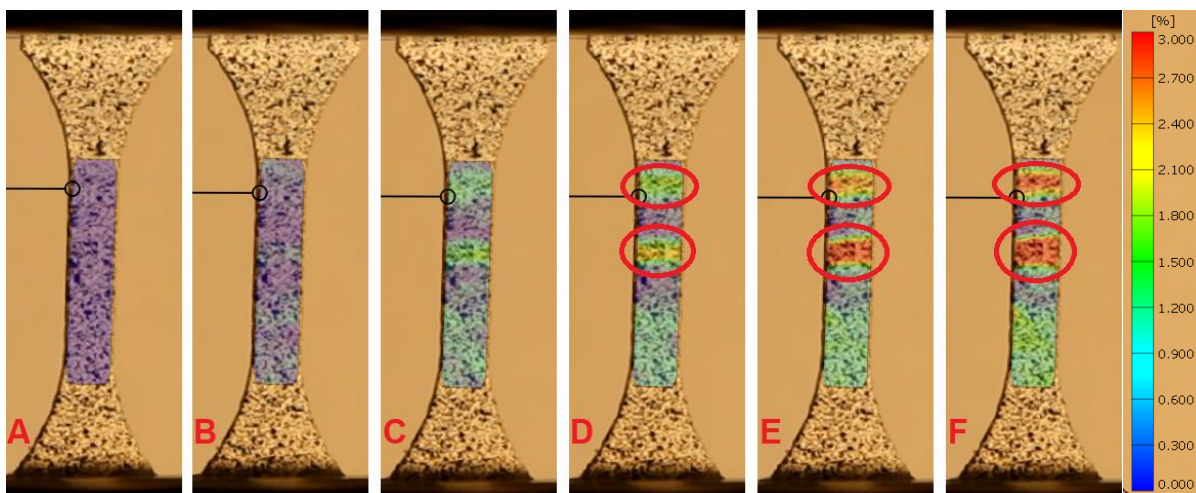


Figura 40: Evolução da deformação no provete A2 (0°).

A Figura 40 mostra a evolução das deformações para o provete orientado a 0°. A sequência dos valores de força são as seguintes: A- 0 N, B- 3.68 N, C- 8.06 N, D- 9.04 N, E- 9.58 N, F- 9.72 N. Observa-se o início da deformação ocorrendo em duas partes no provete na figura D, ambas orientado a 0°. A evolução nas marcações inferiores nas figuras D, E e F são onde ocorre a fratura, nas marcações superior ocorre de fato uma pequena fissura.

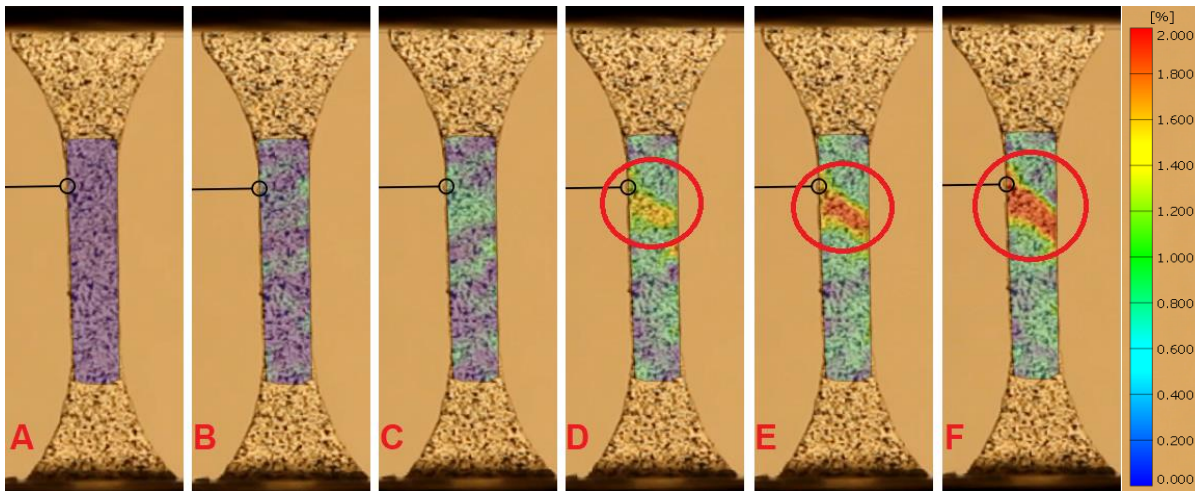


Figura 41: Evolução da deformação no provete B1 (45°).

