



**RODRIGO RODRIGUES FERREIRA PRODUÇÃO E CARATERIZAÇÃO
DE COMPÓSITOS DE MATRIZ
EPÓXI COM FIBRA DE CONTEIRA**

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

Fevereiro, 2021

RODRIGO **PRODUÇÃO E CARATERIZAÇÃO**
RODRIGUES **DE COMPÓSITOS DE MATRIZ**
FERREIRA **EPÓXI COM FIBRA DE CONTEIRA**

JÚRI

Presidente: Professor Doutor José Filipe Castanheira
Pereira Antunes Simões, ESTSetúbal/IPS

Orientador: Professor Doutor Célio Gabriel Figueiredo
Pina, ESTSetúbal/IPS

Vogal: Doutora Raquel Sofia Cardoso Galante, CIMPA

Resumo

A utilização de fibras naturais no fabrico de materiais compósitos é uma área em franca expansão devido à redução da pegada ecológica. Como tal, o presente trabalho teve como objetivo o fabrico de compósitos de matriz epoxídica com fibras de conteira e a sua caracterização. Para tal, foram fabricados compósitos com percentagens de fibra entre 2,5 e 10%wt, para dois tamanhos de fibra: 0,5 e 12 mm. Para o fabrico dos compósitos foi necessário realizar previamente um tratamento alcalino às fibras. Os materiais obtidos foram analisados por macroscopia e microscopia (MEV) e as suas propriedades mecânicas foram obtidas através de ensaios de tração. Os resultados mostraram que a densidade dos compósitos não se altera com a adição de fibra ao contrário da dureza. Contudo, a adição de fibra conduz a uma redução das propriedades mecânicas, com exceção do módulo de *Young*. A máxima resistência à tração verificou-se para as fibras de 0,5 mm e 7,5%wt. Através de análise por macroscopia e microscopia foi possível observar a existência, em alguns casos, da desagregação entre fibra/matriz, a porosidade e a heterogeneidade com o aumento da quantidade de fibra.

Abstract

The use of natural fibers in the manufacture of composite materials is an area in rapid expansion due to the reduction of the ecological footprint. As such, the present work aimed at the manufacture of epoxy matrix composites with content fibers and their characterization. For this purpose, composites were manufactured with fiber percentages between 2,5 and 10%wt, for two fiber sizes: 0,5 and 12 mm. For the manufacture of composites, it was necessary to carry out an alkaline treatment to the fibers. The materials obtained were analyzed by macroscopy and microscopy (SEM) and their mechanical properties were obtained through tensile tests. The results showed that the density of the composites does not change with the addition of fiber as opposed to hardness. However, the addition of fiber leads to a reduction in mechanical properties, except for Young's modulus. Maximum tensile strength was found for the 0,5 mm and 7,5%wt fibers. Through macroscopic and microscopic analysis it was possible to observe the existence, in some cases, of the breakdown between fiber / matrix, porosity and heterogeneity with the increase in the amount of fiber.

Agradecimentos

A elaboração do presente trabalho foi feita com grande dedicação e motivação em realizar mais um grande passo na minha formação. No entanto, muito do trabalho realizado não é demonstrado nem descrito neste documento.

Apesar de um início complicado e algo desmotivante, devido à inexperiência de trabalhar em laboratório e com técnicas pouco praticadas por mim que levaram a muita tentativa/erro, tive a ajuda do Engenheiro Gonçalo Torres, técnico dos Laboratórios de Mecânica e Materiais da ESTSetúbal, o qual apoiou com o manuseio, interação e melhor compreensão dos equipamentos tecnológicos utilizados neste trabalho.

Queria agradecer por toda a paciência, brio e apoio disponibilizado pelo Professor Célio Pina, que foi uma enorme ajuda na elaboração do presente trabalho.

Agradecer também à Professora Rosa Marat por todo apoio e orientação, tanto na parte laboratorial como teórica deste trabalho.

