

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Ana Catarina Ferreira Murça Duro

**Desenvolvimento e caracterização de
compósitos reforçados com fibras de
linho e sisal**



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Ana Catarina Ferreira Murça Duro

**Desenvolvimento e caracterização de
compósitos reforçados com fibras de
linho e sisal**

Dissertação de Mestrado
Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros

Trabalho realizado sob orientação do
Professor Doutor João Pedro Nunes
e do
Professor Doutor João Francisco Silva
e do
Engenheiro Luís Oliveira

outubro de 2013

Nome Ana Catarina Ferreira Murça Duro

Endereço eletrónico: catarinaduro@gmail.com

Título dissertação: Desenvolvimento e caracterização de compósitos reforçados com fibras de linho e sisal

Orientadores: Professor Doutor João Pedro Nunes

Professor Doutor João Francisco Silva

Engenheiro Luís Oliveira

Ano de conclusão: 2013

Designação do Mestrado: Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA DISSERTAÇÃO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE;

Universidade do Minho, ___/___/_____

Assinatura: _____

“Uma vida sem desafios não vale a pena ser vivida.”

Sócrates (470 a.C.)

Agradecimentos

A tese elaborada no âmbito do “Desenvolvimento e caracterização de novos compósitos termoenduríveis reforçados com fibras vegetais” foi realizada em colaboração com o Pólo de Inovação em Engenharia de Polímeros e o Instituto Superior de Engenharia do Porto. Estas entidades mostraram-se fundamentais para os trabalhos de caracterização das fibras de reforço, produção de materiais compósitos por infusão a vácuo e injeção e caracterização dos compósitos obtidos. Sem o seu apoio, dificilmente se teriam alcançado todos os objetivos propostos. Tenho, por isso, de agradecer a todos aqueles que, trabalhando nessas instituições, de uma forma ou de outra tornaram possível a sua realização.

Ao professor João Pedro L. G. Nunes, orientador pela Universidade do Minho (UM), agradeço toda a disponibilidade manifestada ao orientar-me neste projeto. O apoio prestado, a exigência e rigor em todas as etapas de realização do trabalho, correções e sugestões, tornaram possível a conclusão do mesmo.

Ao professor João Francisco M. G. da Silva, orientador no Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), agradeço também toda a sua disponibilidade durante a realização do trabalho e por, para além da sua orientação, ter sido ainda sempre capaz de estimular o meu espírito crítico através da colocação de perguntas a que tive de ir dando resposta.

Ao Engenheiro Luís André P. de Oliveira, responsável pela orientação no Pólo de Inovação em Engenharia de Polímeros (PIEP), agradeço toda a ajuda concedida, informação disponibilizada de forma a deixar-me à vontade com o tema sugerido, confiança transmitida e ainda pelas opiniões, sugestões, acessibilidade e incentivos transmitidos durante todo o trabalho.

Ao Rafael Alves, ao Frederico Ferreira, ao Tiago Neves, ao Bruno Barros, e à Andreia Vilela, colaboradores do PIEP, por todo o acompanhamento no trabalho prático realizado.

Ao Bruno Francisco Castro, à Judite Amorim, à Joana Matos, à Marta Coelho, à Diana Meireles, e ao Rui Pinto pela amizade e apoio durante o projeto de tese.

À minha família e amigos por todo o apoio dado durante este meu percurso e me terem sempre ajudado a encontrar o rumo certo.

Resumo

Face às limitações demonstradas pelos materiais tradicionais, tem-se recentemente verificado a procura crescente de materiais que possuam características mais apropriadas para muitas aplicações de engenharia, como por exemplo, elevada resistência, durabilidade, rigidez e capacidade de absorção e dissipação de energia. Por muitas vezes apresentarem as propriedades requeridas, os materiais compósitos, já bastante usados com sucesso em indústrias avançadas (aeronáutica, aeroespacial, etc.), têm vindo a ser cada vez mais usados em aplicações de grande consumo (construção civil e transportes, por exemplo).

Estes materiais são habitualmente reforçados com fibras de vidro, carbono e aramidas. Contudo, o emprego de fibras naturais é vantajoso face às fibras tradicionais especialmente no que diz respeito à redução de peso (massa volúmica inferior) e contribuição para um crescimento mais sustentável por elas serem biodegradáveis e, portanto, muito mais ecológicas. No entanto, são bem conhecidas algumas limitações à aplicação das fibras naturais, como sejam, a absorção de água, perda de adesão às matrizes e a sua maior degradação com a temperatura.

Neste trabalho estudaram-se e analisaram-se as propriedades mecânicas de diversos compósitos de matriz termoendurecível tradicional (poliéster e epóxido) e bioresina reforçados com fibras vegetais de sisal e linho, respetivamente, na forma de manta e de tecido bidirecional. Além destes, foram também produzidos compósitos de matriz termoplástica biodegradável de PLA reforçada com fibras vegetais cortadas do mesmo tipo tendo, por isso, tamanho mais curto. Os laminados produzidos foram sujeitos a ensaios de tração e de flexão de modo a avaliar e comparar as propriedades finais obtidas.

Os reforços de fibra de sisal e de linho utilizados também foram caracterizados física e mecanicamente, de modo a obter propriedades de base que permitissem prever as características finais teoricamente esperadas para os compósitos produzidos.

Finalmente, as propriedades obtidas foram cuidadosamente analisadas de forma a melhor compreender o comportamento mecânico obtido nos compósitos produzidos.

Abstract

Due to the limitations of traditional materials, nowadays is increasing the demanding for materials presenting more suitable characteristics for many engineering applications, such as high strength, durability, stiffness, absorbing capacity and power dissipation. Composite materials, which already are quite successfully used in advanced markets (aviation, aerospace, etc.) and usually present the desired properties, are been much more often used in the major common commercial applications (for example, construction and transportation).

Glass, carbon and aramid fibres are the reinforcements most often used in these materials. However, the replacement of such traditional reinforcements by natural fibres has great advantages regarding to weight reduction (lower density) and contribution for a more sustainable greener growth due to their biodegradability. However, there are some limitations to natural fibres application, such as, higher water absorption, temperature degradation and lower adhesion to matrices.

This work studied and analysed the mechanical properties of composites made with traditional and biodegradable thermosetting (polyester and epoxy) matrices reinforced with natural vegetable fibres of sisal and flax in form of mat and fabrics, respectively. In addition, composites reinforced with shorter fibres, cut from the same vegetable reinforcements, were also produced by using a biodegradable PLA thermoplastic matrix. The produced laminates were then subjected to tensile and bending in order to evaluate and compare the obtained final properties.

The sisal and flax fibres were also physically and mechanically characterised in order to allow obtaining the basic properties that allow predicting the final theoretically expected properties of the produced composites.

Finally, the properties obtained were carefully analysed in order to better understand the mechanical behaviour of the produced composites.

Índice

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	ix
1. Introdução	1
1.1. Objetivos	2
2. Estado de Arte	3
2.1. Compósitos de Matriz Polimérica Reforçada com Fibras Naturais	3
2.2. Matrizes Poliméricas	6
2.2.1. Resinas de Epóxido	9
2.2.2. Resinas de Poliéster Insaturado	12
2.2.3. Poli (Ácido Lático)	15
2.3. Fibras de Reforço	16
2.3.1. Fibras de Sisal	20
2.3.2. Fibras de Linho	22
3. Procedimentos Experimentais	25
3.1. Caracterização de Fibras de Reforço	25
3.1.1. Microscopia Ótica	26
3.1.2. Densidade	30
3.1.3. Resistência à tração	31
3.2. Caracterização dos materiais compósitos	41
3.2.1. Propriedades em tração	44
3.2.2. Propriedades em flexão	47
3.2.3. Previsão das propriedades nos compósitos	50
4. Caracterização e Processamento de Materiais	53
4.1. Caracterização das Fibras Naturais	53
4.1.1. Fibras de Sisal	53
4.1.2. Fibras de Linho	55
4.2. Infusão por Vácuo	58
4.2.1. Preparação do processo	59
4.2.2. Processamento por infusão com vácuo	64
4.3. Mistura e Estampagem de Compósitos	67
4.3.1. Preparação do processo	68

4.3.2.	Mistura e Estampagem	69
4.4.	Propriedades Determinadas nos Compósitos	71
4.4.1.	Compósitos em Epóxido Reforçado com Fibras de Sisal	71
4.4.2.	Compósito em Epóxido Reforçado com Fibras de Linho	72
4.4.3.	Compósito de Poliéster Insaturado Reforçado com Fibras de Sisal	72
4.4.4.	Compósito de Poliéster Insaturado Reforçado com Fibras de Linho	73
4.4.5.	Compósito de Bioresina de Epóxido Reforçado com Fibras de Sisal	73
4.4.6.	Compósito de Bioresina de Epóxido Reforçado com Fibras de Linho	74
4.4.7.	Poli-Ácido Láctico (PLA)	74
4.4.8.	Compósito de PLA Reforçado com Fibras de Sisal	75
4.4.9.	Compósito de PLA Reforçado com Fibras de Linho	75
4.4.10.	Comparação e Análise dos resultados obtidos	75
5.	Conclusões	81
6.	Referências Bibliográficas	83
7.	Anexos	87
	Anexo I	87
	Anexo II	93
	Anexo III	101
	Anexo IV	103
	Anexo V	107
	Anexo VI	109
	Anexo VII	113
	Anexo VIII	115
	Anexo IX	119
	Anexo X	121
	Anexo XI	123

Índice de Figuras

Figura 1 - Classificação dos materiais compósitos relativamente à matriz usada (adaptado de [2])	6
Figura 2 - Tensão obtida por um compósito de matriz polimérica reforçada com fibras [15]	8
Figura 3 - Classificação dos materiais compósitos de acordo com o reforço utilizado (adaptado de [2])	9
Figura 4 - Estrutura química de um grupo 'epóxido' simples (Ethylene Oxide) [15]	10
Figura 5 - Estrutura química dum 'epóxido', o Diglicidil - Éter do Bisfenol A [15]	10
Figura 6 - Representação esquemática da resina de epóxido (estrutura curada 3D) [15]	11
Figura 7 - Estrutura química de um poliéster isoftálico [15]	12
Figura 8 - Classificação das fibras naturais (adaptado de [2])	17
Figura 9 - Estrutura típica de uma fibra natural vegetal [24]	18
Figura 10 - Disposição da celulose, hemicelulose e lignina na parede da célula de uma fibra natural vegetal [24]	19
Figura 11 - Comparação de desempenho/preço de diversos materiais utilizados na indústria automóvel [25]	20
Figura 12 - O sisal (a) [27] e as suas fibras (b) [28]	21
Figura 13 - Esquema de extração de fibras de sisal (adaptado de [30] [31])	21
Figura 14 - O linho (a) e as suas fibras (b) (adaptado de [32])	22
Figura 15 - Esquema de extração de fibras de linho (adaptado de [34])	23
Figura 16 - Fibras de sisal na forma de manta (a) e fibras de linho na forma de tecido (b)	25
Figura 17 - Microscópio Ótico <i>Olympus BH2-UMA</i>	26
Figura 18 - Amostra em suporte de cartão com fios da manta de sisal (a) e fio e respetivos filamentos do tecido de linho	27
Figura 19 - Amostras de fio de sisal (a) e de linho (b) impregnadas em resina de epóxido	27
Figura 20 - Polideira <i>DAP - Struers</i>	28
Figura 21 - Geometria observada por microscópio ótico de amostras de fios de sisal	28
Figura 22 - Geometria observada por microscópio ótico de amostras de filamentos de linho (a), o fio imaginário que os une (b) e o fio de linho constituído por esses elementos (c)	29
Figura 23 - Medição da área de secção transversal de um fio de linho constituído por um grande número de filamentos e fio imaginário que os une	29
Figura 24 - Determinação da densidade das fibras de sisal (a) e das fibras de linho (b) através do método de Arquimedes	30
Figura 25 - Equipamento de ensaios de tração universal <i>Shimadzu</i>	32
Figura 26 - Suporte de papel para ensaios de tração de amostras de monofilamento	33
Figura 27 - Ensaio de tração aos filamentos das fibras de sisal	33
Figura 28 - Fibras de linho em forma de tecido com duas direções distintas: + 45° e - 45°	35
Figura 29 - Provete circular com uma área de 100 cm ² utilizado na determinação de massa por unidade de superfície do tecido de linho (a) e respetivo equipamento de corte de provete (b)	36
Figura 30 - Equipamento Malhmetro (<i>Maillemètre</i>) para determinação da massa linear dos fios de tecido de linho	37
Figura 31 - Equipamento contador de fios	39
Figura 32 - Equipamento de ensaio de tração universal <i>Hounsfield</i>	39
Figura 33 - Provetes de tecido de linho a testar nas direções: -45°, +45°, e 90°	40
Figura 34 - Ensaio de tração a tira de tecido orientada a -45°	40

Figura 35 - Esquema de compósitos produzidos com matriz e fibra de reforço distintas, e respetivos processos de produtivos	42
Figura 36 - Provete de tração de (250 x 25 mm) (a), provete de flexão de (100 x 25 mm) (b), serra de disco adiamantado para maquinação de provetes (c)	43
Figura 37 - Equipamento de ensaio de tração universal <i>Shimadzu Autograph AG - X Series</i>	44
Figura 38 - Extensómetro utilizado durante o ensaio de tração, para a medição de deslocamento até 0,3mm	45
Figura 39 - Gráfico de curva típica tensão - deformação obtida no ensaio de tração do provete nº 1 de um compósito de resina epóxico com fibras de sisal	46
Figura 40 - Gráfico de curva tensão - deformação extensométrica do ensaio de tração do provete nº 1 de um compósito de resina epóxico com fibras de sisal	47
Figura 41 - Ensaio de flexão em 3 pontos no equipamento de ensaios universal Shimadzu Autograph AG - X Series	47
Figura 42 - Gráfico de curva típica flexão - deformação obtida no ensaio de flexão do provete nº 1 de um compósito de resina epóxico com fibras de sisal	49
Figura 43 - Gráfico de curva flexão - deformação do ensaio de flexão do provete nº 1 de um compósito de resina epóxico com fibras de sisal	49
Figura 44 - Representação esquemática do processo de infusão a vácuo (adaptado de [39])	58
Figura 45 - Fibras de reforço com dimensões (300 x 300 mm) para 1 laminado de fibras de sisal (a) e para 3 laminados de fibra de linho (b)	59
Figura 46 - Molde em vidro, delimitado com “tacky tape” numa superfície com mais 200 mm do que o pretendido em cada extremidade	60
Figura 47 - Posicionamento das fibras de reforço com dimensões (300mm x 300mm) (a) e, sob estas o “peel ply” com dimensões (350mm x 350mm) (b)	61
Figura 48 - Colocação de “flow mesh” em 80% da superfície da peça a fabricar	61
Figura 49 - Posicionamento de tubos de distribuição e alimentação da resina (a) e colocação de saco de vácuo vedado com “tacky tape” (b)	62
Figura 50 - Laminado de fibras de sisal envolvidas por “peel ply”, seguido de saco de vácuo	63
Figura 51 - Adaptação de tubos de distribuição de resina no sistema de infusão	63
Figura 52 - Sistema a infundir no interior do equipamento Permeabilímetro (a) com respetivo medidor de espessuras (b)	64
Figura 53 - Infusão de resina nas placas reforçadas com fibras de linho (a) e fibras de sisal (b)	67
Figura 54 - Representação esquemática do processo produtivo Mistura e Estampagem para a produção de compósito termoplástico reforçado com fibras vegetais (adaptado de [40] [41])	69
Figura 55 - Misturadora utilizada para a mistura do polímero de PLA e da fibra de reforço	70
Figura 56 - Composto extraído da câmara de mistura (a) e colocado de seguida na cavidade do molde (b)	70
Figura 57 - Placas de compósito de PLA reforçado com fibras de sisal (a) e com fibras de linho (b)	71

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Propriedades típicas da resina de epóxido e da resina de poliéster (adaptado de [16])	15
Tabela 2 - Propriedades mecânicas do Poli - Ácido Lático (PLA) (adaptado de [22]).....	16
Tabela 3 – Principais diferenças entre as fibras naturais e as fibras sintéticas (adaptado de [23])	16
Tabela 4 - Comparação das propriedades das fibras naturais e sintéticas (adaptado de [24]).....	19
Tabela 5 - Propriedades mecânicas da fibra de sisal (adaptado de [24]).....	22
Tabela 6 - Propriedades mecânicas da fibra de linho (adaptado de [35] [24] [36] [11])	24
Tabela 7 - Propriedades obtidas na caracterização física e mecânica das fibras de sisal	54
Tabela 8 - Propriedades obtidas na caracterização física e mecânica das fibras de linho.....	56
Tabela 9 - Propriedades da resina de epóxido Epikote™ Resin 04908	65
Tabela 10 - Propriedades da bioresina de epóxido	65
Tabela 11 - Propriedades da resina de poliéster insaturado ortóftálico.....	66
Tabela 12 - Propriedades da resina de PLA.....	68
Tabela 13 - Propriedades obtidas na caracterização mecânica de um compósito de resina de epóxido reforçado com fibras de sisal.....	71
Tabela 14 - Propriedades obtidas na caracterização mecânica de um compósito de resina de epóxido reforçado com fibras de linho orientadas a $\pm 45^\circ$ e a $0^\circ/90^\circ$	72
Tabela 15 - Propriedades obtidas na caracterização mecânica de um compósito de resina ortóftálica de poliéster insaturado reforçado com fibras de sisal	72
Tabela 16 - Propriedades obtidas na caracterização mecânica de um compósito de resina ortóftálica de poliéster insaturado reforçado com fibras de linho orientadas a $\pm 45^\circ$ e a $0^\circ/90^\circ$	73
Tabela 17 - Propriedades obtidas na caracterização mecânica de um compósito de bioresina de epóxido reforçado com fibras de sisal.....	73
Tabela 18 - Propriedades obtidas na caracterização mecânica de um compósito de bioresina de epóxido reforçado com fibras de linho orientadas a $\pm 45^\circ$ e a $0^\circ/90^\circ$	74
Tabela 19 - Propriedades mecânicas obtidas para o PLA	74
Tabela 20 - Propriedades mecânicas obtidas nas placas compósitas de PLA reforçado com sisal.....	75
Tabela 21 - Propriedades mecânicas obtidas nas placas compósitas PLA reforçado com linho.....	75
Tabela 22 - Comparação das propriedades em tração da resina não reforçada (dados do fabricante) e reforçada com sisal e linho (obtidos experimentalmente)	76
Tabela 23 - Comparação de propriedades de flexão da resina sem reforço (fornecidos pelo fabricante) e da resina com reforço de sisal ou linho (obtidos na caracterização mecânica)	79

1. Introdução

Neste trabalho procurou-se estudar e desenvolver materiais compósitos mais amigos do ambiente que pudessem vir a ser utilizados em mercados de grande consumo, como sejam a construção civil e a indústria automóvel, com o intuito de contribuir de modo significativo para crescimento económico mundial mais ecológico e sustentável.

A maior parte do trabalho realizou-se nas instalações do Pólo de Inovação em Engenharia de Polímeros (PIEP) em Guimarães. O PIEP é uma associação privada e sem fins lucrativos, suportada num modelo de gestão empresarial, de interface entre a Universidade e a Indústria no que diz respeito à efetiva transferência tecnológica e científica para o mercado real. Reúne condições de excelência para o exercício da atividade de I&DT em parceria com a indústria nacional e internacional.

As suas atuais instalações foram inauguradas em Abril de 2011 por iniciativa conjunta do sector industrial, IAPMEI e Universidade do Minho, que envolveu fortemente no processo o seu Departamento de Engenharia de Polímeros. Elas pretenderam dar resposta, em tempo oportuno, às necessidades demonstradas pelas empresas do sector no âmbito da inovação em Engenharia de Polímeros tanto a nível de materiais como de produtos finais, tecnologias de processamento e ferramentas produtivas. São importantes objetivos do PIEP a promoção da transferência tecnológica para o tecido empresarial e a formação e desenvolvimento de recursos humanos com competências que garantam o aumento da competitividade e inovação no domínio da Engenharia de Polímeros ao nível industrial.

Atualmente, o PIEP desenvolve a sua atividade nos grandes mercados e setores mais estratégicos de aplicação dos materiais poliméricos e compósitos, nomeadamente:

- aeronáutica e defesa;
- ambiente e energias;
- automóvel
- construção civil;
- embalagem;
- equipamento elétrico e eletrónico;
- saúde e dispositivos médicos.

1.1. Objetivos

Neste trabalho pretendeu-se estudar e desenvolver novos materiais compósitos, de matriz termoendurecível e termoplástica, reforçados com fibras naturais de sisal e linho, que pudessem vir a ser utilizados na construção civil e na indústria automóvel. Desejava-se, portanto, dar um significativo contributo para um desenvolvimento mais sustentável e ecológico da economia mundial.

Nesse sentido, produziram-se peças para a avaliação e comparação das suas propriedades mecânicas com as de outros materiais convencionais usados nessas aplicações.

Tendo em conta as pretensões acima referidas, os principais objetivos definidos para o trabalho são:

- a seleção e caracterização dos reforços fibrosos naturais e as matrizes a utilizar;
- a definição de processos de fabrico a empregar na produção das peças em compósito e a sua otimização, tendo em vista a obtenção do melhor rácio desempenho/custo;
- o projeto e fabrico das ferramentas de produção que se mostrarem necessárias;
- a determinação das principais propriedades das peças em compósitos reforçados com fibras naturais.

2. Estado de Arte

Neste capítulo, para além de se efetuar uma análise do estado atual do desenvolvimento e aplicação dos materiais compósitos reforçados com fibras naturais, também se faz uma apresentação das matérias-primas (resinas e fibras de reforço) utilizadas no presente trabalho.

2.1. Compósitos de Matriz Polimérica Reforçada com Fibras Naturais

Os compósitos possuem propriedades muito interessantes no âmbito da engenharia, destacando-se a elevada resistência e rigidez, o baixo peso específico, a excelente resistência à corrosão e as boas propriedades isolamento elétrico e magnético. Por se revelar extremamente interessante, especialmente em termos ecológicos, usar fibras naturais como reforço nestes materiais, têm-se vindo a intensificar os estudos e pesquisas científicas tendentes a avaliar as possibilidades delas poderem substituir com sucesso as fibras não biodegradáveis mais usadas tradicionalmente.

Os estudos têm demonstrado que a utilização de fibras naturais nos compósitos não só se torna promissora para a indústria por motivos económicos e ambientais, como contribui para a fixação do Homem no campo por se tornar necessário e rentável cultivar e comercializar as plantas donde elas são extraídas. Face à grande variedade de plantas utilizadas na extração das fibras também se torna possível concluir que dificilmente se atingirá o ponto de rotura no uso de recursos naturais. Para além de poderem ser recicladas, elas permitem diminuir as emissões de CO₂ (dióxido de carbono) que contribuem para o efeito de estufa e, conseqüentemente, para alterações climáticas indesejáveis que lhe são associadas. De facto, enquanto as fibras mais usadas atualmente (aramida, carbono e vidro) contribuem para o aumento de CO₂, o uso de fibras vegetais minimiza esse efeito em consequência do processo de fotossíntese das plantas [1].

Tendo em conta os benefícios anteriormente referidos, tem-se verificado um interesse crescente na utilização dos compósitos reforçados com fibras naturais em aplicações de grande consumo. Assim, epóxidos reforçados com fibras de pinho e de faia foram usados na construção civil tendo-se demonstrado que os baseados nas fibras de faia apresentavam melhor desempenho mecânico [2].

Compósitos de matriz termoplástica reforçada com diferentes teores de fibra de pinho foram também recentemente usados em diversos componentes e no fabrico de frisos decorativos para painéis das portas na indústria automóvel [3].

Na verdade, algumas destas fibras naturais já tinham sido utilizadas nestas duas áreas algumas décadas atrás. Na indústria automóvel, produziram-se estofos a partir de compósitos de borracha reforçados com fibras de coco. Como estas fibras tinham grande capacidade de absorção de água, tornavam possível absorver a humidade da transpiração humana, proporcionando um maior conforto aos motoristas. Hoje em dia, ainda se utilizam fibras vegetais nos estofos de veículos de luxo como é, por exemplo, os Mercedes Benz. Na construção civil também se têm vindo a utilizar compósitos reforçados com fibra de sisal em substituição de placas de madeira [4]. No Brasil, utilizou-se recentemente uma resina de poliéster isoftálica reforçada com fibras de coco no fabrico de pisos de construção civil que demonstraram possuir características mecânicas adequadas e de serem capazes de resistir à corrosão resultante do contacto com produtos químicos agressivos [5].

O linho e o sisal são duas das fibras que têm despertado grande interesse na indústria automóvel. A Bayer produz atualmente poliuretanos (PUR) reforçados com fibras naturais (BaySystems®, Baypreg® F) para aplicação na indústria automóvel que têm apresentado excelentes resultados práticos e boas propriedades mecânicas. À cada vez maior procura de componentes de baixo peso que conduzem à obtenção de automóveis mais leves e, conseqüentemente, a menores consumos de combustível e a reduções na emissão de gases para atmosfera, traz excelentes perspectivas à aplicação de compósitos de fibras naturais [6].

De facto, nos últimos anos, verificou-se um significativo aumento do uso de compósitos de fibras naturais pelos fabricantes e fornecedores europeus de peças para automóveis, nomeadamente, em painéis de portas, encostos de cabeça, estofos e diversas peças do interior. Eles tinham aliás já sido utilizados por Henry Ford, em 1930 e 1940, que empregou compósitos reforçados com fibras de soja no fabrico de painéis exteriores do automóvel. Porém, as dificuldades encontradas na transformação e o tempo de cura dificultaram a continuação da sua utilização.

A partir de 2006, o interesse pela aplicação destes materiais aumentou após aprovação pela União Europeia (EU) da nova legislação relativa ao fim de vida dos veículos. Segundo essa legislação 85% dos veículos fabricados deverá ser reutilizável ou recuperável até 2015, contribuindo assim para a sustentabilidade mundial. A Daimler/Chrysler, por exemplo, conta já com 50 componentes dos

seus veículos produzidos em materiais de origem natural. Outros fabricantes também aderiram já a estes objetivos, tais como, a Honda, BMW Group, General Motors, Ford, Goodyear, Toyota, etc. [7].

Trabalhos de investigação realizados demonstraram que compósitos em resina fenólica reforçada com fibras de sisal apresentavam um significativo aumento da resistência ao impacto relativamente à que aquela matriz termoendurecível exibia isoladamente [8]. Ensaio realizado em compósitos de matriz poliéster reforçada com fibras curtas de sisal para verificar a influência do comprimento, teor e orientação das fibras nas suas propriedades mecânicas também demonstraram que a sua resistência aumentava com o comprimento das fibras até se atingir um valor máximo limite (45 - 55 mm), decrescendo acima deste. Pelo contrário, o módulo de elasticidade e a deformação na rotura mostraram não depender do comprimento das fibras. Nos mesmos compósitos, resistência à tração aumentou com o teor de fibras até ao teor ponderal em fibras de 50%, decrescendo a partir desse valor. Finalmente, foi ainda possível verificar que a resistência à tração na direção de fibras orientadas era 10 vezes superior à da direção transversal a elas e, 3 vezes maior do que a resistência de compósitos reforçados por fibras dispostas aleatoriamente [9].

Estudos relativos à condutividade e difusidade térmica de compósitos em polipropileno reforçado com fibras de linho demonstraram que, quando aquelas fibras eram submetidas a um tratamento químico com zeína, se verificava uma diminuição da condutividade e difusidade térmica do compósito [10].

Ensaio em compósitos extrudidos de polipropileno reforçado com fibras de sisal, banana, juta e linho, mostraram que os reforçados com sisal apresentavam melhores propriedades de impacto e fibras mais longas após extrusão. A rigidez à flexão dos compósitos aumentava com o teor de fibras, apresentado os reforçados com linho valores mais elevados [11].

Também já se avaliou o efeito da idade da planta originária das fibras de sisal usadas como reforço no comportamento dos compósitos finais. Verificou-se que plantas mais novas conduziam à obtenção de compósitos com melhores propriedades em tração, nomeadamente, no que diz respeito à resistência e deformação à rotura. O efeito parece dever-se à oxidação da celulose nas fibras envelhecidas, que resulta na sua degradação. Esses estudos, no entanto, também demonstraram que os compósitos reforçados com as fibras mais velhas apresentavam superior adesão entre fibra e matriz por elas apresentarem uma menor absorção de humidade [12].

2.2. Matrizes Poliméricas

Um material compósito é caracterizado por ser constituído por dois ou mais materiais com propriedades distintas [13], combinados de forma a poder obter-se as propriedades finais desejadas [1]. Nesses materiais, um reforço fibroso é normalmente responsável pelas suas propriedades mecânicas e uma matriz por manter as fibras nas direções desejadas, garantir a transmissão e repartição dos esforços por elas, pela forma final das peças e sua proteção de agressões externas (absorção de água, abrasão, ataques químicos, impacto, etc.) [2], [14].

Para além destes dois constituintes principais, é possível recorrer a aditivos, como sejam, iniciadores, catalisadores ou aceleradores para garantir o processamento e as propriedades desejadas nas peças finais. O comportamento do produto final depende de todos os componentes usados, seu teor, da orientação e morfologia das fibras do reforço, interação entre materiais e do processo de fabrico utilizado [14].

Consoante a natureza da matriz utilizada, os compósitos podem ser classificados como: poliméricos, metálicos ou cerâmicos (ver Fig. 1).

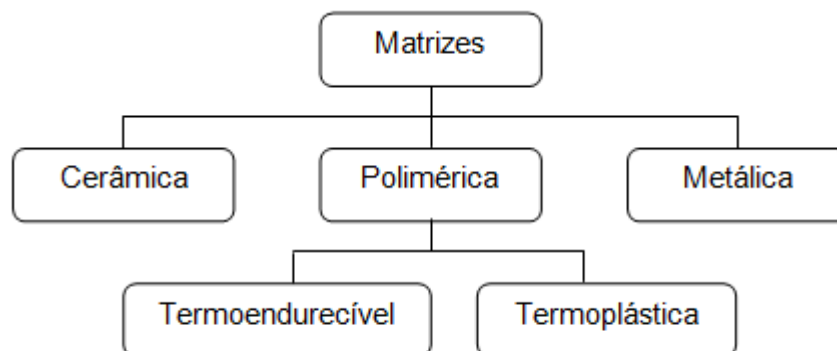


Figura 1 - Classificação dos materiais compósitos relativamente à matriz usada (adaptado de [2])

Os compósitos de matriz cerâmica (CMC's – Ceramic Matrix Composites) são especialmente indicados para aplicações que exijam temperaturas muito elevadas, sendo a cerâmica utilizada

como matriz e os reforços habitualmente constituídos por fibras curtas de carboneto de silício e nitreto de boro [15].

Os compósitos de matriz de metálica (MMC's – Metal Matrix Composites) são utilizados na indústria automóvel. Utilizam o metal (por exemplo, o alumínio) como matriz e reforços normalmente constituídos por fibras ou partículas de carboneto de silício [15].

Os compósitos de matriz polimérica (PMC's – Polymer Matrix Composites) são os mais utilizados por apresentarem um processamento mais fácil e menor custo que os restantes [2]. Estes, também conhecidos por FRP (Fibre Reinforced Polymers), utilizam um polímero como matriz e praticamente toda a variedade de reforços fibrosos atualmente disponíveis (naturais ou sintéticos) [15]. No presente trabalho apenas se utilizaram PMCs.

As resinas poliméricas possuem propriedades muito baixas quando comparadas com a maioria dos metais, o que impossibilita a sua utilização isoladamente em muitas aplicações estruturais de engenharia. Para isso, combinam-se muitas vezes com fibras de vidro, aramida e/ou carbono, capazes de lhes aumentar as propriedades mecânicas de forma muito significativa. A matriz de polímero envolve cada uma das fibras individuais, protegendo-a de danos ambientais e de impacto a que possam estar sujeitas. Obtêm-se assim, compostos com elevada resistência e rigidez, facilmente processáveis em geometrias complexas e capazes de apresentar uma resistência ambiental mais alta e menor densidade que a maioria dos materiais convencionais como, por exemplo, os metais. As propriedades obtidas num compósito de matriz polimérica resultam assim da combinação das propriedades da resina e da fibra de reforço, tal como se pode observar na figura 2 [15].

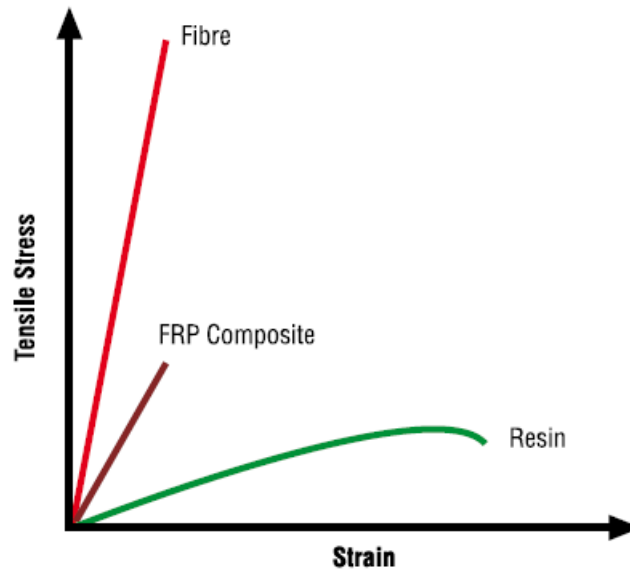


Figura 2 - Tensão obtida por um compósito de matriz polimérica reforçada com fibras [15]

De uma forma geral, as propriedades finais do compósito dependem de:

- Propriedades da fibra;
- Propriedades da resina;
- Fração de volume de fibra;
- Geometria e orientação da fibra [15].

As matrizes poliméricas usadas podem ser do tipo termoplástico ou termoendurecível. Estes dois tipos de polímero apresentam diferenças acentuadas ao nível do processamento e das suas propriedades finais [16].

Os termoplásticos podem ser fundidos e solidificados tantas vezes quanto o desejado, o que lhes atribui a característica de poderem ser facilmente recicláveis. Já os termoendurecíveis passam por uma reação química durante o processamento, designada por cura ou endurecimento, que os transformam num produto rígido e infusível. Após cura, o termoendurecível não pode voltar a ser fundido [15].

Os termoendurecíveis mais utilizadas na produção de compósitos são resinas de poliéster insaturado e de epóxido. Os epóxidos apresentam custo mais elevado e, normalmente, possuem melhores propriedades mecânicas e menor contração após cura que os poliésteres.

Neste projeto utiliza-se três tipos de resina termoendurecível, uma resina de epóxido, uma resina epóxido biodegradável e uma resina ortóftálica de poliéster insaturado, e ainda uma resina termoplástica biodegradável, um Polilactato ou Poliacido láctico (PLA).