A Figura 41 mostra a evolução das deformações para o provete orientado a 45°. A sequência dos valores de força são as seguintes: A- 0 N, B- 8.11 N, C- 14.43 N, D- 18.99 N, E- 19.88 N, F- 7.96 N. Observa-se o início da deformação na figura D orientado a 45°, a evolução nas marcações nas figuras E e F são onde ocorre a fratura, sendo orientada na mesma direção das fibras.

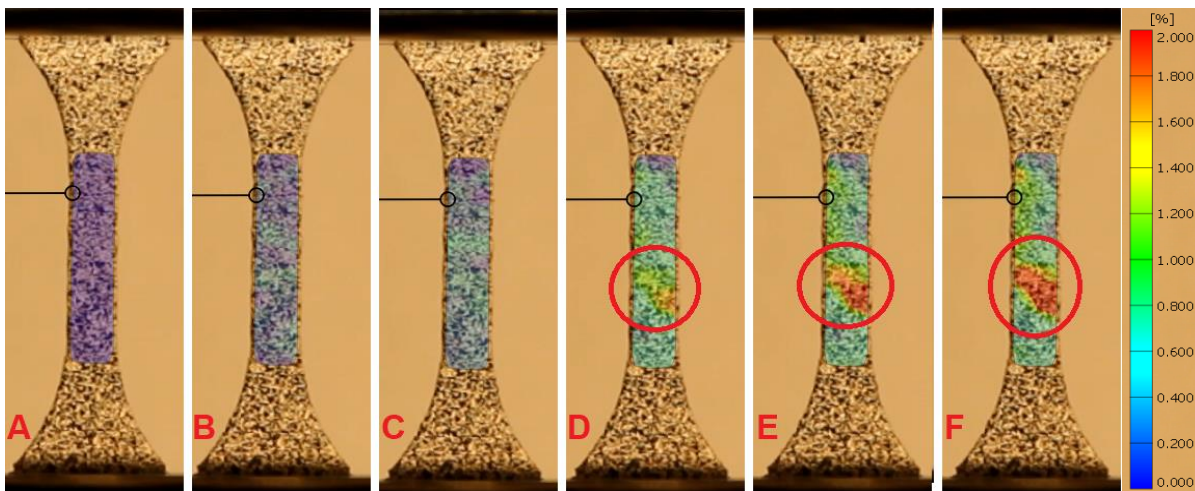


Figura 42: Evolução da deformação no provete B2 (45°).

A Figura 42 mostra a evolução das deformações para o provete orientado a 45°. A sequência dos valores de força são as seguintes: A- 0 N, B- 5.62 N, C- 10.62 N, D- 14.70 N, E- 14.88 N, F- 14.43 N. Observa-se o início da deformação na figura D orientado a 45°, a evolução nas marcações nas figuras E e F são onde ocorre a fratura, sendo orientada na mesma direção das fibras.

