



JOÃO RUI AGUIAR
DE FREITAS

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE
COMPÓSITOS DE MATRIZ EPÓXI COM
FIBRAS DE CONTEIRA E DE SISAL**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia de Produção

ORIENTADORES

Professor Doutor Célio Gabriel Figueiredo Pina

Professora Doutora Rosa Maria Marquito Marat
Mendes

Setembro, 2021

JOÃO RUI AGUIAR
DE FREITAS

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE
COMPÓSITOS DE MATRIZ EPÓXI COM
FIBRAS DE CONTEIRA E DE SISAL**

JÚRI

Presidente: Professor Doutor Pedro Filipe do Carmo
Cunha

Orientador: Professor Doutor Célio Gabriel
Figueiredo Pina

Vogal: Professora Doutora Ana Mafalda Saldanha
Guedes

Setembro, 2021

Resumo

Existe uma grande necessidade na procura de materiais inovadores, económicos e sustentáveis. O desenvolvimento de materiais mais resistentes, duráveis e com elevada ductilidade é possível utilizando a incorporação de fibras, tais como as naturais, nos materiais compósitos. Assim, o presente trabalho teve como objetivo produzir e caracterizar compósitos com fibra de conteira e fibra de sisal, numa matriz de epóxi. Para tal, foram fabricados compósitos com percentagens de fibra a variar entre 2.5% a 10% em peso, com um tamanho de fibra de 6 mm. Estas fibras foram submetidas a um tratamento alcalino com NaOH, para garantir uma melhor adesão das fibras à matriz. Para a caracterização dos materiais, recorreu-se ao método de Arquimedes, à macroscopia e microscopia eletrónica de varrimento e as propriedades mecânicas foram obtidas através de ensaios de dureza e de tração. Os resultados mostraram uma variação pouco significativa na densidade dos compósitos com o aumento da quantidade de fibra incorporada, e também uma diminuição da resistência à tração, ductilidade e tenacidade à fratura dos materiais. Por outro lado, com este aumento da quantidade registou-se um aumento do módulo de elasticidade, assim como um aumento da dureza dos materiais compósitos. Em suma a adição de fibra aumenta de forma significativa a estabilidade dimensional dos materiais, contudo conduz a uma redução da resistência à tração.

Palavras-chave: Compósitos; Resina Epóxi; Fibras de Conteira; Fibras de Sisal e Ensaio Mecânicos.

Abstract

There is a great need in the search for innovative, economical and sustainable materials. The development of materials more resistant, durable and with high ductility is possible using the incorporation of fibers, such as natural fibers, in composite materials. Thus, the present work aimed to produce and characterise composites with conteira fibre and sisal fibre, in an epoxy matrix. For this, composites with fibre percentages varying between 2.5% and 10% in weight, with a fibre size of 6 mm, were fabricated. These fibres were submitted to an alkaline treatment with NaOH, to guarantee a better adhesion of the fibres to the matrix. For the characterisation of the materials, the Archimedes method, macroscopy and scanning electron microscopy were used and the mechanical properties were obtained through hardness and tensile tests. The results showed a small significant variation in the density of the composites with the increase of the amount of fibre incorporated, and also a decrease in the tensile strength, ductility and fracture toughness of the materials. On the other hand, with this increase in the amount there was an increase in the modulus of elasticity, as well as an increase in the hardness of the composite materials. In summary, the addition of fibre significantly increases the dimensional stability of the materials, but leads to a reduction in tensile strength.

Keywords: Composites; Epoxy Resin; Conteira Fibers; Sisal Fibers and Mechanical Testing.

Agradecimentos

Começo por agradecer aos meus orientadores, ao Professor Doutor Célio Gabriel Figueiredo Pina e à Professora Doutora Rosa Maria Marquito Marat Mendes, por concederem a oportunidade de desenvolver o presente trabalho sob a sua orientação, por todo o apoio incondicional, dedicação, confiança, soluções e incentivos. Estou extremamente agradecido pela partilha de conhecimento e orientações valiosas.

À Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Setúbal, por todo o conhecimento obtido ao longo da formação. Um especial obrigado ao Engenheiro Gonçalo Torres, técnico dos Laboratórios de Mecânica e Materiais da ESTSetúbal, pela sua ajuda e conhecimento em termos práticos dos equipamentos tecnológicos utilizados ao longo do estudo.

À empresa *Fibrenamics*, pelo fornecimento das fibras de conteira e de sisal para a elaboração deste estudo, assim como à empresa MR Dinis dos Santos, por ter fornecido a resina epóxi.

À minha mãe, à minha irmã e à minha tia, os meus pilares, por me ajudarem nos momentos em que mais precisei, pelo incentivo e pela força que me deram todos os dias até hoje.

Por fim, a toda a minha família e amigos, por estarem presentes nos bons e maus momentos ao longo desta árdua caminhada.

Índice

Resumo	v
<i>Abstract</i>	vii
Agradecimentos	ix
Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xix
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos	xv
Lista de Símbolos	xvii
Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1. Introdução e âmbito do trabalho	3
1.2. Objetivos	4
1.3. Estrutura de capítulos	4
Capítulo 2	5
Revisão Bibliográfica	5
2.1. Revisão geral	7
2.2. Fibras naturais	7
2.2.1. Conteira e Sisal	10
2.2.2. Preparação e tratamento das fibras	12
2.3. Compósitos com matriz polimérica	12
2.3.1. Compósitos de matriz poliméricas reforçadas com fibras naturais	15
2.4. Aplicações	16
Capítulo 3	21
Materiais e métodos	21
3.1. Materiais	23

3.2. Preparação das fibras	24
3.3. Moldes	25
3.4. Produção de compósitos	27
3.5. Ensaio de densidade	28
3.6. Ensaio mecânico	29
3.6.1. Ensaio de tração	30
3.6.2. Análise macro e micrográficas	31
3.6.3. Ensaio de dureza	32
Capítulo 4	35
Resultados	35
4.1. Ensaio de tração	37
4.1.1. Módulo de <i>Young</i>	38
4.1.2. Extensão à fratura	39
4.1.3. Tensão de rotura	40
4.1.4. Tenacidade à fratura	41
4.2. Ensaio de dureza	42
4.3. Medição da densidade	43
4.4. Macrografias	44
4.4.1. Macrografias das fibras	44
4.4.2. Macrografias dos compósitos	45
4.4.3. Macrografias da zona de fratura dos compósitos	47
4.5. Micrografia da zona de fratura dos compósitos	49
Capítulo 5	53
Discussão	53
Capítulo 6	59

Conclusões e Propostas de Trabalhos Futuros	59
6.1. Conclusões	61
6.2. Propostas de trabalhos futuros	61
Bibliografia	63
Anexos	69

Lista de Figuras

Figura 1- Classificação das fibras têxteis	7
Figura 2 – Alguns exemplos de fibras naturais	8
Figura 3 – Constituição estrutural de uma fibra vegetal	9
Figura 4 – Conteira, <i>Hedychium gardnerianum</i>	10
Figura 5 – Sisal, <i>Agave sisalana</i>	11
Figura 6 – Resina epóxi à base de <i>Bisfenol-A</i>	14
Figura 7 – Resina epóxi à base de <i>Bisfenol-F</i> e ou <i>Novolac</i>	14
Figura 8 – Resina epóxi bromada	14
Figura 9 – Resina epóxi flexível	15
Figura 10 - Uso de fibras naturais para compósitos na indústria automóvel europeia em 2012 (com um volume total de 80.000 toneladas)	17
Figura 11 - Componentes automóveis produzidos com compósitos de fibras naturais: a) <i>Mercedes Classe A</i> ; b) <i>BMW Série 7</i> ; c) <i>Bugster (Fiat)</i>	17
Figura 12 – Alguns exemplos de plicações das fibras naturais em outras indústrias: a) Soalho extrudido em compósito; b) Guitarra produzida com compósito reforçado com fibras de linho; c) Pormenor do fabrico dos painéis; d) Cobertura de fachada produzida num compósito de bioresina reforçado com fibras de cânhamo	20
Figura 13.1 – Fibras naturais: (a) de conteira; (b) de sisal	24
Figura 13.2 – Processo de tratamento das fibras. Adaptado	25
Figura 14 – Modelação do provete em 3D	26
Figura 15 – Processo de produção dos moldes. Adaptado	27
Figura 16 – Procedimento do Método de Arquimedes: (a) amostras; (b) medição da massa fora de água; (c) medição da massa imersa em água; (c) cálculos	29

Figura 17 – Máquina de ensaios de tração TS300 e extensómetro axial <i>Epsilon Model 3542</i>	30
Figura 18 – Exemplo de uma curva de tensão vs extensão um ensaio de tração de um provete de resina epóxi	31
Figura 19 - Microscópio eletrónico de varrimento (MEV): FEG-SEM JEOL JSM-7001F do MicroLab no IST-UL	32
Figura 20 – Máquina de ensaios de dureza <i>INNOVATEST FALCON 450</i>	33
Figura 21 – Exemplo de um ensaio de dureza por penetração	34
Figura 22 - Tensão-extensão para provetes com fibra de conteira: (a) curvas típicas da tensão-extensão; (b) ampliação das curvas tensão-extensão	37
Figura 23 - Tensão-extensão para provetes com fibra de sisal: (a) curvas típicas da tensão-extensão;(b) ampliação das curvas tensão-extensão	38
Figura 24 - Módulo de <i>Young</i> (E) dos compósitos	39
Figura 25 - Extensão à fratura (ϵ_f) dos compósitos	40
Figura 26 - Tensão de rotura (σ_R) dos compósitos	41
Figura 27 - Tenacidade à fratura (U) dos compósitos	42
Figura 28 - Dureza (HV) dos compósitos	43
Figura 29 - Densidade dos compósitos (ρ)	44
Figura 30 – Macrografias das fibras de conteira e de sisal antes e depois do tratamento com NaOH: (a) Fibras de conteira antes do tratamento; (b) Fibras de conteira após o tratamento; (c) Fibras de sisal antes do tratamento; (d) Fibras de sisal após o tratamento	45
Figura 31 - Macrografias dos materiais compósitos de conteira: (a) 2,5% de conteira; (b) 5% de conteira; (c) 7,5% de conteira; (d) 10% de conteira	46
Figura 32 - Macrografias dos materiais compósitos de sisal: (a) 2,5% de sisal; (b) 5% de sisal; (c) 7,5% de sisal; (d) 10% de sisal	47

Figura 33 - Macrografia da zona de fratura dos provetes de conteira: (a) 2,5% de conteira; (b) 5% de conteira; (c) 7,5% de conteira; (d) 10% de conteira	48
Figura 34 - Macrografia da zona de fratura dos provetes de sisal: (a) 2,5% de sisal; (b) 5% de sisal; (c) 7,5% de sisal; (d) 10% de sisal	49
Figura 35 – MEV com ampliação a 40x: a) 2,5% de conteira; b) 10% de conteira; c) 2,5% de sisal; d) 10% de sisal	50
Figura 36 – MEV aos provetes de conteira: a) 2,5% de conteira 200x; b) 2,5 de conteira 100x; c) 10% de conteira 250x; d) 10% de conteira 200x	51
Figura 37 – MEV aos provetes de sisal: a) 2,5% de sisal 400x; b) 2,5 de sisal 150x; c) 10% de sisal 40x; d) 10% de sisal 350x	52
Figura 38 – Propriedades mecânicas dos compósitos estudados: a) Módulo de <i>Young</i> ; b) Extensão à fratura; c) Tensão de rotura; d) Tenacidade à fratura; e) Densidade	58
Figura A.1 – Ensaios experimentais dos provetes de epóxi	69
Figura A.2 – Ensaios experimentais dos provetes de conteira com 2,5% wt	69
Figura A.3 – Ensaios experimentais dos provetes de conteira com 5% wt	70
Figura A.4 – Ensaios experimentais dos provetes de conteira com 7,5% wt	70
FiguraA.5 – Ensaios experimentais dos provetes de conteira com 10% wt	71
Figura A.6 – Ensaios experimentais dos provetes de sisal com 2,5%wt	71
Figura A.7 – Ensaios experimentais dos provetes de sisal com 5% wt	72
Figura A.8 – Ensaios experimentais dos provetes de sisal com 7,5%wt	72
Figura A.9 – Ensaios experimentais dos provetes de sisal com 10%wt	73

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Classificação das fibras naturais e alguns exemplos	8
Tabela 2 – Efeito dos tratamentos nas fibras	12
Tabela 3 – Aplicações das fibras naturais para a indústria automóvel	18
Tabela 4 - Aplicações das fibras naturais em outras indústrias	19
Tabela 5 - Propriedades da resina e do endurecedor	23
Tabela 6 - Propriedades físicas e mecânicas do silicone ESQUIM RTV-491	26
Tabela 7 – Composição dos materiais	28
Tabela A.1 – Resultados dos ensaios experimentais dos provetes de resina epóxi	73
Tabela A.2 – Resultados dos ensaios experimentais dos provetes de conteira com 2,5%wt	73
Tabela A.3 – Resultados dos ensaios experimentais dos provetes de conteira com 5%wt	74
Tabela A.4 – Resultados dos ensaios experimentais dos provetes de conteira com 7,5%wt	74
Tabela A.5 – Resultados dos ensaios experimentais dos provetes de conteira com 10%wt	74
Tabela A.6 – Resultados dos ensaios experimentais dos provetes de sisal com 2,5%wt	75
Tabela A.7 – Resultados dos ensaios experimentais dos provetes de sisal com 5%wt	75
Tabela A.8 – Resultados dos ensaios experimentais dos provetes de sisal com 7,5%wt	75
Tabela A.9 – Resultados dos ensaios experimentais dos provetes de sisal com 10%wt	76

Tabela A.10 – Módulo de elasticidade da resina epóxi, dos compósitos de resina epóxi reforçados com fibras de conteira e dos compósitos de resina epóxi reforçados com fibras de sisal	76
Tabela A.11 – Extensão à fratura da resina epóxi, dos compósitos de resina epóxi reforçados com fibras de conteira e dos compósitos de resina epóxi reforçados com fibras de sisal	76
Tabela A.12 – Tensão de rotura da resina epóxi, dos compósitos de resina epóxi reforçados com fibras de conteira e dos compósitos de resina epóxi reforçados com fibras de sisal	76
Tabela A.13 – Tenacidade à fratura da resina epóxi, dos compósitos de resina epóxi reforçados com fibras de conteira e dos compósitos de resina epóxi reforçados com fibras de sisal	77
Tabela A.14 – Ensaio de densidade para os provetes de resina epóxi	77
Tabela A.15 – Ensaio de densidade para os provetes de conteira com 2,5% wt	77
Tabela A.16 – Ensaio de densidade para os provetes de conteira com 5% wt	78
Tabela A.17 – Ensaio de densidade para os provetes de conteira com 7,5% wt	78
Tabela A.18 – Ensaio de densidade para os provetes de conteira com 10% wt	78
Tabela A.19 – Ensaio de densidade para os provetes de sisal com 2,5% wt	79
Tabela A.20 – Ensaio de densidade para os provetes de sisal com 5% wt	79
Tabela A.21 – Ensaio de densidade para os provetes de sisal com 7,5% wt	79
Tabela A.22 – Ensaio de densidade para os provetes de sisal com 10% wt	80
Tabela A.23 – Densidade da resina epóxi, dos compósitos de resina epóxi reforçados com fibras de conteira e dos compósitos de resina epóxi reforçados com fibras de sisal	80
Tabela A.24 – Ensaio de dureza para os provetes de resina epóxi	80
Tabela A.25 – Ensaio de dureza para os provetes de conteira com 2,5% wt	80

Tabela A.26 – Ensaio de dureza para os provetes de coneteira com 5%wt	81
Tabela A.27 – Ensaio de dureza para os provetes de coneteira com 7,5%wt	81
Tabela A.28 – Ensaio de dureza para os provetes de coneteira com 10%wt	81
Tabela A.29 – Ensaio de dureza para os provetes de sisal com 2,5%wt	81
Tabela A.30 – Ensaio de dureza para os provetes de sisal com 5%wt	82
Tabela A.31 – Ensaio de dureza para os provetes de sisal com 7,5%wt	82
Tabela A.32 – Ensaio de dureza para os provetes de sisal com 10%wt	82
Tabela A.33 – M3dulo de elasticidade dos comp3sitos de resina ep3xi refor3ados com fibras de coneteira (0,5mm, 6mm e 12mm)	82
Tabela A.34 – Extens3o 3 fratura dos comp3sitos de resina ep3xi refor3ados com fibras de coneteira (0,5mm, 6mm e 12mm)	83
Tabela A.35 – Tens3o de rotura dos comp3sitos de resina ep3xi refor3ados com fibras de coneteira (0,5mm, 6mm e 12mm)	83
Tabela A.36 – Tenacidade 3 fratura dos comp3sitos de resina ep3xi refor3ados com fibras de coneteira (0,5mm, 6mm e 12mm)	83
Tabela A.37 – Dureza <i>Vickers</i> dos comp3sitos de resina ep3xi refor3ados com fibras de coneteira (0,5mm, 6mm e 12mm)	83
Tabela A.38 – Densidade dos comp3sitos de resina ep3xi refor3ados com fibras de coneteira (0,5mm, 6mm e 12mm)	84

Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos

3D	Espaço Tridimensional
CO ₂	Dióxido de Carbono
MEV	Microscópio Eletrónico de Varrimento
NaOH	Hidróxido de Sódio
pH	Potencial Hidrogeniónico
PLA	Poli (Ácido Láctico)
PP	Polipropileno
UV	Radiação Ultravioleta

Lista de Símbolos

E	Módulo de Elasticidade ou Módulo de <i>Young</i>
HV	Dureza <i>Vickers</i>
m^L	Massa do Corpo no Ar
m^F	Massa do Corpo Submerso no Fluido
U	Tenacidade à Fratura
ϵ	Extensão Axial
ϵ_f	Extensão à Fratura
ρ	Densidade
ρ^F	Densidade do Fluido de Imersão
σ	Tensão
σ_r	Tensão de Ruptura

Capítulo 1

Introdução

Este capítulo apresenta resumidamente a abordagem da dissertação, iniciando-se pelo enquadramento do tema, objetivos, e por fim, a estrutura do estudo.

1.1. Introdução e âmbito do trabalho

Os materiais compósitos são materiais compostos por duas ou mais fases não miscíveis entre si apresentando uma interface clara entre eles, possuindo uma combinação de propriedades complementares. Estes materiais apresentam uma fase contínua (matriz) e uma fase dispersa (reforço). A matriz é responsável pelo aglutinamento, ou seja, suporta o reforço, absorve as deformações e confere resistência à compressão, enquanto o material de reforço permite que o compósito tenha capacidade de resistência na direção do carregamento [1].

Nos dias de hoje, existe uma grande necessidade na procura de materiais inovadores, económicos e sustentáveis. Assim sendo, o desenvolvimento de materiais mais resistentes, duráveis e com elevada ductilidade é possível utilizando a incorporação de fibras, tais como as naturais, nos materiais compósitos. Estes materiais são produzidos à base de resinas, onde são incorporadas fibras provenientes de resíduos agrícolas ou de espécies vegetais invasoras, dando origem a um compósito. A incorporação de fibras naturais nos compósitos, apresentam vantagens, tais como:

- São materiais renováveis e apresentam neutralidade de CO₂;
- Podem ser obtidas através de resíduos agrícolas, diminuindo a quantidade de resíduos e gera uma oportunidade de negócio para os agricultores;
- A substituição das fibras tradicionais, tais como o vidro e o carbono, por fibras naturais traduz-se em processos de fabrico mais seguros em termos de saúde dos operadores, devido às partículas serem menos nocivas, e também na redução do desgaste das ferramentas utilizadas.

Estas fibras são mais leves, dando origem a materiais de menor peso, pelo que a sua aplicação na indústria de transportes (automóvel, aeronáutica, ferroviária, entre outras) conduz a benefícios energéticos quer através da redução do custo de operações, quer do custo de transporte do produto final.

Neste âmbito, o principal objetivo deste estudo consiste na realização de uma avaliação mecânica de compósitos de resina epóxi com fibras naturais (coneteira e sisal), materiais têm sido alvo de interesse por apresentarem boas propriedades, reduzirem os impactos ambientais, e por minimizarem custos e desperdícios [2].

1.2. Objetivos

O presente trabalho teve como objetivo produzir e caracterizar compósitos com fibra de coneteira e fibra de sisal, numa matriz de epóxi.

1.3. Estrutura de capítulos

Esta dissertação está estruturada em 6 capítulos, sendo que no primeiro é apresentado o enquadramento, os objetivos e a estrutura do estudo. No segundo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre a produção e propriedades dos compósitos verdes com fibras naturais. No terceiro capítulo é apresentado o processo de produção dos compósitos, e do método utilizado para a sua caracterização. No quarto capítulo, são apresentados os resultados obtidos através dos ensaios experimentais: densidade, dureza, módulo de *Young*, tensão de rotura, extensão à fratura, tenacidade e ainda, a macro e a microscopia. No quinto capítulo é feita uma discussão dos resultados obtidos comparativamente à literatura. E para finalizar, no sexto capítulo, são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Este capítulo é composto por uma revisão da bibliográfica da literatura atual, com base nos estudos mais recentes sobre o tema.

2.1. Revisão geral

2.2. Fibras naturais

Devido às preocupações ambientais nos últimos anos, as fibras naturais têm sido alvo de grande interesse por parte da comunidade científica e pela indústria. Para além de serem recicláveis e biodegradáveis, estas estão facilmente disponíveis em grandes quantidades devido à sua abundância e podem ser obtidas a baixo custo [3,4].

Algumas das vantagens destes materiais são o baixo peso, o baixo custo, são renováveis na natureza e apresentam elevada resistência mecânica [5,6]. No entanto, as fibras naturais apresentam também algumas características indesejáveis, como a elevada absorção de humidade e a baixa resistência térmica [7].

Relativamente às propriedades mecânicas, físicas e químicas, estas dependem fortemente da colheita, da localização, das características do solo, das circunstâncias meteorológicas, entre outras. Além disso, o processamento das fibras também afeta as suas propriedades [8]. Na Figura 1 e na Tabela 1, podemos observar a classificação das fibras [9-10].

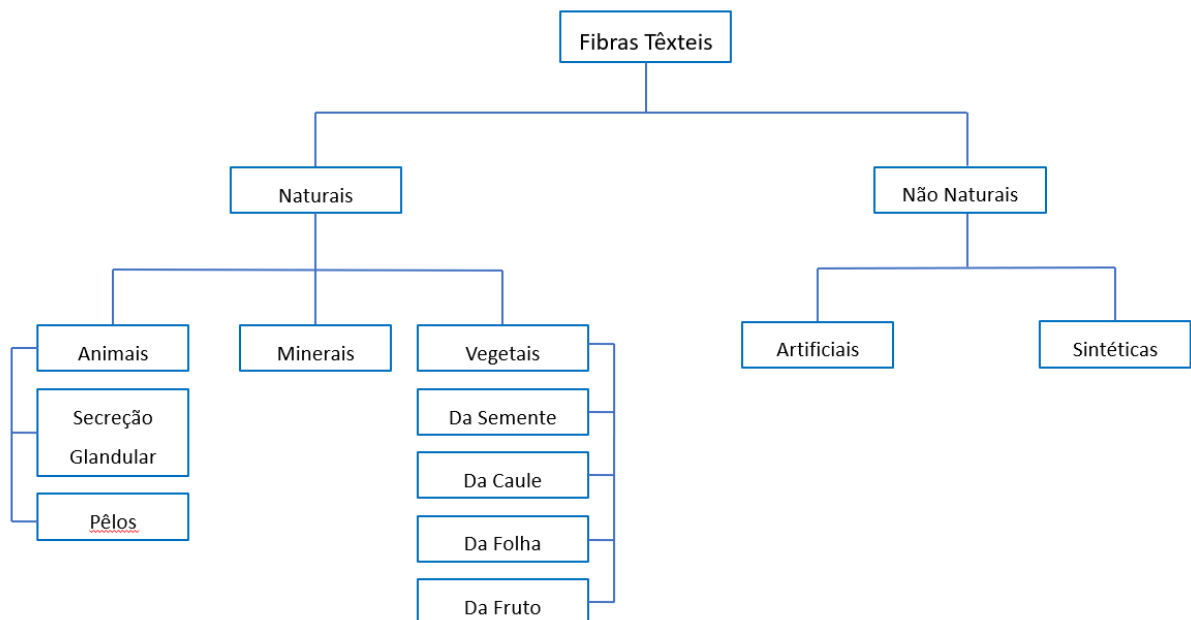


Figura 1- Classificação das fibras têxteis [9].

Tabela 1 – Classificação das fibras naturais e alguns exemplos [9].

Fibras Naturais		
Animais	Lã e pêlos finos	Angorá
		Cashemira
		Coelho
		Lã de ovelha
		Mohair
	Pêlos grossos	Cabra
Seda	Seda cultivada	
	Seda silvestre	
Minerais	Amianto (asbesto)	Crisolita
Vegetais	Caules	Crocidolita
		Cânhamo
		Juta
		Linho
		Malva
	Folhas	Ramí
		Caroá
		Sisal
	Frutos e Sementes	Tucum
		Algodão



Figura 2 – Alguns exemplos de fibras naturais [11].