À *Fibrenamics* Azores por ter fornecido todo o material fibroso para a elaboração desta dissertação, bem como à MR Dinis dos Santos pelo fornecimento dos materiais poliméricos que permitiram produzir estes compósitos mais amigos do ambiente.

Índice

<i>Resumo</i>	iv
<i>Abstract</i>	v
<i>Agradecimentos</i>	vi
<i>Lista de Figuras</i>	3
<i>Lista de Tabelas</i>	6
<i>Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos</i>	7
<i>Lista de Símbolos</i>	8
<i>Capítulo 1</i>	10
<i>Introdução</i>	10
1.1. Introdução e âmbito do trabalho	11
1.2. Objetivos	11
1.3. Estrutura de capítulos	11
<i>Capítulo 2</i>	13
<i>Revisão Bibliográfica</i>	13
2.1. Revisão geral	14
2.2. Extração e preparação das fibras	17
2.3. Processos de fabrico dos compósitos	24
2.4. Compósitos de matriz epoxídica	26
2.4.1. Aplicações	26
2.5. Conteira	27
<i>Capítulo 3</i>	30
<i>Materiais e métodos</i>	30
3.1. Materiais	31
3.2. Preparação da fibra	33

3.3. Produção dos moldes	35
3.4. Fabrico dos compósitos	36
3.5. Determinação da densidade	39
3.6. Ensaios mecânicos	40
3.6.1. Ensaios de tração	40
3.6.2. Ensaios de dureza	41
Capítulo 4.....	43
Resultados	43
4.1. Macrografias.....	44
4.2. Densidade.....	47
4.3. Dureza.....	47
4.4. Ensaios de Tração.....	48
4.4.1. Módulo de Young.....	50
4.4.2. Extensão à fratura	51
4.4.3. Tensão de rotura	52
4.4.4. Tenacidade à fratura específica	53
4.5. Macrografia da zona de fratura dos provetes	54
4.6. Micrografia da zona de fratura dos provetes	57
Capítulo 5.....	61
Discussão	61
Capítulo 6.....	65
Conclusões e Proposta de Trabalhos Futuros.....	65
6.1. Conclusões	66
6.2. Propostas de trabalhos futuros	66
Anexo A.....	A.1

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Classificação das fibras naturais	15
Figura 2.2 - Plantas de sisal: (a) crescimento das plantas cultivadas após três anos de transplante de bulbilhos do viveiro; (b) folhas de sisal colhidas	18
Figura 2.3 - Fotografia da planta de milho com sua borla no topo do caule	19
Figura 2.4 - Comparação da resistência à tração para compósitos verdes reforçados por fibra de juta (JFRGC) com (a)15% e (b)20% em peso de líquido de casca de castanha de caju (CNSL) entre compósitos tratados e não tratados	21
Figura 2.5 - Micrografias superficiais das fibras de juta (a) sem tratamento e (b) com tratamento alcalino	22
Figura 2.6 - Amostras de compósitos de epóxi preenchidos com fibras naturais: (a) partículas de reforço; (b) provetes	25
Figura 2.7 - Fibras naturais de linho, cânhamo, sisal e lã usadas na Mercedes Benz E-class	26
Figura 2.8 - Lâminas de pás eólicas com fibras naturais.....	27
Figura 2.9 - <i>Hedychium gardnerianum</i>	28
Figura 2.10 - Curva tensão (σ)-extensão (ϵ) de 30 filamentos de fibras de conteira (a); microscopia eletrônica de varrimento da secção transversal (b); e de um feixe de fibras de conteira (c)	29
Figura 2.11 - Protótipos de cuvetes de biocompósito de fibra e matriz de conteira	29
Figura 3.1 - Materiais utilizados para o fabrico dos moldes: (a) borracha de silicone RTV491; (b) catalisador 431.....	31
Figura 3.2 - Fibras de conteira: (a) 0,5 mm; (b) 12 mm.....	32
Figura 3.3 - Materiais utilizados para a matriz dos compósitos: (a) resina epóxi SR 1500; (b) endurecedor SD 2505.....	33