Os materiais compósitos podem também ser classificados em termos de reforço utilizado conforme se mostra na Fig. 3 [13].

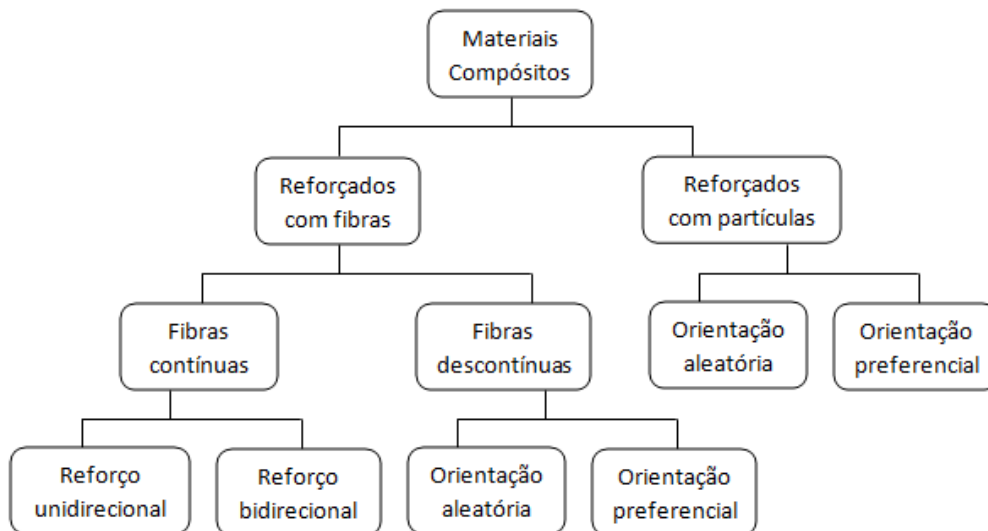


Figura 3 – Classificação dos materiais compósitos de acordo com o reforço utilizado (adaptado de [2])

Normalmente, as fibras promovem mais eficazmente o aumento da resistência mecânica e da rigidez do que as partículas, que se utilizam mais como carga, que embora permitindo reforçar ligeiramente o material diminuem, sobretudo, o custo final do compósito [2].

2.2.1. Resinas de Epóxido

As resinas de epóxido, em comparação com as outras resinas termoendurecíveis, são as que apresentam maior desempenho, pois possuem propriedades mecânicas e resistência à degradação ambiental superiores. Por esse motivo, aplicam-se sobretudo nas indústrias aeroespacial e aeronáutica [15]. Elas podem ainda ser utilizadas como adesivos, revestimentos, tintas e vernizes [2].

Caracterizam-se por apresentarem grupos epóxido, constituído por um átomo de oxigénio que se liga a dois átomos de carbono, na sua molécula. Eles formam habitualmente anéis, conhecido por 'alfa-epóxidos' ou 'epóxidos', tal como podemos observar na figura 4 [15].

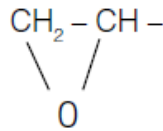


Figura 4 - Estrutura química de um grupo 'epóxido' simples (Ethylene Oxide) [15]

As resinas de epóxido são geradas a partir de uma longa cadeia molecular com grupos radicais ativos "epóxido" nas extremidades, que lhes conferem uma boa resistência à humidade. Os dois grupos aromáticos que se encontra no centro da estrutura molecular da resina de epóxido absorvem tensões mecânicas e térmicas, atribuindo-lhe boa rigidez, resistência e propriedades de resistência ao calor, tal como se pode observar na figura 5 [15].

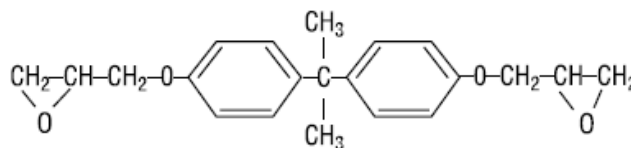


Figura 5 - Estrutura química dum 'epóxido', o Diglicidil - Éter do Bisfenol A [15]

Para que ocorra a reação de cura numa resina de epóxido é necessário adicionar-lhe um endurecedor. Após cura, as propriedades finais da resina dependem do endurecedor utilizado, do seu teor, da temperatura de cura e do tratamento de pós-cura [16]. O endurecedor, normalmente uma amina, quando adicionado à resina, gera uma reação de adição. Existem dois grupos ativos na cadeia molecular da resina de epóxido que se ligam aos grupos ativos da amina, formando uma estrutura molecular tridimensional complexa, como se pode observar na figura que se segue (figura 6): [15].

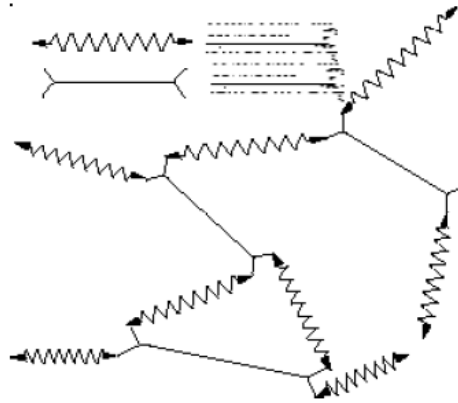


Figura 6 - Representação esquemática da resina de epóxi (estrutura curada 3D) [15]

O teor de endurecedor a utilizar na mistura deve corresponder ao definido pelo fornecedor, para assegurar uma reação completa, visto que as moléculas de amina reagem com as moléculas 'epóxi' numa proporção fixa. Para que ocorra uma mistura correta, os fornecedores calculam a proporção a utilizar a partir da formulação dos componentes [15].

É ainda possível controlar o tempo de gel da mistura durante o processo, através da alteração de temperatura, teor do endurecedor ou seleção de um tipo específico de endurecedor (endurecedor do tipo lento, médio ou rápido) [2].

Estas resinas apresentam, normalmente, excelentes propriedades mecânicas, bom isolamento elétrico e excelente estabilidade dimensional, resistência à corrosão, propriedades de adesão e ao contacto com a humidade, baixa contração após a cura e uma boa resistência à abrasão [16].

A sua baixa contração após a cura, no máximo cerca de 2%, permite limitar o nível tensões internas no compósito final o que também contribui para a sua boa estabilidade dimensional e resistência à fadiga [2].

A resina de epóxi possui tipicamente uma cor âmbar ou castanho [15].

2.2.2. Resinas de Poliéster Insaturado

As resinas de poliéster insaturado são muito utilizadas na indústria naval, nomeadamente para a produção de barcos de pequeno e grande porte [15].

Estas resinas resultam duma reação de condensação de di-ácidos carboxílicos com di-álcoois (glicóis), sendo pelo menos um deles insaturado. Habitualmente, utilizam-se ácidos saturados na reação para conferir propriedades específicas à resina obtida, classificam-se elas de acordo com os ácidos saturados utilizados na sua formulação do seguinte modo por ordem crescente de resistência à corrosão e custo final [17] [18]:

- Ortóftálica;
- Isoftálica;
- Tereftálica;
- Isoftálica com NGP;
- Bisfenólica.

No caso das resinas bisfenólicas, a designação resulta do facto de se utilizar, como álcool, o Bisfenol A. Da reação química acima referida resulta a grande variedade de poliésteres insaturados existentes no mercado produzidos a partir de diferentes ácidos, glicóis e monómeros. As resinas mais utilizadas são, de longe, as ortóftálicas e as isoftálicas. A resina de poliéster ortóftálica é a mais utilizada por ser mais económica. No entanto, as resinas isoftálicas são cada vez mais utilizadas por possuírem muito melhores propriedades de resistência à água e humidade [15].

A estrutura química típica de um poliéster encontra-se ilustrada na figura 7, em que é possível observar a posição dos grupos éster [CO-O-C] e os grupos reativos [C*=C*] dentro da cadeia molecular [15]:

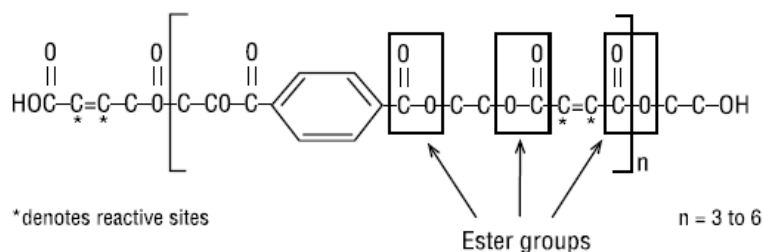


Figura 7 - Estrutura química de um poliéster isoftálico [15]

A grande maioria das resinas de poliéster insaturado apresentam-se sob forma de um líquido de baixa viscosidade e cor pálida. Consistem numa mistura do poliéster insaturado com um monómero, normalmente estireno, que pode ser utilizado em quantidades até de 50%, o que facilita o manuseamento e reduz a viscosidade da resina [15].

A adição de um iniciador (catalisador) às resinas de poliéster insaturado provoca a sua gelificação e, depois, a sua cura, que resulta da reticulação das cadeias moleculares. Normalmente, esta reação química é controlada através da mistura, em teores adequados, das seguintes substâncias:

- Iniciador;
- Acelerador;
- Inibidor
- Outros aditivos (tixotrópicos, pigmentos, cargas de enchimento, de resistência química e ao fogo) [2] [15].

Os iniciadores, normalmente peróxidos orgânicos adicionados em teores ponderais entre 1% e 2%, são responsáveis pelo início do processo de cura da resina[2].

Após mistura do iniciador com a resina o processo de cura pode ser controlada, retardado ou acelerado, através da adição de inibidores e/ou aceleradores à resina. Enquanto os aceleradores, promovem uma reação de cura mais rápida a uma dada temperatura constante os inibidores causam o contrário, isto é, retardam a cura. Os aceleradores são normalmente sais metálicos, por exemplo, sais de cobalto, e os inibidores derivados da hidroquinona e ambos são geralmente adicionados à resina em pequeno teores, que habitualmente variam entre os 0% e os 1.0% [2].

Após a adição dos diferentes componentes da formulação, eles devem ser bem misturados evitando a formação de bolhas de ar durante o processo que, introduzidas no molde, afetarão as propriedades finais da peça final. Uma mistura com as proporções corretas de iniciador, acelerador, inibidor e outros aditivos torna-se indispensável para um efetivo controlo da reação de cura e obtenção duma peça final com as propriedades desejadas. Excessos de catalisador ou acelerador resultam em tempos de gelificação demasiado rápidos, e teores demasiado baixos podem causar insuficiente cura da resina [15].

As resinas de poliéster insaturado podem apresentar as mais diversas cores (sendo mesmo usadas como tintas) desde que devidamente aditivadas com pigmentos adequados, normalmente usados em teores até cerca de 3% do peso da resina. A sua seleção deve ser cuidadosa por poderem

alterar a reação de polimerização, as propriedades finais ou mesmo degradar a resina. A adição de cargas também é usual para diminuir custos, facilitar o processamento ou mesmo melhorar algumas propriedades, por exemplo, a qualidade superficial no caso do carbonato de cálcio [15].

Num processo de cura da resina de poliéster insaturado é possível identificar os seguintes três fenômenos característicos:

- Tempo de gel, que corresponde ao tempo que decorre desde do início da adição de iniciador à resina até que ela adquira as características de gel. Após esta fase e devido ao aumento de viscosidade verificado, a resina já não pode ser utilizada para molhar e impregnar as fibras de reforço;
- Tempo de cura, tempo que decorre desde do início da adição de iniciador até que a resina adquira o seu estado sólido final, em que a viscosidade se pode considerar infinita e onde a resina atinge as suas propriedades mecânicas e rigidez desejadas. Em caso de processamento, a resina e/ou o compósito de que é matriz encontra-se, nesta fase, em condições de ser desmoldado;
- Pico exotérmico, que corresponde à temperatura mais alta que a resina atinge durante a sua polimerização [19]. Durante todo o processo de cura, que é exotérmico, a temperatura da resina está sempre a aumentar. De forma lenta durante o tempo de gel e de forma muito rápida (exponencial) após o tempo de gel até ao momento da cura, onde atinge o seu pico exotérmico.

Os poliésteres insaturados apresentam boas propriedades mecânicas, boa resistência química, excelentes propriedades de isolamento elétrico e boa resistência à absorção de água [16]. A sua maior desvantagem é a sua contração durante cura, com valor típicos de cerca de 6 a 8%, que conduz ao aparecimento de tensões internas e diminui a sua estabilidade dimensional das peças em compósito [2].

Na Tabela 1 comparam-se as principais propriedades das resinas de epóxido e poliéster [16].

Tabela 1 - Propriedades típicas da resina de epóxico e da resina de poliéster (adaptado de [16])

Propriedades	Resina Epóxico	Resina de Poliéster
Resistência à tração [MPa]	55 – 130	40 – 90
Módulo de elasticidade [GPa]	2.8 – 4.2	2.0 – 4.4
Resistência à flexão [MPa]	125	60 – 160
Resistência ao impacto (Izod com entalhe) [J/m]	5.3 – 53	10.6 – 21.2
Densidade [g/cm ³]	1.2 – 1.3	1.1 – 1.5

2.2.3. Poli (Ácido Lático)

Os polímeros tradicionais são materiais que derivam, em cerca de 80%, do petróleo que é um recurso não renovável. Alertados pelo aquecimento global e mudanças climáticas associadas, tanto governos como cientistas e, mesmo empresas, têm empenhadamente procurado alternativas a estes combustíveis fósseis não renováveis.

Uma resina biodegradável caracteriza-se por apresentar, no seu todo ou em parte, uma estrutura molecular biodegradável (de origem vegetal ou animal), ou seja, onde os elementos com base no petróleo se encontram substituídos por materiais biológicos [20].

O aparecimento de novos plásticos de base biológica, derivados de recursos renováveis, surgiu como boa opção para se conseguir reduzir a quantidade de resíduos que se encontram em aterros e que não se degradam ou apresentam o elevado tempo de degradação. Alguns exemplos disso são os denominados biopolímeros termoplásticos naturais como, por exemplo, o Poli (Ácido Lático) (PLA) com base no amido e produzido a partir do ácido e do açúcar fermentável e o Poli-hidroxicanoato (PHA) produzido a partir de óleos vegetais [21]. As propriedades mecânicas de um PLA podem ver-se na tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas do Poli-Ácido Lático (PLA) (adaptado de [22])

Propriedades	Valor
Resistência à tração [MPa]	72
Deformação na rotura [%]	10.7
Módulo de elasticidade [GPa]	2.11

O Poli-Ácido Lático, $[C_3H_6O_3]$, é um termoplástico obtido a partir da polimerização por condensação do ácido lático ou por fermentação a partir da cana-de-açúcar, do amido, da glicose ou da lactose. O seu custo de produção é equivalente ao custo de aquisição de polímeros comerciais. Este pode ser de baixo peso molecular, para aplicações na indústria farmacêutica e biomédica, ou de elevado peso molecular, para a produção de embalagens, filmes, entre outros.

2.3. Fibras de Reforço

As fibras de reforço naturais permitem substituir as fibras tradicionais, baseadas em materiais sintéticos ou minerais não renováveis, por materiais renováveis mais amigos do ambiente. Para além disso, elas habitualmente apresentam outras vantagens, tais como por exemplo, menor densidade e abrasividade para os equipamentos de processamento [2].

A tabela 3 apresenta as principais diferenças entre as fibras naturais e as tradicionais [23].

Tabela 3 – Principais diferenças entre as fibras naturais e as fibras sintéticas (adaptado de [23])

Característica	Fibras Naturais	Fibras Tradicionais
Densidade	Baixa	Alta
Custo	Baixo	Alto
Reciclagem	Alta	Baixa
Consumo de energia	Baixo	Alto

Característica	Fibras Naturais	Fibras Tradicionais
Abrasão em equipamentos	Baixo	Alto
Riscos aquando inalação	Nulo	Alto
Biodegradação	Alta	Nulo

Contudo, também são apontadas algumas desvantagens às fibras naturais, tais como, a fraca adesão às matrizes, a maior absorção de água e a menor resistência à temperatura. Para obviar algumas destas características indesejadas elas são, muitas vezes, submetidas a tratamentos superficiais [16].

Segundo alguns autores, as fibras naturais dividem-se em dois grandes grupos conforme a sua origem é animal ou vegetal (ver Fig. 8). As fibras vegetais aparecem, por sua vez, ainda divididas em cinco subgrupos de acordo com o local donde são extraídas nos vegetais [2].

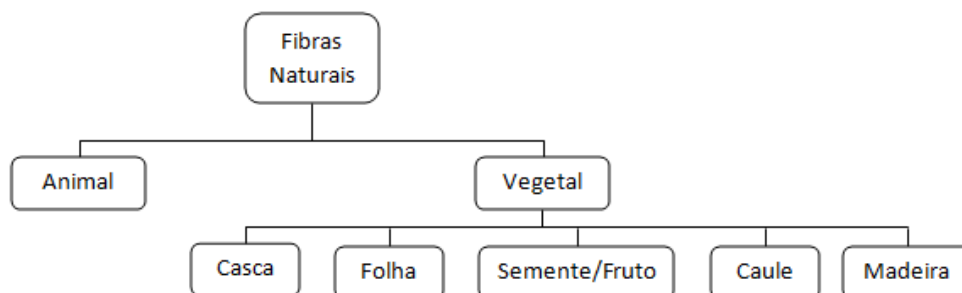


Figura 8 - Classificação das fibras naturais (adaptado de [2])

As fibras vegetais têm normalmente por base a celulose, a hemicelulose e a lignina, associadas com outros elementos que se encontram presentes em menor proporção [2]. As suas propriedades podem alterar-se com o tipo de solo, condições de cultivo, época da colheita, idade e história da planta que lhe deu origem e ainda com a técnica usada na sua extração, entre outras [1].

A celulose, que se encontra em maior quantidade, é responsável pelas propriedades mecânicas que as fibras vegetais possuem. Trata-se de um polissacarídeo, composto por carbono, oxigênio e

hidrogénio. A hemicelulose e a lignina também influenciam as suas propriedades. Quando estes dois constituintes estão simultaneamente presentes em pequenas quantidades, a tenacidade é normalmente reduzida, propriedade que depende da energia até à rotura, mas a resistência aumenta [23]. Na figura 9 pode-se observar o esquema da estrutura de uma fibra natural [24].

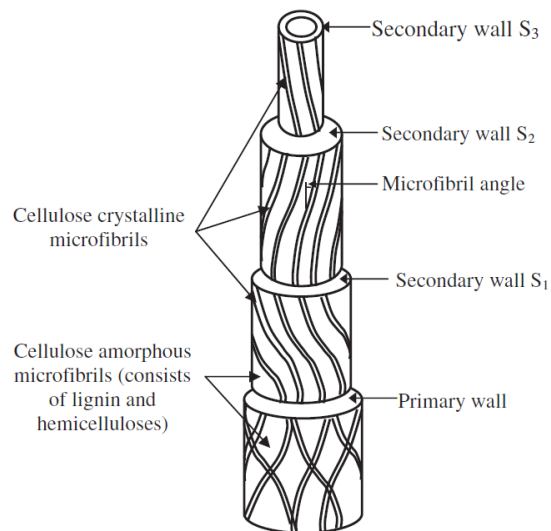


Figura 9 - Estrutura típica de uma fibra natural vegetal [24]

A parede da célula de uma fibra vegetal consiste em camadas com uma parede celular primária e uma secundária de microfibrilas de celulose. Na parede primária da célula ocorre o desenvolvimento da estrutura da fibra, ficando depositada durante o seu crescimento. A parede secundária da célula, que por sua vez encontra-se dividida em três – S₁, S₂ e S₃, possui uma cadeia de microfibrilas de celulose dispostas de forma helicoidal. A quantidade de celulose presente numa fibra aumenta de forma constante desde a parede primária da célula até à parede secundária, sendo a quantidade de hemicelulose semelhante em cada camada. Quanto à lignina, esta comporta-se de forma contrária à celulose, a sua quantidade diminui na sequência apresentada [24].

A forma como estes três constituintes, celulose, hemicelulose e lignina, se encontram organizados numa parede celular, está representado na figura 10 [24]

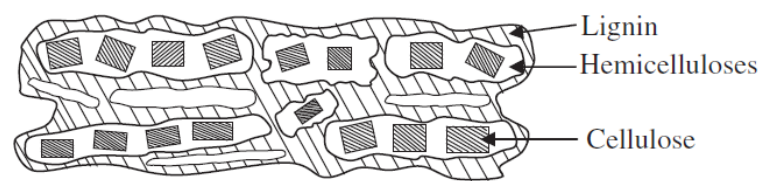


Figura 10 - Disposição da celulose, hemicelulose e lignina na parede da célula de uma fibra natural vegetal [24]

Embora as fibras naturais apresentem normalmente valores mais baixos de resistência que as fibras sintéticas, possuem módulos de elasticidade específicos e deformações à rotura tão semelhantes àquelas que podem, muitas vezes justificar a sua utilização [24], tal como se pode verificar na tabela 4:

Tabela 4 - Comparação das propriedades das fibras naturais e sintéticas (adaptado de [24])

Fibra	Densidade [g/cm ³]	Resistência à tração [MPa]	Módulo de Elasticidade [GPa]	Módulo de Elasticidade Específico [GPa/g/cm ³]	Deformação à Rotura [%]
Juta	1.3 – 1.4	393 – 773	13 – 26.5	10 – 18.3	1.2 – 1.5
Linho	1.5	345 – 1100	27.6	18.4	2.7 – 3.2
Sisal	1.5	468 – 640	9.4 – 22.0	6.4 – 15.2	3 – 7
Algodão	1.5 – 1.6	287 – 800	5.5 – 12.6	3.7 – 7.8	7.0 – 8.0
Vidro – E	2.5	2000 – 3500	70	28	2.5
Vidro – S	2.5	4570	86	34.4	2.8
Aramida	1.4	3000 - 3150	63 – 67	45 – 47.8	3.3 – 3.7

Para além das vantagens anteriormente apontadas, a procura das fibras vegetais tem aumentado devido ao seu baixo custo, por representarem uma nova fonte de rendimentos para a população rural cultivadora das plantas que as originam e, ainda, por reduzirem o consumo de energia e o peso dos componentes a que são aplicadas [17].

Como a figura 11 mostra, as fibras naturais apresentam bastante maior potencial de aplicação no fabrico de componentes para a indústria automóvel que os outros materiais tradicionais [25].

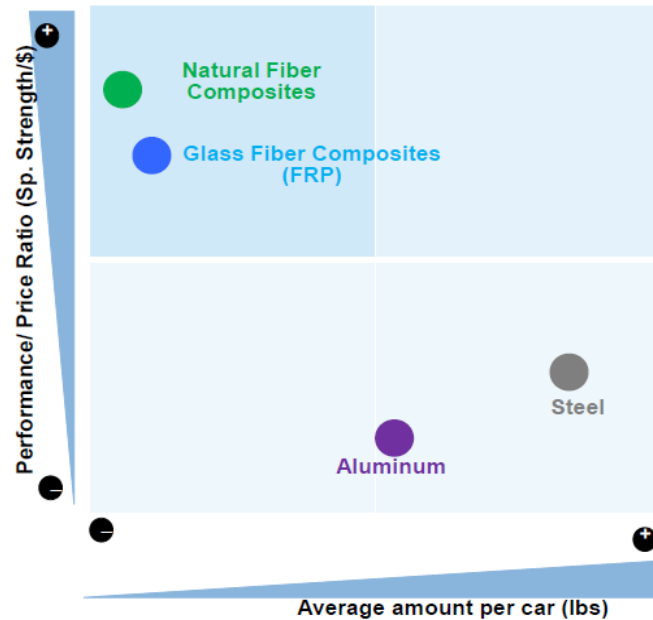


Figura 11 - Comparação de desempenho/preço de diversos materiais utilizados na indústria automóvel [25]

Sendo as fibras de linho e sisal bastante adequadas ao fabrico de componentes para a indústria automóvel e construção civil, foram selecionadas para serem estudadas neste trabalho.

2.3.1. Fibras de Sisal

As fibras de sisal (Fig. 12 (b)) são obtidas das folhas da planta *Agave Sisalana* (Fig. 12 (a)), originária de Yucatan, México [24]. Hoje em dia, esta produção efetua-se em regiões que possuam um clima predominantemente seco, como o Brasil, China, Quênia; Haiti; Madagáscar, México e Cuba, e tal como as de linho, são extraídas em feixes, constituídos por várias fibras elementares sobrepostas continuamente. Após extração, possuem comprimentos entre os 0,6 m e 1,2 m [15] e apresentam boas propriedades mecânicas [6].

O corte das folhas é realizado 36 meses após o cultivo da planta, sendo normalmente colhidas entre 50 a 70 folhas [26].



Figura 12 - O sisal (a) [27] e as suas fibras (b) [28]

O processo de extração destas fibras passa por quatro etapas distintas:

- Lavagem: após a colheita das folhas de sisal, estas passam por um processo de lavagem para que se retire a polpa existente;
 - Desfibramento: através de um equipamento mecânico, a “máquina de agave”, ocorre o desfibramento das folhas de sisal, em conjunto com um jato de água;
 - Secagem ao ar: as fibras já húmidas são colocadas sobre um suporte de madeira e expostas ao sol durante 1 dia;
 - Limpeza da fibra seca: através de bateadeiras retira-se as impurezas aderentes às fibras.
- Após esta etapa são colocas em fardos para posterior comercialização [29] (ver Fig. 13)

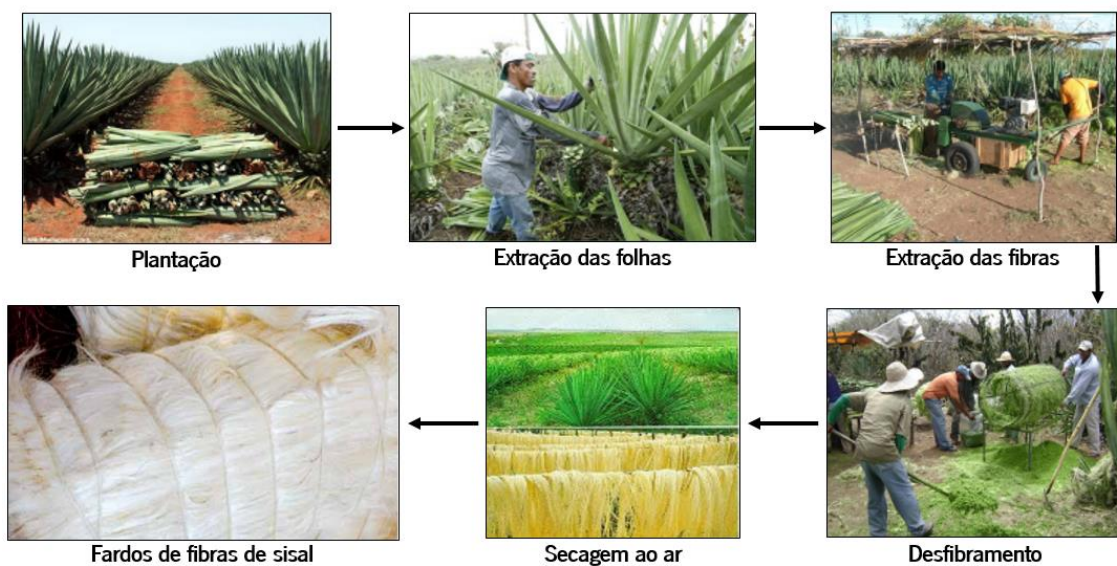


Figura 13 - Esquema de extração de fibras de sisal (adaptado de [30] [31])

Como se pode observar na tabela 5, as fibras de sisal apresentam uma grande variedade nas propriedades mecânicas e físicas como diferentes estudos têm demonstrado. Isto deve-se ao facto de as propriedades, como em todas as outras fibras vegetais, variarem com o tipo de condições de cultivo (solo, clima), e com as condições da planta proveniente (idade, métodos de extração de fibras).

Tabela 5 - Propriedades mecânicas da fibra de sisal (adaptado de [24])

Autores de referência	Propriedades Mecânicas			Propriedades Físicas	
	Módulo de Elasticidade [GPa]	Resistência à tração [MPa]	Deformação à rotura [%]	Densidade [g/cm ³]	Diâmetro [μm]
Guimarães (1987)	14.9	176	29.2	-	-
Chand et al (1988)	9.4 - 22	530 - 640	3 - 7	1.45	50 - 300
Tolêdo Filho (1979)	10.9 - 26.7	227.8 - 230	2.1 - 4.2	0.75 - 1.07	80 - 300
Beaudoin (1990)	13 - 26	1000 - 2000	3 - 5	-	-

2.3.2. Fibras de Linho

As fibras de linho (Fig. 14 b)) são extraídas em feixes do caule da planta *Linum Usitatissimum* (Fig. 14 a)), originária do Egipto. Atualmente o seu cultivo também se encontra na Europa, devido ao clima temperado que esta necessita para o seu desenvolvimento.



Figura 14 - O linho (a) e as suas fibras (b) (adaptado de [32])

Após extração, as fibras apresentam comprimentos entre 0,2 m e 1,4 m, boas propriedades mecânicas, nomeadamente, boa resistência à tração, rigidez, durabilidade, ao ataque por micro-organismos, baixa absorção de água e, ainda, razoável comportamento à abrasão.

O processo de extração das fibras de linho envolve duas etapas:

- Maceração: ocorre a separação das fibras da estrutura do caule da parte lenhosa, através da quebra do tecido. A maceração pode ser efetuada por água, orvalho ou modo químico. Na maceração por água, os feixes de fibras são imersos em água, até que ocorra fermentação por parte das bactérias e amolecimento do caule, destruindo assim os tecidos da estrutura celular. Na maceração por orvalho, os feixes são espalhados no terreno de cultivo e induzidos a fermentação, através da humidade do orvalho, chuva ou irrigação. Na maceração química, os tecidos da estrutura celular são embebidos em ácido acético até que ocorra amolecimento destes, sendo de seguida lavados em água, e por fim secos.
- Trituração e Espadelagem ("Breaking"): após secagem, são forçados a passar através de um rolo horizontal, que vão partir o lenho em tamanhos mais pequenos. De seguida, estas podem ser penteadas de forma a separá-las de fibras mais curtas e de impurezas [29] [33] (ver Fig. 15)



Figura 15 - Esquema de extração de fibras de linho (adaptado de [34])

O tratamento superficial com soluções alcalinas contribui para o aumento da sua resistência, embora exposições excessivas a esses ambientes possam enfraquece-las e degradá-las [15].

Tal como as fibras de sisal, estas também apresentam variações nas suas propriedades mecânicas e físicas, tal como a tabela 6 mostra.

Tabela 6 - Propriedades mecânicas da fibra de linho (adaptado de [35] [24] [36] [11])

Autores de referência	Propriedades Mecânicas			Propriedades Físicas
	Módulo de Elasticidade [GPa]	Resistência à tração [MPa]	Deformação à rotura [%]	Densidade [g/cm ³]
Wambua et al (2003)	60 – 80	800 – 1500	1.2 – 1.6	1.4
Kabir et al (2012)	27.6	345 – 1100	2.7 – 3.2	1.5
Mei-po Ho et al (2012)	27.6	345 – 1035	2.7 – 3.2	1.5
Oksman et al (2009)	28 – 100	345 – 1100	2.4	1.5

3. Procedimentos Experimentais

Neste capítulo 3, descrevem-se os procedimentos experimentais utilizados para caracterizar as fibras de reforço de sisal e linho, que são importantes para a determinação das suas propriedades físicas e mecânicas.

Refere-se ainda a caracterização mecânica realizada aos compósitos produzidos com diferentes matrizes e fibras de reforço.

3.1. Caracterização de Fibras de Reforço

O sisal e o linho, materiais selecionados como fibras de reforço no presente trabalho, foram fornecidas pelo ISEP. Desconhecendo-se as suas propriedades mecânicas e físicas, necessárias para prever as propriedades finais dos compósitos produzidos, tornou-se necessário efetuar a sua determinação.

Assim sendo, as duas fibras foram submetidas a ensaios de microscopia ótica, para a obtenção do tipo de geometria da secção transversal e respetiva área e, também, a ensaios para determinação da densidade, para conhecer as suas propriedades físicas. Como as fibras de sisal foram fornecidas na forma de manta (Fig. 16 a)) e as fibras de linho na forma de tecido (Fig. 16 b)), adotaram-se ensaios mecânicos diferentes em cada caso.



Figura 16 - Fibras de sisal na forma de manta (a) e fibras de linho na forma de tecido (b)

3.1.1. Microscopia Ótica

A determinação da área de secção transversal realizou-se no Laboratório de Microscopia do Departamento de Engenharia de Polímeros, Universidade do Minho, adotando-se o mesmo método de ensaio para as duas fibras que foram observadas sob microscopia ótica de reflexão DIC.

Utilizou-se no ensaio um microscópio *Olympus BH2-UMA* (Fig. 17) equipado com uma câmara digital integrada *Leica*, para captar as imagens da superfície da amostra. Sendo posteriormente inseridas no *software LAS v.4.0*, estas imagens permitem determinar a área da secção transversal das fibras.



Figura 17 - Microscópio Ótico *Olympus BH2-UMA*

Para observar a superfície transversal de um filamento da fibra vegetal torna-se necessário preparar adequadamente a amostra. Para tal, retiraram-se 10 fios da manta de sisal e do tecido de linho que se fixaram num suporte em cartão, tal como se pode observar na figura 18 a) e 18 b) respetivamente. Como o fio de linho é constituído por vários filamentos unidos por um fio imaginário, colocaram-se 10 filamentos (previamente desfiados do fio principal) no cartão de amostra a preparar, o fio imaginário que os une e um fio composto por todos esses elementos de

modo a que se pudessem contar o número de filamentos presente. Isto, devido ao facto do fio de linho ser retirado de um tecido equilibrado obtido por tecelagem.

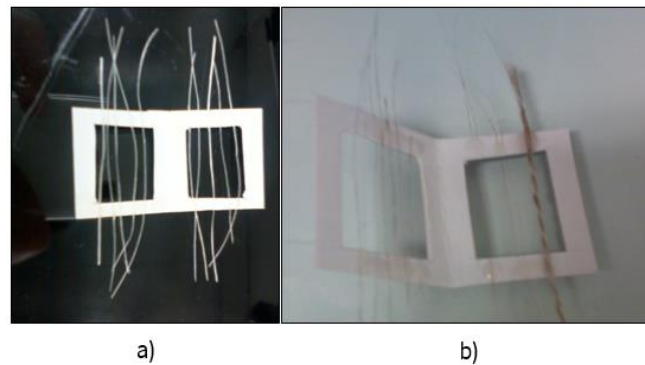


Figura 18 - Amostra em suporte de cartão com fios da manta de sisal (a) e fio e respetivos filamentos do tecido de linho

De seguida colocou-se as duas amostras num copo, ficando impregnadas em resina de epóxido (Kit de resina *EpoFix Struers*), tal como se pode observar nas figuras 19 a) e 19 b).