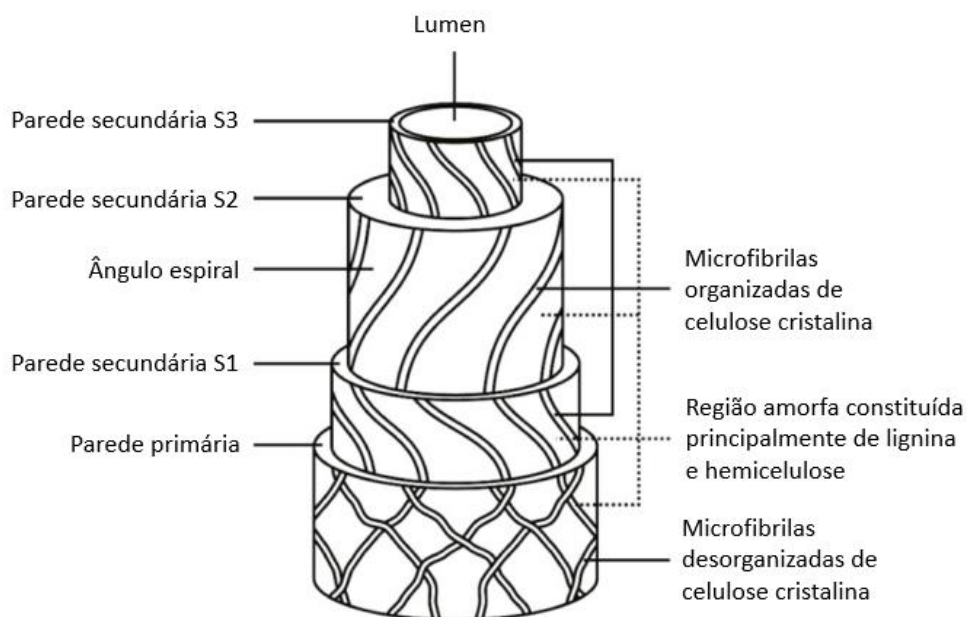


Figura 3 – Constituição estrutural de uma fibra vegetal [11].

As fibras naturais (Figura 2) parecem tubos microscópicos que consistem em paredes celulares em redor de um lúmen central. Este controla as capacidades de absorção de água de fibra. Cada parede celular da fibra natural é constituída por microfibrila de celulose orientada. Estes reforços, são semi-cristalinos, incorporados numa matriz de hemicelulose e lignina, como mostra a Figura 3. As microfibrilas de celulose são aproximadamente de entre 10 nm a 30 nm de diâmetro e são compostas por 30 a 60 moléculas de celulose ligadas entre si numa sucessão em cadeia. Para além de proporcionar rigidez, as fibrilas de celulose também aumentam características mecânicas das fibras, tais como a resistência à tração e à flexão. As microfibrilas de celulose são cimentadas pelas moléculas de hemicelulose da matriz. Isto porque as moléculas de hemicelulose da parede celular têm a capacidade de formar ligações de hidrogénio com a celulose, o que permite criar uma rede de estruturas celulósicas/hemicelulósicas, sendo os principais componentes na célula da fibra. A força das estruturas de celulose/hemicelulose é melhorada pelo efeito de cimentação da matriz de lignina, que é hidrofóbica. A matriz de lignina forma também uma cobertura protetora que protege os componentes internos das fibras contra a decomposição por micróbios. As paredes celulares das fibras naturais são compostas por uma parede celular primária e uma parede celular secundária, como mostra a Figura 3.

A parede celular primária é composta de microfibrilas de celulose soltas e dispostas de forma irregular. Ao contrário, a parede celular secundária que é composta por três camadas, a camada exterior (S1), a camada intermédia (S2) e a camada interior (S3). A camada S2 é a

mais espessa e a mais significativa na determinação do desempenho mecânico das fibras. O ângulo em espiral é o ângulo entre as espirais helicoidais da microfibrila da celulose e do eixo das fibras, que difere de fibra para fibra. Além disso, as características mecânicas de uma fibra dependem do conteúdo de celulose, do ângulo espiral, assim como o grau de polimerização. Por exemplo, as fibras que apresentam um maior aumento do teor de celulose e grau de polimerização, assim como um ângulo espiral inferior, apresentam uma maior resistência à tração e módulo [11].

Devido a todas as vantagens e características que estes materiais verdes podem vir a proporcionar, desde a sua abundância, baixo custo, sustentabilidade e aumento das propriedades mecânicas, e também porque a conteira é uma espécie invasora dos Açores, optou-se por estudar as fibras de conteira, tendo como grau de comparação o sisal.

2.2.1. Conteira e Sisal

A conteira, também conhecida por *Hedychium gardnerianum* da família *Zingiberaceae*, é uma herbácea que possui grandes rizomas e caules com longas folhas (Figura 4) [12]. Destacam-se pela floração intensa e odorífera. São originárias dos Himalaias, consideradas uma espécie invasora na Nova Zelândia, Havai e Açores, o que tem tornado um problema crescente para a vegetação nativa. Esta planta é tolerante a vários tipos de solos, desenvolvendo-se bem em situações de boa exposição solar, sendo também tolerante a sombra parcial [13].



Figura 4 – Conteira, *Hedychium gardnerianum* [12].

A comunidade científica procurou compreender que utilidade poderia dar a esta planta devido à sua abundância, chegando à conclusão até ao momento que esta poderia substituir o plástico descartável. Revelam também que as fibras provenientes do caule da conteira, utilizadas em polímeros biodegradáveis, têm a maleabilidade necessária e sobretudo uma grande capacidade de resistência. Atualmente, existem já diversos produtos como copos, pratos e tigelas em conteira [14].

O sisal, também conhecido por *Agave sisalana* da família *Asparagaceae*, é uma planta cujas fibras são derivadas de folhas, sendo consideradas as fibras vegetais comercialmente mais importantes (Figura 5) [15]. As folhas apresentam uma tonalidade entre cinzentas a verde-escuras, em forma de lança, ramificando-se a partir do caule principal. São originárias do México e de outras zonas da América central e têm imenso potencial futuro no que diz respeito ao uso como um recurso renovável. Estas plantas aprisionam mais dióxido de carbono do que o que produzem, e os resíduos gerados da indústria de processamento de fibras de sisal são completamente biodegradáveis, e podem ser utilizados para produzir biogás, ração animal e fertilizantes naturais. A fibra de sisal é conhecida por ser altamente durável, elástica e resistente [16].



Figura 5 – Sisal, *Agave sisalana* [15].

2.2.2. Preparação e tratamento das fibras

Com o objetivo de uma melhor adesão da matriz à fibra, é necessário recorrer a um tratamento superficial a fim de assegurar um bom desempenho quando aplicada aos compósitos. Isto porque as fibras têm natureza hidrofílica, o que diminui a sua compatibilidade com a hidrofobia do polímero. Além disso, a presença de impurezas nas fibras contribui para uma baixa adesão superficial, não sendo adequada para criar uma forte ligação com uma matriz polimérica. Assim, o tratamento da superfície da fibra pode melhorar a resistência da ligação aumentando a rugosidade da superfície e a energia de superfície da fibra [17].

Vários estudos revelam a influência de vários tipos de modificações químicas no desempenho das fibras naturais e dos compósitos reforçados com fibras, tais como o tratamento alcalino, tratamento de silano, tratamento isocianato, revestimento de látex, tratamento de permanganato, acetilação, enxerto de monómero sob radiação UV, entre outros [18, 19]. Cada tratamento tem um determinado impacto em relação às propriedades das fibras, como pode ser observado na Tabela 2 [20].

Tabela 2 – Efeito dos tratamentos nas fibras [20].

Tratamento	Resultado
Alcalino	Reduz o conteúdo de lignina. Melhora a aderência entre a fibra-matriz, a estabilidade térmica e a resistência térmica.
Acetilação	Melhora a resistência à tração e à flexão.
Benzoilação	Melhora a hidrofobicidade.
Enzimático	Reduz o conteúdo de lignina.
Enxertia	Melhora as propriedades protetoras dos raios UV, a hidrofobicidade e as propriedades mecânicas.
Isocianato	Altera a superfície.
Mercerização	Reduz a recuperação de humidade e melhorar as propriedades mecânicas.
Metacrilato	Melhora a resistência à tração e à flexão.
Ozono	Afeta a energia da superfície e o ângulo de contacto.
Peróxido	Reduz a absorção da humidade.
Plasma	Melhora a hidrofobicidade.
Sílanos	Melhora a hidrofobicidade e as propriedades mecânicas.
Cloreto de Sódio	Melhora a resistência à tração, o módulo de <i>Young</i> e a extensão à rutura.

2.3. Compósitos com matriz polimérica

A procura de materiais avançados com propriedades aperfeiçoadas tem como intuito atender a requisitos cada vez mais exigentes de mercado, substituindo os existentes. Isto contribuiu significativamente para o início de novos materiais compósitos, originando grandes melhorias

em termos de design, aplicação e fabricação de grandes variedades de produtos, incluindo componentes estruturais [21].

A importância do uso industrial destes materiais tem vindo a crescer nos últimos anos, oferecendo soluções económicas para produzir componentes de baixo peso. São obtidos através da integração de materiais de reforço em fibra, ou em pó, numa matriz polimérica. De modo que as características tribológicas sejam melhoradas, são introduzidos lubrificantes nestes materiais. O objetivo para aplicações de desgaste é oferecer soluções de baixo peso, elevada resistência e rigidez [22].

Uma outra vertente da exploração destes compósitos é que apresentam diversos atributos favoráveis, como a alta condutividade térmica, baixo coeficiente de expansão térmica, elevada capacidade de amortecimento e boas propriedades auto-lubrificantes [23].

Os polímeros de engenharia são usados em um grande número de aplicações devido à sua alta flexibilidade, processabilidade e custo relativamente baixo. Entre elas, as resinas epóxi têm recebido um enorme interesse dos cientistas para o uso em materiais compósitos. As resinas epóxi não curadas têm baixas propriedades mecânicas, químicas e térmicas. A reação de uma resina epóxi com um agente de cura adequado resulta em estruturas tridimensionais (3D), reticuladas, termoendurecíveis, com um alto módulo de elasticidade e alta resistência à tração. As resinas apresentam excelente resistência química, aderência, durabilidade a altas e baixas temperaturas, boa resistência elétrica e elevadas propriedades mecânicas (alta resistência e tenacidade). São utilizadas em diversas indústrias, tais como a automóvel, aeronáutica, aeroespacial, entre outras.

O revestimento epóxi pode fornecer uma boa camada protetora contra o desgaste, isto se a epóxi for adequadamente modificada para reduzir o atrito e a resistência ao desgaste [24].

São também amplamente utilizadas como matrizes de compósitos em materiais de anti-desgaste [25].

Sendo uma das matrizes mais populares nos compósitos poliméricos, demonstram ter excelente rigidez, resistência específica, estabilidade dimensional, resistência química e também uma boa adesão relativamente a fibras incorporadas [26].

Os quatros principais tipos de resinas epóxi encontradas comercialmente são:

- À base de *Bisfenol-A* (Figura 6), este tipo de resina é mais utilizado por apresentar maior versatilidade e menor custo. É originada da reação de *Epicloridrina* e de

Bisfenol-A, podendo ser encontrada no estado líquido, semi-sólido ou sólido dependendo do peso molecular.

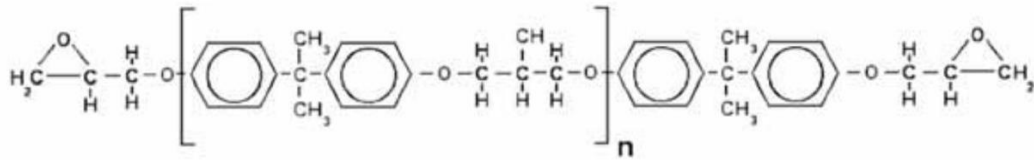


Figura 6 – Resina epóxi à base de *Bisfenol-A* [27].

- À base de *Bisfenol-F* e/ou *Novolac* (Figura 7), este tipo de resina proporciona o aumento das ligações cruzadas, o que faz melhorar as propriedades mecânicas, químicas e térmicas.

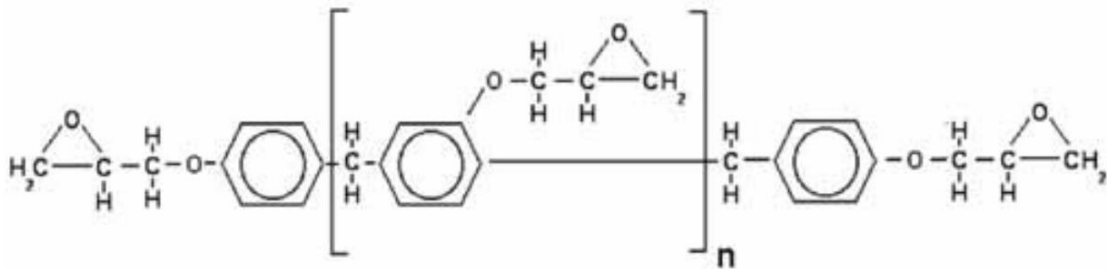


Figura 7 – Resina epóxi à base de *Bisfenol-F* e ou *Novolac* [27].

- À base de *Epícloridrina*, *Bisfenol-A* com a adição de quatro moléculas adicionais de bromo (*Tetrabromobisfenol-A*) (Figura 8), que é um produto altamente inflamável e tóxico.

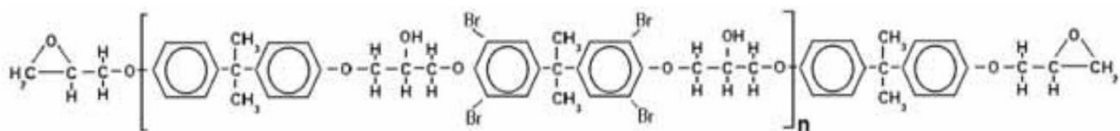


Figura 8 – Resina epóxi bromada [27].

- As flexíveis (Figura 9) são caracterizadas por possuir longas cadeias lineares, onde poliglicóis pouco ramificados substituem os bisfenóis, formando resinas de baixa

reatividade que geralmente são utilizadas como flexibilizantes reativos em outras resinas melhorando a resistência ao impacto com acréscimo da flexibilidade.

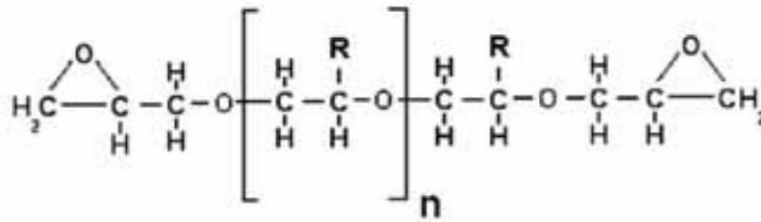


Figura 9 – Resina epóxi flexível [27].

As estruturas químicas mostradas na Figura 6, Figura 7, Figura 8 e Figura 9 são das moléculas das resinas epóxi antes de serem catalisadas. As resinas epóxi são convertidas em polímeros termoendurecíveis por um processo de reação de cura pela ação de endurecedores (agentes de cura). A reação de cura pode ser realizada tanto à temperatura ambiente como a altas temperaturas, dependendo dos produtos iniciais utilizados no processo ou das propriedades desejadas do produto final. As resinas epóxi transformam-se em sólidos termoendurecíveis partindo do estado líquido, logo a viscosidade é um parâmetro de grande importância, pois sendo função da temperatura, determina os parâmetros de processo [27].

No entanto, densidades de reticulação mais altas conduzem ao aumento da resistência mecânica, limitando o uso de compósitos epóxi em aplicações que envolvem componentes mecânicos. Vários tipos de reforços foram desenvolvidos para melhorar as propriedades mecânicas de compósitos epóxi [28], como por exemplo as fibras mencionadas no subcapítulo seguinte.

2.3.1. Compósitos de matriz poliméricas reforçadas com fibras naturais

Os compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras são conhecidos pelo elevado desempenho. Os compósitos com matriz de resina epóxi reforçados com fibras são um dos materiais multifásicos mais utilizados, principalmente por causa das suas características excepcionais na relação resistência-peso. Estes apresentam excelentes propriedades mecânicas e tribológicas, resistência química e à corrosão adequadas e excelente estabilidade dimensional.

Estão presentes na literatura diversos estudos de compósitos de matriz polimérica reforçadas com materiais verdes. Foram já estudadas diversas fibras, tais como o ananás, o coco, o kenaf, o sisal, o pelo de cabra, a banana, entre outras [29].

De uma forma geral, os estudos revelam que a introdução de fibras na matriz melhora as propriedades mecânicas, sendo que essa melhoria depende da arquitetura, da orientação e do comprimento das fibras.

Para além do tipo de matriz utilizada, os tratamentos da fibra também influenciam muito as propriedades dos compósitos poliméricos, resultando numa melhor ligação entre as fibras e a matriz, proporcionando um aumento das propriedades mecânicas. No entanto, esta melhoria depende da concentração e do tempo de exposição da fibra ao tratamento [29].

2.4. Aplicações

Como mencionado anteriormente, existem diversas indústrias que estão a ser desafiadas para produzirem novos produtos de menor impacto ambiental, reduzindo a sua dependência pelos combustíveis fósseis. Assim, as fibras naturais são uma opção atrativa que para além de ajudar a alcançar os objetivos de desenvolvimento sustentável, criam oportunidade de emprego em regiões rurais e menos desenvolvidas, para além das boas propriedades mecânicas, baixa densidade e baixo custo que têm demonstrado ter.

Na indústria automóvel, este tipo de aplicação é usado principalmente em componentes interiores, como quadrantes, painéis de portas, suportes, assentos, encostos e revestimentos. Já para aplicações exteriores, são ainda muito limitadas. Estudos revelam que estes compósitos contribuem para uma redução de custo de 20% e uma redução de peso de 30% de uma peça automóvel. O peso leve dos componentes proporciona um menor consumo de combustível, boas possibilidades de reciclagem, redução de resíduos e de emissões de gases. Na Figura 10 é apresentado o uso de fibras naturais para compósitos na indústria automóvel europeia em 2012 (com um volume total de 80 000 toneladas) e na Tabela 3 as aplicações para cada uma das fibras [24].

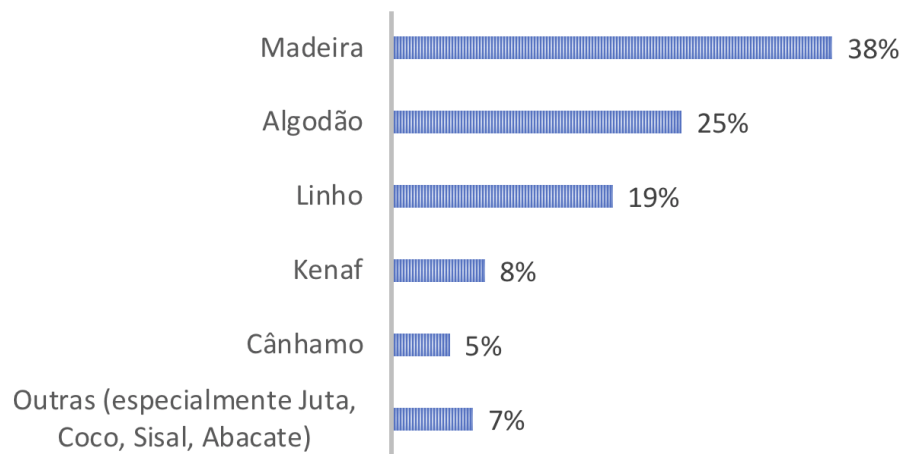


Figura 10 - Uso de fibras naturais para compósitos na indústria automóvel europeia em 2012 (com um volume total de 80 000 toneladas) [21].



Figura 11 - Componentes automóveis produzidos com compósitos de fibras naturais: a) Mercedes Classe A; b) BMW Série 7; c) Bugster (Fiat) [30].

A Figura 11 a) apresenta um automóvel *Mercedes Classe A*, cujas suas peças internas são produzidas com compósitos poliméricos reforçados por fibras naturais de linha e de juta. Na Figura 11 b) é apresentado um outro exemplo, um *BMW Série 7* onde são utilizados estes materiais compósitos reforçados com fibras naturais, que neste caso, utilizadas nos revestimentos das portas e outras partes internas do veículo. Por fim, na Figura 11 c), é mostrado o *Bugster*, da *Fiat*, cuja sua carroceria é produzida com fibras naturais de fontes renováveis [30].

Tabela 3 – Aplicações das fibras naturais para a indústria automóvel [24].

Fibras naturais	Descrição dos componentes
Fibras de primeira qualidade (linho, cânhamo, kenaf, juta, sisal, etc.)	Suportes para painéis de portas, componentes para painéis de instrumentos, suportes para apoios de braços, encostos de bancos, painéis de portas, parafusos de portas, forros de cabeça, paredes interiores de laterais e traseiras, tabuleiros de encostos de bancos, pilares, quadrantes.
Abaca	Painéis de chão e de carroçaria.
Banana	Papel de embalar.
Coco	Fundos dos assentos, almofadas de costas e encostos de cabeça, acabamentos interiores e amortecimento dos bancos, superfícies dos bancos/ encostos.
Couro	Capas de assentos para automóveis, colchões, tapetes.
Algodão	Insonorização, painéis, isolamento.
Fibra madeira reciclada	Encostos de bancos.
Linho	Encostos de bancos, coberturas, outros acabamentos interiores, painéis de chão, quadrantes, painéis de chão.
Linho ou cânhamo	Painéis interiores de portas.
Kenaf	Painéis interiores de portas.
Kenaf/ Linho	Bandejas interiores e suportes de portas.
Kenaf/ Cânhamo	Painéis de portas, bandejas e suportes, outros acabamentos interiores.
Madeira	Painéis de portas, painéis de instrumentos, encostos de bancos, coberturas.
Lã	Estofos, assentos.

Apesar do uso destas fibras estar grandemente presente na indústria automóvel, existem outros campos que estão a ganhar hoje em dia reconhecimento pelo uso das mesmas, tais como: têxteis, medicina, saúde e produtos farmacêuticos, cuidados domésticos e pessoais,

alimentos e aditivos para rações, construção e móveis, embalagens, papel e celulose, bioenergia e biocombustíveis, como ilustrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Aplicações das fibras naturais em outras indústrias [24].

Fibras	Aplicações	Composição
Couro	Recipientes, caixas, tabuleiros, embalagens	Coco e borracha de látex natural
Linho	Painéis de parede verde	50% de resina reciclada, reforçada com linho (25%) e fibra de vidro (25%)
Linho, Cânhamo	Bicicletas e estojos para instrumentos musicais	Linho, cânhamo e epóxi. Plásticos (<i>PLA</i> e <i>PP</i>) e aditivos, fibras naturais
Linho, Balsa, Madeira	Equipamentos de desporto	Material de reforço de fibras naturais e compósitos
Cânhamo, Juta, <i>Kenaf</i>	Contentores para expedição e armazenamento, painéis interiores, pisos interiores de automóveis	Fibras naturais e polímeros termoplásticos fibrosos
<i>Kenaf</i>	Capas para telemóvel	<i>Kenaf</i> e <i>PLA</i>
Madeira	Construção de casas modulares	Compósitos de plástico de madeira

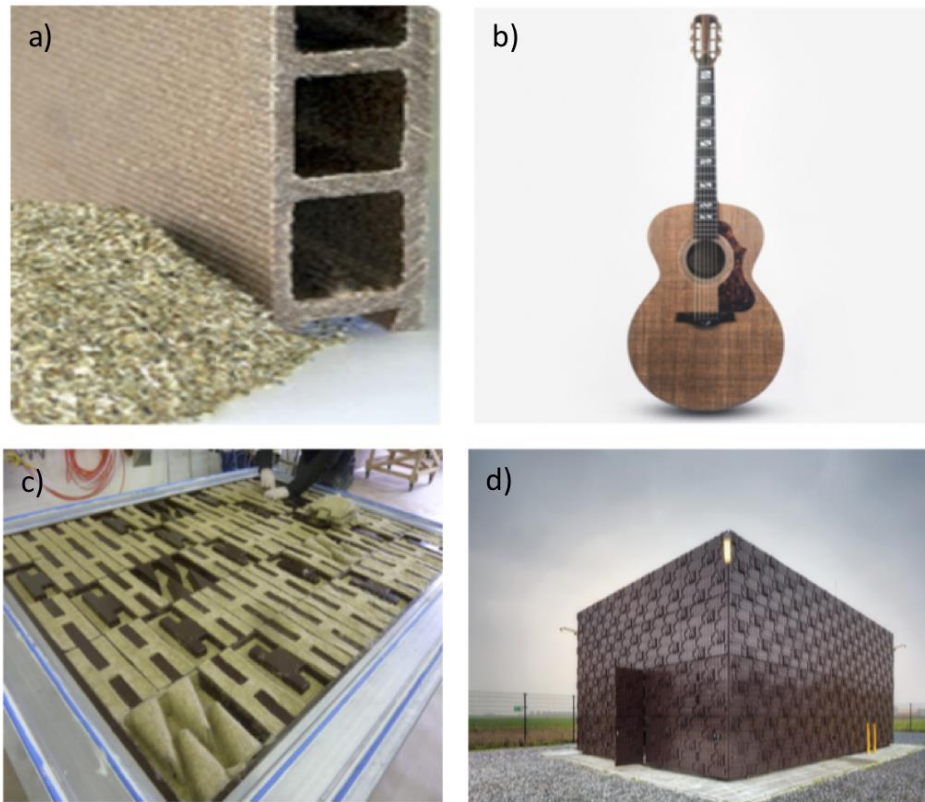


Figura 12 – Alguns exemplos de aplicações das fibras naturais em outras indústrias: a) Soalho extrudido em compósito; b) Guitarra produzida com compósito reforçado com fibras de linho; c) Pormenor do fabrico dos painéis; d) Cobertura de fachada produzida num compósito de bioresina reforçado com fibras de cânhamo [31].