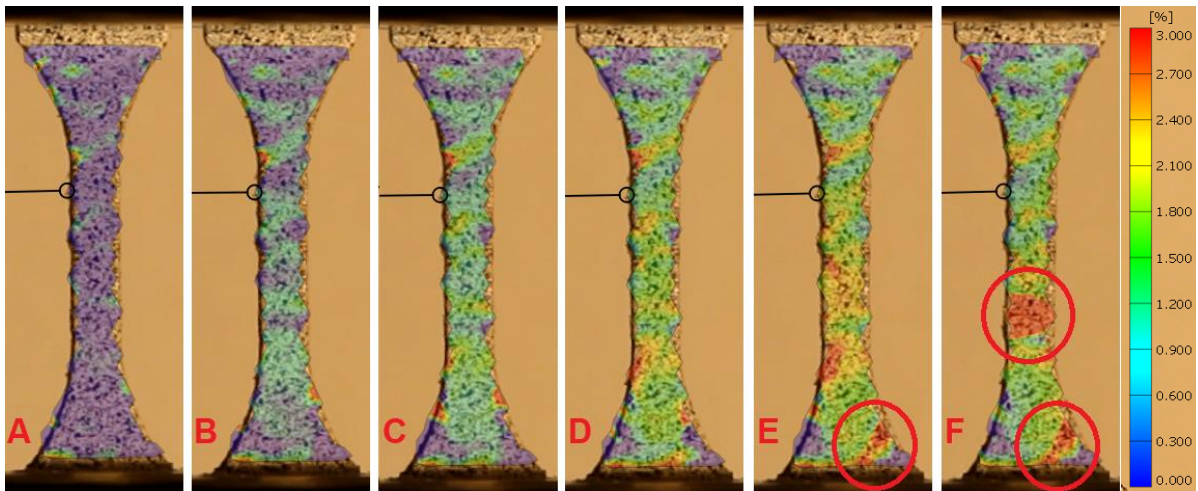


Figura 43: Evolução da deformação no provete C1 (90°).

A Figura 43 mostra a evolução das deformações para o provete orientado a 90°. A sequência dos valores de força são as seguintes: A- 25.39 N; B- 173.62 N; C- 254.59 N ; D- 334.20 N ; E- 359.38 ; F- 361.53 N. Observa-se na figura E o início de uma fissura orientado na direção da fibra, e a evolução da fissura na marcação inferior na figura F, mas a fratura ocorre na marcação superior indicada na figura F orientado a 0°.

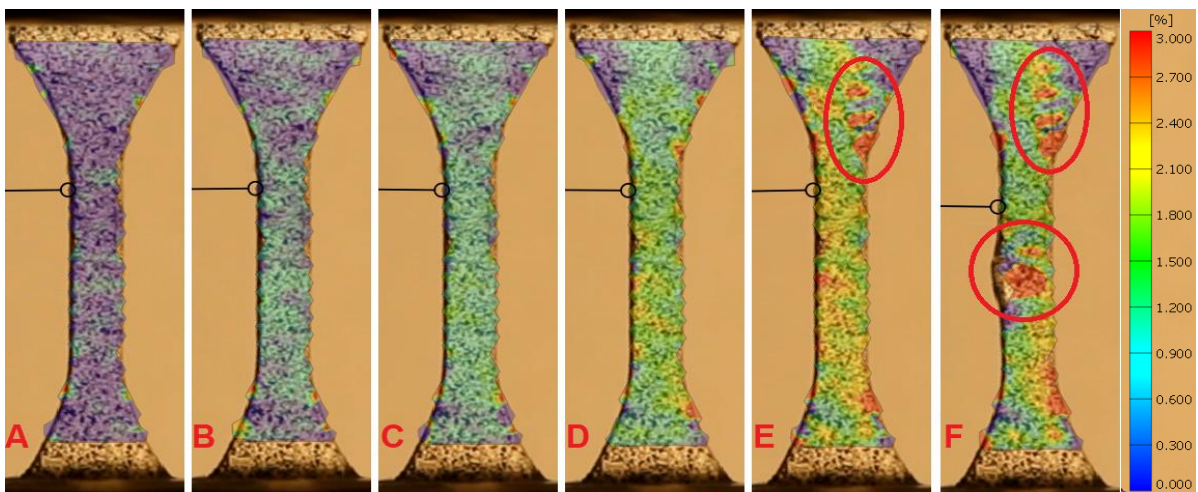


Figura 44: Evolução da deformação no provete C2 (90°).

A Figura 44 mostra a evolução das deformações para o provete orientado a 90°. A sequência dos valores de força são as seguintes: A- 18.74 N, B- 128.57 N, C- 205.72 N, D- 316.16 N, E- 409.44 N, F- 301.42 N. Observa-se na figura E o início de uma fissura orientado na direção da fibra, e a evolução da fissura na marcação inferior

na figura F, mas a fratura ocorre na marcação inferior indicada na figura F orientado a 0° .

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

O estudo realizado na presente dissertação permitiu uma análise das propriedades mecânicas de compósitos reforçados por fibra de cânhamo para diferentes orientações. As propriedades mecânicas dos referidos compósitos foram determinadas através de ensaios de tração. Para além da caracterização mecânica dos compósitos, foi utilizado a técnica de correlação digital de imagem com o intuito de avaliar o campo de deformação das amostras.

