



**ISEL**

**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**

**Área Departamental de Engenharia Mecânica**

## **Desenvolvimento de Produtos com Novos Materiais Poliméricos Biodegradáveis**

**ALEXANDRE MANUEL MENDONÇA SANTANA LOBO**  
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Alexandra Sousa Rodrigues

Prof. Mestre Afonso Manuel da Costa de Sousa Leite

Júri:

Presidente: Prof. Dr. António João Feliciano Abreu

Vogais:

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Amélia Ramos Loja

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Alexandra Sousa Rodrigues

**Fevereiro de 2018**



**ISEL**

**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**

**Área Departamental de Engenharia Mecânica**

## **Desenvolvimento de Produtos com Novos Materiais Poliméricos Biodegradáveis**

**ALEXANDRE MANUEL MENDONÇA SANTANA LOBO**  
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia Mecânica

**Orientadores:**

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Alexandra Sousa Rodrigues

Prof. Mestre Afonso Manuel da Costa de Sousa Leite

**Júri:**

Presidente: Prof. Dr. António João Feliciano Abreu

Vogais:

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Amélia Ramos Loja

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Alexandra Sousa Rodrigues

**Fevereiro de 2018**



*Dedicado aos meus pais*



# Agradecimentos

Gostaria de expressar o meu reconhecimento e sinceros agradecimentos a todas as pessoas que me ajudaram através de um apoio direto ou indireto na realização desta dissertação de mestrado mas também neste percurso académico.

A nível profissional, começo por agradecer aos meus orientadores, Professora Alexandra Rodrigues e Professor Afonso Leite pela oportunidade proporcionada, pelo apoio, pelas reuniões, pelos esclarecimentos de dúvidas e pelo material disponibilizado.

Agradeço ao Professor Ivan Galvão pela ajuda prestada na produção de provetes de ensaio.

Agradeço ao Professor Pedro Amaral e ao Professor Paulo Fernandes, professores do departamento de engenharia mecânica do Instituto Superior Técnico, pela ajuda prestada na realização dos ensaios mecânicos.

Agradeço ao Miguel Marques e ao Ricardo Graça, bem como a outros colegas do curso pela disponibilidade demonstrada.

Por fim, e não menos importante, quero agradecer à minha família pelo apoio incondicional dado ao longo deste percurso académico.



## Resumo

O estudo de novos materiais para integração em materiais compósitos para aplicações de engenharia, tem crescido largamente nas últimas décadas. Esta procura tem como objetivo proporcionar a substituição de materiais sintéticos por materiais naturais biodegradáveis que tenham desempenhos semelhantes mas tenham menor impacto ambiental. O desenvolvimento de novos materiais compósitos incorporando materiais naturais biodegradáveis permite a redução de sucatas, permitindo a sua reciclagem ou a sua biodegradabilidade diminuindo a pegada ecológica provocada pelo desenvolvimento tecnológico.

Neste contexto, o presente trabalho visou estudar as diferenças existentes nas propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de tração de compósitos de fibra de cânhamo e de fibra de vidro produzidos através da moldagem manual com e sem vácuo. Pretendeu-se também analisar a potencialidade de utilização de uma resina biodegradável para o fabrico destes compósitos. A estrutura dos tecidos previamente selecionados bem como a resistência à tração dos fios retirados dos tecidos foram também avaliadas.

O estudo desenvolvido permitiu verificar um melhor desempenho dos compósitos de fibra de vidro em comparação com os compósitos de fibra de cânhamo. Verificou-se ainda que a utilização de vácuo para a produção de compósitos contribui para a existência de alguns defeitos nos compósitos mas no geral melhora as propriedades dos mesmos.

Para além das vantagens do uso de fibras naturais, decorrentes de serem um recurso renovável e biodegradável, também se observou que a fibra de cânhamo confere uma certa plasticidade ao compósito, o que pode ser uma mais valia em diversas aplicações de engenharia.

**Palavras-chave:** Fibras de cânhamo; Fibras de vidro; Matriz polimérica; Materiais compósitos; Materiais biodegradáveis; Microscopia; Resistência mecânica;



## **Abstract**

The study of new materials for integration in composite materials for engineering applications, has grown widely in the last decades. This search aims to provide the substitution of synthetic materials for natural biodegradable materials that have similar performances but have a lower environmental impact. The development of new composite materials incorporating natural biodegradable materials allows the reduction of scrap, allowing its recycling or it is biodegradability reducing the ecological footprint caused by technological development.

In this context, the present work aimed to study the differences in mechanical properties obtained in tensile test of hemp fiber and glass fiber composites produced by manual molding with and without vacuum. It was also intended to analyze the potential use of biodegradable resin in the manufacture of these composites. The structure of the previously selected fabric as well as the tensile strength of the yarns, removed from the fabrics, were also evaluated.

The study showed a better performance of glass fiber composites compares to hemp fiber composites. It has also been found that the use of vacuum for the production of composites contributes to the existence of some defects in the composites but in general improves the properties thereof.

In addition to the advantages of the use of natural fibers as a renewable and biodegradable resource, it was also observed that hemp fiber gives a certain plasticity to the composite, which may be an added value in several engineering applications.

**Keywords:** Hemp fibers; Glass fibers; Polymeric matrix; Composite materials; Biodegradable materials; Microscopy; Mechanical strength;



# Índice

Índice de figuras .....	XV
Índice de tabelas .....	XIX
Lista de símbolos .....	XXI
1. Introdução e objetivo do trabalho .....	2
1.1 Introdução .....	2
1.2 Objetivos .....	4
2. Revisão bibliográfica .....	6
2.1 Enquadramento .....	6
2.2 Materiais compósitos .....	7
2.2.1 Classificação dos compósitos .....	8
2.2.2 Propriedades dos compósitos .....	10
2.2.3 Vantagens e limitações dos materiais compósitos .....	12
2.2.4 Aplicações dos materiais compósitos na indústria .....	13
2.2.5 Compósitos biodegradáveis .....	14
2.3 Fibras de reforço .....	17
2.3.1 Fibras sintéticas .....	17
2.3.1.1 Fibras de vidro .....	17
2.3.2 Fibras naturais .....	18
2.3.2.1 Classificação e propriedades das fibras naturais .....	19
2.3.2.2 Fibras de origem animal .....	21
2.3.2.3 Fibras de origem vegetal .....	22
2.3.2.3.1 Fibras obtidas a partir do caule da planta .....	23
2.3.2.3.2 Fibras obtidas a partir das folhas de planta .....	28
2.3.2.3.3 Fibras obtidas a partir da semente/fruto da planta .....	30
2.3.2.3.4 Fibras obtidas a partir da cana de plantas .....	31
2.3.2.4 Composição química e estrutural de fibras naturais vegetais .....	32
2.3.2.5 Cânhamo .....	35
2.3.2.5.1 Tratamentos/ modificação das fibras de cânhamo .....	36
2.4 Matrizes .....	41
2.4.1 Matrizes não biodegradáveis .....	42
2.4.1.1 Resinas epoxídicas .....	44
2.4.2 Matrizes biodegradáveis .....	45
2.4.2.1 Classificação e propriedades de matrizes poliméricas de base biológica e biodegradáveis .....	45

2.4.2.2 Matrizes de origem na biomassa .....	46
2.4.2.3 Matrizes de origem em microrganismos .....	47
2.4.2.4 Matrizes de origem biotecnológica .....	48
2.4.2.5 A resina: Mater-Bi.....	49
2.5 Estado da arte sobre compósitos reforçados a fibra de cânhamo.....	52
3. Método analítico para determinação de propriedades de compósitos. ....	56
3.1 Análise volumétrica de placas de fibra de cânhamo com resina epoxídica.....	58
3.2 Análise volumétrica de placas de fibra de vidro com resina epoxídica.....	59
3.3 Análise volumétrica de placas de fibra de vidro com resina de Mater-Bi.....	60
3.4 Método analítico para determinação das espessuras expectáveis para as placas de compósito.....	61
4. Parte experimental .....	64
4.1 Processo de fabrico do molde e das placas .....	64
4.1.1 Processo de fabrico do molde.....	64
4.1.2 Processo de fabrico das placas de compósitos para os ensaios de tração .....	65
4.1.2.1 Placas de compósito com resina epoxídica .....	65
4.1.2.2 Placas de compósito com resina Mater-Bi .....	67
4.1.3 Conclusões .....	71
4.2 Estimação das propriedades mecânicas dos compósitos .....	71
4.2.1 Determinação das forças máximas para os ensaios de tração .....	71
4.2.1.1 Previsão de forças de rotura presentes nos ensaios de biocompósitos .....	73
4.2.1.2 Previsão de forças de rotura presentes nos ensaios de compósitos sintéticos.....	74
4.2.2 Determinação do módulo de elasticidade teórico dos compósitos.....	75
4.2.3 Determinação analítica das massas das placas .....	76
4.3 Análise têxtil e filamentar por microscopia .....	78
4.3.1 Introdução.....	78
4.3.2 Materiais.....	79
4.3.3 Método .....	79
4.3.4 Resultados .....	81
4.3.5 Discussão de resultados.....	84
4.3.6 Conclusões .....	85
4.4 Estudo das propriedades mecânicas dos fios à tração.....	86
4.4.1 Introdução.....	86
4.4.2 Materiais.....	86

4.4.3 Método .....	87
4.4.4 Resultados experimentais .....	88
4.4.5 Discussão de resultados .....	90
4.4.6 Conclusões .....	91
4.5 Estudo das propriedades mecânicas dos compósitos à tração .....	92
4.5.1 Introdução .....	92
4.5.2 Materiais .....	92
4.5.3 Método .....	93
4.5.4 Resultados experimentais .....	94
4.5.5 Discussão de resultados .....	99
4.5.6 Conclusões .....	101
5. Conclusões .....	104
5.1 Conclusões gerais .....	104
5.2 Sugestões para trabalhos futuros .....	105
Referências .....	108
Anexo I- Áreas e secções dos provetes de compósitos .....	122
Anexo II- Áreas dos monofilamentos que constituem um fio de cânhamo .....	126
Anexo III- Áreas dos monofilamentos que constituem um fio de fibra de vidro .....	130
Anexo IV- Dados obtidos nos ensaios de tração dos fios .....	138
Anexo V- Dados obtidos nos ensaios de tração dos compósitos .....	142



# Índice de figuras

Figura 1- Composição e fases do material compósito, adaptado de (Isaac & Ishari, 2006) .....	7
Figura 2- Classificação dos materiais compósitos adaptado de (Daniel & Ishai, 1994) ..	8
Figura 3- a) Compósitos de partículas; b) Compósitos de fibras descontínuas; c) Compósitos de fibras contínuas; d) Compósitos estruturais (Adams, Advani, & Alman, 2001).....	9
Figura 4-Ciclo de vida dos polímeros, adaptado de (Jiirgen Liircks, 1998) .....	16
Figura 5- Fibras naturais, adaptado de (Gurunathan, Mohanty, & Nayak, 2015).....	20
Figura 6-a) Lã; b)Seda; c) Pena de galinha; (Zhang, et al., 2016); (Wang, et al., 2017); (Hoi-yan Cheung, 2009).....	22
Figura 7- a)Linho ( <i>Linum Usitatissimum</i> ); b)Juta ( <i>Corchorus Capsularis</i> ); c)Cânhamo ( <i>Cannabis Sativa</i> ); d)Quenafe ( <i>Hibiscus Cannabinus</i> ); e)Rami ( <i>Boehmeria Nivea</i> ); f)Kudzu ( <i>Pueraria Thunbergiana</i> ); g)Quiabo ( <i>Hibiscus Esculentus L</i> ); h)Rosélia ( <i>Hibiscus Sabdariffa</i> ); i)Urtiga ( <i>Urtica Dioica L</i> ); (Choudhary, et al., 2017); (Islam M. , 2013); (Lello, 1988); (Webber III, Bhardwaj, & Bledsoe, 2002); (Starr, Martz, & Loope, 1999); (Kumar, et al., 2013); (Qi, Chin, & Malekian, 2005) .....	27
Figura 8- a)Sisal ( <i>Agave Sisalana</i> ); b)Abacá ( <i>Musa Textilis</i> ); c)Fibra da folha do abacaxi ( <i>Ananus Comosus</i> ); d)Fibra da folha da bananeira ( <i>Musa Indica</i> ); e)Piaçava ( <i>Attalea Funífera</i> ); f)Henequen ( <i>Agave Fourcroydes</i> ); g)Curauá ( <i>Ananas Erectifolius</i> ); (Debnath, et al., 2010); (Lello, 1988); (Zhang, et al., 2016); (Elzubair & Suarez, 2012); (Prieto, et al., 2014); (Moreira, et al., 2016).....	30
Figura 9- a)Algodão ( <i>Gossypium Barbadense</i> ); b)Coco ( <i>Cocos Nucifera</i> ); (Lello, 1988); (Romão, 2003).....	31
Figura 10- Bambu (Lello, 1988).....	32
Figura 11- Fibra natural elementar adaptado de (Castro B. , 2013); (Eichhorn, Hearle, & Jaffe, 2009).....	33
Figura 12- Matrizes poliméricas para aplicação em compósitos, adaptado de (Faruk, et al., 2012).....	42
Figura 13- Classificação das matrizes não biodegradáveis .....	43
Figura 14- Principais classes de polímeros de base biológica e biodegradável (Bugnicourt, et al., 2014).....	45
Figura 15- Representação da placa de compósito .....	58

Figura 16- a) Molde fêmea b) Molde macho.....	65
Figura 17- Fluxograma relativamente ao procedimento utilizado para a produção de provetes de materiais compósitos .....	66
Figura 18- Fabricação das placas de Mater-Bi, a) e b) Molde no interior do forno c) Placas de Mater-Bi.....	67
Figura 19- Empilhamento para 1º e 3º experiencia de produção de compósitos.....	68
Figura 20- Empilhamento para a 2º experiencia de produção de compósitos.....	68
Figura 21-a) Resultado da produção das placas na primeira experiência; b) e c) Resultado da produção das placas na segunda experiência; d) Resultado da produção das placas na terceira experiência.....	70
Figura 22- Definições das áreas de um provete.....	73
Figura 23- Constituição de um tecido (fios da teia e fios da trama).....	78
Figura 24- a) Amostra de tecido de fibra de vidro; b) Provelte têxtil montado em resina .....	79
Figura 25- Software ImageJ, utilizado para a análise das áreas transversais. a) Definição da escala e unidades; b) delimitação da área de um monofilamento.....	80
Figura 26- Imagens SEM do entrançamento; Ampliação: 12x a) fibra de cânhamo b) fibra de vidro .....	81
Figura 27- Análise da quantidade de fios em 5 mm nas duas direções a) e b) para fibras de cânhamo c) e d) para fibras de vidro; Ampliação: 12x.....	82
Figura 28- Secção transversal das a) fibras de cânhamo e das b) fibras de vidro; Ampliação: 20x .....	83
Figura 29- Secção de uma porção de a) fibras de cânhamo, Ampliação 220x e b) fibras de vidro, Ampliação: 230x .....	83
Figura 30- Formato da secção dos monofilamentos ao longo do comprimento a) fibras de cânhamo; b) fibras de vidro; Ampliação: 700x. ....	84
Figura 31- Entrelaçamento das fibras de cânhamo.....	84
Figura 32- Entrelaçamento das fibras de vidro.....	85
Figura 33- Provetes filamentosos para os ensaios de tração .....	87
Figura 34- Equipamento utilizado nos ensaios de tração das fibras.....	87
Figura 35- Posicionamento dos provetes durante o ensaio.....	88
Figura 36- Curva experimental obtida num ensaio de tração para a fibra de cânhamo .	89
Figura 37- Curva experimental obtida num ensaio de tração para a fibra de vidro .....	89
Figura 38- Provelte de compósito para ensaios de tração.....	92

Figura 39- Equipamento utilizado nos ensaios de tração de provetes de compósito .....	93
Figura 40- Provede de compósito montado nas amarras hidráulicas e com extensômetro acoplado.....	94
Figura 41- Curva experimental tensão extensão para compósitos de fibra de cânhamo a) com vácuo e b) sem vácuo.....	95
Figura 42- Curva experimental tensão extensão para compósitos de fibra de vidro a) com vácuo e b) sem vácuo.....	96
Figura 43- Provedes ensaiados, a)Fibra de cânhamo fabricados com vácuo; b) Fibra de cânhamo fabricados sem vácuo; c) Fibra de vidro fabricados com vácuo, d) Fibra de vidro fabricados sem vácuo.....	98
Figura 44- Defeitos no provede de fibra de cânhamo produzidos com vácuo .....	100
Figura 45- Delaminação nos provedes de fibra de vidro produzido com vácuo .....	100



## Índice de tabelas

Tabela 1- Propriedades mecânicas das fibras sintéticas, adaptado de (Mazumdar, 2002); (Adams, Advani, & Alman, 2001) .....	17
Tabela 2- Tipos de fibras de vidro (Wallenberger, Watson, & Li, 2001) .....	18
Tabela 3- Propriedades mecânicas das fibras naturais de origem animal (Pickering, Aruan Efendy, & Le, 2016).....	22
Tabela 4- Propriedades das fibras naturais vegetais, adaptado de (Fuqua, Huo, & Ulven, 2012); (Gurunathan, Mohanty, & Nayak, 2015); (Pickering, Aruan Efendy, & Le, 2016); (Shahzad, 2013).....	23
Tabela 5- Composição química de fibras naturais (Fuqua, Huo , & Ulven , 2012) .....	34
Tabela 6- Temperaturas praticadas no processamento de compósitos de fibras de cânhamo .....	37
Tabela 7- Propriedades de matrizes sintéticas (Mazumdar, 2002).....	44
Tabela 8- Propriedades da resina epoxídica (Sicomín, 2017) .....	44
Tabela 9- Propriedades mecânicas de matrizes naturais biodegradáveis, adaptado de (Sookne & Harris, 1943); (Pachekoski, Agnelli, & Belem, 2009); (Faruk, et al., 2012); (Campos, et al., 2013); (Michel Biron, 2014) .....	46
Tabela 10- Propriedades das várias classes de Mater-Bi (Bastioli, 1998); (Rudnik, 2008); (Moore & Saunders, 1997) .....	51
Tabela 11- Dados da placa de compósito .....	58
Tabela 12- Dados do tecido de fibra de cânhamo .....	58
Tabela 13- Dados da placa de compósito .....	59
Tabela 14- Dados do tecido de fibra de vidro .....	59
Tabela 15- Dados da placa de compósito .....	60
Tabela 16- Dados do tecido de fibra de vidro .....	61
Tabela 17- Características das fibras utilizadas para a produção de placas .....	62
Tabela 18- Análise de temperaturas (1º experiência) .....	69
Tabela 19- Análise de temperaturas (2º experiência) .....	69
Tabela 20- Análise de temperaturas (3º experiência).....	69
Tabela 21- Características dos provetes e propriedades dos materiais a incorporar nos compósitos.....	72
Tabela 22- Modulo de elasticidade dos materiais utilizados nos compósitos .....	76

Tabela 23- Resultados expectáveis referente a algumas propriedades mecânicas .....	76
Tabela 24- Dados da placa de fibra de cânhamo e da placa de fibra de vidro .....	77
Tabela 25- Resumo dos resultados obtidos por análise de imagem dos têxteis por SEM .....	86
Tabela 26- Dados experimentais médios dos ensaios de tração para as fibras de cânhamo e de vidro .....	90
Tabela 27- Dados obtidos da bibliografia consultada referente às fibras elementares de cânhamo e de vidro.....	90
Tabela 28- Variáveis dos provetes de compósitos.....	92
Tabela 29- Dados experimentais obtidos nos ensaios de tração para os materiais compósitos em estudo.....	97
Tabela 30- Dados obtidos da bibliografia consultada referente a compósitos de fibra de cânhamo/resina epoxídica.....	99
Tabela 31- Dados obtidos da bibliografia consultada referente a compósitos de fibra de vidro/resina epoxídica.....	99

## Lista de símbolos

$\sigma$	Tensão
$\varepsilon$	Extensão
E	Módulo de elasticidade (Modulo de Young)
M	Massa
V	Volume
m	Fração de Massa
v	Fração de Volume
$\rho$	Massa Específica
$A_{\text{placa}}$	Área da placa
$h_{\text{composito}}$	Espessura da Placa de Compósito
F	Força
N	Número de Camadas
$\eta$	Fator de Arranjo das Fibras
$f$	Fibra (em índice)
$m$	Matriz (em índice)
v	Vazios (em índice)



# 1. Introdução e objetivo do trabalho

## 1.1 Introdução

A diversidade de materiais atualmente existentes para o uso em engenharia é muito grande, existindo por isso materiais cada vez mais específicos para aplicações pormenorizadas. Neste sentido os materiais compósitos são implementados na generalidade dos sectores industriais, com vários campos de aplicação, como por exemplo na indústria automóvel, na aeronáutica, na construção de navios, nos artigos desportivos e de lazer, na medicina, etc. produtos esses que se pretendem fiáveis e com boas propriedades mecânicas, físicas e químicas.

Os materiais compósitos correspondem a uma combinação de duas ou mais fases insolúveis e distintas quimicamente, cujas propriedades e desempenho devem ser superiores aos seus constituintes quando atuam isoladamente (Isaac & Ishari, 2006).

Os materiais compósitos têm sido utilizados para resolver problemas tecnológicos desde os anos de 1940. Porém na década de 1960 a indústria iniciou com a introdução de materiais compósitos à base de polímeros na sua atividade (Mazumdar, 2002). O crescimento no uso dos materiais compósitos surgiu devido a uma maior sensibilização em relação ao custo e desempenho do produto e aumento da concorrência no mercado mundial de componentes leves. Entre os vários materiais existentes, os compósitos têm o potencial de substituir os materiais mais utilizados na Engenharia, apresentando muitas vezes melhor desempenho. A substituição de componentes de aço por componentes compósitos, seja na aviação, em viaturas ligeiras e pesados, em bicicletas, etc. podem levar à redução de 60 a 80% do peso do componente, e 20 a 50% do peso através da substituição de peças de alumínio (Mazumdar, 2002).

A utilização dos materiais compósitos aumentou, em paralelo com a problemática relacionada com a dificuldade de preservar o meio ambiente e a reciclagem de resíduos. Estas crescentes preocupações de ordem ambiental, nomeadamente com a reciclagem dos materiais usados em Engenharia, tem conduzido a uma procura por novos materiais naturais de modo a serem incorporados em materiais compósitos, com desempenhos semelhantes aos atingidos pelos polímeros de origem sintética. Contudo ainda não existem no mercado materiais compósitos suficientemente estudados e desenvolvidos em

comparação com outros materiais, de modo a solucionar esta problemática, sendo assim uma área de investigação a desenvolver.

A utilização de componentes naturais para o fabrico de compósitos, como é o caso das variadas fibras e matrizes naturais, deram origem aos biocompósitos. Os biocompósitos são materiais compósitos que compreendem uma ou mais fases a partir de uma origem biológica (Fowler, Hughes, & Elias, 2006).

Assim, no presente trabalho pretende-se estudar algumas das propriedades mecânicas de biocompósitos para aplicações de engenharia. Nomeadamente o caso em que apenas uma das fases, a fibra, é natural. Pretende-se ainda estudar, numa primeira fase, o método de produção de um biocompósito em que a fase de origem biológica é a matriz, com o intuito de produzir numa segunda fase um compósito 100% natural, biológico e de baixo impacto ambiental.

Para tal, esta dissertação encontra-se organizada em 5 capítulos.

No primeiro capítulo é realizada uma introdução e definição dos objetivos desta dissertação.

No segundo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os principais temas abordados neste estudo, com uma especial incidência para os vários tipos de reforços e de matrizes naturais existentes. É ainda elaborado um estado da arte sobre o desempenho de materiais compósitos de matriz epoxídica reforçados a fibra de cânhamo.

No terceiro capítulo são aplicados métodos analíticos nomeadamente a regra das misturas para a determinação das quantidades expectáveis de matriz a utilizar e a espessura a obter no compósito.

No quarto capítulo é apresentada a parte experimental realizada no corrente trabalho, bem como a determinação das forças necessárias para realização dos ensaios de tração, o módulo de elasticidade e a tensão de rotura expectável dos compósitos.

Por ultimo, no quinto capítulo apresentam-se as conclusões finais e algumas sugestões para realização de trabalhos futuros.

## 1.2 Objetivos

Esta dissertação de mestrado tem como objetivos a pesquisa, seleção, produção e avaliação de materiais compósitos de fibras longas com matrizes poliméricas.

De modo a atingir-se este objetivo este trabalho passa pelas seguintes etapas:

- a) Pesquisa bibliográfica sobre as fibras e matrizes naturais e suas propriedades;
- b) Seleção das fibras e matrizes para a produção de compósitos;
- c) Reunião bibliográfica sobre o estado da arte dos compósitos fabricados com a fibra e matriz selecionada;
- d) Aquisição e produção de compósitos, com e sem vácuo, utilizando fibras sintéticas e fibras naturais;
- e) Caracterização mecânica, à tração, dos provetes produzidos;
- f) Comparação dos dados experimentais obtidos entre si e com a bibliografia consultada.

Paralelamente pretende-se estudar as fibras selecionadas passando pelas seguintes etapas:

- a) Pesquisa bibliográfica das propriedades dos fios referente às fibras selecionadas;
- b) Produção de provetes, seguindo a norma selecionada;
- c) Análise microscópica das fibras;
- d) Caracterização mecânica, à tração dos provetes produzidos;
- e) Análise dos resultados experimentais e comparação destes entre si e com a bibliografia consultada.



## **2. Revisão bibliográfica**

### **2.1 Enquadramento**

Desde cedo que o Homem utiliza materiais naturais, como é o caso das fibras vegetais para a construção de armas, ferramentas, habitações, produtos têxteis, etc. Pode-se verificar que a necessidade de utilizar reforços fibrosos é muito antiga, referindo-se como exemplo o caso citado em referências bíblicas à palha que reforçava os tijolos de barro no antigo Egito (Referencia bíblica Êxodo 5: 7). Considerando que no passado o Homem usou formas naturais destes materiais, os desenvolvimentos e aplicações mais recentes enfatizam a utilização de materiais sintéticos, ou seja, materiais produzidos pelo Homem (Astrom, 1992).

No início do século passado foi introduzido a resina fenólica reforçada com fibras de amianto. O primeiro barco de fibra de vidro foi fabricado em 1942, acompanhado pela utilização de plásticos reforçados em aeronaves e componentes elétricos. O enrolamento filamentar foi inventado em 1946, seguido de aplicações em mísseis na década de 50 do século XX (Isaac & Ishari, 2006).

As primeiras fibras de carbono e de boro foram introduzidas na década de 60, seguido de aplicações de compósitos avançados para componentes de aeronaves em 1968. A partir do final da década de 70, as aplicações dos compósitos expandiram amplamente aos aviões, marinha, automóveis, artigos de desporto e indústrias biomédicas. As fibras de kevlar foram desenvolvidas em 1973. Nos anos de 1980 registou-se um aumento significativo na utilização de fibra de elevado módulo de elasticidade e a década de 90 foi marcada por uma nova expansão do uso de materiais compósitos em aplicações estruturais relativamente importantes (Isaac & Ishari, 2006).

Atualmente existe uma maior investigação nos materiais compósitos naturais e biodegradáveis visto que as pessoas estão cada vez mais consciencializadas com as alterações climáticas, bem como a poluição excessiva do meio ambiente estando assim disponíveis para a promoção de uma maior sustentabilidade para as gerações futuras (Isaac & Ishari, 2006).

## 2.2 Materiais compósitos

Um material compósito corresponde a uma combinação de duas ou mais fases insolúveis e distintas quimicamente, cujas propriedades e desempenho devem ser superiores aos seus constituintes quando atuam isoladamente. Uma das fases do compósito geralmente mais rígida e resistente designa-se por reforço (fase dispersa) enquanto a menos rígida e menos resistente designa-se por matriz (fase contínua). Devido às interações químicas e a efeitos de processamento ocorre a formação de uma outra fase que se chama interfase (Isaac & Ishari, 2006). Na figura 1 é possível ver as fases anteriormente apresentadas.

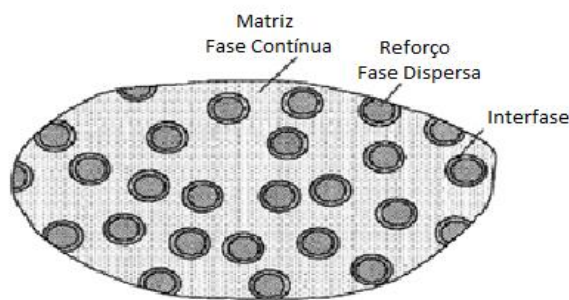


Figura 1- Composição e fases do material compósito, adaptado de (Isaac & Ishari, 2006)

O reforço tem como função suportar as cargas que são exercidas no compósito, suportando entre 70% a 90% da carga. Confere aos compósitos propriedades mecânicas nomeadamente a rigidez, a resistência, a estabilidade térmica e o isolamento elétrico (Vaidya, 2011). Através da variação do tipo de reforço, pode-se obter uma variação apreciável de algumas das principais propriedades dos materiais compósitos (Vaidya, 2011) (Isaac & Ishari, 2006) (Krishnaraj, Prabukarthi, & Ramanathan, 2012).

A matriz tem a função de unir o reforço entre si e transfere as cargas para este. A matriz dá a forma aos compósitos e proporciona uma boa qualidade de acabamento superficial aliada a uma proteção do reforço contra ataques químicos e desgaste. O desempenho do compósito depende do material selecionado para a matriz porque algumas das características, como é o caso da ductilidade e da resistência ao impacto, são influenciadas pelo material da matriz. O modo de falha bem como a compatibilidade com o reforço também são fortemente afetados pelo tipo de material utilizado como matriz (Vaidya, 2011).

### 2.2.1 Classificação dos compósitos

Os compósitos podem ser classificados em quatro grupos principais os compósitos reforçados por partículas, reforçados por fibras descontínuas, reforçados por fibras contínuas e compósitos estruturais, como apresenta-se no fluxograma da figura 2. Pode-se verificar que existem inúmeras combinações para constituir um material compósito (Matthews & Rawlings, 1994).

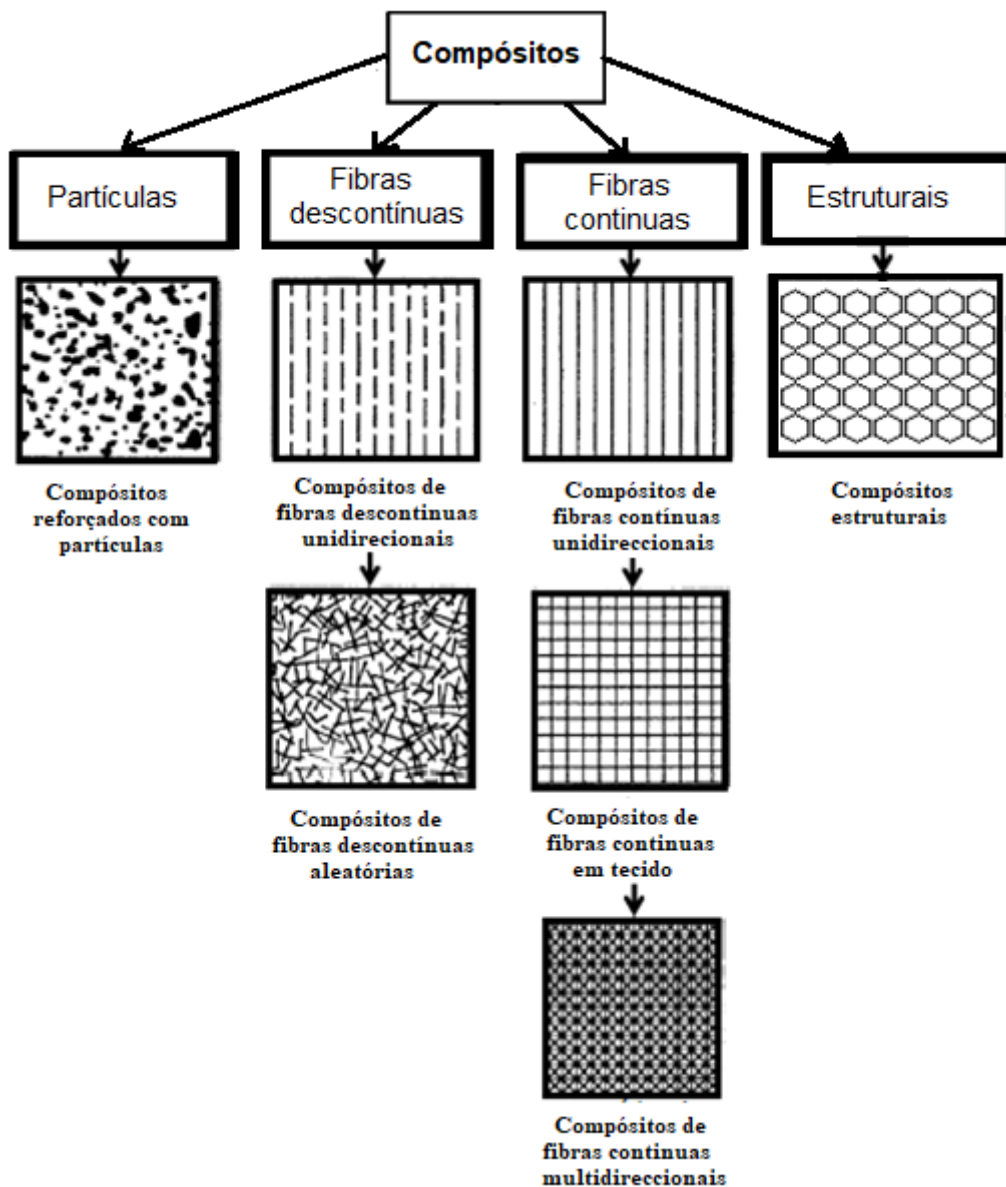


Figura 2- Classificação dos materiais compósitos adaptado de (Daniel & Ishai, 1994)

Um compósito de partículas (figura 3a) pode apresentar as seguintes formas no reforço: esferas, varetas, flocos e muitas outras formas (Adams, Advani, & Alman, 2001). Este tipo de reforço apresenta uma distribuição aleatória pela matriz, permitindo considerar

este tipo de material quase homogêneo, numa escala maior que o tamanho das partículas de reforço (Daniel & Ishai, 1994).

Nos compósitos de fibras descontínuas, também designadas por fibras curtas, as fibras apresentam comprimentos reduzidos (figura 3b). Estas podem ser orientadas numa só direção, tornando o material compósito num material ortotrópico ou podem ser distribuídas aleatoriamente, tornando o material final num material com características quase homogêneas e quase isotrópicas (Daniel & Ishai, 1994).

Os compósitos de fibras contínuas apresentam fibras longas ininterruptas proporcionando melhores propriedades mecânicas nomeadamente a resistência mecânica e a rigidez na direção de aplicação das fibras (figura 3c). Estas fibras podem ser orientadas numa só direção, em duas direções, ou em múltiplas direções, o que fará do produto final um compósito com características quase isotrópicas (Adams, Advani, & Alman, 2001).

Os compósitos estruturais podem ser formados por tecelagem, entrelaçamento, ou tricotando os feixes de fibras para criar fibras que muitas vezes têm orientações ligeiramente ou totalmente ortogonais relativamente ao plano estrutural primário (figura 3 d). Os compósitos estruturais podem ainda ser constituídos por placas com estrutura em ninho de abelha unidas a placas maciças ou placas de sandwich incorporando vários materiais distintos unidos de alguma forma (ex: adesivos). Estes materiais apresentam grande flexibilidade de combinações e propriedades muito variadas (Adams, Advani, & Alman, 2001).

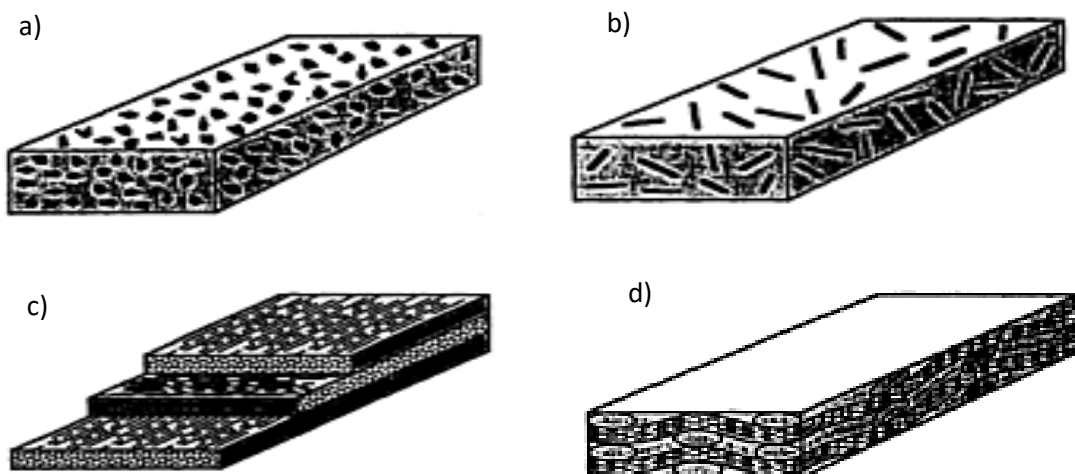


Figura 3- a) Compósitos de partículas; b) Compósitos de fibras descontínuas; c) Compósitos de fibras contínuas; d) Compósitos estruturais (Adams, Advani, & Alman, 2001)

### **2.2.2 Propriedades dos compósitos**

As propriedades de um compósito dependem de vários parâmetros, sendo que três dos principais são as características mecânicas e químicas dos constituintes bem como a resistência da interface entre o reforço e a matriz do compósito (Silva H. , 2014). Outras propriedades dos compósitos igualmente muito importantes prendem-se com o facto de muitos dos compósitos serem heterogêneos e exibirem um comportamento anisotrópico. Um material diz-se heterogêneo se as suas propriedades variarem de ponto para ponto, ou se dependerem da localização (Isaac & Ishari, 2006). Um material diz-se anisotrópico quando as suas propriedades mecânicas, físicas, térmicas ou elétricas variam em função da direção no material.

Habitualmente os materiais compósitos combinam boas propriedades mecânicas com uma baixa densidade e boa estabilidade dimensional (Bourmaud & Baley, 2007).

As propriedades dos compósitos variam tendo em conta vários fatores, sendo eles o tipo de reforço e matriz selecionada, a ligação interfacial, a dispersão e orientação do reforço e o processo de fabrico do compósito.

O reforço é mais resistente e mais rígido do que a matriz e as propriedades do compósito geralmente aumentam com o aumento do teor de fibra, embora dependam da resistência interfacial fibra/matriz. Por vezes pode ocorrer a redução da rigidez em matrizes hidrofóbicas com o aumento do teor de fibra, a menos que os agentes de acoplamento ou algum outro método interfacial seja aplicado. De referir ainda que o módulo de Young aumenta com o teor de fibra (Pickering K. , 2014).

O comprimento das fibras bem como o seu diâmetro são dois fatores que influenciam as propriedades mecânicas dos compósitos. Num compósito com fibras curtas, a carga de tração é transferida para uma fibra a partir da matriz, através do corte na interface fibra/matriz (Matthews & Rawlings , 1999).

A seleção da matriz é uma parte importante de um compósito reforçado por fibras uma vez que proporciona uma barreira contra ambientes hostis, protegendo a superfície das fibras da abrasão mecânica (Holbery & Houston , 2006).

A ligação interfacial entre o reforço e a matriz tem um papel vital nas propriedades mecânicas dos compósitos. A tensão é transferida entre a matriz e o reforço através da interface, portanto uma boa ligação interfacial é necessária para conseguir um reforço

ótimo. É importante salientar que é possível ter uma interface que seja muito resistente e mesmo assim permitir a propagação de fissuras ocorrendo a redução da tenacidade (Chen, *et al.*, 2006). Para os compósitos de fibra de base vegetal geralmente há interações limitadas entre as fibras hidrófilas (fibras com afinidade com a água) e as matrizes geralmente hidrofóbicas (matrizes insolúveis em água), levando a uma má ligação interfacial, limitando o desempenho mecânico, a resistência à humidade bem como as propriedades a longo prazo (Chen, *et al.*, 2006).

A dispersão das fibras tem sido identificada como um importante aspeto que influencia as propriedades dos compósitos de fibras curtas e um desafio particular para os compósitos de fibras naturais, visto que estes são normalmente constituídos por fibras hidrófilas e matrizes hidrofóbicas. A dispersão pode ser influenciada pelos parâmetros de processamento, tais como a temperatura, a pressão e a utilização de aditivos (Sanadi, Caulfield, & Jacobson, 1997).

A orientação das fibras influencia as propriedades dos compósitos. Estas apresentam melhor comportamento quando as fibras são alinhadas paralelamente com a direção da carga aplicada (Amor, *et al.*, 2010) (Herrera-Franco & Valadez-Gonzalez, 2005) (Norman & Robertson, 2003). Verifica-se que é mais difícil conseguir o alinhamento com fibras naturais do que com fibras sintéticas contínuas. Alguns alinhamentos são alcançados durante a moldagem por injeção, dependendo da viscosidade da matriz e da conceção do molde (Joseph, Joseph, & Thomas, 1999).

No processo de fabrico a temperatura, a pressão e a velocidade de processamento afetam as propriedades dos compósitos. É possível ocorrer a degradação das fibras se a temperatura utilizada for demasiada elevada, o que limita a escolha da matriz. O ponto de fusão da matriz tem de ser mais baixo do que a temperatura à qual possa ocorrer a degradação da fibra. Nos compósitos de fibras naturais os processos mais usados são a extrusão, a moldagem por injeção, a moldagem por compressão e moldagem por transferência de resina (abreviado em inglês, RTM) (Angelov, *et al.*, 2007) (Rodriguez, *et al.*, 2005).