A construção civil, representa também uma área importante de aplicação. É comum o uso destes materiais em soalhos, estrados, reforços estruturais, enchimentos e isolamentos. Na Figura 12 a), é possível observar-se uma peça de soalho em compósito reforçado com partículas e fibras curtas de linho numa matriz termoplástica, fabricado por extrusão.

Muitos fabricantes de instrumentos musicais produzem instrumentos com boas propriedades acústicas a partir de compósitos com reforços naturais, como por exemplo, guitarras produzidas com compósitos reforçados com fibras de linho e com resina epóxida biobaseada, como ilustrado na Figura 12 b). É comum surgirem projetos com aplicações experimentais destes materiais, como por exemplo a Figura 12 c) e Figura 12 d), os painéis da fachada de uma estação recetora de gás, produzidos com um compósito de bioresinas reforçado com fibras de cânhamo [31].

Capítulo 3

Materiais e métodos

Este capítulo aborda os materiais e os métodos utilizados ao longo deste estudo. São demonstradas as diversas etapas para a produção dos compósitos, desde os materiais até aos seus ensaios mecânicos.

3.1. Materiais

O estudo incide na produção de materiais compósitos, cuja matriz utilizada é de resina epóxi adicionando dois tipos diferentes de reforço, fibras de conteira (6 mm) e de sisal (6 mm) separadamente. Deste modo foram produzidos provetes de 100% epóxi, epóxi com conteira e epóxi com sisal, de forma a determinar a influencia do tipo de fibra e conteúdo em termos das suas propriedades.

A matriz utilizada foi a resina epóxi SR 1500, juntamente com 33% em peso do endurecedor SD 2505 [32]. As propriedades mencionadas pelo fornecedor são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Propriedades da resina e do endurecedor [32].

Propriedades da Resina SR 1500 e do Endurecedor SD 2505					
Produto	Densidade a 20°C [g/cm ³]	Aspeto	Viscosidade a 20°C [cPs]	Relação de mistura (em peso)	Relação de mistura (em volume)
SR 1500	1,13	Líquido	2100	100	100
SD 2505	1	Líquido	280	33	37

Neste trabalho foram utilizadas fibras naturais de conteira (Figura 13.1 (a)) e de sisal (Figura 13.1 (b)), com 6 mm de comprimento, fornecidas pelo centro de investigação e desenvolvimento *Fibrenamics* Azores [33], já com as dimensões pretendidas.

Previamente, as fibras passaram por diversos processos:

- Colheita – recolha e corte da conteira e sisal;
- Desumidificação – eliminação da humidade em ambiente fechado (estufa) durante 48h;
- Corte – dimensionamento do comprimento (6 mm), através de triturados de lâminas mecânicos;
- Segmentação – Seleção das fibras com o auxílio de peneiros.

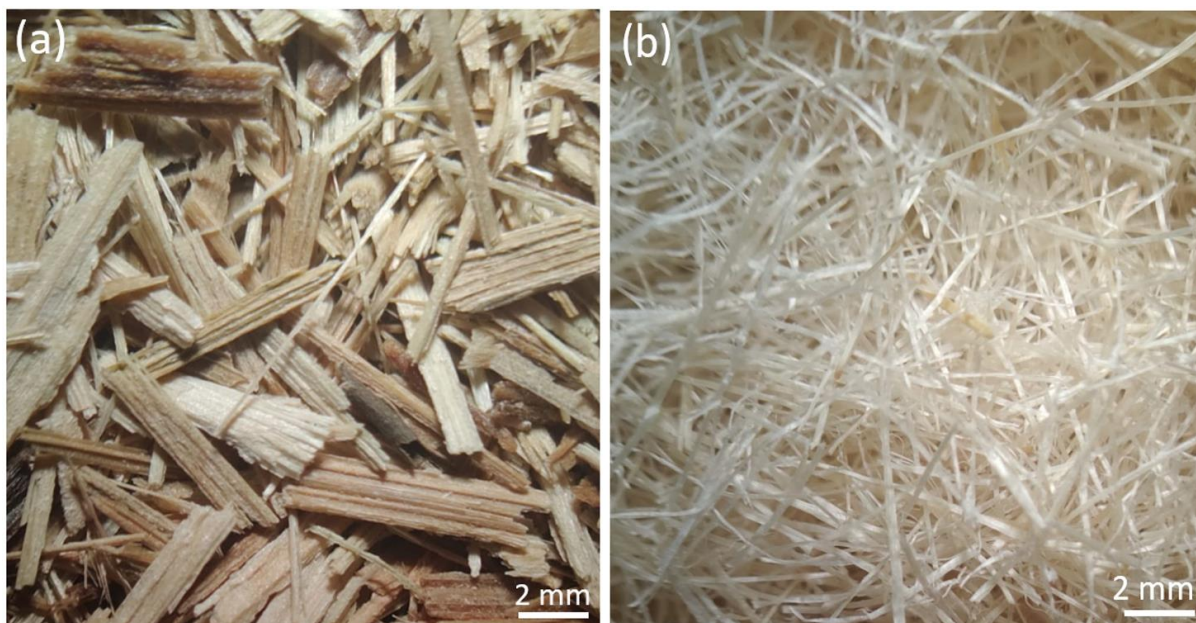


Figura 13.1 – Fibras naturais: (a) de conteira; (b) de sisal.

3.2. Preparação das fibras

Com o objetivo de garantir uma boa adesão das fibras com a matriz, estas foram submetidas a um tratamento alcalino de hidróxido de sódio (NaOH) (Figura 13.2).

Este processo consistiu em imergir e envolver as fibras numa solução aquosa com 5% de NaOH, durante 30 minutos à temperatura ambiente. Em seguida, as fibras foram lavadas com água destilada para remoção do NaOH até apresentarem um pH 7 (neutro). Para extrair toda a água e humidade absorvida, procedeu-se ao processo de secagem. Para tal, as fibras foram dispersas sobre um tabuleiro e colocadas na estufa (*Binder* ED115/E2) a 80 °C durante 24 horas. Na Figura 13.2 é possível observar o processo de preparação das fibras naturais.

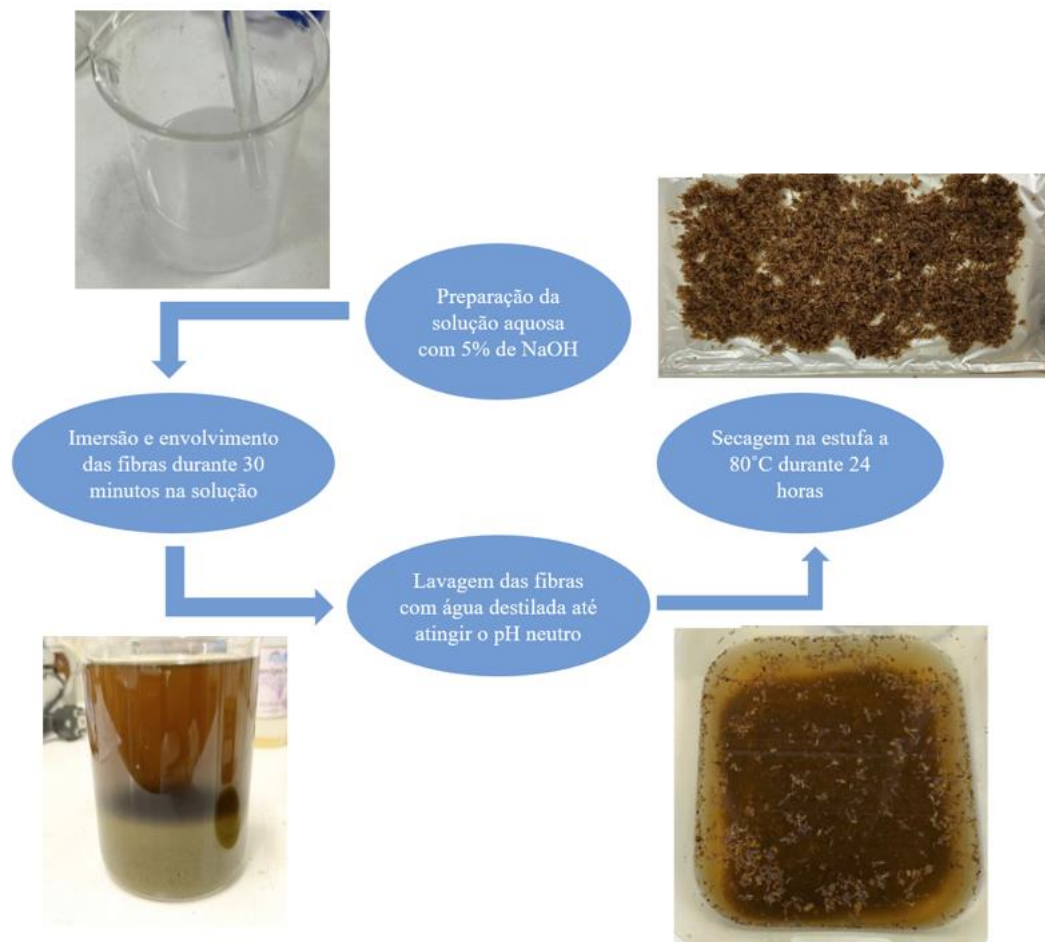


Figura 13.2 – Processo de tratamento das fibras. Adaptado [34].

3.3. Moldes

Para a fabricação dos moldes, foram desenhados provetes de acordo com a norma EN ISO 527-4 [35], em 3D (Figura 14) com o *CATIA V5 R21* (software de análise e modelação) [36], para posterior maquinagem em aço. Estes provetes servem como contramolde.

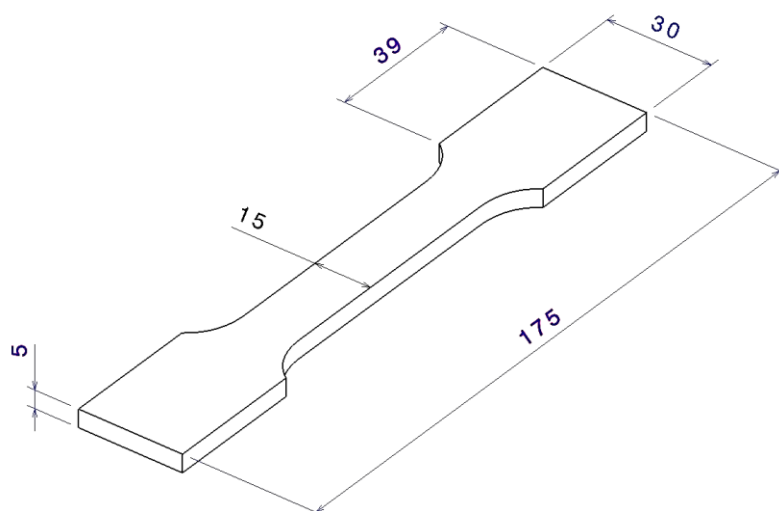


Figura 14 – Modelação do provete em 3D [36].

O material seleccionado para o fabrico dos moldes foi a borracha de silicone RTV 491, juntamente com 5% de catalisador 431 [37]. As propriedades são descritas na Tabela 6.

Tabela 6 - Propriedades físicas e mecânicas do silicone ESQUIM RTV-491 [37].

Propriedades Físicas e Mecânicas do Silicone ESQUIM RTV-491								
Aparência	Viscosidade [cPs]	Catalisador (5%)	Tempo aprox. de trabalho [h]	Tempo aprox. de secagem [h]	Dureza [ShA]	Tensão de rotura [kg/cm ²]	Alongamento [%]	Tensão de corte [kg/cm ²]
Branco	30	CAT - 431	3	22	22	40	350	22
		CAT - 421	3	24	16	35	400	22
		CAT - 451	3	24	12	34	500	22

Para o fabrico dos moldes (Figura 15), foi utilizado um recipiente de alumínio descartável, dentro do qual foram colocados quatro provetes como contramolde, equidistantes entre si. Em seguida a mistura do silicone com o catalisador foi vazada cuidadosamente sobre os provetes de forma a não alterar o seu posicionamento, permanecendo durante 24 horas à temperatura ambiente. Os provetes de aço foram removidos cuidadosamente do molde e os excessos de silicone foram eliminados de forma a garantir a geometria pretendida.

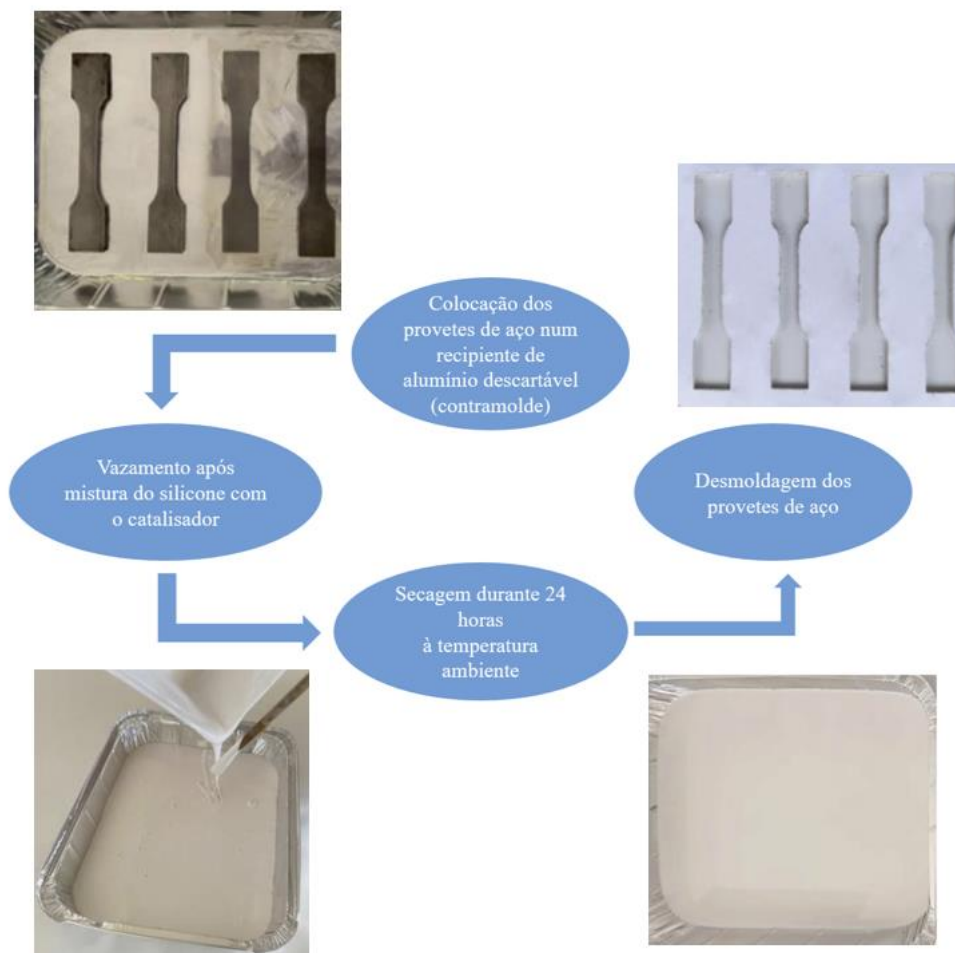


Figura 15 – Processo de produção dos moldes. Adaptado [34].

3.4. Produção dos compósitos

Foram produzidos provetes de material compósito de resina epóxi com fibras de coneteira, e de sisal, com 6 mm de comprimento. As percentagens em peso de fibra foram: 0%; 2,5%; 5%, 7,5% e 10%. Para cada percentagem foram produzidos 4 provetes, fazendo um total de 36 provetes. As diferentes composições dos provetes são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Composição dos materiais.

Provetes	Tipo de Fibra	% de Fibras (wt)	Massa da Fibra (g)	% Resina / % Endurecedor (wt)	Massa da Resina (g)	Massa do Endurecedor (g)
E	-	0	0,00	100,00	85,00	24,80
C 2,5	Conteira	2,50	2,13	97,50	62,57	20,65
C 5	Conteira	5,00	4,29	95,00	61,22	20,20
C 7,5	Conteira	7,50	6,46	92,50	59,86	19,76
C 10	Conteira	10,00	8,64	90,00	58,49	19,30
S 2,5	Sisal	2,50	2,14	97,50	62,84	20,74
S 5	Sisal	5,00	4,32	95,00	61,74	20,38
S 7,5	Sisal	7,50	6,54	92,50	60,63	20,01
S 10	Sisal	10,00	8,79	90,00	59,50	19,64

Nota: E refere-se a Resina Epóxi; C refere-se a Fibras de Conteira; S refere-se a Fibras de Sisal.

Para o processo de fabrico dos compósitos, a resina epóxi foi mantida na estufa a uma temperatura constante de 40°C durante 24 horas, tendo como objetivo a diminuição da sua viscosidade de forma a garantir uma melhor dispersão das fibras.

Após a conclusão da etapa anterior, procedeu-se à mistura das fibras na resina durante 5 minutos à temperatura ambiente com o auxílio de um agitador mecânico. De seguida, foi adicionado o endurecedor à mistura de acordo com a Tabela 7.

Por fim, a mistura foi vazada nos moldes de silicone ficando em repouso durante 48 horas à temperatura ambiente. Posteriormente, os provetes foram desmoldados, colocados num tabuleiro e colocados em estufa, para fazer a segunda fase da cura, onde permaneceram por mais 48 horas a 40°C.

Finalizada a cura procedeu-se ao acabamento. Este processo teve como objetivo remover as imperfeições superficiais dos provetes, garantindo uma melhor geometria dos mesmos, sendo este um fator de grande importância para os ensaios que se seguem. Assim sendo, foi utilizada uma lixadeira (*Buehler Metaserv 2000*) com lixas de granulometria de 800 e de 1000.

3.5. Ensaios de densidade

Para determinar a densidade dos compósitos em estudo foi utilizado o Princípio de Arquimedes (Figura 16). Este princípio baseia-se em que quando um corpo encontra-se total ou parcialmente imerso num fluido em equilíbrio, na presença de um campo gravitacional,

fica sob a ação de uma força vertical ascendente aplicada pelo fluido denominada por força de impulsão, sendo que a sua intensidade é igual ao peso do fluido deslocado pelo corpo.

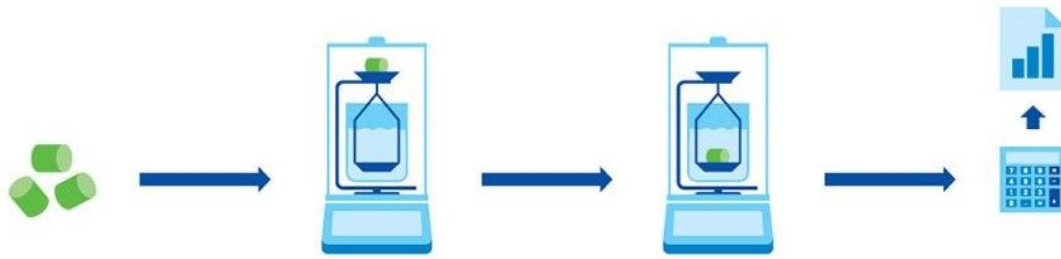


Figura 16 – Procedimento do Método de Arquimedes: (a) amostras; (b) medição da massa fora de água; (c) medição da massa imersa em água; (d) cálculos [38].

Para a realização das pesagens, foram cortadas oito amostras de cada percentagem. De seguida foi preparado um recipiente com água destilada, sendo posteriormente colocado na balança. Assim, foram efetuadas pesagens dentro e fora da água destilada, isto para as 9 diferentes composições sendo que para cada composição o ensaio é repetido 8 vezes.

A densidade dos compósitos foi calculada através da equação (1) [38]:

$$Densidade = \frac{m^L}{(m^L - m^F)} * \rho^F \quad (1)$$

Sendo:

- m^L - Massa do corpo no ar [g];
- m^F - Massa do corpo submerso no fluido [g];
- ρ^F - Densidade do fluido de imersão [g/cm³] que é de 1 g/cm³ para a água destilada.

3.6. Ensaio mecânicos

Para caracterizar as propriedades mecânicas dos compósitos foram realizados ensaios de tração e de dureza. Assim, foi possível determinar o comportamento dos materiais em relação ao módulo de *Young*, tensão de rotura, extensão à fratura, tenacidade e dureza de *Vickers*.

3.6.1. Ensaio de tração

Para a realização dos ensaios de tração foi utilizada a máquina TS300 (Figura 17), com uma célula de carga de 50 kN, com uma velocidade de deslocamento do travessão de 0,5 mm/min. Estes ensaios foram todos efetuados à temperatura ambiente. Para determinação das curvas de tensão vs extensão (Figura 18), foi utilizado um extensómetro axial *Epsilon Model 3542* com 50 mm de extensão máxima.

Desta forma, foram ensaiados 4 provetes para cada uma das composições, fazendo um total de 36 ensaios para o estudo.



Figura 17 – Máquina de ensaios de tração TS300 e extensómetro axial *Epsilon Model 3542*.

Através dos ensaios de tração uniaxial, na zona linear elástica do ensaio, a lei de *Hooke* (equação (2)) é válida para a obtenção do módulo de elasticidade, através do declive da curva tensão vs extensão. Quando um corpo é tracionado ou comprimido, uma força tende a fazê-lo voltar ao ser estado inicial. Essa força é proporcional à deformação sofrida pelo corpo, assim

como à sua constante elástica. Através dos ensaios de tração, o comportamento linear mostrado no início do gráfico reflete que a tensão é proporcional à extensão [39].

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2)$$

Sendo:

- σ - Tensão (MPa);
- ε - Extensão axial (mm/mm);
- E - Módulo de elasticidade ou Módulo de *Young* (GPa).

No gráfico ilustrado na Figura 18, o “U” corresponde à energia absorvida ao longo do ensaio de tração até à fratura do provete, cujo o seu valor é dado pela área representada a verde. O σ_r corresponde à tensão de rotura e o ε_f à extensão à fratura.

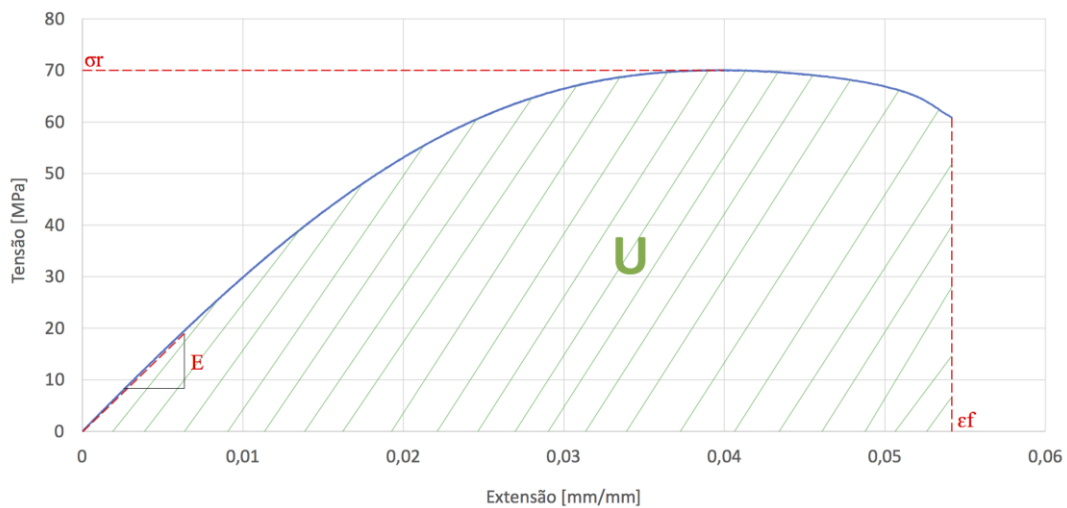


Figura 18 – Exemplo de uma curva de tensão vs extensão um ensaio de tração de um provete de resina epóxi.

3.6.2. Análise macro e micrográficas

Após os ensaios de tração, procedeu-se à análise macrográfica das zonas de fratura dos provetes. Para tal, foi utilizada uma lupa *Leica Zoom 2000* com uma ampliação de 30 vezes. De seguida, as amostras foram submetidas para observação micrográfica, no Laboratório de Microscopia eletrónica – MicroLab no Instituto Superior Técnico, através de um microscópio

eletrónico de varrimento (MEV) FEG-SEM JEOL JSM-7001F com um revestimento através da deposição de uma fina camada de Ouro-paládio (Au-Pd) (Figura 19) [40].