Figura 3.4 - Etapas do tratamento da fibra com NaOH: (a) produção da solução aquosa com 5% de NaOH; (b) imersão das fibras na solução aquosa; (c) lavagem da fibra para eliminação do NaOH; (d) secagem da fibra em estufa	34
Figura 3.5 - Representação gráfica dos provetes normalizados	35
Figura 3.6 - Etapas da produção do molde: (a) colocação dos provetes de aço no fundo do recipiente; (b) inserção da borracha de silicone misturada com catalisador; (c) cura da borracha de silicone; (d) desmoldagem dos provetes de aço (molde finalizado)	36
Figura 3.7 - Provetes em cura	37
Figura 3.8 - Nomenclatura utilizada para numeração dos provetes	37
Figura 3.9 - Lixadeira Buehler METASERV 2000	38
Figura 3.10 - Método de Arquimedes: (a) pesagem fora de água; (b) pesagem dentro de água	39
Figura 3.11 - Montagem experimental de um ensaio de tração com o extensômetro acoplado	40
Figura 3.12 - Ensaio de dureza: (a) máquina de ensaios de dureza; (b) ensaio a decorrer	41
Figura 3.13 - Exemplo de ensaio de dureza	42
Figura 4.1 - Fibras de conteira antes e após tratamento de NaOH: (a) de 0,5 mm antes do tratamento; (b) de 0,5 mm após o tratamento; (c) de 12 mm antes do tratamento; (d) de 12 mm após o tratamento	44
Figura 4.2 - Macrografia dos provetes com partículas: (a) D 0.5 P 2.5; (b) D 0.5 P 5; (c) D 0.5 P 7.5; (d) D 0.5 P 10	45
Figura 4.3 - Macrografia dos provetes com fibras curtas: (a) D 12 P 2.5; (b) D 12 P 5; D 12 P 7.5; D 12 P 10	46
Figura 4.4 - Dureza Vickers dos compósitos de resina epóxi	48
Figura 4.5 - Tensão-extensão para provetes com conteira de 0,5 mm: (a) curvas típicas da tensão-extensão; (b) ampliação das curvas tensão-extensão	49
Figura 4.6 - Tensão-extensão para provetes com conteira de 12 mm: (a) curvas típicas da tensão-extensão; (b) ampliação das curvas tensão-extensão	49

Figura 4.7 - Módulo de Young (E) dos compósitos de resina epóxi	51
Figura 4.8 - Extensão longitudinal à fratura (ϵ_f) dos compósitos de resina epóxi	52
Figura 4.9 - Tensão de rotura (σ_R) dos compósitos de epóxi	53
Figura 4.10 - Tenacidade à fratura (U) dos compósitos de epóxi	54
Figura 4.11 - Macrografia da zona de fratura dos provetes com coneteira de 0,5 mm: (a) D 0.5 P 2.5; (b) D 0.5 P 5; (c) D 0.5 P 7.5; (d) D 0.5 P 10.....	55
Figura 4.12 - Macrografia da zona de fratura dos provetes com coneteira de 12 mm: (a) D 12 P 2.5; (b) D 12 P 5; (c) D 12 P 7.5; (d) D 12 P 10.....	56
Figura 4.13 - Microscopias MEV 40x: (a) D 0.5 P 2.5; (b) D 0.5 P 10; (c) D 12 P 2.5; (d) D 12 P 10, (e) (f) D 12 P 10	57
Figura 4.14 - Microscopias MEV de maior ampliação: (a) D 12 P 2.5 300x; (b) D 12 P 2.5 200x; (c) D 12 P 10 400x; (d) D 12 P 10 250x; (e) D 0.5 P 2.5 500x; (f) D 0.5 P 2.5 300x; (g) D 0.5 P 10 100x; (h) D 0.5 P 10 200x	59
Figura 4.15 – MEV aos provetes com fibras de partículas de 0,5 mm: (a) D 0.5 P 2.5 500x; (b) D 0.5 P 2.5 300x; (c) D 0.5 P 10 100x; (d) D 0.5 P 10 200x.....	60
Figura A.1 – Ensaio experimental dos provetes D 0 P 0	A.1
Figura A.2 – Ensaio experimental dos provetes D 0.5 P 2.5	A.2
Figura A.3 – Ensaio experimental dos provetes D 0.5 P 5	A.2
Figura A.4 – Ensaio experimental dos provetes D 0.5 P 7.5	A.3
Figura A.5 – Ensaio experimental dos provetes D 0.5 P 10	A.3
Figura A.6 – Ensaio experimental dos provetes D 12 P 2.5	A.4
Figura A.7 – Ensaio experimental dos provetes D 12 P 5	A.4
Figura A.8 – Ensaio experimental dos provetes D 12 P 7.5	A.5
Figura A.9 – Ensaio experimental dos provetes D 12 P 10	A.5