### 2.2.3 Vantagens e limitações dos materiais compósitos

Os materiais compósitos apresentam várias vantagens nomeadamente:

- Elevada rigidez específica;
- Elevada relação resistência/densidade;
- Alta resistência à corrosão;
- Boa resistência ao impacto;
- Maior amortecimento às vibrações comparativamente aos metais;
- Possibilidade de produzir peças complexas, com contornos especiais, que por vezes não são possíveis com metais reduzindo assim o tempo de produção;
- Capacidade de integrar vários componentes, permitindo a incorporação de sensores incorporados neles;
- Baixa emissão de fumos e poluentes para o meio ambiente no fabrico de materiais compósitos;
- Baixas pressões e temperaturas na produção de peças (Mazumdar, 2002).

No entanto os materiais compósitos apresentam também algumas limitações, nomeadamente:

- A resistência à temperatura das peças de compósito depende da matriz, sendo que grande parte dos compósitos utiliza matrizes poliméricas e como tal a resistência à temperatura é limitada pelas propriedades destas;
- A resistência a solventes, a resistência a ataques químicos e ambientais dependem das propriedades da matriz uma vez que é a matriz que irá entrar em contacto com estes fatores;
- Os materiais compósitos absorvem a humidade o que afeta as propriedades e a estabilidade dos mesmos;
- Ausência de uma base de dados extensa relativamente às propriedades destes materiais (Mazumdar, 2002).

Há ainda que ter em atenção que, para que haja um reforço eficiente do compósito o módulo de elasticidade e a tensão de rotura da fibra devem ser superiores aos do polímero

a reforçar. Por outro lado o reforço não deverá deteriorar-se em contacto com a matriz e/ou outros constituintes químicos presentes no compósito (Davim, 1998).

#### **2.2.4 Aplicações dos materiais compósitos na indústria**

Os materiais compósitos têm tido cada vez mais aplicações em tudo um pouco que nos rodeia no dia-a-dia, visto que os vários estudos têm permitido um alargamento do conhecimento deste tipo de material contribuindo para uma diminuição do preço e pelo facto de terem adquirido comportamentos mecânicos cada vez melhores associados a uma baixa densidade.

As fibras de vidro aliadas a matrizes de poliéster insaturado são hoje em dia usadas no fabrico de carcaças de automóveis, cascos de barcos, piscinas, silos e tanques, já a resina epoxídica reforçada com fibra de vidro é usada em circuitos impressos e componentes para a indústria eletrónica, como é o caso de placas pré-sensibilizadas. Encontram-se também compósitos à base de fibras celulósicas e resina fenólica aplicados em laminados para o revestimento de móveis e divisórias, engrenagens e circuitos impressos. As fibras de carbono com uma matriz de poliamida são utilizadas frequentemente no fabrico de peças para a indústria aeronáutica e aeroespacial devido à sua resistência a altas temperaturas. As fibras de carbono com uma matriz epoxídica encontram-se bastante em equipamentos de desporto e reatores industriais. Relativamente às fibras de poliamida aromática com resina epoxídica encontram-se aplicações na produção de tubos resistentes a altas pressões para a indústria do petróleo. Também se encontram fibras de poliamida aromática com matriz de poliamida para o fabrico de peças resistentes ao calor para a indústria aeronáutica e aeroespacial (Mano, 1991).

Uma das principais aplicações dos compósitos poliméricos com fibras vegetais tem sido na indústria automóvel (Ashori, 2008) (Wielage & Lampke , 2003), nomeadamente nos painéis das portas, painéis de instrumentos, capas internas do motor, pára-sóis, forros de arranque, filtros do óleo e do ar e encostos dos bancos (Faruk, *et al.*, 2014). O seu uso tem-se igualmente mostrado promissor na construção civil e na produção de produtos de uso geral e desportivo (Santos & Moresco, 2010), como é o caso de barbatanas (Hernandez, *et al.*, 2013), pranchas de surf (Pickering K. , 2008) e canas de pesca (Annabelle, 2014).

Sendo que vários investigadores consideram que o uso de fibras naturais, como reforço em materiais compósitos, apresenta um grande potencial na melhoria do desempenho de polímeros em aplicações tecnológicas (Corradini, Ito, & Marconcini, 2009) (Machado, *et al.*, 2010).

Apesar de serem os materiais compósitos sintéticos os mais utilizados na indústria, os compósitos naturais têm tido uma importância crescente nos últimos anos.

### **2.2.5 Compósitos biodegradáveis**

Como foi referido anteriormente os compósitos biodegradáveis também designados por biocompósitos são materiais compósitos que compreendem uma ou mais fases a partir de uma origem biológica (Fowler, Hughes, & Elias, 2006).

Como materiais de reforço podem-se incluir fibras animais, vegetais ou minerais. As fibras de celulose regeneradas também podem ser incluídas nesta definição se forem provenientes de recursos renováveis (Fowler, Hughes, & Elias, 2006).

Uma propriedade muitas vezes esquecida nos compósitos de fibras naturais é a porosidade, à qual se tem sido reconhecida grande influência sobre as propriedades mecânicas. A porosidade forma-se, devido à inclusão de ar durante o processamento, limitando a absorção de água da fibra levando à baixa capacidade das fibras para compactar (Madsen, Thygesen, & Lilholt, 2009).

A capacidade de absorção da humidade por parte dos compósitos de fibras naturais tem sido limitador ao seu desenvolvimento, esta absorção aumenta com o aumento do teor de fibra e com o aumento da sua temperatura. É influenciada, ainda, pelos tratamentos efetuados às fibras bem como pelo arranjo das mesmas. Esta capacidade está normalmente associada ao inchaço dos compósitos, à perda do seu desempenho mecânico com exceção da energia de impacto. Mesmo com matrizes hidrofóbicas, como é o caso do polipropileno, as propriedades de tração e de flexão dos compósitos de fibras naturais, têm demonstrado um acréscimo considerável, quando estas estão submersas em água durante algumas semanas, havendo ainda um aumento da taxa de degradação em temperaturas mais elevadas (Hargitai, Rác, & Anandjiwala, 2008) (Thwe & Liao, 2003). A absorção da humidade pelas fibras depende ainda do teor de sal. Verifica-se que as

taxas de absorção de água pelas fibras são menores quando expostas a água salgada do que expostas a água destilada (Silva, *et al.*, 2009).

Relativamente às matrizes, estas podem ser polímeros derivados de recursos renováveis como é o caso de óleos vegetais ou amidos (Fowler, Hughes, & Elias, 2006). As matrizes normalmente mais utilizadas, nos compósitos de fibras naturais são as matrizes poliméricas, visto que estas são leves e podem ser processadas a baixas temperaturas (Holbery & Houston, 2006).

Atualmente, os principais mercados para os biocompósitos são o sector da construção e o sector automóvel, sendo que os novos desenvolvimentos e melhorias no seu desempenho levarão a novas oportunidades e aplicações (Fowler, Hughes, & Elias, 2006).

As melhorias no desempenho mecânico dos biocompósitos provem da introdução de novos tipos de fibras, novos processamentos e aditivos, levando a uma expansão na utilização dos biocompósitos (Mohanty, *et al.*, 2004).

De acordo com Albertsson e Karlsson a biodegradação é definida como um fenómeno que ocorre através da ação de enzimas e/ou decomposição química associadas a organismos vivos (bactérias, fungos, etc.). É igualmente necessário considerar as reações abióticas como a fotodegradação, oxidação e a hidrólise que também podem alterar os polímeros (Albertsson & Karlsson, 1994).

Os requisitos básicos para que um material seja considerado biodegradável são os seguintes:

- Biodegradabilidade completa do material, medido por testes respirométricos (Norma ASTM D5338-92 e ISO 14855);
- Não poderá provocar efeitos tóxicos no ambiente;
- Deverá ocorrer a desintegração do material durante a fase de fermentação, ou seja o material tem de ser visualmente indistinguível;
- Deverá ocorrer um controlo de resultados em laboratório na escala piloto, ou seja, o composto com resinas biodegradáveis depois de degradado deverá ser comparado com compostos livres de resinas biodegradáveis (Mohanty, Misra, & Hinrichsen, 2000);

Quando um material biodegradável (figura 4) seja ele polímero puro, produto misturado, ou composto é obtido totalmente a partir de recursos renováveis, pode-se considerar um material polimérico verde (Kaplan, 1998).

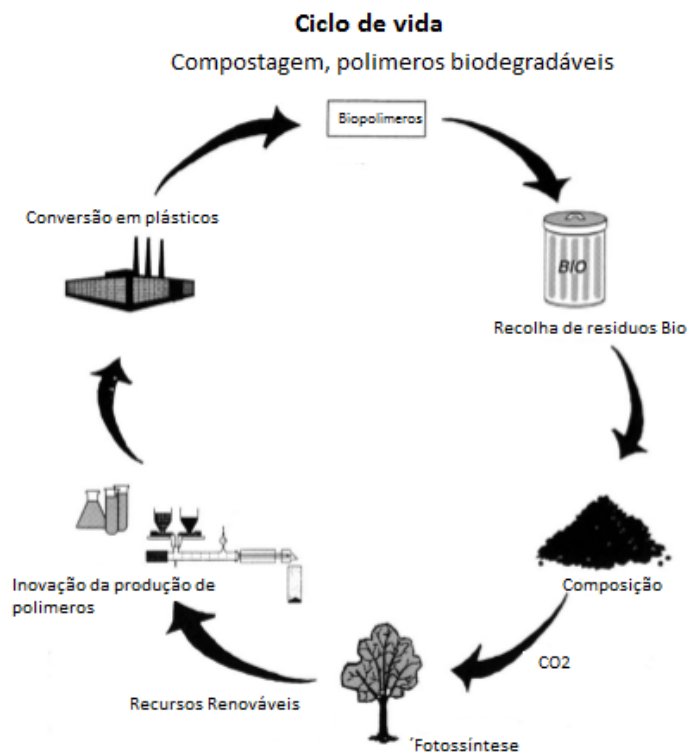


Figura 4-Ciclo de vida dos polímeros, adaptado de (Jiirgen Liircks, 1998)

Os materiais poliméricos provenientes de fontes renováveis oferecem uma solução justificável para manter o desenvolvimento sustentável da economia e do ambiente. As inovações no desenvolvimento dos biopolímeros, a preservação de matérias-primas fósseis, a redução de resíduos, a proteção do clima, redução da libertação de dióxido de carbono e a aplicação de recursos agrícolas para a produção de biomateriais são algumas das razões pelas quais esses materiais têm atraído o interesse público (Lorcks, 1998).

## 2.3 Fibras de reforço

A fibra é um dos componentes estruturais dos compósitos e pode ser classificada em dois grandes grupos, fibras de reforço sintéticas, produzidas pelo Homem e fibras de reforço naturais. As fibras naturais dividem-se em fibras vegetais, ou seja, são fibras extraídas de zonas específicas das plantas, fibras animais e fibras minerais. Após algumas décadas de grande desenvolvimento tecnológico de fibras sintéticas, tem surgido na última década muito interesse na sua substituição, principalmente das fibras de vidro, por fibras naturais, uma vez que as fibras de vidro estão associadas a riscos para a saúde dos trabalhadores destas indústrias.

### 2.3.1 Fibras sintéticas

As principais fibras sintéticas utilizadas como reforço de materiais compósitos são as fibras de vidro, fibras de carbono e ainda as fibras aramídicas. As fibras de vidro são sem dúvidas as mais utilizadas, como reforço de materiais compósitos, estando presentes na esmagadora maioria das aplicações nos mercados de grande consumo. Dado o elevado custo de produção das fibras de carbono e aramídicas, estas apenas são utilizadas em aplicações muito exigentes e específicas (Mazumdar, 2002).

Na tabela 1 apresentam-se algumas das propriedades das fibras sintéticas mais comuns.

Tabela 1- Propriedades mecânicas das fibras sintéticas, adaptado de (Mazumdar, 2002); (Adams, Advani, & Alman, 2001)

<b>Fibras sintéticas</b>						
<b>Fibra</b>	<b>Massa específica [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Resistência à tração [GPa]</b>	<b>Módulo de elasticidade [GPa]</b>	<b>Força específica [GPa/gcm<sup>-3</sup>]</b>	<b>Módulo de elasticidade específico [GPa/gcm<sup>-3</sup>]</b>	<b>Alongamento [%]</b>
<b>Vidro-E</b>	2,55	3,445	70-73	1,35	27	4,8
<b>Vidro-S</b>	2,55	4,5	86	1,8	34,5	5,7
<b>Kevlar 29 (aramídicas)</b>	1,45	2,8	80	1,9	55,5	3,5
<b>Panex (carbono)</b>	1,74	3,6	228	2,1	131	1,5

#### 2.3.1.1 Fibras de vidro

A fibra de vidro está entre os materiais industriais mais versáteis conhecidos, pois são facilmente produzidos a partir de matérias-primas, disponíveis em fornecimento

praticamente ilimitado (Loewenstein, 1993). Grande parte das fibras de vidro derivam de composições que contêm sílica. Apresentam propriedades úteis tais como dureza, transparência, resistência a ataques químicos, bem como resistência mecânica e rigidez (Wallenberger F. , 1999).

Existem vários tipos de fibras de vidro, com designações diferentes sendo distinguidas por uma letra que indica a sua principal propriedade, como se indica na tabela 2.

Tabela 2- Tipos de fibras de vidro (Wallenberger, Watson, & Li, 2001)

<b>Letra</b>	<b>Designação</b>	<b>Propriedade Característica</b>
E	Elétrico	Baixa condutividade elétrica
S	Força	Força elevada
C	Químico	Alta durabilidade química
M	Modulo	Alta rigidez
A	Alcalino	Alto teor alcalino
D	Dielétrico	Baixo constante dielétrica

Quase todas as fibras de vidro contínuas são processadas por estiramento e formadas por extrusão do vidro fundido através de uma feira de liga de platina, que pode conter até vários milhares de orifícios individuais. Embora ainda altamente viscosas, as fibras resultantes são rapidamente estiradas para um diâmetro fino e de seguida solidificam. Os monofilamentos são combinados em fios multifilamentos, onde são enrolados num mandril a velocidades elevadas (Wallenberger, Watson, & Li, 2001).

### **2.3.2 Fibras naturais**

As fibras naturais têm tido uma importância crescente nos estudos devido às suas vantagens relativamente às fibras sintéticas, nomeadamente baixa densidade, alta resistência e elevada rigidez específica. São também um recurso renovável, ou seja, a sua disponibilidade pode ser considerada ilimitada, devido à enorme diversidade de plantas lenhosas e fibrosas existentes (65 mil espécies de plantas vasculares na Amazónia, mais de 6 mil delas provenientes de árvores) (Nechwatal, Mieck, & Reußmann, 2003) (Balzer, *et al.*, 2007) (Carashi & Leao, 2001) (Pukansky, 2005) (Franco & Gonzalez, 2004).

Existe um enorme interesse para a incorporação de novas fibras naturais em compósitos, uma vez que a sua produção requer menos energia e envolve a absorção de CO<sub>2</sub> e o retorno de oxigênio para o meio ambiente.

As fibras naturais podem ser adquiridas a um custo mais baixo relativamente às fibras sintéticas e apresentam uma baixa emissão de fumos tóxicos quando submetidos ao calor. Durante a incineração no fim de vida, exibem danos menos abrasivos para os equipamentos de processamento em comparação com as fibras sintéticas. As fibras naturais representam ainda uma nova fonte financeira para a população rural, podendo evitar os deslocamentos das pessoas do campo para a cidade (Sanadi, Caulfield , & Jacobson , 1997).

Do ponto de vista das limitações as fibras naturais apresentam uma menor durabilidade em comparação com as fibras sintéticas, no entanto podem ser consideravelmente melhoradas com alguns tratamentos específicos. Têm alta absorção de humidade, menor resistências às forças de impacto e as temperaturas de processamento são mais baixas o que limitam as opções das matrizes a utilizar (Mohanty, *et al.*, 2000) (Cao & Wu , 2008) (Lee , Kim , & Yu , 2009) (Li , Tabil , & Panigrahi , 2007) (Mehta, *et al.*, 2005).

### **2.3.2.1 Classificação e propriedades das fibras naturais**

As fibras naturais são normalmente classificadas com base na sua origem, vegetal, animal ou mineral. Todas as fibras vegetais contêm celulose como o seu principal componente estrutural, enquanto as fibras de origem animal contêm proteínas. Na figura 5 apresentam-se os diferentes tipos de fibras naturais existentes.

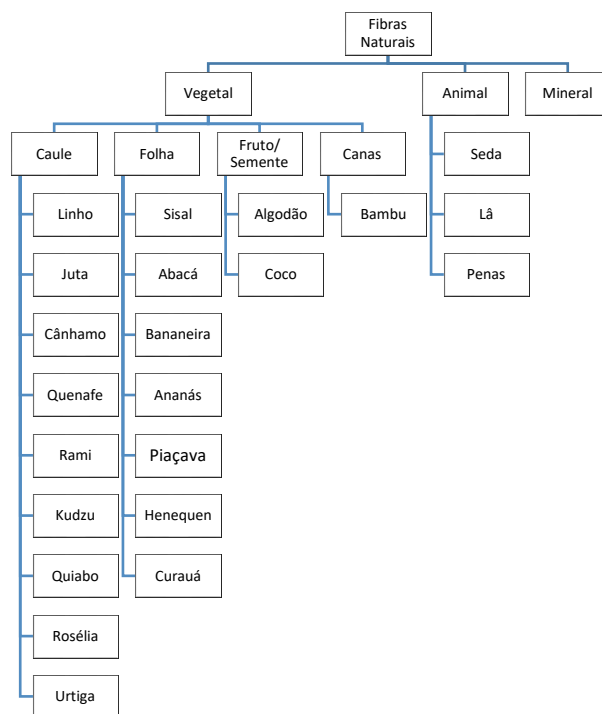


Figura 5- Fibras naturais, adaptado de (Gurunathan, Mohanty, & Nayak, 2015)

As fibras vegetais apresentam melhor desempenho relativamente às fibras de origem animal pois estas fibras naturais geralmente exibem uma resistência e a uma rigidez mais elevadas. A seda constitui uma exceção por ter uma alta resistência e menor rigidez, sendo relativamente cara. As fibras de base vegetal, devido à sua maior resistência são mais adequadas para a utilização em compósitos com requisitos estruturais, comparativamente às fibras de origem animal tendo em conta as suas propriedades, podendo ser cultivadas em variados países sendo recolhidas em curtos períodos de tempo (Shah, Porter, & Vollrath, 2014).

A localização geográfica tem um forte impacto na disponibilidade de utilização das fibras vegetais, verificando-se que na Europa o foco tem sido nas fibras de linho, enquanto na Ásia tem-se utilizado mais fibras de cânhamo, juta, rami, quenafe e sisal (Mustafa, *et al.*, 2015). As condições de crescimento, o tempo de colheita, o método de extração, os tratamentos efetuados e o modo de armazenamento, são fatores que podem influenciar química e estruturalmente a fibra. Por exemplo estudos demonstram que a resistência da fibra reduz-se em 15% se a colheita for realizada após 5 dias do dia ideal (Pickering, *et al.*, 2007) e as fibras de linho extraídas manualmente são 20% mais resistentes que as extraídas mecanicamente (Bos, Van den Oever, & Peters, 2002).

### 2.3.2.2 Fibras de origem animal

No presente as fibras de origem animal têm atraído cada vez mais atenção como potenciais fibras de reforço de alto desempenho. As fibras que são tradicionalmente usadas para o fabrico de peças de vestuário como o caso da lã e da seda foram testadas como reforços para biocompósitos tendo-se obtido resultados satisfatórios (Blicblau, Coutts, & Sims, 1997) (Lee, *et al.*, 2005) (Zhao, *et al.*, 2010).

A lã é um dos principais produtos exportados por vários países como é o caso da Austrália, sendo uma das mais antigas fibras naturais renováveis (figura 6a). A lã é o pelo que cresce naturalmente nos corpos das ovelhas e esta é obtida por cisalhamento, seguida de lavagem e penteamento de modo a remover a sujidade da mesma (Blicblau A. , 1997). Este tipo de fibra é caracterizada pela tenacidade superficial e flexibilidade, sendo menos hidrófilas do que as fibras vegetais.

A seda é produzida por variados animais, sendo eles as aranhas, os escorpiões, os ácaros, as pulgas e ainda os mais conhecidos, por bichos-da-seda (figura 6b). A seda apresenta várias propriedades que fazem dela muito boa na implementação de compósitos. No entanto a qualidade da seda depende consideravelmente da espécie do animal e das condições de fiação. Possuem uma capacidade de esticar até 50% do seu comprimento sem partir permitindo assim a absorção de uma grande quantidade de energia, têm uma boa resistência à tração (Sealy, 2015), a estabilidade térmica é relativamente baixa mas resistem à oxidação e exibem propriedades antibacterianas.

A pena é uma estrutura epidérmica das aves (Richard & Brush, 2002), usada atualmente como fibra estrutural de biocompósitos (figura 6c). As vantagens da sua utilização como biocompósito são a sua baixa densidade devido à sua estrutura oca (Hong & Wool, 2005), baixo custo, força específica aceitável e biodegradabilidade. Como principais limitações apresenta uma elevada absorção de água, fraca resistência contra ataques químicos e baixa resistência à compressão (Cheung, *et al.*, 2009).

Na tabela 3 apresentam-se as propriedades (típicas) de algumas fibras naturais de origem animal.

Os valores apresentados na tabela 3 são meramente indicativos uma vez que existem diversos fatores, já mencionados anteriormente, que provocam uma grande dispersão das propriedades das fibras naturais.

Tabela 3- Propriedades mecânicas das fibras naturais de origem animal (Pickering, Aruan Efendy, & Le, 2016)

Fibras de origem animal							
Fibra	Massa específica [g/cm <sup>3</sup> ]	Comprimento [mm]	Resistência à tração [MPa]	Módulo de elasticidade [GPa]	Força específica [MPa/gcm <sup>-3</sup> ]	Módulo de elasticidade específico [GPa/gcm <sup>-3</sup> ]	Alongamento [%]
Lã	1,3	38-152	50-315	2,3-5	38-242	1,8-3,8	13,2-35
Seda	1,3	Contínuas	100-1500	5-25	100-1500	4-20	15-60
Penas	0,9	10-30	100-203	3-10	112-226	3,3-11	6,9

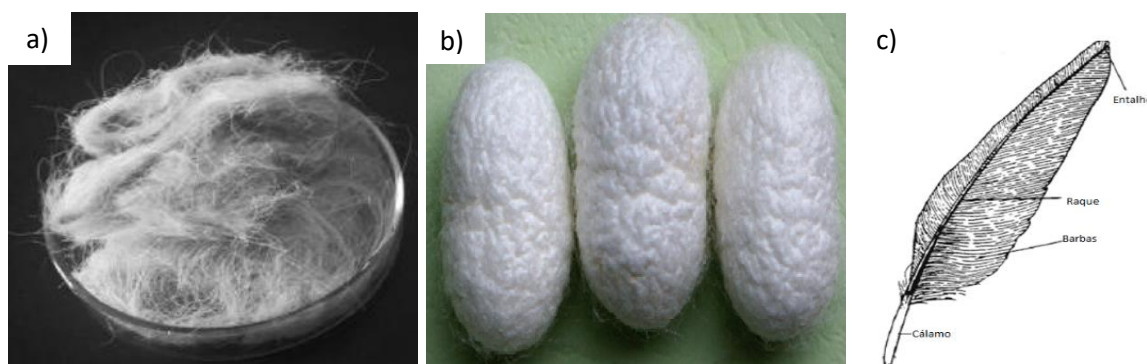


Figura 6-a) Lã; b) Seda; c) Pena de galinha; (Zhang, *et al.*, 2016); (Wang, *et al.*, 2017); (Hoi-yan Cheung, 2009)

### 2.3.2.3 Fibras de origem vegetal

São diversos os tipos de fibras de origem vegetal que podem ser usadas para reforçar matrizes. Localizadas nos diversos órgãos que constituem as plantas, estas fibras vegetais, geralmente crescem em feixes (Schuh, s.d). A maioria dos estudos já realizados estão particularmente focados em fibras vegetais obtidas a partir do caule. Esta escolha deve-se ao facto das suas propriedades mecânicas serem superiores mas também porque as suas fibras são separadas mais facilmente. No entanto, ao contrário das fibras sintéticas, as fibras vegetais têm uma maior quantidade de fatores que influenciam as propriedades mecânicas como é o caso da idade da planta, das condições de crescimento, geográficas e climáticas, bem como dos métodos utilizados na colheita, etc (Summerscales, *et al.*, 2010).

Na tabela 4 apresentam-se as propriedades (típicas) de algumas fibras naturais de origem vegetal.

Os valores apresentados na tabela 4 são meramente indicativos uma vez que existem diversos fatores, já mencionados anteriormente, que provocam uma grande dispersão das propriedades das fibras naturais.

Tabela 4- Propriedades das fibras naturais vegetais, adaptado de (Fuqua, Huo, & Ulven, 2012); (Gurunathan, Mohanty, & Nayak, 2015); (Pickering, Aruan Efendy, & Le, 2016); (Shahzad, 2013)

<b>Fibras de origem vegetal</b>							
<b>Fibra</b>	<b>Massa específica [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Comprimento [mm]</b>	<b>Resistência à tração [MPa]</b>	<b>Módulo de elasticidade [GPa]</b>	<b>Força específica [MPa/gcm<sup>-3</sup>]</b>	<b>Módulo de elasticidade específico [GPa/gcm<sup>-3</sup>]</b>	<b>Alongamento [%]</b>
<b>Linho</b>	1,38-1,54	5-900	345-1830	27-80	230-1220	18-53	1,2-3,2
<b>Juta</b>	1,23-1,5	1,5-120	393-800	10-55	300-610	7,1-39	1-2
<b>Cânhamo</b>	1,35-1,5	5 -55	277 -1110	9,5 -70	370-740	39-47	1,6-4,7
<b>Quenafe</b>	0,749-1,2	1,4-11	223-930	11-60	N. def.	N. def.	2,7-5,7
<b>Rami</b>	1,5	900-1200	400-938	44-128	270-620	29-85	1,2-3,8
<b>Kudzu</b>	N. def.	N. def.	130-418	N. def.	N. def.	N. def.	N. def.
<b>Quiabo</b>	N. def.	N. def.	68-282	5,74-16,55	N. def.	N. def.	2
<b>Rosélia</b>	N. def.	N. def.	147-184	2,76	N. def.	N. def.	11-15
<b>Urtiga</b>	1,51	5,5	650-1594	38-87	N. def.	N. def.	1-6
<b>Sisal</b>	1,20-1,5	900	507-855	1,46-28	362-610	6,7-20	3-15
<b>Abacá</b>	1,5	4,6-5,2	430-813	31,1-33,6	N. def.	N. def.	2,9
<b>Ananás</b>	1,44-1,5	3-8	170-1627	60-82	N. def.	N. def.	0,8-1,6
<b>Bananeira</b>	1,35	0,9	529-914	7,7-32	N. def.	N. def.	1,8-3,7
<b>Piçava</b>	N. def.	N. def.	109-147	1,1-4,6	N. def.	N. def.	6,4-21,9
<b>Henequen</b>	1,2	N. def.	500	13,2	N. def.	N. def.	4,8
<b>Curauá</b>	1,38	N. def.	913	30	N. def.	N. def.	3,9
<b>Algodão</b>	1,5-1,6	10 - 60	287-800	1,1-13	190-530	3,7-8,4	6-9,7
<b>Coco</b>	1,2	20-150	106-220	1,27- 6	110-180	3,3-5	15-59,9
<b>Bambu</b>	0,6-1,1	1,5-4	140-441	11-36	450	N. def.	1,3-8

N. def- Não definido

### 2.3.2.3.1 Fibras obtidas a partir do caule da planta

As fibras obtidas a partir do caule da planta estão associadas ao tecido vascular do floema sendo constituídos por uma única faixa de fibras, com várias camadas de espessura, localizadas na região periférica externa da zona central das plantas da classe dicotiledónea. Estas fibras percorrem todo o comprimento do caule e têm origem na porção inicial do floema primário, amadurecendo como fibra, quando este floema deixa

de ser elemento condutor. Por este motivo estas fibras são de floema primário. Estas fibras são classificadas como fibras macias, visto que são maleáveis e flexíveis (Esau, 1976).

O linho é uma planta que pertence à espécie *Linum Usitatissimum* e à família das lináceas, das regiões temperadas e quentes, ou seja, adapta-se bem nas zonas extratropicais dos dois hemisféricos (figura 7a). O linho semeia-se no princípio da primavera e colhe-se em fins de junho ou julho, deixando-se em seguida secar as hastes em pequenos feixes. Para obter as fibras, procede-se ao curtimento, operação que consiste em mergulhar o linho em água corrente ou expô-lo ao ar livre durante um mês. Procede-se depois à trituração, esta faz-se batendo o linho com maços e em seguida com a espadela (instrumento próprio para preparar o linho, semelhante a uma pequena espada). Segue-se a cardação, que tem por fim desembaraçar o linho formando assim a filaça. A filaça é passada por pentes de dentes finos e de seguida são postas nas rocas para fiar, estas por fim são enroladas em canelas que serão transportadas para os teares dando origem ao linho (Lello, 1988).

As fibras extraídas do linho medem entre 0,2 e 1,4 m de comprimento. São realçadas pela sua excelente resistência à tração, rigidez, durabilidade, resistência à absorção de humidade e ao ataque de microrganismos. Apresentam ainda moderada resistência à abrasão. Embora a sua resistência aumente quando húmidas, o uso excessivo de soluções alcalinas na sua lavagem pode enfraquece-las. Quando comparadas com as fibras de algodão são duas vezes mais resistentes, secam mais rapidamente e degradam-se menos em presença de luz solar. A sua resistência a soluções ácidas diluídas é boa mas, quando estas são concentradas, as fibras degradam-se (Romão, 2003).

A juta é o nome vulgar para a planta tiliácea, *Corchorus Capsularis* (figura 7b). Semeia-se em maio e colhe-se em setembro, antes da maturação do fruto. Os caules são postos em maceração em água corrente e ao fim de alguns dias, as fibras separam-se com facilidade. Os fios obtidos são um pouco brancos, mas escurecem pouco a pouco expostos ao ar (Lello, 1988).

A fibra de juta é uma das fibras provenientes do caule mais conhecida e é a segunda fibra natural mais comum cultivada no mundo (Summerscales, *et al.*, 2010). A juta desenvolve-se na Índia, Bangladesh, China, Nepal, Tailândia, Indonésia e Brasil. Esta pode crescer 2-3,5 m, apresentando grande fragilidade e uma baixa extensão devido ao alto teor de lignina. A resistência à tração das fibras de juta é menor que a do linho e do cânhamo, apresentando ainda pouca resistência à humidade, a ácidos e à luz UV. No entanto, a sua

textura fina, bem como a sua resistência ao calor e ao fogo, permitem uma ampla gama de aplicações (Malkapuram & Kumar, 2008).

O cânhamo é extraído do caule da famosa planta medicinal *Cannabis Sativa* (Callaway, 2004). É uma cultura de primavera e o seu vigor inicial permite-lhe que logo após uma emergência rápida, cobrir o solo em 3 semanas e ao fim de 80 dias atingir cerca de 1,80 m. Não necessita de pesticidas, em contrapartida necessita de uma boa fertilização reagindo bem a estrumeações. A técnica cultural é simples e desenvolve-se quase sem trabalhos de manutenção (Abreu, n.d.). Os feixes de fibras de cânhamo possuem comprimentos compreendidos entre 1 e 3 m (figura 7c) e apresentam elevada rigidez e resistência à tração, comportam-se satisfatoriamente com a presença de humidade, sendo bastante macias e flexíveis no manuseamento. A sua elasticidade é baixa, mas pode ser tratada de modo a ser melhorada apresentando ainda boa resistência à abrasão e elevada durabilidade. Estas fibras possuem uma boa condutividade térmica, elevada resistência à luz solar e excelente afinidade com corantes (Romão, 2003).

O quenafe apresenta mais de 200 espécies de plantas, sendo que a *Hibiscus Cannabinus* desenvolve-se espontaneamente, ou é cultivada em regiões tropicais e subtropicais do globo (figura 7d). É uma planta de rápido crescimento podendo em apenas 3 a 4 meses após serem plantadas apresentar alturas superiores a 3 metros (Ciaramello & Azzini, 1971). Normalmente os feixes de fibra medem cerca de 0,9 m de comprimento e a sua resistência à tração é equivalente à das fibras de juta, por isso muitas das vezes é utilizada principalmente como substituta das fibras de juta. O quenafe apresenta baixa densidade, não é abrasivo durante o processamento, tem elevadas propriedades mecânicas específicas e biodegradabilidade (Pande & Roy, 1998).

O rami muitas vezes designado por urtiga-branca é uma planta da espécie *Boehmeria Nivea* e o seu cultivo ocorre em todo o extremo oriente (figura 7e). Esta fibra é a mais longa, mais larga e mais resistente das fibras têxteis, no entanto a sua preparação é bastante dispendiosa (Lello, 1988). As fibras, na forma de feixes, apresentam entre 1 a 2,5 m de comprimento, dependendo da espécie da planta. O rami é normalmente colhido duas ou três vezes por ano, mas pode ser colhido até seis vezes em boas condições de crescimento. Possui uma elevada resistência à tração específica, baixa elasticidade e uma excelente resistência ao ataque de bactérias, bolor e insetos, sendo também estável em ácidos alcalinos, apresentando ainda elevada suavidade (Yu, *et al.*, 2010).

A fibra de kudzu é proveniente da planta da espécie *Pueraria Thunbergiana*, pode ser colhida principalmente no sul do Japão e no sudeste da China (figura 7f). A fibra de kudzu tem sido utilizada durante séculos para a produção de cestos e roupas. A planta kudzu não comercial tem crescido livremente e em grandes áreas territoriais no sudoeste dos Estados Unidos da América, sendo por isso considerada uma erva daninha. O kudzu desenvolve-se bastante rápido relativamente à vegetação vizinha levando à morte destas, assim leva a que haja ecossistemas ameaçados pelo kudzu, sendo por isso necessário encontrar uma aplicação para este, de modo a aproveitar esse desenvolvimento e assim não ameaçar os ecossistemas onde estão inseridos. Relativamente às suas propriedades mecânicas estas fibras ainda não foram exaustivamente estudadas (Luo, *et al.*, 2002).

O quiabo é uma planta da espécie *Hibiscus Esculentus L*, cultivada em regiões tropicais, e muito quentes sendo ela originária de África (figura 7g). É uma planta anual e pode crescer até 2 metros, sendo considerada uma das espécies de plantas que suporta mais calor (De Rosa, *et al.*, 2010).

A rosélia é uma planta da espécie *Hibiscus Sabdariffa*, sendo uma planta anual que pode alcançar uma altura de 2 a 2,5 metros (figura 7h). Esta é nativa de África ocidental e da Índia, sendo que nos últimos anos a China e a Tailândia têm sido os maiores produtores mundiais. A fibra de rosélia pode ser usada para substituir as fibras de juta, tendo em conta as suas propriedades mecânicas (Luo, *et al.*, 2002).

A fibra de urtiga sendo proveniente da espécie *Urtica Dioica* pode crescer até 2,8 metros (figura 7i). Durante a segunda guerra mundial a urtiga foi amplamente utilizada, no entanto a sua produção diminuiu significativamente nos dias de hoje. Esta apresenta uma notável resistência à tração e módulo de elasticidade sendo por isso considerada uma fibra têxtil de alta qualidade, com excelentes propriedades mecânicas. Uma cultura de urtigas pode perdurar cerca de 8 a 10 anos, relativamente ao seu cultivo esta requer baixa energia e pode ser produzida e processada localmente (Bodros & Baley, 2008) (Bacci, *et al.*, 2009).

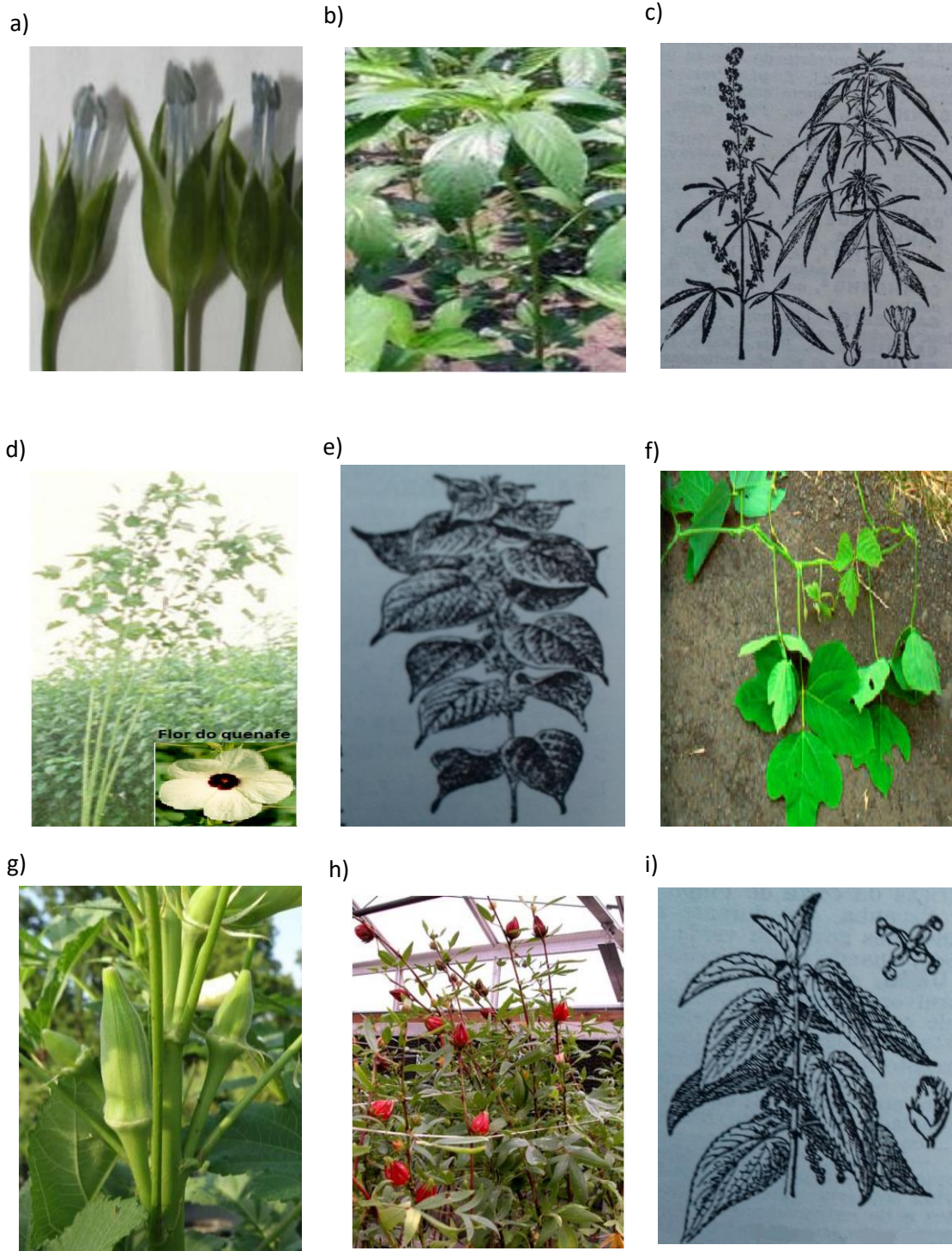


Figura 7- a)Linho (*Linum Usitatissimum*); b)Juta (*Corchorus Capsularis*); c)Cânhamo (*Cannabis Sativa*); d)Quenafe (*Hibiscus Cannabinus*); e)Rami (*Boehmeria Nivea*); f)Kudzu (*Pueraria Thunbergiana*); g)Quiabo (*Hibiscus Esculentus L*); h)Rosélia (*Hibiscus Sabdariffa*); i)Urtiga (*Urtica Dioica L*); (Choudhary, *et al.*, 2017); (Islam M. , 2013); (Lello, 1988); (Webber III, Bhardwaj, & Bledsoe, 2002); (Starr, Martz, & Loope, 1999); (Kumar, *et al.*, 2013); (Qi, Chin, & Malekian, 2005)

### **2.3.2.3.2 Fibras obtidas a partir das folhas de planta**

As fibras provenientes das folhas estão associadas aos tecidos vasculares e são extraídas de plantas monocotiledóneas. Estas são classificadas como fibras duras, porque são ásperas e pouco flexíveis (Esau, 1976).

O sisal é uma planta da espécie *Agave Sisalana* (figura 8a) da família das amarilidáceas, cuja cultura é muito importante em Moçambique, Angola, México e no extremo oriente. Tem uma vida útil de 7-10 anos com cerca de 200-250 folhas, cada uma das quais pode extrair cerca de 1000 feixes de fibras (Li, Mai, & Ye, 2000). A planta cresce até 2 m de altura e o comprimento da fibra do sisal varia entre 0,6 e 1,5 m. As fibras de sisal são caracterizadas pela sua resistência, durabilidade, afinidade para certos corantes e resistência à deterioração em água salgada. No entanto, a resistência à tração, o módulo de elasticidade e a dureza destas diminuem com o aumento da temperatura (Chand & Hashmi, 1993).

O abacá tem algumas designações, sendo elas, cânhamo-de-manila ou bananeira das Filipinas (figura 8b). O abacá é uma espécie da família musaceae e é nativa das Filipinas e do norte da Indonésia, sendo utilizada inicialmente na produção de cordas. A fibra de abacá foi a primeira fibra natural a cumprir os rigorosos requisitos de qualidade para os componentes implementados no exterior dos veículos rodoviários, o que pode ser atribuído à sua resistência à humidade, resistência à exposição dos elementos naturais, durabilidade e elevada resistente à deterioração em água do mar (Marsyahyo, *et al.*, 2008) (Bledzki, Mamun, & Faruk, 2007).