Figura 19 - Microscópio eletrónico de varrimento (MEV): FEG-SEM JEOL JSM-7001F do MicroLab no IST-UL [40].

3.6.3. Ensaios de dureza

Os ensaios de dureza, são considerados de uma forma geral ensaios não destrutivos que deixam uma pequena marca sobre o corpo em estudo, não comprometendo o seu desempenho técnico. Existem diversos métodos para realizar estes ensaios, sendo que atualmente o mais utilizado é o por penetração, onde é aplicada uma carga sobre o material por um determinado período de tempo, sendo que a dureza é avaliada através da deformação deixada à superfície do corpo em estudo [40].

Para a caracterização da dureza dos compósitos foi utilizado o método de dureza *Vickers*. Foram realizados 16 ensaios, com uma força aplicada de 2 kgf durante 10 segundos. O equipamento utilizado para a realização destes testes foi a máquina *INNOVATEST FALCON 450* (Figura 20), através do software *ImpressionsTM*. Esta técnica permite estudar a resistência que o material transmite à penetração de uma pirâmide de diamante de base quadrada, com um ângulo de 136° (Figura 21).



Figura 20 – Máquina de ensaios de dureza *INNOVATEST FALCON 450*.

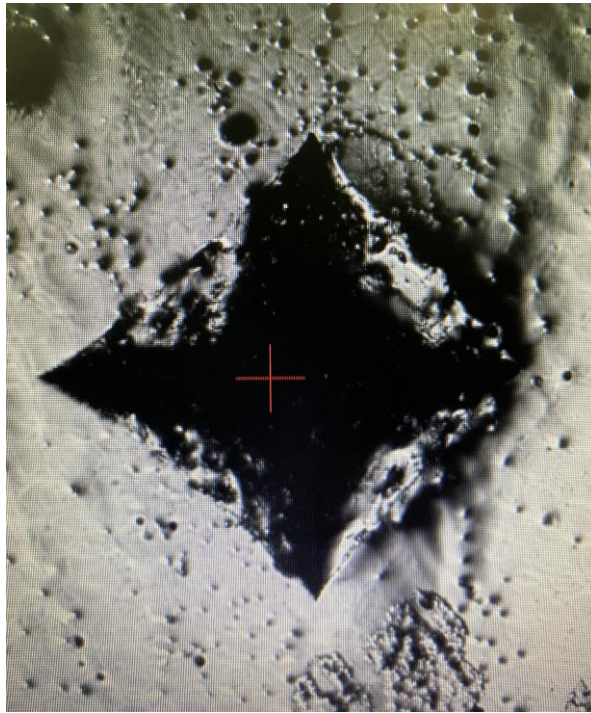


Figura 21 – Exemplo de um ensaio de dureza por penetração.

Capítulo 4

Resultados

Este capítulo aborda os resultados obtidos através da análise e tratamento de dados dos ensaios realizados, com intuito da caracterização dos compósitos.

4.1. Ensaio de tração

Foram ensaiados provetes de resina epóxi (4) e de compósitos com fibras de 6 mm de comprimento (16 com fibra de conteira + 16 com fibra de sisal). A realização destes ensaios teve como objetivo o estudo do efeito da variação da percentagem em peso de fibra na resistência à tração dos compósitos. Nas Figuras 22 e 23, são apresentadas as curvas de tensão-extensão normal obtidas para os diferentes ensaios.

Observou-se que a resina epóxi apresenta um comportamento dúctil enquanto os compósitos de conteira (Figura 22) e sisal (Figura 23) apresentam um comportamento frágil. Para todas as percentagens de fibra estudadas, os compósitos apresentaram uma menor resistência à tração do que o provete só com resina epóxi. A resina epóxi apresenta uma tensão de rotura de ~54,3% superior aos compósitos com inserção de fibras de conteira e de ~10% superior para os de sisal.

A resistência à tração dos compósitos com fibras de sisal é, no entanto, superior aos de fibras de conteira, apresentando uma tensão máxima em média, de ~49,2% superiores.

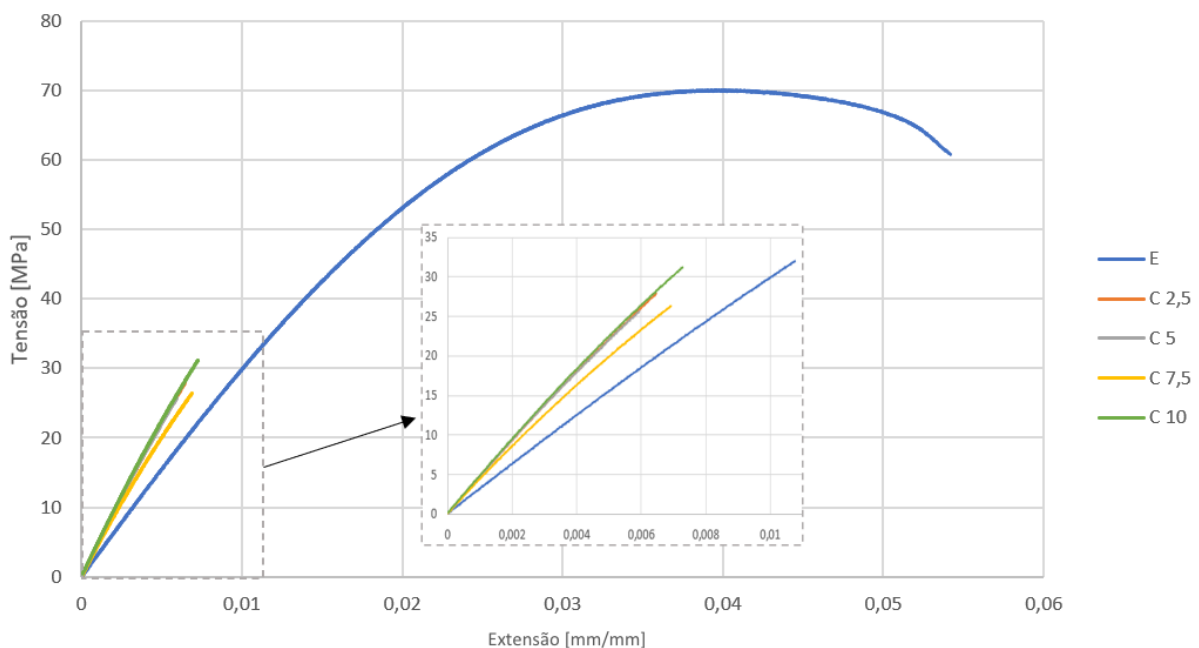


Figura 22 - Tensão-extensão para provetes com fibra de conteira: (a) curvas típicas da tensão-extensão; (b) ampliação das curvas tensão-extensão.

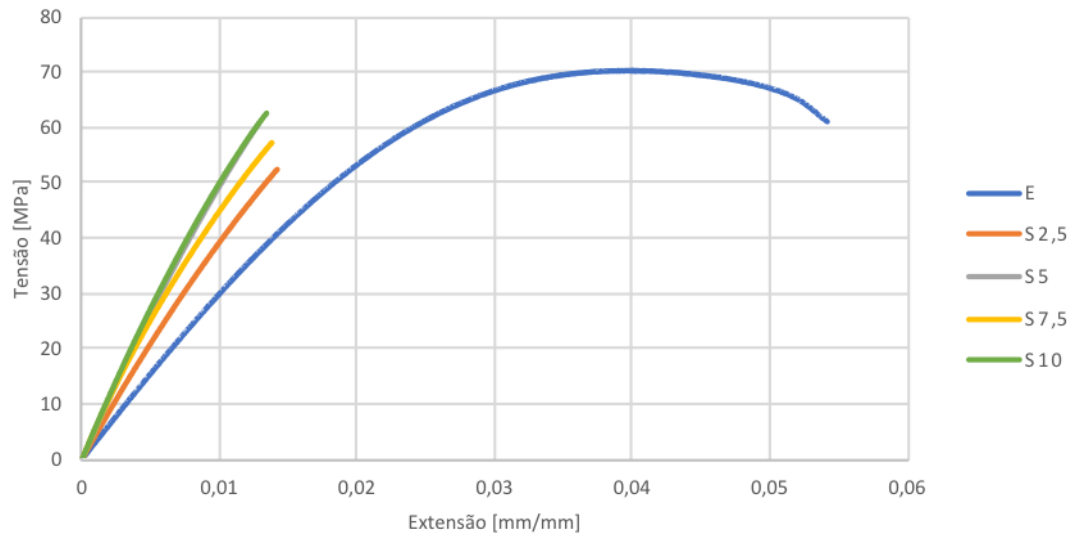


Figura 23 - Tensão-extensão para provetes com fibra de sisal: (a) curvas típicas da tensão-extensão;(b) ampliação das curvas tensão-extensão.

4.1.1. Módulo de *Young*

Com base na Figura 24, pode observar-se que a adição de fibras conduz a um aumento do módulo de *Young*. Para a fibra de coneteira, observou-se que houve variação do módulo de *Young*, que aumentou. E para a fibra de sisal observou-se também um ligeiro aumento do módulo de *Young* com o aumento da percentagem de fibras inseridas na resina.

É também possível observar que os valores mais elevados do módulo de elasticidade foram obtidos para os provetes com 10% de adição de fibras, tanto para os de coneteira como para os de sisal.

Para os provetes com 10% de coneteira, observou-se um aumento máximo de ~50% face aos provetes de epóxi. Relativamente aos provetes com 10% de sisal, registou-se um aumento máximo de ~84% comparativamente aos provetes de epóxi.

Comparando os dois tipos de reforço, é notório que o sisal atingiu valores mais altos em termos do módulo de elasticidade, registando um valor máximo de 5,67 GPa, enquanto que para os de coneteira registou-se um máximo de 4,65 GPa.

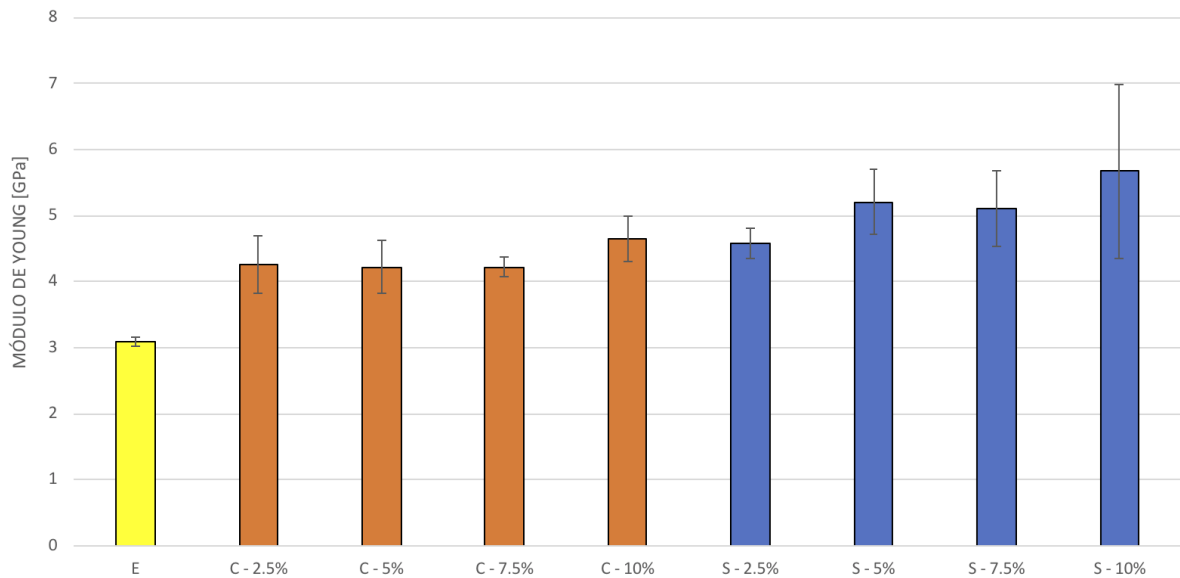


Figura 24 - Módulo de *Young* (E) dos compósitos.

4.1.2. Extensão à fratura

Por análise da Figura 25, verifica-se que a adição das fibras provoca uma diminuição da ductilidade do material, sendo que a conteira regista valores de extensão à fratura inferiores aos do sisal. Tanto para a conteira como para o sisal, observou-se uma diminuição da ductilidade com o aumento da quantidade de fibra. Já anteriormente, nas Figuras 22 e 23 este comportamento tinha sido observado.

Comparativamente à resina epóxi, observa-se que os provetes com 5% de conteira apresentam uma redução de extensão à fratura de aproximadamente de 86%. Para o sisal, os provetes com 10% apresentaram os valores mais baixos, com cerca de ~76% comparativamente à resina epóxi.

Os valores mais altos para a conteira foram obtidos nos provetes de 7,5% apresentando uma extensão à fratura de 0,0067 mm/mm, enquanto que para os de sisal foram os provetes de 2,5% com uma extensão à fratura de 0,0104 mm/mm.

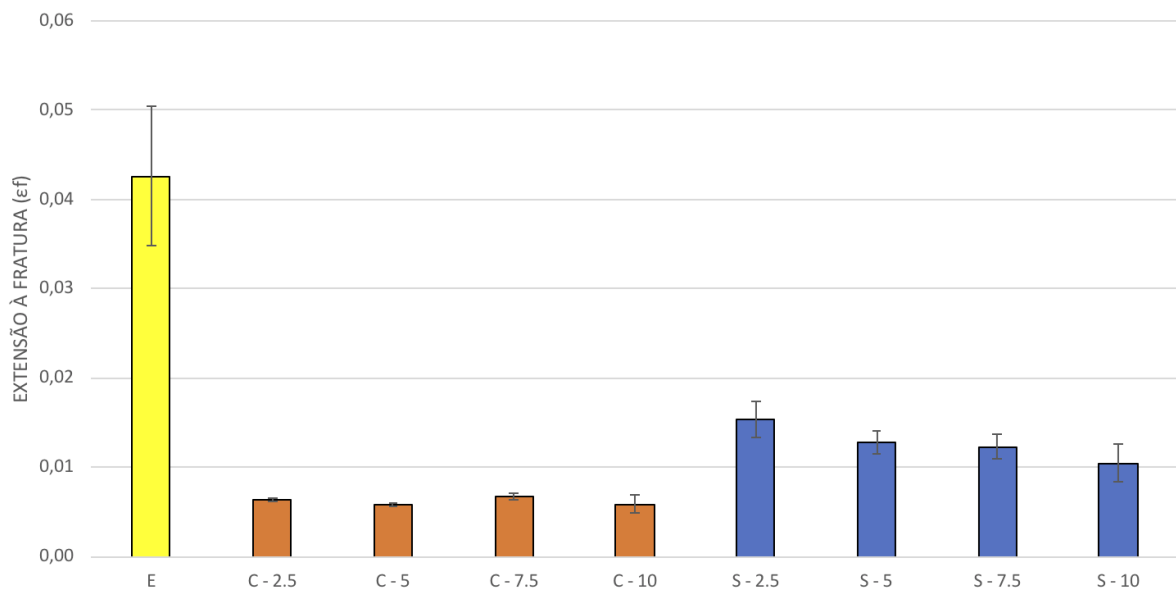


Figura 25 - Extensão à fratura (ϵ_f) dos compósitos.

4.1.3. Tensão de rotura

Os compósitos com adição de fibras, apresentam também uma diminuição em termos de tensão de rotura, comparativamente aos provetes de resina epóxi sem adição de fibras. Como é possível observar na Figura 26, essa diminuição foi mais significativa para os provetes de conteira do que para os de sisal.

Para a conteira, o valor mínimo registado para a tensão de rotura foi para os provetes de 5% em peso de fibra, com um valor de 22,62 MPa, correspondendo a uma diminuição de ~67% comparativamente à resina. O valor mais elevado registado foi de 25,21 MPa para os provetes de 2,5% correspondendo a uma diminuição de ~64%.

Para o sisal, o menor valor registado foi para os provetes de 10%, obtendo uma tensão de rotura de 42,50 MPa, sendo ~39 % inferior à resina. Relativamente ao valor mais elevado, foi para os provetes de 2,5% em peso, cuja tensão foi de 58,67 MPa, o que corresponde a uma diminuição de ~15%.

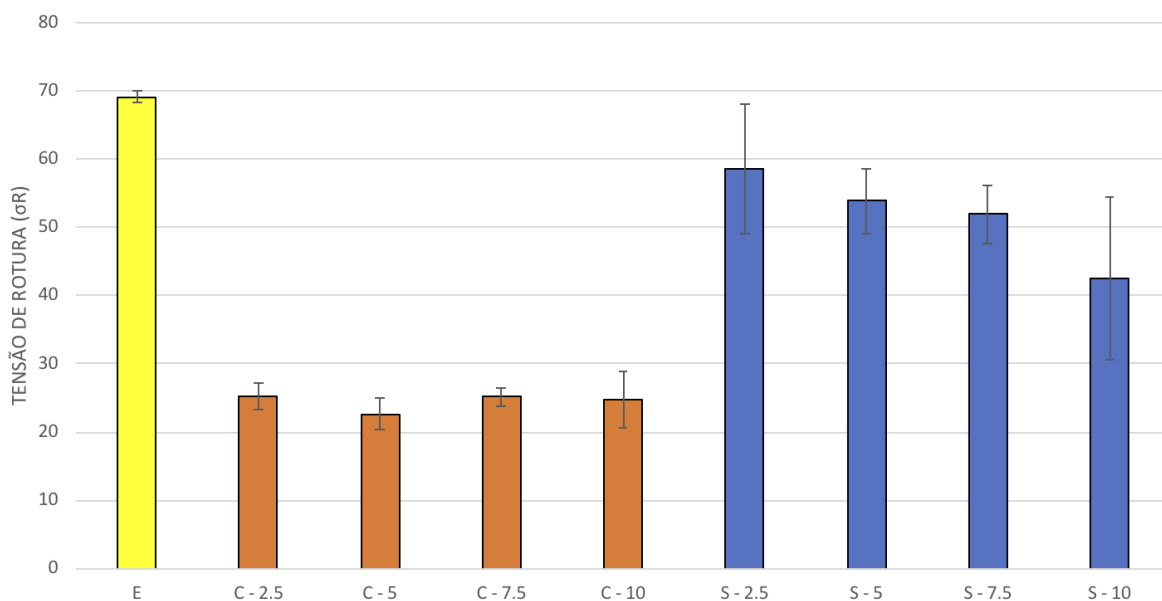


Figura 26 - Tensão de ruptura (σ_r) dos compósitos.

4.1.4. Tenacidade à fratura

Com a adição de fibras na resina, é possível verificar que o comportamento destes materiais relativamente à tenacidade (Figura 27) à fratura também sofre uma diminuição significativa. É mais visível para os provetes de conteira, apresentando os menores valores.

Para os provetes de conteira, o menor valor registado foi de 4,37 kJ/m³ para os de 5% em peso, que corresponde a ~96% relativamente aos provetes de epóxi. O valor mais elevado registado foi para os provetes de 7,5%, cuja tenacidade à fratura foi de 5,71 kJ/m³, ou seja, de ~95%.

Para o sisal, observou-se que com a adição gradual em termos de % de reforço utilizado a tenacidade à fratura também diminuí. O valor mais baixo registado foi para os provetes de 10%, correspondendo a 15,49 kJ/m³, ou seja, de ~85% face aos provetes de epóxi. Relativamente ao valor mais elevado obtido, foi para os provetes de 2,5%, com 32,05 kJ/m³ que corresponde a uma diminuição de ~70% comparativamente à resina.

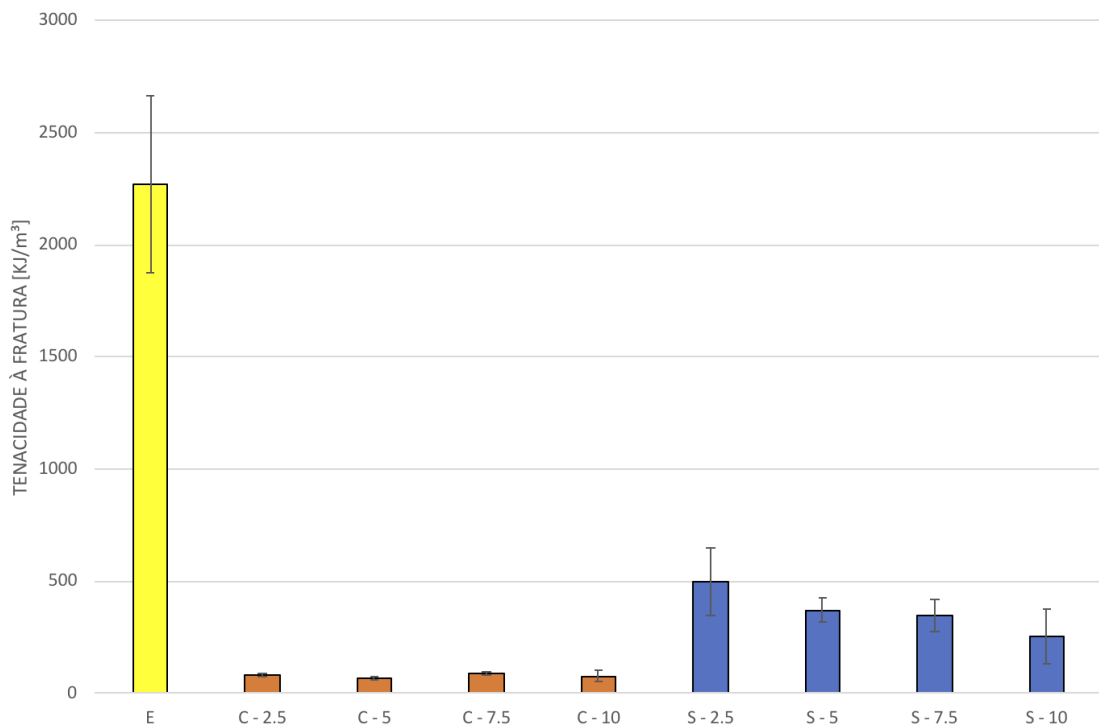


Figura 27 - Tenacidade à fratura (U) dos compósitos.

4.2. Ensaio de dureza

Através dos ensaios de dureza, representados na Figura 28, observou-se que a adição de fibras proporciona um aumento da dureza do material.

Para a contreira, o valor mínimo foi obtido para os ensaios dos materiais com 2,5% em peso, registando um valor de 19,31 HV, um decréscimo de ~7% relativamente à resina epóxi. O máximo foi registado para os provetes com 10%, com um valor de 22,87 HV, um aumento de ~10% comparativamente à resina.

Relativamente ao sisal, observou-se o mesmo comportamento, ou seja, o mínimo ocorreu para os materiais com 2,5% em peso, tendo sido obtido um valor de 19,53 HV, correspondendo a uma diminuição de ~6% em relação à resina e o valor máximo foi obtido para os materiais de 10% em peso, com um valor de 24,75 HV, o que corresponde a um aumento de ~19% em relação à epóxi.

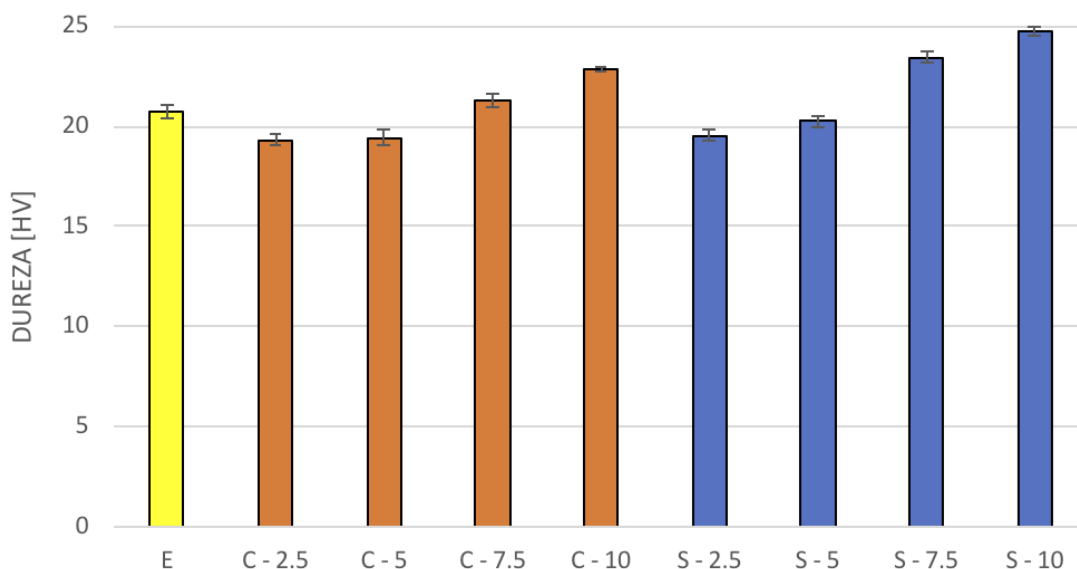


Figura 28 - Dureza (HV) dos compósitos.