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Propriedades físicas e composição química das fibras naturais	16
Tabela 2.2 - Tratamentos químicos para fibras vegetais	20
Tabela 2.3 - Efeito de vários tratamentos químicos nas propriedades mecânicas de compósitos poliméricos com fibra de sisal	23
Tabela 2.4 - Técnicas de fabrico usadas para produzir NFRCs	24
Tabela 3.1 - Propriedades dos materiais para o fabrico dos moldes	31
Tabela 3.2 - Propriedades da resina e do endurecedor	33
Tabela 3.3 - Composição dos provetes.....	38
Tabela 4.1 - Densidade dos compósitos de resina epóxi com fibras de conteira	47
Tabela 5.1 - Comportamento mecânico de compósitos verdes	63
Tabela A.1 - Dureza média <i>Vickers</i> dos compósitos de resina epóxi com fibras de conteira.....	A.1
Tabela A.2 – Módulo de <i>Young</i> dos compósitos de resina epóxi com fibras de conteira.....	A.6
Tabela A.3 – Extensão à fratura dos compósitos de resina epóxi com fibras de conteira.....	A.6
Tabela A.4 – Tensão de rotura dos compósitos de resina epóxi com fibras de conteira.....	A.6
Tabela A.5 – Tenacidade à fratura específica dos compósitos de resina epóxi com fibras de conteira.....	A.6

Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos

CNSL	<i>cashew nut shell liquid</i>
CO ₂	Dióxido de carbono
JFRGC	<i>jute fiber reinforced green composites</i>
MEV	Microscópio eletrônico de varrimento
Na ₂ S ₂ O ₄	Ditionato de sódio
NaOCl	Hipoclorito de sódio
NaOH	Hidróxido de sódio
NFRC	Compósitos reforçados com fibras naturais
PA11	Poliamida 11
PALF	Fibra de folha de ananás
PBS	Succinato de polibutileno
PTT	Tereftalato de politrimetileno

Lista de Símbolos

HV	Dureza Vickers
m^F	Massa, em gramas, do corpo submerso no fluido
m^L	Massa, em gramas, do corpo no ar
pH	Potencial de hidrogénio
ρ^F	Densidade, gramas por centímetro cubico, do fluido de imersão

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo é apresentado o enquadramento, os objetivos e a estrutura desta dissertação.

1.1. Introdução e âmbito do trabalho

Atualmente os problemas ambientais são um tema de relevância socioeconómica. Os materiais devem ser fabricados de forma a assegurar o menor impacto ambiental possível, como tal, estes devem ser produzidos de forma a minimizar o consumo energético, produção de resíduos e tendo como objetivo a sua reutilização e reciclabilidade. A incorporação de fibras naturais nos materiais, reduz o custo final do material, podendo aumentar a reciclabilidade e a biodegradação destes materiais, e a neutralização do CO₂ comparativamente com o uso de fibras mais comumente utilizadas, tais como as fibras de vidro ou de carbono.

Hoje em dia, as fibras naturais são utilizadas no fabrico de várias peças automóveis devido ao seu baixo peso, como por exemplo, painéis, forro de tejadilho, tabliers ou até costas dos assentos, o que se traduz numa diminuição de 20% em custo, relativamente aos compósitos convencionais [1].