O abacaxi mais propriamente da espécie do *Ananás Comosus* é uma planta tropical que se desenvolve no Brasil (figura 8c). A fibra da folha do abacaxi é caracterizada por ser rica em celulose, relativamente barata e existe em abundancia, podendo ser usada como reforço de matrizes (Marsyahyo, *et al.*, 2008). Estas fibras apresentam boas propriedades mecânicas e alta resistência, obtendo valores ótimos para comprimentos de 30 mm (Thomas, Bhagawan, & Devi, 1997).

A bananeira é própria de climas quentes e húmidos, desenvolvendo-se melhor em planícies próximas do mar e resguardadas do vento (figura 8d). Um dos problemas dos biocompósitos que usam as fibras da folha da bananeira é a homogeneidade do compósito, havendo uma dificuldade em manter a fibra esticada e unidirecional ao longo do compósito (Joseph, *et al.*, 2015) (Navaneethakrishnan, Selvam, & Julyes, 2015).

Experimentalmente A. Bahari *et al* concluíram que o aumento do número de camadas aumenta a resistência à tração, o alongamento à ruptura, o módulo à flexão e a resistência ao impacto, no entanto o módulo de elasticidade à tração mostrou a tendência oposta. A orientação das fibras tem pouco efeito sobre a resistência ao impacto, no entanto relativamente ao módulo de elasticidade à tração, ao módulo à flexão e à resistência à tração as propriedades para compósitos com a mesma orientação de fibra foram melhores do que para compósitos com orientação cruzada (Baharin, *et al.*, 2016).

As fibras de piaçava, planta da espécie da *Attalea Funífera* são extraídas das folhas de palmeiras que se desenvolvem no Brasil (figura 8e). Estas fibras são normalmente utilizadas para o fabrico de vassouras industriais e domésticas, bem como coberturas e tapetes (Bacci, *et al.*, 2009). As propriedades desta fibra relativamente à tração são inferiores comparativamente às fibras de juta e sisal (Monteiro, de Deus, & D'Almeida, 2005). No entanto, as suas propriedades mecânicas são comparáveis às da fibra de coco.

O henequen pertence à espécie da *Agave Fourcroydes*, ou seja, pertence à família do sisal, no entanto não tem tanta qualidade como este (figura 8f). O henequen cresce nas regiões tropicais de África, América Central e do Sul bem como na Ásia (Valadez-Gonzalez, 1999). As fibras de henequen são lisas, estreitas, e degradam-se facilmente com a água salgada, apresentando baixo módulo de elasticidade e alongamento, no entanto têm uma boa dureza e resiliência (Bismarck, Mishra, & Lampke, 2005).

O curauá pertence à espécie do *Ananás Erectifolius* sendo uma planta amazónica que cresce em zonas semiáridas (figura 8g), esta planta apresenta folhas duras e pode atingir uma altura de 1.5 a 1.7 metros (Luo, *et al.*, 2002). A fibra de curauá tem atraído uma atenção crescente desde que começou a ser amplamente utilizada na indústria automóvel nos anos 90. Relativamente ao comportamento mecânico destas fibras pode-se dizer que apresentam um elevado módulo de elasticidade e boa resistência à tração (Tomczak, Satyanarayana, & Sydenstricker, 2007).

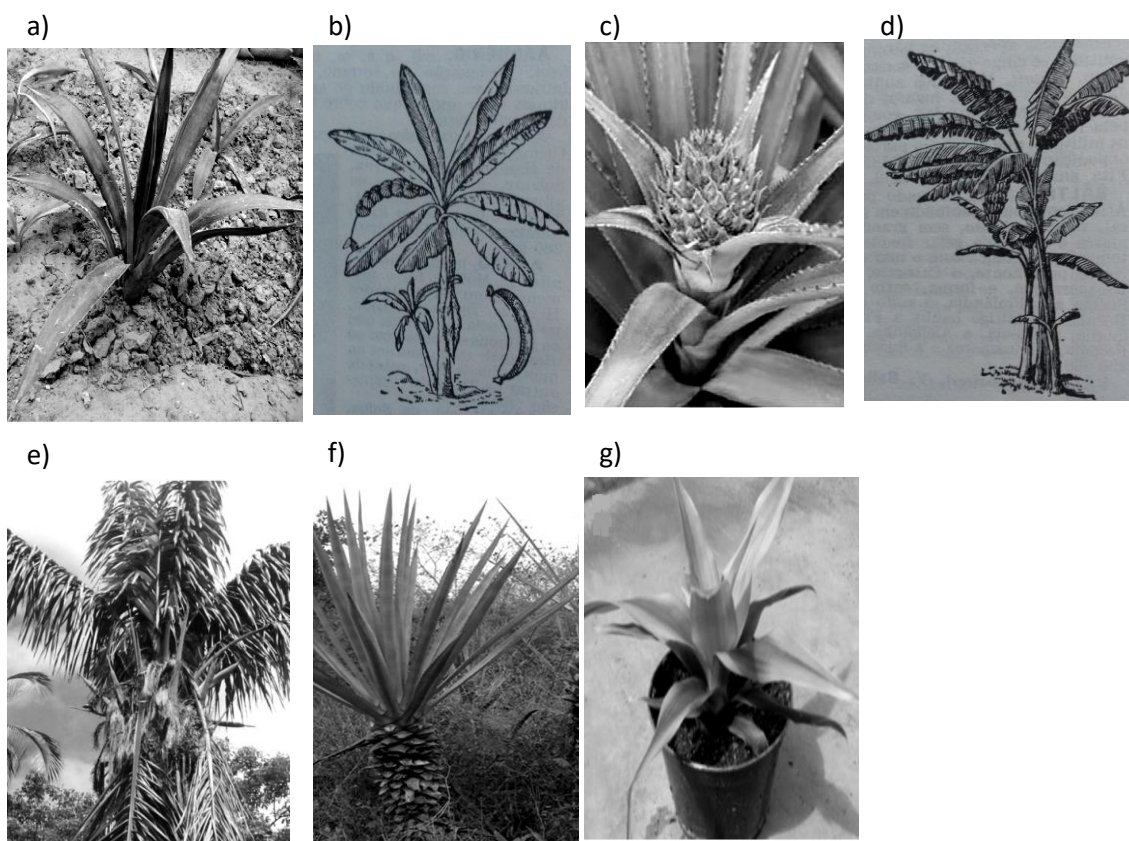


Figura 8- a)Sisal (Agave Sisalana); b)Abacá (Musa Textilis); c)Fibra da folha do abacaxi (Ananas Comosus); d)Fibra da folha da bananeira (Musa Indica); e)Piaçava (Attalea Funífera); f)Henequen (Agave Fourcroydes); g)Curauá (Ananas Erectifolius); (Debnath, *et al.*, 2010); (Lello, 1988); (Zhang, *et al.*, 2016); (Elzubair & Suarez, 2012); (Prieto, *et al.*, 2014); (Moreira, *et al.*, 2016)

### 2.3.2.3.3 Fibras obtidas a partir da semente/fruto da planta

Para além das fibras provenientes dos caules e das folhas das plantas é possível também usar as fibras extraídas das sementes e dos frutos. Nas sementes as fibras são retiradas da capsula protetora destas, enquanto as fibras extraídas dos frutos são provenientes da casca que o compõem.

O algodão é a penugem longa e sedosa que envolve a semente do algodoeiro (figura 9a). O algodão é proveniente de Africa, da América do Sul e ainda de países asiáticos como o caso da Índia (Lello, 1988). As fibras de algodão crescem a partir da camada epidérmica da semente, sob a forma de fibras individuais, formando uma cobertura densa sobre a superfície da mesma. São macias e apresentam elevada resistência à deformação e degradação térmica. Possuem ainda uma resistência à abrasão satisfatória. São resistentes em contacto com soluções alcalinas e com a maior parte dos solventes orgânicos, possuindo ainda uma elevada resistência à deterioração por exposição solar. Contudo, degradam-se na presença de ácidos diluídos a quente ou com ácidos concentrados à

temperatura ambiente (Romão, 2003). O desempenho mecânico desta fibra é relativamente baixo, em parte devido ao grau de orientação das fibras (Bledzki, Fink, & Specht, 2004).

A fibra de coco é uma fibra natural extraída da casca de coco (figura 9b), mais propriamente entre o reservatório interior (duro) e o revestimento exterior do coco, e pode ser encontrada nas árvores de coco que desenvolvem-se em ambientes tropicais (Satyanarayana, Kulkarni, & Rohatgi, 1981). As fibras de coco são fibras económicas (Geethamma, *et al.*, 1998), ásperas, grosseiras e rígidas, medindo entre 0,1 e 0,3 m, sendo constituídas por fibras mais pequenas continuamente sobrepostas. Possuem baixa condutividade térmica, boa resistência ao impacto, às bactérias e à humidade. Apresentam mais baixa densidade que todas as outras fibras naturais, são frágeis, exibindo baixa resistência e elasticidade, com tendência para encardar. São resistentes à abrasão e podem ser facilmente tingidas. Tendo em conta as suas propriedades a fibra de coco é um material versátil e perfeitamente indicado para os mercados dos isolamentos (Biswas, Kindo, & Patnaik, 2011).

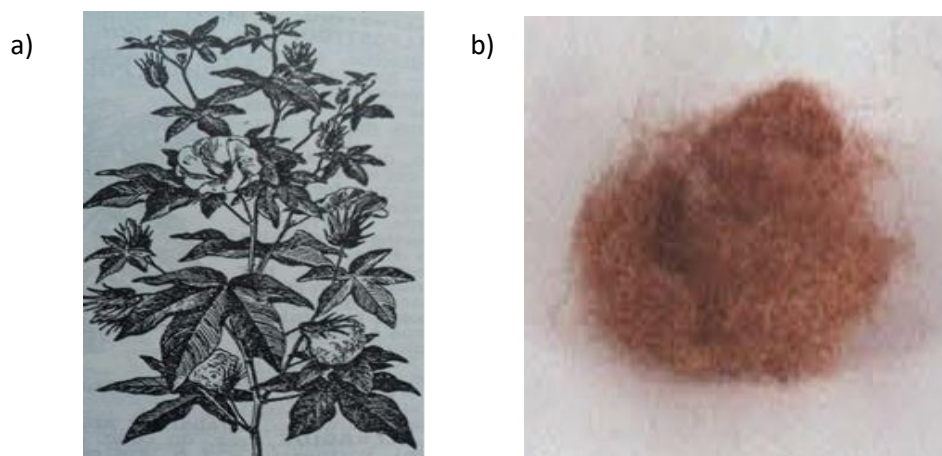


Figura 9- a)Algodão (*Gossypium Barbadense*); b)Coco (*Cocos Nucifera*); (Lello, 1988); (Romão, 2003)

#### **2.3.2.3.4 Fibras obtidas a partir da cana de plantas**

Também é possível utilizar fibras provenientes da cana de uma planta, mais propriamente da estrutura do bambu. Apesar da altura atingida por este tipo de planta por norma estas fibras são utilizadas como fibras curtas nos compósitos.

A fibra de bambu é do género *Bambusa* e é uma planta duradoura, que cresce até 40 metros de altura e desenvolve-se em climas húmidos nos países asiáticos e na América do Sul (figura 10). A planta de bambu tende a atingir o seu tamanho maduro entre seis a oito meses, com alguma variação entre as espécies (Faruk, *et al.*, 2012). O bambu apresenta inúmeras espécies, existindo cerca de mil espécies distintas identificadas em todo o mundo. O bambu é muito utilizado em mobiliário na indústria têxtil e do papel, apresentando algumas características propícias no desenvolvimento de compósitos (Chen, Guo, & Mi, 1998).



Figura 10- Bambu (Lello, 1988)

#### **2.3.2.4 Composição química e estrutural de fibras naturais vegetais**

As fibras vegetais elementares são constituídas por várias paredes celulares que cercam um lúmen central. As fibras vegetais apresentam varias paredes secundárias espessas, que se desenvolvem sobre as paredes primárias depois destas terem completado o seu processo de crescimento em extensão (figura 11) (Romão, 2003). Estas paredes são constituídas por fibras de celulose, ou seja, microfibrilas de celulose rígidas e unidas por uma matriz de lignina amorfa. A hemicelulose encontrada nas fibras naturais serve como um compatibilizador entre a celulose e a lignina (Hansen & Bjorkman, 1998). A parede celular de uma fibra não é considerada uma membrana homogênea, ou seja, devido à sua constituição complexa é considerado um material compósito (Rong, *et al.*, 2001). Para além dos três principais constituintes mencionados, algumas fibras vegetais podem também ser compostas por pectina, ceras e gorduras (Kaith & Kaur, 2011).

Na figura 11 apresenta-se uma configuração esquemática da estrutura das fibras vegetais e uma constituição mais pormenorizada da configuração de uma microfibrila.

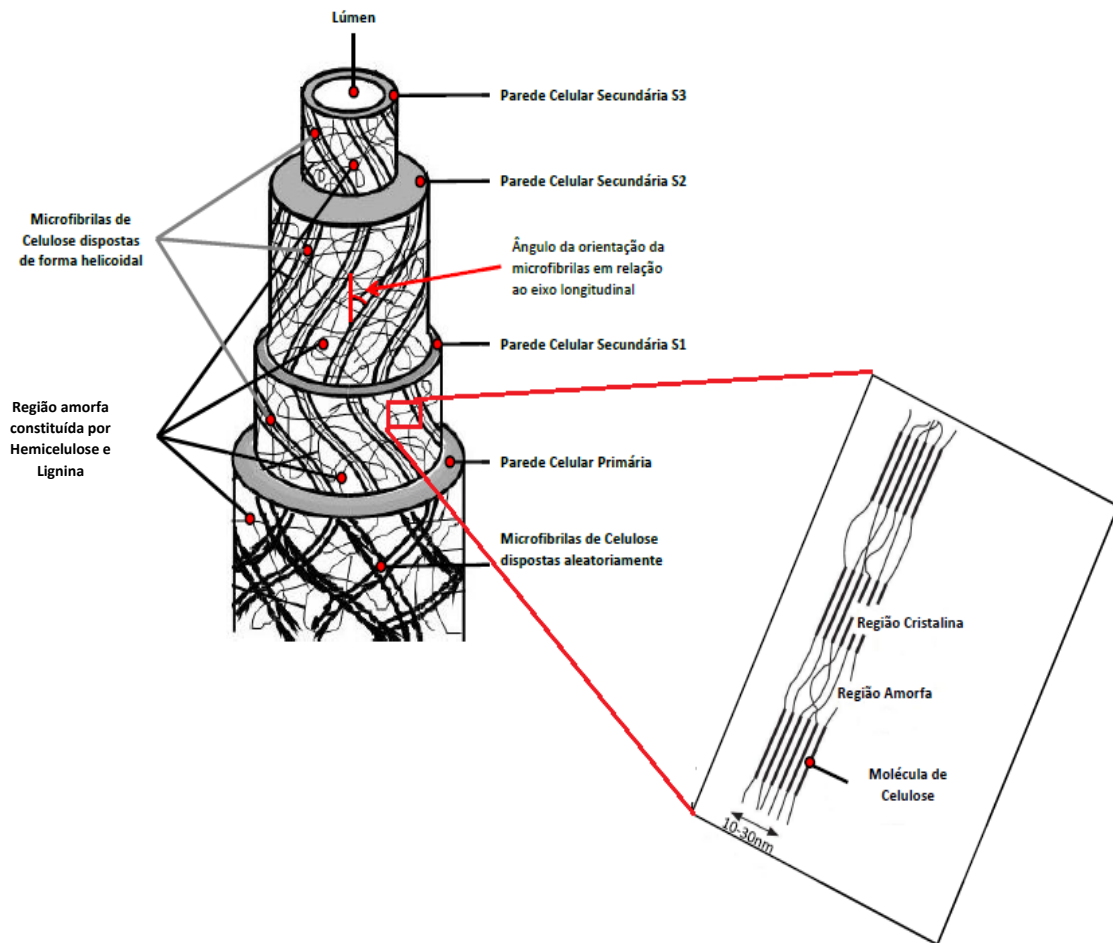


Figura 11- Fibra natural elementar adaptado de (Castro B. , 2013); (Eichhorn, Hearle, & Jaffe, 2009)

O principal composto da parede celular é a celulose, sendo esta a principal responsável pelas propriedades mecânicas das fibras. A celulose é uma macromolécula linear constituída por vários monómeros de glicose ( $C_6H_{11}O_5$ ) muito resistente a soluções alcalinas, pouco resistente em meios ácidos e é moderadamente resistente a agentes oxidantes (Mohanty, Misra, & Drzal, 2005). A hemicelulose é muito hidrófila, solúvel em soluções alcalinas e pouco resistente a soluções ácidas. A lignina é resistente a ácidos e pouco resistente a soluções alcalinas, sendo a responsável pela rigidez das plantas. Para além disso a lignina apresenta uma estrutura amorfa e hidrofóbica (Mohanty, Misra, & Drzal, 2005).

A parede celular primária é constituída por uma rede irregular de microfibrilas de celulose embebidas numa matriz de proteínas, hemicelulose e pectina. As microfibrilas de celulose

estão muito entrelaçadas, apresentando uma disposição intercalar, sendo por isso muito porosa (Mohanty, Misra, & Drzal, 2005).

A parede celular secundária é constituída basicamente por celulose, é mais espessa e cristalina, menos hidratada e mais dura que a primária. Normalmente é constituída em três camadas (S1, S2 e S3). A camada S2 tem maior espessura e tem maior teor de celulose sendo a mais importante e a que determina as propriedades das fibras nomeadamente a deformação à rotura, o módulo de elasticidade e a resistência à tração (Baillie, 2004).

As microfibrilas da parede celular secundária encontram-se aproximadamente paralelas entre si, e inclinadas relativamente ao eixo longitudinal da fibra. Este ângulo de orientação varia de planta para planta (Kaith & Kaur, 2011).

Na tabela 5 apresenta-se a composição química de algumas fibras. É necessário destacar que as percentagens apresentadas são meramente indicativas, visto que estes valores dependem de diversos fatores, nomeadamente dos procedimentos analíticos de cada laboratório, da origem geográfica e grau de maturidade da planta, condições do solo e fertilizantes aplicados, humidade, temperatura, parte da planta de onde foi extraída a fibra e como foi extraída, entre outros.

Tabela 5- Composição química de fibras naturais (Fuqua, Huo , & Ulven , 2012)

<b>Fibra</b>	<b>Celulose (%)</b>	<b>Hemicelulose (%)</b>	<b>Lignina (%)</b>
<b>Linho</b>	71–81	18,6–20,6	2,2–3
<b>Juta</b>	61–73,2	13,6–20,4	12–16
<b>Cânhamo</b>	70,2–74,4	17,9–22,4	3,7–5,7
<b>Quenafe</b>	28–39	21,5–25	15–22,7
<b>Rami</b>	68,6–76,2	13,1–16,7	0,6–1
<b>Kudzu</b>	33	11,3	14
<b>Quiabo</b>	46,6–49,3	17,4–19	11,3–14
<b>Rosélia</b>	70,2	7,2	14,9
<b>Urtiga</b>	79–83,6	6,5–12,5	3,5–4,4
<b>Sisal</b>	56,5–78	5,6–16,5	8–14
<b>Abacá</b>	60,4	20,8	12,4
<b>Banana</b>	63–67,6	19	5
<b>Ananás</b>	70–82	0	5–12,7
<b>Piaçava</b>	31,6	n.d.	48,4
<b>Henequen</b>	77,6	4–8	13,1
<b>Curauá</b>	73,6	9,9	7,5
<b>Algodão</b>	82,7–92	5,7–6	0
<b>Coco</b>	32–47	0,3–20	31–45
<b>Bambu</b>	48,2–60,8	25,1	2,1–32,2

As propriedades mecânicas das fibras estão relacionadas com as propriedades químicas apresentadas. De uma forma geral pode-se dizer que a resistência à tração e o módulo de elasticidade das fibras aumentam com o aumento da quantidade de celulose. O ângulo de orientação das microfibrilas em relação ao eixo longitudinal determina a rigidez das fibras. As fibras vegetais apresentam maior ductilidade quanto maior for o ângulo de orientação das microfibrilas. Também se observa maior rigidez e elevada resistência à tração quando as microfibrilas estão orientadas quase paralelamente ao eixo longitudinal da fibra (Mohanty, Misra, & Drzal, 2005).

### **2.3.2.5 Cânhamo**

Devido às excelentes propriedades mecânicas exibidas pelas fibras de cânhamo selecionou-se este tipo de fibras para a incorporação nos compósitos a produzir e a avaliar no corrente estudo.

O cânhamo dito industrial é uma variante da canábica (*Cannabis Sativa*), cultivado pelas suas hastes e pelas suas sementes, dada a sua proximidade com a *Cannabis Indica* (marijuana), a regulamentação desta cultura é muito restrita. Assim estas duas variedades variam unicamente nos seus teores de THC (TetraHidroCannabiol) que vai desde 0,2% nas variedades autorizadas a mais de 10% para as variedades utilizadas como droga (Abreu, n.d.).

O ciclo da cultura desta planta dura aproximadamente 110 a 120 dias, entre abril/maio e agosto, sendo que a fase de crescimento ativo dura perto de 6 semanas. São privilegiadas as variedades precoces para a colheita do grão (semente) e as variedades de ciclos mais longos para recolher a palha. A sementeira é uma etapa fundamental para o sucesso desta cultura, devendo ser realizada numa terra quente e bem seca com uma boa preparação do solo para favorecer um bom desenvolvimento. A alta densidade de sementeiras favorece a colheita de fibras, visto que é mais propício ao desenvolvimento do caule do que das folhas. O cânhamo é uma cultura que não é exigente em água, no entanto numa fase inicial é importante para o crescimento ativo (Abreu, n.d.).

A primeira fase do processo de transformação do cânhamo em fibras é a da colheita das plantas podendo esta ser efetuada manualmente ou mecanicamente.

A extração manual é efetuada em vários passos, após a operação de corte os caules de cânhamo são deixados a secar no campo, procedendo-se seguidamente à limpeza das hastes, removendo as folhas. De seguida procede-se à maceração, no qual ocorre a

degradação biológica que provoca a solubilização das substâncias incrustantes (pectina e lignina). Esta solubilização facilita a separação da fibra da parte palhosa do caule. O processo de maceração consiste na imersão das hastes do cânhamo em água, durante um período de aproximadamente oito dias. O tempo de maceração é bastante importante, pois irá influenciar diretamente as propriedades das fibras. Depois de terminar este processo é necessário proceder novamente à secagem. Para terminar é efetuada a gramagem que tem por objetivo a separação efetiva da fibra da parte palhosa do caule, sendo composta por duas operações: a primeira consiste no esmagamento da parte palhosa e a segunda na separação da fibra em pequenos pedaços resultantes da operação anterior (Romão, 2003).

#### **2.3.2.5.1 Tratamentos/ modificação das fibras de cânhamo**

Como já referido anteriormente na secção 2.2.2 e na secção 2.2.5 umas das principais limitações das fibras naturais utilizadas no reforço dos materiais compósitos são a difícil compatibilidade entre a fibra e a matriz e o elevado grau de absorção de humidade. Assim sendo, quando se pretende utilizar fibras naturais é muitas vezes necessário alterar as propriedades da superfície da fibra de modo a melhorar a sua adesão com diferentes matrizes (Faruk, *et al.*, 2012). Um outro fator preponderante que leva aos tratamentos das fibras naturais é a sua fraca resistência a elevadas temperaturas. Como as fibras naturais são misturas heterogêneas de materiais orgânicos, as temperaturas elevadas podem provocar alterações físicas e químicas das mesmas. As alterações físicas estão relacionadas com variações no peso, cor, cristalinidade e orientação do ângulo das microfibrilas (Yang & Kokot, 1996). As alterações químicas relacionam-se com a decomposição dos vários constituintes químicos. A degradação térmica das fibras naturais resulta na alteração do odor e da cor mas também na deterioração das propriedades mecânicas das fibras naturais (Shahzad, 2013).

As fibras de cânhamo não tratadas apresentam quatro estágios de decomposição quando expostas a elevadas temperaturas. Aos 60°C ocorre perda de humidade, dando-se posteriormente três reações exotérmicas, aos 323°C (devido à degradação da hemicelulose), aos 439°C (devido à decomposição da celulose) e por fim aos 464°C (devido à oxidação de produtos voláteis e carbonizados) (Islam, Pickering, & Foreman, 2011). Qualquer tratamento térmico destas fibras deve ser restrito a cerca de 150°C, visto que a degradação inicia-se entre os 150-200°C (Shahzad, 2013). Na tabela 6 apresentam-

se as temperaturas praticadas no processamento das fibras de cânhamo em variados procedimentos.

Tabela 6- Temperaturas praticadas no processamento de compósitos de fibras de cânhamo

<b>Processo Utilizado</b>	<b>Temperaturas</b>	<b>Referência</b>
Misturador	170°C	(Lopez, <i>et al.</i> , 2012)
Tratamento químico	160°C	(Lopez, <i>et al.</i> , 2012)
Tratamento térmico	100°C, 150°C, 200°C	(Shahzad, 2013)
Moldagem por compressão	195°C	(Baghaei, <i>et al.</i> , 2014)
Tratamento químico	120°C	(Islam, Pickering, & Foreman, 2011)
Tratamento químico e secagem	50°C, 80°C	(Lu & Oza, 2013)
Análise termo-mecânica	30°C a 175°C	(Lu & Oza, 2013)
Moldagem por Compressão	120°C e 180°C	(Landro & Janszen, 2014)
Moldagem por Compressão	110°C	(Rouison, Sain, & Couturier, 2006)
Tratamento químico e secagem	100°C e 105°C	(Sèbe, <i>et al.</i> , 2000)

Pode-se constatar através dos valores apresentados na tabela 6 que as temperaturas não ultrapassam os 200°C, no entanto muitos são os valores que estão dentro do intervalo 150-200°C, o que significa que estão muito perto de sofrer degradação.

Os tratamentos físicos das fibras mais usados são os tratamentos térmicos, de corona e de plasma.

O tratamento térmico usado habitualmente consiste em colocar as fibras dentro de um forno ou autoclave de modo a fornecer calor, com o objetivo de secar as fibras. As temperaturas praticadas variam entre 60 e 200°C dependendo do tipo de fibra. O tempo de duração do tratamento deve ser o menor possível para que seja o mais económico.

O tratamento com corona é uma das técnicas mais interessantes para a ativação da oxidação superficial das fibras. Este processo consiste na alteração da energia superficial das fibras de celulose quando se faz passar o tecido por entre dois elétrodos num meio gasoso (Lopes S. , 2012). Faruk *et al.* verificaram que o tratamento de descarga de corona sobre fibras de celulose e matriz hidrofóbica é eficaz para a melhoria da compatibilização entre fibras hidrófilas e uma matriz hidrofóbica (Faruk, *et al.*, 2012).

O tratamento com plasma é outro método de tratamento físico e é muito semelhante ao tratamento com corona. Sendo os plasmas iônicos criados através de uma variedade de gases (He, Ar, Kr, Ne, NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>) (Lopes S. , 2012), estes irão promover a quebra de ligações químicas e o surgimento de radicais livre, aumentando assim a energia livre de superfície, proporcionado por isso a melhoria da compatibilização entre as fibras e a matriz (Salmoria, Martins, & Fucio, 2013).

Os tratamentos químicos das fibras mais usados são os tratamentos de mercerização, de acetilação, de silanização, de acoplamento maleico e enzimático.

A mercerização é um tratamento alcalino, sendo provavelmente o mais popular processo de modificação química de fibras naturais e o mais simples de execução, por isso, foi mais aprofundado relativamente aos outros tratamentos. A hemicelulose é solúvel em baixa concentrações de álcalis e nessas condições, a lignina sofre hidrólise básica. Este tratamento aumenta a rugosidade da superfície da fibra e melhora a aderência mecânica (Arrakhiz, *et al.*, 2012) (Lopes, *et al.*, 2008).

A mercerização depende da concentração da solução alcalina utilizada, da temperatura e do tempo de duração do tratamento. Quando a fibra mercerizada é adicionada a uma matriz polimérica, a adesão ocorre pelo mecanismo de ancoragem mecânica da fibra, resultando em um maior contato físico entre os dois materiais (Tita, Paiva, & Frollini, 2002).

O uso de KOH, LiOH e NaOH, (Lopes, *et al.*, 2008) (Arrakhiz, *et al.*, 2012) levam ao aumento da quantidade de celulose amorfa na fibra, devido ao enfraquecimento da ligação de hidrogênio na estrutura molecular da celulose, que se apresenta sob a forma de rede (Ichazo, *et al.*, 2001) (Joseph, Thomas, & Pavithran, 1996) (Li, Tabil, & Panigrahi, 2007). Em presença de água, a estrutura celulósica sofre inchamento, o que acaba por alterar a sua cristalinidade (de monoclinica para polimórfica) (Fowler , Hughes, & Elias, 2006). O grau de inchamento e conseqüentemente o tipo de estrutura cristalina obtida dependem do tipo e da concentração da substância alcalina usada no tratamento (Weyenberg, *et al.*, 2006).

Zhang J. *et al.* através da normalização e utilização de múltiplas variáveis concluíram que as condições ótimas de tratamento alcalino são um tempo de tratamento de 5 h e uma dosagem alcalina de 10 g / L. Tais condições fazem com que as fibras de cânhamo apresentem as melhores propriedades possíveis (Zhang, Zhang, & Zhang, 2014).

Lu e Oza trataram as fibras de cânhamo utilizando 5% em massa de solução de NaOH. As fibras foram imersas na solução de NaOH durante 16 h a 50°C e depois lavadas com água destilada até o pH se tornar neutro. As fibras de cânhamo foram então secas no forno a 80°C durante 10 horas e armazenadas em estufas antes da preparação do compósito, tendo-se concluído que a estabilidade térmica dos compósitos melhorou drasticamente após a modificação química das fibras (Lu & Oza, 2013).

No processo de Baghaei *et al.* as fibras de cânhamo foram tratadas com uma solução de NaOH a 4% em massa durante 1 hora, de seguida foram enxaguadas com água destilada até o pH se tornar neutro e finalmente foram secas à temperatura ambiente durante 48 h. Foi observado que os compósitos de PLA com fibras de cânhamo tratadas com o processo alcalino proporcionou uma melhoria das propriedades mecânicas em comparação com os compósitos de PLA com fibras de cânhamo não tratadas (Baghaei, *et al.*, 2014).

A acetilação é um método de modificação da superfície das fibras que visa torná-las mais hidrofóbicas (Li, Tabil, & Panigrahi, 2007). Estes tratamentos ocorrem pela reação de esterificação do grupo hidroxila dos constituintes da fibra (hemicelulose, lignina e celulose) com o grupo acetil (CH<sub>3</sub>CO). O grupo hidroxil (OH) dentro das estruturas cristalinas da fibra possui interações muito fortes com a água, que impedem a aproximação do reagente de acetilação. A celulose, embora seja o componente principal de muitas fibras, possui uma estrutura cristalina muito apertada, o que deixa as hidroxilas da sua estrutura protegidas de ataque de agentes químicos. Por isso, o processo de acetilação é mais efetivo em fibras ricas em lignina (Albinante, Pacheco, & Visconte, 2013).

A silanização é um tratamento químico com compostos de silício, cujas moléculas apresentam em uma das extremidades, um grupo terminal hidrofóbico, podendo levar ao desenvolvimento de interações do tipo van der Waals com a matriz do compósito, e na outra extremidade, um grupo hidrofílico, o qual pode reagir com os grupos OH da fibra, formando uma ponte. A reação do silano depende da temperatura e do pH (Ichazo, *et al.*, 2001) (Bonelli, Elzubair, & Suarez, 2005). A silanização promove a união entre as fases orgânicas e inorgânicas, levando a uma melhoria das propriedades mecânicas da fase inorgânica (Wilson, Zhang, & Antonucci, 2005). A silanização reduz ainda a degradação por hidrólise, evitando a penetração de água na interface fibra/matriz (Matinlinna, Lassila, & Vallittu, 2007).

Atualmente, o acoplamento maleico é amplamente utilizado para fortalecer compósitos reforçados com fibras naturais. O anidrido maleico não só é usado para modificar a superfície das fibras, mas também a matriz polimérica de modo a conseguir uma melhor ligação interfacial entre fibra e matriz, sendo essa a grande diferença fundamental comparativamente a outros tratamentos químicos. Observa-se que com este tratamento as propriedades mecânicas dos compósitos melhoram, existindo alguns estudos publicados em que o efeito do enxerto de anidrido maleico sobre as propriedades mecânicas das fibras naturais tem sido investigadas (Faruk, *et al.*, 2012). O modo de aplicação do processo é igualmente simples, as fibras são colocadas num banho de anidrido maleico durante um determinado tempo e de seguida as fibras são lavadas com água destilada de modo a retirar os materiais que não reagiram (Becker, Kleinschmidt, & Balzer, 2014).

O uso da tecnologia enzimática está se a tornar cada vez mais substancial para o processamento de fibras naturais (Faruk, *et al.*, 2012). Existe uma grande variedade de enzimas estas são proteínas que catalisam reações, apresentando características relevantes para a redução do impacto ambiental na indústria têxtil (Jesus, 2011).

## 2.4 Matrizes

A matriz normalmente é um dos componentes estruturais dos compósitos, podendo esta ser polimérica, cerâmica ou metálica. Dos três tipos mencionados serão abordadas neste trabalho apenas as matrizes poliméricas, uma vez que serão as utilizadas na componente experimental. Os polímeros são materiais constituídos por macromoléculas de elevada massa molecular, resultantes de reações químicas de polimerização e formadas por unidades menores, denominados monómeros. Os polímeros podem ser de origem natural, derivados de substâncias obtidas de vegetais ou animais, ou de origem sintética, criados a partir de produtos petroquímicos. As matrizes poliméricas podem ser classificadas em dois grupos, matrizes termoplásticas e matrizes termoendurecíveis (Campos Rubio, *et al.*, 2013). As resinas termoendurecíveis são comercializadas numa combinação de dois ou três componentes, tipicamente uma resina e um catalisador e/ou acelerador. As resinas termoendurecíveis são formadas por cadeias moleculares inicialmente independentes nas quais ocorre uma reação química de cura, durante a qual se criam ligações cruzadas entre cadeias vizinhas, obtendo-se uma estrutura reticulada. Em alguns casos a polimerização ocorre após a mistura dos referidos componentes à temperatura ambiente, enquanto outros tipos de termoendurecíveis exigem a aplicação de calor e pressão adicional para que o processo de cura se realize. As matrizes termoendurecíveis têm a capacidade de suportarem temperaturas mais elevadas (comparativamente às termoplásticas), boa estabilidade térmica e dimensional, elevada rigidez, baixa densidade, boas propriedades de isolamento elétrico e térmico, boa resistência à fluência e à deformação sob cargas e permitem uma fácil impregnação de fibras para o fabrico de compósitos (Fakirov & Bhattacharyya, 2007). Como limitações pode-se indicar que o processo de cura não é instantâneo e isso implica um aumento dos tempos de ciclo de produção, sendo por vezes necessário adicionar calor para completar a reticulação, o que conduz a custos adicionais de processamento. Para além desta limitação, estas matrizes não podem ser recicladas, ou seja, uma vez processadas assumem uma forma permanente, degradando-se a temperaturas elevadas (Biron, 2003).

As resinas termoplásticas são formadas por cadeias moleculares independentes, sem ligações cruzadas, sendo que a sua rigidez e a resistência mecânica dependem do tamanho das cadeias moleculares vizinhas, bem como da sua microestrutura (Hoa, 2009). As matrizes termoplásticas têm a possibilidade de serem recicladas, reprocessadas e reparadas, uma vez que podem ser fundidas sem perda significativa de propriedades. Os

compósitos formados com estas resinas são mais dúcteis e possuem maior tenacidade à fratura. A principal limitação é a elevada viscosidade que apresentam, obrigando a recorrer a temperaturas e pressões elevadas, o que implica um maior custo no processamento. Ao utilizar fibras naturais como material de reforço em compósitos, as elevadas temperaturas e pressões necessárias neste caso, podem danificar as fibras em questão (Castro B. , 2013).

Neste trabalho pretende-se seleccionar uma matriz não biodegradável e uma matriz biodegradável de base biológica, independentemente de serem termoendurecíveis ou termoplásticas. Na figura 12 apresentam-se algumas resinas existentes indicando quais são biodegradáveis e qual a sua origem.

<b>Totalmente biodegradável</b>	PBS PBSL PBSA PCL PBST PBSAT PTMAT PCBS	Mistura de amido (com copolímeros de base fóssil biodegradáveis) Mistura de PLA (com copolímeros de base fóssil biodegradáveis)	TPS Mistura de amido (com copolímeros bio) PLA PHA Mistura PLA/PHA Celulose regenerada Acetato de celulose PO3G
	<b>Não biodegradável</b>	PE PP PET PBT PA6.66 PVC PUR ABS Resina epoxídica Borracha sintética	Mistura de amido (Com poliolefina) PA610 PTT de base bio de 1,3-PDO PBT de base bio de ácido succínico PET de base bio de etileno PVC de base bio de etileno PUR de base bio de poliol Resina epoxídica de base bio de glicerol ABS de base bio de ácido succínico
		<b>Totalmente baseado em fonte fóssil</b>	<b>Parcialmente biológico</b>

Figura 12- Matrizes poliméricas para aplicação em compósitos, adaptado de (Faruk, *et al.*, 2012)

#### 2.4.1 Matrizes não biodegradáveis

Os efeitos da incorporação de fibras naturais em resinas sintéticas, tanto à base de matrizes termoplásticas como matrizes termoendurecíveis têm sido amplamente estudados. Materiais como o polipropileno (PP), polietileno (PE), poliestireno (PS) e

policloreto de vinilo (PVC) têm sido usados como matrizes termoplásticas em vários estudos. Materiais como o poliéster, as resinas epoxídicas, as resinas fenólicas, e os vinilesteres têm sido utilizados como matrizes termoendurecíveis sendo as matrizes mais utilizadas para o desenvolvimento de compósitos poliméricos reforçados a fibras naturais na atualidade. Na figura 13 apresenta-se um organograma de matrizes não biodegradáveis usadas para o fabrico de compósitos (Faruk, *et al.*, 2012).

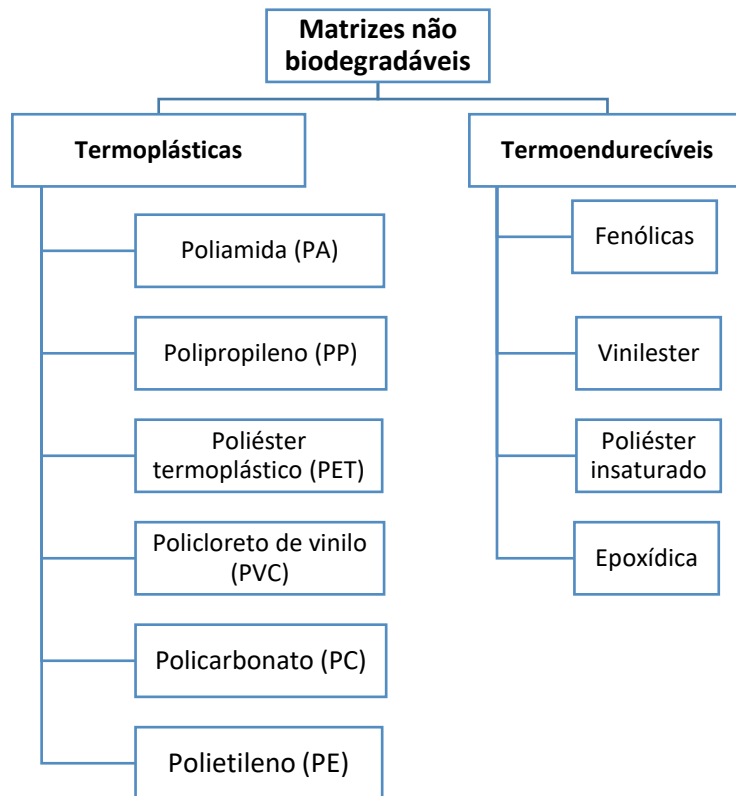


Figura 13- Classificação das matrizes não biodegradáveis

Pode-se verificar que inúmeras são as matrizes não naturais, e portanto não biodegradáveis utilizadas na indústria, sendo a seleção destas realizadas com base nas suas propriedades químicas, térmicas, elétricas, inflamabilidade, ambiental, custos, etc. A utilização de um ou de um outro tipo de matriz, conduz a diferenças acentuadas nas técnicas de processamento e nos campos de aplicação dos produtos fabricados.

Na tabela 7 apresentam-se algumas propriedades das principais matrizes utilizadas na indústria (Mazumdar, 2002).

Tabela 7- Propriedades de matrizes sintéticas (Mazumdar, 2002)

<b>Matriz Polimérica</b>	<b>Matriz</b>	<b>Massa específica [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Resistência à tração [MPa]</b>	<b>Módulo de elasticidade [GPa]</b>
<b>Termoendurecível</b>	Epoxídica	1,2-1,4	50-110	2,5-5,0
	Fenólica	1,2-1,4	35-60	2,7-4,1
	Poliéster	1,1-1,4	35-95	1,6-4,1
<b>Termoplástico</b>	Polietileno	0,9-1,0	20-35	0,7-1,4
	Policarbonato	1,2	55-70	2,1-3,5

#### 2.4.1.1 Resinas epoxídicas

De todas as resinas não biodegradáveis indicadas a matriz epoxídica foi a selecionada de modo a ser aplicada neste presente trabalho, dado que exibe boas propriedades mecânicas, apresentando altos valores de resistência à tração e módulo de elasticidade, para além de ter um baixo custo e ser fácil de adquirir.

As resinas epoxídicas pertencem a uma classe de resinas termoendurecíveis, caracterizadas por ter dois ou mais anéis de óxido de etileno ou grupos epoxídicos dentro da sua estrutura molecular (Hodd, 1990). A resina epoxídica selecionada para utilização no corrente trabalho foi a SR1500 Sicomin, sendo uma resina epoxídica modificada formulada para ser livre da formação de cristais, apresenta baixa toxicidade e possui propriedades de desengorduramento e aderência excelentes para todos os tipos de reforços sintéticos. Este tipo de resina foi desenvolvida para variadas aplicações como é o caso da construção naval, aeronáutica, protótipos automotivos e fabricação de ferramentas.