Os valores de módulo de elasticidade obtidos para a fibra são menores que aqueles descritos na literatura. A discrepância entre os valores ocorre devido a variabilidade das fibras vegetais, estrutura da fibra, diâmetro da fibra, comprimento da fibra, velocidade de ensaio e condições ambientais de ensaio.

De uma forma geral, os compósitos com reforço de cânhamo com orientação a 90° são os que apresentam melhores propriedades mecânicas, apresentando o valor médio para limite de resistência a tração de $97,46 \pm 14,60$ MPa. Os maiores valores de módulo de elasticidade e menor valor de deformação máxima também são os compósitos orientados a 90°, sendo as fibras alinhadas com a direção do teste de tração.

Os ensaios de tração dos compósitos de matriz polimérica de poliéster reforçados com fibras de cânhamo mostraram um aumento significativo tanto na tensão máxima quanto no módulo de elasticidade em comparação com a resina pura.

Quanto à técnica de correlação de imagem pode-se concluir que é possível medir a deformação da amostra de forma satisfatória, sem estar em contato com ela, tendo a vantagem de poder realizar medições em qualquer ponto da superfície do provete após o ensaio ter sido executado.

5.2 Linhas futuras de investigação

Em termos de trabalhos futuros e melhorias da presente dissertação, sugere-se a realização dos seguintes estudos:

- ✓ Devido à grande variabilidade nas dimensões e nas propriedades mecânicas das fibras vegetais, é essencial a realização de um número elevado de ensaios, para, assim, confirmar os resultados e interpretar alguns comportamentos observados;
- ✓ Para maior precisão, determinar a densidade da fibra de cânhamo através do método de Picnometria com hélio, por ser um método mais sensível e adequado à gama de densidade das fibras;
- ✓ Para a avaliação da área das fibras de cânhamo, determinar através da técnica de análise de imagem ou com a utilização de um microscópio eletrónico de varrimento.
- ✓ Realizar um tratamento superficial nas fibras de cânhamo a fim de melhorar a interface fibra/matriz;
- ✓ Modificar o processamento dos compósitos, uma vez que, as fibras de cânhamo quando inseridas na matriz não se acomodam de maneira homogênea, deixando espaços vazios, ocasionando pontos mais frágeis e concentradores de tensão, diminuindo a resistência do compósito de uma maneira geral.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Shahzad, "Hemp fiber and its composites - A review," *J. Compos. Mater.*, vol. 46, no. 8, pp. 973–986, 2012.
- [2] X. Lu and R. C. Clarke, "The cultivation and use of hemp," 1995.
- [3] J. C. Callaway, "Hempseed as a nutritional resource: An overview," *Euphytica*, vol. 140, no. 1–2, pp. 65–72, 2004.
- [4] E. M. J. Salentijn, Q. Zhang, S. Amaducci, M. Yang, and L. M. Trindade, "New developments in fiber hemp (*Cannabis sativa* L.) breeding," *Ind. Crops Prod.*, 2015.
- [5] R. Johnson, "Hemp as an Agricultural Commodity Renée Johnson Specialist in Agricultural Policy," *Congr. Res. Serv.*, 2017.
- [6] ASTM D3878-95, "Standard terminology of high - modulus reinforcing fibers and their composites. 1995."
- [7] R. Akmal, N. Akmal, and A. M. Usmani, "Materials science and engineering," *Polym. News*, vol. 28, no. 9, p. 282, 2003.
- [8] A. M. F. M. Ventura, "Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas," *Ciência & Tecnol. dos Mater.*, vol. 21, no. 3–4, pp. 10–19, 2009.
- [9] A. T. M. Lucas Filipe Martins da Silva, Fernando Jorge Lino Alves, *Materiais de construção*. 2013.
- [10] M. A. Iozzi, G. S. Martins, M. A. Martins, F. C. Ferreira, A. E. Job, and L. H. C. Mattoso, "Estudo da influência de tratamentos químicos da fibra de sisal nas propriedades de compósitos com borracha nitrílica," *Polímeros*, vol. 20, no. 1, pp. 25–32, Feb. 2010.
- [11] M. Truong, W. Zhong, S. Boyko, and M. Alcock, "A comparative study on natural fibre density measurement," *J. Text. Inst.*, vol. 100, no. 6, pp. 525–529, 2009.
- [12] A. Arbelaiz, B. Fernández, G. Cantero, R. Llano-Ponte, A. Valea, and I. Mondragon, "Mechanical properties of flax fibre/polypropylene composites. Influence of fibre/matrix modification and glass fibre hybridization," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 36, no. 12, pp. 1637–1644, 2005.
- [13] N. Soykeabkaew, P. Supaphol, and R. Rujiravanit, "Preparation and characterization of jute- and flax-reinforced starch-based composite foams," *Carbohydr. Polym.*, vol. 58, no. 1, pp. 53–63, Oct. 2004.
- [14] J. and M. G. L. Blair, "Measurement of Fiber Density by Helium Pycnometry," *J. Compos. Mater.*, vol. 34, no. 3, pp. 251–80, 2000.
- [15] ASTM D1505-03, "Standard Test Method for Density of Plastics by the Density-Gradient Technique, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003."
- [16] M. Sutton, W. Wolters, W. Peters, W. Ranson, and S. McNeill, "Determination of displacements using an improved digital correlation method," *Image Vis. Comput.*, vol. 1, no. 3, pp. 133–139, Aug. 1983.