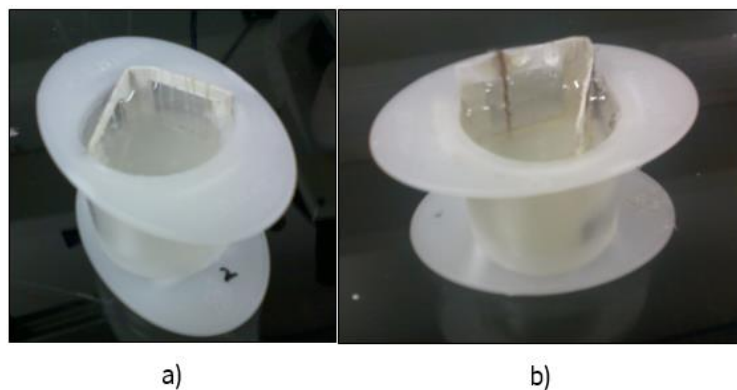


Figura 19 - Amostras de fio de sisal (a) e de linho (b) impregnadas em resina de epóxido

Após a cura da resina durante 6 a 8 h, desmoldou-se a amostra e cortou-se a sua superfície com o auxílio de um micrótomo até à zona onde se encontrava os fios. Seguidamente, poliu-se a superfície obtida de forma a eliminar todos os seus defeitos superficiais (riscos) e obtenção de imagens tão nítidas quanto possível. O polimento efetuou-se passando a amostra por lixas com 5 granulometrias diferentes: 320, 500, 1000, 2400 e 5000, numa polideira rotacional *DAP – Struers* mostrada na figura 20.

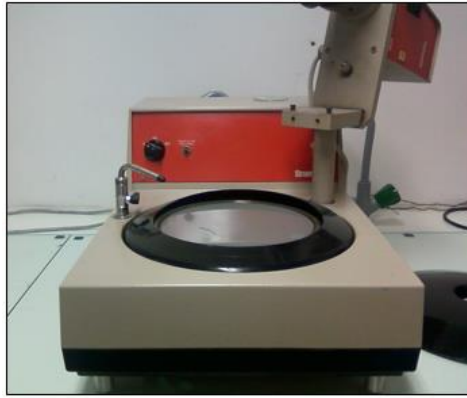


Figura 20 - Polideira *DAP - Struers*

Após o polimento, fixou-se a amostra numa lâmina de vidro para observação no microscópio ótico. Recolheram-se imagens da geometria de cada fibra com uma objetiva de ampliação 10x e 20x e, finalmente, determinaram-se as respetivas áreas de secção transversal.

➤ Fibras de Sisal

Observando as imagens recolhidas dos 10 fios de sisal, verificou-se que estes possuem duas geometrias distintas (ver Fig. 21), 6 fios apresentam uma geometria do tipo (a) e 4 fios apresentam uma geometria do tipo (b)

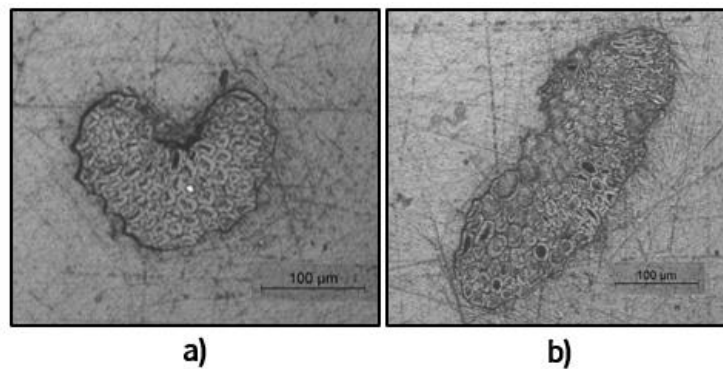


Figura 21 - Geometria observada por microscópio ótico de amostras de fios de sisal

Comparando as imagens obtidas com imagens existentes noutros estudos, verificou-se que possuem o mesmo tipo de geometria.

➤ Fibras de Linho

Observando as imagens obtidas pelos 3 tipos de fios utilizados na amostra (10 filamentos, 1 fio imaginário, 1 fio de linho) verificou-se que estes não possuem uma geometria definida, como se pode ver na figura 22:

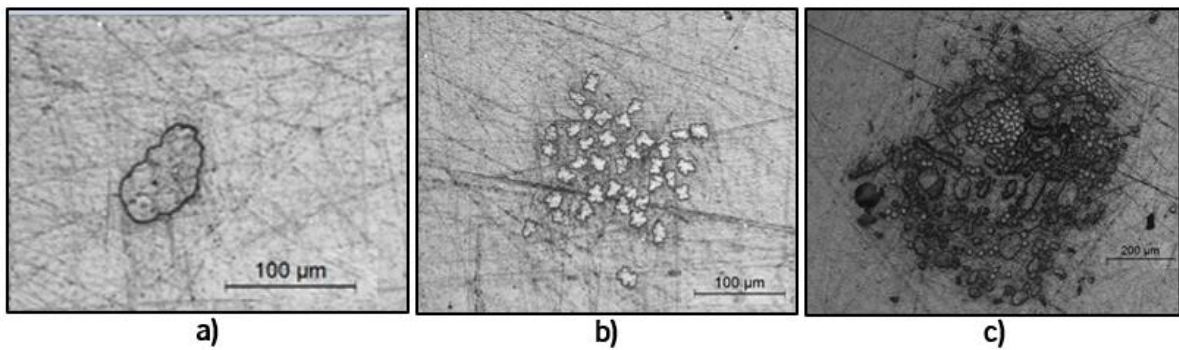


Figura 22 - Geometria observada por microscópio ótico de amostras de filamentos de linho (a), o fio imaginário que os une (b) e o fio de linho constituído por esses elementos (c)

Analisando de forma mais pormenorizada o fio de linho (Fig. 23) verificou-se que este possui espaços vazios entre os filamentos que o constituem, os quais não foram considerados na determinação da área de secção transversal.

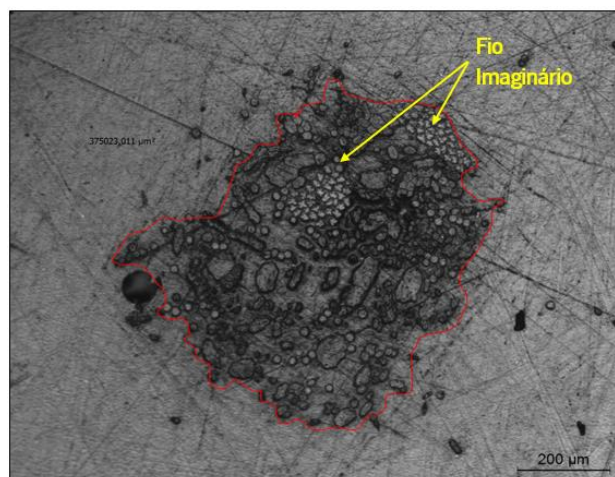


Figura 23 - Medição da área de secção transversal de um fio de linho constituído por um grande número de filamentos e fio imaginário que os une

As áreas de secção transversal correspondentes a cada fibra de sisal e de linho foram registadas e determinou-se a sua área média aritmética. Os resultados estão apresentados na discussão efetuada no capítulo 5 deste relatório.

3.1.2. Densidade

A densidade das fibras de sisal e linho pode ser determinada por cinco métodos distintos:

- Diâmetro e densidade linear;
- Método de Archimedes;
- Picnometria de hélio;
- Coluna de gradiente;
- Picnometria de líquido.

Dentro destes, os mais recomendados em termos de precisão são o método de Archimedes, através do uso de um líquido de imersão, e o método de picnometria de hélio. Sendo este último o mais fiável, por apresentar custos elevados foi preterido em relação ao método de Archimedes neste trabalho, por se ter considerado este último mais simples, rápido e de menor custo [37].

O método de Archimedes consiste na pesagem de uma amostra (feixe de fibras) seca, com um peso mínimo de 0.5g, numa balança analítica com aproximação de 0.0001g. De seguida, esta é colocada no interior de uma proveta graduada que contém um fluido de menor densidade, e mede-se a diferença de volume alguns minutos após a sua imersão, tal como se pode observar na figura 24:

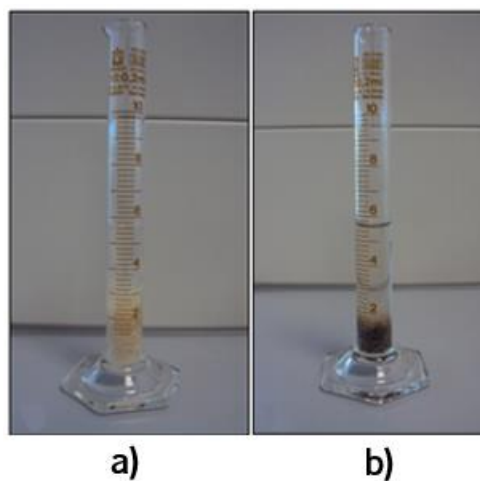


Figura 24 - Determinação da densidade das fibras de sisal (a) e das fibras de linho (b) através do método de Archimedes

A densidade da amostra é determinada pela seguinte expressão:

$$\rho_{amostra} = \frac{m_{amostra}}{\Delta V} \quad (1)$$

Onde,

$\rho_{amostra}$ corresponde à densidade da amostra de fibra [g/cm³];

$m_{amostra}$ massa da amostra de fibra seca [g];

ΔV diferença de volume registado alguns minutos após a imersão da amostra [cm³]

O equipamento usado dispõe de alguns líquidos de imersão possíveis para a obtenção dos resultados pretendidos: acetona, etanol, metanol, água destilada e óleo de canola. A acetona, o etanol e metanol têm como desvantagem a libertação de gases nocivos, em que para os manusear é necessário utilizar equipamentos de segurança. A água destilada e o etanol fornecem bons resultados, contudo não são os mais aconselhados devido à propriedade higroscópica presente nas fibras naturais. E por último, o óleo de canola fornece bons resultados, próximos aos teóricos [37].

Num primeiro ensaio utilizou-se como líquido de imersão o óleo de canola (*CANadian Oil Low Acid*), também conhecido por óleo de colza, contudo tendo-se verificado que o erro associado era muito elevado, optou-se pelo uso de água destilada.

Realizou-se a medição das massas e respetivas diferenças de volume em 10 amostras de cada fibra e, seguidamente, a sua densidade foi determinada pela média aritmética dos resultados obtidos que se encontram tabelados no capítulo 5.

3.1.3. Resistência à tração

O sisal e o linho, como se referiu no início do capítulo, foram fornecidos na forma de manta com os filamentos distribuídos aleatoriamente, e na forma de tecido equilibrado, com direções de +/- 45°, respetivamente. Face a esta distinção, teve-se de usar um método diferente para caracterizar mecanicamente as duas fibras.

Para caracterizar as fibras de sisal efetuaram-se ensaios monofilamentares num equipamento de ensaios de tração universal de acordo com a norma ASTM D 3379-89, enquanto que para as fibras

de linho se utilizou um método têxtil de caracterização mecânica de tecidos, segundo a norma ASTM D5446-08, para determinar as propriedades em tração nas duas direções do tecido de linho usado.

➤ Fibras de Sisal

A caracterização mecânica das fibras de sisal realizou-se num equipamento universal de ensaios mecânicos, da marca *Shimadzu* (ver Fig. 25), no Laboratório de Ensaios Mecânicos do PIEP, segundo a norma ASTM D 3379-89. O ensaio efetuou-se a uma velocidade de 0.1 mm/min usando uma célula de carga de 1 kN.



Figura 25 - Equipamento de ensaios de tração universal *Shimadzu*

De acordo com a norma utilizada, preparam-se 5 amostras com monofilamentos, num suporte de papel (Fig. 26) com três comprimentos diferentes, 20mm, 25mm e 30mm, que ficaram fixas nas extremidades com fita adesiva. A fita adesiva, para além de fixar a amostra ao suporte de teste, também evita o escorregamento causado pela pressão exercida das garras do equipamento.

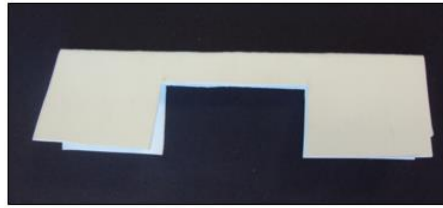


Figura 26 - Suporte de papel para ensaios de tração de amostras de monofilamento

De seguida, fixou-se o conjunto às garras e cortou-se o centro do suporte de papel, para que este não influencie os resultados obtidos (ver Fig. 27).

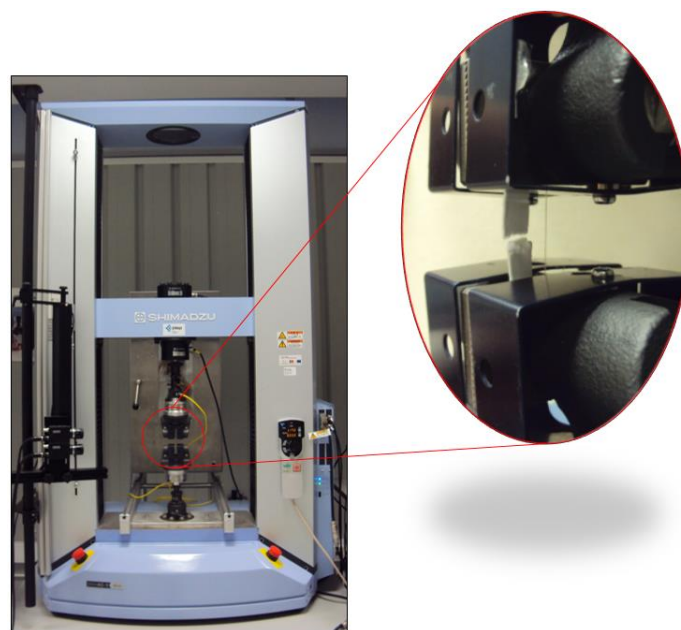


Figura 27 - Ensaio de tração aos filamentos das fibras de sisal

Para cada amostra, a tensão de rotura foi calculada pela seguinte expressão:

$$\sigma_{rotura} = \frac{F_{max}}{A} \quad (2)$$

Onde:

σ_{rotura} corresponde à tensão de rotura do material [MPa];

F_{max} força máxima obtida pelo material durante o ensaio mecânico [N];

A área de secção transversal da amostra determinada no ensaio de microscopia ótica [m²].

O módulo de elasticidade foi calculado em 3 passos. Utilizando os valores obtidos nos ensaios das amostras com diferentes comprimentos, traçou-se um gráfico Força – Deslocamento, determinando-se de seguida o declive para o domínio elástico correspondente a 20% e 40% da força máxima de cada ensaio.

O valor de C_a (Conformidade), que é dado pela expressão:

$$C_a = \frac{D}{F} \quad (3)$$

Onde:

D deslocamento sofrido pelo material no ensaio de tração [mm];

F força aplicada sobre o filamento no ensaio de tração [N];

Conhecido o valor de C_a para cada amostra, de comprimentos diferentes, esboça-se um gráfico $C_a - L$ (3 comprimentos distintos), e traça-se sobre os pontos registados no gráfico a linha de tendência, método de regressão linear. A interseção desta linha com o eixo dos yy vai definir o valor de C_s , que corresponde à deformabilidade do equipamento, o que permite obter a deformabilidade verdadeira da fibra através da seguinte expressão:

$$C = C_a - C_s \quad (4)$$

Para finalizar, depois de conhecidos estes dois parâmetros, é possível determinar o valor do módulo de elasticidade para as amostras de diferentes comprimentos, pela expressão:

$$E = \frac{L}{C \times A} \quad (5)$$

Em que:

E corresponde ao módulo de elasticidade para cada amostra [MPa];

L comprimento de cada amostra de fibra [mm];

A área média da secção transversal das fibras de sisal [mm²].

Analisando o erro associado aos cálculos das médias aritméticas para as amostras de diferentes comprimentos, verificou-se que as fibras com 20mm apresentavam menor erro. Assim sendo, realizou-se a caracterização mecânica para fibras de 20mm.

➤ Fibras de linho

De forma a determinar as propriedades mecânicas das fibras de linho, realizou-se a caracterização têxtil aos fios e ao tecido:

- Massa por unidade de superfície;
- Massa linear;
- Contração dos fios;
- Contextura do tecido;
- Ensaio de tração.

Estes efetuaram-se no Laboratório do Departamento de Engenharia Têxtil, Universidade do Minho:

Como o tecido de linho é bidirecional, direção dos fios a $+45^\circ$ e a -45° (ver Fig. 28), os ensaios aos fios e ao tecido foram realizados nestas duas direções.

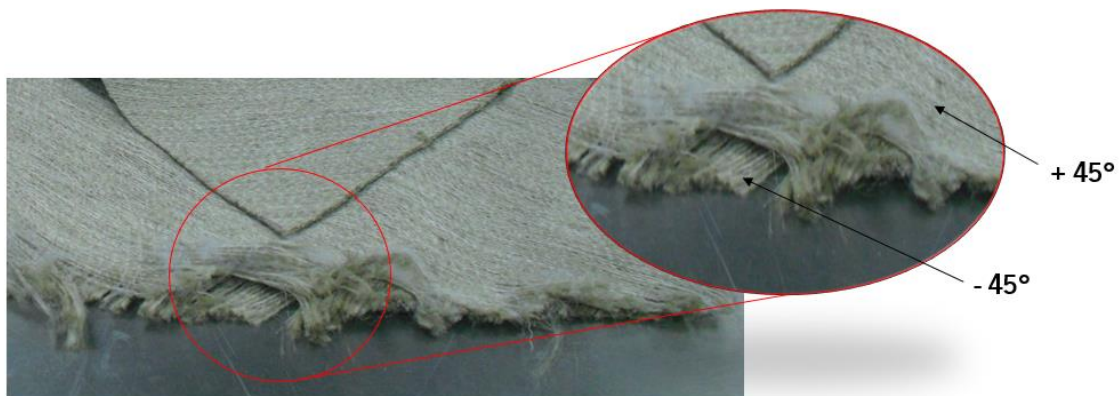


Figura 28 - Fibras de linho em forma de tecido com duas direções distintas: $+ 45^\circ$ e $- 45^\circ$

- Determinação da massa por unidade de superfície

De forma a conhecer a gramagem do tecido de fibra de reforço é necessário determinar a sua massa por unidade de superfície. Este método consiste na medição do peso de um provete de área padrão, que é dividida por essa mesma área.

De acordo com a norma NP EN 12127, preparam-se 5 provetes de forma circular, com uma área de 100 cm^2 , retirados de diferentes zonas do tecido, com o auxílio de uma ferramenta de corte normalizada que se pode observar na figura 29.

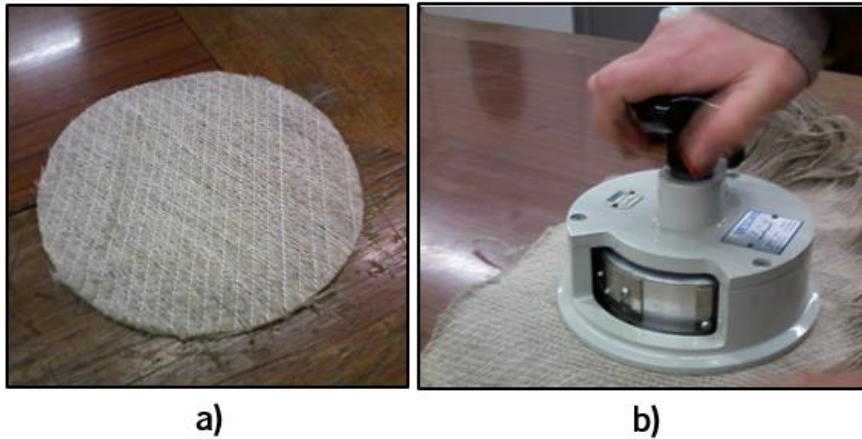


Figura 29 - Provete circular com uma área de 100 cm² utilizado na determinação de massa por unidade de superfície do tecido de linho (a) e respetivo equipamento de corte de provete (b)

De seguida, pesou-se cada provete por uma balança digital para conhecer a sua massa, e determinou-se a gramagem através da seguinte expressão:

$$G_f = \frac{m_p \times 10000}{A_p} \quad (6)$$

Onde,

G_f corresponde à gramagem do tecido de fibra de reforço [g/m²];

m_p massa do provete circular [g];

A_p área conhecida do provete circular, [100 cm²].

- Determinação da massa linear

O ensaio de determinação de massa linear permite conhecer o valor teórico da área da secção transversal do fio, necessário para determinar a tensão de rotura do tecido, através da medição do peso de um fio com 1 km de comprimento.

Segundo a norma NF G 07 – 101, recolheu-se 10 amostras de fios de cada direção do tecido, com um comprimento de 50 cm. Para uma primeira direção, por exemplo +45°, determinou-se a massa de um fio através de uma balança digital, e colocou-se no malhímetro (*Maillemètre*) (ver Fig. 30) de modo a medir o comprimento atingido pelo fio tensionado por um peso colocado na extremidade do equipamento.



Figura 30 - Equipamento Malhímetro (*Maillemètre*) para determinação da massa linear dos fios de tecido de linho

Para determinar a massa linear, recorreu-se à seguinte expressão:

$$M_{linear} = \frac{m_{fio}}{c_{ft}} \quad (7)$$

Onde,

M_{linear} corresponde à massa linear da amostra de fio de tecido, [Tex];

m_{fio} massa do fio, [g];

c_{ft} comprimento do fio quando sujeito a uma força de tensão, [Km].

Este valor é utilizado apenas para corrigir o peso a utilizar no malhímetro para todos os ensaios que se seguem, pela expressão:

$$0.2 \times M_{linear} + 4 \quad (8)$$

A partir do resultado obtido pela expressão anterior, consultou-se a tabela da norma utilizada e seleccionou-se o peso correspondente para colocar os fios sob tensão. Após esta correção, voltou-se a repetir o ensaio para as 10 amostras de fio na direcção em causa, com o peso correto no malhímetro, e fez-se a leitura ao comprimento atingido, determinando novamente a massa linear. Repete-se este procedimento para os fios na direcção oposta do tecido.

Conhecida a massa linear e a massa específica do tecido, determinou-se a secção transversal teórica dos fios, através da expressão:

$$m_{fio} = A_{fio} \times C_{ft} \times \rho_{tecido} \quad (9)$$

Em que:

- m_{fio} corresponde massa do fio [Kg];
- A_{fio} área da secção transversal do fio [m^2];
- ρ_{tecido} massa específica do tecido [kg/m^2].

Isolando o termo A_{fio} :

$$A_{fio} = \frac{m_{fio}}{C_{ft} \times \rho_{tecido}} \quad (10)$$

e como:

$$M_{linear} = \frac{m_{fio}}{C_{ft}} \quad (11)$$

obtem-se:

$$A_{fio} = \frac{M_{linear}}{\rho_{tecido}} \quad (12)$$

- Contração dos fios

Este parâmetro é determinado em percentagem através do valor do comprimento dos fios de amostra obtidos no ensaio de massa linear, pela expressão:

$$contração = \frac{C_{ft} - C_f}{C_{ft}} \times 100 \quad (13)$$

Onde,

- C_{ft} corresponde ao comprimento do fio sob tensão lido no malhímetro [cm];
- C_f comprimento inicial do fio, (50 cm).

- Contextura do tecido

A contextura de tecido, também conhecido como densidade de fios por unidade de superfície, consiste na contagem do número de fios presente em 1 cm^2 de área de tecido.

Para tal, utilizou-se um contador de fios (ver Fig. 31) que se colocou sobre o tecido, e através de observação pela lupa do equipamento procedeu-se à contagem dos fios nas duas direções. Realizou-se 5 contagens em zonas diferentes do tecido.

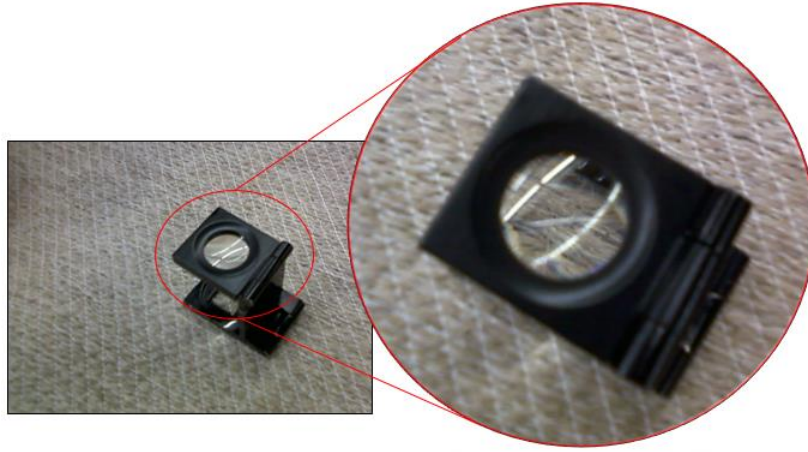


Figura 31 - Equipamento contador de fios

- Ensaio de Tração

De acordo com a norma NP EN ISO 13934-1, realizou-se a caracterização mecânica a provetes de tecido de dimensões 300×50 mm, num equipamento ensaios de tração universal da marca *Hounsfield* (ver Fig.32).



Figura 32 - Equipamento de ensaio de tração universal *Hounsfield*

Como o tecido de linho possui duas direções distintas, os provetes a testar foram cortados de forma a determinar a sua resistência mecânica quando este se encontra orientado a -45° , a $+45^\circ$, e a 90° , tal como podemos observar na figura 33, ou seja, cinco provetes para cada uma das direções possíveis.

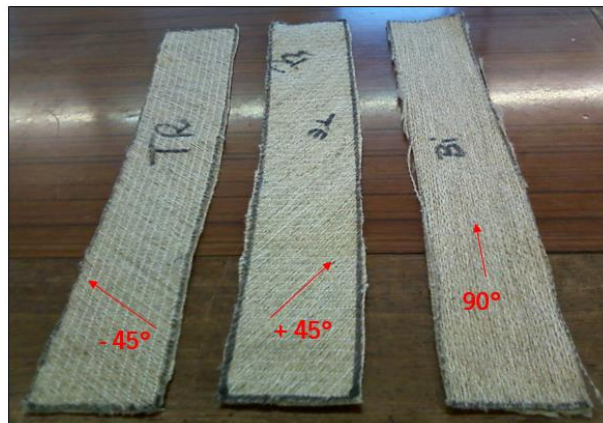


Figura 33 - Provetes de tecido de linho a testar nas direções: -45° , $+45^\circ$, e 90°

O ensaio realizou-se a uma velocidade constante de 100 mm/min, utilizando uma célula de carga de 2,5 N. Inicialmente, aplicou-se uma pré-tensão de 2 N, com distância entre amarras de 200 mm, tal como se pode observar na figura 34.

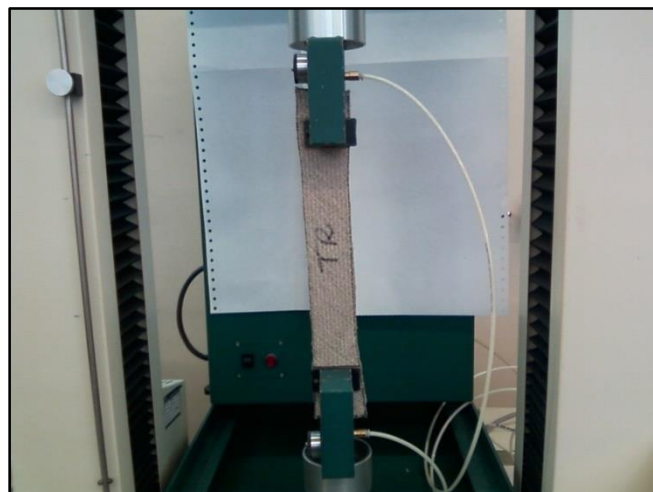


Figura 34 - Ensaio de tração a tira de tecido orientada a -45°

O equipamento fornece dados de força aplicada e respetivo alongamento para cada provete, bem como as suas médias aritméticas. Através destes valores, determinou-se a sua tensão de rotura, pela expressão:

$$\sigma_{rotura} = \frac{F}{A_{st}} \quad (14)$$

Em que:

σ_{rotura} corresponde à tensão de rotura do provete de tecido, [MPa];

F força registada durante o ensaio de tração, [N];

A_{st} área da secção transversal do provete, [mm²]

Como as fibras naturais não possuíam uma área de secção transversal uniforme e bem definida, determinou-se a sua tenacidade, para posterior comparação mecânica entre as diversas fibras de reforço em forma de tecido existentes no mercado. A tenacidade traduz-se na energia que um material consegue absorver até ao seu ponto de rotura, ou seja, quanto maior a tensão máxima e a sua capacidade de deformação, maior será a sua tenacidade. Este parâmetro pode ser calculado através da expressão:

$$tenacidade = \frac{F}{densidade\ linear\ do\ tecido} \quad (15)$$

Para finalizar a caracterização mecânica, determinou-se o módulo de elasticidade através do declive da curva tensão – deformação, pelo método de mínimos quadrados, aproximando todos os pontos do domínio elástico a uma reta de regressão linear.

3.2. Caracterização dos materiais compósitos

No presente trabalho produziram-se doze tipos de laminados que diferem no tipo de resina, no tipo de fibra de reforço, e no tipo de orientação das fibras, tal como podemos observar no seguinte esquema (Fig. 35):

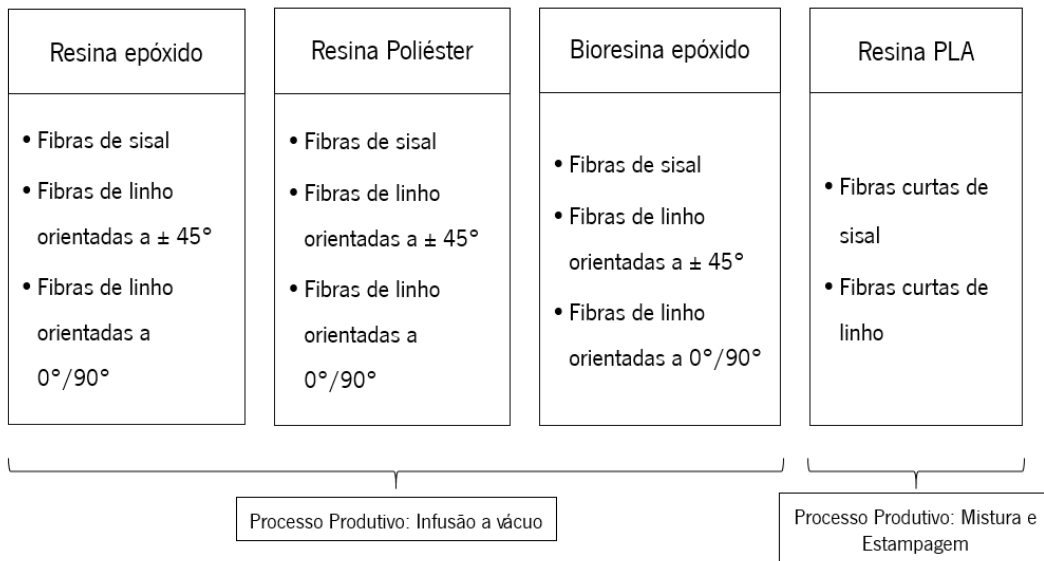


Figura 35 - Esquema de compósitos produzidos com matriz e fibra de reforço distintas, e respetivos processos de produtivos

➤ Compósitos produzidos por infusão a vácuo

Como já foi referido neste capítulo, as fibras de sisal foram fornecidas na forma de manta, ou seja, as fibras não possuem uma orientação preferencial, encontram-se distribuídas de forma aleatória. Por este motivo, apenas se produziu três tipos de compósito, que se diferenciam na matriz de resina. Utilizou-se apenas uma camada de fibra de reforço de sisal, devido à sua elevada espessura.

Já as fibras linho, fornecidas na forma de tecido equilibrado, estão orientadas a $\pm 45^\circ$. Assim sendo, produziu-se compósitos, de diferentes resinas, com duas orientações possíveis:

- Fibras de tecido de linho orientadas axialmente (0°) e a 90° com o comprimento (eixo axial) dos provetes;
- Fibras de tecido de linho orientadas a $\pm 45^\circ$ com o eixo axial dos provetes.

Nestes, utilizaram-se três camadas de tecido de fibras de reforço de linho, para que se obtivesse uma espessura considerável.

De acordo com as dimensões dos provetes referido nas normas de determinação de propriedades mecânicas, produziu-se placas de compósito de (300 x 300 mm), variando a espessura consoante a fibra de reforço utilizada, sendo cerca de 5 – 6 mm para fibras de sisal, e 3 – 3,5 mm para fibras de linho.

➤ Compósitos produzidos por mistura e estampagem

Na produção de compósitos de resina de PLA através da mistura e estampagem, as fibras de reforço a utilizar são do tipo curtas. As fibras de sisal e linho foram desfiadas, da manta e do tecido, respetivamente, e cortadas em dimensões de 25 mm. Desta forma, apenas foi necessário produzir um compósito para cada tipo de fibra de reforço.

O único molde disponível para a produção destes compósitos possui dimensões de (100 × 100 × 5 mm), o que resultou na utilização de provetes para ensaios de tração com comprimento máximo de 100 mm, inferior ao referido pela norma de determinação de propriedades mecânicas.

Após a produção das diversas placas de compósito, estas foram marcadas com as dimensões dos provetes de tração de (250 x 25 mm) (ver Fig. 36 a)), com exceção das placas de compósito de resina de PLA de (100 x 25 mm), e flexão de (100 x 15 mm) (ver Fig. 36 b)) imposto pelas normas. Quatro provetes foram usados em ensaios de tração e os outros quatro em ensaios de flexão, sendo para o efeito, posteriormente, cortados com uma serra de disco adiantado (ver Fig. 36 c)) do Laboratório de Materiais Compósitos, Instituto Superior de Engenharia do Porto.



Figura 36 - Provette de tração de (250 x 25 mm) (a), provete de flexão de (100 x 25 mm) (b), serra de disco adiantado para maquinação de provetes (c)

Os ensaios de tração e flexão foram realizados no Laboratório de Propriedades Mecânicas, Instituto Superior de Engenharia do Porto, de acordo com as normas ISO 527 – 4 e ISO 14125, respetivamente.

3.2.1. Propriedades em tração

O ensaio de tração tem como finalidade determinar a tensão de rotura e o módulo de elasticidade à tração. O ensaio realizou-se num equipamento de ensaios de tração universal *Shimadzu Autograph AG – X Series* (Fig. 37) com uma célula de carga de 100 KN, e uma velocidade de separação de garras de 2 mm/min.