Na tabela 8 apresentam-se as características mecânicas da resina SR1500 Sicomin que será usada no corrente trabalho.

Tabela 8- Propriedades da resina epoxídica (Sicomin, 2017)

	<b>SR1500/SD2505</b>
<b>Resistência à tração [MPa]</b>	77
<b>Módulo de elasticidade [GPa]</b>	3,1
<b>Alongamento [%]</b>	4,5
<b>Massa específica [g/cm<sup>3</sup>]</b>	1,13/1,0

## 2.4.2 Matrizes biodegradáveis

Cerca de 80 % dos plásticos usados atualmente em aplicações industriais são dominados por plásticos não renováveis. Assim, quer responsáveis de empresas, quer administradores e cientistas têm trabalhado para encontrar materiais alternativos às matrizes não biodegradáveis, de modo a diminuir o impacto ambiental dos materiais compósitos e combater as alterações climáticas e a utilização de recursos que utilizam combustíveis fósseis limitados. O desenvolvimento e aplicação de resinas biológicas, ou seja, constituídos por materiais naturais tem tido uma grande importância nas últimas décadas, visto que permitem uma diferenciação de produtos perante empresas concorrentes (Faruk, *et al.*, 2012).

### 2.4.2.1 Classificação e propriedades de matrizes poliméricas de base biológica e biodegradáveis

Os polímeros de base biológica e biodegradáveis são agrupados tendo em conta a sua origem, sendo elas originárias da biomassa, de microorganismos ou da biotecnologia. Na figura 14 apresenta-se um organograma representativo das classes de polímeros de base biológica e biodegradável.

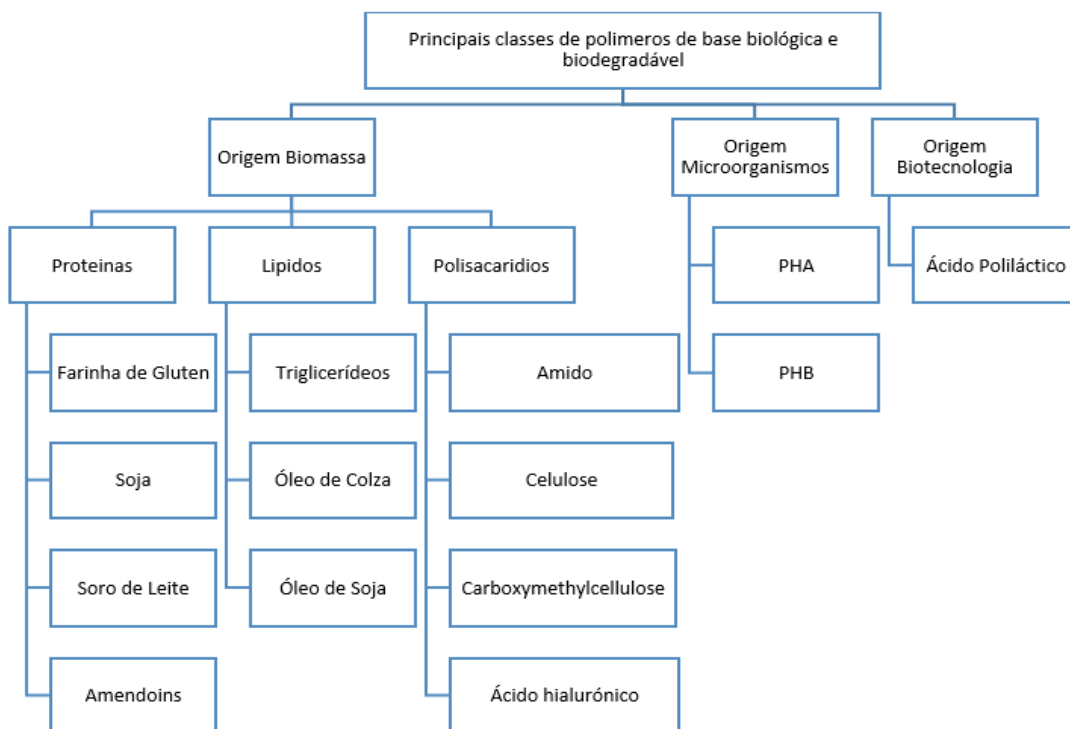


Figura 14- Principais classes de polímeros de base biológica e biodegradável (Bugnicourt, *et al.*, 2014)

A seleção da matriz para aplicação industrial é muitas vezes limitada pela temperatura à qual as fibras naturais degradam. A maioria das fibras naturais utilizadas como reforço dos compósitos são termicamente instáveis acima de 200°C, embora nalgumas circunstâncias seja possível que estas sejam processadas a temperaturas mais elevadas durante um curto período de tempo (Summerscales, 2010).

Na tabela 9 apresentam-se as propriedades mecânicas de algumas matrizes naturais e biodegradáveis que têm sido usadas em estudos recentes.

Tabela 9- Propriedades mecânicas de matrizes naturais biodegradáveis, adaptado de (Sookne & Harris, 1943); (Pachekoski, Agnelli, & Belem, 2009); (Faruk, *et al.*, 2012); (Campos, *et al.*, 2013); (Michel Biron, 2014)

<b>Matriz</b>	<b>Resistência à tração [MPa]</b>	<b>Módulo de elasticidade [GPa]</b>	<b>Alongamento [%]</b>
<b>TPS</b>	9,3	29	94
<b>Soja</b>	0,0697	0,00273	3,9
<b>PHA</b>	15-40	1-2	1-15
<b>PHB</b>	28,5	2,045	2,5
<b>PLA</b>	63,5	3,4	3,3

#### **2.4.2.2 Matrizes de origem na biomassa**

Os termoplásticos à base de amido (Thermoplastic starch (TPS)) são biopolímeros versáteis obtidos a partir de recursos vegetais renováveis, tais como o milho, o trigo e a batata, como tal está facilmente disponível e têm baixo custo. O amido consiste em dois componentes, os polímeros de amilose (AM) e de amilopectina (AP). A amilose é o polissacárido linear, poli ( $\alpha$ -1,4-glucopyronosyl). A amilopectina é o poli ( $\alpha$ -1,4-glucopyronosyl)) com muitos ramos  $\alpha$ -1,6-glucopyronosyl (Shanks. & Kong, 2012).

O amido é um biopolímero que é biodegradável, sendo adequado para o fabrico de embalagens descartáveis, para tal podem ser utilizados equipamentos de processamento tradicionais, como é o caso da extrusão e da termoformação, no entanto terão de ser adaptados para as características específicas do amido (Shanks. & Kong, 2012).

A soja tem sido produzida para obtenção de óleo e de proteína para aplicações em produtos domésticos e industriais. Tipicamente, a soja contém cerca de 20% de óleo de soja, 42% proteína de soja (SP), 33% de hidratos de carbono e 5% de cinzas numa base seca (Berk, 1993). O óleo de soja tem sido extensivamente utilizado para a produção de polímeros de base biológica através de vários métodos de modificação química (Lu & Larock, 2009) (Miao, *et al.*, 2014). Entre os vários derivados do óleo de soja modificado, o óleo de soja epoxidado acrilado (AESO), sintetizado a partir da reação do óleo de soja epoxidado com ácido acrílico, tem sido amplamente utilizados no desenvolvimento de resinas termoendurecíveis para compósitos reforçados com fibras (Gandini, 2008) (Shibata, Kaneko, & Kakihara, 2011) (Zhan & Wool, 2013). O AESO é altamente viscoso à temperatura ambiente e conseqüentemente, é necessário um diluente reativo (RD) para formar uma mistura com baixa viscosidade para que seja possível ocorrer a impregnação das fibras.

O acetato de celulose (AC) é um dos derivados da celulose com maior importância comercial, principalmente devido às propriedades que apresenta é um polímero neutro, tem a capacidade de formar filmes transparentes e tem um baixo custo, sendo por isso interessante a sua utilização como matriz para incorporação em compósitos (Miao, *et al.*, 2014).

O acetato de celulose é produzido através da substituição dos grupos hidroxila das unidades de glicose por grupos acetila. Resultando na obtenção de materiais com diferentes graus de substituição (GS) (sendo o grau de substituição o número médio de grupos acetila que substituem as hidroxilas por unidade glicosídica), o qual pode variar de zero (para a celulose) a 3 (para um material trisubstituído). O GS é um parâmetro de extrema importância, pois afeta a cristalinidade do polímero, o potencial de biodegradabilidade bem como a solubilidade em diferentes solventes (Kobayashi, Ishizaka, & Kurokawa, 2005) (Cerqueira, *et al.*, 2009).

#### **2.4.2.3 Matrizes de origem em microrganismos**

Os PHA (Poli-Hidroxicarboxilatos) são poliésteres de diferentes hidroxicarboxilatos que são sintetizados por diversas bactérias, havendo pelo menos 75 géneros diferentes. Estes polímeros são acumulados intracelularmente funcionando como uma reserva de carbono e energia (Madison & Huisman, 1999). Mais de 100 unidades de monómeros diferentes foram identificados como constituintes do PHA, o que cria a possibilidade de produzir

diferentes tipos de polímeros biodegradáveis com uma extensa gama de propriedades (Reddy, *et al.*, 2003).

A principal propriedade que distingue o PHA dos plásticos sintéticos é a sua biodegradabilidade, este degrada-se quando entra em contacto com o solo e quando exposto a ambientes marinhos. A sua biodegradação está dependente de inúmero fatores, tais como a atividade microbiana no ambiente, a área da superfície exposta, a humidade, a temperatura, o pH e o peso molecular (Boopathy, 2000).

O ácido Poli- $\beta$ - (hidroxibutírico) (beta-Poly (Hydroxybutyric) acid (PHB)) é um poliéster termoplástico biodegradável produzido através da fermentação bacteriana, cujo tempo de biodegradação é curto. O PHB tem um potencial muito elevado para aplicações industriais devido à sua alta cristalinidade (50-70%) (Sharma & Ray, 1995), excelente barreira de gases (permeabilidade ao vapor de água em torno de  $560 \text{ g}\cdot\mu\text{m} / \text{m}^2 / \text{dia}$ ) e propriedades físicas semelhantes às do polipropileno. Contudo o PHB apresenta algumas limitações como a elevada fragilidade (Asrar & Gruys, 2004), exibindo apenas 3-5% de alongamento à tensão de rutura e uma elevada degradação a partir dos  $200^\circ \text{C}$ .

#### **2.4.2.4 Matrizes de origem biotecnológica**

O Ácido Polilático (polylactide acid (PLA)) pertence à família dos poliésteres alifáticos geralmente produzido a partir de um composto orgânico designado por hidroxiácido, que inclui o ácido poliglicólico ou o ácido polimandélico, sendo considerado biodegradável (Hartmann, 1998). O PLA é um termoplástico de alta resistência podendo ser produzido a partir de recursos renováveis, tais como o milho, o arroz e a beterraba (Nam, Ogihara, & Kobayashi, 2012). São facilmente processados em equipamentos utilizados na indústria dos plásticos em produções de peças moldadas ou películas (Hartmann, 1998). O PLA é degradado pela simples hidrólise da ligação do éster e não requer a presença de enzimas para catalisar essa hidrólise. A taxa de degradação depende da temperatura de hidrólise, do tempo e das impurezas de baixo peso molecular (Hartmann, 1998) (Jamshidi, Hyon, & Ikada, 1988). O PLA pode ser processado em linhas de produção em grande escala em aplicações tais como injeção por molde, moldagem por sopro, termoformação e extrusão, se o polímero possuir estabilidade térmica adequada para prevenir a degradação e manter o peso molecular bem como as suas propriedades durante o processo. Este polímero sofre

degradação térmica a temperaturas acima dos 208°C por hidrólise ( Jamshidi, Hyon, & Ikada, 1988).

O Ácido Poliláctico é um termoplástico com um bom comportamento mecânico e com uma vida útil razoável para a maioria das aplicações em embalagens de uso único e quando descartado corretamente irá hidrolisar de modo inofensivo. O PLA tem um tempo de degradação no ambiente na ordem dos seis meses a dois anos, em vez de 500 a 1000 anos como o necessário para os plásticos convencionais, tais como o poliestireno (PS) e o polietileno (PE) ( Sinclair, 1996).

#### **2.4.2.5 A resina: Mater-Bi**

A resina Mater-Bi foi a matriz biodegradável de base biológica escolhida para o desenvolvimento do corrente trabalho. Tendo em conta que é um material de base biológica e com baixo impacto ambiental, aliado ao facto de ainda haver poucos estudos científicos sobre o desempenho mecânico desta resina quando incorporada em compósitos, leva à necessidade de realizar trabalho de investigação mais profundo nesta área.

O Mater-Bi é um bioplástico biodegradável e compostável, de acordo com a norma UNI EN Europeia 13432, desenvolvido pela Novamont para fornecer uma solução ecológica. O Mater-Bi é obtido através da utilização de amido, celulose, óleos vegetais e suas combinações, apresentando propriedades e características de utilização muito semelhantes aos dos plásticos tradicionais (Novamont, 2016).

Esta resina é dividida em classes, tendo como base as misturas comercialmente disponíveis provenientes do amido, dependendo da classe esta poderá ser usada em várias áreas (Bastioli, 1998).

O Mater-Bi da classe Z contém amido termoplástico e poli- $\epsilon$ -caprolactona e foi introduzido no mercado no início de 1992. É biodegradável e compostável, sendo utilizado principalmente para filmes e placas. A microestrutura destes produtos pode ser muito diferente, variando a quantidade de amido termoplástico disperso no componente sintético (Bastioli, 1998). As aplicações do Mater-Bi da classe Z são o fabrico de bolsas, redes, papel laminado, filmes plásticos, rolos de cordel e película de embrulho (Rudnik, 2008).

O Mater-Bi da classe Y é utilizado para o fabrico de peças moldadas por injeção (rígidos) sendo dimensionalmente estáveis. As matérias-primas são totalmente de origem natural, tais como amido termoplástico na forma de derivados de celulose e dispersos. As suas propriedades mecânicas e plasticidade são muito próximas aos do poliestireno (Bastioli, 1998). As aplicações deste tipo de produto são na produção de talheres, caixas, potes, vasos, canetas e bandejas (Rudnik, 2008).

O Mater-Bi da classe V é compostável e solúvel e usa-se como um substituto para as espumas de embalagem de poliestireno. Esta classe apresenta um teor de amido superior relativamente às outras classes, aproximadamente 85%, e podem ser definidos como o amido plastificado termoplástico (Bastioli, 1998). A principal aplicação deste tipo de produto é na produção de itens solúveis, como é o caso de cotonetes, material de enchimento de caixas (Rudnik, 2008).

O Mater-Bi da classe A é biodegradável e não compostável, sendo composto por uma mistura de amido com copolímeros de etileno e álcool vinílico. O tempo de biodegradação é cerca de 2 anos em ambientes que simulam uma estação de tratamento. Este material é utilizado normalmente em aplicações em que não exigem a necessidade de ser compostável (Kalia, 2015).

As resinas Mater-Bi apresentam as seguintes propriedades:

- A biodegradabilidade e a compostagem são de acordo com as normas existentes (DINV54900-2, 1998) (EN13432) (UNI10785, 1999);

- Redução significativa do impacto ambiental, especialmente no que diz respeito às emissões de CO<sub>2</sub> e consumo de energia, em comparação com materiais tradicionais em usos específicos (DINV54900-2, 1998) (EN13432) (UNI10785, 1999) (Composto, 1998) (Composto, 2000);

- Performances semelhantes relativamente aos plásticos tradicionais;

- Processabilidade semelhante ou melhorada em comparação com os materiais plásticos tradicionais (Bastioli & Facco, 2001);

- Permeabilidade ao vapor de água;

-Ampla gama de propriedades mecânicas, sem que ocorra envelhecimento significativo após um ano de armazenamento (Bastioli, 2001);

-Comportamento anti estática;

-Compostabilidade em uma ampla gama de condições de compostagem.

Na tabela 10 apresentam-se as propriedades mecânicas do Mater-Bi da classe Z, Y e A. O material da classe Z será o material utilizado na produção de provetes, no corrente trabalho.

Tabela 10- Propriedades das várias classes de Mater-Bi (Bastioli, 1998); (Rudnik, 2008); (Moore & Saunders, 1997)

<b>Propriedades</b>	<b>Unidades</b>	<b>Classe Z</b>	<b>Classe Y</b>	<b>Classe A</b>
<b>MFI</b>	g/10 min	4-5,5	10-15	-
<b>Resistência à tração</b>	MPa	31	25-30	13-36
<b>Alongamento</b>	%	886	2-6	18-500
<b>Módulo de elasticidade</b>	MPa	185	2100-2500	250-2200
<b>Resistência ao rasgamento</b>	N/mm	68	-	-
<b>Temperatura de fusão</b>	°C	115-145	-	-

Relativamente às propriedades térmicas deste produto de classe Z, o gráfico DTG (referente à bibliografia consultada) indica dois picos de temperatura (Puglia & Kenny, 2003). Aos 320°C ocorre a degradação da celulose e aos 410°C ocorre a degradação da policaprolactona. Os outros picos a temperaturas mais baixas correspondem à degradação de aditivos de baixo peso molecular (Puglia & Kenny, 2003).

## 2.5 Estado da arte sobre compósitos reforçados a fibra de cânhamo

Diversos investigadores têm estudado nos últimos anos compósitos reforçados a cânhamo com o objetivo de se produzir compósitos com reduzido impacto ambiental e elevada performance.

Na presente secção pretende-se apresentar resultados de alguns estudos publicados nos últimos anos, realizados em materiais compósitos de matriz epoxídica reforçada com fibras de cânhamo, nomeadamente no que refere ao desempenho mecânico.

Os três principais constituintes das fibras vegetais são a celulose, a lignina e a hemicelulose, podendo ainda ser constituída por pectina, ceras e gorduras. Por isso alguns estudos foram realizados de modo a analisar qual o impacto que estes constituintes têm no compósito de resina epoxídica reforçada com fibras de cânhamo. Os estudos realizados por Wood *et al.* e por Bhongade e Borkar consistiram na análise dos efeitos provocados pela adição de lignina nos compósitos, através de ensaios mecânicos. Puderam concluir que a adição de lignina é benéfica para a resistência ao impacto, à tração e à flexão, embora nos dois últimos ensaios tenham apresentado uma diminuição quando se adicionou uma elevada quantidade de lignina (Wood, *et al.*, 2011) (Bhongade & Borkar, 2016). Liu *et al.* investigaram o efeito da remoção da pectina e da hemicelulose nas fibras de cânhamo através do estudo das propriedades mecânicas dos compósitos. A remoção da pectina levou à eliminação das células epidérmicas e parenquimáticas das fibras de cânhamo melhorando a separação das fibras, enquanto a remoção de hemicelulose através do tratamento NaOH melhorou ainda mais a limpeza da superfície das fibras. A remoção destes dois constituintes em conjunto levou à redução do fator de porosidade do compósito. Tendo em conta as propriedades mecânicas a remoção de pectina aumentou a rigidez do compósito e a resistência à tração por sua vez a remoção de hemicelulose aumentou a rigidez do compósito, mas diminuiu a resistência à tração (Liu, *et al.*, 2016).

Sempre com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas dos compósitos de resina epoxídica reforçada com fibras de cânhamo alguns estudos centraram-se nas alterações das propriedades através de tratamentos das fibras. Liu *et al.* investigaram o uso de um pré-tratamento hidrotérmico e de um endurecimento enzimático para a remoção de compostos não celulósicos. Concluíram que o pré-tratamento hidrotérmico a 100 kPa e 121°C combinado com um endurecimento enzimático apresentaram maior resistência à

tração aliada a uma baixa concentração de pectina. Comparado com as fibras não tratadas, este tratamento combinado, exibiu um efeito positivo sobre as propriedades mecânicas dos compósitos, resultando em compósitos de alta qualidade com baixo fator de porosidade. (Liu, *et al.*, 2016). Mais uma vez Liu *et al.* analisaram o efeito de vários tratamentos com lacase (enzimas) através do estudo das propriedades mecânicas das fibras de cânhamo e de alguns compósitos. Puderam concluir que os compósitos tratados com lacase apresentaram uma maior rigidez e resistência à tração de rotura quando o teor de fibra era de 50%. A resistência térmica das fibras de cânhamo aumentou, visto que a temperatura de degradação máxima aumentou cerca de 5°C e observaram a oxidação de hidroxilos fenólicos na lignina (Liu, *et al.*, 2017). Islam *et al.* estudaram a influência de um tratamento alcalino tendo em conta as propriedades mecânicas obtidas nos ensaios mecânicos. Embora o tratamento alcalino tenha geralmente melhorado a resistência do compósito, foi conseguida uma melhor resistência a altos teores de fibra para compósitos de fibras longas com fibra não tratada, o que pareceu ser devido ao menor contacto entre as fibras tratadas com álcali (Islam, Pickering, & Foreman, 2011).

Outros estudos foram ainda realizados de modo a aprofundar o conhecimento relativamente aos compósitos de resina epoxídica reforçada com fibras de cânhamo. Tanto Szolnoki *et al.* como o Boccarusso *et al.* estudaram a inflamabilidade do compósito, enquanto os primeiros utilizaram diferentes tratamentos superficiais, os segundos utilizaram diferentes percentagens de polifosfato de amónio como variável. Os resultados mostraram uma melhoria determinante na resistência à chama, sem efeitos negativos na maioria das suas propriedades mecânicas e sobre a viabilidade tecnológica do processo para todos os tipos de tratamentos (Szolnoki, *et al.*, 2015) (Boccarusso, *et al.*, 2016). Caprino *et al.*, Scarponi *et al.* e Kuma *et al.* estudaram a possibilidade dos compósitos naturais serem aplicados quando submetidos a cargas de impacto de baixa velocidade. Caprino *et al.* verificaram que os laminados unidireccionais apresentaram um dano mais severo, mas nenhum dano significativo foi observado abaixo de 75 J de energia de impacto tanto para os laminados unidirecional como bidirecional (Caprino, *et al.*, 2015). Os resultados de Scarponi *et al.* confirmaram uma tenacidade significativa nos laminados produzidos com matriz bio epoxídica e a sua tolerância a danos mostrou ser superior em comparação com laminados de cânhamo com resina epoxídica padrão. Destacaram assim o seu uso potencial em aplicações semiestruturais devido à sua adesão interfacial melhorada com fibras de cânhamo (Scarponi, *et al.*, 2016). Kumar *et al.* tiveram em conta

diferentes temperaturas no estudo dos danos de impacto a baixas velocidades. Os resultados mostraram uma redução na resistência ao impacto e na resistência residual à flexão após o impacto a temperaturas elevadas (Kumar, *et al.*, 2015). Perrier *et al.* avaliaram a resposta de nanoindentação dos componentes de compósitos quando influenciados pelo envelhecimento pela água, através de testes de Nanohardness (NHT). A nanoindentação consiste no estudo das propriedades mecânicas de pequenos volumes de material. Concluíram que a água provoca uma diminuição nas propriedades de nanoindentação, redução que ocorre na zona interfacial, o que mostra a degradação significativa da interface fibra / matriz causada pelo envelhecimento provocada pela água (Perrier, *et al.*, 2016).

Os métodos de produção têm sido igualmente estudados de modo a analisar se a sua aplicação é viável ou não. Landro *et al.* estudaram a aplicação do método de infusão de resina (RTM), verificando que o processo RTM foi facilmente implementado na produção dos compósitos sendo assim uma técnica promissora (Landro & Janszen, 2014).

Têm sido realizados igualmente estudos sobre o comportamento mecânico de compósitos híbridos em que se utiliza mais do que uma fibra, na produção dos compósitos. Girisha *et al.* avaliaram as propriedades mecânicas dos compósitos de matriz epoxídica e poliéster reforçadas com fibras de juta/cânhamo. Verificaram que os compósitos híbridos com resina de poliéster apresentaram maior resistência à tração, flexão e ao impacto do que os compósitos híbridos com resina epoxídica. Verificaram maior resistência à tração, à flexão e ao impacto com orientações de fibra de 90° tanto em compósitos com resina epoxídica como em compósitos com resina de poliéster (Girisha, Anil, & Akash, 2014).

Existe também a necessidade de estudar a estrutura dos provetes produzidos de modo a perceber se existem defeitos originados no fabrico bem como para avaliar os danos provocados pelos ensaios, de modo a entender os efeitos nos provetes. Assim Perrier *et al.* estudaram a possibilidade de utilizar o teste de choque a laser (Laser Shock adhesion test (LASAT)) para estudar a adesão entre a fibra e a matriz em materiais compósitos. O efeito de sorção (absorção e adsorção em simultâneo) de água na qualidade de adesão interfacial foi igualmente estudado. Os resultados demonstraram a capacidade do teste de choque a laser para estudar e quantificar a qualidade mecânica da interface fio / matriz. Para níveis de intensidade de laser elevados, dois tipos de danos foram observados: micro-dano no fio /matriz e fissuração da resina localmente entre o fio e a face traseira da amostra (aparecendo apenas para altas intensidades). O efeito de sorção de água na

qualidade de adesão interfacial foi estudado, concluindo que o compósito cânhamo/resina bio epoxídica é mais sensível à sorção de água relativamente a um compósito cânhamo resina epoxídica padrão (Perrier, *et al.*, 2015). Os estudos desenvolvidos por Bonnafous *et al.* tiveram como objectivo caracterizar mecanismos de dano em compósitos de tecido através da análise multi-escala, utilizando diferentes emissões acústicas. Este estudo permitiu identificar três tipos de danos em compósitos de cânhamo e resina epoxídica, sendo eles fissuração matricial, desunião interfacial e degradação do reforço (Bonnafous, Touchard, & Chocinski-Arnault, s.d). A investigação de Eichhorn e de Young visou entender a possibilidade da micro deformação das fibras de cânhamo, serem monitorizadas seguindo o deslocamento de pico da banda Raman em relação à deformação e tensão. Para isso realizaram ensaios de tração com monitorização através de um microscópio Renishaw 1000 Raman. Mostraram que a banda Raman de celulose deslocou-se sob a aplicação de tensões para um número de onda inferior, indicativo de deformação molecular. Também demonstraram que é possível utilizar a espectroscopia Raman para mapear a tensão de uma fibra de cânhamo dentro de uma gota de resina epoxídica. Utilizando este método concluíram ainda que os compósitos de resina epoxídica reforçados com fibra de cânhamo apresentam boa adesão entre a fibra e a resina (Eichhorn & Young, 2004).

### 3. Método analítico para determinação de propriedades de compósitos.

Neste capítulo pretende-se estimar a quantidade de resina necessária para a impregnação dos compósitos, aplicando métodos analíticos nomeadamente a regra das misturas. No estudo da micromecânica considera-se o comportamento de cada constituinte (fibra e matriz). A abordagem mais simples para determinar as propriedades do laminado baseia-se no pressuposto de que cada material constituinte é homogéneo e isotrópico.

Considerando  $M$  a massa total e o  $V$  o volume total, com o índice  $f$  para as fibras, o índice  $m$  para a matriz e o índice  $v$  para as zonas vazias, considera-se (H. Staab, 2015):

$$M = M_f + M_m \quad (1)$$

$$V = V_f + V_m + V_v \quad (2)$$

A massa total do compósito é o somatório da massa dos constituintes, ou seja, massa da fibra ( $M_f$ ) e massa da matriz ( $M_m$ ). Já em relação ao volume total é necessário considerar o volume da fibra ( $V_f$ ), volume da matriz ( $V_m$ ) e o volume das zonas vazias ( $V_v$ ).

Considerando que a gramagem é a massa por unidade de área e  $N$  o número de camadas de fibra, a massa da fibra ( $M_f$ ) existente num compósito pode ser expressa por:

$$M_f = \text{área da placa} \times \text{gramagem do tecido} \times N \quad (3)$$

Dividindo a massa de cada constituinte pela massa total e o volume de cada constituinte pelo volume total obtém-se as frações de massa e de volume definidas por (H. Staab, 2015):

$$m_f + m_m = 1 ; v_f + v_m + v_v = 1 \quad (4)$$

Onde a fração de massa da fibra ( $m_f$ ) é dada pelo quociente entre a massa da fibra ( $M_f$ ) e a massa total ( $M$ ),  $m_f = \frac{M_f}{M}$ . A fração de massa da matriz ( $m_m$ ) é dada pelo quociente entre a massa da matriz ( $M_m$ ) e a massa total ( $M$ ),  $m_m = \frac{M_m}{M}$ . A fração de volume da fibra ( $v_f$ ) é dada pelo quociente entre o volume de fibra ( $V_f$ ) e o volume total ( $V$ ),  $v_f = \frac{V_f}{V}$ . A fração de volume da matriz ( $v_m$ ) é dada pelo quociente entre o volume da matriz ( $V_m$ ) e o volume

total (V),  $v_m = \frac{V_m}{V}$ . A fração de volume das zonas vazias ( $v_v$ ) é dada pelo quociente entre o volume das zonas vazias ( $V_v$ ) e o volume total (V),  $v_v = \frac{V_v}{V}$ .

A massa específica ( $\rho$ ) pode ser expressa por (H. Staab, 2015):

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (5)$$

$$\rho_{\text{comp.}} = \frac{\rho_f V_f + \rho_m V_m}{V} = \rho_f v_f + \rho_m v_m \quad (6)$$

Onde o  $\rho_f$  é a massa específica da fibra e o  $\rho_m$  é a massa específica da matriz.

A espessura do compósito ( $h_{\text{compósito}}$ ) pode ser expressa por (Gay, Hoa, & Tsai, 2003):

$$h_{\text{composito}} = \frac{\text{gramagem} \times N}{v_f \times \rho_f} \quad (7)$$

A tensão máxima suportada pelo compósito ( $\sigma$ ) poderá ser estimada pela expressão (Gay, Hoa, & Tsai, 2003):

$$\sigma = \sigma_f \times v_f + \sigma_m \times v_m \quad (8)$$

Onde o  $\sigma_f$  é a tensão de rotura da fibra e o  $\sigma_m$  é a tensão de rotura da matriz.

O módulo de elasticidade (E) para têxteis bidirecionais, pode ser estimado pela seguinte expressão de acordo com a regra das misturas (Gay, Hoa, & Tsai, 2003) (Castro B. , 2013):

$$E = \eta \times E_f \times v_f + E_m \times v_m \quad (9)$$

Em que  $E_f$  é o módulo de elasticidade da fibra, o  $E_m$  é o módulo de elasticidade da matriz e o  $\eta$  é o fator de arranjo das fibras, que toma o valor de 0,5 para os tecidos equilibrados, ou seja, tecidos com o mesmo número de fios por unidade de comprimento nas duas direções.

Na figura 15 representa-se um esquema da placa de compósito que se pretende produzir com as dimensões pretendidas, incorporando 8 camadas de fibra.

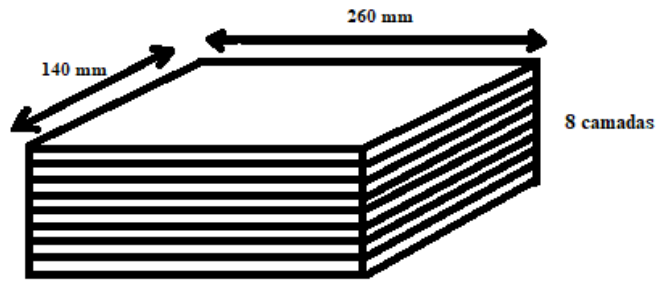


Figura 15- Representação da placa de compósito

### 3.1 Análise volumétrica de placas de fibra de cânhamo com resina epoxídica

Pretende-se nesta secção estimar a quantidade de resina epoxídica necessária para a produção das placas de compósitos com fibra de cânhamo que serão posteriormente ensaiadas.

Nas tabelas 11 e 12 apresentam-se os dados referentes à produção da placa de compósito, bem como à fibra de cânhamo os quais foram obtidos através do fornecedor e da consulta da bibliografia (tabela 4), (100% hemp, 2017). O valor de fração de volume fibra foi considerado como sendo 40%, visto que é o valor recomendado para o processo de fabrico utilizado, por moldagem manual (Gay, Hoa, & Tsai, 2003).

Tabela 11- Dados da placa de compósito

Dimensões [m]	0,26x0,14
Área da placa [m <sup>2</sup> ]	0,0364
Número de camadas (N)	8

Tabela 12- Dados do tecido de fibra de cânhamo

Gramagem [kg/m <sup>2</sup> ]	0,23734
Massa específica ( $\rho_f$ ) [kg/m <sup>3</sup> ]	1500
Fração de volume de fibra ( $v_f$ ) [%]	40

Tendo em conta os dados das tabelas 11 e 12 foi calculada a massa da fibra presente na placa de compósito através da expressão (3):

$$M_f = 0.26 \times 0.14 \times 0.23734 \times 8 = 0,069 \text{ kg}$$

Tendo em conta a expressão (5) calculou-se o volume de fibra:

$$V_f = \frac{M_f}{\rho_f} = \frac{0.069}{1500} = 4.6 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

Utilizando a relação entre os volumes totais e as frações volúmicas e considerando 40% de volume de fibra e 60% de volume de matriz obtém-se:

$$V_m = \frac{V_f \times v_m}{v_f} = \frac{4.6 \times 10^{-5} \times 0.6}{0.4} = 6.9 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

Pode-se assim concluir que serão necessários aproximadamente 70 mililitros de resina para o fabrico das placas de resina epoxídica reforçada com fibra de cânhamo. Tendo em conta a proporção de resina/endurecedor recomendada pelo fabricante (100/37 de volume) utilizou-se aproximadamente 25 mililitros de endurecedor.

### 3.2 Análise volumétrica de placas de fibra de vidro com resina epoxídica

Do mesmo modo pretende-se nesta secção estimar a quantidade de resina epoxídica necessária para a produção das placas de compósitos com fibra de vidro que serão posteriormente ensaiadas.

Nas tabelas 13 e 14 apresentam-se os dados técnicos referentes à produção da placa de compósito. Os dados da fibra de vidro foram obtidos através do fornecedor e da consulta da bibliografia (tabela 1). Considera-se igualmente uma fração de volume de fibra de 40 % uma vez que é esse o valor recomendado para o processo de fabrico selecionado (Gay, Hoa, & Tsai, 2003).

Tabela 13- Dados da placa de compósito

Dimensões [m]	0,26x0,14
Área da placa [m <sup>2</sup> ]	0,0364
Número de camadas (N)	8

Tabela 14- Dados do tecido de fibra de vidro

Gramagem [kg/m <sup>2</sup> ]	0,296
Massa específica ( $\rho_f$ ) [kg/m <sup>3</sup> ]	2550
Fração de volume de fibra ( $v_f$ ) [%]	40

Tendo em conta os dados das tabelas 13 e 14 foi calculada a massa da fibra presente na placa de compósito através da expressão (3):

$$M_f = 0.26 \times 0.14 \times 0.296 \times 8 = 0,0861952 \text{ kg}$$

Tendo em conta a expressão (5) calculou-se o volume de fibra:

$$V_f = \frac{M_f}{\rho_f} = \frac{0.0861952}{2550} = 3.38 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

Utilizando a relação entre os volumes totais e as frações volúmicas e considerando igualmente 40% de volume de fibra e 60% de volume de matriz obtém-se:

$$V_m = \frac{V_f \times v_m}{v_f} = \frac{3.38 \times 10^{-5} \times 0.6}{0.4} = 5.07 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

Verifica-se assim que serão necessários aproximadamente 51 mililitros de resina, para a produção de placas de resina epoxídica reforçada com fibra de vidro. Tendo em conta a proporção de resina/endurecedor recomendada pelo fabricante (100/37 de volume) utilizou-se aproximadamente 19 mililitros de endurecedor.

### **3.3 Análise volumétrica de placas de fibra de vidro com resina de Mater-Bi**

Nesta secção pretende-se estimar a quantidade de resina Mater-Bi necessária para a produção das placas de compósitos com fibras de vidro.

Nas tabelas 15 e 16 apresentam-se os dados referentes à produção da placa de compósito e os dados da fibra de vidro, os quais foram obtidos através do fornecedor e da consulta de dados recolhidos na bibliografia (tabela 1). Considera-se igualmente uma fração de volume de fibra de 40 % uma vez que é esse o valor recomendado, para o processo de fabrico selecionado (Gay, Hoa, & Tsai, 2003).

Tabela 15- Dados da placa de compósito

Dimensões [m]	0,26x0,14
Área da placa [m <sup>2</sup> ]	0,0364
Número de camadas (N)	9

Neste caso foram utilizadas 9 camadas de fibra de vidro, em vez de 8, visto que se pretendeu maximizar o número de camadas a colocar no interior do molde em conjunto com as placas de Mater-Bi.

Tabela 16- Dados do tecido de fibra de vidro

Gramagem [kg/m <sup>2</sup> ]	0,296
Massa específica ( $\rho_f$ ) [kg/m <sup>3</sup> ]	2550
Fração de volume de fibra ( $v_f$ ) [%]	40

Tendo em conta os dados das tabelas 15 e 16 foi calculada a massa da fibra presente na placa de compósito através da expressão (3):

$$M_f = 0.26 \times 0.14 \times 0.296 \times 9 = 0,0969696 \text{ kg}$$

Tendo em conta a expressão (5) calculou-se o volume de fibra:

$$V_f = \frac{M_f}{\rho_f} = \frac{0.0969696}{2550} = 3.80 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

Utilizando a proporcionalidade indicada pela expressão (4) e considerando igualmente 40% de volume de fibra e 60% de volume de matriz obtém-se:

$$V_m = \frac{V_f \times v_m}{v_f} = \frac{3.80 \times 10^{-5} \times 0.6}{0.4} = 5,70 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

Verifica-se assim que serão necessários aproximadamente 57 mililitros de resina, para a produção de placas de resina de Mater-Bi reforçada com fibra de vidro.

### **3.4 Método analítico para determinação das espessuras expectáveis para as placas de compósito**

Nesta secção pretende-se estimar as espessuras expectáveis para as placas de compósitos tanto para a fibra de cânhamo como para a fibra de vidro.

Na tabela 17 apresentam-se os dados referentes à fibra de cânhamo os quais foram obtidos através do fornecedor e da consulta da bibliografia (tabela 4), (100% hemp, 2017) e os dados referentes à fibra de vidro, os quais foram obtidos através do fornecedor e da consulta de dados recolhidos na bibliografia (tabela 1).

Tabela 17- Características das fibras utilizadas para a produção de placas

<b>Características das placas com fibras de cânhamo</b>	
Gramagem [kg/m <sup>2</sup> ]	0,23734
Massa específica ( $\rho_f$ ) [kg/m <sup>3</sup> ]	1500
Fração de volume de fibra ( $v_f$ ) [%]	40
Número de camadas (N)	8
<b>Características das placas com fibras de vidro</b>	
Gramagem [kg/m <sup>2</sup> ]	0,296
Massa específica ( $\rho_f$ ) [kg/m <sup>3</sup> ]	2550
Fração de volume de fibra ( $v_f$ ) [%]	40
Número de camadas (N)	8

De modo a estimar a espessura da placa de compósito de fibra de cânhamo, foi utilizada a expressão (7) apresentada no capítulo 3 e os dados da tabela 17 obtendo-se:

$$h_{\text{composito}} = \frac{0,23734 \times 8}{0,4 \times 1500} = 0,00316\text{m} = 3,16\text{mm}$$

De igual modo estimou-se a espessura da placa de compósito de fibra de vidro, obtendo-se:

$$h_{\text{composito}} = \frac{0,296 \times 8}{0,4 \times 2550} = 0,0023216\text{m} = 2,3 \text{ mm}$$

Tendo em conta os cálculos efetuados será espectável uma espessura de 3,16 mm para as placas de compósito reforçado com fibra de cânhamo e 2,3 mm para as placas de compósito reforçado com fibra de vidro.



## **4. Parte experimental**

### **4.1 Processo de fabrico do molde e das placas**

Esta secção descreve o método utilizado para o fabrico do molde bem como das várias placas de compósito, evidenciando as diferenças existentes entre o fabrico dos vários provetes para ensaio.

#### **4.1.1 Processo de fabrico do molde**

Vários são os processos de fabrico existentes para produzir peças de materiais compósitos. Estes devem ser seleccionados segundo o tipo de material utilizado, as condições económicas do projeto, o tipo de aplicação, mas também consoante a qualidade desejada para a peça. Os processos utilizados para o fabrico de peças de materiais compósitos reforçados com fibras naturais são similares aos utilizados com fibras sintéticas. No entanto certos parâmetros devem ser adaptados, como é o caso da temperatura, de modo a não danificar o compósito.

Tendo em conta todos estes aspetos mencionados, seleccionou-se a moldagem manual e a moldagem manual assistida por vácuo para a produção de provetes de compósitos. A moldagem manual tem como vantagens o baixo investimento inicial, a necessidade de pouco equipamento, as poucas restrições geométricas e uma baixa complexidade no processo de fabrico. Como limitações apresenta uma baixa produtividade e a libertação de voláteis (Castro B. , 2013). A moldagem manual assistida por vácuo tem como vantagens a uniformização da resina no interior do compósito, a diminuição do número de bolhas no seu interior e uma melhor ligação entre a resina e as fibras (Castro B. , 2013). Como limitações, este processo apresenta baixa produtividade e a dificuldade em produzir usando vácuo. De modo a utilizar estes processos de fabrico foi necessário a produção de um molde.

O molde foi produzido utilizando três placas de aço, com as medidas 320x220mm e com 10 mm de espessura. A partir de uma das placas foi cortada uma moldura em aço, a qual foi aparafusada a outra placa, obtendo-se uma peça com um rebaixo central (molde fêmea), como se observa na figura 16 a). A parte interior da placa, onde foi cortada a moldura (com 260x140mm), foi por sua vez aparafusada à terceira placa, obtendo-se uma

peça com um ressalto (molde macho) que encaixará no molde fêmea, como se observa na figura 16 b). Realizaram-se três furos no molde macho e colocaram-se três guias no molde fêmea de modo a que o molde macho encaixasse no molde fêmea com maior facilidade. Para fim de curso foram utilizadas anilhas, com espessuras diferentes consoante a espessura mínima pretendida para o compósito.