4.3. Medição da densidade

Através da medição da densidade (Figura 29) realizada para os compósitos com 2,5%; 5%; 7,5% e 10% de adição de fibras, foi possível observar-se que a variação não foi muito significativa quando comparados com os provetes de resina epóxi sem adição de fibras. No entanto, é notório que a adição da percentagem em peso de fibra proporciona uma diminuição em termos de densidade, sendo ela inferior para os compósitos de conteira do que para os de sisal. O valor mínimo para os provetes de conteira, foi registado para os provetes de 10%, com uma densidade de $1,137 \text{ g/cm}^3$, correspondendo a uma diminuição de $\sim 2\%$ em relação aos provetes de epóxi. Em relação aos provetes de sisal, estes também registaram um valor mínimo para os provetes de 10%, de $1,148 \text{ g/cm}^3$, o que corresponde a uma diminuição de $\sim 1\%$ face aos provetes de epóxi.

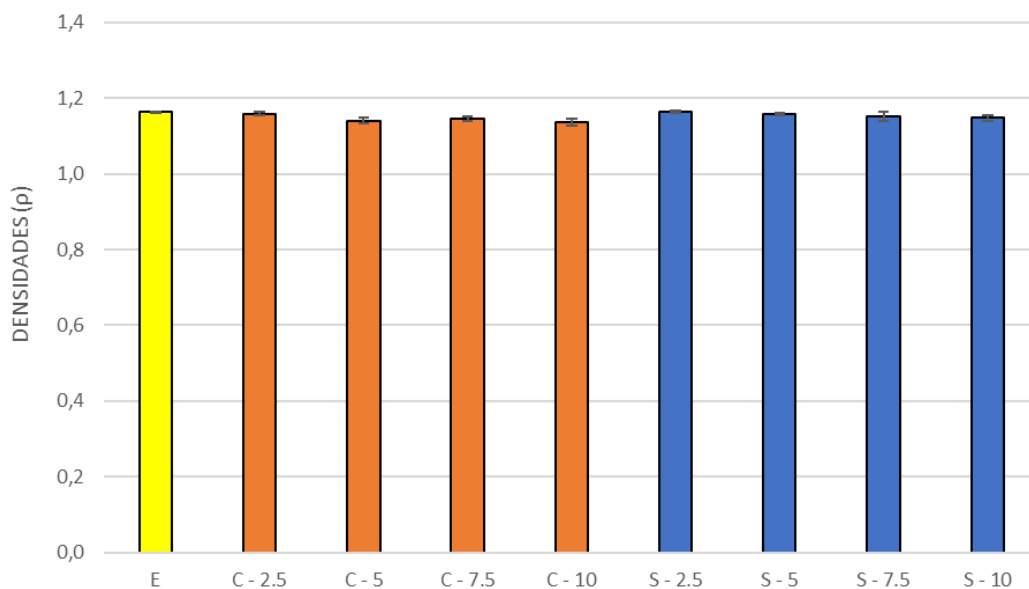


Figura 29 - Densidade dos compósitos (ρ).

4.4. Macrografias

4.4.1. Macrografias das fibras

Através da Figura 30 podem-se observar as fibras de conteira e de sisal antes e depois do tratamento com NaOH. A conteira é ilustrada na figura (a) e (b), sendo que a (a) corresponde às fibras sem o tratamento e a (b) corresponde às fibras tratadas. O sisal podemos observar na figura (c) e (d), sendo que o (c) corresponde às fibras sem tratamento e o (d) às fibras tratadas com NaOH.

Com o tratamento de NaOH, as fibras apresentam uma diminuição em termos de espessura e uma superfície mais rugosa comparativamente às fibras sem tratamento. De onde se depreende que a fibrose superficial aumenta com o tratamento de NaOH, ou seja, essa fibrose superficial é pretendida para que a adesão superficial resina/fibra aumente.

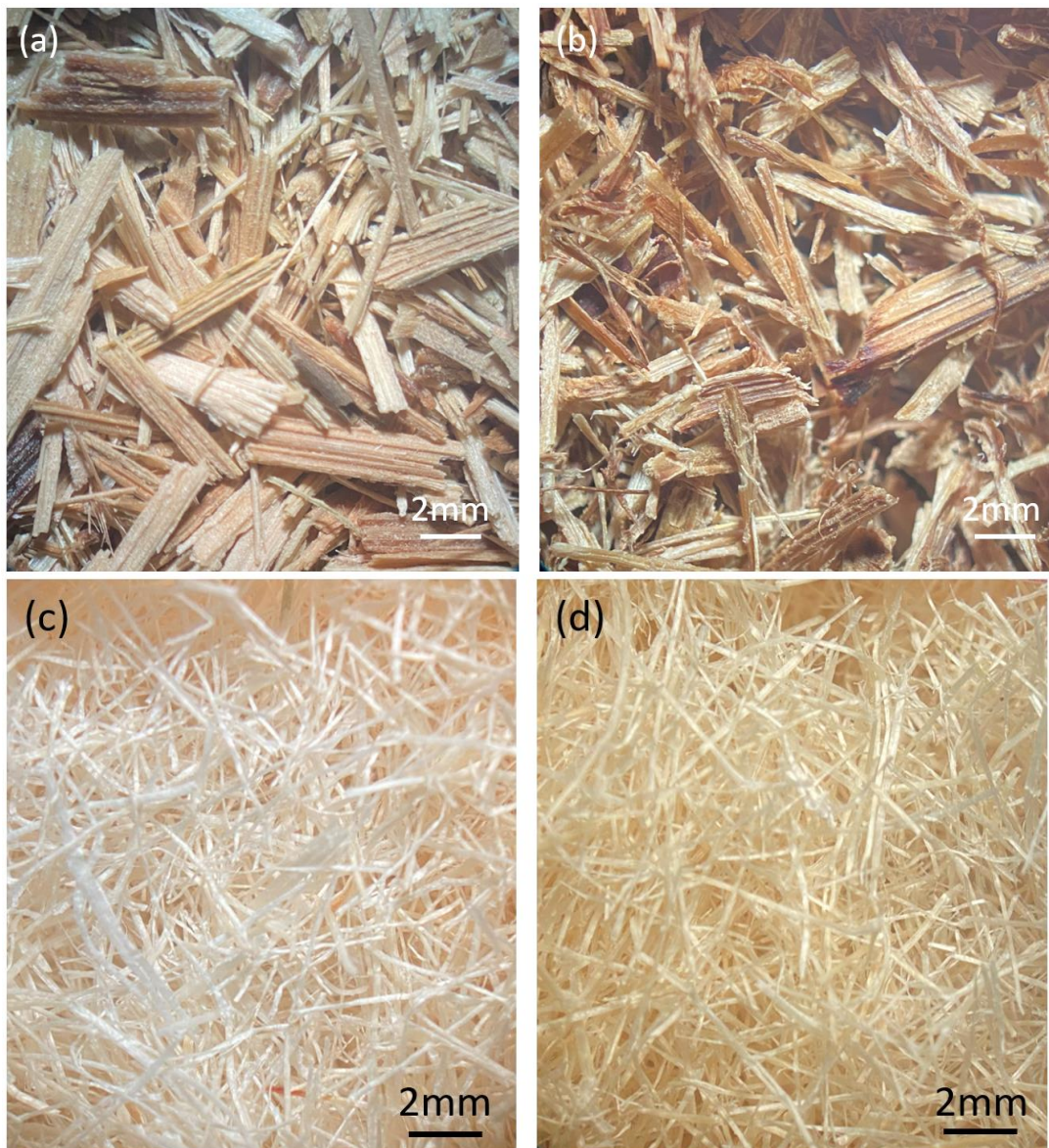


Figura 30 – Macrografias das fibras de coneteira e de sisal antes e depois do tratamento com NaOH: (a) Fibras de coneteira antes do tratamento; (b) Fibras de coneteira após o tratamento; (c) Fibras de sisal antes do tratamento; (d) Fibras de sisal após o tratamento.

4.4.2. Macrografias dos compósitos

Nas Figuras 31 e 32, são apresentadas as macrografias dos materiais compósitos de resina epóxi com inserção das fibras de coneteira e de sisal, respetivamente. Com o incremento da percentagem de fibra verifica-se que os compósitos apresentam algumas lacunas, como o aparecimento de bolhas de ar o que representa a dificuldade em termos de mistura. No entanto, observando as percentagens inferiores como a de 2,5%, apesar de o surgimento de

bolhas ser inferior, o material apresenta aglomerados de fibras em determinadas zonas e outras sem fibras, o que indica uma má homogeneização do compósito.

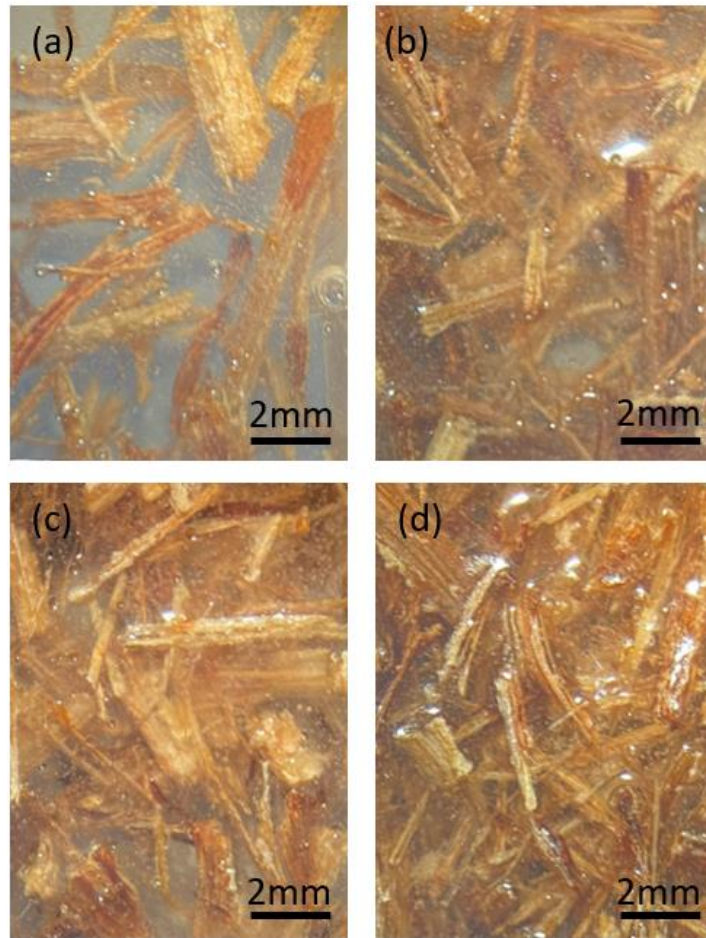


Figura 31 - Macrografias dos materiais compósitos de conteira: (a) 2,5% de conteira; (b) 5% de conteira; (c) 7,5% de conteira; (d) 10% de conteira.

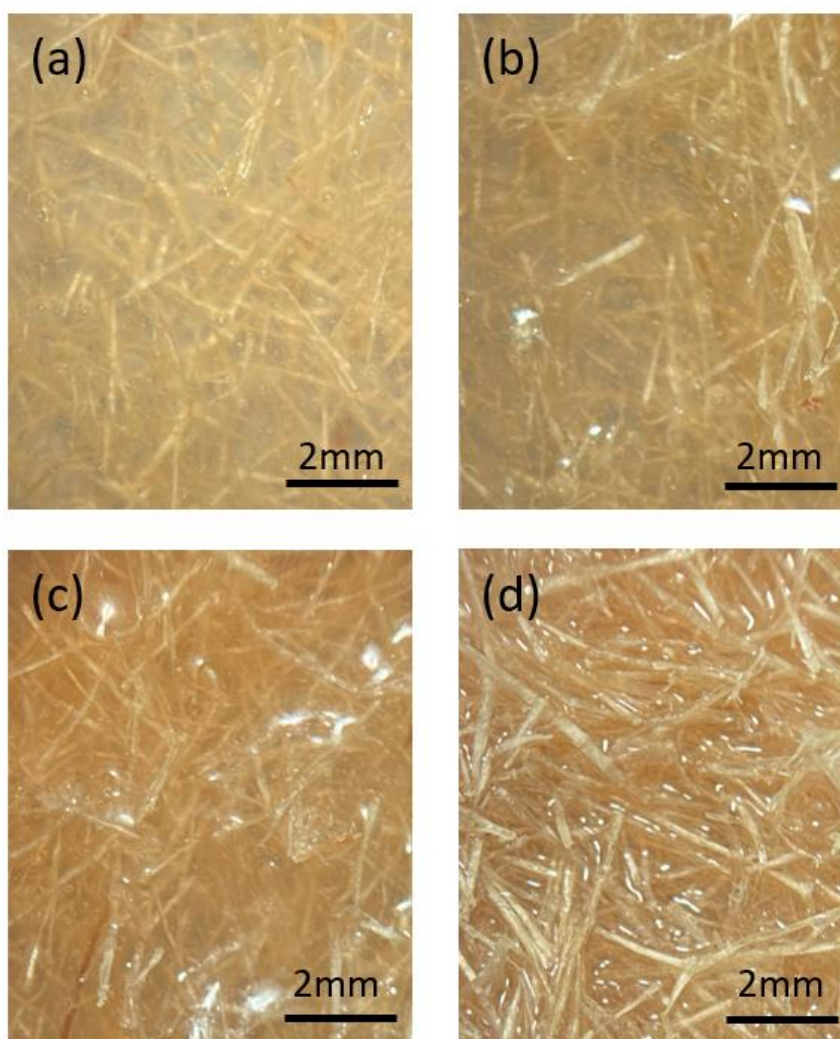


Figura 32 - Macrografias dos materiais compósitos de sisal: (a) 2,5% de sisal; (b) 5% de sisal; (c) 7,5% de sisal; (d) 10% de sisal.

Assim, os provetes com maior percentagem em peso de fibra (10%) são os que apresentam a maior concentração de fibras. Os provetes com menor concentração (2,5%) apresentam uma menor homogeneização do material.

4.4.3. Macrografias da zona de fratura dos compósitos

Na figura 33 e 34, são apresentadas as macrografias das zonas de fratura dos materiais compósitos de conteira e de sisal, respetivamente.

Nos compósitos de conteira observa-se que apresentam uma fratura frágil. Com o aumento da percentagem de fibra, a porosidade do material também aumenta, diminuindo a sua homogeneidade, tornando a zona de fratura irregular e porosa.

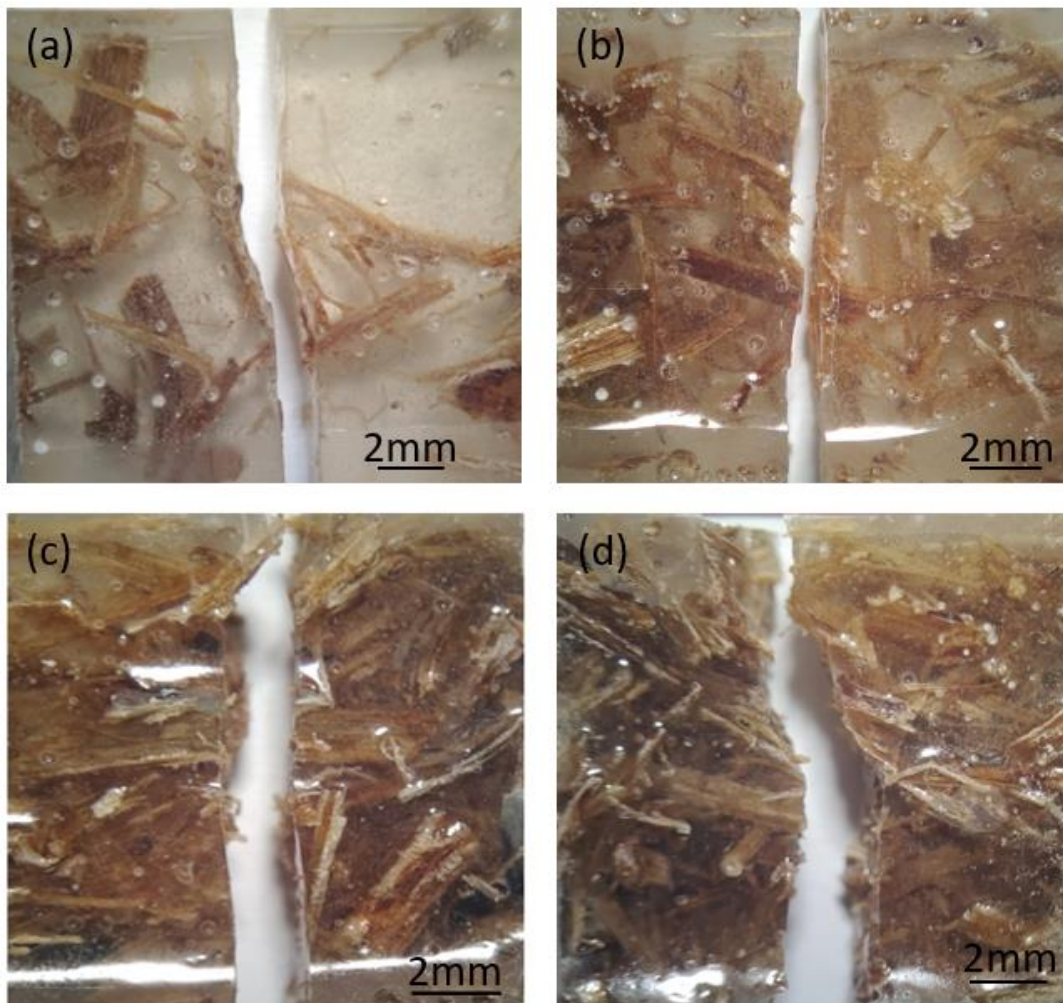


Figura 33 - Macrografia da zona de fratura dos provetes de conteira: (a) 2,5% de conteira; (b) 5% de conteira; (c) 7,5% de conteira; (d) 10% de conteira.

Para os compósitos de sisal observou-se um aumento da irregularidade na zona de fratura, apresentando uma menor porosidade. Verificou-se que na zona de fratura não originou separação entre as fibras e a matriz epoxídica, revelando uma boa adesão.

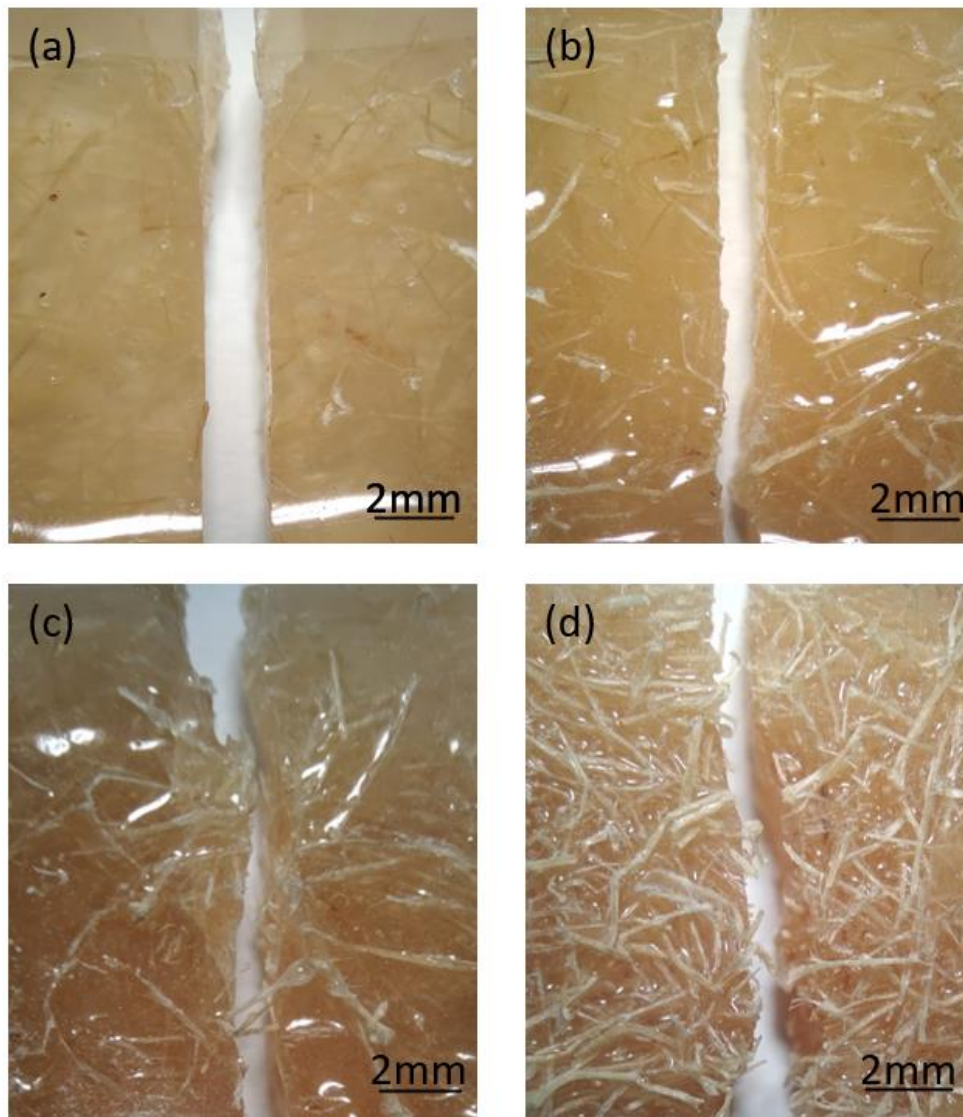


Figura 34 - Macrografia da zona de fratura dos provetes de sisal: (a) 2,5% de sisal; (b) 5% de sisal; (c) 7,5% de sisal; (d) 10% de sisal.

4.5. Micrografia da zona de fratura dos compósitos

A Figura 35 ilustra as micrografias das superfícies de fratura dos materiais compósitos realizadas através do MEV, com uma ampliação de 40x.

Foram realizadas desde a menor à maior % em peso dos provetes de conteira e de sisal, que são ilustradas na Figura 35, sendo que a a) corresponde a 2,5% de conteira, a b) a 10% de conteira, a c) a 2,5% de sisal e a d) a 10% de sisal.

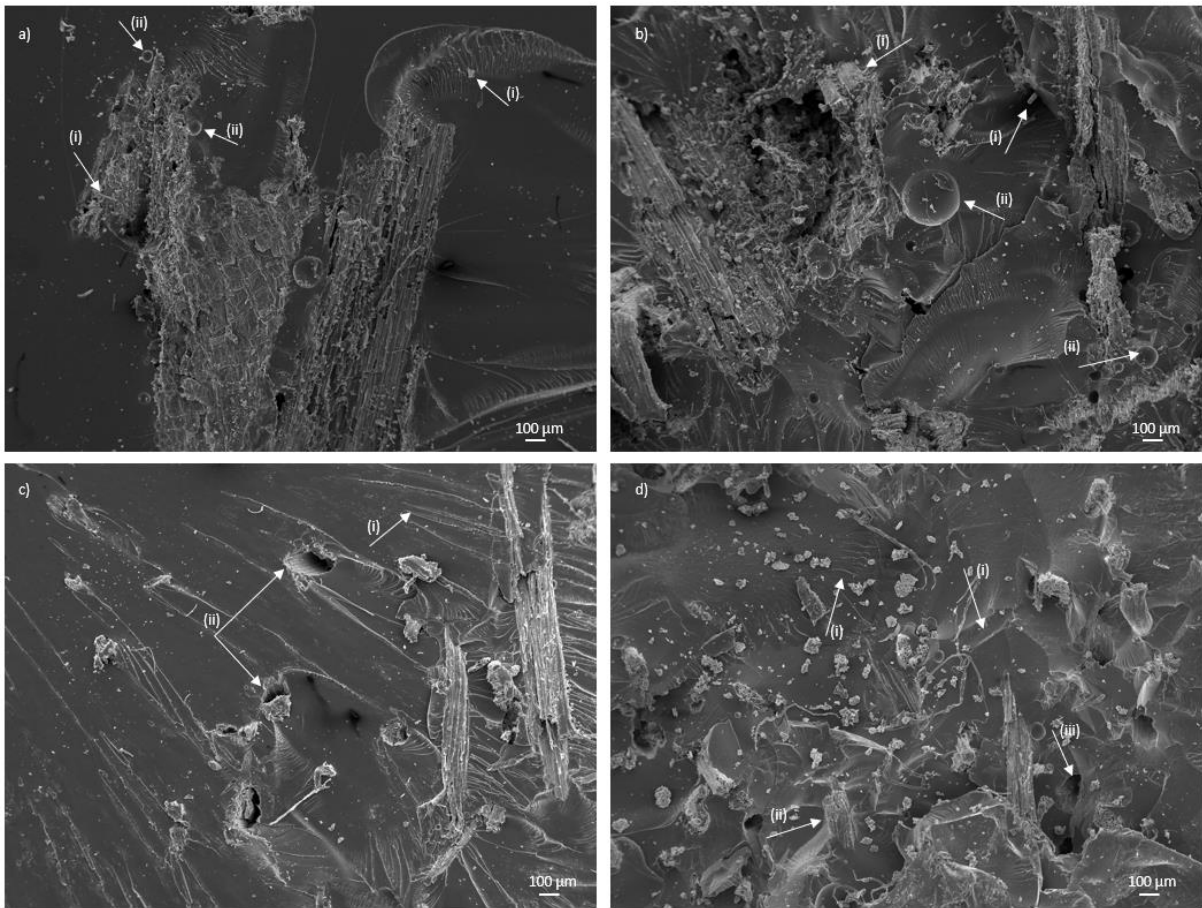


Figura 35 – MEV com ampliação a 40x: a) 2,5% de conteira; b) 10% de conteira; c) 2,5% de sisal; d) 10% de sisal.