A conteira é uma espécie invasora oriunda dos Himalaias encontrada nas ilhas dos Açores. Uma das formas de controlo da sua população será a utilização no fabrico de materiais compósitos.

1.2. Objetivos

O presente estudo propõe-se a avaliar a possibilidade de fabrico de compósitos de resina epóxi reforçada com fibra de conteira e caracterizar através das propriedades físicas e mecânicas os materiais obtidos.

1.3. Estrutura de capítulos

Esta tese está estruturada em 6 capítulos, no **primeiro** capítulo foi apresentado o enquadramento, os objetivos do trabalho e será apresentada a estrutura do presente documento.

No **segundo** capítulo é realizada uma revisão bibliográfica sobre o estado da arte relativamente ao fabrico e às propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais.

No **terceiro** capítulo, é descrito o procedimento experimental utilizado para o fabrico dos materiais compósitos reforçados com fibras de conteira, assim como o método de ensaios experimentais utilizado na caracterização física e mecânica dos materiais produzidos.

No **quarto** capítulo, são apresentados os resultados obtidos através da observação macroscópica dos materiais compósitos para obtenção da densidade e da dureza, assim como da caracterização das propriedades mecânicas através do módulo de *Young*, tensão de rotura, extensão à fratura e tenacidade dos materiais fabricados.

No **quinto** capítulo os resultados obtidos são discutidos e comparados com a literatura e posteriormente é feita uma análise aos resultados obtidos pela microscopia eletrónica de varrimento comparando as superfícies de fratura com as propriedades mecânicas obtidas.

Por fim, no capítulo **seis**, são apresentadas as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

O presente capítulo, tem como objetivo enquadrar teoricamente este trabalho, envolvendo os pontos fulcrais à compreensão da temática.

2.1. Revisão geral

A crescente procura de materiais verdes, ambientalmente mais amigáveis, resultou na criação de novos materiais que têm como material de reforço as fibras naturais, como substitutos para materiais não degradáveis derivados de recursos de petróleo [2].

O uso de fibras naturais para reforçar polímeros é uma prática cada vez mais difundida. Os biocompósitos são cada vez mais utilizados em sectores como a indústria automóvel e a indústria da construção. Os compósitos verdes são uma classe específica de biocompósitos, estes são compostos de uma matriz polimérica que é reforçada por fibras naturais e representam uma área emergente na ciência dos polímeros [3]. O termo biocompósito pode ser aplicado a uma vasta gama de materiais derivados, total ou parcialmente, de recursos de baixo impacto ambiental [4].

Os benefícios ambientais, decorrentes do uso de fibras naturais em compósitos poliméricos e da substituição de polímeros derivados de petróleo por polímeros de base biológica como material de matriz, são inúmeros, e permitem uma diminuição da pegada ecológica. Surgem novas tendências na seleção de fibras naturais, ou seja, de resíduos em vez de culturas. Existem polímeros desenvolvidos recentemente, biodegradáveis e que podem ser usados no fabrico de compósitos verdes, tais como a resina epóxi, tereftalato de politrimetileno (PTT), poliamida 11 (PA11), succinato de polibutileno (PBS), entre outros [3].

Os compósitos verdes têm vindo a alcançar grande atenção graças a vantagens importantes sobre o reforço tradicional, tais como baixo impacto ambiental, baixo custo, desgaste reduzido das máquinas de processamento e baixa densidade, assim como uma boa rigidez e resistência mecânica [4].

As fibras naturais podem ser classificadas em fibras de origem vegetal e de origem animal. As fibras vegetais são constituídas principalmente de polissacarídeos (polímeros naturais), enquanto as fibras animais são constituídas por proteínas. Para serem utilizadas como reforço, as fibras puras precisam de ser extraídas e separadas de todas as substâncias de ligação presentes na matéria-prima vegetal ou animal (hemiceluloses, lignina, cera, proteínas, etc.), como exemplificado na figura 2.1 [3, 5].