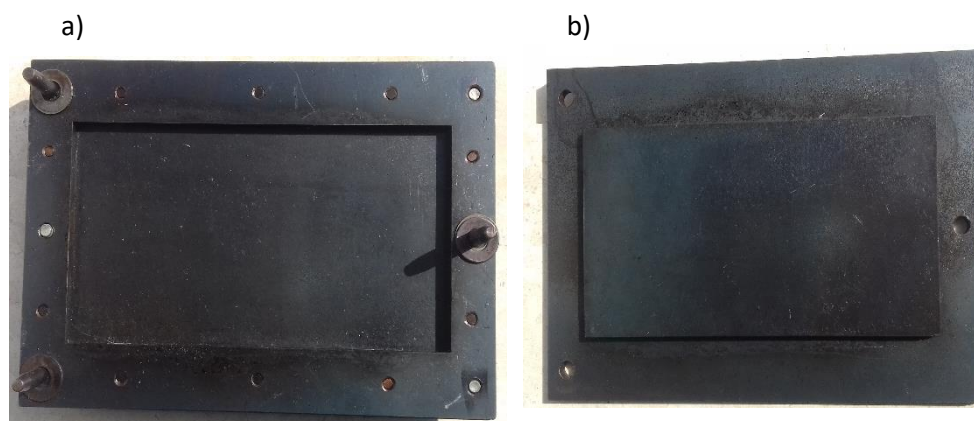


Figura 16- a) Molde fêmea b) Molde macho

#### **4.1.2 Processo de fabrico das placas de compósitos para os ensaios de tração**

##### **4.1.2.1 Placas de compósito com resina epoxídica**

Para a produção dos provetes iniciou-se o processo com a medição e corte do tecido de fibra de cânhamo e de fibra de vidro, do filme protetor bem como do manto absorvente (feltro). A resina epoxídica SR1500 foi misturada com um endurecedor SD2505, com a proporção indicada na embalagem (100/37 em volume). No interior do molde fêmea foi realizada a seguinte sequência de empilhamento: foi colocado um filme protetor, de seguida um manto absorvente, depois um filme protetor perfurado e por fim foi iniciada a impregnação das 8 camadas de tecido através do vazamento com aplicação de pincel. Ambos os tecidos são bi-direcionais. Finalizando a impregnação foi colocado um último filme protetor e colocou-se o molde macho sobre o molde fêmea. Dois dos sistemas foram colocados dentro de um saco de vácuo e ligados à bomba de vácuo do autoclave enquanto outros dois foram pressionados através de quatro pesos, cada um com aproximadamente 3kg. Após 72 horas de cura as placas foram desmoldadas, polidas com lixa de granulação 220 e cortadas com serra circular de modo a produzir cinco provetes com a dimensão média de 250x25x3mm no caso dos compósitos de fibra de cânhamo e 250x25x2mm no caso dos compósitos de fibra de vidro. Na figura 17 apresenta-se um fluxograma do procedimento realizado.

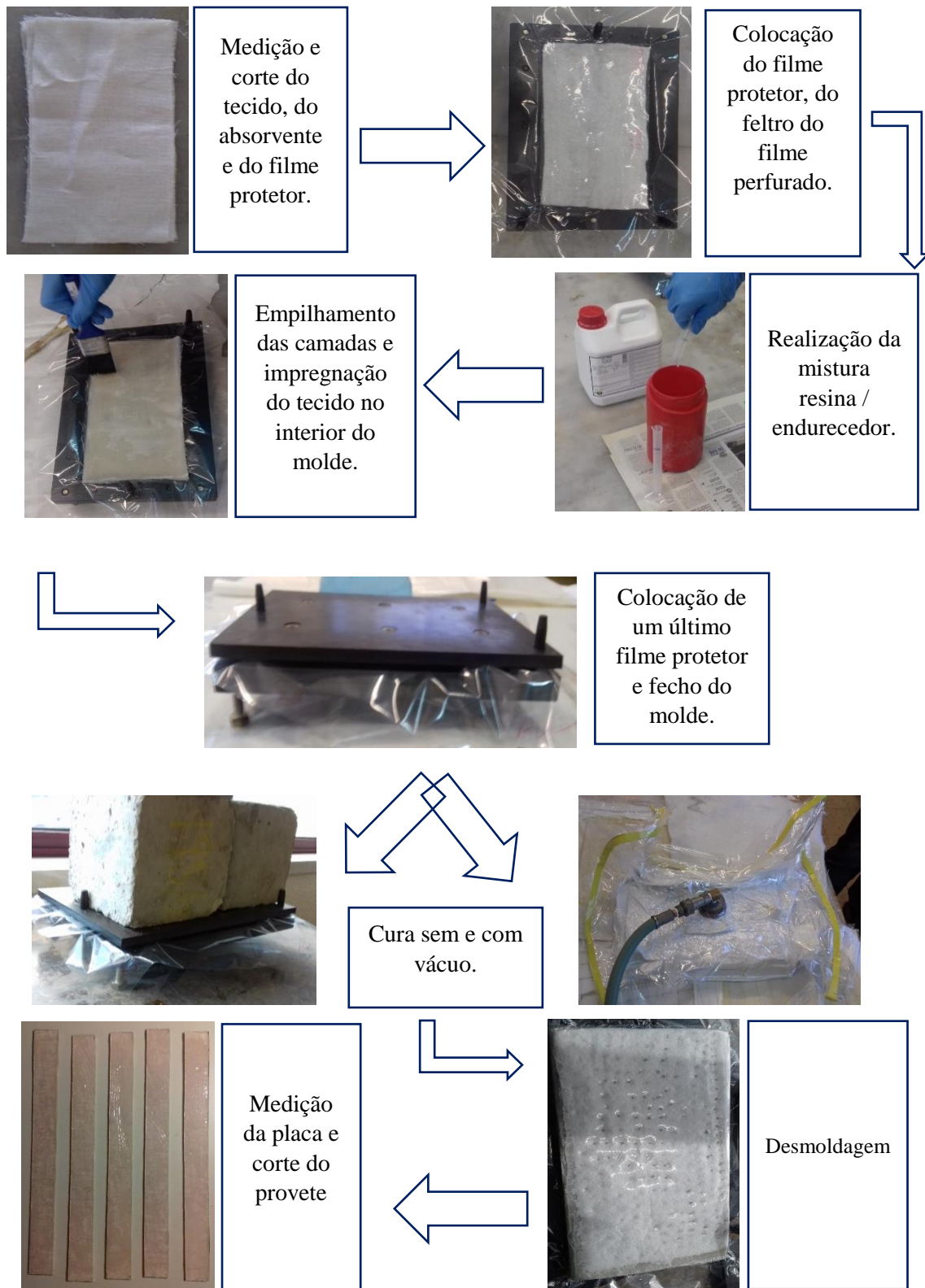


Figura 17- Fluxograma relativamente ao procedimento utilizado para a produção de provetes de materiais compósitos

#### 4.1.2.2 Placas de compósito com resina Mater-Bi

A fabricação de placas com resina Mater-Bi reforçada com fibra de vidro foi dividida em duas fases. Uma primeira fase pretendeu-se transformar o granulado de Mater-Bi em placas uniformes, de modo a tornar mais homogênea a distribuição de resina pelas fibras, mas também para que não ocorra a danificação das fibras quando pressionadas contra a placa. A segunda fase consistiu na produção de placas de compósitos com resina de Mater-Bi reforçada com tecido de fibra de vidro.

A primeira fase iniciou-se com o processo de pulverização do desmoldante DP200 da marca Ambersil, no interior do molde. De seguida o granulado de Mater-Bi foi colocado no interior do molde fêmea e foram utilizadas anilhas de 1 mm para o fim de curso. Seguidamente colocou-se o molde macho sobre o molde fêmea. O sistema foi pousado no interior de um forno doméstico com pesos sobre o molde (ver figura 18), de modo a produzir placas com pequena espessura. O ciclo de temperatura utilizado foi o seguinte: 175°C durante 30 minutos, 225°C durante 30 minutos, 250°C durante 20 minutos e desligado durante 10 minutos. Por fim esperou-se quatro horas até atingir a temperatura ambiente e procedeu-se à desmoldagem.

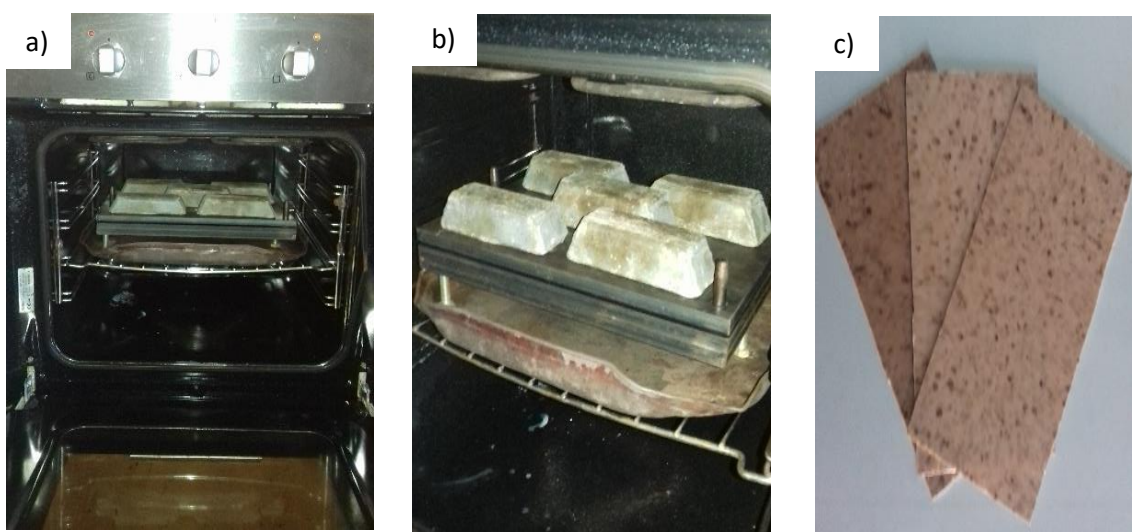


Figura 18- Fabricação das placas de Mater-Bi, a) e b) Molde no interior do forno c) Placas de Mater-Bi

A segunda fase do processo de fabrico consistiu na produção de placas de compósito em que se utilizou a resina de Mater-Bi reforçada com tecido de fibra de vidro. Iniciou-se o processo com a pulverização do desmoldante DP 200 no interior do molde. De seguida

mediu-se e cortaram-se nove camadas de tecido de fibra de vidro com as medidas 260x140 mm. Depois colocou-se o tecido e a placa de resina no interior do molde fêmea usando três procedimentos distintos. Na primeira e na terceira experiência a placa de Mater-Bi foi colocada em cima de quatro camadas de fibra de vidro tendo sobreposto cinco camadas de fibra, tal como ilustra a figura 19.

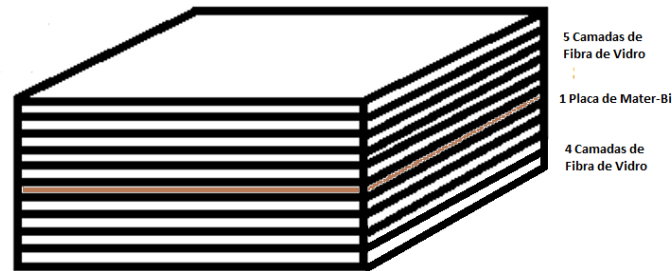


Figura 19- Empilhamento para 1º e 3º experiência de produção de compósitos

Na segunda experiência colocou-se a placa de Mater-Bi no fundo do molde sobrepondo-se nove camadas de fibra de vidro, tal como ilustra a figura 20.

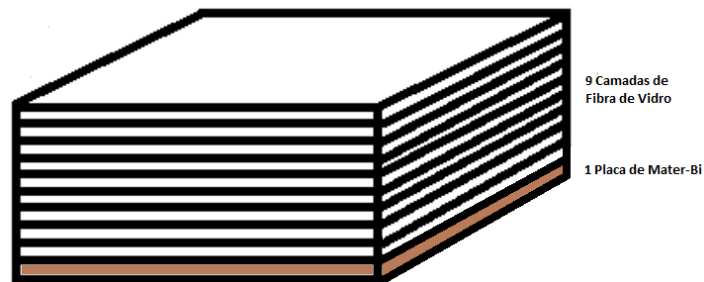


Figura 20- Empilhamento para a 2ª experiência de produção de compósitos

O molde foi fechado e colocado no interior do forno com pesos por cima. Foram utilizadas temperaturas entre os 175°C e os 250°C durante um tempo fixo de 5 horas, como mostram as tabelas 18, 19 e 20. Ao longo do processo houve medições da temperatura do molde no exterior do forno de modo a controlar o procedimento. Por fim deixou-se arrefecer e efetuou-se a desmoldagem.

Nas tabelas 18, 19 e 20 apresentam-se os registos de temperatura efetuados referentes à produção dos compósitos com resina de Mater-Bi reforçada com fibra de vidro.

### 1º Experiência

Tabela 18- Análise de temperaturas (1º experiência)

<b>Tempo [horas]</b>	<b>Temperatura do forno [°C]</b>	<b>Temperatura do molde [°C]</b>
1	200	136
1	200	166
1	175	170
1	175	N.V
1	175	170
5 Horas		

N.V- Não verificada

### 2º Experiência

Tabela 19- Análise de temperaturas (2º experiência)

<b>Tempo [horas]</b>	<b>Temperatura do forno [°C]</b>	<b>Temperatura do molde [°C]</b>
1	250	N.V.
1	250	210
1	200	180
1	250	N.V.
1	250	N.V.
5 Horas		

N.V- Não verificada

### 3º Experiência

Tabela 20- Análise de temperaturas (3º experiência)

<b>Tempo [horas]</b>	<b>Temperatura do forno [°C]</b>	<b>Temperatura do molde [°C]</b>
1	250	155
1	200	173
1	200	177
1	200	180
1	200	N.V.
5 Horas		

N.V- Não verificada

Na figura 21 apresentam-se algumas imagens relativas à produção dos compósitos com resina Mater-Bi em que se observou resultados diferentes. a) Na primeira experiência não ocorreu impregnação total das fibras e apenas as fibras adjacentes à resina ficaram

agarradas pontualmente à placa de Mater-Bi. Aparentemente a placa de resina não fundiu; b) e c) Na segunda experiência obteve-se uma aparente impregnação de sete camadas de fibra de vidro, no entanto a matriz carbonizou, perdendo assim as suas propriedades e fazendo com que as fibras não se mantenham juntas; d) Na terceira experiência obteve-se uma parcial impregnação de seis camadas de fibra de vidro, no entanto a matriz ficou aparentemente queimada. A impregnação ocorreu em três camadas inferiores e em três camadas superiores à placa de resina.

a)



b)



c)



d)



Figura 21-a) Resultado da produção das placas na primeira experiência; b) e c) Resultado da produção das placas na segunda experiência; d) Resultado da produção das placas na terceira experiência

### **4.1.3 Conclusões**

A produção do molde bem como a produção das placas com resina epoxídica reforçada com fibras sintéticas e naturais não apresentaram grandes dificuldades tendo-se obtido placas com bom aspeto. No entanto o mesmo não ocorreu na produção de placas de resina Mater-Bi reforçada com fibras de vidro.

Pôde-se verificar que o processo usando resina Mater-Bi é moroso, requer elevada quantidade de energia e não permitiu a impregnação adequada da fibra de vidro. Observou-se que a viscosidade desta resina é muito elevada, mesmo a altas temperaturas e por isso dificulta a impregnação das fibras.

Tendo em conta as temperaturas praticadas durante o processo, considerou-se desadequado a utilização de fibras naturais pois as temperaturas necessárias ao fabrico são muito elevadas, comprometendo assim as propriedades mecânicas das fibras.

## **4.2 Estimação das propriedades mecânicas dos compósitos**

Nesta secção pretende-se estimar as propriedades mecânicas dos compósitos previamente fabricados, aplicando métodos analíticos nomeadamente a regra das misturas apresentada anteriormente no capítulo 3.

### **4.2.1 Determinação das forças máximas para os ensaios de tração**

Nesta secção pretende-se estimar as forças teóricas máximas que serão atingidas nos ensaios de tração, de modo a escolher a célula de carga mais adequada para o efeito. Para tal efetuaram-se os cálculos para os compósitos de tecido de fibra de cânhamo com resina epoxídica e para os compósitos de tecido fibra de vidro com resina epoxídica, tendo em conta a espessura real média obtida no conjunto dos provetes ensaiados.

Na tabela 21 apresentam-se os dados técnicos referentes aos provetes de compósito. Os dados da fibra de cânhamo foram obtidos através do fornecedor e da consulta de dados técnicos recolhidos na bibliografia (tabela 4). Os dados da fibra de vidro foram obtidos através do fornecedor e da consulta de dados técnicos recolhidos na bibliografia (tabela 1). Os dados da resina epoxídica foram obtidos através do fornecedor e da consulta de dados técnicos recolhidos na bibliografia (tabela 8).

Tabela 21- Características dos provetes e propriedades dos materiais a incorporar nos compósitos

<b>Provetes</b>	
Dimensões dos provetes de fibra cânhamo [mm]	250x25x3
Dimensão dos provetes de fibra de vidro [mm]	250x25x2
Número de camadas (N)	8
<b>Fibra de cânhamo</b>	
Gramagem [Kg/m <sup>2</sup> ]	0,23734
Massa específica [Kg/m <sup>3</sup> ]	1500
Tensão máxima de rotura [MPa]	277
<b>Fibra de vidro</b>	
Gramagem [Kg/m <sup>2</sup> ]	0,296
Massa específica [Kg/m <sup>3</sup> ]	2550
Tensão máxima de rotura [MPa]	3445
<b>Resina epoxídica</b>	
Tensão máxima de rotura [MPa]	77

As espessuras dos provetes de compósito com fibra de cânhamo são diferentes dos compósitos com fibras de vidro, visto que foi utilizada a média das espessuras medidas nos provetes previamente fabricados (ver anexo I). Apesar das placas terem sido produzidas nas mesmas condições as espessuras obtidas foram diferentes. Esta diferença deve-se às diferenciações de áreas de fibras, ou seja, apesar de se ter usado a mesma quantidade de camadas de fibras, as fibras de vidro apresentam menor área transversal que as fibras de cânhamo ocupando menos espaço, tal como será demonstrado na secção 4.3 na análise dos fios. As espessuras estimadas na secção 3.4 para ambas as placas, apresentaram valores ligeiramente diferentes das espessuras reais das placas fabricadas, devido ao facto de haver algumas variações da espessura das placas, ao longo das mesmas, devido à dificuldade de se obter uma distribuição de resina completamente uniforme na moldagem manual.

Na figura 22 apresenta-se um desenho de um provete, obtido a partir de uma placa de compósito, indicando a área da secção, onde serão aplicadas as forças de tração e a área principal que será usada para o cálculo da fração de fibra e matriz presentes.

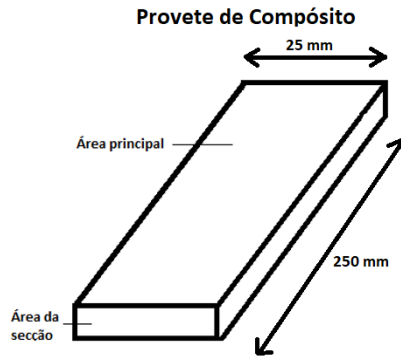


Figura 22- Definições das áreas de um provete

#### 4.2.1.1 Previsão de forças de rotura presentes nos ensaios de biocompósitos

Tendo em conta os dados da tabela 21 e as expressões apresentadas no capítulo 3, determinaram-se as forças máximas à tração para compósitos de resina epoxídica reforçados com fibra de cânhamo.

Área da secção:

$$\text{Área}_{\text{secção}} = 3 \times 25 = 75 \text{ mm}^2$$

Área principal:

$$\text{Área}_{\text{principal}} = 250 \times 25 = 6250 \text{ mm}^2$$

A massa das 8 camadas de fibra é obtida através da expressão (3):

$$\text{massa} = \text{Área}_{\text{principal}} \times \text{gramagem} \times N$$

$$\text{massa} = 6250 \times 10^{-6} \times 0,23734 \times 8 = 11,867 \text{ g}$$

Utilizando a expressão (5) referente ao cálculo da massa específica obtém-se:

$$V_f = \frac{m_f}{\rho_f} \Leftrightarrow V_f = \frac{11,867 \times 10^{-3}}{1500} \Leftrightarrow V_f = 7,9 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

O volume real do provete obtém-se da seguinte forma:

$$V_{\text{composito}} = 250 \times 25 \times 3 = 18750 \text{ mm}^3$$

Utilizando a expressão da fração de volume (4) obtém-se:

$$\frac{V_f}{V_{\text{composito}}} = \frac{7,9 \times 10^{-6}}{1,8750 \times 10^{-5}} = 0,42$$

Ou seja, obteve-se uma percentagem de fibra ligeiramente superior ao estimado inicialmente ( $v_f=42\%$  e  $v_m=58\%$ ).

Considerando a expressão (8) para o cálculo da tensão máxima tem-se:

$$\sigma_{\text{composito}} = \sigma_f \times v_f + \sigma_m \times v_m$$

$$\sigma_{\text{composito}} = 277 \times 0,42 + 77 \times 0,58 = 161 \text{ MPa}$$

$$F = \sigma_{\text{composito}} \times \text{Área}_{\text{secção}}$$

$$F = 161 \times 75 = 12075 \text{ N}$$

Estimam-se deste modo forças de rotura de cerca de 12kN, para os provetes de resina epoxídica reforçados com fibras de cânhamo.

#### 4.2.1.2 Previsão de forças de rotura presentes nos ensaios de compósitos sintéticos

Tendo em conta os dados da tabela 21 e as expressões apresentadas no capítulo 3, determinaram-se as forças de rotura à tração para compósitos de resina epoxídica reforçados com fibra de vidro.

Área da secção:

$$\text{Área}_{\text{Secção}} = 2 \times 25 = 50 \text{ mm}^2$$

Área principal:

$$\text{Área}_{\text{principal}} = 250 \times 25 = 6250 \text{ mm}^2$$

A massa das 8 camadas de fibra é obtida através da expressão (3):

$$\text{massa} = \text{Área}_{\text{principal}} \times \text{gramagem} \times N$$

$$\text{massa} = 6250 \times 10^{-6} \times 0,296 \times 8 = 14,8\text{g}$$

Utilizando a expressão (5) referente ao cálculo da massa específica obtém-se:

$$V_f = \frac{m_f}{\rho_f} \Leftrightarrow V_f = \frac{14,8 \times 10^{-3}}{2550} \Leftrightarrow V_f = 5,8 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

O volume real do provete obtém-se da seguinte forma:

$$V_{\text{composito}} = 250 \times 25 \times 2 = 12500 \text{ mm}^3$$

Utilizando a expressão da fração de volume (4) obtém-se:

$$\frac{V_f}{V_{\text{composito}}} = \frac{5,8 \times 10^{-6}}{1,2500 \times 10^{-5}} = 0,46$$

Ou seja, verifica-se que se tem um  $v_f=46\%$  e um  $v_m=54\%$ .

Assim sendo, utilizando a expressão (8) para o cálculo da tensão tem-se:

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{composito}} &= \sigma_f \times v_f + \sigma_m \times v_m \\ \sigma_{\text{composito}} &= 3445 \times 0,46 + 77 \times 0,54 = 1626,28 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$F = \sigma_{\text{composito}} \times \text{Área}_{\text{secção}}$$

$$F = 1626,28 \times 50 = 81314 \text{ N}$$

Estimam-se deste modo forças de rotura de cerca de 82kN, para provetes de resina epoxídica reforçados com fibra de vidro.

Assim sendo terá de ser usada uma célula de carga de 100kN para suportar as forças necessárias aos ensaios que se pretendem realizar.

#### **4.2.2 Determinação do módulo de elasticidade teórico dos compósitos**

Pretende-se nesta secção estimar o módulo de elasticidade teórico para os compósitos de fibra de cânhamo com resina epoxídica e para os compósitos de fibra de vidro com resina epoxídica, para comparação com os dados obtidos experimentalmente.

Na tabela 22 apresenta-se o módulo de elasticidade para os vários constituintes dos compósitos. Os dados da fibra de cânhamo foram obtidos através do fornecedor e da consulta de dados técnicos recolhidos na bibliografia (tabela 4). Os dados da fibra de vidro foram obtidos através do fornecedor e da consulta de dados técnicos recolhidos na bibliografia (tabela 1). Os dados da resina epoxídica foram obtidos através do fornecedor e da consulta de dados técnicos recolhidos na bibliografia (tabela 8).

Tabela 22- Modulo de elasticidade dos materiais utilizados nos compósitos

<b>Material</b>	<b>Módulo de Elasticidade [GPa]</b>
Fibra de cânhamo	9.5
Fibra de vidro	70
Resina epoxídica	3.1

Utilizando a expressão (9) referente ao módulo de elasticidade apresentada no capítulo 3 e as frações de volume calculadas na secção 4.2.1 obtém-se:

Fibra de cânhamo com resina epoxídica:

$$E = \eta \times E_f \times v_f + E_m \times v_m$$

$$E = 0,5 \times 9,5 \times 0,42 + 3,1 \times 0,58$$

$$E = 3,8 \text{ GPa}$$

Fibra de vidro com resina epoxídica:

$$E = \eta \times E_f \times v_f + E_m \times v_m$$

$$E = 0,5 \times 70 \times 0,46 + 3,1 \times 0,54$$

$$E = 17,8 \text{ GPa}$$

Na tabela 23 apresentam-se os valores teóricos expectáveis para os compósitos, obtidos através dos cálculos efetuados nas secções 4.2.1 e 4.2.2.

Tabela 23- Resultados expectáveis referente a algumas propriedades mecânicas

<b>Propriedades</b>	<b>Compósitos com fibra de cânhamo</b>	<b>Compósitos com fibra de vidro</b>
Tensão máxima [MPa]	161	1626,28
Forças de tração expectáveis [N]	12075	81314
Módulo de elasticidade expectáveis [GPa]	3,8	17,8

#### 4.2.3 Determinação analítica das massas das placas

Pretende-se nesta secção estimar a massa teórica das placas de compósito de modo a comparar com o valor real das mesmas.

Na tabela 24 apresentam-se os dados referentes às fibras utilizadas. Os dados da fibra de cânhamo foram obtidos através do fornecedor e da consulta de dados técnicos recolhidos na bibliografia (tabela 4). Os dados da fibra de vidro foram obtidos através do fornecedor e da consulta de dados técnicos recolhidos na bibliografia (tabela 1).

Tabela 24- Dados da placa de fibra de cânhamo e da placa de fibra de vidro

<b>Compósitos com fibra de Cânhamo</b>	
Volume [mm <sup>3</sup> ]	109200 (260×140×3)
Massa específica [kg/m <sup>3</sup> ]	1500
Massa real da placa [g]	127
<b>Compósitos com fibra de vidro</b>	
Volume [mm <sup>3</sup> ]	72800 (260×140×2)
Massa específica [kg/m <sup>3</sup> ]	2550
Massa real da placa [g]	131

Utilizando os volumes de fibra e de matriz calculados na secção 4.2.1, bem como os dados da tabela 24 calculou-se a massa teórica para a placa de fibra de cânhamo e para a placa de fibra de vidro.

Placa de fibra de cânhamo:

$$m_{teórica} = (\rho_f \times v_f + \rho_m \times v_m) \times V$$

$$m_{teórica} = (1500 \times 0,42 + 1130 \times 0,58) \times 1.092 \times 10^{-4}$$

$$m_{teórica} = 0,1404 \text{ Kg} = 140,4\text{g}$$

Placa de fibra de vidro:

$$m_{teórica} = (\rho_f \times v_f + \rho_m \times v_m) \times V$$

$$m_{teórica} = (2550 \times 0,46 + 1130 \times 0,54) \times 7.28 \times 10^{-5}$$

$$m_{teórica} = 0,1298 \text{ Kg} = 129,8\text{g}$$

$$\frac{m_{teórica} - m_{real}}{m_{real}}$$

$$\text{Massa percentual}_{\text{Fibra de canhamo}} = \frac{140,4 - 127}{127} \times 100 = 10,55\%$$

$$\text{Massa percentual}_{\text{Fibra de vidro}} = \left| \frac{129,8 - 131}{131} \right| \times 100 = 0,91\%$$

Para a placa de compósito de fibra de cânhamo observa-se que a massa teórica calculada é superior à massa real obtida, obtendo-se uma diferença percentual de 10,55%. Esta diferença deve-se aos poros existentes na placa real.

Verifica-se para a placa de compósito de fibra de vidro que a massa real do compósito é muito próxima da massa teórica calculada.

### 4.3 Análise têxtil e filamentar por microscopia

#### 4.3.1 Introdução

Nesta secção pretende-se fazer uma avaliação da constituição dos tecidos de fibra de cânhamo e de fibra de vidro através da análise por microscopia optica de varrimento (SEM), de modo a ser possível posteriormente caracteriza-los mecanicamente. Procedeu-se assim à análise do entrelaçamento das fibras, à contagem monofilamentar e à determinação da área da secção transversal de um fio para ambas as fibras.

Os tecidos produzidos por tecelagem resultam do entrelaçamento de fios em duas direções os fios da teia (vertical) e pelos fios perpendiculares aos primeiros denominados fios da trama, de acordo com a ilustração na figura 23. Os fios da teia são inicialmente estendidos no tear e dispostos de tal modo que possam ser alternadamente baixados e levantados pela ação de armações moveis. Os fios da trama são depois dispostos perpendicularmente à teia, podendo-se exibir vários tipos de entrelaçamentos. Existem três principais tipos de estruturas de entrelaçamentos denominados tafetá, sarja e cetim, sendo os restantes na sua maioria variantes destes três tipos (Bendel, *et al.*, 1979).

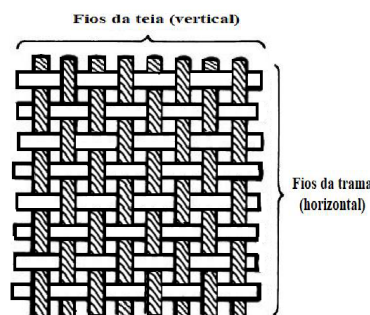


Figura 23- Constituição de um tecido (fios da teia e fios da trama)

### 4.3.2 Materiais

Foram retiradas pequenas amostras dos tecidos de fibra de cânhamo e de fibra de vidro, nas duas direções para se proceder à análise.

Para a análise dos materiais têxteis através do SEM foi necessário a preparação de amostras montadas em resina, devido às suas características geométricas. Como tal procedeu-se à montagem a frio, em moldes flexíveis, com uma resina acrílica de cura rápida da marca Metkon, DMT 20 Powder com o catalisador da marca Metkon, DMT 20 liquid. Os tecidos foram cortados com as dimensões de 1x1 [cm] (figura 24 a) e colocados dentro do molde, com a ajuda de um suporte de plástico, de forma a manter as amostras na vertical. Foi seguidamente vazada a resina para dentro do molde, aguardando-se 15 min até se dar a cura total da mesma. Os provetes foram seguidamente desmoldados e polidos para observação ao microscópio. O polimento foi realizado com água corrente usando lixas com a granulação 400, 600, 800 e 1000, até obter-se uma superfície plana. De seguida, realizaram-se polimentos com panos com pasta diamantada de 9  $\mu\text{m}$ , 6  $\mu\text{m}$  e 3  $\mu\text{m}$ . Para terminar as amostras foram revestidas com uma liga de ouro/paládio (figura 24 b), para observação no SEM.

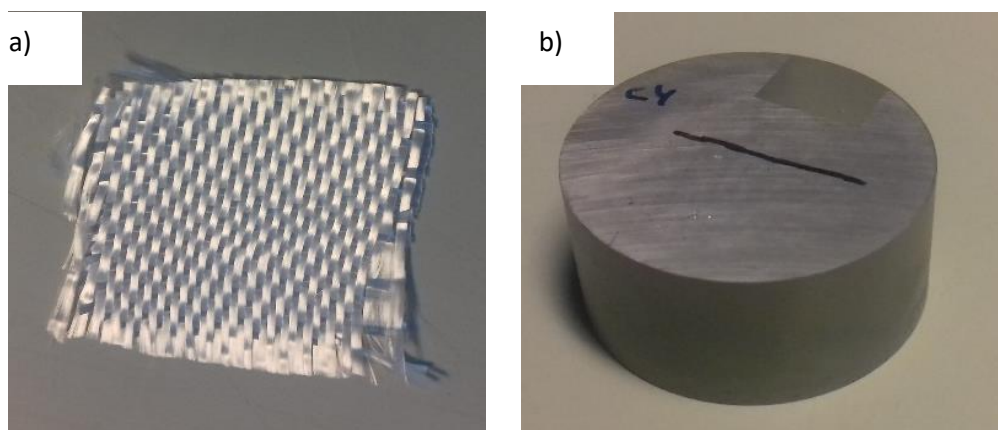


Figura 24- a) Amostra de tecido de fibra de vidro; b) Provede têxtil montado em resina

### 4.3.3 Método

A análise dos têxteis foi realizada recorrendo a um microscópio eletrónico de varrimento (SEM), da marca JEOL, modelo JSM-7001F com uma energia entre 5 e 10 kV, de modo a obter imagens detalhadas dos tecidos de fibra de cânhamo e dos tecidos de fibra de vidro.

Através das imagens SEM foi possível visualizar o entrelaçamento das fibras, permitindo observar se este é igual nas duas direções. Foram feitas observações com ampliações entre 12X a 700X.

Foi ainda possível analisar a quantidade de monofilamentos existentes num fio retirado do tecido de fibra de cânhamo e do tecido de fibra de vidro. Para o efeito foi utilizado o software de análise de imagem ImageJ (Rasband, 2016), de modo a ser possível proceder à contagem dos monofilamentos apresentados nas imagens obtidas através do SEM.

De igual modo, para a determinação da área da secção transversal dos fios utilizou-se o software ImageJ. Sabendo a ampliação de cada uma das imagens e utilizando as ferramentas de medição do software, definiu-se uma escala. De seguida delimitou-se a secção de cada um dos monofilamentos e determinou-se a área da secção transversal destes, como mostra a figura 25. Sabendo a área de cada um dos monofilamentos fazendo o somatório destas, obteve-se a área de secção transversal de um fio.

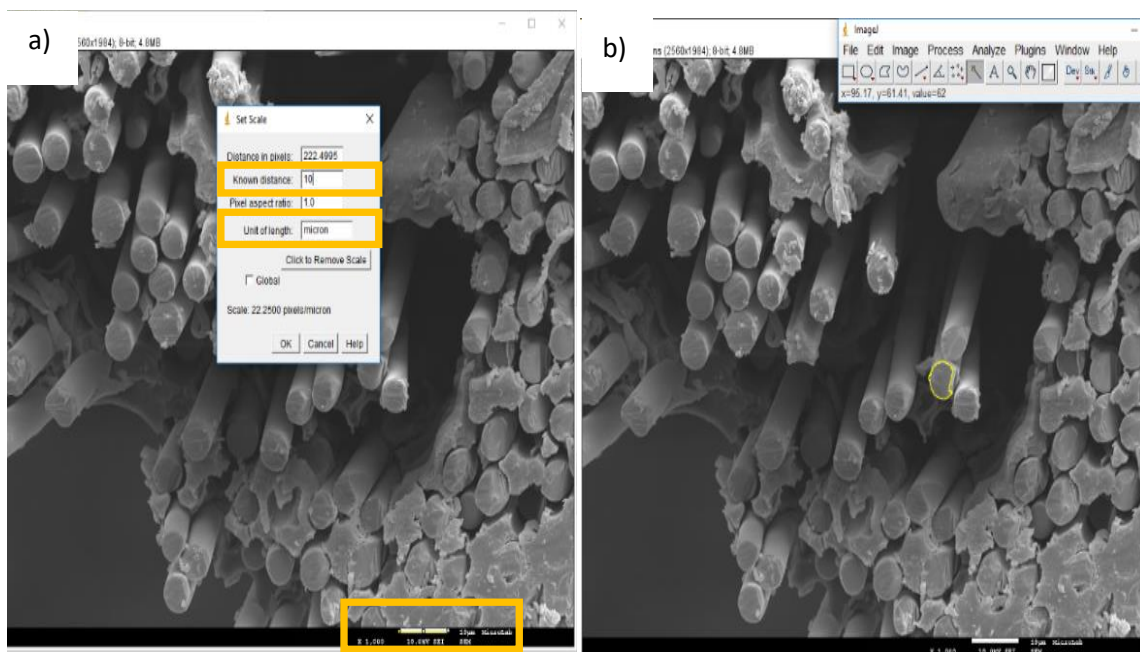


Figura 25- Software ImageJ, utilizado para a análise das áreas transversais. a) Definição da escala e unidades; b) delimitação da área de um monofilamento

### 4.3.4 Resultados

Na figura 26 apresentam-se duas imagens obtidas através do microscópio eletrónico de varrimento para o tecido de fibra de cânhamo e para o tecido de fibra de vidro. Nestas imagens é possível visualizar o entrelaçamento dos tecidos e avaliar se são idênticas nas duas direções.

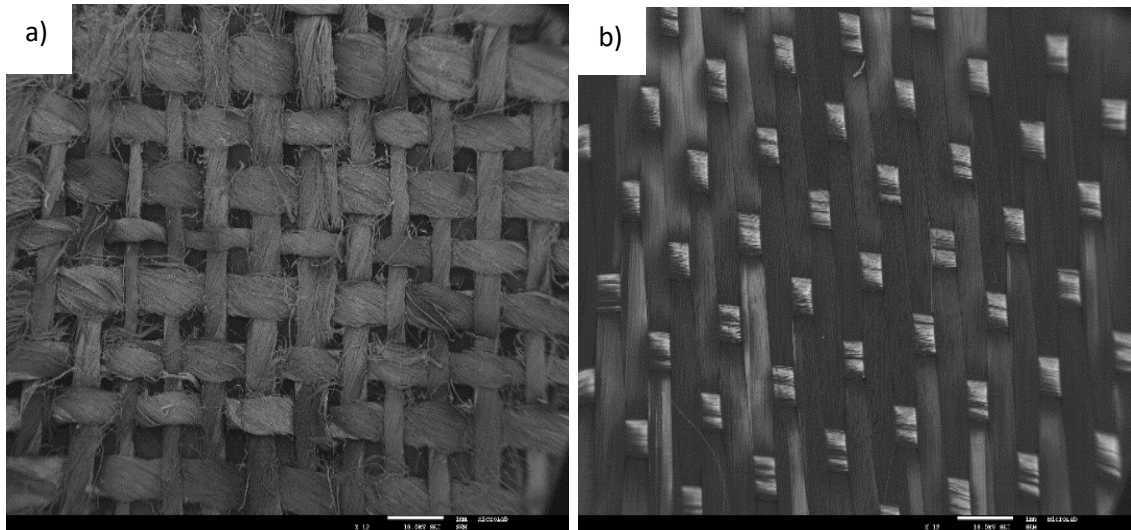
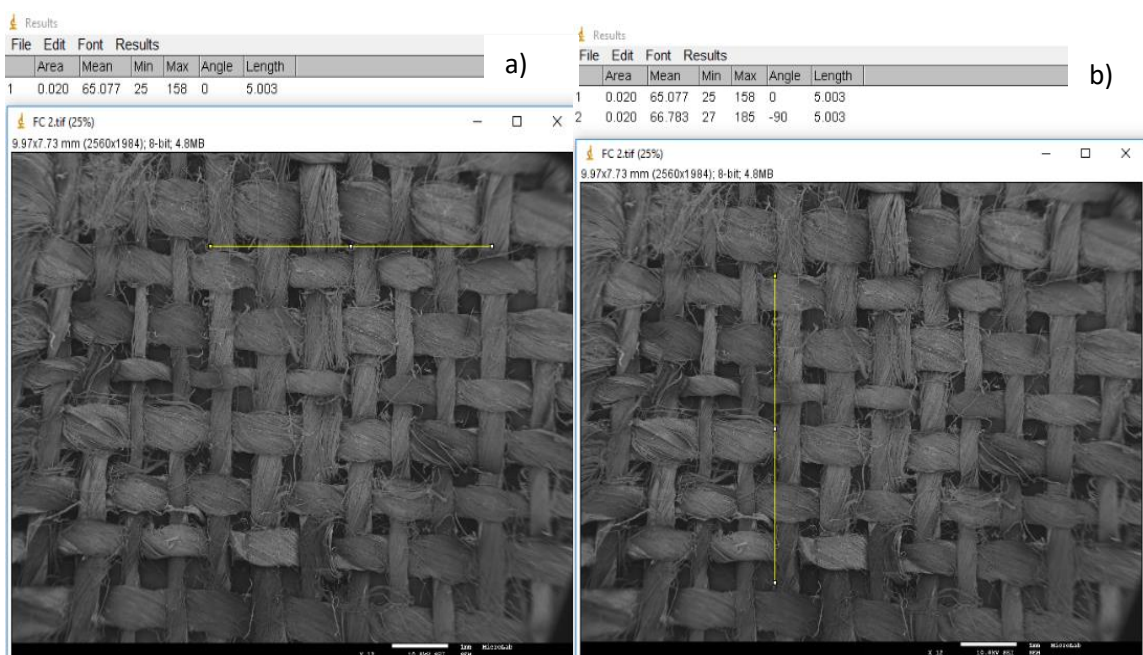


Figura 26- Imagens SEM do entrançamento; Ampliação: 12x a) fibra de cânhamo b) fibra de vidro

Através da análise de imagem da figura 27, procedeu-se à contagem dos fios nas direções horizontal e vertical que intersectam uma reta de aproximadamente 5 mm como demonstra o valor da zona superior do ecrã (length), assim é possível determinar se a quantidade de fios é idêntica em ambas as direções do tecido.