Através da análise das imagens obtidas, observou-se que para ambas as diferentes fibras, os compósitos com 10% em peso apresentam maior porosidade (Figura 35 b) (ii)), maior quantidade de fibra (Figura 35 b) (i) e d) (ii)) e maior heterogeneidade em termos da sua distribuição (Figura 35 b) (i)). Em relação às superfícies de fratura, para a menor percentagem em peso de conteira (Figura 35 a)) e de sisal (Figura 35 c)) e para a maior percentagem em peso de conteira (Figura 35 b)) e de sisal (Figura 35 d)), observa-se que as amostras com maior percentagem apresentam maior quantidade de fibra na superfície de fratura. Quanto maior a percentagem, maior será a quantidade de fibras presentes no compósito.

É possível também observar-se estrias na superfície de fratura (Figura 35 c) (i) e d) (i)), representando as zonas de elevada concentração de tensões, indicando a direção de propagação da fenda. As áreas onde é possível verificar-se que a fibra esta fortemente aderida à matriz são apresentadas na Figura 35 d) (ii), e as áreas onde a se encontra ausência de fibra é ilustrada na Figura 35 d) (iii).

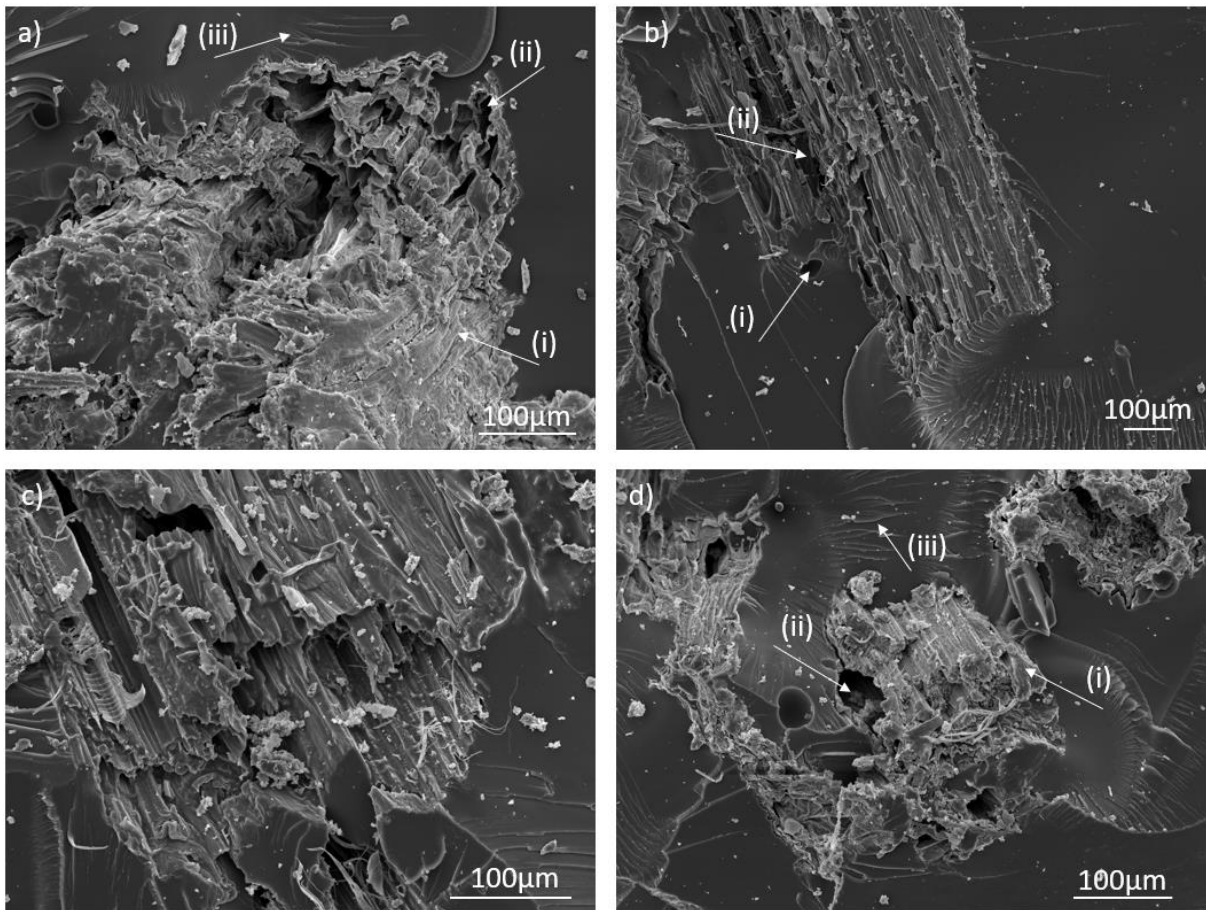


Figura 36 – MEV aos provetes de coneteira: a) 2,5% de coneteira 200x; b) 2,5 de coneteira 100x; c) 10% de coneteira 250x; d) 10% de coneteira 200x.

A Figura 36, ilustra as micrografias das superfícies de fratura dos provetes de coneteira com diferentes ampliações, e com a maior e a menor percentagem de fibra. Na Figura 36 a), observa-se que as fibras estão organizadas em forma de feixes, contendo à sua volta resina epóxi. Para maiores ampliações, o MEV revelou que as fibras fraturaram transversalmente à carga (Figura 36 a) (i)). Verificou-se também que para alguns casos é visível que as fibrilas exteriores dos feixes ficaram aderidas à matriz, ao contrário dos interiores que descolaram devido ao esforço causado pela tração. Este acontecimento é visível tanto em fibras que estavam alinhadas axialmente com o eixo de tração (Figura 36 b) (ii) e d) (ii)), como para as que estavam noutras direções. Observou-se também um descolamento entre o exterior dos feixes e a matriz (Figura 36 a) (i) e Figura 36 d) (i)). A desfibrilação que ocorre nas fibras é visível na Figura 36 d). Estrias foram também vistas junto das fibras, sendo resultantes da propagação da fenda (Figura 36 a) (iii) e c) (iii)).

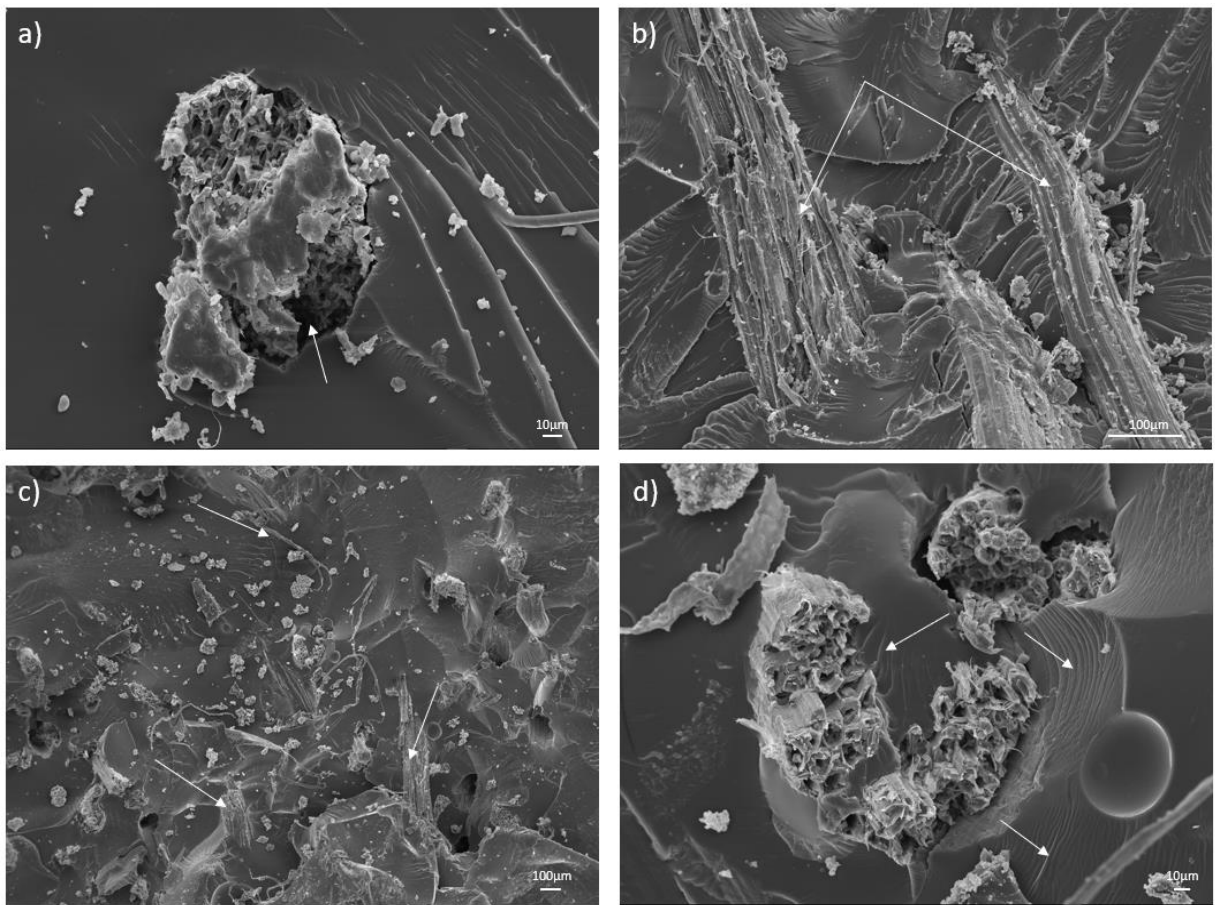


Figura 37 – MEV aos provetes de sisal: a) 2,5% de sisal 400x; b) 2,5 de sisal 150x; c) 10% de sisal 40x; d) 10% de sisal 350x.

Na Figura 37, estão representadas as micrografias das superfícies de fratura dos provetes de sisal para diferentes ampliações e percentagens de fibra. Neste caso observa-se também que as fibras estão organizadas em feixes (Figura 37), tal como as anteriores (Figura 36).

Capítulo 5

Discussão

Neste capítulo é apresentada a discussão de toda a componente laboratorial realizada, comparativamente à literatura atual.

De um modo geral, estes resultados indicam que as propriedades mecânicas dos compósitos dependem do tamanho da fibra. Existe uma redução da resistência à tração e da ductilidade com o tamanho da fibra, assim como existe um tamanho de fibra para o qual o módulo de elasticidade é o mais elevado.

O estudo apresentado neste trabalho teve como objetivo o fabrico e a caracterização mecânica de compósitos de matriz epoxídica com a incorporação de dois tipos de fibras: fibras de conteira e de sisal, ambas com 6 mm de comprimento.

Previamente ao fabrico, procedeu-se ao tratamento das fibras numa solução alcalina de NaOH, levando à desfibrilação das mesmas (Figura 30). Este tratamento tem sido muito utilizado na literatura para retirar impurezas, assim como a hemicelulose e a lignina presentes na fibra, conduzindo ao aumento proporcional do teor de celulose, promovendo a adesão das fibras hidrofílicas à matriz hidrofóbica, devido à quebra da rede extensiva de ligações de hidrogénio da sua estrutura, dando origem a grupos de hidroxila livres reativos [41].

A análise das superfícies de fratura após os ensaios de tração permitiu observar que grande parte das fibras ficaram aderidas à resina, o que demonstra uma boa adesão entre as fibras e a matriz (Figuras 35, 36 e 37). Para ambas as fibras, observaram-se heterogeneidades na distribuição destas no compósito (Figuras 33 e 34), o que pode ser atribuído a diferenças de hidrofiliabilidade entre a matriz e a fibra. É de notar que este efeito foi mais preponderante no caso da conteira.

Através dos ensaios de tração, observou-se um aumento do módulo de elasticidade com o aumento da percentagem de adição de fibra, tanto para os compósitos com conteira, como para os de sisal. Os provetes com fibras de conteira com 10% wt, apresentaram o valor mais elevado do módulo de elasticidade, 4,65 GPa (Figura 24). Dentro dos provetes de sisal, os com 10% wt de fibras, também apresentaram o valor mais elevado, obtendo-se 5,67 GPa (Figura 24). O aumento do módulo de elasticidade do compósito com a incorporação de fibra deve-se ao facto da fibra ter um módulo superior ao da matriz. De acordo com a literatura, o módulo de elasticidade do sisal está compreendido entre os 9-22 GPa [42], contudo não foram encontrados na literatura valores para o módulo de elasticidade da conteira.

Em contrapartida, os resultados da tensão de rotura obtidos para os compósitos de conteira e de sisal revelaram uma diminuição da resistência à tração, tanto com o aumento da percentagem de incorporação de fibras, assim como comparativamente à resina epóxi. A maior resistência à tração obtida para a conteira foram para os provetes de 2,5% wt, cujo valor de tensão de rotura atingiu os 25,21 MPa. No caso do sisal, foram também os provetes de 2,5% wt que apresentaram uma resistência à tração superior, atingindo uma tensão de rotura

de 58,67 MPa. Os provetes sem incorporação de fibras na sua matriz, só resina epóxi, atingiram os 69,07 MPa de tensão de rotura (Figura 26). De uma forma geral, verificou-se que à medida que são adicionadas fibras, a resistência mecânica à tração diminui praticamente para todas as percentagens estudadas, o que pode ser atribuído ao aumento da porosidade do compósito, fragilizando-o (Figura 26, Figura 33 e Figura 34) [43].

É de notar que noutros trabalhos foram obtidos valores para a tensão de rotura semelhantes ou inferiores aos obtidos no presente trabalho. Por exemplo, para compósitos laminados com fibras de sisal foram obtidos por Arthanarieswaran et al. valores de resistência à tração de 23 MPa [44]. É de notar que de acordo com Priya et al. a resina usada tem uma resistência à tração de 187 MPa [45]. Kumaresan et al. estudaram o efeito da orientação das fibras de sisal na resistência à tração de compósitos laminados, e obtiveram-se valores entre 16 e 40 MPa [42]. Num estudo semelhante, valores entre 16 e 57 MPa foram obtidos por Badrinath [43]. Patra et al. testaram compósitos com fibras curtas e obtiveram valores entre 25 e 35 MPa [46]. No que diz respeito aos valores mais baixos obtidos para a tensão de rotura, os provetes com coneteira com 5% em peso de fibra, apresentam um valor de 22,62 MPa, e os provetes de sisal com 10% em peso de fibra, apresentaram um valor de 42,50 MPa, o que corresponde a uma diminuição de ~67% e de ~39 %, sucessivamente, comparativamente à resina epóxi (Figura 26).

A diminuição da resistência mecânica, pode ser justificada pelo facto de as fibras serem locais de concentração de tensões originando o local ideal para a iniciação da fratura do compósito. A observação MEV, permitiu identificar (Figura 36 e Figura 37), estrias concêntricas na matriz junto às fibras. As fibras foram capazes de suportar a carga após a fratura, o que é visível um estiramento da fibra, principalmente para as fibras de sisal (Figura 37).

A concentração de tensões induzida na matriz epoxídica devido à presença das fibras também teve reflexo na ductilidade dos compósitos. Os resultados mostram que à medida que são adicionadas fibras, os materiais apresentam uma diminuição desta propriedade, sendo que a coneteira regista valores de extensão à fratura inferiores aos do sisal. Os provetes de sisal com 2,5% wt foram os que apresentaram uma extensão à fratura superior, com 0,0104 mm/mm. No caso dos provetes com coneteira, os que possuem 7,5% wt de adição de fibras, apresentaram uma extensão à fratura de 0,0067 mm/mm (Figura 25). No que diz respeito aos valores mais baixos obtidos, observou-se que os provetes com 5% wt de coneteira apresentam uma redução da extensão à fratura de aproximadamente de 86%, e para o sisal, os provetes com 10% wt apresentaram os valores mais baixos, com cerca de ~76 %, comparativamente à

resina epóxi. Estes resultados devem-se à pouca homogeneidade na dispersão das fibras no material compósito.

A tenacidade à fratura também apresenta uma diminuição significativa com o aumento de adição de fibras na matriz. Este comportamento é mais visível para os provetes de conteira, que são os que apresentam os menores valores, sendo que o mais baixo registado são para os provetes de 5% em peso de fibra, cuja valor foi de 4,37 kJ/m³ (Figura 27). No caso do sisal, o valor mais baixo registado foi para os provetes de 10% em peso de fibra, com um valor de 15,49 kJ/m³ (Figura 27). Assim, a conteira apresenta uma diminuição de ~96% e o sisal de ~85%, comparativamente aos provetes de resina epóxi.

No caso da dureza, observou-se que a adição de fibras proporciona um aumento desta propriedade, sendo que tanto a conteira, como o sisal, registaram valores superiores aos da resina epóxi. O maior valor obtido para a conteira foi para os compósitos de 10% em peso de fibra, atingindo os 22,87 HV, e para o sisal foram também os compósitos de 10% em peso de fibra, cujo valor atingiu os 24,75 HV (Figura 28). Isto corresponde a um aumento de ~10% e de ~19%, respetivamente, em relação à resina epóxi. As fibras funcionam como um obstáculo à deformação plástica do matiz, conduzindo a um aumento da dureza.

No que diz respeito à densidade dos compósitos estudados, a variação foi quase inexistente. Apesar da variação dos resultados serem muito mínimas, apresentam um decréscimo com a adição de fibras. O menor valor registado para a conteira, foi para os provetes de 10% em peso de fibras, com uma densidade de 1,137 g/cm³, e para o sisal, o menor valor foi também para os provetes de 10% em peso de fibras, com um valor de 1,148 g/cm³ (Figura 29). Tais diminuições correspondem a ~2% e ~1%, sucessivamente, face aos provetes de epóxi. A densidade da fibra de sisal é de 1,45 g/cm³, enquanto que a densidade da resina é de 1,16 g/cm³ pelo que teoricamente seria expectável que a densidade dos compósitos aumenta-se com o aumento do conteúdo em fibra. A ausência de diferenças em densidade entre os vários materiais produzidos pode ser atribuída a um aumento de porosidade dos compósitos com o aumento do teor em fibra.

Os resultados obtidos no presente trabalho foram comparados com os obtidos no trabalho de R. Ferreira [34] e verificou-se que existe um tamanho ótimo para o qual o módulo de elasticidade é máximo, contudo a resistência à tração e a ductilidade diminui com o aumento do tamanho da fibra [34]. A diminuição da resistência à tração da fibra com o aumento do tamanho da fibra deve-se ao facto do aumento do tamanho conduzir a uma diminuição do número de fibras que são obstáculos à propagação da fissura (Figura 38).

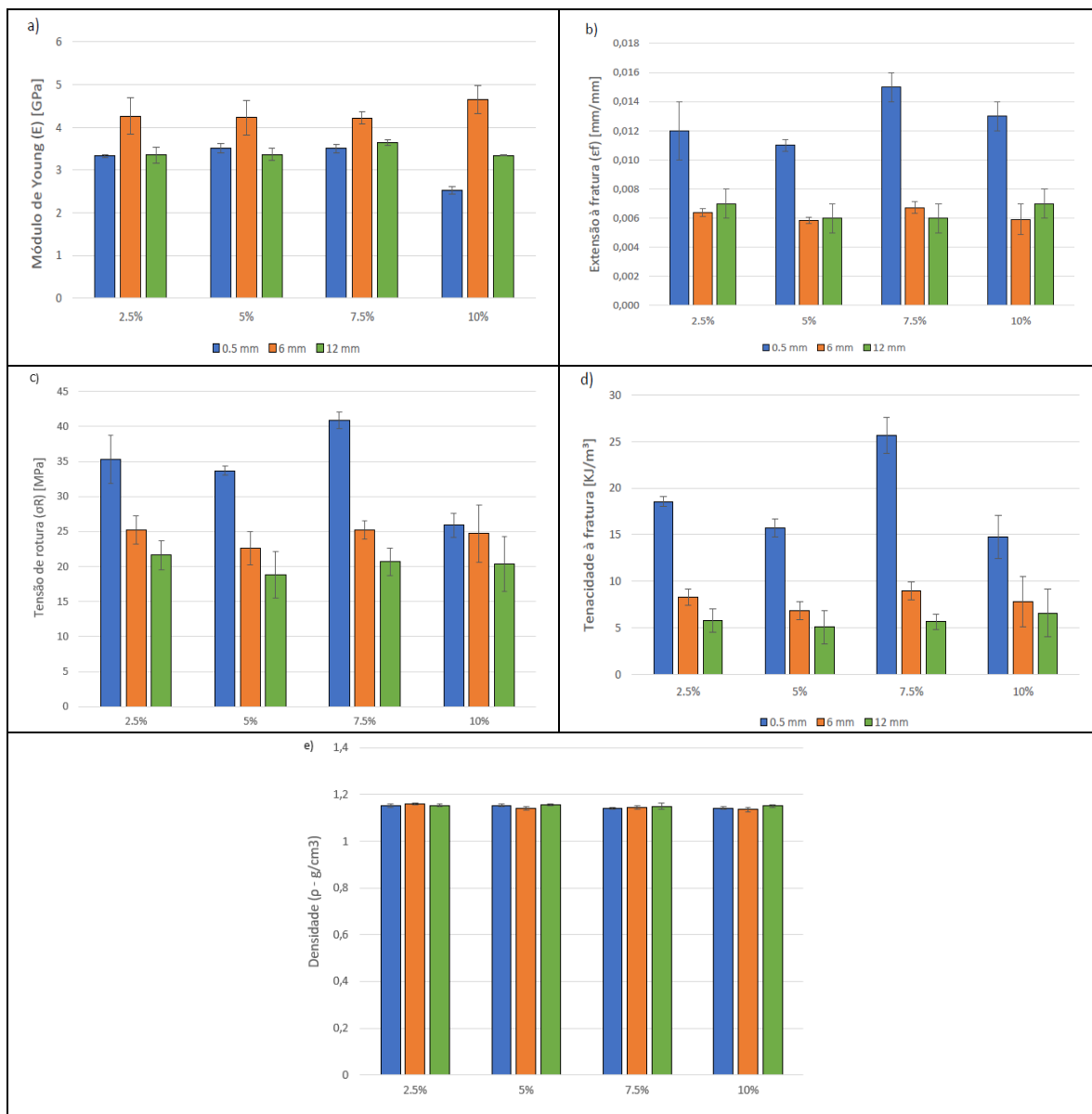


Figura 38 – Propriedades mecânicas dos compósitos estudados: a) Módulo de *Young*; b) Extensão à fratura; c) Tensão de rotura; d) Tenacidade à fratura; e) Densidade.

De um modo geral, estes resultados indicam que as propriedades mecânicas dos compósitos dependem do tamanho da fibra. Existe uma redução da resistência à tração e da ductilidade com o tamanho da fibra, assim como existe um tamanho de fibra para o qual o módulo de elasticidade é o mais elevado.

Capítulo 6

Conclusões e Proposta de Trabalhos Futuros

Este capítulo apresenta as conclusões do estudo, e ainda, o que poderá ser realizado futuramente para complementar o tema.

6.1. Conclusões

Este estudo teve como intuito produzir e caracterizar compósitos de resina epóxi com fibras de coneteira e fibras de sisal com diferentes percentagens em peso e com as mesmas dimensões. Para tal, foram fabricados materiais com percentagens em peso a variar entre os 2,5% e os 10%wt, ambos com 6 mm de tamanho. Sendo assim conclui-se que:

- O fabrico destes materiais compósitos é possível ser produzido através do vazamento em moldes de silicone;
- Com o aumento da quantidade de fibra incorporada no compósito, verificou-se:
 - ❖ Um aumento da porosidade do material;
 - ❖ Variação não significativa na densidade do material;
 - ❖ Diminuição da resistência à tração, ductilidade e tenacidade à fratura;
 - ❖ Aumento do módulo de elasticidade;
 - ❖ Aumento da dureza;
- Os compósitos que apresentaram maior resistência mecânica e módulo de elasticidade foram os de sisal.

Em suma, o sisal apresenta melhores propriedades mecânicas comparativamente à coneteira.

6.2. Propostas de trabalhos futuros

Como proposta para trabalhos futuros propõe-se:

- Produzir materiais compósitos com as mesmas fibras, utilizando uma matriz polimérica mais sustentável;
- Produzir os compósitos com o auxílio de vácuo para diminuir a porosidade do material;
- Estudar o efeito de outros tratamentos nas fibras presentes na literatura;
- Caracterizar os materiais produzidos relativamente à resistência à flexão, impacto e ao desgaste.