- [17] H. A. Bruck, S. R. McNeill, M. A. Sutton, and W. H. Peters, "Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction," *Exp. Mech.*, vol. 29, no. 3, pp. 261–267, 1989.
- [18] J. Ribeiro, H. Lopes, B. Mendonça, and P. Martins, "Determinação do Campo de Deslocamentos de Tecidos Biológicos Hiperelásticos," *Rev. Iberoam. Ing. Mecánica*, vol. bf Acepte, 2011.
- [19] J. D. L. Rosas, "Implementação de um sistema para medição das deformações no plano pela técnica de correlação digital de imagem," *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2019.
- [20] B. Pan, "Digital image correlation for surface deformation measurement: Historical developments, recent advances and future goals," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 29, no. 8, 2018.
- [21] P. Moreira, "Desenvolvimento de Algoritmo de Correlação Digital de Imagem para Avaliação de Grandes Deformações," 2015.
- [22] B. Pan, H. Xie, Z. Wang, K. Qian, and Z. Wang, "Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns," *Opt. Express*, vol. 16, no. 10, pp. 7037–7048, 2008.
- [23] P. Bai, Y. Xu, F. Zhu, and D. Lei, "A novel method to compensate systematic errors due to undermatched shape functions in digital image correlation," *Opt. Lasers Eng.*, vol. 126, p. 105907, Mar. 2020.
- [24] Y. A. and A. J. G. Çengel, *Transferência de Calor e Massa*. 2012.
- [25] J. Ribeiro, J. Rocha, L. Queijo, "The Influence of Manufacturing Factors in the Short-Fiber Non-Woven Chestnut Hedgehog Spine-Reinforced Polyester Composite Performance', *Journal of Natural Fibers*, 2019."
- [26] ASTM C1557-03, "Standard Test Method for Tensile Strength and Young ' s Modulus of Fibers. American Society for Testing and Materials," vol. 03, no. Reapproved 2013, pp. 1–10, 2014.
- [27] C. Cardoso, C. S. Fernandes, R. Lima, and J. Ribeiro, "Biomechanical analysis of PDMS channels using different hyperelastic numerical constitutive models," *Mech. Res. Commun.*, 2018.
- [28] J. Rocha. J. Ribeiro, L. Queijo, "Mechanical properties comparison of autochthonous natural fibers reinforced polyester composites: flax and hemp', Book Chapter in the 'Materials Design and Applications', Part III, Vol. 65. Edited by Springer, pp. 125-134, 2017. ISBN 978-3-319-50783-5," .
- [29] A. Shalwan, "In State of Art: Mechanical and tribological behaviour of polymeric composites based on natural fibres," *Mater. Des.*, vol. 48, pp. 14–24, Jun. 2013.
- [30] N. Lu and S. Oza, "A comparative study of the mechanical properties of hemp fiber with virgin and recycled high density polyethylene matrix," *Compos. Part B Eng.*, vol. 45, no. 1, pp. 1651–1656, Feb. 2013.
- [31] K. L. Pickering, M. G. A. Efendy, and T. M. Le, "A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 83, pp. 98–112, Apr. 2016.