Figura 37 - Equipamento de ensaio de tração universal *Shimadzu Autograph AG - X Series*

No ensaio, utilizou-se também um extensómetro com comprimento inicial de referência de 50mm para medir o deslocamento axial dos provetes até aos 0,3mm tal como se pode observar na figura 38. Os valores registados pelo extensómetro são importantes para determinar o módulo de elasticidade à tração, que é referido mais à frente.



Figura 38 - Extensómetro utilizado durante o ensaio de tração, para a medição de deslocamento até 0,3mm

Após o ensaio de tração, o equipamento fornece dados referente à força aplicada ao provete e respetivo deslocamento sofrido. Através destes, determinou-se a tensão e a deformação pelas expressões que se seguem:

$$\sigma_t = \frac{F}{A_{st}} \quad (16)$$

Onde:

σ_t corresponde à tensão de tração [MPa];

F força aplicada ao provete durante ensaio de tração [N];

A_{st} área de secção transversal do provete [mm²].

$$\varepsilon_t = \frac{D}{l} \quad (17)$$

Em que:

ε_t corresponde à deformação à tração [%];

D deslocamento registado pelo equipamento durante o ensaio [mm];

l distância ente garras ($l = 150$ mm) [mm].

Conhecidos estes dois parâmetros, traçou-se a curva tensão – deformação, tal como se pode observar na figura 39, uma curva típica obtida no ensaio de tração do provete nº 1 de um compósito de resina epóxido com fibras de sisal.

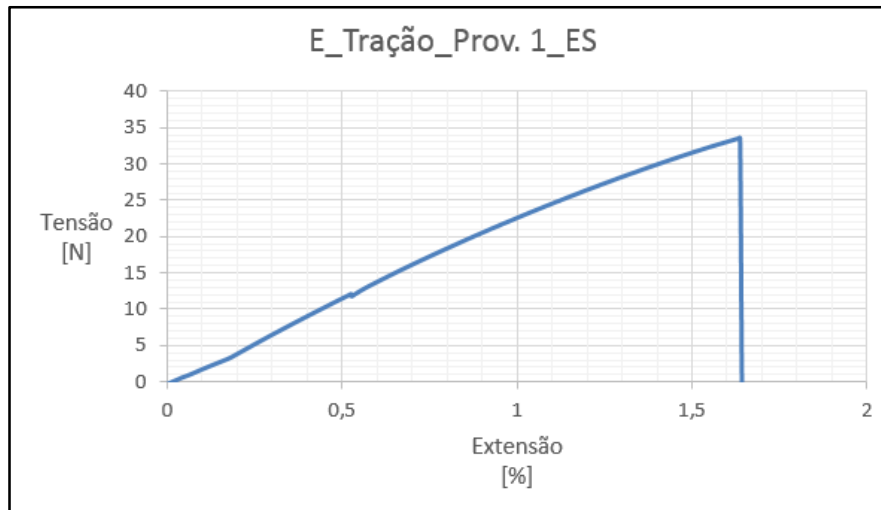


Figura 39 - Gráfico de curva típica tensão - deformação obtida no ensaio de tração do provete nº 1 de um compósito de resina epóxido com fibras de sisal

Analisando curva tensão-deformação, verifica-se que na parte inicial o provete possui um comportamento elástico, o que significa que obedece à Lei de *Hooke*, que se traduz pela seguinte expressão:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (18)$$

Sendo:

σ correspondente à tensão a que o provete está sujeito [MPa];

E módulo de elasticidade à tração [MPa];

ε deformação aplicada pela tensão [%].

Para determinar o módulo de elasticidade, traçou-se a curva tensão – deformação extensométrica, deformação registada pelo extensómetro de 0.01% até 0.1%, que corresponde à zona elástica onde todos os provetes ensaiados apresentam proporcionalidade entre a tensão e a deformação, utilizando um extensómetro com comprimento de referência de 50 mm (ver Fig. 40):

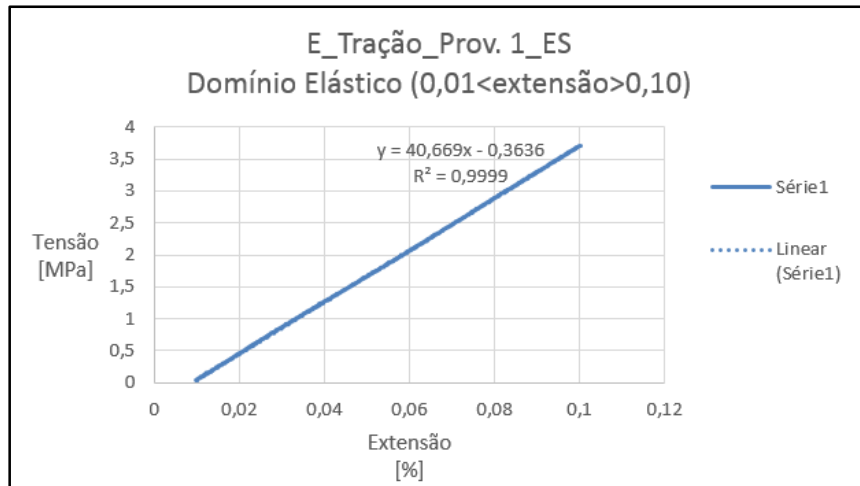


Figura 40 - Gráfico de curva tensão - deformação extensométrica do ensaio de tração do provete nº 1 de um compósito de resina epóxido com fibras de sisal

Aplicou-se, de seguida, o método dos mínimos quadrados, que aproxima todos os pontos experimentais, da zona definida, por uma reta de regressão linear, obtendo-se a equação da reta, descrita no gráfico.

3.2.2. Propriedades em flexão

O ensaio de flexão em 3 pontos realizou-se no equipamento de ensaios universal Shimadzu Autograph AG – X Series, tal como se pode observar na figura 41, e permite determinar a resistência à flexão e o seu módulo de elasticidade.

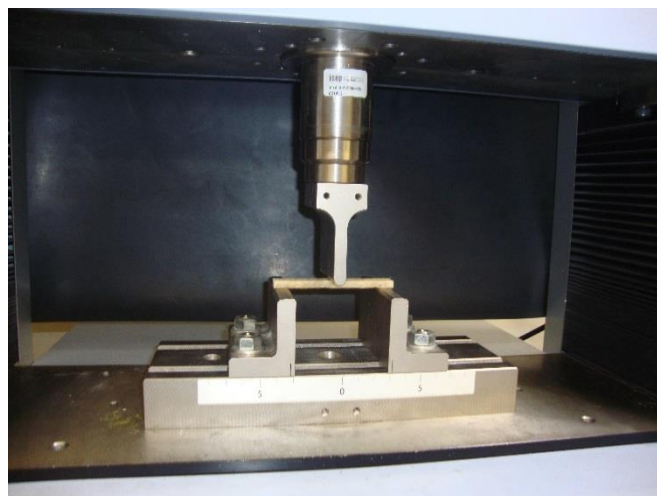


Figura 41 - Ensaio de flexão em 3 pontos no equipamento de ensaios universal Shimadzu Autograph AG - X Series

Para este ensaio utilizou-se uma célula de carga de 100 KN, com uma velocidade de deflexão de 2 mm/min. O punção, que corresponde ao ponto intermédio onde é aplicada a carga, possui um raio de 3.17 mm, para evitar a rotura por compressão nos provetes. Antes de iniciar o ensaio, é necessário definir a distância entre os suportes de apoio, que deve obedecer à seguinte expressão:

$$\frac{L}{h} = 16 \quad (19)$$

Em que:

L corresponde à distância dos suportes [mm];

h espessura do provete [mm].

Visto conhecer-se o parâmetro da espessura dos provetes a ensaiar, facilmente se determinou a distância entre os suportes, 80 mm.

Através dos valores fornecidos pelo equipamento, força e deslocamento, determinou-se a tensão de flexão pela expressão:

$$\sigma_f = \frac{3 F L}{2 b h^2} \quad (20)$$

Sendo que:

σ_f corresponde à tensão (resistência) de flexão [MPa];

F força aplicada ao provete [N];

L distância entre apoios (80 mm) [mm];

b largura do provete [mm];

h espessura do provete [mm].

E a deformação correspondente à tensão de flexão, determinou-se pela expressão:

$$\varepsilon_f = \frac{6 \cdot s \cdot h}{L^2} \quad (21)$$

Em que,

S corresponde ao deslocamento obtido pelo ensaio [mm].

De seguida, traçou-se a curva de flexão – deformação. Pode-se observar a curva típica obtida no ensaio do provete nº 1 de um compósito de resina epóxido com fibras de sisal (ver Fig. 42).

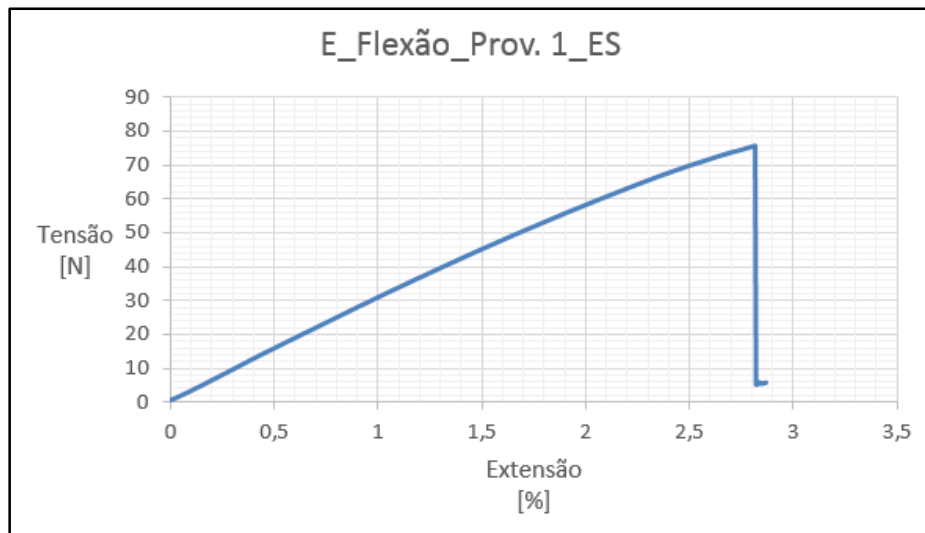


Figura 42 - Gráfico de curva típica flexão - deformação obtida no ensaio de flexão do provete nº 1 de um compósito de resina epóxido com fibras de sisal

Analisando esta curva, verifica-se mais uma vez, o comportamento elástico que este provete apresenta. Assim sendo, o módulo de elasticidade determinou-se da mesma forma que no ensaio de tração. Traçou-se um gráfico com a curva flexão – deformação da zona elástica entre 0,05% a 0,25% (ver Fig. 43), e aplicou-se o método dos mínimos quadrados.

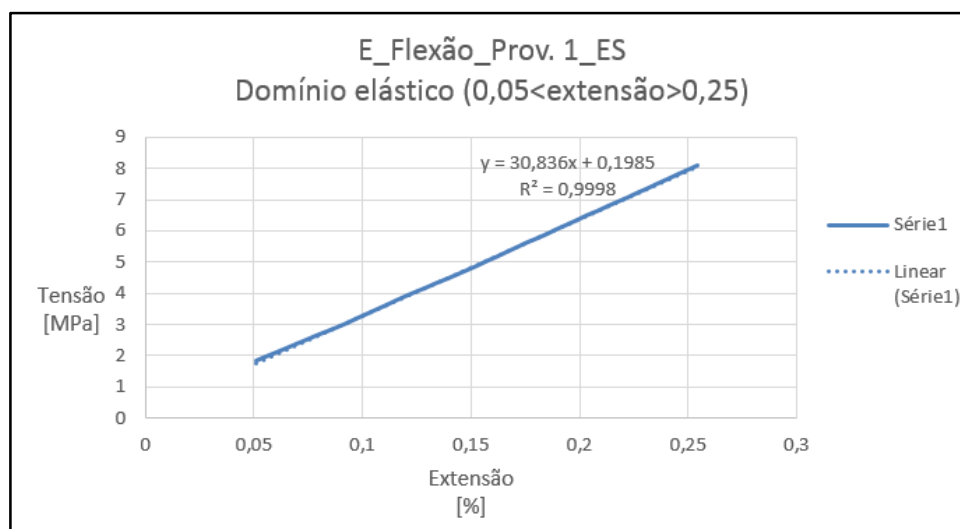


Figura 43 - Gráfico de curva flexão - deformação do ensaio de flexão do provete nº 1 de um compósito de resina epóxido com fibras de sisal

Traçou-se a reta de regressão linear, e obteve-se a equação descrita no gráfico. O módulo de elasticidade à flexão é 3083,6 MPa (30,836 x 100).

3.2.3. Previsão das propriedades nos compósitos

É possível prever as propriedades mecânicas dos compósitos através da aplicação da lei das misturas e considerando a inexistência de vazios no seu interior. A fração volúmica das fibras e a sua orientação influencia o comportamento mecânico de um material compósito.

Conhecendo a espessura do compósito produzido, através da medição de um paquímetro, e as propriedades individuais das fibras de reforço e da matriz polimérica, determina-se a fração mássica (w_f) que pode ser obtida através da resolução da equação seguinte em ordem a w_f :

$$t = G_f \times \left(\frac{1}{\rho_f} + \frac{1-w_f}{\rho_f w_f} \right) \times n \quad (22)$$

Onde:

- t corresponde à espessura do compósito produzido [m];
- G_f à gramagem do tecido [kg/m²];
- ρ_f à densidade das fibras de reforço [kg/m³];
- w_f à fração mássica de fibras [kg];
- ρ_f à densidade da matriz polimérica [kg/m³];
- n ao número de camadas do laminado.

Conhecidos os parâmetros anteriores, é possível determinar a fração volúmica de fibras (v_f) através de:

$$V_f = \frac{\frac{w_f}{\rho_f}}{\frac{w_f}{\rho_f} + \frac{1-w_f}{\rho_p}} \quad (23)$$

Sendo que:

- v_f corresponde à fração volúmica de fibras presente na matriz [%].

Através do valor de fração volúmica de fibras podem então prever-se as propriedades mecânicas teóricas: o módulo de elasticidade e a resistência mecânica.

O módulo de elasticidade de um compósito na direção das fibras (E_1) é dado segundo a lei das misturas, pela seguinte expressão:

$$E_1 = \eta E_f v_f + E_p (1 - v_f) \quad (24)$$

Em que:

- η é fator de arranjo das fibras:
 - $\eta = 1$ Fibras contínuas;
 - $\eta = 0,5$ Tecidos equilibrados;
 - $\eta = 0,375$ Manta de filamentos aleatórios;
- E_f corresponde ao módulo de elasticidade das fibras [GPa];
- E_p ao módulo de elasticidade da matriz [GPa].

Por sua vez, a resistência mecânica de um compósito (X_1) na direção das fibras é muitas vezes prevista pela expressão:

$$X_1 = \eta X_f v_f + X_p (1 - v_f) \quad (25)$$

Onde:

- X_f corresponde à resistência mecânica das fibras [MPa];
- X_p à resistência mecânica da matriz [MPa].

A expressão anterior apenas se torna válida se a deformação na rotura das fibras for inferior à da matriz e para frações volúmicas superiores a um valor crítico.

Pela lei da mistura é ainda possível determinar a massa volúmica de um compósito (ρ_c), através da expressão:

$$\rho_c = \rho_f v_f + \rho_p (1 - v_f) \quad (26)$$

Os resultados teóricos das propriedades mecânicas são apresentados no Capítulo 5.

4. Caracterização e Processamento de Materiais

Neste capítulo apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos nos ensaios de caracterização física e mecânica das fibras naturais de sisal e linho usadas no presente trabalho.

Apresentam-se também os processos, as matérias-primas e as condições usadas na produção dos compósitos reforçados com fibras naturais estudadas. Recorreu-se à infusão por vácuo e a um processo envolvendo a mistura e estampagem para produzir, respetivamente, os compósitos de matriz termoendurecível e de matriz termoplástica reforçada com fibras naturais.

Finalmente, são ainda apresentados e discutidos neste capítulo os resultados obtidos nos ensaios mecânicos a que foram submetidos os compósitos reforçados com fibras

4.1. Caracterização das Fibras Naturais

4.1.1. Fibras de Sisal

Filamentos individuais da manta de sisal foram observados sob microscopia ótica de acordo com o procedimento descrito no parágrafo 3.1.1 e caracterizados pelo método de Archimedes, de acordo com o procedimento referido em 3.1.2, para determinação da área média da sua secção transversal e da sua densidade.

Foram ainda sujeitos aos ensaios mecânicos descritos em 3.1.3 para determinação das suas propriedades em tração.

A tabela 7 resume os valores das principais propriedades obtidas para estas fibras. Os valores individuais efetivamente obtidos nos ensaios realizados podem ser observados de forma detalhada no Anexo I.

Tabela 7 - Propriedades obtidas na caracterização física e mecânica das fibras de sisal

Propriedades	Fibras de Sisal	
	Valor experimental	Bibliografia (ver Tabelas 4 e 5)
Densidade [g/cm ³]	1,22 ± 0,024	1,4 – 1,5
Massa por unidade de área [g/m ²]	1345	-
Área média da secção transversal dos fios [mm ²]	0,0285 ± 0,001	-
Tensão de rotura [MPa]	412,0 ± 123,3	468 – 640
Deformação à rotura [%]	2,62 ± 1,06	3 – 7
Módulo de Elasticidade [GPa]	4,73 ± 0,72	9,4 – 22,0

Analisando a tabela, pode-se concluir que:

- As fibras apresentam uma densidade média de 1,22, inferior aos valores normalmente referidos na bibliografia. Esta diferença pode dever-se ao elevado grau de higroscopicidade apresentado por estas fibras devido à sua elevada porosidade. Essa deve ser também a razão de alguns valores bastante díspares que também se podem ver na literatura consultada (ver valores de 0,75 – 1,07 apresentados na Tabela 5). Deve-se ainda referir que durante a determinação de densidade pelo método de Archimedes, teve-se especial cuidado em agitar a amostra imersa de modo a expulsar todas bolhas de ar contidas no sistema não sendo contudo possível garantir uma eliminação completa das bolhas de ar.
- No que diz respeito à geometria da secção transversal, verificou-se que as fibras de sisal apresentavam duas geometrias distintas. Verificou-se, no entanto, que o valor médio obtido para a área de secção transversal corresponde aos valores dos diâmetros destas fibras que vêm referidos na bibliografia (ver Tabela 5).

No que refere às propriedades mecânicas obtidas pode-se referir que:

- A resistência das fibras que se apresenta na tabela foi a determinada nos filamentos com comprimento de 20 mm e que esse valor se encontra dentro dos valores habitualmente referidos na bibliografia (ver Tabela 4). Durante o ensaio verificou-se existir um pequeno escorregamento da amostra em relação às amarras, devido às suas dimensões reduzidas dos filamentos.

- Obtiveram-se, no entanto, valores de módulo de elasticidade e deformação à rotura mais baixos do que os normalmente são referidos na bibliografia. Embora se encontrem valores bastante díspares na bibliografia (ver Tabelas 4 e 5), estas diferenças podem ter resultado do facto de se terem usado ensaios monofilamentares neste trabalho. De facto, tendo-se usada uma manta de sisal com distribuição aleatória de filamentos de fibra esta pareceu-nos a forma mais correta de tentar determinar as propriedades em tração das fibras.

Por último, parece-nos importante voltar ainda a recordar que as propriedades das fibras vegetais são bastante dependentes das espécies donde foram retiradas e dos tratamentos químicos/mecânicos a que foram sujeitas.

4.1.2. Fibras de Linho

As fibras de linho também foram observadas sob o microscópio ótico nas condições referidas no parágrafo 3.1.1 e sujeitas aos ensaios referidos nos parágrafos 3.1.2 e 3.1.3 para determinação da densidade e de outras características físicas, sendo os ensaios de caracterização mecânica realizados de acordo com a norma NP EN ISO 13934-1 em tiras de tecido orientadas a $+45^\circ$, -45° e 90° .

A tabela 8 apresenta as principais propriedades obtidas, podendo os valores individualmente obtidos em cada ensaio ser consultados no Anexo II.

Tabela 8 - Propriedades obtidas na caracterização física e mecânica das fibras de linho

Fibras de Linho				
Propriedades	Valor experimental			Bibliografia (ver Tabelas 4 e 6)
	Tira de tecido orientado +45°	Tira de tecido orientado -45°	Tira de tecido orientado 90°	
Densidade [g/cm ³]	1,52 ± 0,037			1,4 – 1,5
Área da secção transversal dos fios [mm ²]	0,375			-
Massa p/ unidade de área [g/m ²]	624 ± 10,5			-
	Tira de tecido orientado +45°	Tira de tecido orientado -45°		
Massa linear [Tex]	255 ± 30	263 ± 43		-
Contração [%]	8,4 ± 9,8	6,0 ± 4,1		-
Contextura [fios/cm ²]	7,2 ± 0,4	8 ± 0,7		-
Área <u>média</u> teórica da secção transversal dos fios [mm ²]	0,167 ± 0,02	0,173 ± 0,03		-
	Tira de tecido orientado +45°	Tira de tecido orientado -45°	Tira de tecido orientado 90°	
Tensão de Rotura [MPa]	24,98 ± 11,01	12,31 ± 0,65	49,46 ± 12,82	345 – 1100
Deformação à rotura [%]	26,8 ± 1,82	34,17 ± 1,8	4,86 ± 0,89	2,7 – 3,2
Módulo Elasticidade [GPa]	0,26 ± 0,12	0,078 ± 0,008	1,59 ± 0,55	27,6

Analisando as propriedades obtidas para o linho pode-se concluir que:

- As fibras apresentaram uma densidade 1,52 g/cm³, valor muito próximo dos referidos na bibliografia. Tal como acontecia para as fibras de sisal, as diferenças nos valores de densidade podem ser justificadas pela presença de humidade devido à elevada higroscopicidade das fibras vegetais.
- Após a análise da secção transversal das fibras observadas ao microscópico ótico, verificou-se que elas eram compostas por vários filamentos e uma linha de costura que

os une. Comparando o valor da área de secção transversal determinada ($0,375\text{mm}^2$) e os valores teóricos calculados a partir do ensaio de determinação de massa linear descrito em 3.1.3 para fios retirados do lado do tecido com orientação a $+45^\circ$ ($0,167\text{mm}^2$) e para os fios retirados do lado oposto a -45° ($0,173\text{mm}^2$), verifica-se que eles apresentam uma diferença significativa. A diferença parece resultar do facto de a contabilização efetuada sob microscópio ótico se considerar a área transversal total ignorando os espaços vazios existentes entre os filamentos.

Do ponto de vista da caracterização mecânica dos fios, pode-se também aferir que:

- Se obtiveram propriedades mecânicas relativamente próximas nas duas direções simétricas em que o tecido foi ensaiado ($+45^\circ$ e -45°). Verificou-se, no entanto, existir uma maior massa linear e um menor número de número de fios por unidade de área do lado do tecido orientado a $+45^\circ$.
- A contração dos fios foi superior para o lado do tecido orientado a $+45^\circ$.

E das propriedades mecânicas obtidas nos ensaios efetuados às tiras de tecido:

- Que quando sujeito a tração nas direções a $+45^\circ$, a -45° e a 90° , o tecido de linho apresenta características bastante inferiores aos valores descritos na bibliografia, com exceção da deformação à rotura. Isso é esperado se se tiver em conta que os valores de resistência referidos na literatura se baseiam em ensaios na direção das fibras. No entanto, mesmo considerando que a resistência mecânica deve variar com o quadrado do co-seno do ângulo de orientação das fibras ($\cos^2 \theta$) prever-se-ia a obtenção de valores mais elevados de resistência à tração ($172,5 - 550$ [MPa]). Os valores mais baixos obtidos podem dever-se ao facto de se ter verificado, durante o ensaio realizado às tiras de tecido, que os filamentos que compõem o tecido de linho que se encontram unidos pela linha de costura que condicionou a rotura de tecido ao longo da sua direção. Verificou-se, aliás, amostra de tira a ensaiar nunca quebrava totalmente, isto é, apenas se desfragmentava lentamente ao longo da linha de costura. Assim, os valores das propriedades mecânicas obtidas não devem fazer-se corresponder diretamente com as propriedades do linho, mas sim, com as propriedades resultantes do método usado no fabrico do tecido.
- Que sendo as amostras constituídas por tiras de tecido, há maior probabilidade de defeitos do tecido influenciarem as propriedades mecânicas obtidas.

- Que não sendo possível utilizar um extensômetro nestes ensaios, o deslocamento medido corresponde ao do travessão móvel da máquina de ensaios.
- Que o maior módulo de elasticidade e resistência obtidos para as tiras orientadas a 90° parecem prender-se com os aspetos acima referidos e relacionados com a existência das linhas de costura usadas para unir os fios de linho.

4.2. Infusão por Vácuo

Na infusão por vácuo (*Vacuum Infusion*) faz-se infiltrar uma resina de baixa viscosidade no interior de uma pré-forma de fibra seca colocada num molde rígido envolvido por uma membrana flexível, habitualmente designada por saco de vácuo. Através de um gradiente de pressões gerado por uma bomba de vácuo, a resina é conduzida para o interior do molde, impregnando a pré-forma de vidro como se mostra na figura 44 [38].

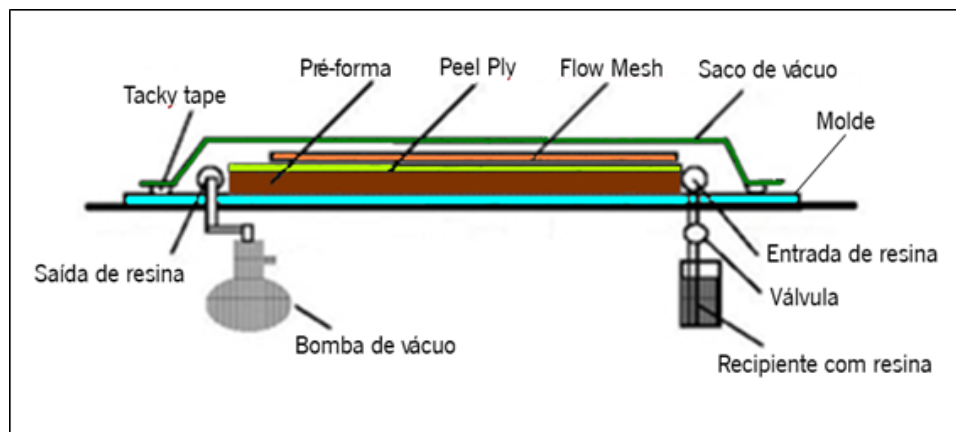


Figura 44 - Representação esquemática do processo de infusão a vácuo (adaptado de [39])

Este processo é sensível a fugas de ar, e só garante um bom acabamento superficial num dos lados da peça [38].

4.2.1. Preparação do processo

- Definição de dimensões

Antes de iniciar o processo de infusão a vácuo definiram-se as dimensões das placas de compósito reforçado com fibras vegetais a produzir de modo a que fosse possível extrair delas os provetes necessários aos ensaios de tração e flexão. Analisando as normas a utilizar nos ensaios, verificou-se que os provetes deviam possuir as dimensões de 250×25 mm e de 100×15 mm, com espessura variável entre os 2mm e os 10mm, respetivamente, para os ensaios de tração e flexão. Tendo em atenção estas dimensões e considerando uma folga entre os provetes de cerca de 0,5mm, decidiu-se processar placas quadradas em compósito com dimensões de 300×300 mm. Definiu-se ainda que as placas de compósito reforçado com fibras de sisal apenas possuiriam 1 camada de laminado (ver Fig. 45 a)), devido à elevada espessura da manta sisal disponível para utilização, e que se utilizaria um laminado constituído por 3 camadas com a sequência de orientação: $+45^\circ / -45^\circ / +45^\circ$ nas placas de compósito reforçado com fibras de linho (ver Fig. 45 b)).



Figura 45 - Fibras de reforço com dimensões (300 x 300 mm) para 1 laminado de fibras de sisal (a) e para 3 laminados de fibra de linho (b)

Conhecidas as dimensões da peça, é possível definir a dimensão de todos os materiais necessários ao processo de infusão a vácuo.

- Preparação do processo de infusão de vácuo

A produção das placas por infusão foi efetuada sobre placas de vidro, o que permitia a visualização do escoamento de resina durante o processo. O molde, que deve ser suficientemente resistente para suportar a depressão a aplicar, foi efetuado com dimensões superiores às permitidas de modo a permitir a fixação do saco de vácuo. Após delimitação com fita adesiva de papel de uma superfície a utilizar com mais 200 mm do que as dimensões pretendidas em cada extremidade, colocou-se uma camada de desmoldante, de forma a facilitar a extração final da peça do molde. Após secagem durante alguns minutos, substituiu-se a fita de papel por uma fita adesiva de vedação (“tacky tape”) como mostra a figura 46.

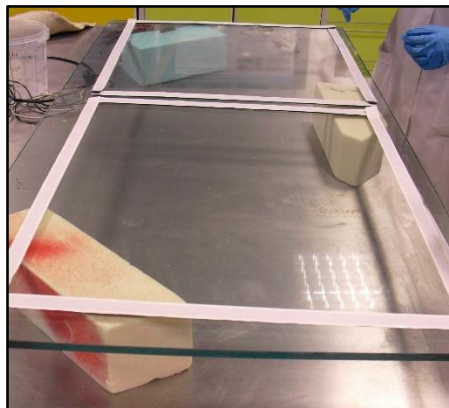


Figura 46 - Molde em vidro, delimitado com “tacky tape” numa superfície com mais 200 mm do que o pretendido em cada extremidade

Seguidamente, colocou-se e posicionou-se uma pré-forma do reforço de fibras secas no molde com as dimensões definidas (300 × 300 mm) (ver Fig. 47 a)) e, sobre esta, aplicou-se o “peel ply” (ver Fig. 47 b)), que é uma camada de um tecido fino e poroso que tem por função retirar eventuais excessos de resina gerados na produção. O “peel ply” deve exceder em aproximadamente 50 mm as dimensões da pré-forma de fibras de reforço.

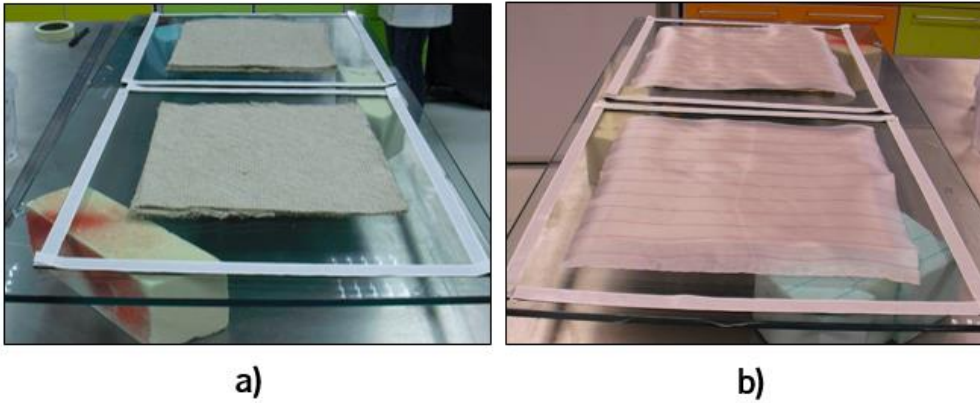


Figura 47 - Posicionamento das fibras de reforço com dimensões (300mm x 300mm) (a) e, sob estas o “peel ply” com dimensões (350mm x 350mm) (b)

Sob o “peel ply” coloca-se ainda o “flow mesh”, que é uma rede em termoplástico que apresenta uma elevada permeabilidade destinada a permitir o aumento da velocidade do fluxo de resina através da superfície e melhorar a sua distribuição por toda a pré-forma. Ele deve cobrir até cerca de 80% da dimensão peça, para garantir que a resina preencha todos os espaços vazios existentes no interior da pré-forma e, nas extremidades da peça, deve-se garantir a existência de uma pequena tira neste material que permite assegurar que o fluxo de resina atinja o final da placa a produzir, como se pode observar na figura 48.

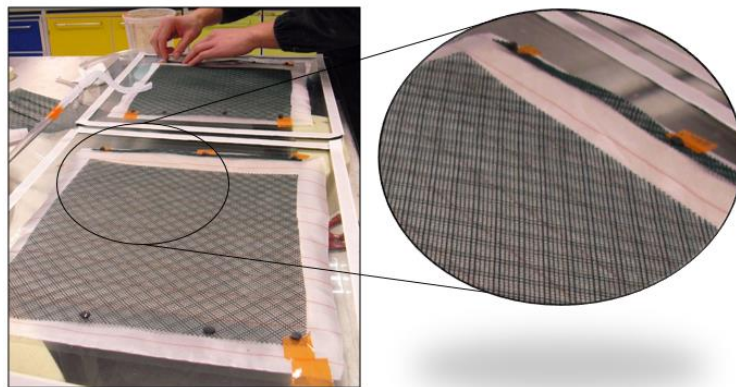


Figura 48 - Colocação de “flow mesh” em 80% da superfície da peça a fabricar

O “flow mesh” foi fixo ao vidro com uma fita adesiva de modo a não se deslocar durante a aplicação de vácuo.

Por fim, coloca-se a membrana flexível com dimensões excedendo em cerca de 300mm as da pré-forma, normalmente designada por saco de vácuo, que foi devidamente vedada com a fita adesiva de vedação “tacky tape” (ver Fig. 49 b)), tendo o cuidado de posicionar duas mangueiras termoplásticas em espiral entre o molde e o saco de vácuo (ver Fig 49 a)). Estas mangueiras em espiral, habitualmente designadas por tubos de distribuição, são constituídas por uma espiral aberta (perfurada) de modo a permitir conduzir e abastecer, simultaneamente, a pré-forma de reforço com a resina líquida. Estes tubos de distribuição são, por sua vez, ligados aos dois tubos de alimentação de resina, um ligado ao recipiente contendo a resina líquida e o outro à bomba de vácuo.