Bibliografia

- [1] H. Rachid, S. Rajaa, B. Zakaria, H. Miloudi, R. Mohamed, E. Ahmed, “Polymer composite materials: A comprehensive review”, *Composite Structures*, vol 262, 2021.
- [2] S. Luciana, C. Aires, V. Graça, “Material compósito à base de gesso reforçado com fibras: caracterização mecânica”, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil Azurém, P - 4800-058, 2014.
- [3] M. Jawaid and H. P. S. Abdul Khalil, “Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: a review,” *Carbohydrate Polymers*, vol. 86, no. 1, pp. 1–18, 2011.
- [4] Y. Payae, N. Lopattananon, “Adhesion of pineapple-leaf fiber to epoxy matrix: The role of surface treatments”, *Songklanakarin J. Sci. Technol.*, vol. 31, pp. 189–194, 2009.
- [5] O. Faruk, A. K. Bledzki, H.-P. Fink, and M. Sain, “Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010,” *Progress in Polymer Science*, vol. 37, no. 11, pp. 1552–1596, 2012.
- [6] J.M. Kenny, “Natural fibre composites in the European automotive industry,” in *Proceedings of the 6th International Conference on Wood Fibre-Plastic Composites*, 2001.
- [7] W. D. Brouwer, “Natural fibre composites: where can flax compete with glass?” *SAMPE Journal*, vol. 36, no. 6, pp. 18–23, 2000.
- [8] T. Peijs, “Composites turn green,” in *Proceedings of the Swedish Institute of Composite Conference*, Pitea, Sweden, 2000.
- [9] M. J. John and S. Thomas, “Biofibres and biocomposites”, *Carbohydrate Polymers*, vol. 71, no. 3, pp. 343–364, 2008.
- [10] S. Taj, M. A. Munawar, and S. U. Khan, “Natural fiber-reinforced polymer composites,” *Proceedings of the Pakistan Academy of Sciences*, vol. 44, no. 2, pp. 129–144, 2007.
- [11] M. Mochane, S. Magagula, J. Sefadi, T. Mokhena, “A review on green composites based on natural fiber-reinforced polybutylene succinate (PBS)”, *Polymers*, 2021.

- [12] A. Albore, “Hedychium gardnerianum in foresta di media montagna, dall'isola di Flores (Azzorre)”, Hedychium gardnerianum flowers, 2015.
- [13] Jardim Gulbenkian, available at: <https://gulbenkian.pt/jardim/garden-flora/conteira/>. Acedido em março de 2021.
- [14] P. Paiva, “A conteira é a planta com todas as capacidades para substituir o plástico”, Innovation Green Azores, 2019.
- [15] Britannica Escola, available at: <https://escola.britannica.com.br/artigo/sisal/626546>. Acedido em abril de 2021.
- [16] P. Shelton, “O que é Sisal (Agave Sisalana)?”, Ripley Believes, 2021.
- [17] N. Lopattananon, Y. Payae, M. Seadan, “Influence of fiber modification on interfacial adhesion and mechanical properties of pineapple leaf fiber-epoxy composites”, Journal of Applied Polymer Science, pp.433 – 44, 2008.
- [18] J. Siregar, S. Sapuan, M. Rahman, K. Zaman, “The effect of alkali treatment on the mechanical properties of short pineapple leaf fibre (PALF) reinforced high impact polystyrene (HIPS) composites”, Journal of Food Agriculture and Environment, 2010.
- [19] J. George, S. Bhagawan, S. Thomas, “Effects of environment on the properties of low-density polyethylene composites reinforced with pineapple-leaf fibre”; Composites Science and Technology, pp. 1471-1485, 1998.
- [20] S. Albinante, E. Pacheco, L. Visconte, “A review on chemical treatment of natural fiber for mixing with polyolefins”, Instituto de Macromoléculas, 2013.
- [21] R. Baptista, A. Mendão, F. Rodrigues, C.G. Figueiredo-Pina, M. Guedes and R. Marat-Mendes, “Effect of high graphite filler contents on the mechanical and tribological failure behavior of epoxy matrix composites”, Theoretical and Applied Fracture Mechanics 85, pp. 113-124, 2016.
- [22] R. Marat-Mendes, I. Rodrigues and C.G. Figueiredo-Pina, “Evaluation of tribological performance of carbon fibre reinforced epoxy composites loaded with graphite platelets under reciprocating linear motion”, Journal of Engineering Tribology, pp. 1-9, 2019.

- [23] A. Moghadam, E. Omrani, P. L. Menezes and P. K. Rohatgi, “Mechanical and tribological properties of self-lubricating metal matrix nanocomposites reinforced by carbon nanotubes (CNTs) and graphene - A review”, *Composites Part B* 77, pp. 402-420, 2015.
- [24] V. Kumar, S. K. Sinha & A. K. Agarwal, “Tribological studies of epoxy and its composite coatings on steel in dry and lubricated sliding”, *Tribology - Materials, Surfaces & Interfaces*, pp. 144-153, 2015.
- [25] X. Shen, X. Pei, Y. Liu and S. Fu, “Tribological performance of carbon nanotube–graphene oxide hybrid/epoxy composites”, *Composites: Part B* 57, pp. 120-125, 2014.
- [26] J. Qiu, S. Wang, “Enhancing polymer performance through graphene sheets”, *Wiley Online Library*, pp. 3670- 3674, 2010.
- [27] J. Dermott, “The structure of the advanced composites industry”, *Advance composites Bluebook*, 1990.
- [28] J. Cha, J. Kim, S. Ryu, S. Hong, “Comparison to mechanical properties of epoxy nanocomposites reinforced by functionalized carbon nanotubes and graphene nanoplatelets”, *Composites Part B* 162, pp. 283–288, 2019.
- [29] K. Senthilkumar, N. Saba, N. Rajini, M. Chandrasekar, M. Jawaid, S. Siengchin, O. Alotman, “Mechanical properties evaluation of sisal fibre reinforced polymer composites: A review”, *Construction and Building Materials*, Vol. 174, pp. 713-729, 2018.
- [30] S. Luz, P. Ferrão, “Design e desenvolvimento sustentável”, *Ecodesign e Materiais*, 2005.
- [31] C. Gabriel, “Potencial eco-sustentável de um compósito reforçado com fibras naturais aplicado a um equipamento multifuncional para suporte e estabilização de câmaras”, *Escola Superior de Tecnologia e Gestão*, 2016.
- [32] Rebelco, available at: <http://www.rebelco.pt/files/SR%201500-%20PORT%20.pdf>. Acedido em março de 2021.
- [33] Fibrenamics Azores, available at: <http://green.fibrenamics.com/newsletter/fibrenamics-azores>. Acedido em fevereiro de 2021.

- [34] R. Ferreira, “Produção e caracterização de compósitos de matriz epóxi com fibra de conteira”, Instituto Politécnico de Setúbal – Escola Superior de Tecnologia de Setúbal, 2021.
- [35] BS EN ISO 527-4 (1997), Plastics - Determination of tensile properties-Part. 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre – reinforced plastic composites, British Standards Institution (BSI).
- [36] CATIA V5 Student Edition. available at: <https://academy.3ds.com/en/software/catia-v5-student-edition>. Acedido em fevereiro de 2021.
- [37] ESQUIM S.A., Chemical Specialties, “Silicone elastomers”, available at: <https://www.esquim.com/wp-content/uploads/2016/10/Catálogo-Moldeados-EN.pdf>. Acedido em março de 2021.
- [38] METTLER TOLEDO, “Medição de densidade”, available at: https://www.mt.com/br/pt/home/applications/Laboratory_weighing/density-measurement.html. Acedido em abril de 2021.
- [39] Mundo Educação, “Lei de Hooke”, available at: <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/lei-hooke.htm>. Acedido em fevereiro de 2021.
- [40] MicroLab Electron Microscopy Laboratory, Técnico Lisboa, available at: <http://microlab.ist.utl.pt/microfacilities.html>. Acedido em abril de 2021.
- [41] I. Silva, “Propriedades e estrutura de compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas de juta”, Centro de Ciência e Tecnologia, 2014.
- [42] M. Kumaresan, S. Sathish, N. Karthi, “Effect of fiber orientation on mechanical properties of sisal fiber reinforced epoxy composites”, Journal of Applied Science and Engineering, Vol. 18, No. 3, pp. 289-294, 2015.
- [43] R. Badrinath, T. Senthilvelan, “Comparative investigation on mechanical properties of banana and sisal reinforced polymer based composites”, Procedia Materials Science, pp. 2263 – 2272, 2014.

- [44] V. Arthanarieswaran, A. Kumaravel, M. Kathirselvam, “Evaluation of mechanical properties of banana and sisal fiber reinforced epoxy composites: Influence of glass fiber hybridization”, *Materials and Design*, pp. 194–202, 2014.
- [45] I. Priya, B. Vinayagam, “Enhancement of bi-axial glass fibre reinforced polymer composite with graphene platelet nanopowder modifies epoxy resin”, *Advances in Mechanical Engineering*, 2018.
- [46] A. Patra, D. Bisoyi, “Investigation of the electrical and mechanical properties of short sisal fiber-reinforced epoxy composite in correlation with structural parameters of the reinforced fiber”, *Journal of Materials Science*, pp. 7206-7213, 2011.

Anexos

Registo dos Ensaio Experimentais

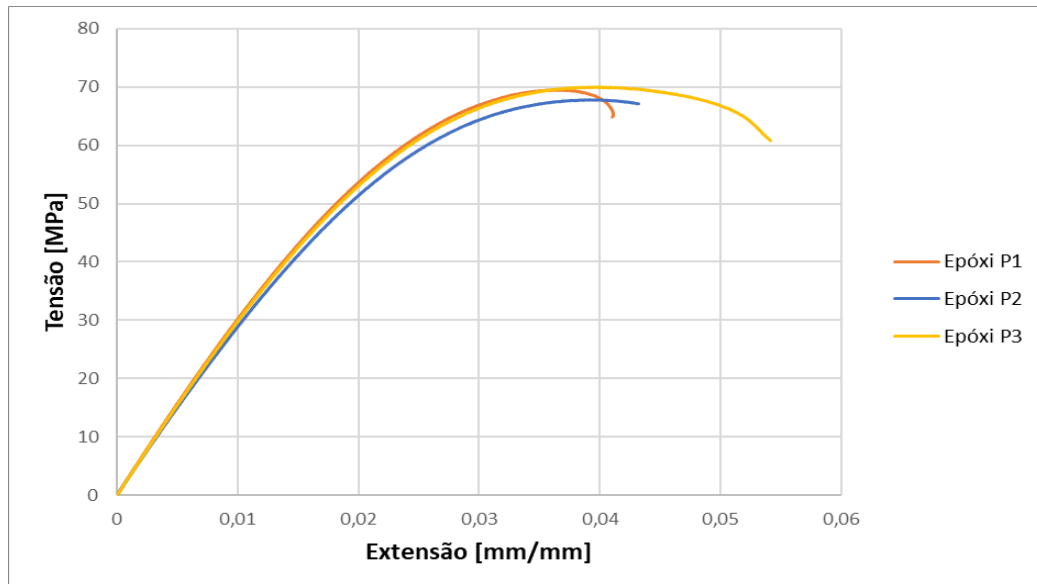


Figura A.1 – Ensaio experimentais dos provetes de epóxi.

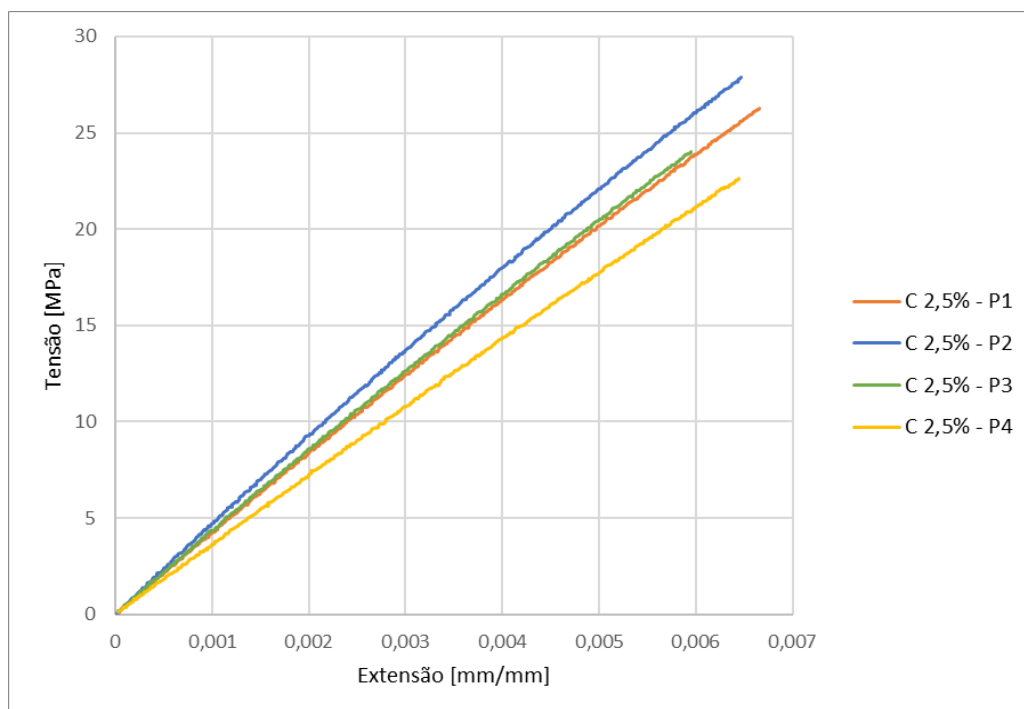


Figura A.2 – Ensaio experimentais dos provetes de conteira com 2,5% wt.

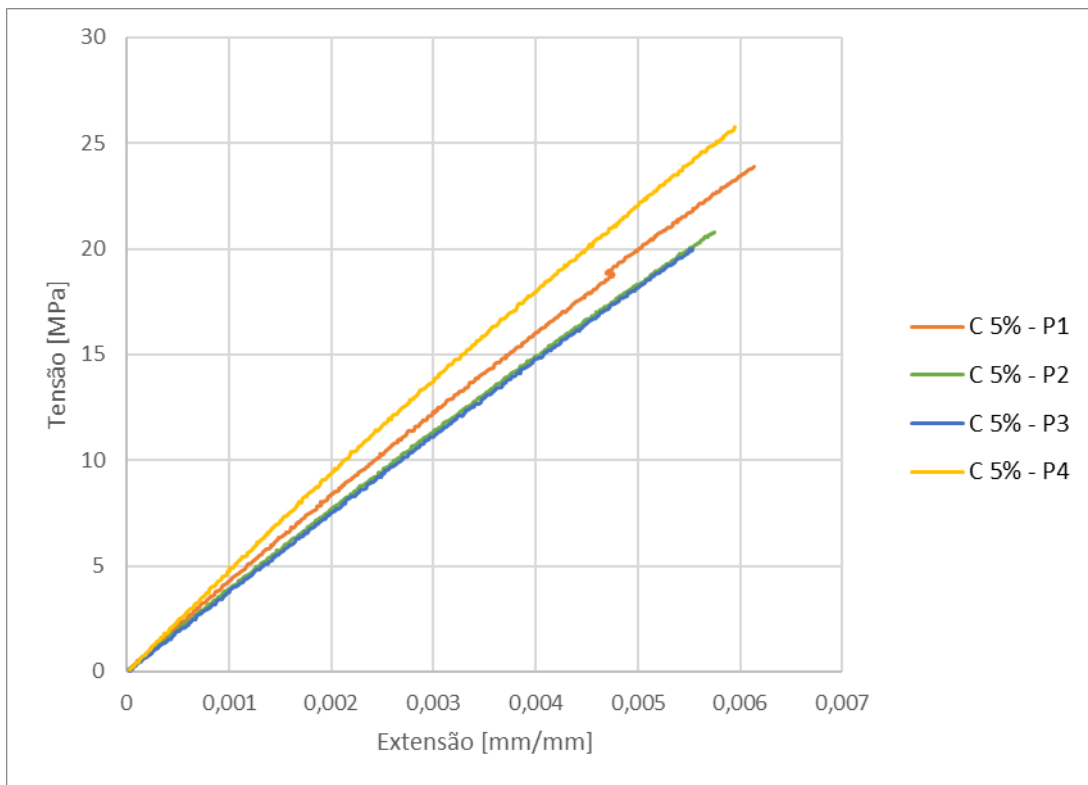


Figura A.3 – Ensaio experimentais dos provetes de conteira com 5% wt.

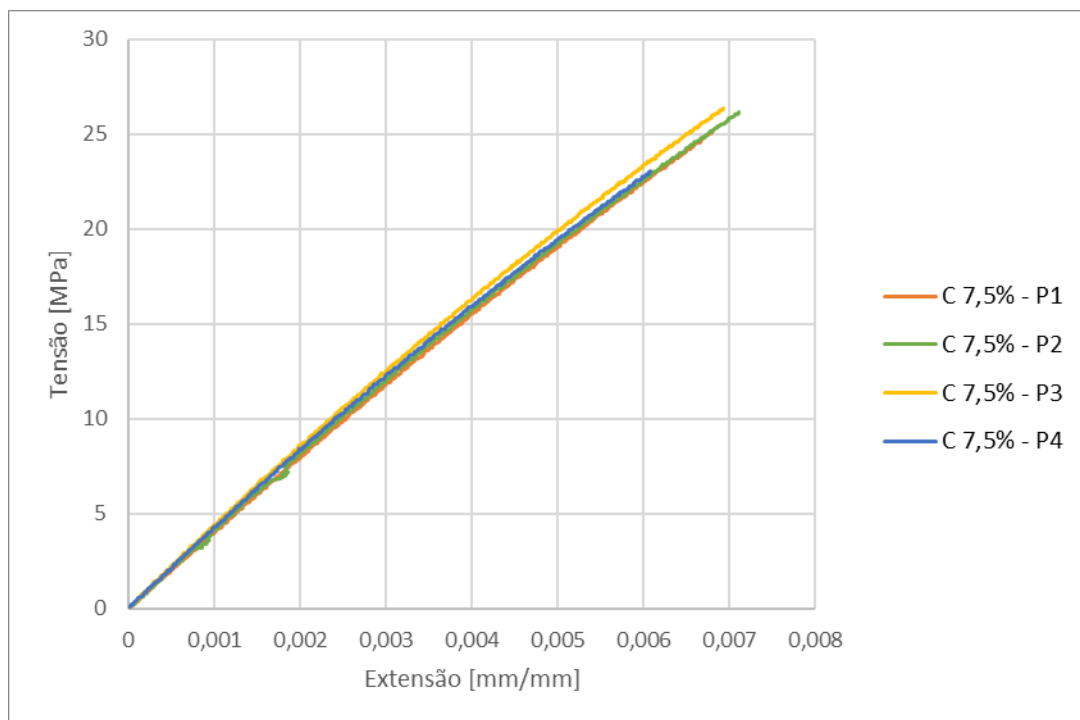


Figura A.4 – Ensaio experimentais dos provetes de conteira com 7,5% wt.

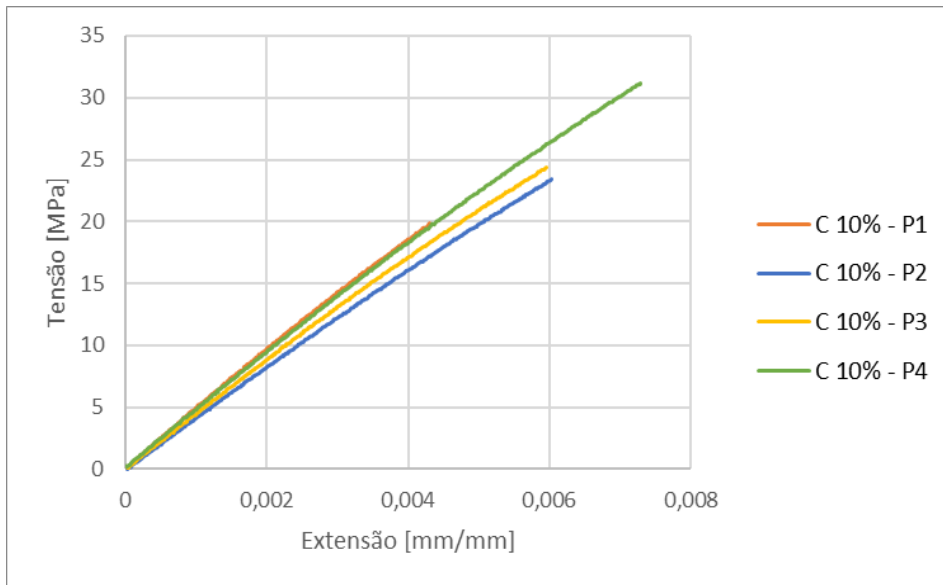


Figura A.5 – Ensaio experimentais dos provetes de conteira com 10% wt.

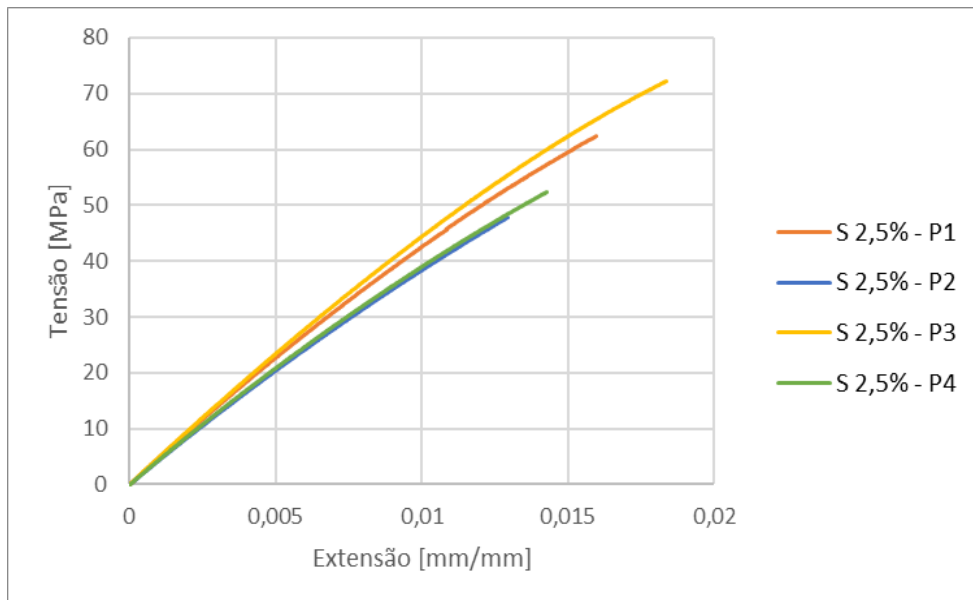


Figura A.6 – Ensaio experimentais dos provetes de sisal com 2,5% wt.

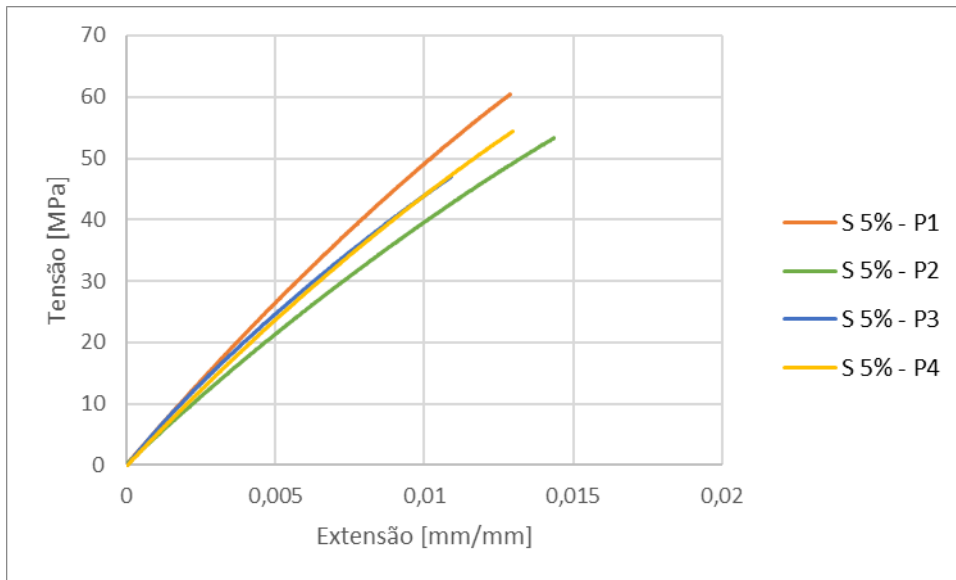


Figura A.7 – Ensaio experimental dos provetes de sisal com 5% wt.