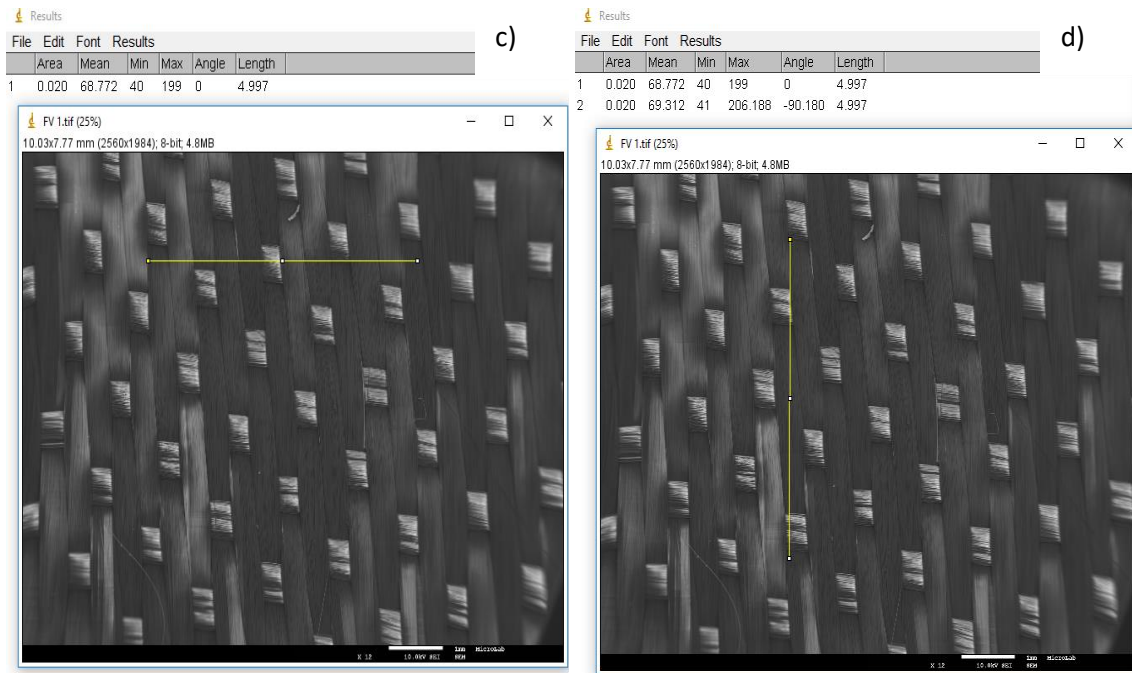
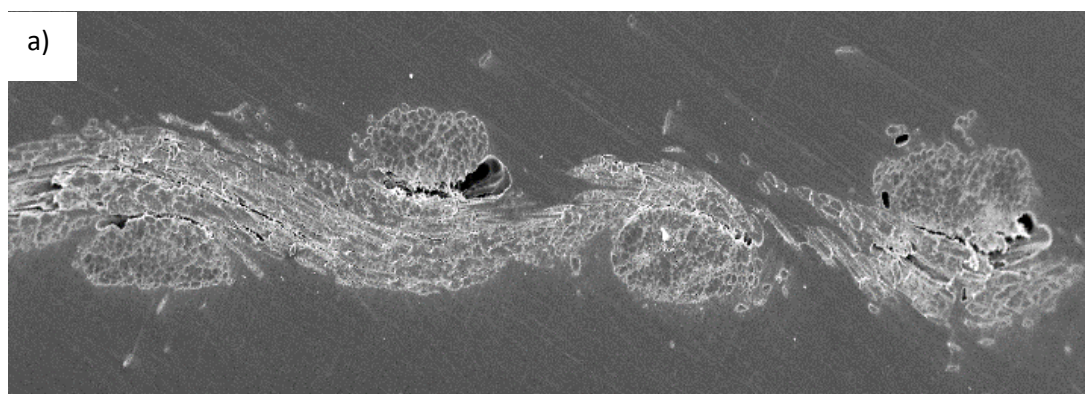


Figura 27- Análise da quantidade de fios em 5 mm nas duas direções a) e b) para fibras de cânhamo c) e d) para fibras de vidro; Ampliação: 12x

Na figura 28 apresentam-se duas imagens referentes a uma secção transversal do tecido de fibra de cânhamo e outra para o tecido de fibra de vidro. Nestas imagens é possível visualizar os fios vistos de topo e os fios a passarem transversalmente aos primeiros. Os fios são constituídos por vários monofilamentos, como tal, de modo a proceder à contagem destes e à determinação da área da secção, aumentou-se a ampliação de imagem sobre o fio que melhor forma apresentou.



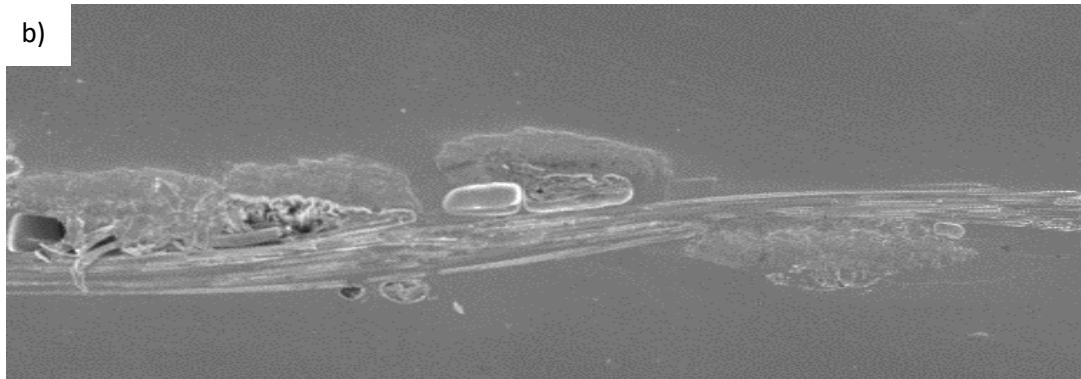


Figura 28- Secção transversal das a) fibras de cânhamo e das b) fibras de vidro; Ampliação: 20x

Na figura 29 observa-se com maior detalhe os vários monofilamentos que constituem um único fio tanto para a fibra de cânhamo como para a fibra de vidro, visto que se aumentou a ampliação sobre o fio escolhido.

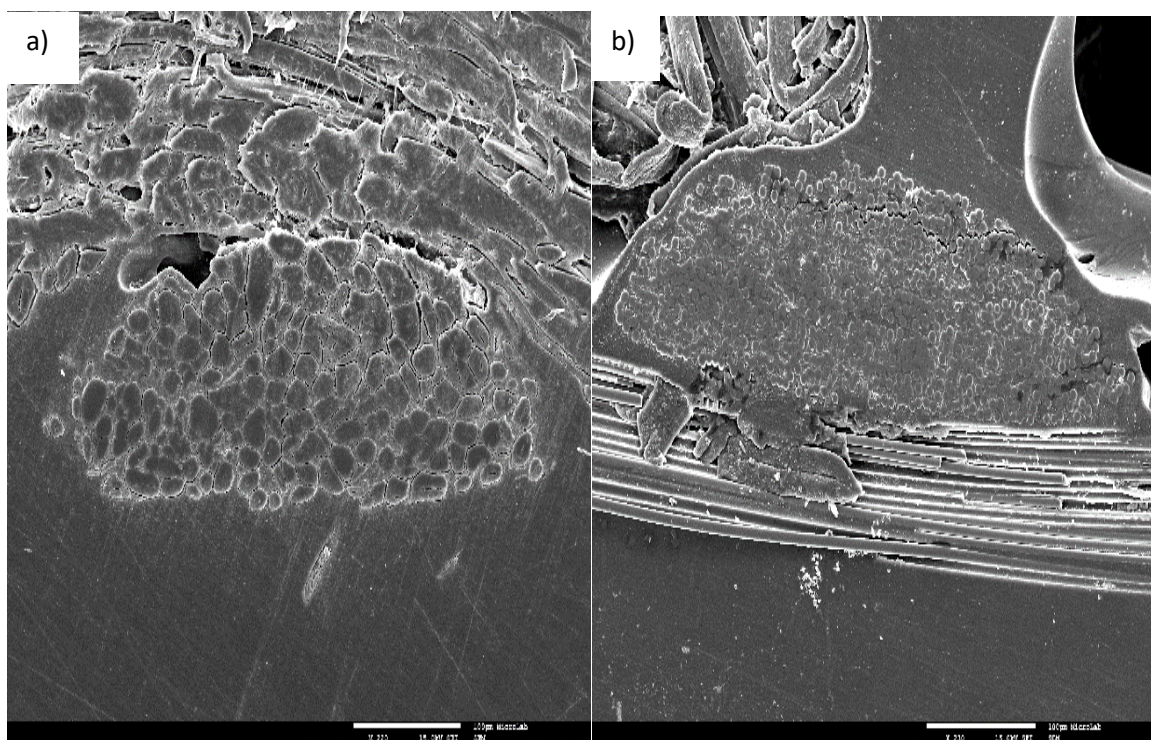


Figura 29- Secção de uma porção de a) fibras de cânhamo, Ampliação 220x e b) fibras de vidro, Ampliação: 230x

Através das imagens apresentadas na figura 29 foi possível determinar a área das secções dos fios de cânhamo e de vidro, permitindo ainda a determinação da quantidade de monofilamentos em cada fio. As áreas das secções das fibras de cânhamo são de aproximadamente  $0,034 \text{ mm}^2$  e as de fibra de vidro de aproximadamente  $0,022 \text{ mm}^2$  (Anexo II e III). Estas áreas são importantes de determinar para a obtenção das tensões

nos fios quando sujeitos a tração. Na contagem dos monofilamentos para as fibras de cânhamo obtiveram-se 145 monofilamentos enquanto para a fibra de vidro obtiveram-se 797 monofilamentos.

Na figura 30 observam-se os monofilamentos ao longo da direção longitudinal tanto para a fibra de cânhamo como para a fibra de vidro, observando-se a irregularidade da secção dos fios no caso das fibras naturais e a secção constante e uniforme na fibra de vidro, característica de fibras sintéticas.

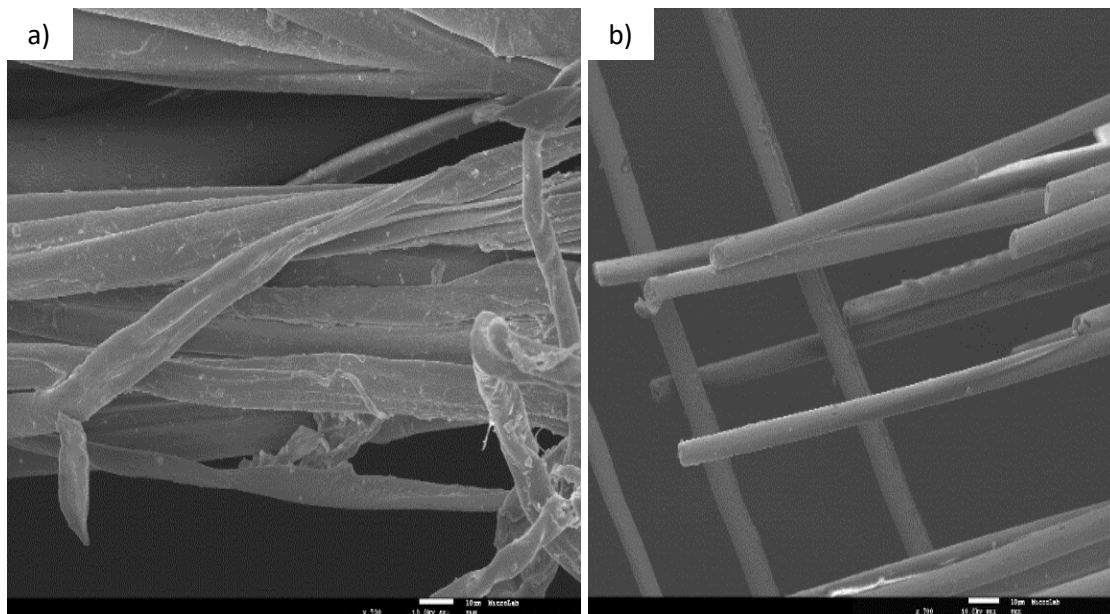


Figura 30- Formato da secção dos monofilamentos ao longo do comprimento a) fibras de cânhamo; b) fibras de vidro; Ampliação: 700x.

#### 4.3.5 Discussão de resultados

Da análise feita conclui-se que o tecido de fibra de cânhamo apresenta um entrelaçamento simples (ver figura 26 a), ou seja, os fios da trama passam alternadamente sobre e sob os da teia (ver figura 31). Observa-se este entrelaçamento nas duas direções.



Figura 31- Entrelaçamento das fibras de cânhamo

O tecido de fibra de vidro apresenta um entrelaçamento um pouco mais complexo (ver figura 26 b), ou seja, os fios da trama passam alternadamente sob sete fios da teia e sobre um fio da teia (ver figura 32). Observa-se um entrelaçamento idêntico nas duas direções.



Figura 32- Entrelaçamento das fibras de vidro

As fibras de cânhamo exibem seis fios, em ambas as direções, por cada 5 mm de comprimento do têxtil. Já as fibras de vidro apresentam aproximadamente doze fios, em ambas as direções, por cada 5 mm de comprimento.

Observa-se que as secções dos monofilamentos das fibras de cânhamo são muito irregulares com secções variando bastante de largura (figura 30 a). Pode-se ainda observar que as fibras de vidro apresentam secções circulares de diâmetro contante (figura 30 b).

#### **4.3.6 Conclusões**

A análise efetuada permitiu observar que o tecido de fibra de vidro apresenta maior número de monofilamentos num fio, uma menor área de secção e um entrelaçamento mais complexo em comparação com o tecido de fibra de cânhamo.

Comparando cada um dos têxteis nas duas direções, observou-se que o entrelaçamento na horizontal e na vertical é igual pelo que se espera que as propriedades em ambas as direções sejam idênticas, para cada um dos compósitos.

Na tabela 25 apresentam-se os resultados obtidos da análise dos tecidos obtidos por SEM.

Tabela 25- Resumo dos resultados obtidos por análise de imagem dos têxteis por SEM

<b>Tipo de fibra</b>	<b>Quantidade de fios por cada 5 mm de comprimento tecido (horizontal e vertical)</b>	<b>Quantidade de monofilamentos num fio</b>	<b>Área da secção de um fio [mm<sup>2</sup>]</b>	<b>Área da secção das fibras por cada 5mm [mm<sup>2</sup>]</b>
<b>Fibras de cânhamo</b>	6	145	0,034	0.2
<b>Fibras de vidro</b>	12	797	0,022	0.264

## **4.4 Estudo das propriedades mecânicas dos fios à tração**

### **4.4.1 Introdução**

Nesta secção pretende-se estudar o comportamento dos fios de fibra de cânhamo e dos fios de fibra de vidro à tração, de forma a poder compará-los e perceber em que medida as suas propriedades afetarão as propriedades dos compósitos onde serão usados.

### **4.4.2 Materiais**

Foram ensaiados à tração fios de dois materiais diferentes, nomeadamente fios de fibra de cânhamo e de fibra de vidro, retirados das direções horizontal e vertical dos tecidos utilizados no fabrico dos compósitos.

Para a realização dos provetes e devido à geometria dos fios, foi necessário fazer a sua montagem em cartolina para permitir o aperto adequado nas amarras e a criação de marcas para o uso do extensómetro vídeo. Foram cortados cartões com a dimensão 80×50 mm e retirados do têxtil fios com cerca de 80 mm, os quais foram colados na cartolina em dois pontos distanciados de 70 mm (figura 33). A cartolina foi marcada com dois pontos brancos distanciados de 50 mm junto ao local de fixação do provete, às amarras, de modo a permitir a leitura pelo extensómetro de vídeo. A cartolina foi cortada a meio, de modo a que durante o ensaio, só o fio ficasse sujeito a tração.

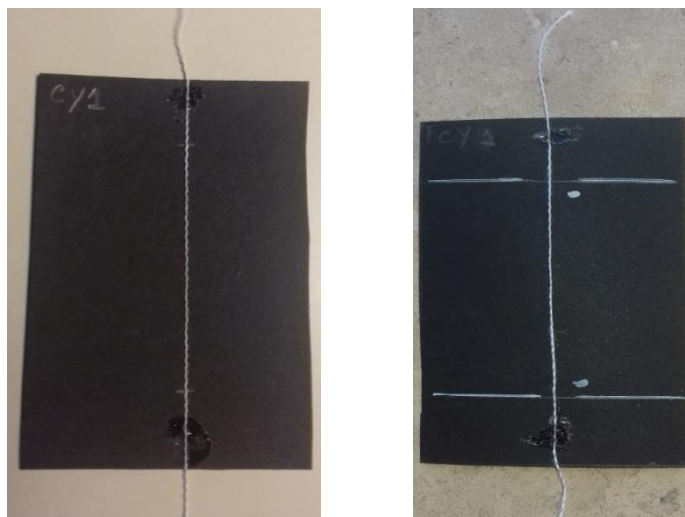


Figura 33- Provetes filamentosos para os ensaios de tração

#### 4.4.3 Método

Os testes de tração foram realizados no Instituto Superior Técnico numa máquina universal de ensaios mecânicos da marca Instron, modelo 5544, utilizando o software Bluehill 3. O procedimento utilizado nos ensaios de tração das fibras de cânhamo e das fibras de vidro baseou-se na norma ASTM D3379-75. Para os ensaios de tração dos fios, foram extraídos fios do tecido tanto na direção horizontal como na direção vertical. Foi utilizada uma célula de carga de 100N tendo sido imposta uma deformação a uma velocidade de 1 mm/min. Para a medição das extensões foi utilizado um extensómetro de vídeo (ver figura 34), o qual não entra em contacto com os provetes, não tendo qualquer influência sobre as amostras de teste, permitindo uma medição de elevada precisão.

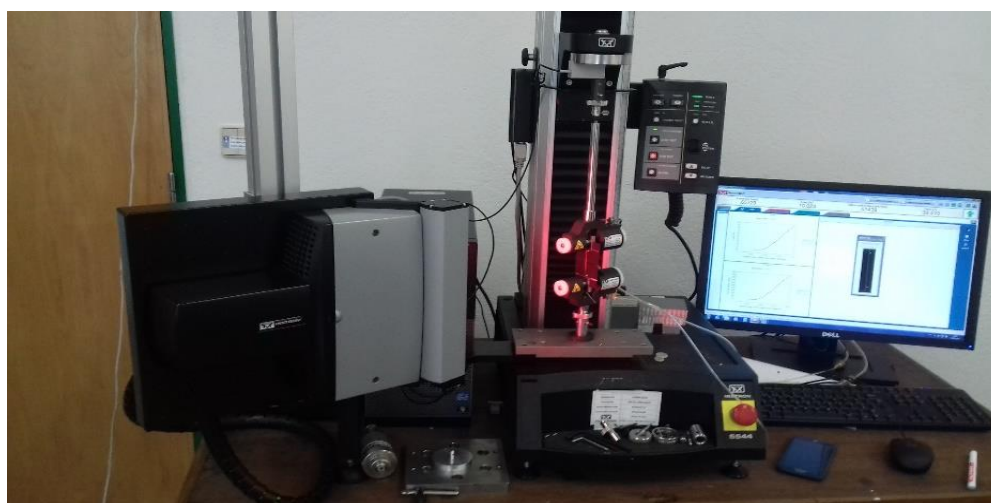


Figura 34- Equipamento utilizado nos ensaios de tração das fibras

As amostras foram fixadas na máquina, na posição vertical através de amarras pneumáticas, de tal forma que os pontos brancos ficassem junto às mesmas, em frente ao extensómetro de vídeo, de modo a permitir realizar as medições (ver figura 35). Após o aperto das amostras, os cartões foram cortados, deixando apenas o fio sujeito a tensão.

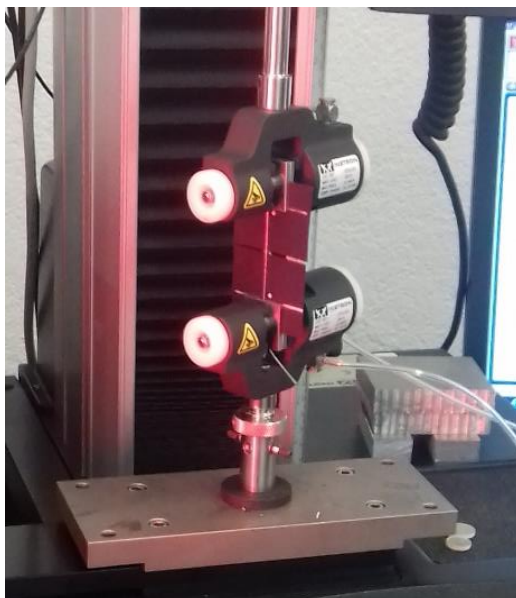


Figura 35- Posicionamento dos provetes durante o ensaio

Durante os ensaios as fibras foram submetidas a forças de tração uniaxiais até à rotura, tendo-se medido as forças, a deformação e a extensão dos provetes. As tensões foram posteriormente calculadas dividindo a força aplicada pela área da secção dos fios (obtido na secção 4.3.4).

Por cada tipo de tecido e para cada direção (horizontal e vertical) foram testados 4 provetes.

#### **4.4.4 Resultados experimentais**

Na figura 36 apresenta-se uma curva experimental tensão/extensão, obtida para um provete de fibra cânhamo. Fazendo uma análise mais detalhada verifica-se inicialmente o desenrolamento do fio (zona quase plana do gráfico) até este ficar esticado. Aparece depois uma zona reta, característica da zona elástica observando-se proporcionalidade entre a extensão e a tensão onde é válida a lei de Hooke. No final da zona elástica observa-se a fratura de alguns monofilamentos, levando a pequenas oscilações sucessivas o que

provoca a redução da secção do fio, dando-se seguidamente a rotura. Todos os provetes de fio de cânhamo apresentaram curvas idênticas.

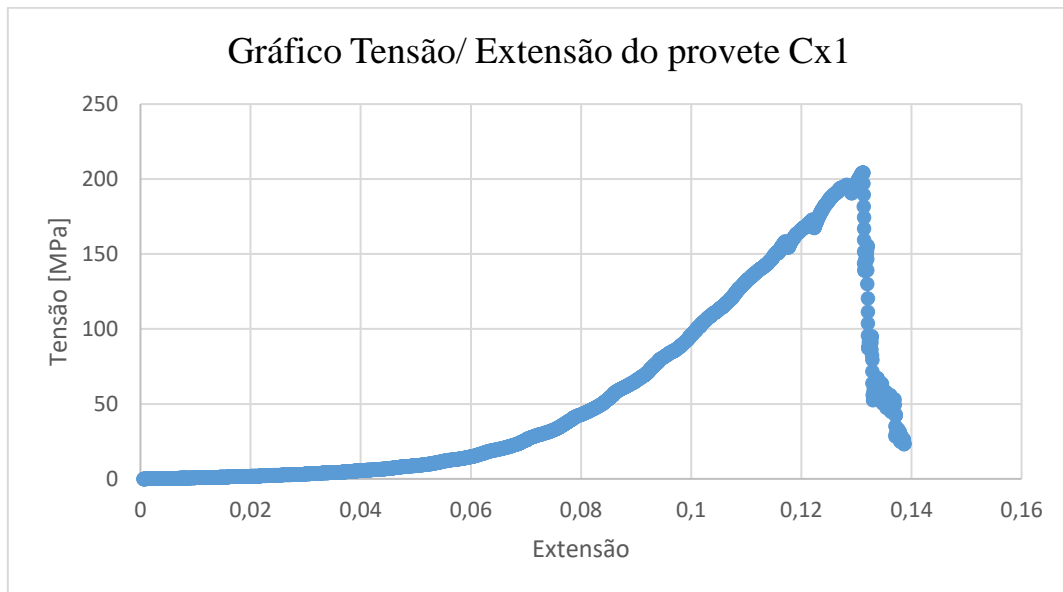


Figura 36- Curva experimental obtida num ensaio de tração para a fibra de cânhamo

Na figura 37 apresenta-se uma curva experimental tensão/extensão, para um provete de fibra de vidro. Tal como no caso anterior verifica-se inicialmente o desenrolamento do fio até este ficar totalmente esticado, observando-se no entanto, que esta zona é bastante menor do que nas fibras naturais. De seguida a curva apresenta uma zona linear com proporcionalidade entre a extensão e a tensão típica do domínio elástico. Observa-se posteriormente fratura progressiva dos monofilamentos até ocorrer a rotura total do fio.

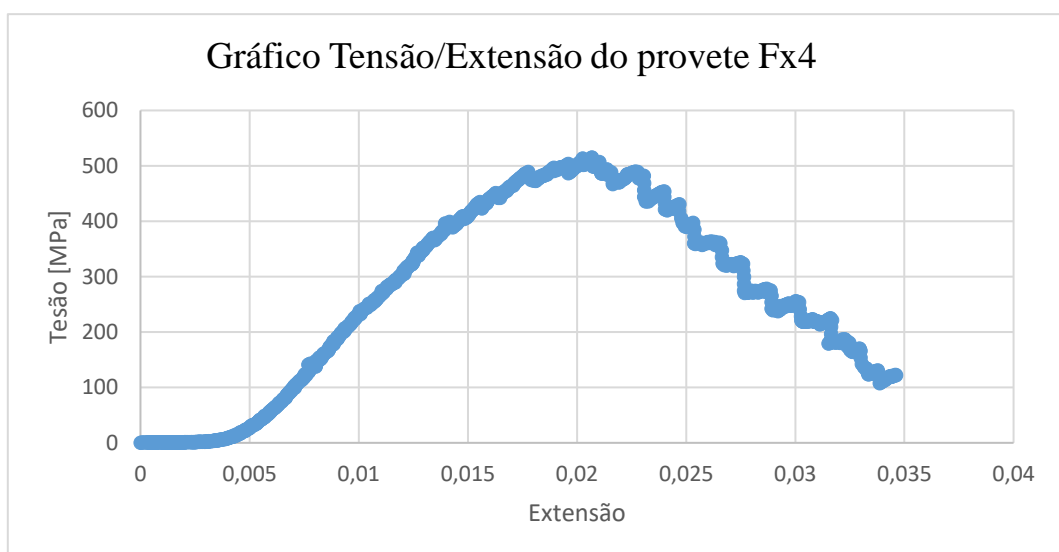


Figura 37- Curva experimental obtida num ensaio de tração para a fibra de vidro

Na tabela 26 apresentam-se os resultados dos ensaios de tração com os valores médios e os desvios padrão das propriedades obtidas nos ensaios de tração realizados aos provetes de fibra de cânhamo e de fibra de vidro na direção horizontal e vertical. No anexo IV apresentam-se todos os resultados obtidos durante os ensaios.

Tabela 26- Dados experimentais médios dos ensaios de tração para as fibras de cânhamo e de vidro

Provetes	Módulo de elasticidade [GPa]	Tensão de cedência [MPa]	Força máxima [N]	Tensão de rotura [MPa]	Extensão máxima
<b>Cânhamo direção horizontal</b>	3,542 ± 0,409	193,324 ± 7,035	7,136 ± 0,493	209,88 ± 14,493	0,140 ± 0,013
<b>Cânhamo direção vertical</b>	10,691 ± 1,147	298,493 ± 22,408	10,636 ± 0,964	312,838 ± 28,343	0,057 ± 0,010
<b>Vidro direção horizontal</b>	37,822 ± 4,169	472,815 ± 49,658	11,338 ± 1,148	513,031 ± 51,938	0,0338 ± 0,003
<b>Vidro direção vertical</b>	44,772 ± 5,338	650,071 ± 123,094	15,412 ± 2,367	697,366 ± 107,123	0,037 ± 0,007

#### 4.4.5 Discussão de resultados

Nesta secção pretende-se apresentar observações e comparações entre os resultados obtidos, produto das experiências laboratoriais efetuadas. Pretende-se ainda fazer uma comparação com dados recolhidos da bibliografia e apresentados na tabela 27.

Tabela 27- Dados obtidos da bibliografia consultada referente às fibras elementares de cânhamo e de vidro

Materiais	Módulo de Elasticidade [GPa]	Tensão de rotura [MPa]	Referências
<b>Fibra de cânhamo</b>	19,1	270	(Eichhorn & Young, 2004)
	14,4	285	(Placet, 2009)
	35	389-900	(Bodros, <i>et al.</i> , 2007)
	34,2	526	(Islam, Pickering, & Foreman, 2011)
<b>Fibra de vidro</b>	55,8-99,6	1400-2500	(Goda & Cao, 2007)
	72-73	3200-3400	(Davis , 2004)

Observando-se os resultados apresentados na tabela 26 verifica-se que a fibra de vidro tem um maior módulo de elasticidade que a fibra de cânhamo de acordo com o expectável e publicado na literatura. No entanto comparando os valores com a bibliografia consultada (tabela 27), pode-se constatar que os valores obtidos estão abaixo dos espectáveis.

Observa-se que a tensão de cedência e de rotura da fibra de vidro são bastante superiores aos da fibra de cânhamo, contudo apresentaram valores inferiores aos obtidos na literatura. No entanto a tensão de rotura da fibra de cânhamo, apresentou valores semelhantes a alguns encontrados na literatura, da ordem dos 200/300 MPa.

Verificou-se que o valor da extensão máxima das fibras de cânhamo na direção horizontal foi muito superior ao obtido na direção vertical, isto porque os monofilamentos apresentavam-se muito ondulados nessa direção. Os resultados das extensões das fibras de vidro tanto na horizontal como na vertical foram idênticos.

Tendo em consideração a análise efetuada aos têxteis na secção 4.3 seria expectável que as propriedades das fibras de cânhamo na horizontal e na vertical fossem semelhantes, no entanto isto não se verificou. Deve-se ter em atenção que todas as fibras têxteis naturais apresentam elevada variabilidade de secção o que afeta largamente as suas propriedades. Por outro lado, estas fibras são largamente afetadas pelo local e clima onde são cultivadas. Estes factos, de forma conjunta, contribuem para uma grande variabilidade nas propriedades medidas.

Em relação às fibras de vidro verificou-se algumas dispersões de resultados, típicas de materiais fibrosos, mas globalmente as fibras exibiram propriedades idênticas nas duas direções, como seria expectável numa fibra sintética.

#### **4.4.6 Conclusões**

Verificou-se que as fibras de cânhamo apresentam uma elevada ondulação dos fios, levando à obtenção de extensões mais elevadas, comparativamente à fibra de vidro. As fibras de cânhamo apresentaram valores de tensão de rotura idênticos a alguns publicados na literatura. As fibras de cânhamo apresentaram dispersões típicas das fibras naturais dado que são fibras não uniformes com grande variabilidade de secção ao longo do comprimento. Será expectável que nos ensaios dos provetes de compósitos se verifique diferenças comportamentais, visto que a fibra irá influenciar significativamente as

características mecânicas do compósito. A fibra de vidro apresentou valores abaixo dos encontrados na literatura, contudo estes valores dependem do tipo de fibra de vidro e do fabricante da mesma.

## 4.5 Estudo das propriedades mecânicas dos compósitos à tração

### 4.5.1 Introdução

Nesta secção pretende-se estudar o comportamento à tração dos provetes de compósitos reforçados a fibra de vidro e dos provetes de compósitos reforçados a fibra de cânhamo produzidos de acordo com o descrito em 4.1.2, de modo a analisar as potencialidades da utilização de recursos naturais e biodegradáveis no fabrico de peças de material compósito.

### 4.5.2 Materiais

Foram ensaiados provetes retirados das placas produzidas com resina epoxídica, com fibra de cânhamo e com fibra de vidro (secção 4.1.2), produzidos com e sem vácuo.

Os ensaios foram realizados em provetes planos de secção retangular com a dimensão 250x25mm (figura 38) e com as espessuras indicadas na tabela 28.



Figura 38- Proвете de compósito para ensaios de tração

Na tabela 28 apresenta-se um resumo das variáveis existentes nos provetes produzidos.

Tabela 28- Variáveis dos provetes de compósitos

Material		Nº de Camadas	Orientação das fibras	Produção a vácuo	Provetes ensaiados	Espessura média [mm]
Fibra de Cânhamo	Resina epoxídica	8	Bidirecional	Com	5	2.9
				Sem		3.1
Fibra de vidro				Com		1.7
				Sem		2.1

### 4.5.3 Método

A norma consultada para a realização dos ensaios de tração foi a ASTM D3039. Este método de ensaio abrange a determinação das propriedades de tração de plásticos reforçados e não reforçados, quando testados sob condições definidas de pré-tratamento, temperatura, humidade e velocidade de ensaio.

Os testes de tração foram realizados numa máquina universal de ensaios mecânicos, servo-hidráulica da marca Instron, modelo 8502, com o software Bluehill existente no Instituto Superior Técnico. Na figura 39 é possível visualizar o equipamento utilizado na realização dos ensaios de tração.



Figura 39- Equipamento utilizado nos ensaios de tração de provetes de compósito

As amostras foram fixadas na máquina, na posição vertical, utilizando amarras hidráulicas. Para medição das extensões foi usado um extensómetro movível (figura 40), acoplado ao provete com  $l_0=12,5\text{mm}$ .

Foram registados, ao longo dos ensaios, a força, a deformação e a extensão. Para a obtenção da tensão, dividiu-se a força registada pela área média da secção do provete medida antes da realização dos ensaios.

Os ensaios foram realizados com uma célula de carga de 100 kN e foi imposta uma velocidade de ensaio de 2 mm / min. Por cada tipo de reforço, com e sem vácuo, foram testados 5 provetes.



Figura 40- Provete de compósito montado nas amarras hidráulicas e com extensômetro acoplado

#### 4.5.4 Resultados experimentais

Na figura 41 a) apresenta-se uma curva experimental tensão/extensão, obtida para um provete de resina epoxídica reforçado com fibra de cânhamo, fabricado com utilização de vácuo. Analisando o gráfico verifica-se que, inicialmente, a curva apresenta uma região linear, obedecendo à lei de Hooke, com proporcionalidade entre a tensão e a extensão, característica do domínio elástica. O material atinge a tensão de cedência e observa-se posteriormente a zona plástica, onde o provete sofre a maior parte da deformação, ocorrendo depois a rotura.

Na figura 41 b) apresenta-se uma curva experimental tensão/extensão, para um provete de resina epoxídica reforçado com fibra de cânhamo, fabricado sem a utilização de vácuo. Pode-se verificar que o comportamento desta curva é muito semelhante à obtida em provetes com vácuo, havendo contudo variações nas propriedades obtidas.

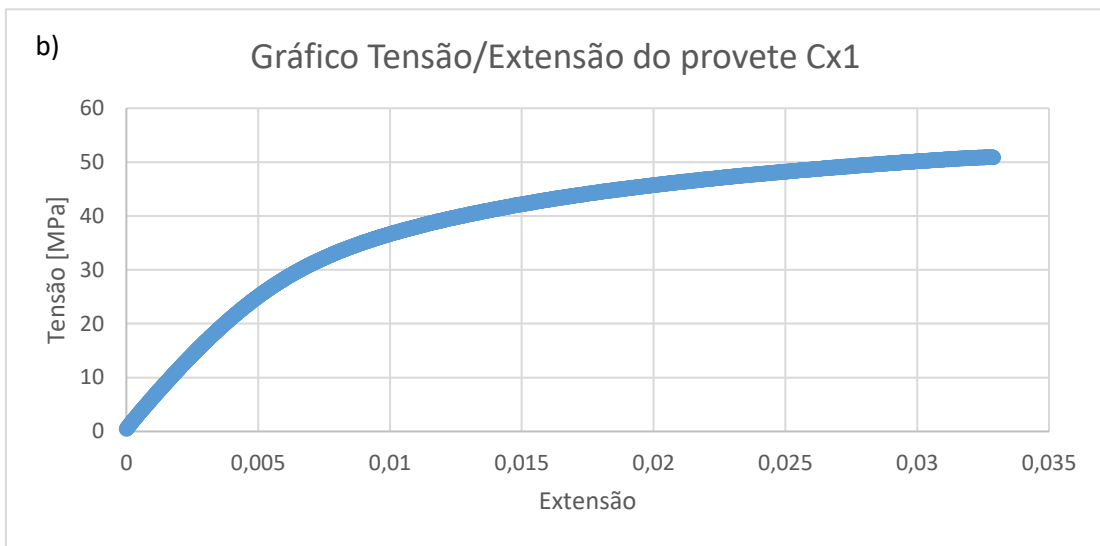
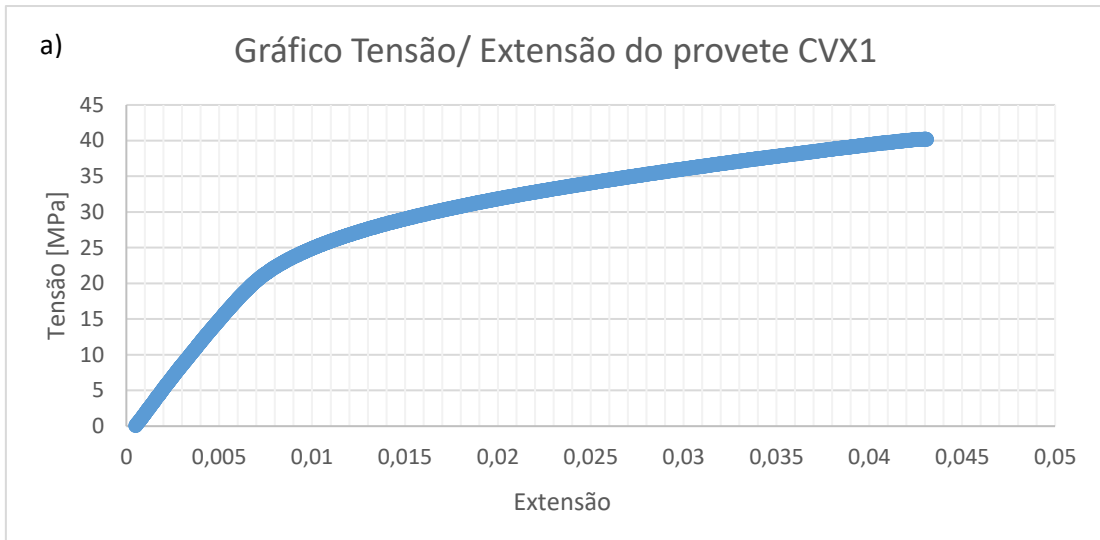


Figura 41- Curva experimental tensão extensão para compósitos de fibra de cânhamo a) com vácuo e b) sem vácuo

Na figura 42 a) apresenta-se uma curva experimental tensão/extensão, para um provete de resina epoxídica reforçado com fibra de vidro, fabricado com vácuo e na figura 42 b) apresenta-se uma curva experimental tensão/extensão, para um provete de resina epoxídica reforçado com fibra de vidro, fabricado sem vácuo. Observa-se que estas curvas apresentam apenas zona elástica atingindo-se a rotura no final da zona linear elástica.

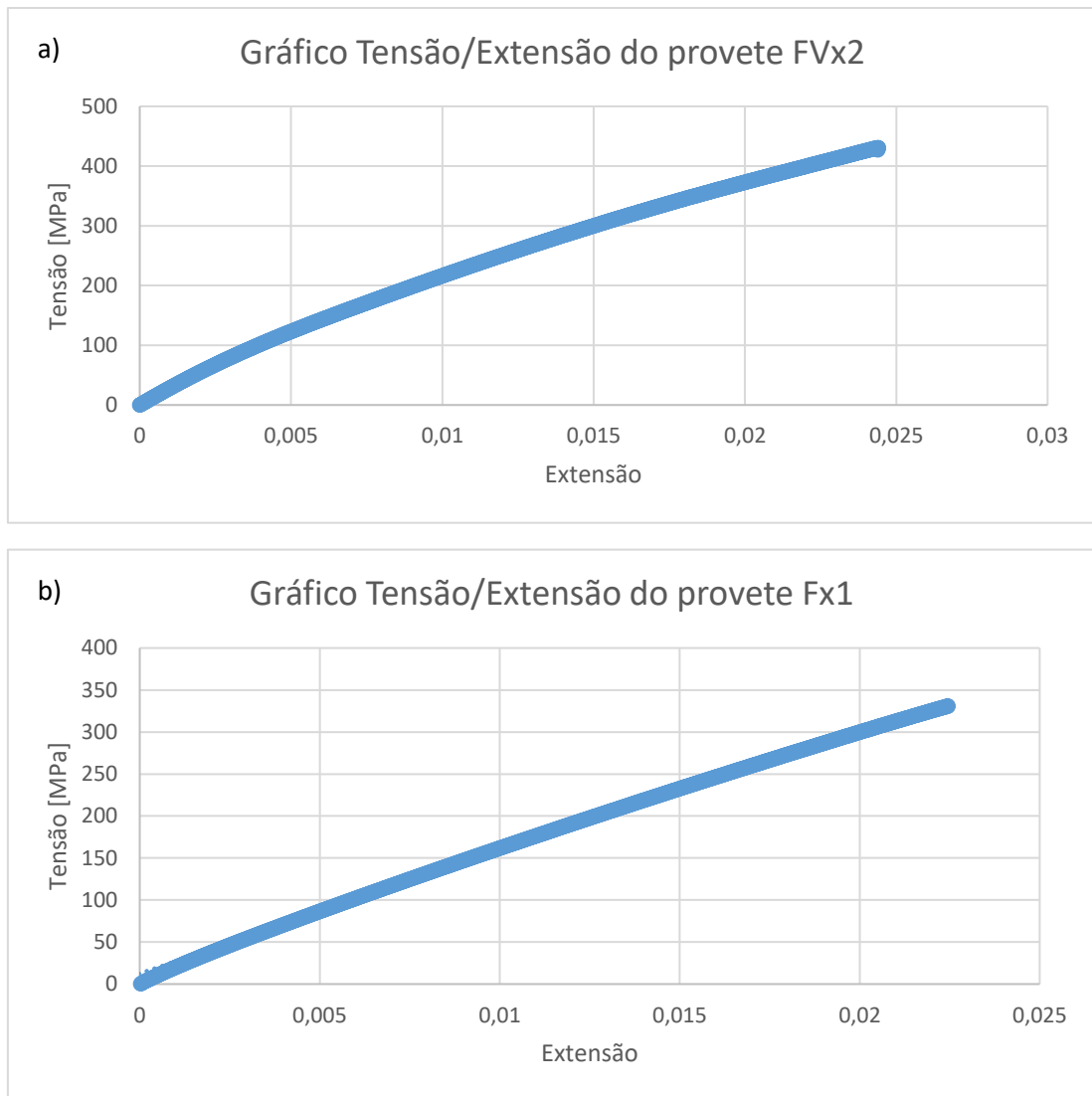


Figura 42- Curva experimental tensão extensão para compósitos de fibra de vidro a) com vácuo e b) sem vácuo

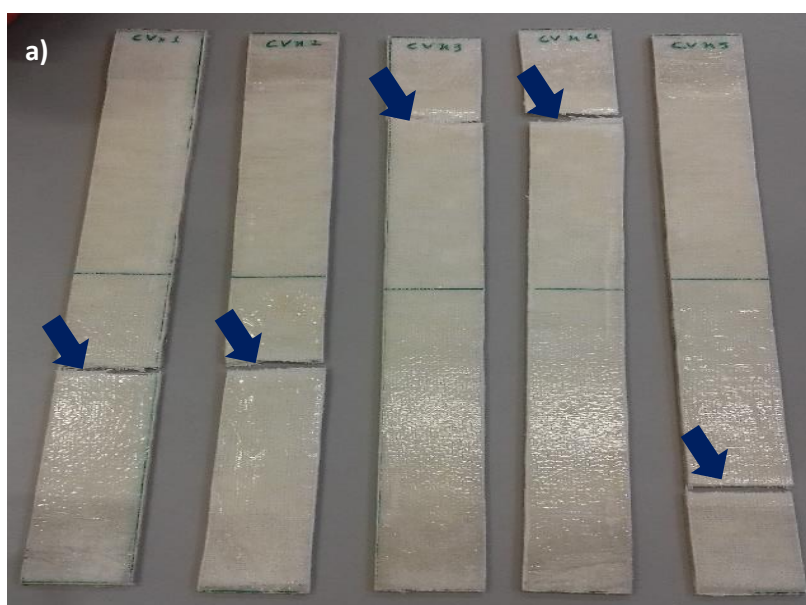
Como se pode observar das curvas obtidas, os compósitos de fibra de vidro apresentam um comportamento do tipo elástico, ocorrendo fratura sem deformação plástica. No entanto os compósitos de fibra de cânhamo exibem alguma plasticidade antes da fratura.