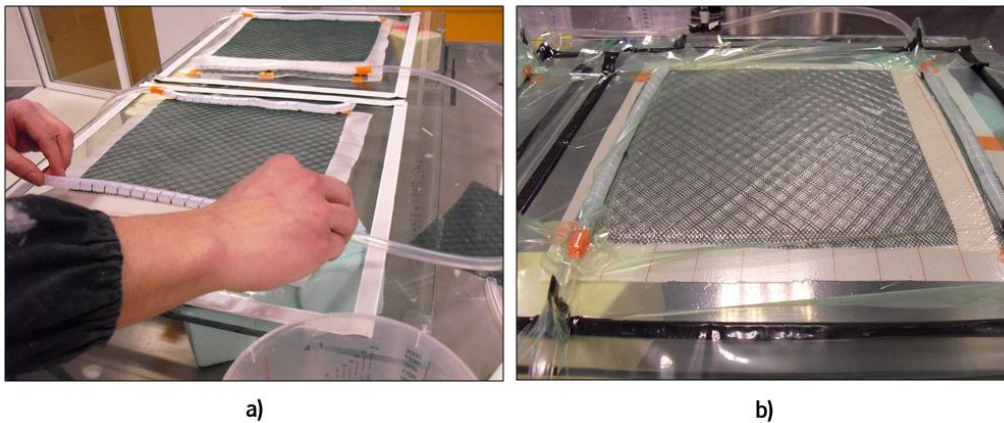


Figura 49 - Posicionamento de tubos de distribuição e alimentação da resina (a) e colocação de saco de vácuo vedado com “tacky tape” (b)

De forma a verificar a inexistência de fugas de ar no sistema de infusão a vácuo, os tubos de alimentação de resina são fechados com grampos e aplica-se a depressão por vácuo. A pré-forma compacta-se devido à depressão gerada no seu interior, sendo qualquer fuga facilmente detetada através de utilização dum pressostato capaz de medir pequenas diferenças de pressão. Caso se verifique alguma fuga, o “tacky tape” aplicado deve ser verificado de modo a que se consiga garantir a vedação total do sistema a ser verificada numa nova avaliação. Assim que se confirme a total inexistência de fugas no sistema, o processamento das placas através da infusão da resina por vácuo encontra-se pronto a ser iniciado.

Como as mantas de fibra de sisal usadas no trabalho possuíam uma espessura elevada, o saco usado na produção das placas em compósito reforçado com elas foi preparado de forma ligeiramente diferente. Respeitando as dimensões da pré-forma de reforço, as fibras de sisal foram

envolvidas no “peel ply” e o saco de vácuo aplicado logo de seguida, como se mostra na figura 50. O sistema sofreu ainda uma adaptação nos tubos de distribuição de resina, que foram feitos com “flow mesh” e “lacrosse mesh” (ver Fig. 51).



Figura 50 - Laminado de fibras de sisal envolvidas por “peel ply”, seguido de saco de vácuo

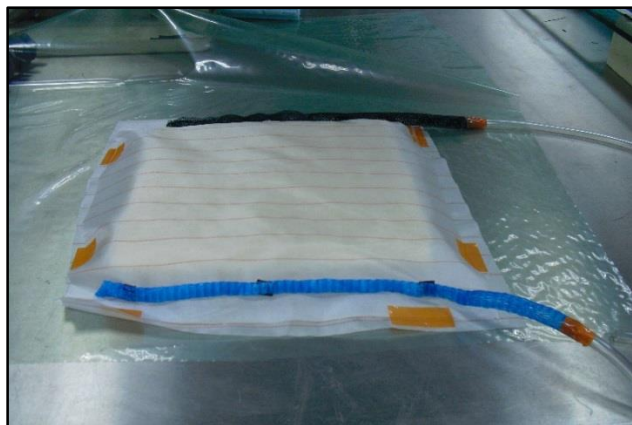


Figura 51 - Adaptação de tubos de distribuição de resina no sistema de infusão

Usou-se ainda um permeabilímetro (ver Fig. 52 a)) desenvolvido no PIEP para um melhor controlo da quantidade de resina a utilizar e garantir a obtenção de uma placa em compósito com espessura dentro dos valores pretendidos. O equipamento permite introduzir com auxílio da bomba de vácuo a resina entre duas placas, uma superior de acrílico e outra inferior em aço, e possui um medidor de deslocamento das placas (ver Fig. 52 b)). Medindo a espessura obtida é possível prever com alguma rigor a espessura a obter no compósito com uma dada quantidade de resina.

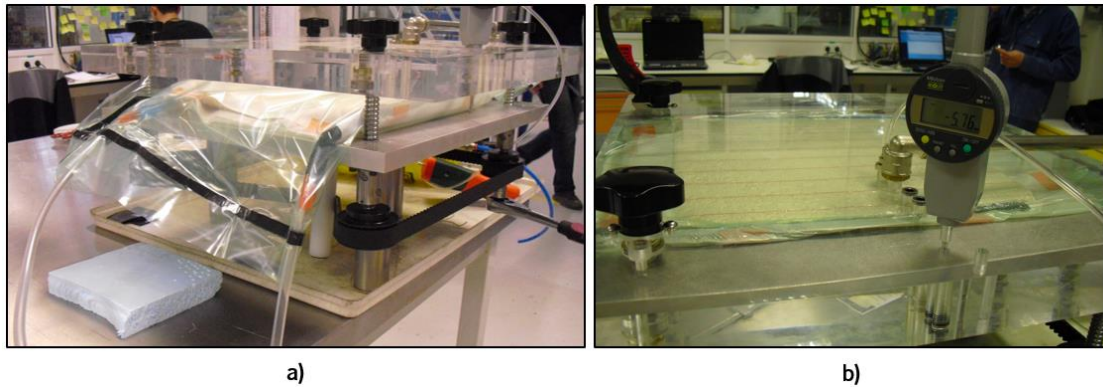


Figura 52 - Sistema a infundir no interior do equipamento Permeabilímetro (a) com respetivo medidor de espessuras (b)

4.2.2. Processamento por infusão com vácuo

Assim que se finaliza a etapa de preparação do processo produtivo, pode-se preparar a resina a utilizar na infusão. Foram preparadas 3 tipos de resinas distintas: uma resina de epóxico convencional, uma resina de epóxico biodegradável e resina ortóftálica de poliéster insaturado. As principais características destas resinas termoendurecíveis usadas como matéria-prima neste trabalho para processar compósitos por infusão com vácuo são seguidamente apresentadas.

- Resina de Epóxico

Neste trabalho usou-se uma resina de epóxico fabricada pela *Hexion Specialty Chemicals.*, a Epikote™ Resin 04908, como matriz de compósitos reforçados com fibras naturais produzidos por infusão com vácuo. É uma resina usada na construção de naval para fabrico por infusão de barcos de pequeno e grande porte e em componentes requerendo níveis superiores de qualidade. O fornecedor recomenda a utilização de uma relação ponderal 30% de agente endurecedor, o Epikure™ Curing Agent 04908, para 100% de resina.

A resina apresenta baixa viscosidade e uma excelente adesão às fibras convencionais de carbono, vidro e aramida. A tabela 9 apresenta as principais propriedades desta resina:

Tabela 9 - Propriedades da resina de epóxido Epikote™ Resin 04908

Propriedades Sistema epóxido Epikote™ Resin 04908 + Epikure™ Curing Agent 04908)		
	Tração	Flexão
Tensão de rotura [MPa]	74	112
Deformação na rotura [%]	9,4	-
Módulo de Elasticidade [GPa]	2,9	3,1
Densidade	1,15	
Temperatura de transição vítrea [°C]	82	

- Bioresina de Epóxido

Adquiriu-se à *Entropy Resins* um sistema de bioresina de epóxido, denominado Super Sap® CLR/INF (bioresina CLR e um endurecedor de tipo rápido, o INF), para ser utilizado como matriz nos compósitos reforçados com fibras naturais produzidos por infusão/vácuo. Trata-se de uma sistema que permite reduzir em 50% da pegada de carbono por a substituição de 1kg de resina epóxido convencional pela resina Super Sap®, conduzir à redução de cerca de 4kg os gases emitidos para a atmosfera, sem que o desempenho do produto final seja afetado [20].

Trata-se de uma resina com baixa viscosidade, ideal para permitir o processo por infusão com vácuo de peças, de geometria simples ou complexa, de grande ou pequena dimensão. O fabricante recomenda a utilização do endurecedor numa relação de 33/100 do peso de resina. Apresentando uma excelente estabilidade aos ultravioletas (UV) é normalmente aplicada na indústria aeronáutica e dos transportes. Na tabela 10 apresentam-se as suas principais propriedades.

Tabela 10 - Propriedades da bioresina de epóxido

Propriedades Sistema de Resina (Super Sap CLR/INF)		
	Tração	Flexão
Tensão de rotura [MPa]	69	110
Deformação [%]	2	-
Densidade	0,97 – 1,2	
Temperatura de transição vítrea [°C]	120	

- Resina Ortóftálica de Poliéster Insaturado

A resina ortóftálica de poliéster insaturado utilizada como matriz na produção de compósitos reforçados com fibras naturais, denominada Distitron® 3501 S1, foi adquirida à *Polynt*. Para obter a sua cura adicionou-se um iniciador e um inibidor, respetivamente, em percentagem ponderal de 1,5% e 0,05% do peso de resina. As suas principais propriedades são apresentadas na tabela 11.

Tabela 11 - Propriedades da resina de poliéster insaturado ortóftálico

Propriedades Resina Distitron® 3501 S1		
	Tração	Flexão
Tensão de rotura [MPa]	65	120
Deformação [%]	2	-
Módulo de Elasticidade [GPa]	4,1	4,2
Densidade [g/cm ³]	1,07 – 1,15	

- Infusão da Resina

Utilizou-se sempre o mesmo critério na preparação da resina necessária à infusão dos compósitos reforçados com fibras vegetais produzidos neste trabalho. Começou por se determinar o volume da placa de compósito a processar, do “peel ply” e “flow mesh” e o necessário para preencher o tubo de distribuição e de alimentação usados no processo. Seguidamente, considerou-se a quantidade de resina a preparar e utilizar como a soma de todas aquelas parcelas e, de acordo com as recomendações do fornecedor de cada resina, adicionou-se a esta última as percentagens correspondentes de endurecedor e de iniciador e inibidor, respetivamente, para os casos da resina epóxico, epóxico biodegradável e de poliéster insaturado.

Durante a preparação de resina, teve-se especial cuidado em eliminar todas as bolhas de ar que ela possa conter ou que resultem da adição dos aditivos usados, isto é, endurecedores, iniciadores e inibidores. Para tal, agitou-se com movimentos circulares lentos o recipiente onde se misturaram todos os componentes até que se obtivesse uma mistura homogénea, após o que esta foi sujeita a uma desgaseificação sob vácuo numa estufa (“degassing”).

Terminada a desgaseificação, o tubo de alimentação foi introduzido no recipiente de resina e, através da aplicação da pressão máxima (965mbar) gerada pela bomba de vácuo, ela foi “puxada”

até impregnar totalmente a pré-forma, tal como mostra a figura 53 para as placas compósitas reforçadas com fibras de linho (a) e de sisal (b).

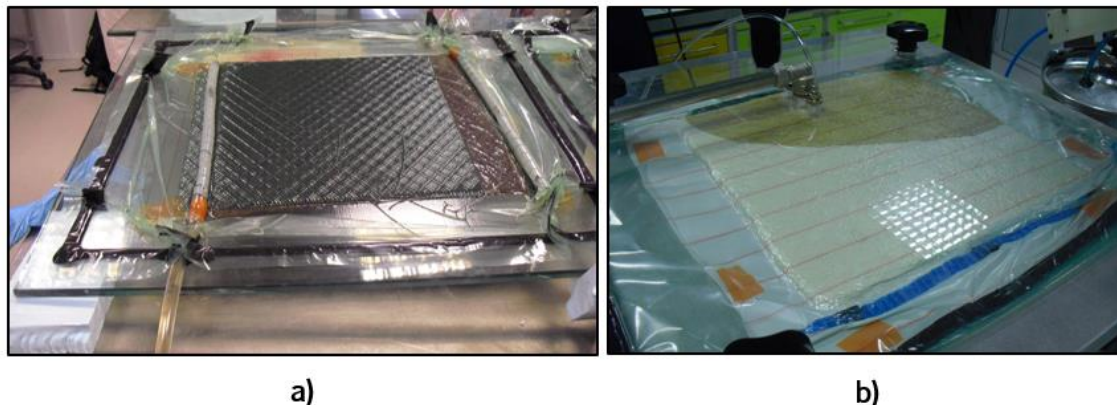


Figura 53 - Infusão de resina nas placas reforçadas com fibras de linho (a) e fibras de sisal (b)

Após a impregnação total da pré-forma de reforço de fibras naturais, baixou-se a pressão para 400mbar e manteve-se este valor constante até que ocorresse a cura total da placa. Após cura, procedeu-se à desmoldagem da peça. Para cada placa de compósito reforçado com fibras vegetais, registou-se numa folha de processo a evolução da pressão e de impregnação até que a cura total ocorresse.

4.3. Mistura e Estampagem de Compósitos

Neste trabalho e com o intuito de produzir compósitos ainda mais sustentáveis, tentou-se utilizar um termoplástico biodegradável com matriz de compósitos reforçados com fibras vegetais naturais. Optou-se por selecionar como matriz um poli-ácido láctico (PLA) que é apresentado no ponto seguinte. Contudo, tal como a grande maioria dos termoplásticos, o estado sólido com que este polímero se apresenta à temperatura ambiente e a viscosidade demasiado elevada por ele exibida no estado fundido tornava totalmente inviável a utilização do processo produtivo descrito anteriormente, isto é, a infusão por vácuo, na produção dos compósitos. Assim sendo, optou-se por um processo de mistura a quente seguido de estampagem na produção de placas compósitas em PLA reforçado com fibras de sisal e linho no presente trabalho.

4.3.1. Preparação do processo

- Resina de Poli-Ácido Lático (PLA)

O termoplástico biodegradável utilizado neste trabalho como matriz de compósitos reforçados com fibras naturais, foi o PLA (polyactide) polymer 3051D produzido pela *Resinex*. Ele é essencialmente aplicado no fabrico, por injeção convencional, de artigos descartáveis usados na alimentação, como sejam, copos, pratos e talheres.

Para além de biodegradável, este polímero também apresenta um alto desempenho mecânico e caracteriza-se por não ser tóxico. Na tabela 12 resumem-se as suas principais propriedades.

Tabela 12 - Propriedades da resina de PLA

Propriedades Resina PLA (polyactide) polymer 3051D		
	Tração	Flexão
Tensão de rotura [MPa]	48,3	82,7
Deformação [%]	2,5	-
Módulo de Elasticidade [GPa]	-	3,83
Densidade [g/cm ³]	1,25	
Temperatura de transição vítrea [°C]	60	

- Processamento

O processo consistiu na introdução do PLA e das fibras de reforço num misturador existente no PIEP, que foi especialmente desenvolvido para permitir a impregnação sem degradação de fibras de reforço por termoplásticos. As fibras de reforço e o termoplástico foram introduzidos através de uma tremonha para o interior do cilindro do misturador, onde a mistura é efetuada a alta temperatura e, simultaneamente, a baixas taxas de corte para evitar a degradação do reforço. No cilindro, os materiais são misturados e extrudidos a temperatura elevada, após o que são retirados e imediatamente colocados no interior de um molde arrefecido e de dimensões pretendidas, montado numa prensa de modo a serem estampados, (ver figura 54).

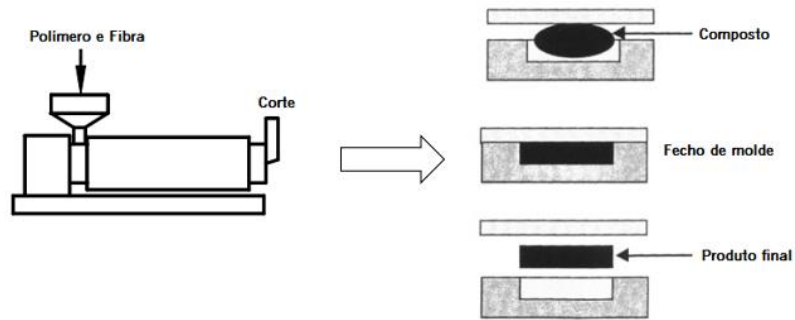


Figura 54 - Representação esquemática do processo produtivo Mistura e Estampagem para a produção de compósito termoplástico reforçado com fibras vegetais (adaptado de [40] [41])

Sendo a resina termoplástica de PLA um material bastante higroscópico, ou seja, absorvedor de bastante humidade, e podendo esta última ser responsável pelo aparecimento de diversos efeitos indesejados a nível de processamento e das propriedades finais do produto e defeitos no campo do acabamento superficial, começou-se por secar os grânulos de PLA, a usar no processo, numa estufa.

Em seguida, desfiou-se da manta de sisal e do tecido de linho, as quantidades de fibras necessárias para produzir as placas de compósitos que foram, posteriormente e antes da sua colocação no misturador, cortadas em filamentos com comprimentos próximos de 25 mm.

Finalmente, procedeu-se à pesagem das fibras e dos grânulos de PLA de modo a que se pudessem obter compósitos reforçados com uma fração volúmica de fibras próximas dos 15%.

4.3.2. Mistura e Estampagem

Preparados os materiais a utilizar, iniciou-se a mistura dos componentes no misturador existente no PIEP. Para tal, ligam-se as resistências elétricas do cilindro do misturador (ver Fig. 55), para que possa aquecer o polímero. Assim que se atingiu as temperaturas desejadas ($T = 200^{\circ}\text{C}$), introduziu-se o PLA e as fibras curtas de reforço através da tremonha.



Figura 55 - Misturadora utilizada para a mistura do polímero de PLA e da fibra de reforço

Procedeu-se, então, à mistura dos dois materiais no interior do cilindro sob ação da rotação de três barras metálicas presentes durante, aproximadamente, 10 minutos de modo a evitar a degradação das fibras vegetais. Após os 10 minutos abriu-se a câmara do misturador e extrudiu-se o composto obtido para o exterior (ver Fig. 56 a)). Após corte, ele foi rapidamente colocado no interior da cavidade do molde arrefecido montado numa prensa onde foi estampado (ver Fig. 56 b)). O arrefecimento do molde efetua-se através de um sistema de circulação de água refrigerada.

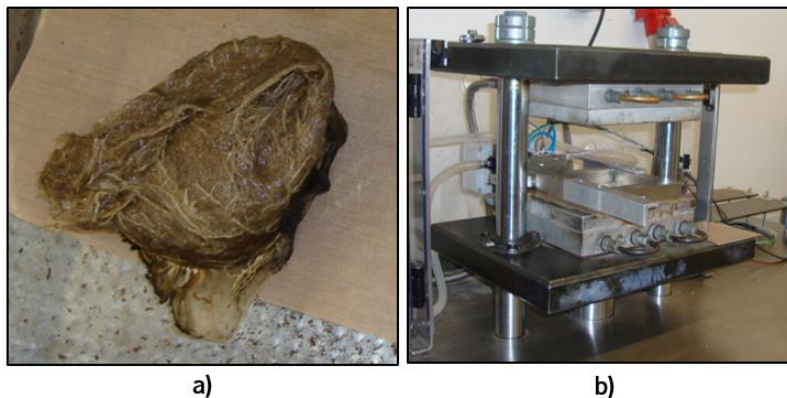


Figura 56 - Composto extraído da câmara de mistura (a) e colocado de seguida na cavidade do molde (b)

A passagem do composto do misturador para o molde deve ser feita o mais rapidamente possível para que o composto não arrefeça e solidifique antes de ser estampado. Fechou-se o molde sob uma pressão 100 bar, permanecendo o composto no seu interior durante 5 minutos de modo a ser arrefecido e solidificar.

O processo foi usado na produção de duas placas compósitas, com dimensões de $100 \times 100 \times 5\text{mm}$, em PLA reforçado com fibras de sisal e de outras duas placas em PLA reforçado com fibras de linho (ver Fig. 57).

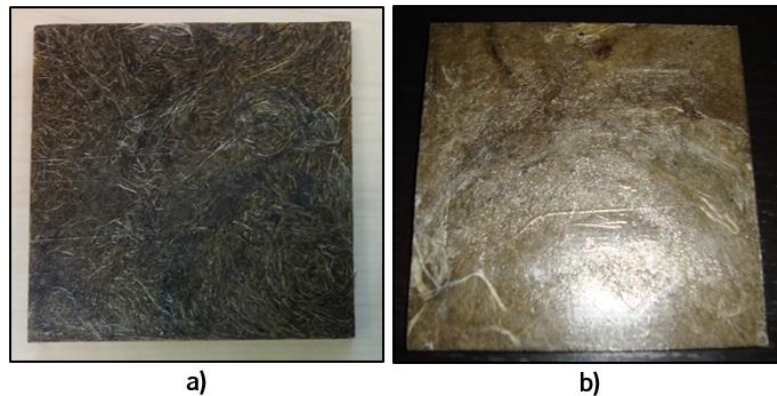


Figura 57 - Placas de compósito de PLA reforçado com fibras de sisal (a) e com fibras de linho (b)

4.4. Propriedades Determinadas nos Compósitos

Seguidamente, apresentam-se as propriedades mecânicas obtidas através dos ensaios de tração e flexão em provetes cortados das placas compósitas reforçadas com fibras vegetais naturais produzidas neste trabalho.

4.4.1. Compósitos em Epóxico Reforçado com Fibras de Sisal

A tabela 13 resume as propriedades mecânicas obtidas por ensaio, efetuados de acordo com o procedimento descrito no parágrafo 3.2, nos compósitos de resina epóxico reforçada com fibras de sisal. Os resultados individuais obtidos em cada ensaio podem ser consultados no Anexo III.

Tabela 13 - Propriedades obtidas na caracterização mecânica de um compósito de resina de epóxico reforçado com fibras de sisal

Ensaio	Tensão de Rotura	Deformação à Rotura	Módulo de Elasticidade
	[MPa]	[%]	[GPa]
Tração	$32,7 \pm 1,5$	$1,9 \pm 0,2$	$4,3 \pm 0,2$
Flexão	$68,3 \pm 6,7$	$2,7 \pm 0,4$	$3,0 \pm 0,3$

4.4.2. Compósito em Epóxico Reforçado com Fibras de Linho

Na tabela 14 apresentam-se, por outro lado, os resultados obtidos nas placas compósitas em resina epóxico reforçada com fibras de linho orientadas a $\pm 45^\circ$ e a $0^\circ/90^\circ$, ensaiadas de acordo com o procedimento descrito no parágrafo 3.2. Os resultados individuais obtidos em cada ensaio podem ser consultados no Anexo IV.

Tabela 14 - Propriedades obtidas na caracterização mecânica de um compósito de resina de epóxico reforçado com fibras de linho orientadas a $\pm 45^\circ$ e a $0^\circ/90^\circ$

Orientação	Ensaio	Tensão de Ruptura	Deformação à Ruptura	Módulo de Elasticidade
		[MPa]	[%]	[GPa]
$\pm 45^\circ$	Tração	$78,9 \pm 1,8$	$4,4 \pm 0,5$	$6,9 \pm 0,4$
$0^\circ/90^\circ$		$69,2 \pm 1,2$	$3,0 \pm 0,2$	$9,3 \pm 1,7$
$\pm 45^\circ$	Flexão	$104,8 \pm 5,6$	$4,4 \pm 0,3$	$5,9 \pm 0,2$
$0^\circ/90^\circ$		$116,9 \pm 8,0$	$2,8 \pm 0,1$	$6,5 \pm 0,7$

4.4.3. Compósito de Poliéster Insaturado Reforçado com Fibras de Sisal

Na tabela 15 encontram-se as propriedades mecânicas obtidas por ensaio nas placas em resina ortóftálica de poliéster insaturado reforçado com fibras de sisal. Os resultados individuais de cada ensaio também se encontram no Anexo V.

Tabela 15 - Propriedades obtidas na caracterização mecânica de um compósito de resina ortóftálica de poliéster insaturado reforçado com fibras de sisal

Ensaio	Tensão de Ruptura	Deformação à Ruptura	Módulo de Elasticidade
	[MPa]	[%]	[GPa]
Tração	$23,8 \pm 3,8$	$5,1 \pm 0,6$	$1,5 \pm 0,2$
Flexão	$55,5 \pm 0,9$	$2,4 \pm 0,1$	$3,9 \pm 0,3$

4.4.4. Compósito de Poliéster Insaturado Reforçado com Fibras de Linho

A tabela 16 apresenta, de forma resumida, os resultados obtidos nos ensaios mecânicos dos compósitos de resina ortóftálica de poliéster reforçado com fibras de linho orientadas a $\pm 45^\circ$ e a $0^\circ/90^\circ$. Os resultados individuais obtidos nos ensaios encontram-se no Anexo VI.

Tabela 16 - Propriedades obtidas na caracterização mecânica de um compósito de resina ortóftálica de poliéster insaturado reforçado com fibras de linho orientadas a $\pm 45^\circ$ e a $0^\circ/90^\circ$

Orientação	Ensaio	Tensão de Rotura	Deformação à Rotura	Módulo de Elasticidade
		[MPa]	[%]	[GPa]
$\pm 45^\circ$	Tração	$22,4 \pm 2,3$	$3,2 \pm 0,1$	$3,4 \pm 0,6$
$0^\circ/90^\circ$		$92,2 \pm 4,0$	$3,6 \pm 0,4$	$10,3 \pm 0,8$
$\pm 45^\circ$	Flexão	$48,2 \pm 2,3$	$4,0 \pm 0,3$	$3,1 \pm 0,2$
$0^\circ/90^\circ$		$123,3 \pm 9,1$	$3,5 \pm 0,2$	$6,3 \pm 0,7$

4.4.5. Compósito de Bioresina de Epóxido Reforçado com Fibras de Sisal

A tabela 17 apresenta, de forma resumida, os resultados obtidos na caracterização mecânica dos compósitos em bioresina de epóxido reforçado com fibras de sisal. Os resultados individuais de cada ensaio podem ser consultados no Anexo VII.

Tabela 17 - Propriedades obtidas na caracterização mecânica de um compósito de bioresina de epóxido reforçado com fibras de sisal

Ensaio	Tensão de Rotura	Deformação à Rotura	Módulo de Elasticidade
	[MPa]	[%]	[GPa]
Tração	$30,7 \pm 0,8$	$1,7 \pm 0,1$	$3,7 \pm 0,3$
Flexão	$55,6 \pm 3,6$	$2,6 \pm 0,2$	$2,9 \pm 0,1$

4.4.6. Compósito de Bioresina de Epóxido Reforçado com Fibras de Linho

A tabela 18 apresenta, por outro lado, os resultados das propriedades mecânicas obtidas nos ensaios a que foram sujeitos os compósitos em bioresina de epóxido reforçado com fibras de linho orientadas a $\pm 45^\circ$ e a $0^\circ/90^\circ$. Os resultados individuais de cada ensaio são apresentados no Anexo VIII.

Tabela 18 - Propriedades obtidas na caracterização mecânica de um compósito de bioresina de epóxido reforçado com fibras de linho orientadas a $\pm 45^\circ$ e a $0^\circ/90^\circ$

Orientação	Ensaio	Tensão de Ruptura	Deformação à Ruptura	Módulo de Elasticidade
		[MPa]	[%]	[GPa]
$\pm 45^\circ$	Tração	$31,3 \pm 0,9$	$3,0 \pm 0,5$	$4,4 \pm 0,2$
$0^\circ/90^\circ$		$88,7 \pm 2,0$	$3,2 \pm 0,2$	$9,8 \pm 0,7$
$\pm 45^\circ$	Flexão	$60,7 \pm 2,2$	$3,7 \pm 0,2$	$3,5 \pm 0,1$
$0^\circ/90^\circ$		$149,5 \pm 14,1$	$2,4 \pm 0,2$	$11,6 \pm 1,0$

4.4.7. Poli-Ácido Láctico (PLA)

Com vista à determinação das propriedades mecânicas do PLA, também se produziram placas de PLA por compressão a quente donde se cortaram provetes que foram ensaiados em tração e flexão de acordo com os procedimentos descritos no parágrafo 3.2 deste documento. A tabela 19 resume as propriedades obtidas nos ensaios realizados. Os resultados individuais de cada ensaio encontram-se no Anexo IX.

Tabela 19 - Propriedades mecânicas obtidas para o PLA

Ensaio	Tensão de Ruptura	Deformação à Ruptura	Módulo de Elasticidade
	[MPa]	[%]	[GPa]
Tração	$39,7 \pm 7,0$	$2,1 \pm 0,6$	$3,4 \pm 0,2$
Flexão	$83,4 \pm 10,2$	$3,7 \pm 0,2$	$2,7 \pm 0,2$

4.4.8. Compósito de PLA Reforçado com Fibras de Sisal

A tabela 20 apresenta, de forma resumida, os resultados obtidos nos ensaios a que foram submetidas as placas compósitas em PLA reforçado com fibras de sisal. Os resultados individuais de cada ensaio encontram-se no Anexo X.

Tabela 20 - Propriedades mecânicas obtidas nas placas compósitas de PLA reforçado com sisal

Ensaio	Tensão de Rotura	Deformação à Rotura	Módulo de Elasticidade
	[MPa]	[%]	[GPa]
Tração	39,1 ± 2,0	2,1 ± 0,4	4,9 ± 0,4
Flexão	57,8 ± 5,9	2,1 ± 0,2	3,3 ± 0,4

4.4.9. Compósito de PLA Reforçado com Fibras de Linho

A tabela 21 apresenta, de forma resumida, os resultados obtidos nos ensaios realizados nas placas compósitas de PLA reforçado com fibras de linho orientadas a $\pm 45^\circ$ e a $0^\circ/90^\circ$. Os resultados individuais de cada ensaio podem ser consultados no Anexo XI.

Tabela 21 - Propriedades mecânicas obtidas nas placas compósitas PLA reforçado com linho

Ensaio	Tensão de Rotura	Deformação à Rotura	Módulo de Elasticidade
	[MPa]	[%]	[GPa]
Tração	41,6 ± 1,1	3,0 ± 0,6	4,9 ± 1,5
Flexão	72,1 ± 16,7	2,2 ± 0,2	3,8 ± 0,9

4.4.10. Comparação e Análise dos resultados obtidos

- Propriedades de Tração

Comparando as resinas não reforçadas com as reforçadas por fibras vegetais em termos de resistência mecânica, verifica-se que: i) as resinas reforçadas com fibras de sisal apresentaram uma diminuição significativa da tensão de rotura e deformação, e um ligeiro aumento do módulo de elasticidade; ii) as resinas reforçadas com fibras de linho, por outro lado, apresentaram um

valor da tensão de rotura próximo do da resina não reforçada. As resinas de epóxido apresentaram tensões de rotura próximas quando o tecido se encontra orientado a $\pm 45^\circ$ e um aumento nas direções $0^\circ/90^\circ$. A resina de poliéster e o epóxido reforçado com linho diminuíram a tensão de rotura quando reforçados com tecido orientado a $\pm 45^\circ$ e aumentaram-na quando ele se encontrava orientado a $0^\circ/90^\circ$; iv) relativamente à deformação na rotura e ao módulo de elasticidade verifica-se um aumento nas duas direções do tecido; iv) por outro lado, o PLA apresentou um comportamento diferente ao verificado nas resinas termoendurecíveis: neste caso, ocorreu uma diminuição na tensão de rotura no PLA reforçado com fibras de sisal e linho e um aumento do módulo de elasticidade. Na tabela 22 apresentam-se todas estas comparações. Pode-se, então, concluir que, em tração, as mantas aleatórias de fibras de sisal não conferiram uma melhoria na resistência mecânica aos polímeros usados como matriz.

Tabela 22 - Comparação das propriedades em tração da resina não reforçada (dados do fabricante) e reforçada com sisal e linho (obtidos experimentalmente)

	Vf [%]	Tensão de Rotura [MPa]		Deformação à Rotura [%]	Módulo de Elasticidade [GPa]	
		Real	Teórico	Real	Real	Teórico
Resina Epóxido ¹		74		9,4	2,9	
Epóxido reforçado com fibras de sisal ²	18,4	32,7 ± 1,5	88,81	1,9 ± 0,2	4,3 ± 0,2	2,69
Epóxido reforçado com fibras de linho a $\pm 45^\circ$ ²	35,6	78,9 ± 1,8	50,97	4,4 ± 0,5	6,4 ± 0,4	1,90
Epóxido reforçado com fibras de linho $0^\circ/90^\circ$ ²	34,6	69,2 ± 1,2	78,9	3,0 ± 0,2	9,3 ± 1,7	2,13
Poliéster ¹		65		2	4,1	
Poliéster reforçado com fibras de sisal ²	18,7	23,8 ± 3,8	81,74	5,1 ± 0,6	1,5 ± 0,2	3,66
Poliéster reforçado com fibras de linho $\pm 45^\circ$ ²	36,1	22,4 ± 2,3	44,90	3,2 ± 0,1	3,4 ± 0,6	2,65
Poliéster reforçado com fibras de linho $0^\circ/90^\circ$ ²	34,6	92,2 ± 4,0	50,09	3,6 ± 0,4	10,3 ± 0,8	2,91

	Vf [%]	Tensão de Ruptura [MPa]		Deformação à Ruptura [%]	Módulo de Elasticidade [GPa]	
		Real	Teórico	Real	Real	Teórico
Bioresina de Epóxico ¹		69		2	3,4	
Bioresina de Epóxico reforçado com fibras de sisal ²	18,9	30,7 ± 0,8	85,16	1,7 ± 0,1	3,7 ± 0,3	3,09
Bioresina de Epóxico reforçado com fibras de linho ±45° ²	35,1	31,3 ± 0,9	48,05	3,0 ± 0,5	4,4 ± 0,2	2,24
Bioresina de Epóxico reforçado com fibras de linho 0°/90° ²	35,1	88,7 ± 2,0	52,47	3,2 ± 0,2	9,8 ± 0,7	2,44
PLA ¹		48,3		2,5	3,8	
PLA ²		39,7 ± 7,0		2,1 ± 0,6	3,4 ± 0,2	
PLA reforçado com fibras de sisal ²	15	39,1 ± 2,0	64,23	2,1 ± 0,4	4,9 ± 0,4	3,5
PLA reforçado com fibras de linho ²	15	41,6 ± 1,1	42,10	3,0 ± 0,6	4,9 ± 1,5	3,24

¹ - Valores fornecidos por fabricante

² - Valores determinados experimentalmente

Durante os ensaios de tração verificou-se que os compósitos de matriz termoendurecível reforçados com o tecido de linho apresentaram um comportamento muito semelhante ao do tecido de reforço ensaiado individualmente. À medida que aumentava a força de tração, o compósito iniciava a sua falha através das linhas de costura até que se verificasse a sua ruptura.

Comparando os compósitos de matriz termoendurecível convencional, resina de epóxico e resina de poliéster, verifica-se que um compósito de resina de epóxico apresenta tensões de cedência e de ruptura superiores, no caso de reforço com sisal e linho orientado a ± 45°, verificando-se o contrário com reforço de linho orientado a 0°/90°.

No caso dos compósitos em bioresina de epóxico verificou-se uma ligeira diminuição das propriedades nos reforçados com fibras de sisal, uma diminuição significativa nos reforçados com tecido de linho com fibras orientadas a ±45° e um ligeiro aumento para as fibras orientadas a 0°/90°.

Globalmente, o poliéster reforçado com fibras de linho orientadas a 0°/90° parece ser o material com maiores tensões de ruptura, seguindo-se os compósitos de bioresina de epóxico reforçado com fibras linho orientadas a 0°/90°.

No que diz respeito à deformação na rotura, o laminado que apresenta melhores propriedades é o de poliéster reforçado com fibras de linho orientadas a $\pm 45^\circ$, seguindo-se o de epóxido reforçado com as mesmas fibras e orientadas na mesma orientação.