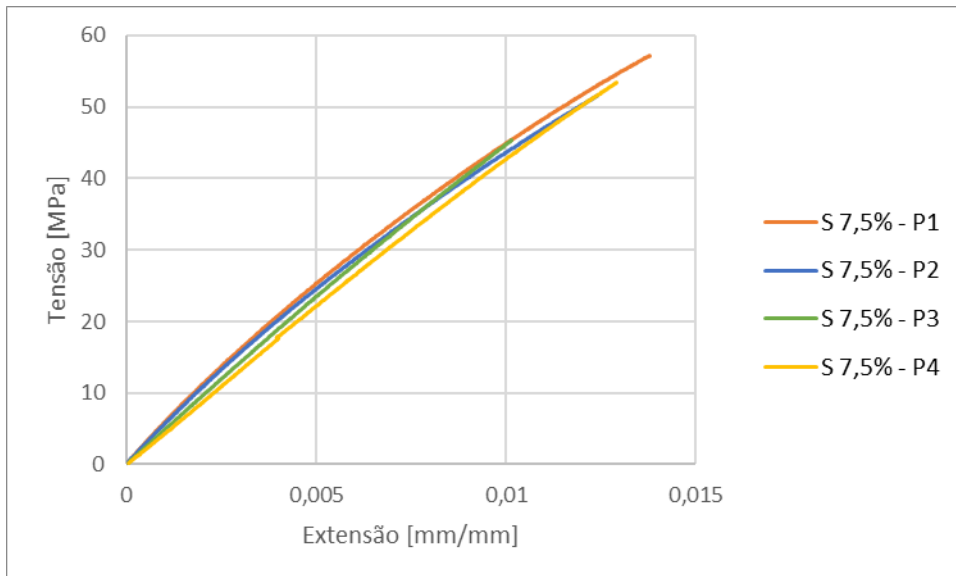


Figura A.8 – Ensaio experimental dos provetes de sisal com 7,5% wt.

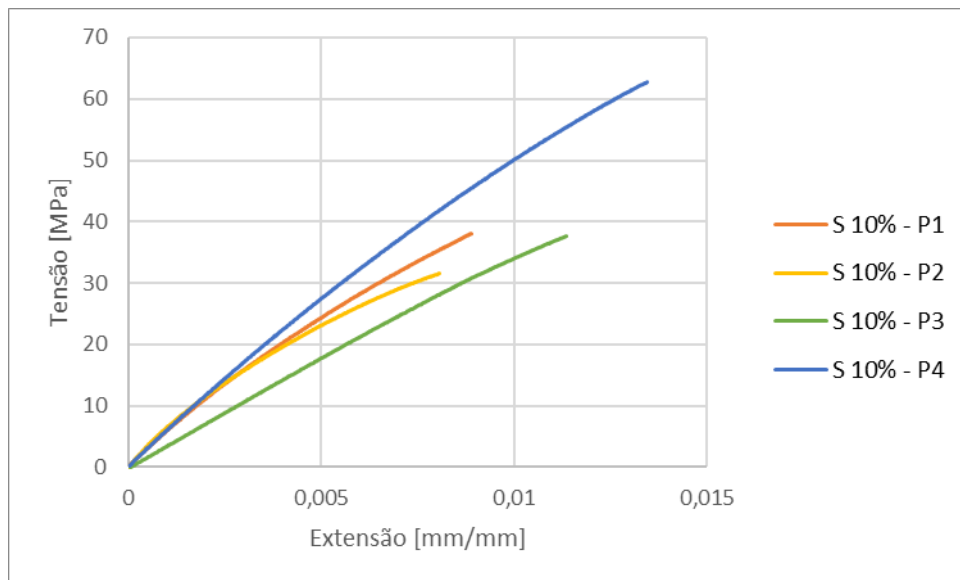


Figura A.9 – Ensaio experimentais dos provetes de sisal com 10% wt.

Tabela A.1 – Resultados dos ensaios experimentais dos provetes de resina epóxi.

Resina Epóxi						
	E (GPa)	σ_r [MPa]	σ_f [MPa]	σ_c [MPa]	ϵ_f [mm/mm]	U (kJ/m ³)
P1	3,18	69,55	64,90	51,56	0,04	1950,77
P2	3,03	67,89	67,20	56,83	0,04	2030,71
P3	3,05	68,73	68,68	55,03	0,03	-
P4	3,11	70,13	60,85	54,07	0,05	2830,13
Média	3,09 ± 0,06	69,07 ± 0,84	65,41 ± 2,95	54,37 ± 1,90	0,04 ± 0,01	2270,54 ± 397,03

Tabela A.2 – Resultados dos ensaios experimentais dos provetes de conteira com 2,5% wt.

Conteira (6 mm) - 2,5% wt						
	E (GPa)	σ_r [MPa]	σ_f [MPa]	σ_c [MPa]	ϵ_f [mm/mm]	U (kJ/m ³)
P1	4,28	26,29	26,29	13,87	0,01	90,14
P2	4,81	27,88	27,88	14,91	0,01	93,36
P3	4,35	24,02	24,02	12,67	0,01	73,60
P4	3,61	22,66	22,66	11,85	0,01	74,15
Média	4,26 ± 0,43	25,21 ± 2,01	25,21 ± 2,01	13,33 ± 1,16	0,01 ± 0,00	82,81 ± 9,01

Tabela A.3 – Resultados dos ensaios experimentais dos provetes de conteira com 5% wt.

Conteira (6 mm) - 5% wt						
	E (GPa)	σ_r [MPa]	σ_f [MPa]	σ_c [MPa]	ϵ_f [mm/mm]	U (kJ/m³)
P1	4,26	23,91	23,91	12,65	0,01	75,87
P2	3,91	20,82	20,82	11,13	0,01	61,68
P3	3,85	20,01	20,01	10,49	0,01	56,51
P4	4,88	25,75	25,75	13,73	0,01	79,72
Média	4,23 ± 0,41	22,62 ± 2,32	22,62 ± 2,32	12,00 ± 1,27	0,01 ± 0,00	68,45 ± 9,62

Tabela A.4 – Resultados dos ensaios experimentais dos provetes de conteira com 7,5% wt.

Conteira (6 mm) - 7,5% wt						
	E (GPa)	σ_r [MPa]	σ_f [MPa]	σ_c [MPa]	ϵ_f [mm/mm]	U (kJ/m³)
P1	4,02	25,07	25,07	13,50	0,01	88,53
P2	4,21	26,20	26,20	14,13	0,01	97,85
P3	4,43	26,37	26,37	14,30	0,01	96,76
P4	4,22	23,10	23,10	12,42	0,01	73,72
Média	4,22 ± 0,15	25,19 ± 1,30	25,19 ± 1,30	13,59 ± 0,74	0,01 ± 0,00	89,21 ± 9,65

Tabela A.5 – Resultados dos ensaios experimentais dos provetes de conteira com 10% wt.

Conteira (6 mm) - 10% wt						
	E (GPa)	σ_r [MPa]	σ_f [MPa]	σ_c [MPa]	ϵ_f [mm/mm]	U (kJ/m³)
P1	5,12	19,86	19,86	10,40	0,00	44,08
P2	4,22	23,43	23,43	12,62	0,01	73,11
P3	4,49	24,36	24,36	13,08	0,01	75,82
P4	4,77	31,21	31,21	17,02	0,01	119,69
Média	4,65 ± 0,33	24,72 ± 4,11	24,72 ± 4,11	13,28 ± 2,38	0,01 ± 0,00	78,18 ± 27,01

Tabela A.6 – Resultados dos ensaios experimentais dos provetes de sisal com 2,5% wt.

Sisal (6 mm) - 2,5% wt						
	E (GPa)	σ_r [MPa]	σ_f [MPa]	σ_c [MPa]	ϵ_f [mm/mm]	U (kJ/m³)
P1	4,74	62,33	62,33	35,15	0,02	537,86
P2	4,33	47,70	47,70	25,93	0,01	326,11
P3	4,85	72,29	72,29	41,47	0,02	726,13
P4	4,39	52,37	52,37	29,19	0,01	400,28
Média	4,58 ± 0,22	58,67 ± 9,47	58,67 ± 9,47	32,94 ± 5,93	0,02 ± 0,00	497,60 ± 152,25

Tabela A.7 – Resultados dos ensaios experimentais dos provetes de sisal com 5% wt.

Sisal (6 mm) - 5% wt						
	E (GPa)	σ_r [MPa]	σ_f [MPa]	σ_c [MPa]	ϵ_f [mm/mm]	U (kJ/m³)
P1	5,55	60,50	60,44	35,28	0,01	417,03
P2	4,50	53,33	53,33	29,64	0,01	411,58
P3	5,75	47,10	47,10	26,20	0,01	281,06
P4	5,04	54,46	54,46	30,54	0,01	379,74
Média	5,21 ± 0,48	53,85 ± 4,75	53,83 ± 4,73	30,42 ± 3,24	0,01 ± 0,00	372,35 ± 54,60

Tabela A.8 – Resultados dos ensaios experimentais dos provetes de sisal com 7,5% wt.

Sisal (6 mm) - 7,5% wt						
	E (GPa)	σ_r [MPa]	σ_f [MPa]	σ_c [MPa]	ϵ_f [mm/mm]	U (kJ/m³)
P1	5,75	57,11	57,11	33,03	0,01	437,56
P2	5,52	51,69	51,69	29,19	0,01	352,13
P3	4,83	45,40	45,40	24,81	0,01	238,07
P4	4,33	53,45	53,45	30,41	0,01	358,93
Média	5,11 ± 0,56	51,92 ± 4,24	51,92 ± 4,24	29,36 ± 2,97	0,01 ± 0,00	346,67 ± 71,12

Tabela A.9 – Resultados dos ensaios experimentais dos provetes de sisal com 10% wt.

Sisal (6 mm) - 10% wt						
	E (GPa)	σ_r [MPa]	σ_f [MPa]	σ_c [MPa]	ϵ_f [mm/mm]	U (kJ/m ³)
P1	5,92	37,98	37,93	21,72	0,01	187,65
P2	7,29	31,58	31,58	17,78	0,01	150,20
P3	3,61	37,74	37,74	20,79	0,01	224,83
P4	5,87	62,67	62,67	35,50	0,01	461,75
Média	5,67 ± 1,32	42,50 ± 11,93	42,48 ± 11,93	23,95 ± 6,83	0,01 ± 0,00	256,11 ± 121,62

Tabela A.10 – Módulo de elasticidade da resina epóxi, dos compósitos de resina epóxi reforçados com fibras de conteira e dos compósitos de resina epóxi reforçados com fibras de sisal.

Módulo de Young E (GPa)									
	E	C – 2.5%	C – 5%	C – 7.5%	C – 10%	S – 2.5%	S – 5%	S – 7.5%	S – 10%
Média	3,09	4,26	4,23	4,22	4,65	4,58	5,21	5,11	5,67
	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,06	0,43	0,41	0,15	0,33	0,22	0,48	0,56	1,32

Tabela A.11 – Extensão à fratura da resina epóxi, dos compósitos de resina epóxi reforçados com fibras de conteira e dos compósitos de resina epóxi reforçados com fibras de sisal.

Extensão à fratura (ϵ_f) [mm/mm]									
	E	C – 2.5%	C – 5%	C – 7.5%	C – 10%	S – 2.5%	S – 5%	S – 7.5%	S – 10%
Média	0,0426	0,0064	0,0058	0,0067	0,0059	0,0154	0,0128	0,0123	0,0104
	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,0079	0,0003	0,0002	0,0004	0,0011	0,0020	0,0012	0,0013	0,0021

Tabela A.12 – Tensão de rotura da resina epóxi, dos compósitos de resina epóxi reforçados com fibras de conteira e dos compósitos de resina epóxi reforçados com fibras de sisal.

Tensão de rotura (σ_r) (MPa)									
	E	C – 2.5%	C – 5%	C – 7.5%	C – 10%	S – 2.5%	S – 5%	S – 7.5%	S – 10%
Média	69,07	25,21	22,62	25,19	24,72	58,67	53,85	51,92	42,50
	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,84	2,01	2,32	1,30	4,11	9,47	4,75	4,24	11,93

Tabela A.13 – Tenacidade à fratura da resina epóxi, dos compósitos de resina epóxi reforçados com fibras de conteira e dos compósitos de resina epóxi reforçados com fibras de sisal.

Tenacidade à fratura (U) [kJ/m ³]									
	E	C – 2.5%	C – 5%	C – 7.5%	C – 10%	S – 2.5%	S – 5%	S – 7.5%	S – 10%
Média	2270,54	82,81	68,45	89,21	78,18	497,60	372,35	346,67	256,11
	± 397,03	± 9,01	± 9,62	± 9,65	± 27,01	± 152,25	± 54,60	± 71,12	± 121,62

Tabela A.14 – Ensaio de densidade para os provetes de resina epóxi.

Material	Nº	Peso ar (g)	Peso água (g)	ρ (g/cm ³)	Média ρ (g/cm ³)
Epóxi	1	0,9654	0,1378	1,167	1,163
	1	1,0678	0,1469	1,160	
	2	1,3003	0,1791	1,160	
	2	1,3446	0,1880	1,163	
	3	1,3229	0,1845	1,162	
	3	1,2203	0,1725	1,165	
	4	1,1087	0,1547	1,162	
	4	1,1196	0,1594	1,166	

Tabela A.15 – Ensaio de densidade para os provetes de conteira com 2,5% wt.

Material	Nº	Peso ar (g)	Peso água (g)	ρ (g/cm ³)	Média ρ (g/cm ³)
Conteira (6 mm) – 2,5% wt	1	1,1119	0,1534	1,16	1,159
	1	1,2329	0,1727	1,16	
	2	0,8621	0,1188	1,16	
	2	1,0494	0,1461	1,16	
	3	0,8386	0,1187	1,16	
	3	0,9512	0,1297	1,16	
	4	0,6955	0,0913	1,15	
	4	0,8805	0,1176	1,15	

Tabela A.16 – Ensaio de densidade para os provetes de conreira com 5% wt.

Material	Nº	Peso ar (g)	Peso água (g)	ρ (g/cm ³)	Média ρ (g/cm ³)
Conreira (6 mm) – 5% wt	1	1,1048	0,1401	1,15	1,141
	1	0,6658	0,0786	1,13	
	2	1,0013	0,1166	1,13	
	2	0,8164	0,0976	1,14	
	3	0,9272	0,1126	1,14	
	3	0,9410	0,1251	1,15	
	4	1,103	0,1339	1,14	
	4	1,1348	0,1473	1,15	

Tabela A.17 – Ensaio de densidade para os provetes de conreira com 7,5% wt.

Material	Nº	Peso ar (g)	Peso água (g)	ρ (g/cm ³)	Média ρ (g/cm ³)
Conreira (6 mm) – 7,5% wt	1	1,4717	0,1816	1,14	1,145
	1	1,0031	0,1216	1,14	
	2	1,0148	0,1267	1,14	
	2	1,2399	0,1558	1,14	
	3	1,2781	0,1630	1,15	
	3	1,1662	0,1406	1,14	
	4	1,3827	0,1881	1,16	
	4	1,1698	0,1541	1,15	

Tabela A.18 – Ensaio de densidade para os provetes de conreira com 10% wt.

Material	Nº	Peso ar (g)	Peso água (g)	ρ (g/cm ³)	Média ρ (g/cm ³)
Conreira (6 mm) – 10% wt	1	1,0787	0,1374	1,15	1,137
	1	1,1974	0,1498	1,14	
	2	1,0784	0,1194	1,12	
	2	1,1021	0,1146	1,12	
	3	1,0498	0,1315	1,14	
	3	1,0634	0,1326	1,14	
	4	1,0768	0,1319	1,14	
	4	1,0198	0,1239	1,14	

Tabela A.19 – Ensaio de densidade para os provetes de sisal com 2,5% wt.

Material	Nº	Peso ar (g)	Peso água (g)	ρ (g/cm ³)	Média ρ (g/cm ³)
Sisal (6 mm) – 2,5% wt	1	1,3910	0,1924	1,16	1,165
	1	1,2034	0,1725	1,17	
	2	1,6613	0,2308	1,16	
	2	1,4574	0,2031	1,16	
	3	1,4106	0,2048	1,17	
	3	1,1868	0,1682	1,17	
	4	1,3695	0,1947	1,17	
	4	1,4184	0,2033	1,17	

Tabela A.20 – Ensaio de densidade para os provetes de sisal com 5% wt.

Material	Nº	Peso ar (g)	Peso água (g)	ρ (g/cm ³)	Média ρ (g/cm ³)
Sisal (6 mm) – 5% wt	1	1,1919	0,1592	1,15	1,159
	1	1,4570	0,1967	1,16	
	2	1,1087	0,1508	1,16	
	2	0,9570	0,1279	1,15	
	3	1,2124	0,1657	1,16	
	3	1,1520	0,1635	1,17	
	4	0,9913	0,1362	1,16	
	4	1,3660	0,1920	1,16	

Tabela A.21 – Ensaio de densidade para os provetes de sisal com 7,5% wt.

Material	Nº	Peso ar (g)	Peso água (g)	ρ (g/cm ³)	Média ρ (g/cm ³)
Sisal (6 mm) – 7,5% wt	1	1,4230	0,1957	1,16	1,151
	1	1,2332	0,1743	1,16	
	2	1,5323	0,2161	1,16	
	2	1,5427	0,2061	1,15	
	3	1,6027	0,1819	1,13	
	3	1,5634	0,1968	1,14	
	4	1,5478	0,1900	1,14	
	4	1,4772	0,1962	1,15	

Tabela A.22 – Ensaios de densidade para os provetes de sisal com 10% wt.

Material	Nº	Peso ar (g)	Peso água (g)	ρ (g/cm ³)	Média ρ (g/cm ³)
Sisal (6 mm) – 10% wt	1	1,5641	0,1822	1,13	1,148
	1	1,8434	0,2433	1,15	
	2	1,5688	0,2184	1,16	
	2	1,3856	0,1845	1,15	
	3	1,8947	0,2354	1,14	
	3	1,9632	0,2542	1,15	
	4	1,8182	0,2278	1,14	
	4	1,6212	0,2115	1,15	

Tabela A.23 – Densidade da resina epóxi, dos compósitos de resina epóxi reforçados com fibras de conteira e dos compósitos de resina epóxi reforçados com fibras de sisal.

Densidade (ρ) [g/cm ³]									
	E	C – 2.5%	C – 5%	C – 7.5%	C – 10%	S – 2.5%	S – 5%	S – 7.5%	S – 10%
Média	1,163	1,159	1,141	1,145	1,137	1,165	1,159	1,151	1,148
	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,002	0,004	0,007	0,007	0,010	0,003	0,004	0,012	0,008

Tabela A.24 – Ensaios de dureza para os provetes de resina epóxi.

Dureza (HV) - Epóxi					Média
P1	20,62	19,64	20,88	21,37	20,63
P2	19,57	21,06	20,41	20,68	20,43
P3	21,73	21,68	20,72	21,24	21,34
P4	20,66	20,93	21,11	20,10	20,70

Tabela A.25 – Ensaios de dureza para os provetes de conteira com 2,5% wt.

Dureza (HV) – Conteira (6 mm) – 2,5% wt					Média
P1	18,69	19,12	18,87	19,34	19,01
P2	19,35	19,74	19,35	19,12	19,39
P3	19,12	20,12	19,64	20,18	19,77
P4	18,78	18,97	19,38	19,21	19,09

Tabela A.26 – Ensaio de dureza para os provetes de coneteira com 5% wt.

Dureza (HV) – Coneteira (6 mm) – 5% wt					Média
P1	18,83	19,47	20,30	19,84	19,61
P2	18,56	18,36	19,79	18,45	18,79
P3	20,27	19,32	19,45	20,31	19,84
P4	19,42	19,80	19,34	19,01	19,39

Tabela A.27 – Ensaio de dureza para os provetes de coneteira com 7,5% wt.

Dureza (HV) – Coneteira (6 mm) – 7,5% wt					Média
P1	21,71	21,35	21,46	22,47	21,75
P2	20,78	21,34	21,63	21,75	21,38
P3	21,61	20,87	20,12	21,68	21,07
P4	21,22	20,41	21,64	20,79	21,02

Tabela A.28 – Ensaio de dureza para os provetes de coneteira com 10% wt.

Dureza (HV) – Coneteira (6 mm) – 10% wt					Média
P1	22,13	22,65	23,34	23,84	22,99
P2	23,41	22,87	22,17	23,21	22,92
P3	23,45	21,40	22,98	22,87	22,68
P4	22,41	22,98	23,43	22,71	22,88

Tabela A.29 – Ensaio de dureza para os provetes de sisal com 2,5% wt.

Dureza (HV) – Sisal (6 mm) – 2,5% wt					Média
P1	19,22	19,41	19,35	18,70	19,17
P2	19,47	20,49	19,52	20,12	19,90
P3	19,36	18,97	20,77	19,41	19,63
P4	19,51	18,67	19,32	20,13	19,41

Tabela A.30 – Ensaio de dureza para os provetes de sisal com 5% wt.

Dureza (HV) – Sisal (6 mm) – 5% wt					Média
P1	19,10	20,57	19,78	20,37	19,96
P2	20,46	20,46	21,40	20,34	20,67
P3	20,41	20,44	20,34	20,49	20,42
P4	20,68	19,89	20,34	19,30	20,05

Tabela A.31 – Ensaio de dureza para os provetes de sisal com 7,5% wt.

Dureza (HV) – Sisal (6 mm) – 7,5% wt					Média
P1	23,51	23,67	23,85	23,79	23,71
P2	23,97	22,98	23,46	21,65	23,02
P3	23,41	23,85	23,74	23,56	23,64
P4	23,87	22,94	23,65	23,41	23,47

Tabela A.32 – Ensaio de dureza para os provetes de sisal com 10% wt.

Dureza (HV) – Sisal (6 mm) – 10% wt					Média
P1	22,9	24,64	24,81	24,87	24,31
P2	24,64	24,86	24,65	25,34	24,87
P3	24,78	24,85	24,38	25,61	24,91
P4	24,71	24,83	25,12	24,94	24,90

Tabela A.33 – Módulo de elasticidade dos compósitos de resina epóxi reforçados com fibras de conteira (0,5 mm, 6 mm e 12 mm).

Módulo de Young (E) [GPa] - Conteira				
Dimensão (mm)	Percentagem em Peso (%wt)			
	2,5	5	7,5	10
0,5	3,33 ± 0,03	3,52 ± 0,11	3,50 ± 0,09	2,53 ± 0,09
6	4,26 ± 0,43	4,22 ± 0,41	4,22 ± 0,15	4,65 ± 0,33
12	3,35 ± 0,19	3,37 ± 0,15	3,64 ± 0,07	3,34 ± 0,01

Tabela A.34 – Extensão à fratura dos compósitos de resina epóxi reforçados com fibras de conteira (0,5 mm, 6 mm e 12 mm).

Extensão à fratura (ϵ_f) [mm/mm] - Conteira				
Dimensão (mm)	Porcentagem em Peso (%wt)			
	2,5	5	7,5	10
0,5	0,012 ± 0,002	0,011 ± 0,0004	0,015 ± 0,001	0,013 ± 0,001
6	0,0064 ± 0,0003	0,0058 ± 0,0002	0,0067 ± 0,0004	0,0059 ± 0,0011
12	0,007 ± 0,001	0,006 ± 0,001	0,006 ± 0,001	0,007 ± 0,001

Tabela A.35 – Tensão de rotura dos compósitos de resina epóxi reforçados com fibras de conteira (0,5 mm, 6 mm e 12 mm).

Tensão de rotura (σ_r) [MPa] - Conteira				
Dimensão (mm)	Porcentagem em Peso (%wt)			
	2,5	5	7,5	10
0,5	35,33 ± 3,45	33,69 ± 0,69	40,85 ± 1,16	25,89 ± 1,75
6	25,21 ± 2,01	22,62 ± 2,32	25,19 ± 1,30	24,72 ± 4,11
12	21,65 ± 2,06	18,79 ± 3,31	20,68 ± 1,99	20,35 ± 3,88

Tabela A.36 – Tenacidade à fratura dos compósitos de resina epóxi reforçados com fibras de conteira (0,5 mm, 6 mm e 12 mm).

Tenacidade à fratura [kJ/m ³] - Conteira				
Dimensão (mm)	Porcentagem em Peso (%wt)			
	2,5	5	7,5	10
0,5	18,55 ± 0,52	15,68 ± 0,98	25,70 ± 1,95	14,73 ± 2,29
6	8,28 ± 0,90	6,85 ± 0,96	8,92 ± 0,97	7,82 ± 2,70
12	5,75 ± 1,26	5,06 ± 1,79	5,62 ± 0,84	6,57 ± 2,54

Tabela A.37 – Dureza *Vickers* dos compósitos de resina epóxi reforçados com fibras de conteira (0,5 mm, 6 mm e 12 mm).

Dureza <i>Vickers</i> [HV] - Conteira				
Dimensão (mm)	Porcentagem em Peso (%wt)			
	2,5	5	7,5	10
0,5	21,95 ± 0,12	24,18 ± 1,57	24,39 ± 1,25	24,56 ± 2,65
6	19,31 ± 0,30	19,41 ± 0,39	21,30 ± 0,29	22,87 ± 0,12
12	22,20 ± 0,60	23,32 ± 0,70	24,95 ± 0,39	21,53 ± 1,07

Tabela A.38 – Densidade dos compósitos de resina epóxi reforçados com fibras de conteira (0,5 mm, 6 mm e 12 mm).

Densidade (ρ) [g/cm³] - Conteira				
Dimensão (mm)	Percentagem em Peso (%wt)			
	2,5	5	7,5	10
0,5	1,153 ± 0,008	1,153 ± 0,006	1,140 ± 0,003	1,142 ± 0,005
6	1,159 ± 0,004	1,141 ± 0,007	1,145 ± 0,007	1,137 ± 0,010
12	1,153 ± 0,006	1,155 ± 0,004	1,150 ± 0,013	1,151 ± 0,006