Na tabela 29 apresentam-se os resultados dos ensaios de tração dos vários compósitos, apresentando-se o valor médio e o desvio padrão das propriedades obtidas. No anexo V apresentam-se os resultados de todos os ensaios realizados. Na figura 43 apresentam-se varias fotografias dos provetes após serem ensaiados, observando-se as zonas de fratura.

Tabela 29- Dados experimentais obtidos nos ensaios de tração para os materiais compósitos em estudo

Provete	Módulo de elasticidade [GPa]	Tensão de cedência [MPa]	Tensão máxima [MPa]	Extensão máxima	Força máxima [kN]
Compósitos de cânhamo e resina epoxídica com vácuo	$4,04 \pm 0,409$	$14,424 \pm 1,33$	$41,00 \pm 1,240$	$0,04 \pm 0,002$	$2,93 \pm 0,062$
Compósitos de cânhamo e resina epoxídica sem vácuo	$5,09 \pm 0,640$	$23,754 \pm 2,40$	$52,076 \pm 0,785$	$0,046 \pm 0,015$	$4,03 \pm 0,079$
Compósitos de fibra de vidro e resina epoxídica com vácuo	$24,20 \pm 1,814$	-	$414,221 \pm 18,034$	$0,049 \pm 0,045$	$17,220 \pm 0,290$
Compósitos de fibra de vidro e resina epoxídica sem vácuo	$17,1 \pm 2,295$	-	$307,121 \pm 16,747$	$0,050 \pm 0,042$	$16,167 \pm 1,109$

Observa-se que os compósitos com fibra de vidro apresentaram melhores resultados quando produzidos com vácuo, provavelmente devido à menor quantidade de vazios. O mesmo não aconteceu com os provetes de cânhamo possivelmente devido a alguns defeitos existentes na parte superficial dos provetes.



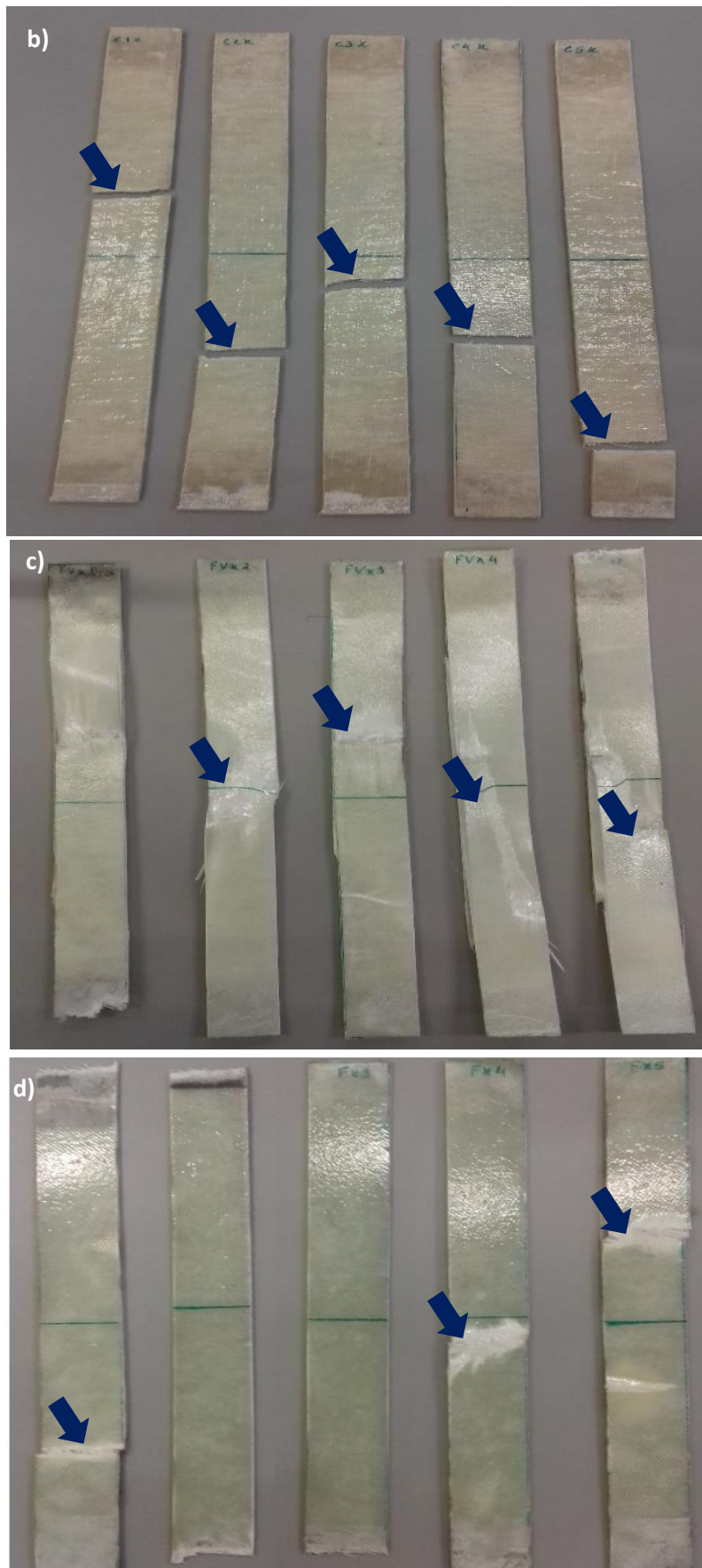


Figura 43- Provetes ensaiados, a)Fibra de cânhamo fabricados com vácuo; b) Fibra de cânhamo fabricados sem vácuo; c) Fibra de vidro fabricados com vácuo, d) Fibra de vidro fabricados sem vácuo

Observou-se que nos provetes com fibra de cânhamo ocorreu uma fratura total sem delaminação do provete. No que concerne aos provetes com fibra de vidro verificou-se que a rotura foi acompanhada de uma extensa delaminação.

#### 4.5.5 Discussão de resultados

Nas tabelas 30 e 31 apresentam-se alguns dados recolhidos em estudos efetuados por outros investigadores. Estes valores servem para comparação com os resultados obtidos experimentalmente.

Tabela 30- Dados obtidos da bibliografia consultada referente a compósitos de fibra de cânhamo/resina epoxídica

Material	Módulo de elasticidade [GPa]	Tensão de rotura [MPa]	Referência
<b>Tecido de fibra de cânhamo e resina epoxídica (<math>v_f=40\%</math>)</b>	3.33	75	(Lau, <i>et al.</i> , 2017)
<b>Fibras unidirecionais de cânhamo e resina epoxídica (<math>v_f=50\%</math>)</b>	33,875	294	(Liu, <i>et al.</i> , 2016)
<b>Fibras unidirecionais de cânhamo e resina epoxídica (<math>v_f=50\%</math>)</b>	34	295	(Liu, <i>et al.</i> , 2016)

Tabela 31- Dados obtidos da bibliografia consultada referente a compósitos de fibra de vidro/resina epoxídica

Material	Módulo de elasticidade [GPa]	Tensão de rotura [MPa]	Referência
<b>Fibra unidirecionais de vidro com resina epoxídica (<math>v_f=40\%</math>)</b>	31	530	(VAN DE WEYENBERG, 2005)
<b>Tecido de fibra de vidro e resina epoxídica (<math>v_f=50\%</math>)</b>	20	264	(Castro, <i>et al.</i> , 2000)

Comparando os resultados experimentais, verifica-se que os compósitos de fibra de vidro obtiveram melhores resultados que os compósitos de fibra de cânhamo com e sem vácuo. Um dos fatores que contribui para o melhor comportamento dos compósitos com fibra de vidro deve-se ao facto do têxtil de fibra de vidro apresentar mais fios por unidade de comprimento em comparação com o tecido de fibra de cânhamo de acordo com o apresentado na secção 4.3.

Comparando o efeito da utilização de vácuo nas propriedades dos compósitos verificou-se que nos provetes com fibra de cânhamo fabricados com vácuo obtiveram-se piores resultados que nos compósitos de fibra de cânhamo sem vácuo. No entanto nos

compósitos de fibra de vidro ocorreu o inverso, obtendo-se melhores resultados com a utilização de vácuo. A utilização do vácuo na produção dos provetes deveria conduzir a melhores propriedades nos compósitos, visto que tende a diminuir a quantidade de poros nas peças, permitindo a produção de compósitos mais homogêneos com uma melhor distribuição de resina pela fibra e sem vazios. Os piores resultados obtidos usando vácuo, em provetes de cânhamo, podem-se dever a alguns defeitos provocados pela reutilização do absorvente (feltro) na produção das placas de compósito. Como é possível observar na figura 44, os provetes evidenciam pequenas depressões à superfície, do lado em que se colocou o absorvente, coincidindo com a zona de acumulação de resina seca obtida da reutilização do feltro. Estas depressões funcionam como zonas de nucleação de fissuras que propagam quando os compósitos são sujeitos a tração.



Figura 44- Defeitos no provete de fibra de cânhamo produzidos com vácuo

Nos provetes produzidos com fibra de vidro assistidos com vácuo observou-se delaminação mais extensa após os ensaios. Ou seja, a adesão na interface fibra/matriz foi menor, possivelmente devido à força exercida pelo poder de sucção do vácuo que removeu alguma resina entre camadas. Na figura 45 pode-se observar a delaminação ocorrida num provete.



Figura 45- Delaminação nos provetes de fibra de vidro produzido com vácuo

Observou-se que tanto os compósitos de fibra de vidro como os compósitos de fibra de cânhamo exibiram um módulo de elasticidade um pouco acima do valor expectável, para

um volume de fibra de 50% para a fibra de vidro e para um volume de fibra de 40% para a fibra de cânhamo, tendo em consideração a literatura consultada. O módulo de elasticidade calculado na secção 4.2.2 ficou muito próximo dos valores obtidos experimentalmente.

Os valores das forças expectáveis calculadas na secção 4.2.1 mostram que os valores experimentais obtidos ficaram bastante abaixo dos esperados. Isto deve-se possivelmente ao facto dos valores teóricos utilizados não coincidirem com os valores reais.

As tensões de rotura entre os provetes de fibra de cânhamo e de fibra de vidro não podem ser comparadas visto que as percentagens de volume de fibra dos provetes não são as mesmas. De facto os compósitos de fibra de cânhamo apresentaram 42% de volume de fibra e os compósitos de fibra de vidro apresentaram 46% de volume de fibra.

Os compósitos de fibra de vidro atingiram valores de tensão de rotura superiores aos apresentados na bibliografia consultada (tabela 31) para volumes de fibra de 50%, exibindo boas propriedades à tração. Em relação aos compósitos de fibra de cânhamo verificou-se que a tensão de rotura esteve um pouco a baixo do expectável (tabela 30).

Em relação às extensões os valores foram semelhantes para os dois tipos de compósitos, no entanto os compósitos de fibra de vidro exibiram uma elevada dispersão de resultados. Por outro lado verifica-se que os compósitos de fibra de cânhamo apresentaram alguma plasticidade, não exibindo uma rotura completamente frágil como acontece nos compósitos de fibra de vidro.

#### **4.5.6 Conclusões**

Comparando os compósitos de fibra de vidro com os compósitos de fibra de cânhamo pode-se concluir que estes últimos estão um pouco abaixo do desempenho dos primeiros.

Tendo em conta os métodos analíticos aplicados de modo a obter as propriedades expectáveis dos compósitos, observa-se que tanto o módulo de elasticidade do compósito com fibras de cânhamo como o do compósito com fibras de vidro estiveram próximos dos valores obtidos experimentalmente.

O módulo de elasticidade dos compósitos de fibra de vidro foi o resultado experimental com valores mais próximos aos recolhidos na literatura.

Comparando a utilização e a não utilização do vácuo na produção dos provetes, pode-se concluir que esta, em alguns casos melhora as propriedades mecânicas do compósito. No entanto a sua utilização nalguns casos acentua alguns defeitos durante a produção. Sendo necessário otimizar as condições de fabrico dos compósitos para evitar porosidades e obter-se uma uniformização da resina para evitar problemas de delaminação.

Apesar das propriedades dos compósitos com fibra de cânhamo serem inferiores às dos compósitos com fibra de vidro, observa-se alguma plasticidade dos compósitos com fibra de cânhamo, conferido por este tipo de fibra, o que pode ser vantajoso em múltiplas aplicações de engenharia em que se pretendem evitar fraturas frágeis.



## 5. Conclusões

### 5.1 Conclusões gerais

A pesquisa efetuada permitiu confirmar que existem várias fibras e matrizes naturais e biodegradáveis possíveis de utilizar no fabrico de compósitos. Estes materiais apresentam contudo uma grande variabilidade de propriedades mecânicas, sendo necessário desenvolver mais estudos em termos de análise de propriedades básicas e de processo de fabrico, de modo a perceber melhor o seu comportamento mecânico quando utilizados em novos materiais compósitos biodegradáveis. O foco desta dissertação de mestrado centrou-se na análise da potencialidade de utilização de fibras de cânhamo em compósitos de baixo impacto ambiental dado que estas fibras apresentam excelentes propriedades mecânicas, sendo por isso bastante atrativas no que concerne à sua utilização para substituição de fibras sintéticas.

Inicialmente um dos objetivos desta dissertação foi o de estudar a utilização de fibras de cânhamo e de fibras de vidro impregnadas com uma resina biodegradável (Mater-Bi). No entanto devido às elevadas temperaturas de fusão desta resina e à sua elevada viscosidade, foi impossível realizar uma impregnação eficaz das fibras não tendo sido possível produzir provetes adequados à realização dos ensaios pretendidos. Assim sendo o estudo prosseguiu usando apenas uma matriz sintética, a epoxídica.

Os ensaios realizados em fibras demonstraram que as tensões suportadas pelas fibras de vidro são superiores às suportadas pelas fibras de cânhamo e que o módulo de elasticidade das fibras de vidro é bastante superior ao das fibras de cânhamo analisadas. Também os ensaios realizados nos compósitos produzidos revelaram propriedades mais elevadas nos compósitos de fibra de vidro do que nos compósitos de fibra de cânhamo.

Contudo há que ter em atenção que as fibras de cânhamo, sendo naturais, sofrem elevada variabilidade (em termos de estrutura e propriedades) e são influenciadas pelos locais onde são cultivadas, tipo de solo e clima. Sendo que as fibras usadas neste estudo não foram selecionadas especificamente para aplicações de engenharia, tendo sido obtidas de têxteis comuns usados em vestuário. Espera-se por isso que uma seleção mais cuidada de fibras de cânhamo possa trazer melhorias no desempenho geral dos compósitos que as incorporam.

Outro dos aspetos importantes a ter em consideração será o desenvolvimento de procedimentos adequados de fabrico para o processamento destes materiais, nomeadamente no pré-tratamento das fibras, nas técnicas de impregnação e na utilização de vácuo. Um procedimento adequado de fabrico poderá melhorar a adesão fibra/matriz minimizar a quantidade de poros nas peças bem como defeitos superficiais que podem levar a problemas como a fissuração precoce das peças e delaminação entre camadas.

Verificou-se neste estudo que o fabrico com vácuo levou ao surgimento de defeitos que não ocorreram em algumas peças produzidas sem vácuo, mostrando a importância de otimizar o processo de fabrico das peças.

Também se observou que a fibra de cânhamo traz uma certa plasticidade ao compósito evitando fraturas frágeis do mesmo, como acontece no caso dos compósitos de fibra de vidro. Esta plasticidade pode ser uma mais valia em diversas aplicações de engenharia em que se pretendem evitar roturas frágeis.

## **5.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Vários são os estudos que se poderão realizar tendo em conta a panóplia de variáveis existentes, que necessitam ser otimizadas. Apresentam-se seguidamente algumas sugestões para trabalhos futuros de modo a atingir um conhecimento mais alargado sobre compósitos de baixo impacto ambiental.

-Comparação entre compósitos com fibras de cânhamo de varias origens, de modo a entender a influência que existe no processo de recolha da fibra, humidade que esta apresenta, percentagem fibra/matriz e orientação no compósito.

-Utilização de processos de cura química, como é o caso da mercerização, de modo a perceber a influência destes tratamentos no desempenho mecânico da fibra e nas temperaturas suportadas após tratamento.

-Utilização de uma resina epoxídica, uma bio epoxídica e uma resina 100% natural, para o fabrico de compósitos com fibra de cânhamo e fibra de vidro, com o objetivo de comparar o desempenho mecânico entre si.

-Ensaio de flexão, de impacto, dureza, fadiga e fluência de modo a completar a caracterização mecânica do material compósito.

-Utilização de outros processos de fabrico como é o caso de por exemplo do RTM (Resin Transfer Moulding).

-Análise da biodegradabilidade dos materiais no solo.



## Referências

- 100% hemp. (14 de 04 de 2017). Obtido de <http://www.dharmatrading.com/fabric/100-hemp-summercloth.html?lnav=fabric.html>
- Abreu, M. (n.d.). *A cultura do cânhamo. Ministério da agricultura, mar, ambiente e ordenamento do territorio*. Obtido em 28 de 09 de 2016, de <http://www.drapn.min-agricultura.pt/drapn/conteudos/producaoagricola/ACulturadoCanhamo.pdf>
- Adams, R., Advani, S., & Alman, D. (2001). *Composites. 21*. ASM International Handbook Committee.
- Albertsson, C., & Karlsson, S. (1994). *Chemistry and Technology of Biodegradable Polymers*. Vol. 48.
- Albinante, S., Pacheco, É., & Visconte, L. (2013). *Revisão dos tratamentos químicos da fibra natural para mistura com poliolefinas*. *Quim. Nova*,.
- Amor, I., Rekik, H., Kaddami, H., Raihane, M., Arous, M., & Kallel, A. (2010). *Effect of Palm tree fiber orientation on electrical properties of palm tree fiber-reinforced polyester composites*. *J Compos Mater*. p. 1553-68.
- Angelov, I., Wiedmer, S., Evstatiev, M., Friedrich, K., & Mennig, G. (2007). *Pultrusion of a flax/ polypropylene yarn*. *Composites Part A*.
- Annabelle, E. M. (2014). *Cellucomp's first bio-refinery plant opened*. *Cellucomp Sustainable Materials*.
- Arrakhiz, F., El Achaby, M., Benmoussa, K., Bouhfid, R., Essassi, E., & Qaiss, A. (2012). *Mater. Desig*.
- Ashori, A. (2008). *99. Biores. Techn*. p. 4661
- Asrar, J., & Gruys, K. (2004). *Biodegradable polymer (Biopol) in: biopolymers. 4. Polyesters III: applications and commercial products*.
- ASTM. (1993). *ASTM standards on environmentally degradable plastics*. ASTM publication code number (DCN).
- Astrom, B. (1992). *Manufacturing of Polymer Composites*. London: Chapman and Hall.
- Bacci, L., Baronti, S., Predieri, S., & di Virgilio, N. (2009). *Fiber yield and quality of fiber nettle (Urtica dioica L.) cultivated in Italy*. Vol. 29. *Industrial Crops and Products*. p. 480–484.
- Baghaei, B., Skrifvars, M., Salehi, M., Bashir, T., Rissanen, M., & Nousiainen, P. (2014). *Novel aligned hemp fibre reinforcement for structural biocomposites: Porosity, water absorption, mechanical performances and viscoelastic behaviour*. *Em Composites: Part A Elsevier Ltd*. p. 1–12.

- Baharin, A., Abdul Fattah, N., Abu Bakar, A., & Ariff, Z. (2016). *Production of Laminated Natural Fibre Board from Banana Tree Wastes*. *Procedia Chemistry*. pp. 999 – 1006.
- Baillie, C. (2004). *Green Composites: Polymer Composites and The Environment*. Woodhead.
- Balzer, P. S., Vicente, L., Briesemeister, R., Becker, D., Sordi, V., Rodolfo Jr, A., & Feltran, M. (2007). Vol. 17, *Polímeros: Ciência e Tecnologia*. p. 1.
- Bastioli, C. (1998). *Properties and applications of Master-Bi starch-based materials*. *Polym. Deg. Stab.*
- Bastioli, C. (2001). *Global Status of the production of biobased materials*. Birmingham, UK.
- Bastioli, C., & Facco, S. (2001). *Biodegradable Plastics*. Frankfurt, Germany. p. 26-27.
- Becker, D., Kleinschmidt, A., & Balzer, P. (2014). *Compósitos de PVC rígido e fibras de bananeira: efeito do tratamento da fibra*. *Revista Matéria*, p. 257-265.
- Bendel, P., Brown, M., Busse, H., Clarke, M., Costa, M., DuBane, J., . . . Fiadeiro, J. (1979). *O grande livro da costura*. Selecções do Reader's Digest.
- Berk, Z. (1993). *Technology of production of edible flours and protein products from soybean*. Bulletin des services Agricoles de la FAO (FAO).
- Bhongade, A., & Borkar, S. (2016). *Use of Lignin as a Compatibiliser in Sunn Hemp Fibre Reinforced Epoxy Composites*. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)*.
- Biron, M. (2003). *Thermosets and Composites: Technical Information for Plastics Users*. Elsevier Science.
- Bismarck, A., Mishra, S., & Lampke, T. (2005). *Plant fibers as reinforcement for green composites. Biopolymers, and Biocomposites; Mohnaty, A.K., Misra, M., Drzal, L.T., Eds. CRC Press, Boca Raton, FL.* In *Natural Fibers*.
- Biswas, S., Kindo, S., & Patnaik, A. (2011). *Effect of fiber length on mechanical behavior of coir fiber reinforced epoxy composites*. *Fibers and Polymers*, p. 73–78.
- Bledzki, A., Fink, H.-P., & Specht, K. (2004). *Unidirectional hemp and flax EP- and PP-composites: Influence of defined fiber treatments*. *Journal of Applied Polymer Science*, p. 2150–2156.
- Bledzki, A., Mamun, A., & Faruk, O. (2007). *Abaca fibre reinforced PP composites and comparison with jute and flax fibre PP composites*. *Polym Lett*, .
- Blicblau, A. (1997). *Novel composites utilizing raw wool and polyester resin*. 16, pp. 1417-1419. *Journal of materials science letters*.
- Blicblau, A., Coutts, R., & Sims, A. (1997). 16, *J. Mater. Sci. Lett*. p. 1417.

- Boccarusso, L., Carrino, L., Durante, M., Formisano, A., Langella, A., & Minutolo, F. M. (2016). *Hemp fabric/epoxy composites manufactured by infusion process: improvement of fire properties promoted by ammonium polyphosphate*. p. 117-126.
- Bodros, E., Pillin, I., Montrelay, N., & Baley, C. (2007). *Could biopolymers reinforced by randomly scattered flax fibre be used in structural applications?* p. 462–470.
- Bodros, E., & Baley, C. (2008). *Study of the tensile properties of stinging nettle fibres (Urtica dioica)*. 62, *Materials Letters*. p. 2143–2145.
- Bonelli, C., Elzubair, A., & Suarez, J. (2005). *Polímeros: Ciência e Tecnologia*.
- Bonafous, C., Touchard, F., & Chocinski-Arnault, L. (s.d.). *Damage mechanisms in hemp-fibre woven fabric composite studied by acoustic emission*.
- Boopathy, R. (2000). *Factor limiting bioremediation technologies*. Vol. 74, *Bioresour. Technol.* p. 63–67.
- Bos, H., Van den Oever, M., & Peters, O. (2002). *Tensile and compressive properties of flax fibres for natural fibre reinforced composites*. Vol. 37, *J Mater Sci.* p. 1683-92.
- Bourmaud, A., & Baley, C. (2007). 92, *Polym. Degr. Stab.* p. 1034.
- Bugnicourt, E., Cinelli, P., Lazzeri, A., & Alvarez, V. (2014). *Polyhydroxyalkanoate (PHA): Review of synthesis, characteristics, processing and potential applications in packaging*. Vol. 8, *eXPRESS Polymer Letters*. p. 791–808.
- Callaway, J. C. (2004). *Hempseed as a nutritional resource: An overview*. Kluwer Academic Publishers. Vol. 140. Netherlands: Euphytica. p. 65–72.
- Campos Rubio, J., Silva, L., Leite, W., Panzera, T., Ribeiro Filho, S., & Davim, J. (2013). *J. P. Compos.* Vol. 55, Part B Eng. p. 338.
- Campos, A., Teodoro, K., Teixeira, E., Corrêa, A., Marconcini, J., Wood, D., . . . Mattoso, L. (2013). *Properties of Thermoplastic Starch and TPS/Polycaprolactone Blend Reinforced With Sisal Whiskers Using Extrusion Processing*. *Polymer engineering and science*. p. 801-808.
- Cao, Y., & Wu, Y. (2008). *Evaluation of statistical strength of bamboo fiber and mechanical properties of fiber reinforced green composites*. Vol. 15, *J Cent South Univ Technol.* p. 564–567
- Caprino, G., Carrino, L., Durante, M., Langella, A., & Lopresto, V. (2015). *Low impact behaviour of hemp fibre reinforced epoxy composites*. p. 892–901.
- Carashi, J. C., & Leao, A. (2001). *Anais do 6º Congresso Brasileiro de Polímeros*. Gramado: Congresso Brasileiro de Polímeros. p. 566.
- Castro, B. (2013). *Estudo e Caracterização Mecânica de Compósitos Reforçados com Fibras Naturais*. ISEP. Dissertação de mestrado

- Castro, J., Daldosso, C., Shigue, C., & Baldan, C. (2000). *Estudo de propriedades mecânicas de compostos epóxi/fibra de vidro para aplicação em temperaturas criogênicas*. p. 23301-23313.
- Cerqueira, D. A., Valente, A., Filho, G., & Burrows, H. (2009). Vol. 78. *Carbohydr. Polym.* p. 402.
- Chand, N., & Hashmi, S. (1993). *Mechanical properties of sisal fibre at elevated temperatures*. *Journal of Materials Science*.
- Chen, P., Lu, C., Yu, Q., Gao, Y., Li, J., & Li, X. (2006). *Influence of fiber wettability on the interfacial adhesion of continuous fiber-reinforced PPESK composite*. Vol. 102. *J Appl Polym Sci.* pp. 2544–2551.
- Chen, X., Guo, Q., & Mi, Y. (1998). Vol. 69. *Journal of Applied Polymer Science*. p. 1891-1899.
- Cheung, H., Ho, M., Lau, K., Cardona, F., & Hui, D. (2009). *Natural fibre-reinforced composites for bioengineering and environmental engineering applications*. Vol. 40. *Composites Part B*. p. 655–663.
- Choudhary, S., Sharma, H., Kumar, A., Chowdhury, I., Maruthi, R., & Kak, A. (2017). *Genetic diversity spectrum and marker trait association for agronomic traits in global accessions of *Linum usitatissimum* L.* *Industrial Crops and Products*. p. 604-615.
- Ciaramello, D., & Azzini, A. (1971). *Resultados preliminares sobre o estudo do quenafe como matéria-prima para papel*. Vol. 30. Instituto Agrônomo Campinas.
- Composto. (1998). *Life Cycle Assessment of Mater-bi bags for the collection of compostable waste*. Switzerland, Composto.
- Composto. (2000). *Life Cycle Assessment of Mater-bi and EPS Loose-Fills*. Switzerland: Composto.
- Corradini, E., Ito, E., & Marconcini, J. (2009). Vol. 28. *Polym. Test*. p. 183.
- Daniel, I., & Ishai, O. (1994). *Engineering Mechanics of Composite Materials*. Oxford University Press.
- Davim, J. (1998). *Tecnologia dos Materiais Plásticos*. Universidade Aberta Lisboa.
- Davis, J. (2004). *Tensile Testing*. p. 1-283.
- De Rosa, I. M., Kenny, J., Puglia, D., Santulli, C., & Sarasini, F. (2010). *Morphological, thermal and mechanical characterization of okra (*Abelmoschus esculentus*) fibres as potential reinforcement in polymer composites*. Vol. 70. *Composites Science and Technology*. p. 116–112.
- Debnath, M., Pandey, M., Sharma, R., Thakur, G., & Lal, P. (2010). *Biotechnological intervention of *Agave sisalana*: A unique fiber yielding plant with medicinal property*. *Journal of Medicinal Plants Research*, p. 177-187.
- DINV54900-2. (1998). *Prüfung der kompostierbarkeit von kunststoffen*. DIN V 54900-2.

- Eichhorn, S., & Young, R. (2004). *Composite micromechanics of hemp fibres and epoxy resin microdroplets*. p. 767–772.
- Eichhorn, S., Hearle, J., & Jaffe, M. (2009). *Handbook of Textile Fibre Structure: Vol. 2: Em Inorganic and Specialist Fibres*. Woodhead Pub.
- Elzubair, A., & Suarez, J. (2012). *Mechanical behavior of recycled polyethylene/piassava fiber composites*. *Materials Science & Engineering A*, p. 29–35.
- EN13432. (s.d.). *Requirements for packaging recoverable through composting and biodegradation. Test scheme and evaluation criteria for the final acceptance of packaging*. EN 13432.
- Esau, K. (1976). *Anatomia das plantas com sementes*. Edgard Blucher.
- Fakirov, S., & Bhattacharyya, D. (2007). *Handbook of Engineering Biopolymers: Homopolymers, Blends and Composites*. Hanser.
- Faruk, O., Bledzk, A., Fink, H.-P., & Sain, M. (2012). *Biocomposites reinforced with natural fibers:2000-2010*. Vol. 37. *Progress in Polymer Science*. p. 1552-1596.
- Faruk, O., Bledzki, A., Fink, H., & Sain, M. (2014). *Progress report on natural fiber reinforced composites*. Vol. 299. *Macromol Mater Eng*. p. 9–26.
- Fowler, P., Hughes, J., & Elias, R. (2006). *J. Sci. Food Agric*.
- Fowler, P., Hughes, J., & Elias, R. (2006). *Biocomposites: technology, environmental credentials and market forces*. *J Sci Food Agric*. p. 1781–1789.
- Franco, P. J., & Gonzalez, A. (2004). Vol. 35. *Compositics*. Part A. p. 339.
- Fuqua, M. A., Huo, S., & Ulven, C. (2012). *Natural Fiber Reinforced Composites*. *Polymer Reviews*. p. 259-320.
- Gandini, A. (2008). *Polymers from renewable resources: a challenge for the future of macromolecular materials*. Vol. 41. *Macromolecules*. p. 491–504.
- Gay, D., Hoa, S., & Tsai, S. (2003). *Composite materials design and applications*. CRC PRESS.
- Geethamma, V., Mathew, K., Lakshminarayanan, R., & Thomas, S. (1998). *Composite of short coir fibers and natural rubber: effect of chemical modification, loading and orientation of fiber*. Vol. 39. *Polymer*. p. 1483–1491.
- Girisha, Anil, & Akash. (2014). *Mechanical properties of jute and hemp reinforced epoxy/polyester hybrid composites*. p. 245-248.
- Goda, K., & Cao, Y. (2007). *Research and development of fully green composites reinforced with natural fibers*. p. 1073–1082.
- Gurunathan, T., Mohanty, S., & Nayak, S. (2015). *A review of the recent developments in biocomposites based on natural fibres and their application perspectives*. *Composites: Part A*. p. 1–25.
- H. Staab, G. (2015). *Laminar Composites*. Butterworth-Heinemann.

- Hansen , C., & Bjorkman, A. (1998). *Holzforschung*.
- Hargitai, H., Rác , I., & Anandjiwala, R. (2008). *Development of hemp fiber reinforced polypropylene composites*. Vol. 21 *J Thermoplast Compos Mater*. p. 165–174.
- Hartmann, M. (1998). *Biopolymers from Renewable Resources*. Berlin: Springer. p. 367–411
- Hernandez, A., Graham-Jones , J., Summerscales , J., & Hall , W. (2013). *Resin transfer moulding (RTM) to produce surfboard fins with natural fibres*. *9th International conference on composite science and technology: 2020*. Scientific and industrial challenges. p. 577–583.
- Herrera-Franco, P., & Valadez-Gonzalez , A. (2005). *A study of the mechanical properties of short natural-fiber reinforced composites*. Vol. 36. *Composites Part B*. p. 597–608.
- Hoa, S. (2009). *Principles of the manufacturing of composite materials*. DEStech Publications.
- Hodd, K. (1990). *Epoxy Resins*. Rapra Technology.
- Hoi-yan Cheung. (2009). *Natural fibre-reinforced composites for bioengineering and environmental*. *Composites: Part B* Elsevier. p. 655–663.
- Holbery, J., & Houston , D. (2006). *Natural-fiber-reinforced polymer composites in automotive applications*. Vol. 58. *JOM*. p. 80–86.
- Hong, C., & Wool, R. (2005). Vol. 95. *J. Appl. Polym. Sci*. p. 1524.
- Ichazo, M., Albano, C., González, J., Pereira, R., & Candal, M. (2001). *Compos. Struct*.
- Isaac, M., & Ishari, O. (2006). *Engineering of Composite Material*. Oxford University Press.
- Islam, M. (2013). *Biochemistry, Medicinal and Food values of Jute (Corchorus capsularis L. and C. olitorius L.)*. *International Journal of Enhanced Research in Science Technology & Engineering*, p. 35-44.
- Islam, M. S., Pickering, K. L., & Foreman, N. J. (2011). *Influence of Alkali Fiber Treatment and Fiber Processing on the Mechanical Properties of Hemp/Epoxy Composites*. *Journal of Applied Polymer Science*.
- Jamshidi, K., Hyon, S., & Ikada, Y. (1988). *Polymer*. p. 2229-2234.
- Jesus, S. (2011). *Novas bases têxteis para novas exigências sociais*. p. 52-54.
- Jiirgen Liircks. (1998). *Properties and applications of compostable starch-based plastic material*. Vol. 59. *Polymer Degradation and Stability*. p. 245-249.
- Joseph, A., Baby , B., Thomas, A., & Krishnan , S. (2015). *Preparation and characterization of banana reinforced phenol formaldehyde composite*. Vol. 2. *Eur J Adv Eng Tech*. p. 85-90.
- Joseph, K., Thomas, S., & Pavithran, C. (1996). *Polymer*.

- Joseph, P., Joseph , K., & Thomas , S. (1999). *Effect of processing variables on the mechanical properties of sisal-fiber-reinforced polypropylene composites*. Vol. 59. *Compos Sci Technol*. pp. 1625–1640.
- Kaith, B., & Kaur, I. (2011). *Cellulose Fibers: Bio- and Nano-Polymer Composites: Green*. Springer.
- Kalia, V. (2015). *Biodiversity, Biopolymers, Bioactive Molecules*. Em *Microbial Factories*. Springer.
- Kaplan, D. (1998). *Introduction to biopolymers from renewable resources*. *Macromolecular Systems – Materials Approach*. Berlin: Springer.
- Kobayashi, Y., Ishizaka, T., & Kurokawa, Y. (2005). Vol. 40. *J. Mater. Sci*. p. 263.
- Krishnaraj, V., Prabukarthi , A., & Ramanathan, A. (2012). *Compos, Part B Eng*. p. 1791.
- Kumar , C., Arumugam, V., Dhakal, H., & John, R. (2015). *Effect of temperature and hybridisation on the low velocity impact behavior of hemp-basalt/epoxy composites*. p. 407–416.
- Kumar, D., Tony, D., Kumar, A., Kumar, K., Rao, D., & Nadendla, R. (2013). *Abelmoschus esculentus (Okra)*. *International Research Journal of Pharmaceutical and Applied Sciences (IRJPAS)*. p. 129-132.
- Landro, L., & Janszen, G. (2014). *Composites with hemp reinforcement and bio-based epoxy matrix*. Em *Composites: Part B Elsevier* . p. 220–226.
- Lau, K.-t., Hung, P.-y., Zhu, M.-H., & Hui, D. (2017). *Properties of natural fibre composites for structural engineering applications*. *Composites Part B*, p.222-233.
- Lee , B., Kim , H., & Yu , W. (2009). *Fabrication of long and discontinuous natural fiber reinforced polypropylene biocomposites and their mechanical properties*. Vol. 10. *Fibers Polym*. p. 83-90.
- Lee, S., Cho, D., Park, W., Lee,, S., Han, S., & Drzal, L. (2005). Vol. 65. *Compos. Sci. Technol*. p. 647.
- Lello, J. (1988). *Lello Universal*. Lello e irmão.
- Li , X., Tabil , L., & Panigrahi , S. (2007). *Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites: a review*. Vol. 15. *J Polym Environ*. p. 25-33.
- Li, Y., Mai, Y., & Ye, L. (2000). *Sisal fibre and its composites: A review of recent developments*. *Composites Science and Technology*.
- Liu, M., Baum , A., Odermatt, J., Berger, J., Yu, L., Zeuner, B., . . . Meyer, A. (2017). *Oxidation of lignin in hemp fibres by laccase: Effects on mechanical properties of hemp fibres and unidirectional fibre/epoxy composites*. p. 377–387.

- Liu, M., Meyer, A., Fernando, D., Silva, D., Daniel, G., & Thygesen, A. (2016). *Effect of pectin and hemicellulose removal from hemp fibres on the mechanical properties of unidirectional hemp/epoxy composites*. p. 724–735.
- Liu, M., Silva, D., Fernando, D., Meyer, A., Madsen, B., Daniel, G., & Thygesen, A. (2016). *Controlled retting of hemp fibres: Effect of hydrothermal pre-treatment and enzymatic retting on the mechanical properties of unidirectional hemp/epoxy composites*. p. 253–262.
- Loewenstein, K. (1993). *The Manufacturing Technology of Continuous Glass Fibers*. Elsevier.
- Lopes, F., Araújo, G., Nascimento, J., & Gadelha, T. (2008). *Rev. Educação Agrícola Superior*.
- Lopes, S. (2012). *Estudo de propriedades de não tecidos de polipropileno tratados por descarga corona e plasma de rádio frequência*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química. Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 115.
- Lopez, J., Vilaseca, F., Barberà, L., Bayer, R., Pèlach, M., & Mutjé. (2012). *Processing and properties of biodegradable composites based on Mater-Bi® and hemp core fibres*. *Em Resources, Conservation and Recycling*. ELSEVIER Lda. p. 38-42.
- Lorcks, J. (1998). *Properties and applications of compostable starch-based plastic material*. Vol. 59. *Polym. Degrad. Stab.* p. 245–249.
- Lu, N., & Oza, S. (2013). *Thermal stability and thermo-mechanical properties of hemp-high density polyethylene composites: Effect of two different chemical modifications*. *Em Composites: Part B Elsevier Ltd*. p. 484–490.
- Lu, Y., & Larock, R. (2009). *Novel polymeric materials from vegetable oils and vinyl monomers: preparation, properties, and applications*. Vol. 2. *ChemSusChem*. p. 136–147.
- Luo, X., Benson, R., Kit, K., & Dever, M. (2002). *Kudzu Fiber-Reinforced Polypropylene Composite*. *Em I. 2002 Wiley Periodicals (Ed.)*. Vol. 85. *Journal of Applied Polymer Science*. p. 1961–1969.
- Machado, M. L., Pereira, N., Miranda, L., & Terence, M. (2010). Vol. 20 *Polímeros*. p. 65.
- Madison, L., & Huisman, G. (1999). *Metabolic engineering of poly(3-hydroxyalkanoates): from DNA to plastic*. *Microbiol.* Vol. 63. *Mol. Biol. Rev.* p. 21–53.
- Madsen, B., Thygesen, A., & Lilholt, H. (2009). *Plant fibre composites – porosity and stiffness*. Vol. 69. *Compos Sci Technol*. p. 1057–1069.
- Malkapuram, R., & Kumar, V. (2008). *Recent development in natural fiber reinforced polypropylene composites*. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*.