Quanto ao módulo de elasticidade, o laminado de poliéster reforçado com fibras de linho orientadas a $0^\circ/90^\circ$ foi o que apresentou maiores valores, seguindo-se o laminado de bioresina de epóxido reforçado com fibras de linho com a mesma orientação.

- Propriedades de Flexão

Nos ensaios de flexão, verificou-se alguma semelhança no comportamento dos compósitos de matriz termoendurecível reforçada com fibras de sisal e linho dado não ocorrer rotura do provete em nenhum dos casos. Após o ensaio, os provetes apresentavam uma deformação permanente no ponto de aplicação da carga (ponto intermédio do ensaio). Já os compósitos de bioresina de epóxido e de PLA reforçados foram ensaiados até se atingir a rotura.

Comparando os compósitos de matriz termoendurecível convencional (ver tabela 23), resinas epóxido e de poliéster, verifica-se que o compósito de resina de epóxido é quem apresenta maiores tensões de rotura e deformações, exceto quando reforçado com fibras de linho orientadas a $0^\circ/90^\circ$.

Tabela 23 - Comparação de propriedades de flexão da resina sem reforço (fornecidos pelo fabricante) e da resina com reforço de sisal ou linho (obtidos na caracterização mecânica)

	Vf [%]	Tensão de Rotura [MPa]	Deformação à Rotura [%]	Módulo de Elasticidade [GPa]
Epóxido ¹		112	-	3,1
Epóxido reforçado com fibras de sisal ²	18,4	68,3 ± 6,7	2,7 ± 0,4	3,0 ± 0,3
Epóxido reforçado com fibras de linho ±45° ²	35,6	104,8 ± 5,6	4,4 ± 0,3	5,9 ± 0,2
Epóxido reforçado com fibras de linho 0°/90° ²	34,6	116,9 ± 8,0	2,8 ± 0,1	6,5 ± 0,7
Resina de Poliéster ¹		120	-	4,2
Poliéster reforçado com fibras de sisal ²	18,7	55,5 ± 0,9	2,4 ± 0,1	3,9 ± 0,3
Poliéster reforçado com fibras de linho ±45° ²	36,4	48,2 ± 2,3	4,0 ± 0,3	3,1 ± 0,2
Poliéster reforçado com fibras de linho 0°/90° ²	34,6	123,3 ± 9,1	3,5 ± 0,2	6,3 ± 0,7
Bioresina de Epóxido ¹		110	-	-
Bioresina de Epóxido reforçado com fibras de sisal ²	18,9	55,6 ± 3,6	2,6 ± 0,2	2,9 ± 0,1
Bioresina de Epóxido reforçado com fibras de linho ±45° ²	35,4	60,7 ± 2,2	3,7 ± 0,2	3,5 ± 0,1
Bioresina de Epóxido reforçado com fibras de linho 0°/90° ²	35,1	149,5 ± 14,1	2,4 ± 0,2	11,6 ± 1,0
PLA ¹		82,7	-	3,83
PLA ²		83,4 ± 10,2	3,7 ± 0,2	2,7 ± 0,6
PLA reforçado com fibras de sisal ²	15	57,8 ± 5,9	2,1 ± 0,2	3,3 ± 0,4
PLA reforçado com fibras de linho ²	15	72,1 ± 16,7	2,2 ± 0,2	3,8 ± 0,9

¹ - Valores fornecidos por fabricante² - Valores determinados experimentalmente

Analisando a resina epóxico convencional com a bioresina, verificou-se que elas apresentaram valores relativamente próximos de tensão de rotura, deformação na rotura e módulo de elasticidade. Deve-se, no entanto, destacar que os compósitos em epóxico reforçado com fibras de linho foram os que apresentarem melhores propriedades nas duas direções.

Globalmente e contrariamente ao que aconteceu em tração, foi o compósito de bioresina de epóxico reforçado com fibras de linho orientadas a $0^{\circ}/90^{\circ}$ quem apresentou maior tensão de rotura, seguindo-se o poliéster reforçado com fibras linho orientadas nas mesmas direções ($0^{\circ}/90^{\circ}$).

No que diz respeito à deformação na rotura e tal como aconteceu nos ensaios de tração, é o poliéster reforçado com fibras de linho orientadas a $\pm 45^{\circ}$ quem apresenta maiores valores, seguindo-se o epóxico reforçado com as fibras de linho com a mesma orientação.

Quanto ao módulo de elasticidade, o poliéster reforçado com fibras de linho orientadas a $\pm 45^{\circ}$ foi quem apresentou maiores valores, seguindo-se o epóxico reforçado com fibras de linho com a mesma orientação.

5. Conclusões

O presente trabalho permitiu o desenvolvimento de compósitos mais sustentáveis e amigos do meio ambiente que, após análise das propriedades mecânicas obtidas em tração e flexão, demonstraram poder vir a ser aplicados na indústria automóvel e da construção civil. Além da caracterização dos compósitos, foi ainda possível efetuar uma análise às matérias-primas utilizadas com reforços, que confirmou as diferentes propriedades existentes entre fibras vegetais da mesma espécie.

Verificou-se que o reforço das diferentes resinas com fibras diversas produz efeitos distintos. No que diz respeito às fibras de sisal, elas não apresentaram tão boas propriedades como as fibras de linho, que também variaram consoante a sua orientação. Relativamente aos compósitos de matriz termoplástica de PLA, verificou-se que os reforços fibrosos não provocaram melhorias significativas de propriedades mecânicas.

A introdução do reforço de fibras naturais provocou efeitos semelhantes em ensaios de tração e de flexão, destacando-se que o mesmo tipo de compósitos apresenta maiores tensões de rotura e de deformação à rotura. Quanto ao módulo de elasticidade em tração, destacaram-se os compósitos em poliéster e em bioresina de epóxido reforçados com fibras de linho a $\pm 45^\circ$ e, na resistência à flexão, os compósitos de poliéster e de epóxido reforçados com fibras de linho orientadas a $0^\circ/90^\circ$.

De uma forma geral, os laminados com reforço de linho com orientação a $0^\circ/90^\circ$ são os que apresentam melhores propriedades mecânicas. O PLA, apesar de não exibir grandes alterações com a introdução das fibras de reforço, possuem valores próximos aos compósitos de resina termoendurecível. Assim sendo, tornam-se uma boa opção para a sua utilização a nível ecológico. Mesmo com a obtenção de boas propriedades mecânicas nos compósitos desenvolvidos neste trabalho, existem ainda alguns aspetos que podem ser melhorados e que permitirão alcançar melhores resultados como, por exemplo, o tratamento superficial das fibras vegetais, de forma a aumentar a adesão da matriz ao reforço de fibra.

6. Referências Bibliográficas

- [1] C. Silva, C. Dantas e R. Felipe, “Levantamento da utilização dos materiais compósitos reforçados com fibras naturais,” em *IV Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte e Nordeste de Educação Tecnológica*, Belém, 2009.
- [2] M. F. Pinheiro, “Compósitos avançados reforçados com fibras naturais para construção,” Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2008.
- [3] E. Trombetta, “Utilização de fibra natural de pinus (serragem) como reforço em componentes automotivos compostos de polipropileno,” Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.
- [4] L. H. Mattoso, N. Pereira, M. L. Souza e J. A. Agnelli, “Utilização de fibras vegetais para reforço de plásticos,” *Embrapa - Pesquisa em Andamento*, pp. 1 - 4, Novembro 1996.
- [5] A. W. Santos, I. V. Lima, I. B. Souza, J. D. Francisco, P. A. Franco, P. F. Oliveira, S. C. Silva, T. N. Valério e A. V. Silva, “Piso Produzido a partir de fibras vegetais,” *e-xacta*, pp. 59 - 64, Outubro 2011.
- [6] <http://www.pu-systems.bayermaterialsscience.com/>.
- [7] J. Holbery e D. Houston, “Natural fiber reinforced polymer composites in automotive applications,” *JOM*, Novembro 2006.
- [8] J. Paiva, W. Trindade e E. Frollini, “Compósito de matriz termofixa fenólica reforçada com fibras vegetais,” em *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, São Paulo, Out/Dez 1999.
- [9] K. Joseph, E. Medeiros e L. Carvalho, “Compósitos de matriz poliéster reforçados por fibras curtas de sisal,” em *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, Campina Grande, Out/Dez 1999.
- [10] M. J. John, R. Tlili, R. Anandjiwala, A. Boudenne e L. Ibos, “Effect of amphiphilic coupling agent on heat flow and dielectric properties of flax-polypropylene composites,” em *Elsevier - Composites: Part B*, 2012.

- [11] K. Oksman, A. Mathew, R. Langström, B. Nyström e K. Joseph, "The influence of fibre microstructure on fibre breakage and mechanical properties of natural fibre reinforced polypropylene," em *Elsevier - Composites Science and Technology*, 2009.
- [12] S. Mukhopadhyay e R. Srikanta, "Effect of ageing of sisal fibres on properties of sisal-polypropylene composites," em *Elsevier - Polymer Degradation and Stability*, 2008.
- [13] C. C. Silva, R. A. Cunha, R. C. Felipe e R. N. Felipe, "Desenvolvimento de tecidos de sisal para utilização em compósitos poliméricos," 2009.
- [14] L. Juvandes, "Materiais compósitos reforçados com fibras, FRP," Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto, 2002.
- [15] Gurit, Guide to Composites, GTC - 4 - 0111 - 1.
- [16] C. Romão, "Estudo do comportamento mecânico de materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras naturais," Faculdade de Engenharia do Porto, Porto, 2003.
- [17] M. Leão, "Fibras de licuri: um reforço alternativo de compósitos poliméricos," Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.
- [18] H. Silva, "Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras de curauá e híbridos com fibras de vidro," Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- [19] R. A. Gonzaga, "O Poliéster," Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.
- [20] "www.entropyresins.eu".
- [21] O. Faruk, A. Bledzki, H.-P. Fink e M. Sain, "Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000 - 2010," em *Elsevier - Progress in polymer Science*, 2012.
- [22] S. Kalia e L. Avérous, "Biopolymers: Biomedical and Environmental Applications," em *Wiley*, 2011.

- [23] F. Tomczak, “Estudos sobre a estrutura e propriedades de fibras de coco e curauá do Brasil,” Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.
- [24] M. Kabir, H. Wang, K. Lau e F. Cardona, “Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview,” em *Elsevier - Composites: Part B*, 2012.
- [25] “Opportunities in natural fiber composites,” *Lucintel*, Março 2011.
- [26] J. R. Holmer, “Sistemas de cobertura para construções de baixo custo: uso de fibras vegetais e de outros resíduos agroindustriais. Utilização de resíduos na construção habitacional,” em *Coletânea Habitar*, pp. 94 - 123 Vol. 4.
- [27] http://fates.blogspot.pt/2012_01_01_archive.html.
- [28] <http://www.millerwastemills.com/materials/sisal-fiber/>.
- [29] L. Carvalho, “Produção de fibras de bambu para a fabricação de compósito poliuretana de mamona,” Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC - RIO) - Departamento de Engenharia Civil, 2007.
- [30] J. K. Tan, “Caracterização química e estrutural de fibra de sisal da variedade Agave Sisalana,” Universidade de Estado da Bahia, 2012.
- [31] R. Andrade, J. Ornelas e W. Brandão, “Situação atual do sisal na Bahia e suas novas possibilidades de utilização e aproveitamento”. *Comunicação*.
- [32] <http://geia-deusaterra.blogspot.pt/2010/12/o-linho.html>, Novembro 2012.
- [33] C. Bezerra, “Fibras Celulósicas,” Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Departamento de Engenharia de Produção e Têxtil, 2003.
- [34] R. Brino, “O Linho,” Curso de Tecnologia Têxtil e da Indumentária - Brasil.
- [35] P. Wambua, J. Ivens e I. Verpoest, “Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastic?,” em *Elsevier - Composites Science and Technology*, 2003.

- [36] M.-p. Ho, H. Wang, J.-H. Lee, C.-k. Ho, K.-t. Lau, J. Leng e D. Hui, "Critical factors on manufacturing process of natural fibre composites," em *Elsevier - Composites: Part B*, 2012.
- [37] M. Truong, W. Zhong, S. Boyko e M. Alcock, "A comparative study on natural fibre density measurement," *Journal of the textile institute*, 2012.
- [38] A. Ragondet, "Experimental characterisation of the vacuum infusion process," University of Nottingham, School of Mechanical, Materials and Manufacturing Engineering, 2005.
- [39] "http://pgfcompositos.com/produtos_servicos/produtos.php?cod=2".
- [40] J. F. Silva, "Pré-impregnados de matriz termoplástica: Fabrico e transformação por compressão a quente e enrolamento filamentar," Faculdade de Engenharia do Porto, Universidade do Porto, 2005.
- [41] "www.lusoguide.com".

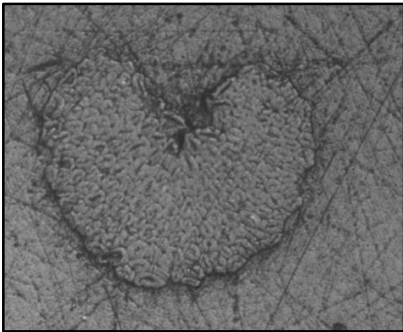
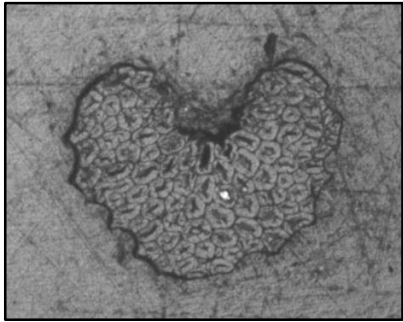
7. Anexos

Anexo I

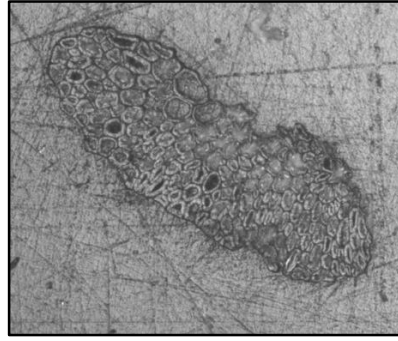
Resultados da caracterização das Fibras de Sisal

- Caracterização Física: Determinação da área de secção transversal dos fios

Tabela de dados e resultados experimentais:

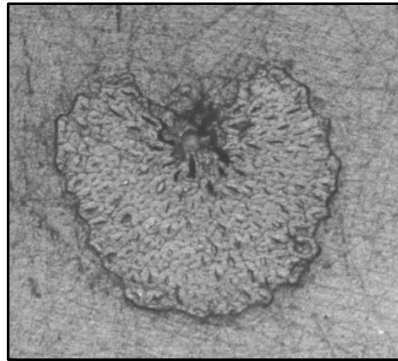
Nº Amostra	Geometria	Área [mm ²]
1		0,0307
2		0,0199

3



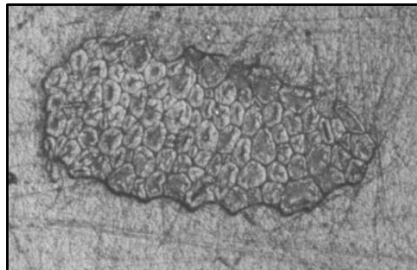
0,0440

4



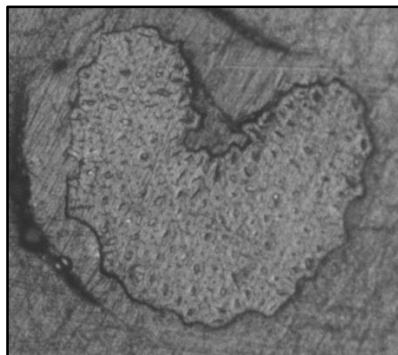
0,0283

5

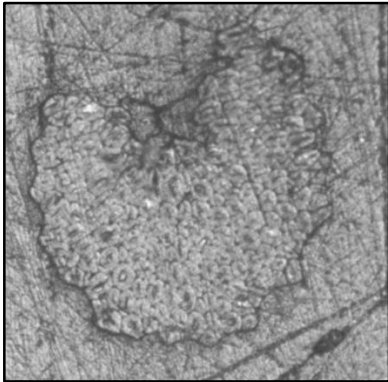
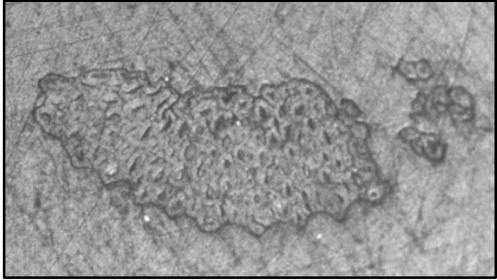
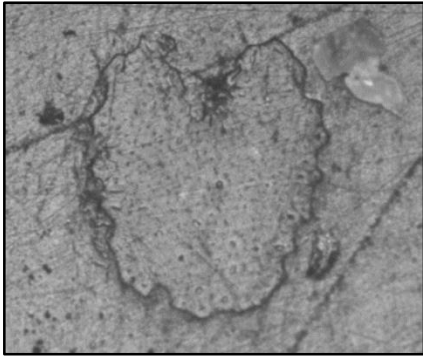
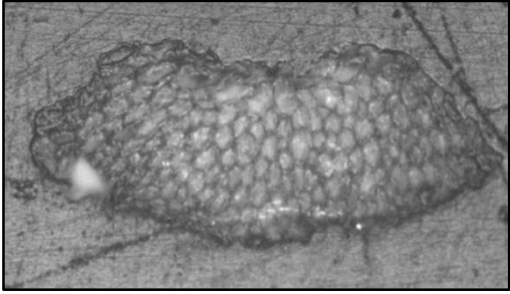


0,0192

6



0,0301

7		0,0261
8		0,0211
9		0,0191
10		0,0466
Média ± Desvio Padrão		0,0285 ± 0,001

➤ Caracterização Física: Determinação da densidade das fibras

Tabela de dados e resultados experimentais:

N° Provete	Massa da amostra	ΔV	ρ
	[g]	[cm ³]	[g/cm ³]
1	0,5665	0,45	1,26
2	0,5485	0,45	1,23
3	0,5433	0,45	1,21
4	0,5025	0,40	1,26
5	0,5400	0,45	1,20
6	0,5315	0,45	1,18
7	0,5520	0,45	1,23
8	0,5576	0,45	1,24
9	0,5508	0,45	1,23
10	0,5530	0,45	1,23
Média ± Desvio Padrão	0,5446 ± 0,017	0,445 ± 0,016	1,224 ± 0,024

➤ Caracterização Mecânica: Determinação da resistência das fibras

Tabela de resultados experimentais para provetes com três comprimentos distintos:

Comprimento do filamento [mm]	N° Provete	Tensão de rotura [MPa]	Deformação à rotura [%]	Módulo de Elasticidade [GPa]
20	1	862,86	3,47	27,7
	2	655,07	3,86	29,2
	3	854,32	3,56	28,4
	4	667,36	2,01	27,0
Média ± Desvio Padrão		759,90 ± 114,12	3,22 ± 0,70	28,1 ± 0,97

Comprimento do filamento [mm]	N° Provete	Tensão de rotura [MPa]	Deformação à rotura [%]	Módulo de Elasticidade [GPa]
25	1	752,96	3,17	19,94
	2	771,39	2,25	19,35
	3	770,55	2,20	18,53
	4	757,96	3,62	19,94
Média ± Desvio Padrão		763,21 ± 9,19	2,81 ± 0,70	19,44 ± 0,66
30	1	637,86	3,09	14,76
	2	229,76	2,32	14,49
	3	397,42	2,91	14,62
	4	578,68	2,26	14,76
Média ± Desvio Padrão		460,93 ± 184,97	2,65 ± 0,42	14,65 ± 0,13

Tabela de resultados experimentais para provetes com comprimento de 20mm:

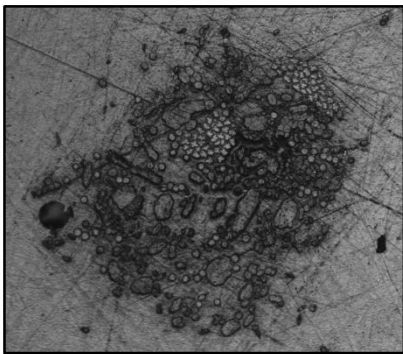
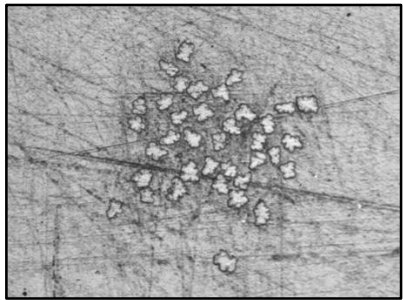
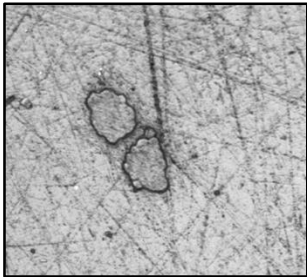
Comprimento do filamento [mm]	N° Provete	Tensão de rotura [MPa]	Deformação à rotura [%]	Módulo de Elasticidade [GPa]
20	1	471,43	1,04	32,89
	2	787,03	3,14	28,45
	3	453,48	1,30	30,08
	4	903,14	3,48	28,45
	5	372,61	6,33	30,96
	6	862,04	3,42	30,08
	7	968,67	5,05	27,70
	8	737,78	3,68	28,45
	9	508,60	3,32	30,08
Média ± Desvio Padrão		673,86 ± 223,44	3,31 ± 1,68	29,68 ± 1,62

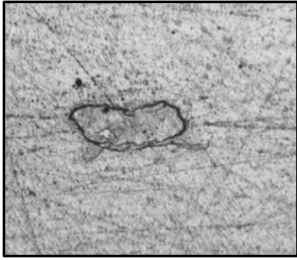
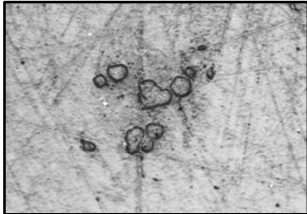
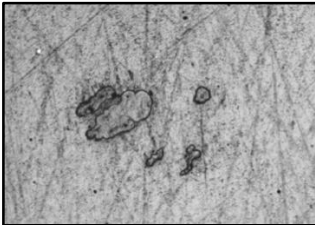
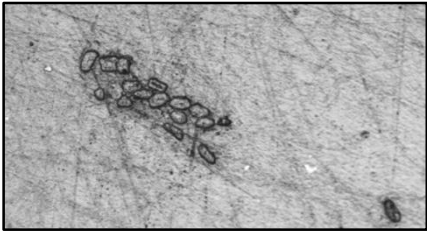
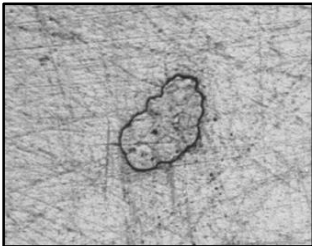
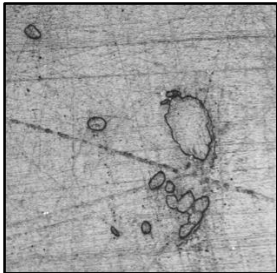
Anexo II

Resultados da caracterização das Fibras de Linho

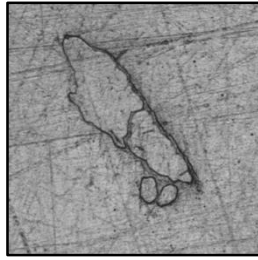
- Caracterização Física: Determinação da área de secção transversal dos fios

Tabela de dados e resultados experimentais:

Nº Amostra	Geometria	Área [mm ²]
Fio		0,3750
Fio imaginário (Linha de costura)		0,0023
Filamento 1		0,0119

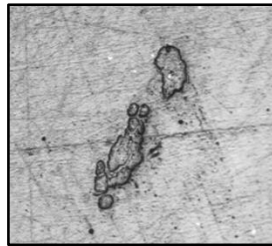
Filamento 2		0,0258
Filamento 3		0,0020
Filamento 4		0,0059
Filamento 5		0,0016
Filamento 6		0,0305
Filamento 7		0,0051

Filamento 8



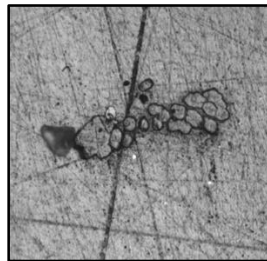
0,0202

Filamento 9



0,0030

Filamento 10



0,0029

➤ Caracterização Física: Determinação da densidade das fibras

Tabela de dados e resultados experimentais:

N° Provete	Massa da amostra	ΔV	ρ
	[g]	[cm ³]	[g/cm ³]
1	0,693	0,45	1,539
2	0,696	0,45	1,547
3	0,671	0,45	1,491
4	0,903	0,6	1,505
5	0,749	0,5	1,497
6	0,729	0,5	1,458

N° Provete	Massa da amostra	ΔV	ρ
	[g]	[cm ³]	[g/cm ³]
7	0,771	0,5	1,541
8	0,687	0,45	1,526
9	0,778	0,5	1,556
10	0,871	0,55	1,583
Média ± Desvio Padrão	0,755 ± 0,07	0,495 ± 0,049	1,524 ± 0,037

- Caracterização Mecânica: Determinação da massa por unidade de superfície

Tabela de dados e resultados experimentais:

N° Provete	Massa da amostra	Massa por unidade de superfície
	[g]	[g/m ²]
1	6,2393	623,93
2	6,0676	606,76
3	6,2438	624,38
4	6,3302	633,02
5	6,3189	631,89
Média ± Desvio Padrão		624,0 ± 10,5

- Caracterização Mecânica: Determinação da massa linear

Tabela de dados e resultados experimentais para os fios retirados do lado do tecido que se encontra orientado a +45°:

Nº Amostra	Massa do fio	Comprimento do fio	Tex	Área teórica da secção transversal
	[g]	[cm]	[g/km]	[mm ²]
1	0,0729	27,0	270	0,1772
2	0,0705	32,6	216	0,1419
3	0,0621	25,6	243	0,1592
4	0,0590	24,0	246	0,1613
5	0,0823	33,2	248	0,1627
6	0,0857	27,9	307	0,2016
7	0,0650	24,0	271	0,1777
8	0,0498	24,2	206	0,1350
9	0,0648	24,7	262	0,1721
10	0,0658	23,3	282	0,1853
Média ± Desvio Padrão			255 ± 30	0,1674 ± 0,02

Tabela de dados e resultados experimentais para os fios retirados do lado do tecido que se encontra orientado a -45°:

Nº Amostra	Massa do fio	Comprimento do fio	Tex	Área teórica da secção transversal
	[g]	[cm]	[g/km]	[mm ²]
1	0,0697	24,8	281	0,1844
2	0,0831	24,4	341	0,2235
3	0,0666	26,9	248	0,1625
4	0,0494	25,0	198	0,1297
5	0,0719	27,0	266	0,1747
6	0,0857	27,5	312	0,2045
7	0,0645	25,6	252	0,1653
8	0,0723	25,5	284	0,1860
9	0,0606	24,9	243	0,1597
10	0,0510	24,3	210	0,1377
Média ± Desvio Padrão			263 ± 43	0,1728 ± 0,03

➤ Caracterização Mecânica: Determinação da contração dos fios

Tabela de dados e resultados experimentais para os fios retirados do lado do tecido que se encontra orientado a +45°:

N° Amostra	Comprimento do fio	Contração
	[cm]	[%]
1	27,0	9,3
2	32,6	24,8
3	25,6	4,3
4	24,0	2,1
5	33,2	26,2
6	27,9	12,2
7	24,0	2,1
8	24,2	0,8
9	24,7	0,8
10	23,3	1,3
Média ± Desvio Padrão		8,4 ± 9,8

Tabela de dados e resultados experimentais para os fios retirados do lado do tecido que se encontra orientado a -45°:

N° Amostra	Comprimento do fio	Contração
	[cm]	[%]
1	24,8	3,2
2	24,4	1,6
3	26,9	10,8
4	25,0	4,0
5	27,0	11,1
6	27,5	12,7
7	25,6	6,3
8	25,5	5,9
9	24,9	3,6
10	24,3	1,2
Média ± Desvio Padrão		6,0 ± 4,1

➤ Caracterização Mecânica: Determinação da contextura do tecido

Tabela de dados e resultados experimentais dos fios:

N° Amostra	Número de fios orientados	
	+45° / cm ²	-45° / cm ²
1	7	9
2	8	8
3	7	8
4	7	8
5	7	7
Média ± Desvio Padrão	7,2 ± 0,4	8,0 ± 0,7

➤ Caracterização Mecânica: Determinação da resistência do tecido

Tabela de resultados experimentais às tiras de tecido com três orientações distintas:

Orientação da tira de tecido	N° Provete	Tensão de rotura	Deformação à rotura	Módulo de Elasticidade
		[MPa]	[%]	[GPa]
+45°	1	40,48	0,35	0,43
	2	27,34	0,34	0,24
	3	26,26	0,32	0,31
	4	10,20	0,33	0,12
	5	20,62	0,33	0,21
Média ± Desvio Padrão		24,98 ± 11,01	0,33 ± 0,01	0,26 ± 0,12
-45°	1	11,31	0,38	0,65
	2	12,30	0,37	0,08
	3	12,17	0,35	0,08
	4	12,83	0,34	0,08
	5	12,93	0,34	0,08

Média ± Desvio Padrão	12,31 ± 0,65	0,36 ± 0,02	0,19 ± 0,26	
	1	48,44	0,18	1,54
	2	46,80	0,19	1,57
90°	3	51,68	0,14	1,79
	4	50,91	0,14	1,46
	5	21,12	0,14	0,39
Média ± Desvio Padrão	43,79 ± 12,82	0,16 ± 0,02	1,35 ± 0,55	

Anexo III

Resultados da caracterização dos compósitos em resina de epóxico com fibras de sisal

➤ Propriedades Mecânicas à tração

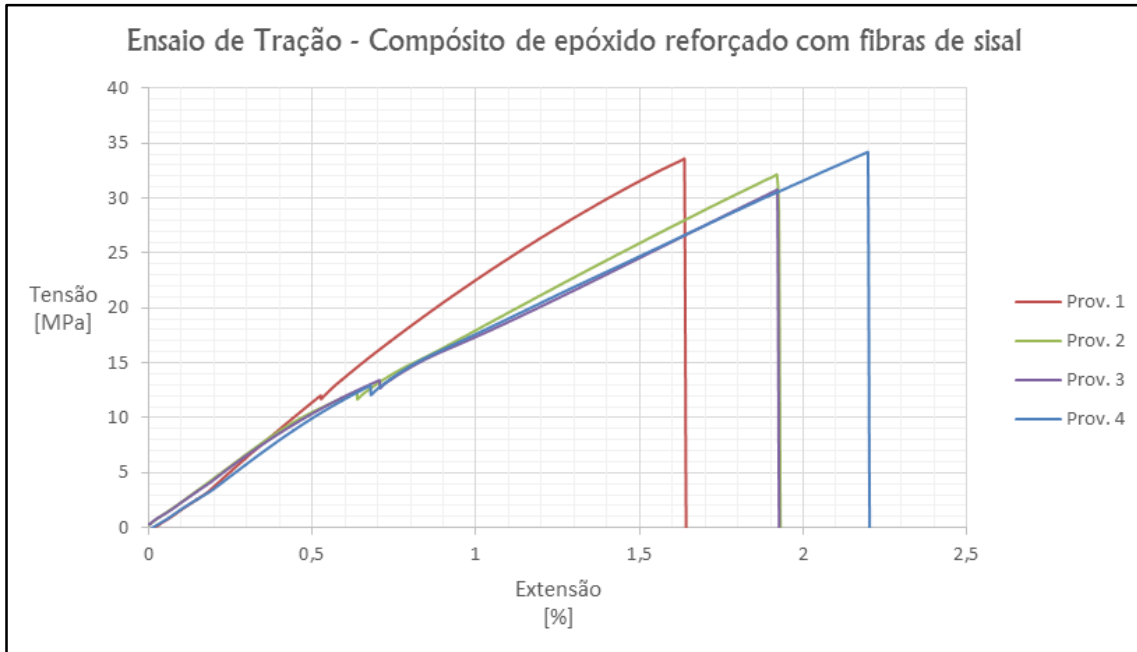


Tabela de dados e resultados experimentais dos provetes de tração:

Provetes	Largura [mm]	Espessura [mm]	Tensão de Ruptura [MPa]	Deformação na ruptura [%]	Módulo de Elasticidade [GPa]
Prov. 1	26,75	6,16	33,6	1,6	4,1
Prov. 2	25,26	6,03	32,1	1,9	4,3
Prov. 3	25,85	6,18	30,8	1,9	4,3
Prov. 4	25,41	6,16	34,2	2,2	4,6
Média					
±	25,82 ± 0,67	6,13 ± 0,07	32,7 ± 1,5	1,9 ± 0,2	4,3 ± 0,2
Desvio Padrão					

➤ Propriedades Mecânicas à flexão

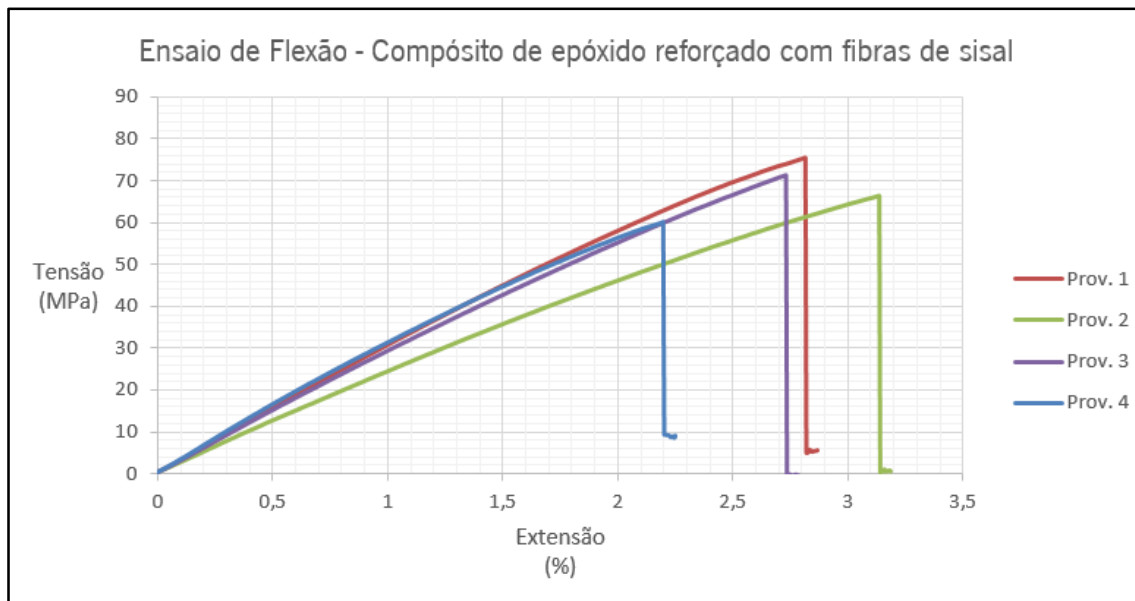


Tabela de dados e resultados experimentais dos provetes de flexão:

Provete	Largura [mm]	Espessura [mm]	Tensão de Rotura [MPa]	Deformação à rotura [%]	Módulo de Elasticidade [GPa]
Prov. 1	15,49	5,92	75,5	2,8	3,1
Prov. 2	16,76	5,87	66,4	3,1	2,5
Prov. 3	16,45	5,95	71,3	2,7	3,0
Prov. 4	16,65	5,96	59,9	2,2	3,3
Média					
±	16,34 ± 0,58	5,93 ± 0,04	68,3 ± 6,7	2,7 ± 0,4	3,0 ± 0,3
Desvio Padrão					

Anexo IV

Resultados da caracterização dos compósitos em resina de epóxico com fibras de Linho orientadas a $\pm 45^\circ$ e a $0^\circ/90^\circ$

- Propriedades Mecânicas à tração para fibras de linho orientadas a $\pm 45^\circ$

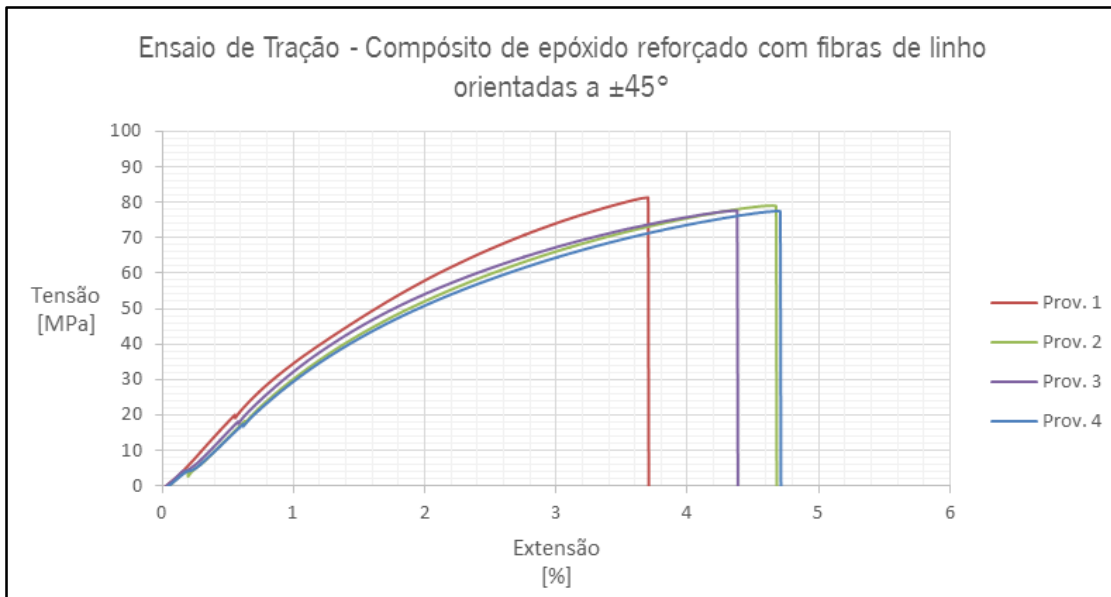


Tabela de dados e resultados experimentais dos provetes de tração para fibras de linho orientadas a $\pm 45^\circ$:

Provete	Largura [mm]	Espessura [mm]	Tensão de Ruptura [MPa]	Deformação na ruptura [%]	Módulo de Elasticidade [GPa]
Prov. 1	24,32	3,39	81,3	3,7	7,4
Prov. 2	24,90	3,43	79,1	4,6	7,0
Prov. 3	25,26	3,36	77,6	4,4	6,6
Prov. 4	25,16	3,35	77,5	4,7	6,4
Média					
±	25,16 ± 0,77	3,38 ± 0,04	78,9 ± 1,8	4,4 ± 0,5	6,9 ± 0,4
Desvio Padrão					

➤ Propriedades Mecânicas à flexão para fibras de linho orientadas a $\pm 45^\circ$

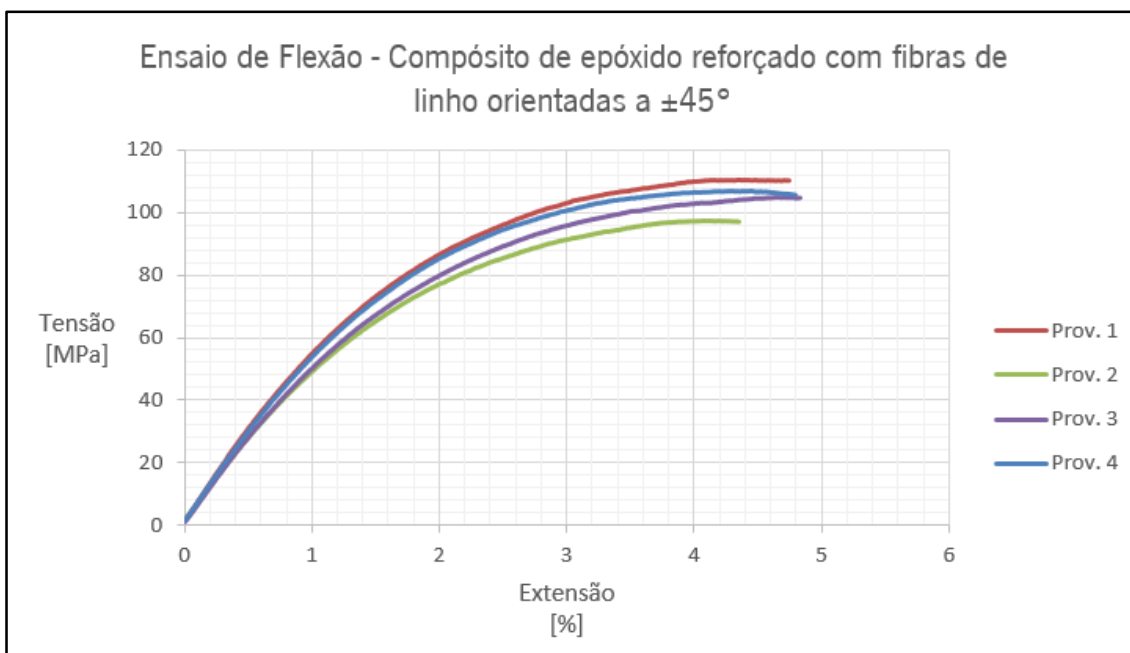


Tabela de dados e resultados experimentais dos provetes de flexão para fibras de linho orientadas a $\pm 45^\circ$:

Provetes	Largura [mm]	Espessura [mm]	Tensão de Ruptura [MPa]	Deformação na ruptura [%]	Módulo de Elasticidade [GPa]
Prov. 1	14,51	3,37	110,4	4,4	6,1
Prov. 2	14,66	3,41	97,2	4,1	5,6
Prov. 3	15,05	3,48	104,7	4,7	5,7
Prov. 4	15,34	3,36	106,9	4,5	6,0
Média					
±	14,89 ± 0,38	3,41 ± 0,05	104,8 ± 5,6	4,4 ± 0,3	5,9 ± 0,2
Desvio Padrão					

➤ Propriedades Mecânicas à tração para fibras de linho orientadas a 0°/90°

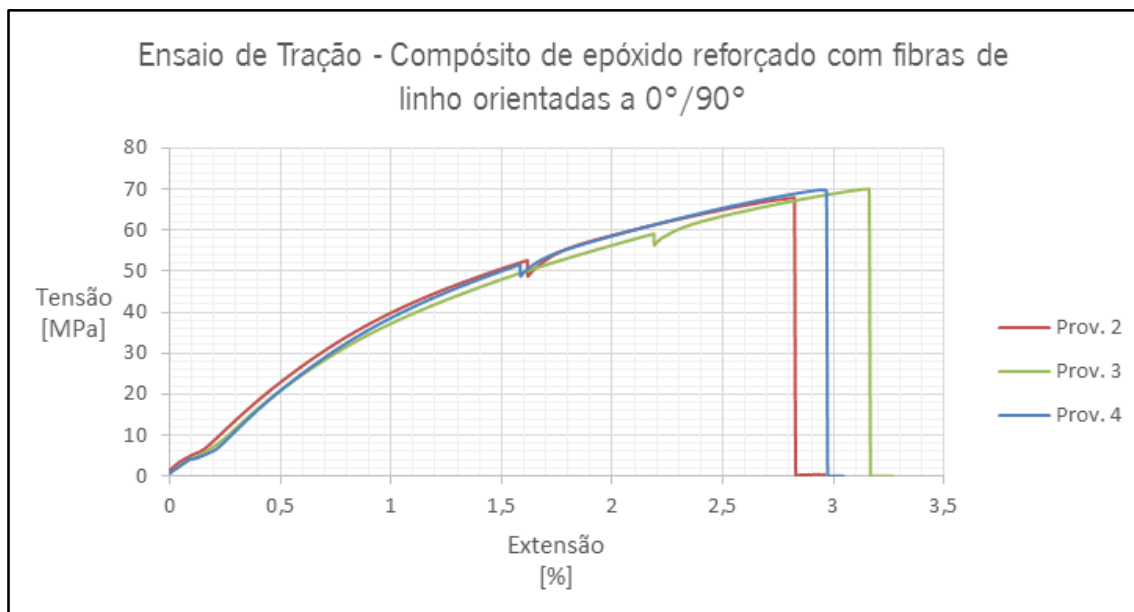


Tabela de dados e resultados experimentais dos provetes de tração para fibras de linho orientadas a 0°/90°:

Provete	Largura [mm]	Espessura [mm]	Tensão de Ruptura [MPa]	Deformação à ruptura [%]	Módulo de Elasticidade [GPa]
Prov. 1	26,7	3,6	-	-	-
Prov. 2	26,0	3,5	67,9	2,8	8,7
Prov. 3	25,9	3,6	70,0	3,2	11,3
Prov. 4	26,1	3,5	69,8	3,0	8,0
Média					
±	26,18 ± 0,36	3,55 ± 0,06	69,2 ± 1,2	3,0 ± 0,2	9,3 ± 1,7
Desvio Padrão					

➤ Propriedades Mecânicas à flexão para fibras de linho orientadas a 0°/90°

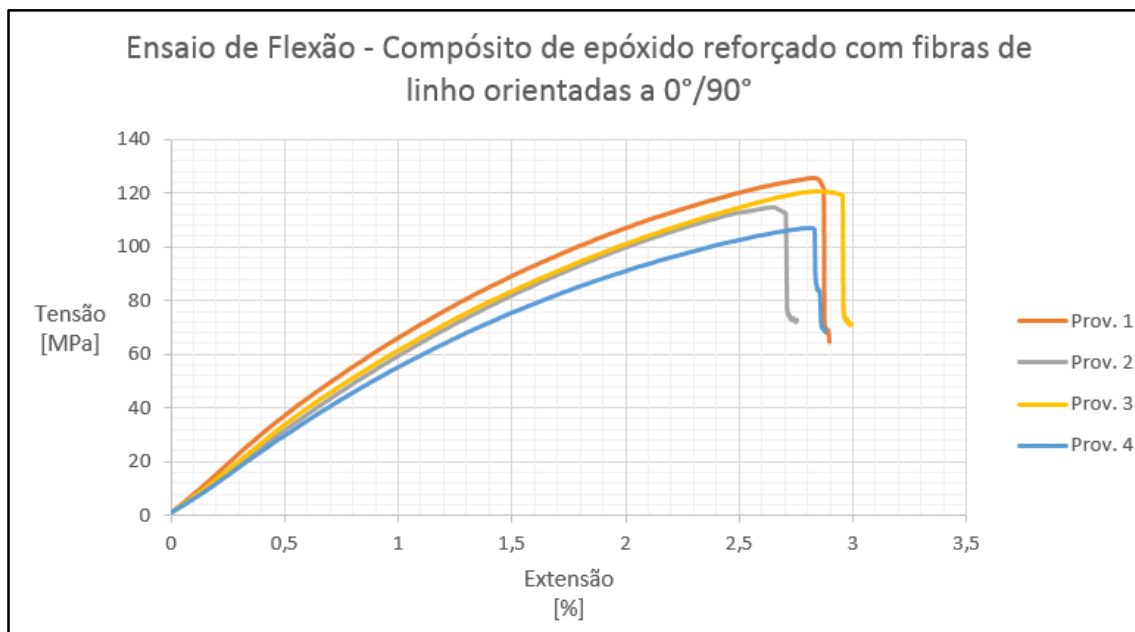


Tabela de dados e resultados experimentais dos provetes de flexão para fibras de linho orientadas a 0°/90°:

Provete	Largura [mm]	Espessura [mm]	Tensão de Ruptura [MPa]	Deformação na ruptura [%]	Módulo de Elasticidade [GPa]
Prov. 1	16,6	3,5	125,5	2,8	7,4
Prov. 2	15,5	3,6	114,5	2,7	6,3
Prov. 3	16,0	3,6	120,6	2,8	6,7
Prov. 4	14,8	3,5	107,0	2,8	5,7
Média					
±	15,73 ± 0,76	3,6 ± 0,05	116,9 ± 8,0	2,8 ± 0,05	6,5 ± 0,7
Desvio Padrão					

Anexo V

Resultados da caracterização dos compósitos de resina de poliéster com fibras de sisal

➤ Propriedades Mecânicas à tração

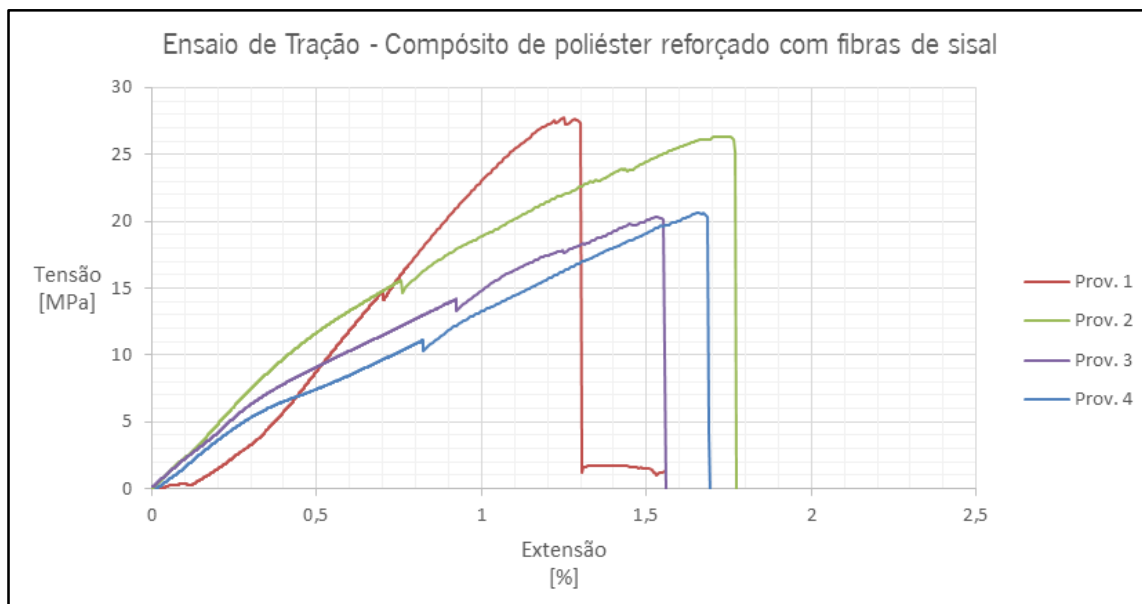


Tabela de dados e resultados experimentais dos provetes de tração:

Proveite	Largura [mm]	Espessura [mm]	Tensão de Ruptura [MPa]	Deformação na ruptura [%]	Módulo de Elasticidade [GPa]
Prov. 1	25,54	5,13	27,7	1,2	5,4
Prov. 2	26,29	5,60	26,4	1,7	5,6
Prov. 3	25,60	5,43	20,3	1,5	5,1
Prov. 4	26,31	5,02	20,7	1,7	4,3
Média					
±	25,94 ± 0,42	5,30 ± 0,27	23,8 ± 3,8	1,5 ± 0,2	5,1 ± 0,6
Desvio Padrão					

➤ Propriedades Mecânicas à flexão

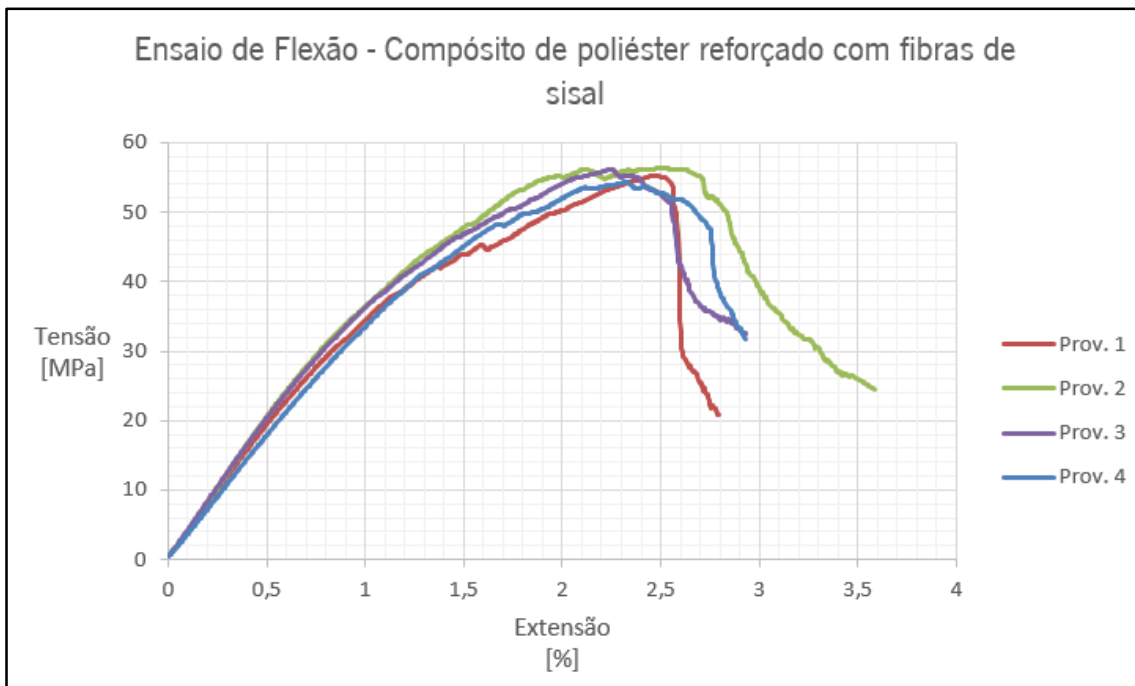


Tabela de dados e resultados experimentais dos provetes de flexão:

Provete	Largura [mm]	Espessura [mm]	Tensão de Ruptura [MPa]	Deformação à ruptura [%]	Módulo de Elasticidade [GPa]
Prov. 1	16,35	5,75	55,2	2,5	3,9
Prov. 2	16,82	5,79	56,4	2,5	4,0
Prov. 3	16,38	5,86	56,1	2,3	4,1
Prov. 4	16,16	5,87	54,3	2,3	3,5
Média					
±	16,43 ± 0,28	5,82 ± 0,06	55,5 ± 0,9	2,4 ± 0,1	3,9 ± 0,3
Desvio Padrão					

Anexo VI

Resultados da caracterização dos compósitos de resina de poliéster com fibras de Linho orientadas a $\pm 45^\circ$ e a $0^\circ/90^\circ$

➤ Propriedades Mecânicas à tração para fibras de linho orientadas a $\pm 45^\circ$

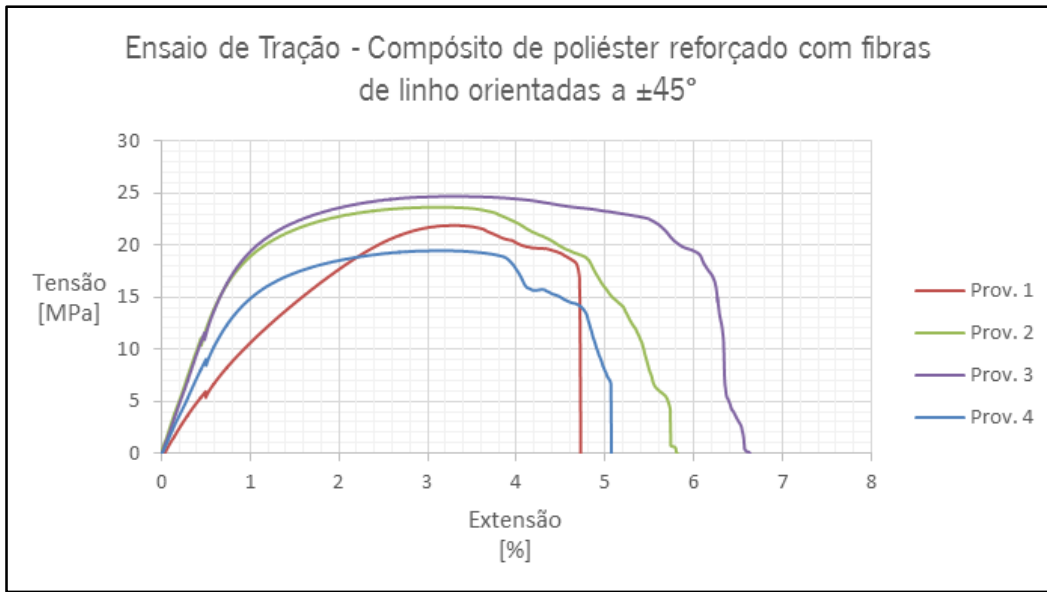


Tabela de dados e resultados experimentais dos provetes de tração para fibras de linho orientadas a $\pm 45^\circ$:

Proвете	Largura [mm]	Espessura [mm]	Tensão de Ruptura [MPa]	Deformação na ruptura [%]	Módulo de Elasticidade [GPa]
Prov. 1	25,42	3,34	21,9	3,3	2,7
Prov. 2	25,12	3,42	23,6	3,1	3,8
Prov. 3	28,08	3,35	24,7	3,3	4,1
Prov. 4	26,07	4,1	19,5	3,2	3,1
Média					
±	26,17 ± 1,33	3,55 ± 0,37	22,4 ± 2,3	3,2 ± 0,1	3,4 ± 0,6
Desvio Padrão					

➤ Propriedades Mecânicas à flexão para fibras de linho orientadas a $\pm 45^\circ$

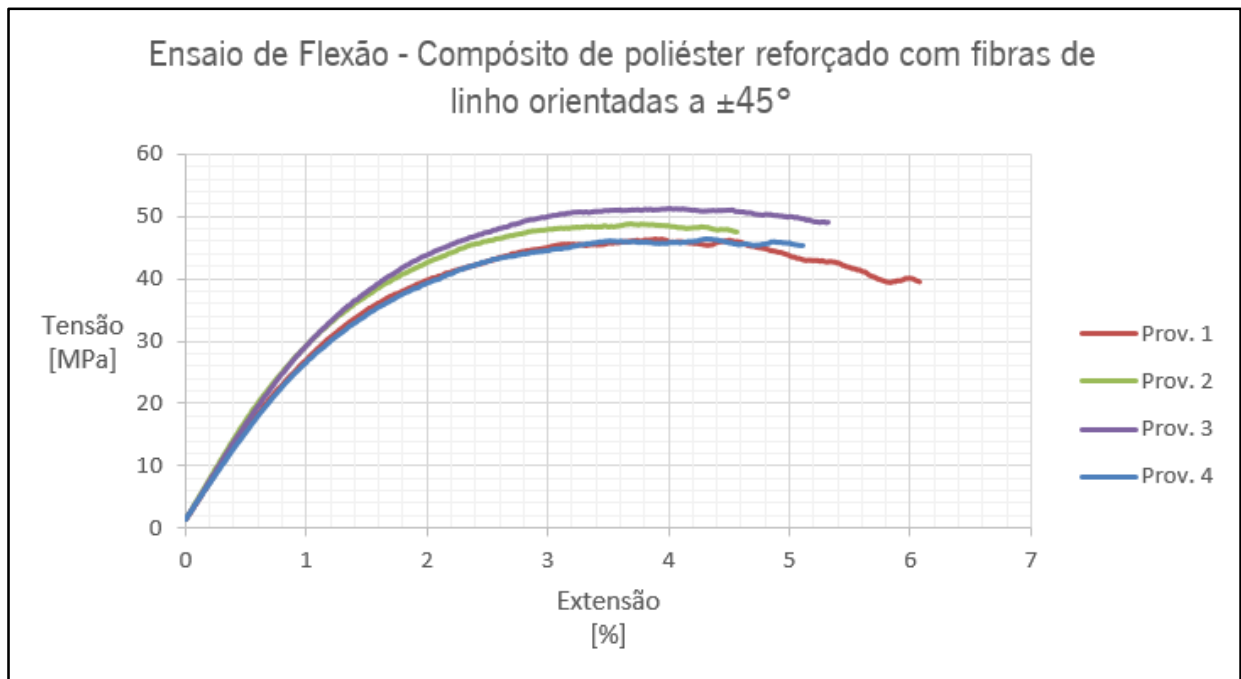


Tabela de dados e resultados experimentais dos provetes de flexão para fibras de linho orientadas a $\pm 45^\circ$:

Provete	Largura [mm]	Espessura [mm]	Tensão de Ruptura [MPa]	Deformação na ruptura [%]	Módulo de Elasticidade [GPa]
Prov. 1	15,72	3,39	46,4	3,9	3,1
Prov. 2	16,62	3,32	48,8	3,7	3,3
Prov. 3	15,80	3,38	51,2	4,0	3,2
Prov. 4	15,56	3,40	46,3	4,3	2,9
Média					
±	14,89 ± 0,38	3,41 ± 0,05	48,2 ± 2,3	4,0 ± 0,3	3,1 ± 0,2
Desvio Padrão					

➤ Propriedades Mecânicas à tração para fibras de linho orientadas a 0°/90°

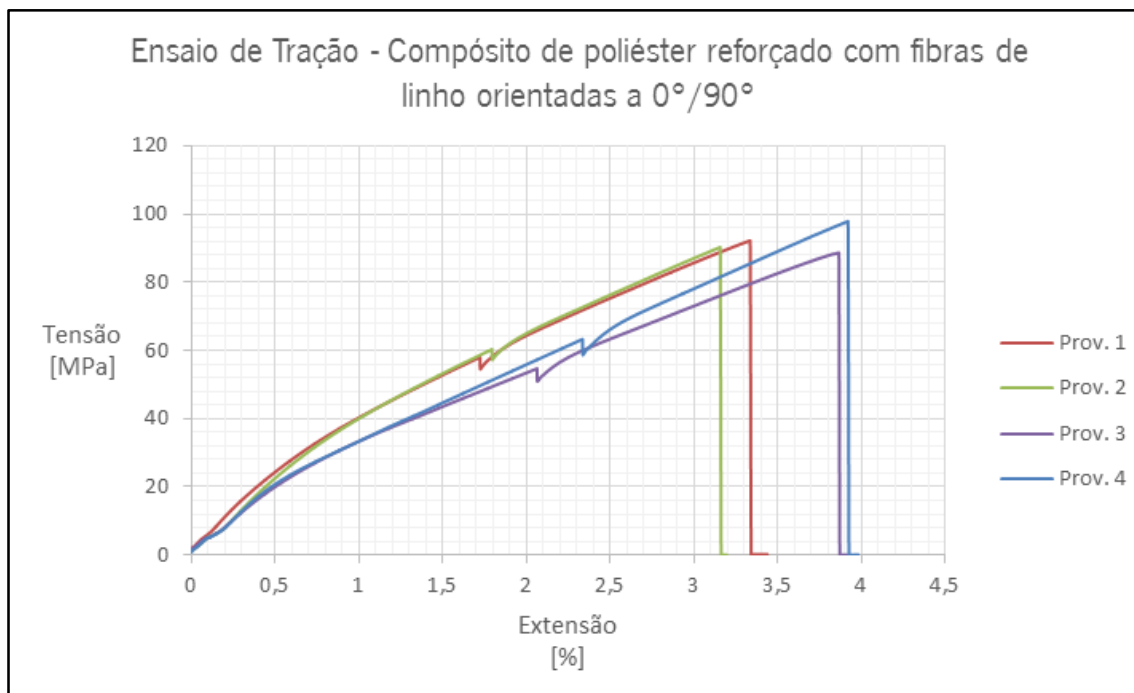


Tabela de dados e resultados experimentais dos provetes de tração para fibras de linho orientadas a 0°/90°:

Provete	Largura [mm]	Espessura [mm]	Tensão de Ruptura [MPa]	Deformação na ruptura [%]	Módulo de Elasticidade [GPa]
Prov. 1	27,0	3,5	92,2	3,3	9,6
Prov. 2	25,3	3,3	90,3	3,2	10,6
Prov. 3	24,6	3,5	88,6	3,9	9,6
Prov. 4	25,8	3,1	97,8	3,9	11,3
Média					
±	25,68 ± 1,01	3,35 ± 0,19	92,2 ± 4,0	3,6 ± 0,4	10,3 ± 0,8
Desvio Padrão					

➤ Propriedades Mecânicas à flexão para fibras de linho orientadas a 0°/90°

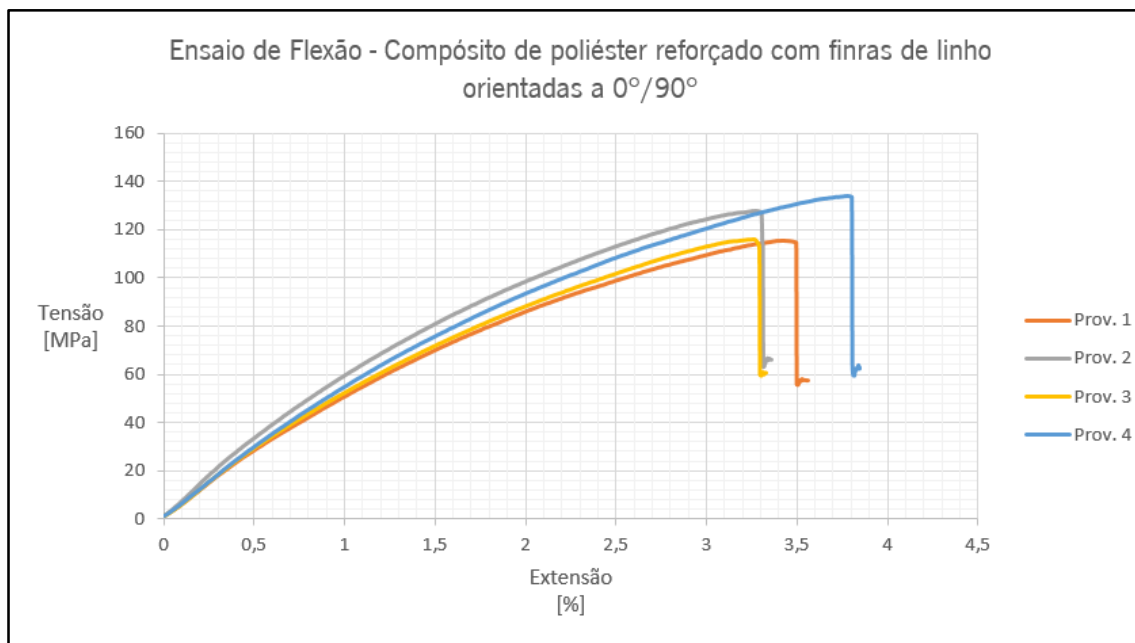


Tabela de dados e resultados experimentais dos provetes de flexão para fibras de linho orientadas a 0°/90°:

Provete	Largura [mm]	Espessura [mm]	Tensão de Ruptura [MPa]	Deformação na ruptura [%]	Módulo de Elasticidade [GPa]
Prov. 1	16,6	3,4	115,7	3,4	5,9
Prov. 2	15,5	3,3	127,9	3,3	7,3
Prov. 3	15,8	3,6	115,8	3,3	6,0
Prov. 4	14,9	3,6	133,9	3,8	5,9
Média					
±	15,70 ± 0,71	3,5 ± 0,15	123,3 ± 9,1	3,5 ± 0,2	6,3 ± 0,7
Desvio Padrão					

Anexo VII

Resultados da caracterização dos compósitos de bioresina de epóxico com fibras de sisal

➤ Propriedades Mecânicas à tração

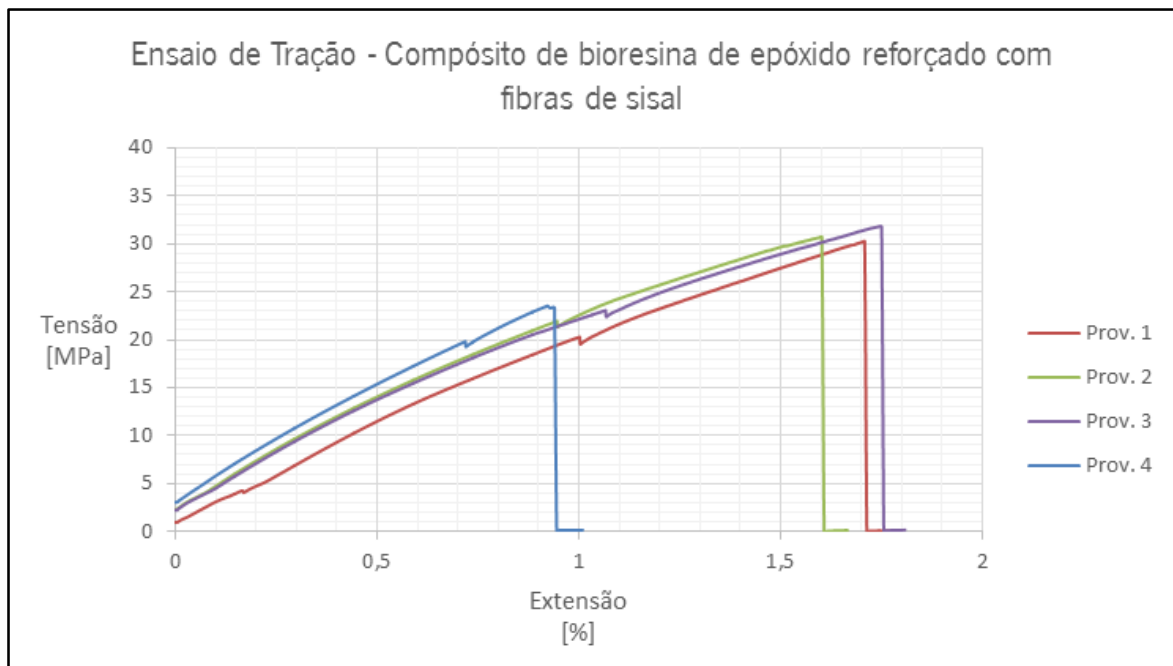


Tabela de dados e resultados experimentais dos provetes de tração:

Provete	Largura [mm]	Espessura [mm]	Tensão de Ruptura [MPa]	Deformação na ruptura [%]	Módulo de Elasticidade [GPa]
Prov. 1	25,4	5,4	30,2	1,7	3,5
Prov. 2	27,0	5,3	30,7	1,6	3,8
Prov. 3	26,4	5,1	31,8	1,7	4,1
Prov. 4	26,7	5,6	30,2	1,7	3,5
Média					
±	26,38 ± 0,69	5,35 ± 0,21	30,7 ± 0,8	1,7 ± 0,05	3,7 ± 0,3
Desvio Padrão					

➤ Propriedades Mecânicas à flexão

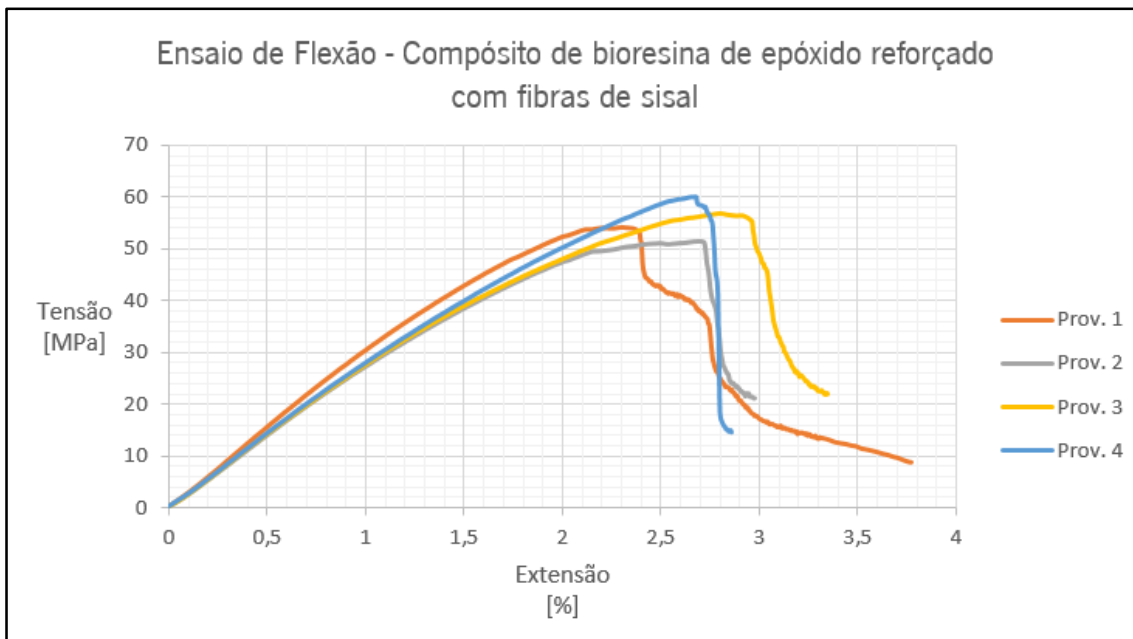


Tabela de dados e resultados experimentais dos provetes de flexão:

Provete	Largura [mm]	Espessura [mm]	Tensão de Rotura [MPa]	Deformação na rotura [%]	Módulo de Elasticidade [GPa]
Prov. 1	16,5	5,8	54,1	2,3	3,0
Prov. 2	16,1	5,7	51,5	2,7	2,8
Prov. 3	15,9	5,8	56,8	2,8	2,8
Prov. 4	16,8	5,9	59,9	2,7	2,8
Média					
±	16,33 ± 0,40	5,80 ± 0,08	55,6 ± 3,6	2,6 ± 0,2	2,9 ± 0,1
Desvio Padrão					

Anexo VIII

Resultados da caracterização dos compósitos de bioresina de epóxico com fibras de Linho orientadas a $\pm 45^\circ$ e a $0^\circ/90^\circ$

- Propriedades Mecânicas à tração para fibras de linho orientadas a $\pm 45^\circ$

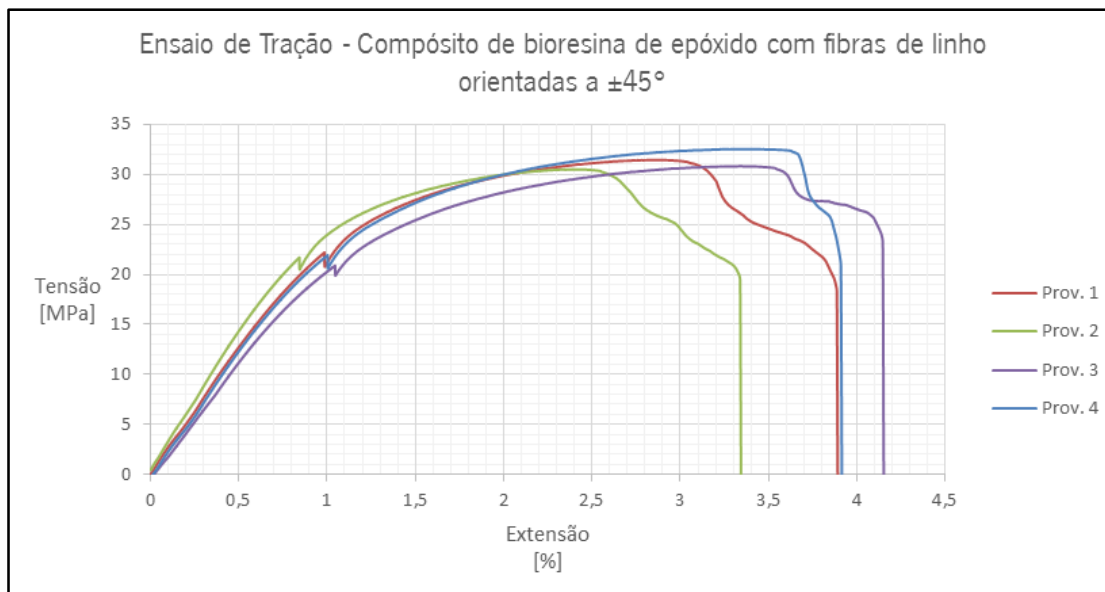


Tabela de dados e resultados experimentais dos provetes de tração para fibras de linho orientadas a $\pm 45^\circ$:

Provete	Largura [mm]	Espessura [mm]	Tensão de Ruptura [MPa]	Deformação na ruptura [%]	Módulo de Elasticidade [GPa]
Prov. 1	24,2	3,5	31,4	2,9	4,6
Prov. 2	23,3	3,5	30,5	2,3	4,2
Prov. 3	24,1	3,6	30,8	3,3	4,3
Prov. 4	23,3	3,5	32,5	3,3	4,5
Média					
±	23,73 ± 3,53	3,55 ± 0,37	31,3 ± 0,9	3,0 ± 0,5	4,4 ± 0,2
Desvio Padrão					

➤ Propriedades Mecânicas à flexão para fibras de linho orientadas a $\pm 45^\circ$

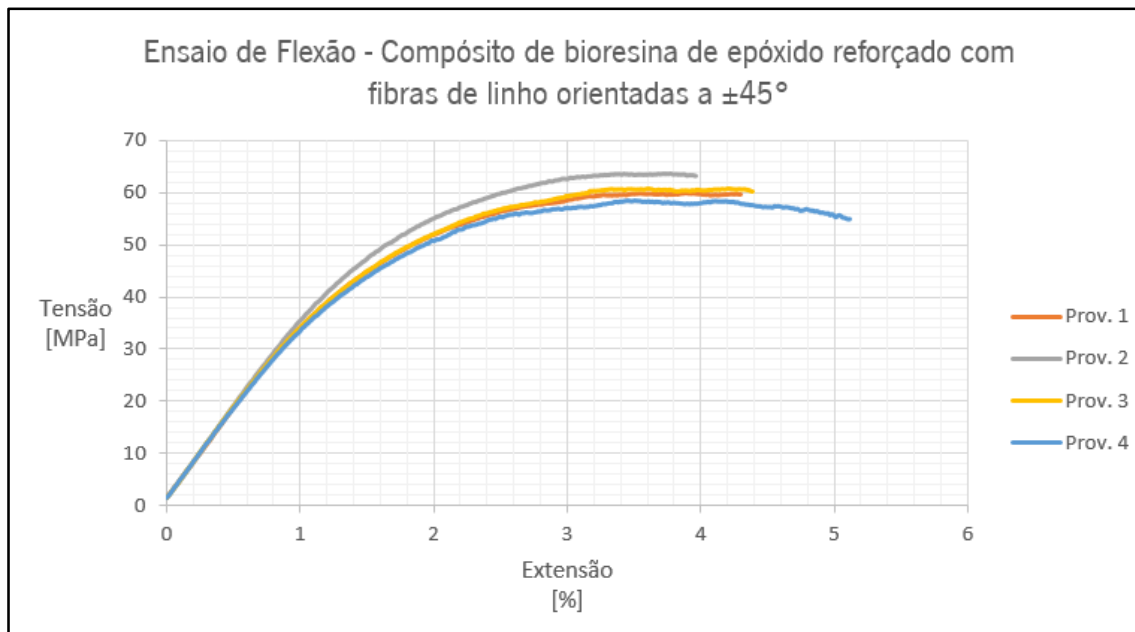


Tabela de dados e resultados experimentais dos provetes de flexão para fibras de linho orientadas a $\pm 45^\circ$:

Provete	Largura [mm]	Espessura [mm]	Tensão de Ruptura [MPa]	Deformação na ruptura [%]	Módulo de Elasticidade [GPa]
Prov. 1	14,4	3,5	59,8	3,9	3,4
Prov. 2	13,6	3,5	63,7	3,8	3,5
Prov. 3	13,4	3,5	60,7	3,6	3,6
Prov. 4	12,9	3,5	58,4	3,5	3,5
Média					
±	13,58 ± 0,62	3,5 ± 0,00	60,7 ± 2,2	3,7 ± 0,2	3,5 ± 0,1
Desvio Padrão					

➤ Propriedades Mecânicas à tração para fibras de linho orientadas a 0°/90°

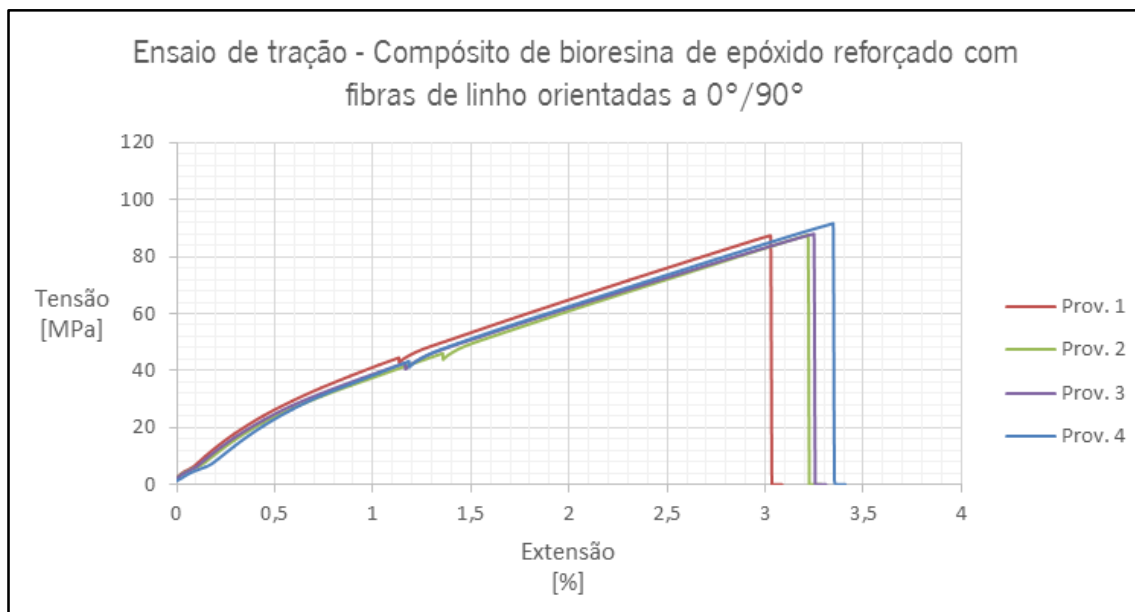


Tabela de dados e resultados experimentais dos provetes de tração para fibras de linho orientadas a 0°/90°:

Provete	Largura [mm]	Espessura [mm]	Tensão de Rotura [MPa]	Deformação na rotura [%]	Módulo de Elasticidade [GPa]
Prov. 1	26,2	3,5	87,4	3,0	10,1
Prov. 2	26,1	3,5	87,7	3,2	10,5
Prov. 3	26,5	3,5	88,0	3,3	9,3
Prov. 4	26,1	3,5	91,7	3,4	9,1
Média					
±	26,23 ± 0,19	3,5 ± 0,00	88,7 ± 2,0	3,2 ± 0,2	9,8 ± 0,7
Desvio Padrão					

➤ Propriedades Mecânicas à flexão para fibras de linho orientadas a 0°/90°

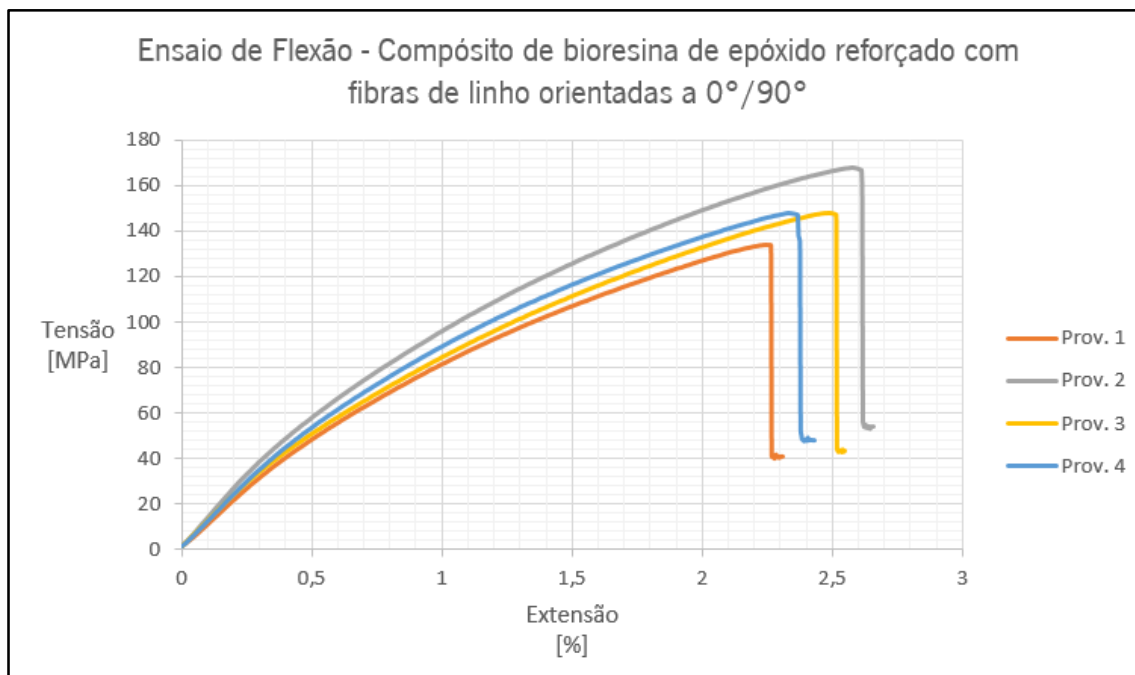


Tabela de dados e resultados experimentais dos provetes de flexão para fibras de linho orientadas a 0°/90°:

Provete	Largura [mm]	Espessura [mm]	Tensão de Ruptura [MPa]	Deformação na ruptura [%]	Módulo de Elasticidade [GPa]
Prov. 1	14,4	3,5	134,0	2,3	10,6
Prov. 2	13,6	3,5	168,2	2,6	12,9
Prov. 3	13,4	3,5	148,0	2,5	11,2
Prov. 4	12,9	3,5	147,8	2,3	11,7
Média					
±	13,58 ± 0,62	3,5 ± 0,00	149,5 ± 14,1	2,4 ± 0,2	11,6 ± 1,0
Desvio Padrão					

Anexo IX

Resultados da caracterização da resina termoplástica de PLA

➤ Propriedades Mecânicas à tração

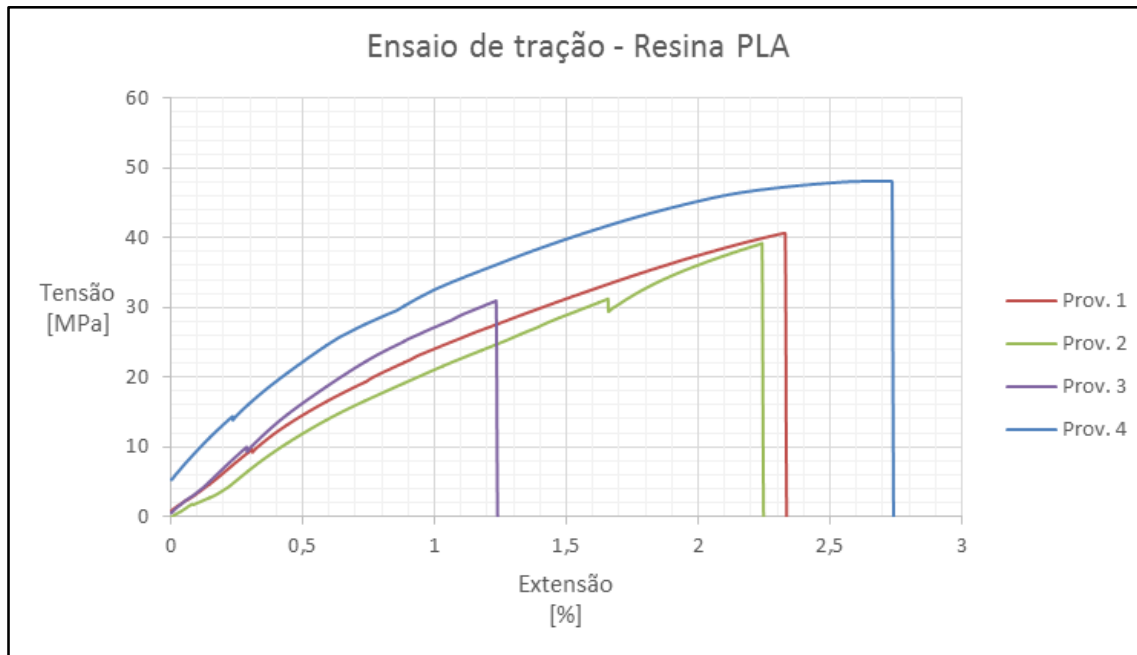


Tabela de dados e resultados experimentais dos provetes de tração:

Provete	Largura [mm]	Espessura [mm]	Tensão de Ruptura [MPa]	Deformação à ruptura [%]	Módulo de Elasticidade [GPa]
Prov. 1	23,9	6,9	40,6	2,3	3,2
Prov. 2	23,6	6,2	39,2	2,2	-
Prov. 3	21,9	6, ⁴	30,9	1,2	3,6
Prov. 4	25,8	6,1	48,1	2,7	3,3
Média					
±	23,8 ± 1,6	6,3 ± 0,4	39,7 ± 7,0	2,1 ± 0,6	3,4 ± 0,2
Desvio Padrão					

➤ Propriedades Mecânicas à flexão

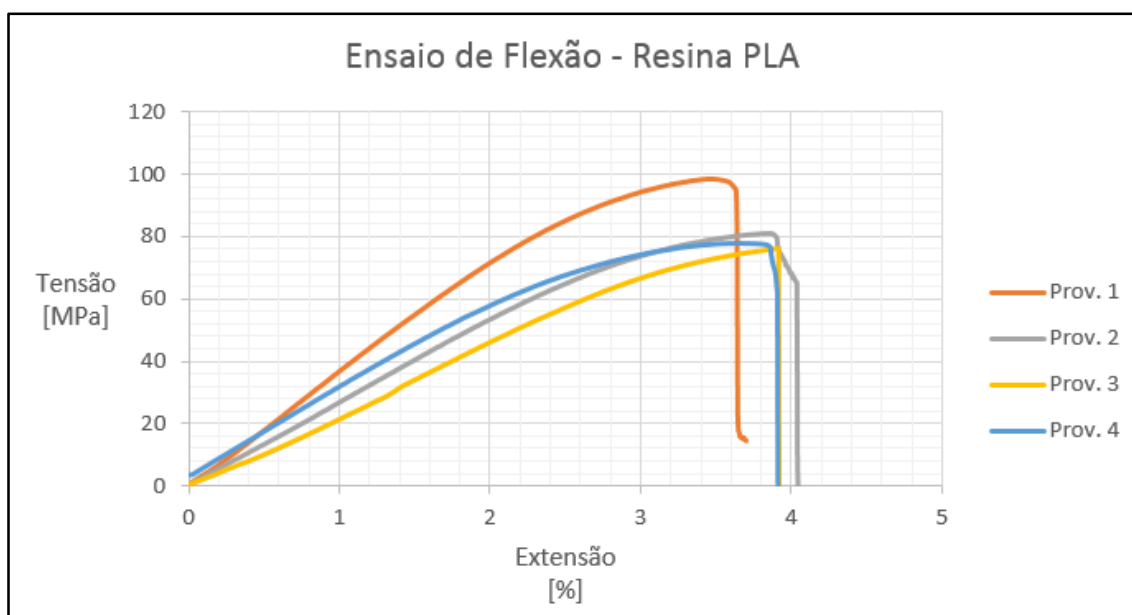


Tabela de dados e resultados experimentais dos provetes de flexão:

Provete	Largura [mm]	Espessura [mm]	Tensão de Ruptura [MPa]	Deformação à ruptura [%]	Módulo de Elasticidade [GPa]
Prov. 1	14,3	4,9	98,4	3,5	3,2
Prov. 2	14,3	5,0	81,2	3,8	2,6
Prov. 3	14,4	5,0	76, ⁴	3,9	1,9
Prov. 4	14,4	5,3	77,8	3,6	2,9
Média					
±	14,4 ± 0,1	5,1 ± 0,2	83,4 ± 10,2	3,7 ± 0,2	2,7 ± 0,6
Desvio Padrão					

Anexo X

Resultados da caracterização dos compósitos de PLA com fibras curtas de sisal

➤ Propriedades Mecânicas à tração

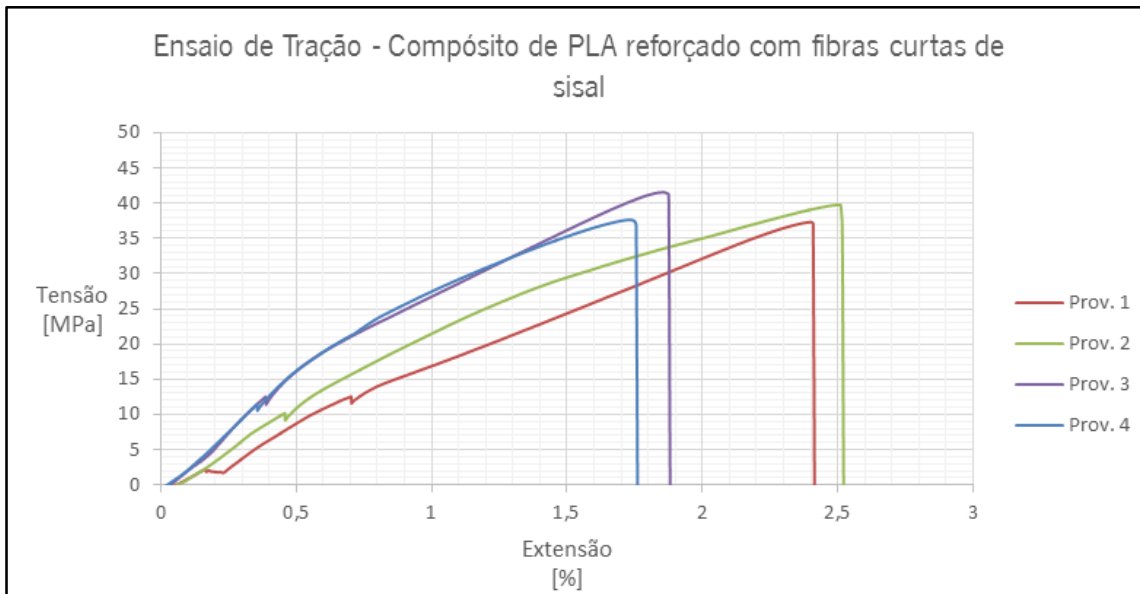


Tabela de dados e resultados experimentais dos provetes de tração:

Prove	Largura [mm]	Espessura [mm]	Tensão de Ruptura [MPa]	Deformação na ruptura [%]	Módulo de Elasticidade [GPa]
Prov. 1	21,4	6,4	37,3	2,4	5,0
Prov. 2	24,0	6,3	39,8	2,5	4,7
Prov. 3	22,8	5,0	41,5	1,9	5,4
Prov. 4	23,4	5,0	37,6	1,7	4,6
Média					
±	22,90 ± 1,11	5,68 ± 0,78	39,1 ± 2,0	2,1 ± 0,4	4,9 ± 0,4
Desvio Padrão					

➤ Propriedades Mecânicas à flexão

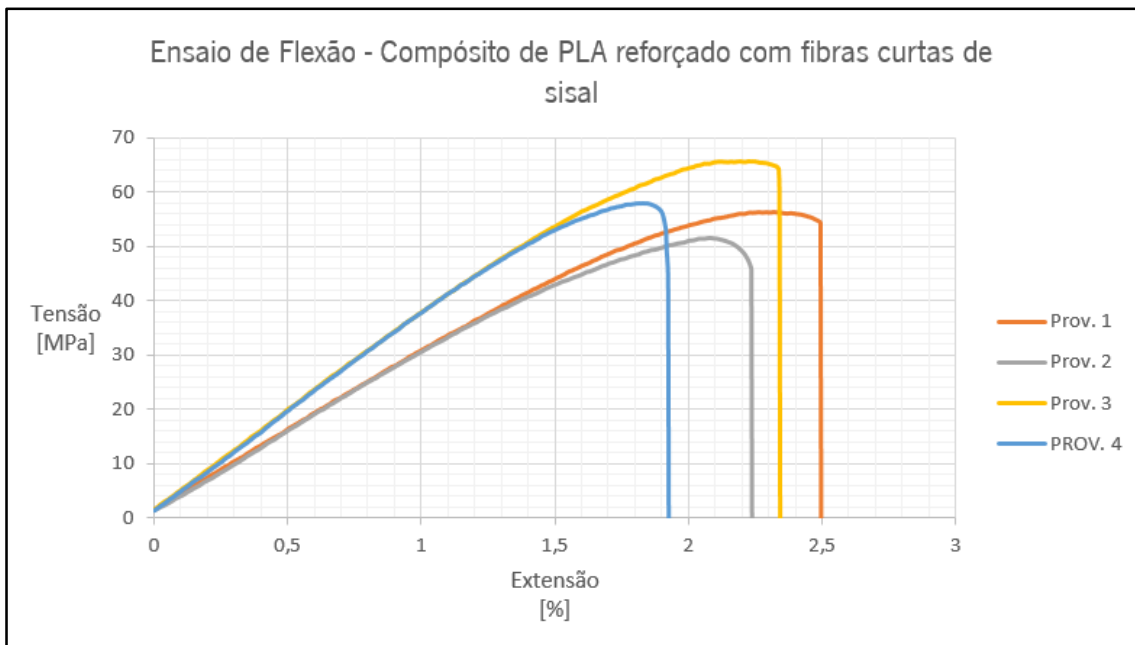


Tabela de dados e resultados experimentais dos provetes de flexão:

Provete	Largura [mm]	Espessura [mm]	Tensão de Ruptura [MPa]	Deformação na ruptura [%]	Módulo de Elasticidade [GPa]
Prov. 1	12,9	3,6	56,2	2,3	3,0
Prov. 2	15,1	3,6	51,5	2,4	2,9
Prov. 3	13,3	3,4	65,7	2,2	3,7
Prov. 4	15,7	3,4	57,8	1,8	3,5
Média					
±	14,25 ± 1,36	3,5 ± 0,12	57,8 ± 5,9	2,1 ± 0,2	3,3 ± 0,4
Desvio Padrão					

Anexo XI

Resultados da caracterização dos compósitos de PLA com fibras curtas de linho

➤ Propriedades Mecânicas à tração

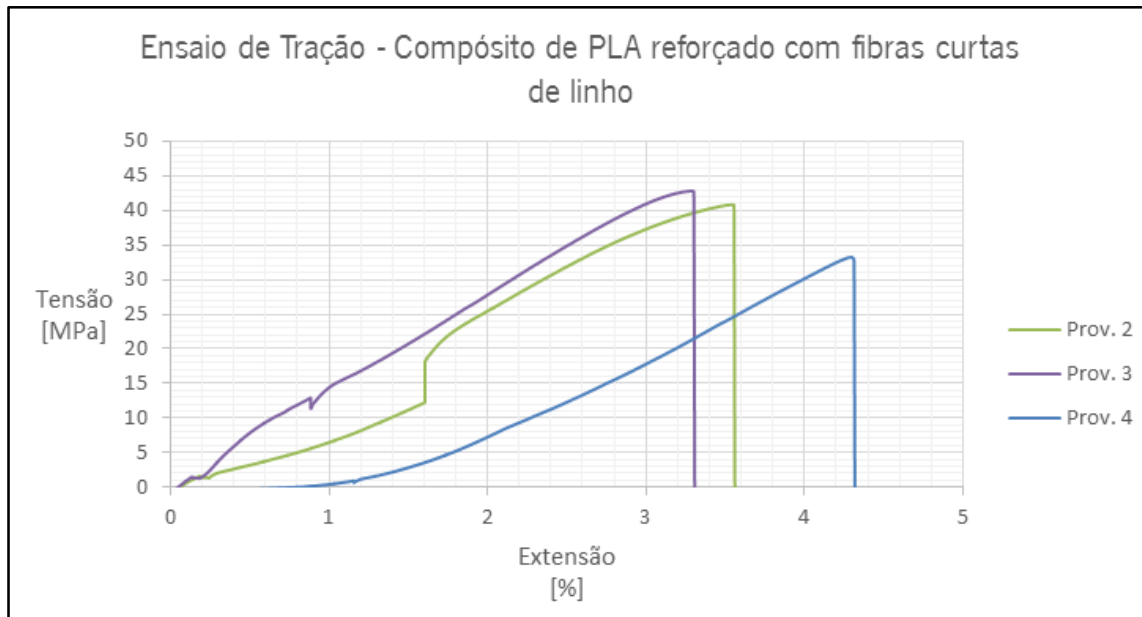


Tabela de dados e resultados experimentais dos provetes de tração:

Provete	Largura [mm]	Espessura [mm]	Tensão de Rotura [MPa]	Deformação na rotura [%]	Módulo de Elasticidade [GPa]
Prov. 1	23,8	7,1	41,2	2,3	6,1
Prov. 2	22,0	7,3	40,8	3,5	3,3
Prov. 3	24,2	7,1	42,8	3,3	5,4
Prov. 4	25,2	7,2	-	-	-
Média					
±	23,8 ± 1,34	7,2 ± 0,1	41,6 ± 1,1	3,0 ± 0,6	4,9 ± 1,5
Desvio Padrão					

➤ Propriedades Mecânicas à flexão

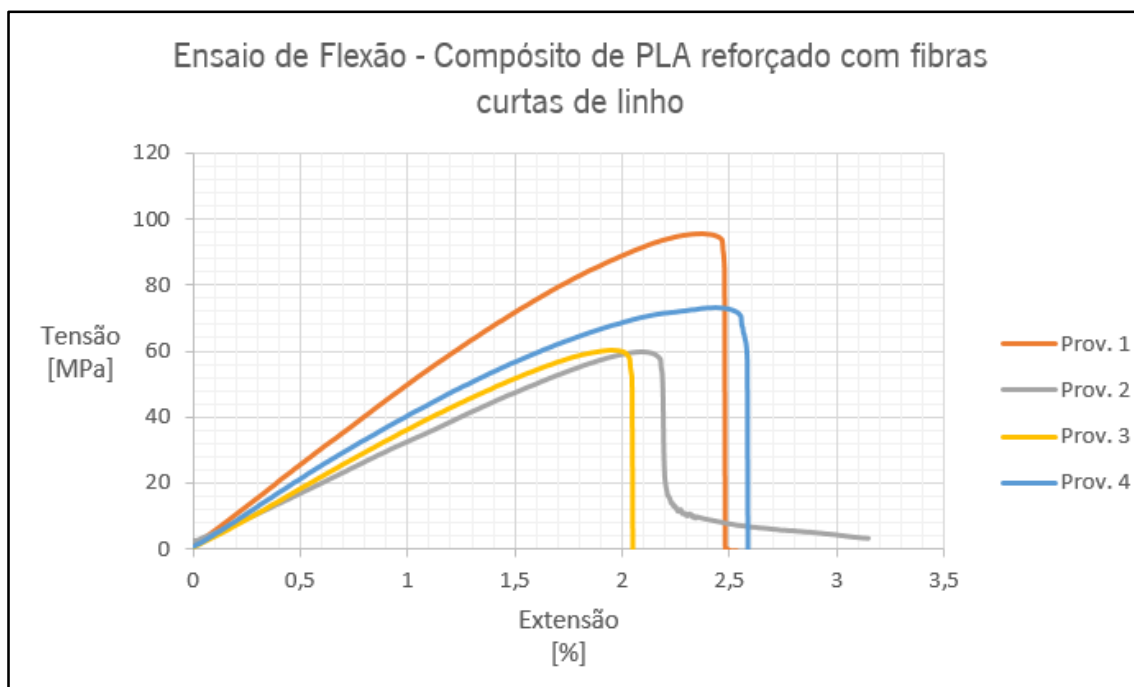


Tabela de dados e resultados experimentais dos provetes de flexão:

Provete	Largura [mm]	Espessura [mm]	Tensão de Ruptura [MPa]	Deformação na ruptura [%]	Módulo de Elasticidade [GPa]
Prov. 1	14,9	4,5	95,4	2,4	4,9
Prov. 2	13,03	4,8	59,9	2,1	2,9
Prov. 3	13,7	4,7	60,2	1,9	3,4
Prov. 4	14,4	4,6	73,0	2,4	4,1
Média					
±	14,01 ± 0,82	4,65 ± 0,13	72,1 ± 16,7	2,2 ± 0,2	3,8 ± 0,9
Desvio Padrão					