- Mano, E. B. (1991). *Polímeros com Materiais de Engenharia*. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda.
- Moore, G. F.; Saunders, S. M. (1997). *Advances in Biodegradable Polymers*. Rapra Review Reports
- Marsyahyo, E., Soekrisno, H., Rochardjo, B., & Jamarsi, J. (2008). *J. Indus. Text.*, 38.
- Mater-bi*. (14 de 04 de 2017). Obtido de <http://materbi.com/schede-tecniche/>
- Matinlinna, J., Lassila, L., & Vallittu, P. (2007). *The effect of five silane coupling agents on the bond strength of a luting cement to a silica-coated titanium*. *Dent Mater*, 2(3). p.1173-1180.
- Matthews, F., & Rawlings, R. (1999). *Composite materials: engineering and science*. Cambridge: Woodhead Publishing.
- Matthews, F., & Rawlings, R. (1994). *Composite Materials: Engineering and Science*. London: Chapman & Hall. p. 1-28.
- Mazumdar, S. (2002). *Composites manufacturing: materials, product and process engineering*. CRC Press.
- Mehta, G., Mohanty, A., Thayer, K., Misra, M., & Drzal, L. (2005). *Novel biocomposites sheet molding compounds for low cost housing panel applications*. Vol. 13. *J Polym Environ*. p. 169-175.
- Miao, S., Wang, P., Su, Z., & Zhang, S. (2014). *Vegetable-oil-based polymers as future polymeric biomaterials*. Vol. 10. *Acta Biomater*. p. 1692–1704.
- Michel Biron. (2014). *Thermosets and composites: technical information for plastics users*. Elsevier. p. 265.
- Mohanty, A., Khan, M., Sahoo, S., & Hinrichsen, G. (2000). *Effect of chemical modification on the performance of biodegradable jute yarn-Biopol (R) composites*. Vol.35. *J MaterSci*. pp. 2589–2595.
- Mohanty, A., Misra, M., & Drzal, L. (2005). *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites*. Taylor & Francis.
- Mohanty, A., Misra, M., & Hinrichsen, G. (2000). *Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: an overview*. *Macromol. Mater. Eng*, p. 6-15.
- Mohanty, A., Wibowo, A., Misra, A., & Drzal, L. (2004). *Effect of process engineering on the performance of natural fiber reinforced cellulose acetate biocomposites*. Vol. 35. *Compos Part A*. p. 363–370.
- Monteiro, S., de Deus, J., & D’Almeida, J. (2005). *Effect of drying, molding pressure, and strain rate on the flexural mechanical behavior of piassava (Attalea funifera Mart) fiber-polyester composites*. Vol. 24. *Polymer Testing*. p. 750–755.
- Moreira, C., Andrade, H., Bertolucci, S., Lameira, O., Mohammed, A., & Pinto, J. (2016). *Plantlet regeneration from young leaf segments of curaua (Ananas erectifolius), an Amazon species*. *Turkish Journal of Biology*. p.1227-1234.

- Mustafa , A., Bin Abdollah , M., Shuhimi , F., Ismail , N., Amiruddin , H., & Umehara , N. (2015). *Selection and verification of kenaf fibres as an alternative friction material using Weighted Decision Matrix method*. Vol. 67. Mater Des. p. 577-582.
- Nam , T., Ogihara , S., & Kobayashi, S. (2012). *Interfacial, mechanical and thermal properties of coir-fiber-reinforced poly(lactic acid) biodegradable composites*. Adv Compos Mater. p. 103–122.
- Navaneethkrishnan, G., Selvam , V., & Julyes , S. (2015). *Development and mechanical studies of glass/banana fiber hybrid reinforced silica nano particles with epoxy bio-nanocomposites*. Vol. 7. J Chem Pharm Sci. p. 197-199.
- Nechwatal, A., Mieck, K., & Reußmann, T. (2003). Vol. 17. Composites Science And Technology. p. 1273.
- Norman, D., & Robertson , R. (2003). *The effect of fiber orientation on the toughening of short fiber-reinforced polymers*. Vol. 90. J Appl Polym Sci. p. 2740–2751.
- Novamont. (27 de 09 de 2016). Obtido de <http://www.novamont.com/eng/mater-bi>
- Pachekoski, W., Agnelli, J., & Belem, L. (2009). *Thermal, Mechanical and Morphological Properties of Poly (Hydroxybutyrate) and Polypropylene Blends After Processing*. Vol. 12. p. 159-164.
- Pande, H., & Roy, D. (1998). *Influence of fibre morphology and chemical composition on the papermaking potential of kenaf fibers*. Vol. 99. Pulp Paper Can. p. 31–34.
- Perrier, A., Bourhis, E., Touchard, F., & Chocinski-Arnault, L. (2016). *Effect of water ageing on nanoindentation response of single hemp yarn/epoxy composites*. p. 216–223.
- Perrier, A., Ecault, R., Touchard, F., Urriza, M. V., Baillargeat, J., Chocinski-Arnault, L., & Boustie, M. (2015). *Towards the development of laser shock test for mechanical characterisation of fibre/matrix interface in eco-composites*. p. 125-134.
- Pickering , K. (2014). *Comparison of harakeke with hemp fibre as a potential reinforcement in composites*. Vol. 67. Composites Part A. p. 259–567.
- Pickering , K., Beckermann , G., Alam, S., & Foreman , N. (2007). *Optimising industrial hemp fibre for composites*. Vol. 38. Composites Part A. p. 461-468.
- Pickering, K. (2008). *Properties and performance of natural-fibre composites*. Cambridge: Woodhead Publishing.
- Pickering, K., Aruan Efendy, M., & Le, T. (2016). *A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance*. Composites: Part A. p. 98–112.
- Placet, V. (2009). *Characterization of the thermo-mechanical behaviour of Hemp fibres intended for the manufacturing of high performance composites*. p. 1111–1118.

- Prieto, F., Escamilla, G., Hernandez, J., & Aranda, S. (2014). *Characterization of lignocellulosic residues of henequen and their use as a bio-oil source*. *Biomass Conv. Bioref*, p. 95–104.
- Puglia, D., & Kenny, J. (2003). *Processing, properties and stability of biodegradable composites based on Mater-Bi-(R) and cellulose fibres*. *Polymers for Advanced Technologies*.
- Pukansky, B. (2005). Vol. 41. *European Polymer Journal*. p. 645.
- Qi, Y., Chin, K., & Malekian, F. (2005). *Biological Characteristics, Nutritional and Medicinal Value of Roselle, Hibiscus Sabdariffa*. Agricultural Research and extension center.
- Rasband, W.S., *ImageJ*, U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA
- Reddy, C., Ghai, R., Rashmi, & Kalia, V. (2003). *Polyhydroxyalkanoates: an overview*. *Bioresource Technology*. p.137–146.
- Richard, O., & Brush, A. (2002). *The evolutionary origin and diversification of feathers*. Vol. 77. *The Quarterly Review of Biology*. p. 261-295.
- Rodriguez, E., Petrucci , R., Puglia , D., Kenny., J., & Vazquez, A. (2005). *Characterization of composites based on natural and glass fibers obtained by vacuum infusion*. *J Compos Mater*.
- Romão, C. (2003). *Estudo do comportamento mecânico de materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras naturais*. Faculdade de engenharia do Porto. Dissertação de mestrado.
- Rong, M., Zhang, M., Liu, Y., Yang, G., & Zeng, H. (2001). *Compos. Sci. Technol*.
- Rouison, D., Sain, M., & Couturier, M. (2006). *Resin transfer molding of hemp fiber composites: optimization of the process and mechanical properties of the materials*. Em *Composites science and technology*. Elsevier. p. 895–906
- Rudnik, E. (2008). *Compostable polymer materials*. Elsevier.
- Salmoria, G., Martins, W., & Fucio, D. (2013). *Tratamento da superfície de cateteres de poliamida 11 por plasma de oxigênio*. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*.p. 565-569.
- Sanadi, A., Caulfield , D., & Jacobson , R. (1997). *Agro-fiber thermoplastic composites*. In: *Paper and composites from agro-based resources*. Boca Raton: FL: CRC. p. 377–401.
- Santos, E., & Moresco, M. (2010). *Extrusão de Compósitos de PP com Fibras Curtas de Coco: Efeito da Temperatura e Agentes de Acoplamento*. Instituto de Química, UFRGS.
- Satyanarayana, K., Kulkarni , A., & Rohatgi , P. (1981). *Tructures and properties of some vegetable fibers*. Vol. 40. *J Sci Ind Res*. p. 222.

- Scarponi , C., Sarasini , F., Tirillo, J., Lampani , L., Valente, T., & Gaudenzi, P. (2016). *Low-velocity impact behaviour of hemp fibre reinforced bio-based epoxy laminates*. p. 162-168.
- Schuh, T. (s.d). *Renewable Materials for Automotive Applications*. Interactive European Network for industrial Crops and their applications (IENICA).
- Sealy, C. (2015). *Silk shows new strengths in composites*. Vol. 59. Reinforced Plastics.
- Sèbe, G., Cetin, N., Hill, C., & Hughes, M. (2000). *RTM Hemp Fibre-Reinforced Polyester Composites*. Em *Applied Composite Materials*. p. 341–349.
- Shah, D., Porter, D., & Vollrath, F. (2014). *Can silk become an effective reinforcing fibre? A property comparison with flax and glass reinforced composites*. Vol. 101. *Compos Sci Technol*. p. 173–183.
- Shahzad, A. (2013). *A Study in Physical and Mechanical Properties of Hemp Fibres*. Em *Advances in Materials Science and Engineering* Hindawi Publishing Corporation. p. 1-9.
- Shanks., R., & Kong, I. (2012). *Thermoplastic Starch, Thermoplastic Elastomers*. Prof. Adel El-Sonbati.
- Sharma, R., & Ray , A. (1995). *Polyhydroxybutyrate, its copolymers and blends*. Vol. 35. *Journal of Macromolecular Science*. p. 327-359.
- Shibata, M., Kaneko , K., & Kakihara , T. (2011). *Supramolecular composites of photocured acrylated epoxidized soybean oil and fibers formed by the self-assembly of low molecular weight organic gelators*. Vol. 43. *Polym J*. p. 552–558.
- Sicomín. (13 de 04 de 2017). Obtido de <http://www.sicomín.com/datasheets/product-pdf39.pdf>
- Silva, H. (2014). *Comportamento mecânico de Compósitos de Fibras de Vidro/Epoxy nano-reforçados*. PhD thesis, Université, année.
- Silva, R., Aquino , E., Rodrigues, L., & Barros , A. (2009). *Curaua/glass hybrid composite: the effect of water aging on the mechanical properties*. Vol. 28. *J Reinf Plast Compos*. p. 1857–1868.
- Sinclair, R. (1996). *Journal of Macromolecular Science—Pure and Applied Chemistry*., Vol. 33. p. 585–597.
- Sookne, A., & Harris, M. (1943). Mechanical properties of cellulose acetate as related to molecular chain length. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*.
- Starr, F., Martz, K., & Loope, L. (1999). *Kudzu (Pueraria lobata)*. United States Geological Survey Biological Resources Division. p. 1-12.
- Summerscales, J. (2010). *A review of bast fibres and their composites. Part 1 – fibres as reinforcements*. Vol. 41. *Composites Part A*. p. 1329–35.
- Summerscales, J., Dissanayake, N., Virk, A., & Hall, W. (2010). Vol. 41. *Compos.A: Appl. Sci. Manuf*. p. 1329.

- Summerscales, J., Dissanayake, N., Virk, A., & Hall, W. (2010). *A review of bast fibres and their composites. Part I: Fibres as reinforcements*. Composites Part A: Applied Science and.
- Szolnoki, B., Bocz, K., Soti, P., Bodzay, B., Zimonyi, E., Toldy, A., . . . Marosi, G. (2015). *Development of natural fibre reinforced flame retarded epoxy resin composites*. p. 68-76.
- Thomas, S., Bhagawan, S., & Devi, L. (1997). *Mechanical Properties of Pineapple Leaf Fiber-Reinforced Polyester Composites*. Vol. 64. J Appl Polym Sci. p. 1739–1748.
- Thwe, M., & Liao, K. (2003). *Environmental effects on bamboo-glass/polypropylene hybrid composites*. Vol. 38. J Mater Sci. p. 363–376.
- Tita, S., Paiva, J., & Frollini, E. (2002). *Polímeros: Ciência e Tecnologia*.
- Tomczak, F., Satyanarayana, K., & Sydenstricker, T. (2007). *Studies on lignocellulosic fibers of Brazil: Part III: Morphology and properties of Brazilian curauá fibers*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, p. 2227-2236.
- UNI10785. (January de 1999). *Compostabilità dei Materiali Plastici*. UNI10785.
- Vaidya, U. (2011). *Composites for automotive, truck and mass transit*. DEStech Publications, Inc.
- Valadez-Gonzalez, A. (1999). *Chemical modification of henequén fibers with an organosilane coupling agent*. Vol. 30. Composites Part B: Engineering. p. 321–331.
- VAN DE WEYENBERG, I. (2005). *Flax fibres as a reinforcement for epoxy*. p. 1–238.
- Wallenberger, F. (1999). *Structural Silicate and Silica Glass Fibers*. Em *Advanced Inorganic Fibers Processes, Structures, Properties, Applications*. Academic Publishers. p. 129–168.
- Wallenberger, F., Watson, J., & Li, H. (2001). *Glass Fibers*. Em *Composite*. ASM International.
- Wang, X., Li, Y., Liu, Q., Chen, Q., Xia, Q., & Zhao, P. (2017). *In vivo effects of metal ions on conformation and mechanical performance of silkworm silks*. *Biochimica et Biophysica Acta*, p. 567–576.
- Webber III, C., Bhardwaj, H., & Bledsoe, V. (2002). *Kenaf Production: Fiber, Feed, and Seed*. ASHS Press, p. 327-339.
- Weyenberg, I., Troung, T., Vangrimde, B., & Verpoest, I. (2006). *Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf.*
- Wielage, B., & Lampke, T. (2003). Vol. 139. *Mater. Proces. Technol.* p. 140.
- Wilson, K., Zhang, K., & Antonucci, J. (2005). *Systematic variation of interfacial phase reactivity in dental nanocomposites*. *Biomaterials*, 26(25) p. 5095-103.

- Wood, B., Coles, S., Maggs, S., Meredith, J., & Kirwan, K. (2011). *Use of lignin as a compatibiliser in hemp/epoxy composites*. C. S. Technology, Ed. p. 1804–1810.
- Yang, P., & Kokot, S. (1996). *Thermal analysis of different cellulosic fabrics*. Em Journal of Applied Polymer Science p. 1137–1146.
- Yu, T., Ren, J., Li, S., Yuan, H., & Li, Y. (2010). *Effect of fiber surface-treatments on the properties of poly(lactic acid)/ramie composites*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.
- Zhan, M., & Wool, R. (2013). *Design and evaluation of bio-based composites for printed circuit board application*. Vol. 47. Compos Part A-Appl Sci Manuf. p. 22–30.
- Zhang, H., Sun, W., Sun, G., Liu, S., Li, Y., Wu, Q., & Wei, Y. (2016). *Phenological growth stages of pineapple (*Ananas comosus*) according to the extended Biologische Bundesantalt, Bundessortenamt and Chemische Industrie scale*. Annals of Applied Biology. p. 311–318.
- Zhang, J., Zhang, H., & Zhang, J. (2014). *Effect of Alkali Treatment on the Quality of Hemp Fiber*. Journal of Engineered Fibers and Fabrics.
- Zhang, Y., Pang, G., Zhao, Y., Wang, X., Bu, F., & Zhao, X. (2016). *Pulsed electrohydraulic discharge for wool fiber cleaning*. Journal of Cleaner Production. p. 1033-1039.
- Zhao, Y., Cheung, H., Lau, K., Xu, C., Zhao, D., & Li, H. (2010). Vol. 95. Polym. Degrad. Stab. p. 1978.

## **Anexo I- Áreas e secções dos provetes de compósitos**



<b>Provetes</b>	<b>Espessura [mm]</b>	<b>Largura [mm]</b>	<b>Espessura média [mm]</b>	<b>Largura média [mm]</b>	<b>Área da secção [mm<sup>2</sup>]</b>
<b>Cânhamo com vácuo X1</b>	2,85	25,03	2,94	25,08	73,65
	2,94	25,23			
	3,02	24,98			
<b>Cânhamo com vácuo X2</b>	2,84	24,62	2,91	24,66	71,76
	3,00	24,50			
	2,89	24,86			
<b>Cânhamo com vácuo X3</b>	2,84	25,45	2,81	25,28	71,04
	2,76	25,40			
	2,83	24,99			
<b>Cânhamo com vácuo X4</b>	2,79	24,86	2,77	24,62	68,28
	2,66	24,48			
	2,87	24,52			
<b>Cânhamo com vácuo X5</b>	2,92	24,51	2,93	24,65	72,30
	2,83	24,60			
	3,05	24,83			
<b>Cânhamo X1</b>	3,19	24,18	3,22	24,38	78,49
	3,00	24,22			
	3,47	24,73			
<b>Cânhamo X2</b>	3,06	24,16	3,19	24,54	78,35
	3,22	24,55			
	3,30	24,90			
<b>Cânhamo X3</b>	3,24	24,80	3,12	24,96	77,95
	3,07	24,74			
	3,06	25,33			
<b>Cânhamo X4</b>	3,03	25,40	3,09	25,02	77,41
	3,05	24,89			
	3,20	24,78			
<b>Cânhamo X5</b>	3,15	24,10	3,10	24,24	75,22
	3,09	24,22			
	3,07	24,40			
<b>Fibra de vidro com vácuo X1</b>	1,74	25,34	1,75	25,22	44,14
	1,83	25,04			
	1,68	25,29			
<b>Fibra de vidro com vácuo X2</b>	1,70	24,22	1,67	24,37	40,77
	1,71	24,24			
	1,61	24,64			
<b>Fibra de vidro com vácuo X3</b>	1,69	25,67	1,71	25,49	43,67
	1,72	25,46			
	1,73	25,34			

<b>Provetes</b>	<b>Espessura [mm]</b>	<b>Largura [mm]</b>	<b>Espessura média [mm]</b>	<b>Largura média [mm]</b>	<b>Área da secção [mm<sup>2</sup>]</b>
<b>Fibra de vidro com vácuo X4</b>	1,65	24,55	1,66	24,62	40,87
	1,64	24,46			
	1,69	24,85			
<b>Fibra de vidro com vácuo X5</b>	1,69	25	1,68	24,57	41,19
	1,64	24,29			
	1,7	24,41			
<b>Fibra de vidro X1</b>	2,01	25,7	2,09	25,69	53,61
	2,07	25,9			
	2,18	25,48			
<b>Fibra de vidro X2</b>	2,01	24,6	2	24,78	49,65
	1,96	24,68			
	2,04	25,07			
<b>Fibra de vidro X3</b>	2,07	25,56	2,04	25,59	52,2
	1,99	25,39			
	2,06	25,82			
<b>Fibra de vidro X4</b>	2,14	24,99	2,13	24,75	52,64
	2,11	24,56			
	2,13	24,7			
<b>Fibra de vidro X5</b>	2,04	24,9	2,05	25,19	51,56
	2,03	25			
	2,07	25,67			

**Anexo II- Áreas dos monofilamentos que constituem um fio de cânhamo**



Nº	Área [µm²]	Nº	Área [µm²]	Nº	Área [µm²]	Nº	Área [µm²]
1	231,491	45	77,806	89	59,016	133	356,356
2	77,090	46	90,866	90	445,954	134	60,449
3	94,613	47	108,665	91	197,657	135	667,747
4	79,955	48	476,647	92	52,293	136	600,355
5	182,008	49	170,436	93	122,385	137	606,637
6	403,194	50	493,619	94	180,354	138	631,819
7	86,072	51	737,894	95	185,699	139	327,316
8	151,094	52	301,527	96	259,483	140	224,988
9	230,885	53	87,725	97	246,038	141	293,207
10	316,295	54	122,936	98	348,145	142	333,653
11	157,156	55	138,255	99	259,924	143	360,433
12	158,974	56	278,274	100	476,206	144	35,873
13	39,124	57	398,620	101	266,647	<b>145</b>	175,175
14	137,814	58	246,754	102	344,453	<b>Soma das áreas</b>	<b>34.326,905 µm²</b>
15	88,772	59	159,415	103	229,617		<b>0.034 mm²</b>
16	50,695	60	129,659	104	252,816		
17	122,881	61	522,659	105	145,253		
18	106,075	62	43,036	106	270,669		
19	35,377	63	287,090	107	179,142		
20	85,080	64	234,962	108	164,485		
21	100,674	65	49,208	109	83,207		
22	266,537	66	330,016	110	147,843		
23	97,644	67	183,165	111	242,291		
24	132,249	68	106,130	112	427,219		
25	218,431	69	515,991	113	328,694		
26	121,779	70	277,612	114	234,687		
27	456,093	71	128,612	115	254,359		
28	343,296	72	306,652	116	218,045		
29	113,734	73	214,519	117	261,963		
30	494,280	74	272,378	118	162,776		
31	157,431	75	180,189	119	291,003		
32	345,721	76	194,736	120	90,260		
33	530,428	77	46,287	121	471,798		
34	220,690	78	405,288	122	187,077		
35	206,859	79	136,106	123	95,495		
36	242,181	80	224,492	124	150,102		
37	497,586	81	71,029	125	353,766		
38	205,978	82	271,165	126	224,327		
39	103,981	83	339,218	127	255,185		
40	601,402	84	157,982	128	55,655		
41	267,749	85	218,376	129	219,588		
42	218,211	86	40,115	130	399,612		
43	165,642	87	335,141	131	369,030		
44	177,930	88	76,484	132	133,792		



**Anexo III- Áreas dos monofilamentos que constituem um fio de fibra de vidro**



Nº	Área [ $\mu\text{m}^2$ ]	Nº	Área [ $\mu\text{m}^2$ ]	Nº	Área [ $\mu\text{m}^2$ ]	Nº	Área [ $\mu\text{m}^2$ ]
1	15,706	45	33,147	89	37,987	133	22,463
2	40,270	46	26,298	90	31,503	134	30,499
3	25,477	47	24,427	91	23,194	135	30,499
4	19,176	48	26,755	92	21,550	136	29,129
5	29,129	49	31,503	93	19,815	137	25,385
6	37,895	50	40,361	94	24,655	138	33,147
7	46,570	51	29,221	95	21,550	139	25,477
8	37,074	52	21,550	96	19,633	140	31,503
9	42,826	53	17,532	97	34,334	141	29,129
10	39,265	54	20,454	98	27,029	142	31,503
11	19,815	55	24,290	99	25,477	143	27,029
12	30,499	56	24,655	100	25,477	144	27,896
13	20,591	57	20,591	101	30,362	145	34,334
14	21,550	58	21,459	102	26,755	146	39,265
15	30,499	59	25,385	103	27,896	147	26,344
16	22,326	60	25,477	104	27,896	148	27,896
17	24,427	61	27,896	105	26,344	149	29,221
18	24,427	62	46,570	106	22,326	150	22,326
19	23,468	63	24,655	107	33,421	151	21,550
20	25,477	64	26,344	108	30,499	152	27,029
21	28,125	65	27,896	109	37,987	153	33,147
22	34,334	66	22,463	110	24,655	154	29,221
23	26,344	67	32,690	111	27,029	155	33,147
24	26,344	68	26,755	112	27,029	156	35,704
25	30,179	69	23,468	113	26,755	157	29,221
26	27,896	70	26,755	114	25,385	158	27,029
27	32,690	71	23,468	115	26,298	159	27,942
28	32,690	72	22,463	116	31,503	160	27,029
29	29,221	73	22,463	117	32,690	161	25,477
30	25,477	74	26,298	118	25,477	162	25,477
31	25,477	75	23,194	119	28,125	163	25,477
32	25,477	76	26,344	120	33,147	164	33,147
33	26,298	77	30,362	121	21,459	165	29,221
34	26,755	78	27,029	122	24,655	166	36,845
35	24,427	79	24,655	123	19,222	167	25,477
36	30,499	80	21,550	124	21,459	168	31,412
37	24,427	81	26,344	125	22,326	169	22,463
38	22,326	82	30,362	126	27,029	170	40,361
39	32,325	83	24,427	127	29,129	171	24,655
40	24,427	84	26,344	128	24,427	172	19,906
41	21,550	85	24,427	129	19,906	173	29,221
42	31,503	86	25,385	130	33,147	174	26,344
43	20,591	87	23,468	131	26,298	175	29,129
44	26,755	88	22,326	132	26,298	176	26,344

Nº	Área [ $\mu\text{m}^2$ ]	Nº	Área [ $\mu\text{m}^2$ ]	Nº	Área [ $\mu\text{m}^2$ ]	Nº	Área [ $\mu\text{m}^2$ ]
177	26,344	221	29,221	265	37,074	309	21,276
178	27,029	222	40,361	266	26,344	310	18,263
179	27,896	223	22,463	267	30,362	311	29,129
180	31,412	224	35,613	268	20,591	312	21,459
181	32,690	225	32,462	269	24,427	313	25,477
182	24,290	226	22,463	270	26,344	314	36,845
183	37,074	227	31,503	271	27,029	315	26,298
184	39,265	228	26,344	272	26,298	316	33,421
185	26,755	229	26,344	273	24,427	317	33,147
186	26,755	230	18,080	274	30,179	318	25,933
187	27,029	231	50,497	275	27,942	319	24,427
188	26,755	232	32,690	276	29,221	320	40,270
189	31,503	233	61,546	277	26,344	321	24,427
190	26,298	234	54,789	278	22,463	322	29,129
191	22,463	235	33,147	279	26,344	323	19,906
192	22,463	236	29,129	280	21,459	324	37,987
193	24,427	237	27,896	281	27,029	325	31,503
194	23,468	238	19,906	282	23,468	326	29,221
195	30,499	239	26,755	283	27,029	327	29,221
196	29,221	240	28,125	284	24,655	328	32,462
197	26,344	241	43,831	285	30,499	329	19,815
198	29,129	242	23,468	286	27,896	330	22,326
199	35,613	243	23,468	287	35,613	331	27,896
200	33,147	244	27,029	288	23,194	332	20,591
201	32,462	245	39,311	289	32,690	333	25,385
202	21,459	246	19,906	290	24,655	334	26,298
203	27,029	247	29,221	291	32,462	335	26,344
204	29,129	248	41,639	292	19,176	336	24,655
205	26,755	249	32,690	293	30,499	337	24,427
206	17,121	250	27,029	294	25,477	338	25,477
207	25,385	251	26,298	295	27,896	339	25,477
208	30,499	252	26,755	296	27,896	340	37,074
209	22,463	253	37,987	297	31,503	341	26,755
210	29,129	254	37,987	298	31,412	342	23,468
211	25,203	255	33,147	299	27,896	343	29,221
212	24,244	256	35,613	300	22,463	344	27,896
213	26,298	257	35,613	301	27,029	345	27,896
214	26,298	258	31,412	302	29,129	346	28,125
215	20,637	259	26,344	303	31,503	347	23,468
216	24,427	260	28,125	304	37,895	348	31,503
217	29,221	261	26,298	305	19,633	349	25,385
218	32,690	262	33,147	306	42,826	350	26,298
219	19,176	263	30,362	307	25,477	351	25,477
220	25,385	264	23,468	308	30,499	352	27,029

Nº	Área [ $\mu\text{m}^2$ ]	Nº	Área [ $\mu\text{m}^2$ ]	Nº	Área [ $\mu\text{m}^2$ ]	Nº	Área [ $\mu\text{m}^2$ ]
353	27,029	397	24,655	441	21,550	485	30,362
354	24,427	398	19,906	442	26,298	486	24,427
355	21,550	399	24,427	443	30,499	487	30,362
356	33,147	400	37,074	444	23,468	488	26,344
357	21,459	401	39,311	445	29,129	489	24,655
358	31,503	402	26,344	446	59,080	490	27,896
359	31,412	403	26,755	447	34,197	491	23,468
360	26,298	404	28,125	448	57,711	492	40,270
361	25,477	405	23,468	449	26,755	493	23,468
362	27,029	406	39,265	450	28,125	494	24,427
363	21,550	407	26,344	451	27,896	495	39,265
364	22,463	408	27,029	452	31,503	496	27,029
365	26,344	409	24,427	453	21,550	497	30,499
366	24,427	410	30,499	454	19,222	498	23,468
367	25,477	411	28,125	455	24,427	499	21,550
368	25,477	412	24,427	456	29,221	500	21,550
369	24,427	413	26,755	457	22,463	501	21,550
370	26,344	414	23,468	458	24,427	502	22,326
371	23,468	415	27,896	459	28,125	503	28,125
372	21,550	416	24,655	460	29,221	504	37,987
373	27,029	417	27,029	461	27,896	505	23,468
374	19,222	418	24,244	462	27,896	506	32,690
375	24,655	419	23,468	463	22,326	507	31,503
376	30,499	420	24,427	464	32,462	508	23,468
377	35,704	421	23,194	465	30,499	509	31,503
378	34,334	422	22,326	466	23,194	510	35,613
379	19,176	423	32,462	467	23,468	511	23,468
380	43,831	424	29,129	468	29,221	512	25,385
381	26,298	425	24,655	469	23,468	513	26,298
382	37,987	426	31,503	470	33,147	514	32,690
383	29,129	427	30,362	471	27,942	515	30,499
384	22,463	428	26,298	472	26,298	516	21,550
385	33,421	429	25,933	473	25,477	517	26,344
386	18,856	430	29,221	474	23,468	518	35,613
387	39,265	431	25,477	475	28,125	519	24,290
388	19,906	432	25,477	476	26,298	520	37,895
389	22,098	433	29,221	477	32,690	521	35,613
390	25,933	434	21,778	478	29,129	522	23,376
391	26,344	435	18,993	479	23,468	523	25,385
392	30,499	436	33,421	480	23,194	524	25,385
393	30,179	437	27,896	481	24,655	525	35,613
394	16,619	438	29,129	482	23,468	526	23,194
395	29,129	439	37,987	483	22,326	527	33,421
396	24,746	440	27,896	484	24,655	528	19,906

Nº	Área [ $\mu\text{m}^2$ ]	Nº	Área [ $\mu\text{m}^2$ ]	Nº	Área [ $\mu\text{m}^2$ ]	Nº	Área [ $\mu\text{m}^2$ ]
529	33,421	573	53,054	617	29,129	661	23,468
530	37,895	574	33,421	618	27,029	662	30,499
531	28,125	575	25,385	619	26,344	663	21,550
532	35,704	576	25,385	620	25,477	664	27,029
533	39,265	577	31,503	621	26,755	665	30,499
534	24,427	578	27,029	622	34,197	666	29,221
535	24,655	579	26,298	623	27,029	667	23,468
536	26,298	580	23,468	624	20,591	668	23,468
537	37,895	581	28,125	625	23,468	669	23,468
538	27,896	582	26,344	626	19,815	670	26,755
539	25,477	583	32,462	627	23,468	671	25,477
540	26,344	584	29,129	628	22,326	672	24,655
541	34,197	585	49,538	629	44,424	673	29,221
542	27,029	586	40,270	630	24,427	674	24,427
543	37,987	587	22,463	631	25,477	675	23,468
544	25,385	588	34,197	632	27,029	676	32,325
545	21,550	589	29,221	633	26,755	677	32,462
546	21,550	590	32,690	634	25,477	678	28,125
547	19,815	591	20,454	635	29,129	679	29,129
548	22,326	592	25,477	636	26,298	680	25,477
549	23,194	593	25,385	637	26,344	681	22,463
550	21,276	594	23,468	638	46,707	682	25,477
551	32,462	595	23,468	639	24,655	683	23,468
552	24,655	596	23,468	640	29,221	684	23,468
553	18,172	597	23,194	641	34,197	685	22,463
554	18,856	598	21,550	642	26,298	686	23,468
555	31,047	599	24,427	643	32,690	687	25,477
556	23,376	600	26,344	644	24,655	688	25,477
557	19,906	601	26,755	645	25,477	689	21,459
558	25,477	602	22,326	646	23,376	690	24,290
559	27,029	603	30,499	647	26,755	691	27,896
560	24,655	604	23,194	648	30,179	692	23,468
561	19,633	605	26,344	649	24,427	693	24,290
562	21,276	606	25,477	650	25,477	694	23,468
563	20,454	607	31,503	651	24,427	695	24,655
564	18,263	608	31,503	652	27,029	696	35,613
565	26,298	609	33,147	653	32,462	697	21,550
566	17,532	610	24,427	654	19,906	698	30,499
567	29,129	611	46,570	655	25,477	699	24,244
568	21,550	612	24,655	656	24,655	700	24,655
569	21,550	613	22,326	657	26,298	701	23,468
570	30,362	614	29,221	658	30,362	702	24,655
571	25,203	615	24,427	659	24,655	703	31,503
572	28,125	616	33,421	660	21,550	704	21,550

Nº	Área [ $\mu\text{m}^2$ ]	Nº	Área [ $\mu\text{m}^2$ ]	Nº	Área [ $\mu\text{m}^2$ ]
705	19,176	749	19,906	793	23.468
706	35,613	750	27,896	794	22.326
707	26,938	751	25,203	795	26.298
708	26,298	752	20,454	796	27.896
709	23,468	753	25,477	<b>797</b>	43.831
710	19,815	754	23,468	<b>Soma das áreas</b>	<b>21.950,046 <math>\mu\text{m}^2</math></b>
711	32,325	755	27,029		<b>0.022 mm<sup>2</sup></b>
712	24,290	756	25,385		
713	28,125	757	24,655		
714	33,147	758	29,129		
715	24,655	759	36,845		
716	20,591	760	19,906		
717	14,976	761	24,655		
718	21,550	762	27,029		
719	27,029	763	30,179		
720	23,468	764	27,029		
721	24,290	765	33,147		
722	25,477	766	32,280		
723	21,459	767	27,029		
724	24,427	768	27,896		
725	26,344	769	32,690		
726	22,463	770	34,882		
727	32,690	771	32,462		
728	25,385	772	34,197		
729	29,129	773	29,129		
730	25,477	774	35,704		
731	20,591	775	31,412		
732	24,427	776	28,125		
733	30,499	777	30,499		
734	27,029	778	33,147		
735	24,427	779	26,298		
736	24,655	780	29,221		
737	29,129	781	40,270		
738	20,454	782	32,462		
739	15,706	783	40,361		
740	20,454	784	30,362		
741	19,906	785	26,298		
742	23,468	786	26,755		
743	23,468	787	24,655		
744	24,655	788	35,613		
745	31,503	789	40,270		
746	26,298	790	23,468		
747	26,344	791	25,477		
748	20,591	792	34,334		



#### **Anexo IV- Dados obtidos nos ensaios de tração dos fios**



Provete	Força máxima [N]	Tensão rotura [MPa]	Extensão máxima	Módulo de elasticidade [GPa]	Tensão de cedência [MPa]
F. Cânhamo x1	6,94731	204,3326	0,13873	3,3401	195,71
F. Cânhamo x2	7,81545	229,8662	0,12969	4,0659	190,582941
F. Cânhamo x3	7,31094	215,0276	0,13016	3,7712	203,1114706
F. Cânhamo x4	6,47007	190,2962	0,16151	2,9924	183,8923529
<b>Média</b>	<b>7,1359425</b>	<b>209,8806</b>	<b>0,1400225</b>	<b>3,5424</b>	<b>193,3241911</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,492778595</b>	<b>14,49349651</b>	<b>0,012917166</b>	<b>0,409214791</b>	<b>7,034858706</b>
<b>Máximo</b>	<b>7,81545</b>	<b>229,8662</b>	<b>0,16151</b>	<b>4,0659</b>	<b>203,1114706</b>
<b>Mínimo</b>	<b>6,47007</b>	<b>190,2962</b>	<b>0,12969</b>	<b>2,9924</b>	<b>183,8923529</b>
F. Cânhamo y1	9,1714	269,7471	0,06624	9,51	263,9176471
F. Cânhamo y2	10,55408	310,4141	0,04748	12,039	302,07
F. Cânhamo y3	11,83678	348,1406	0,0688	9,5985	326,6367647
F. Cânhamo y4	10,98364	323,0482	0,04597	11,616	301,348824
<b>Média</b>	<b>10,636475</b>	<b>312,8375</b>	<b>0,0571225</b>	<b>10,690875</b>	<b>298,493309</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,963650523</b>	<b>28,34264765</b>	<b>0,010450465</b>	<b>1,146848528</b>	<b>22,40801854</b>
<b>Máximo</b>	<b>11,83678</b>	<b>348,1406</b>	<b>0,0688</b>	<b>12,039</b>	<b>326,6367647</b>
<b>Mínimo</b>	<b>9,1714</b>	<b>269,7471</b>	<b>0,04597</b>	<b>9,51</b>	<b>263,9176471</b>
F. vidro x1	12,05115	545,3009	0,0379	32,068	491,3877828
F. vidro x2	12,45681	563,6566	0,03041	43,743	521,3561086
F. vidro x3	9,465	428,2805	0,03224	38,558	389,7081448
F. vidro x4	11,37895	514,8846	0,03461	36,918	488,80724
<b>Média</b>	<b>11,3379775</b>	<b>513,0307</b>	<b>0,03379</b>	<b>37,82175</b>	<b>472,8148191</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>1,147837602</b>	<b>51,93837912</b>	<b>0,002801401</b>	<b>4,169102684</b>	<b>49,65805223</b>
<b>Máximo</b>	<b>12,45681</b>	<b>563,6566</b>	<b>0,0379</b>	<b>43,743</b>	<b>521,3561086</b>
<b>Mínimo</b>	<b>9,465</b>	<b>428,2805</b>	<b>0,03041</b>	<b>32,068</b>	<b>389,7081448</b>
F. vidro y1	16,88239	763,909	0,03708	50,417	750,9552036
F. vidro y2	18,46129	835,3525	0,04528	47,709	770,1149
F. vidro y3	12,54311	567,5615	0,02505	44,763	463,3986
F. vidro y4	13,76035	622,6403	0,03875	36,199	615,8163
<b>Média</b>	<b>15,411785</b>	<b>697,365825</b>	<b>0,03654</b>	<b>44,772</b>	<b>650,0712509</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>2,367419145</b>	<b>107,1230408</b>	<b>0,007307246</b>	<b>5,338267603</b>	<b>123,0935923</b>
<b>Máximo</b>	<b>18,46129</b>	<b>835,3525</b>	<b>0,04528</b>	<b>50,417</b>	<b>770,1149</b>
<b>Mínimo</b>	<b>12,54311</b>	<b>567,5615</b>	<b>0,02505</b>	<b>36,199</b>	<b>463,3986</b>



## **Anexo V- Dados obtidos nos ensaios de tração dos compósitos**



Provete	Força máxima [kN]	Tensão máxima [MPa]	Extensão máxima	Módulo de elasticidade [GPa]	Tensão de cedência [MPa]
F. Cânhamo com vácuo x1	2,965145	40,25995	0,043098	3,2774	15,22
F. Cânhamo com vácuo x2	2,944528	41,033	0,03889	4,251	16,43
F. Cânhamo com vácuo x3	2,802865	39,45475	0,03811	4,2234	13,66
F. Cânhamo com vácuo x4	2,948301	43,17956	0,043258	4,4568	12,54
F. Cânhamo com vácuo x5	2,968792	41,06213	0,043771	4,0055	14,27
<b>Média</b>	2,9259262	40,997878	0,0414254	4,04282	14,424
<b>Desvio Padrão</b>	0,0622355	1,24023223	0,00241155	0,40855551	1,3277439
<b>Máximo</b>	2,968792	43,17956	0,043771	4,4568	16,43
<b>Mínimo</b>	2,802865	39,45475	0,03811	3,2774	12,54
F. Cânhamo x1	3,99958	50,95655	0,033027	5,3946	19,47
F. Cânhamo x2	4,042626	51,59701	0,027578	3,9014	25,5
F. Cânhamo x3	4,141446	53,12951	0,051784	5,1027	22,75
F. Cânhamo x4	4,084269	52,76151	0,069247	5,8063	25,34
F. Cânhamo x5	3,906448	51,93363	0,048755	5,2692	25,71
<b>Média</b>	4,0348738	52,075642	0,0460782	5,09484	23,754
<b>Desvio Padrão</b>	0,0794939	0,78519750	0,01475876	0,64043635	2,3979374
<b>Máximo</b>	4,141446	53,12951	0,069247	5,8063	25,71
<b>Mínimo</b>	3,906448	50,95655	0,027578	3,9014	19,47
F. de vidro com vácuo x1	Utilizado para a afinação da máquina				
F. de vidro com vácuo x2	17,57176	430,9973	0,12717	26,576	-
F. de vidro com vácuo x3	16,76995	384,0154	0,022314	23,277	-
F. de vidro com vácuo x4	17,32278	423,8509	0,024662	25,158	-
F. de vidro com vácuo x5	17,21822	418,0195	0,022814	21,803	-
<b>Média</b>	17,220677	414,220775	0,04924	24,2035	-
<b>Desvio Padrão</b>	0,2901918	18,0345923	0,04500140	1,81387906	-
<b>Máximo</b>	17,57176	430,9973	0,12717	26,576	-
<b>Mínimo</b>	16,76995	384,0154	0,022314	21,803	-
F. de vidro x1	17,73185	330,7564	0,022451	14,448	-
F. de vidro x2	Não partiu			19,958	-
F. de vidro x3	Não partiu			19,15	-
F. de vidro x4	15,47539	293,9853	0,109582	14,507	-
F. de vidro x5	15,2938	296,6214	0,01865	17,557	-
<b>Média</b>	16,167013	307,121033	0,05022766	17,124	-
<b>Desvio Padrão</b>	1,1089872	16,7473415	0,04199852	2,29492422	-
<b>Máximo</b>	17,73185	330,7564	0,109582	19,958	-
<b>Mínimo</b>	15,2938	293,9853	0,01865	14,448	-