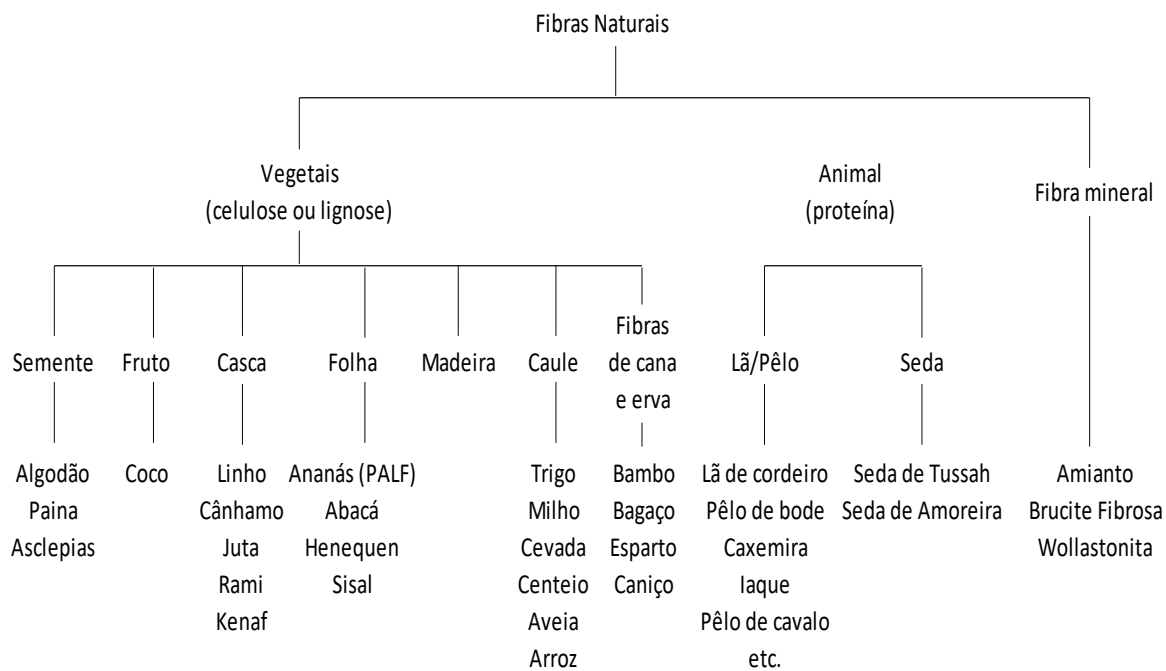


Figura 2.1 - Classificação das fibras naturais. [5]

Segundo V. K. Thakur et al [2], as propriedades físico-químicas dos compósitos foram testadas para verificar o seu potencial para uma possível aplicação no dia a dia. Os constituintes químicos da fibra variam de origem para origem, sendo mais comuns a celulose, a hemicelulose e a lignina, além desses, alguns outros aditivos como cinza, cera, pectina também são encontrados nas fibras. As propriedades físicas e químicas das fibras naturais são mostradas na tabela 2.1 [6].

Tabela 2.1 - Propriedades físicas e composição química das fibras naturais. [6]

Fibra	Nome	Propriedades físicas					
	Botanico	Diâmetro (µm)	Densidade (g/m^3)	Resistência à tração (Mpa)	Módulo de tensão (Gpa)	% de alongamento	
Abaca	Musa textilis	10 - 30	1,5	430 - 813	31,1 - 33,6	2,9 - 10	
Alfa	Stipa tenacissima	-	1,4	247	8,5	1,96	
Bambo	Bambusoideae	88 - 125	0,91 - 1,26	503	35,91	1,4	
Bagação	Graminear Saccharum officinarum	-	1,2	20 - 390	19 - 27	1,1	
Banana	Musa	100 - 250	1,35	529 - 914	27 - 32	2,6 - 5,9	
Coco	Cocos nucifera	150 - 250	1,15 - 1,25	131 - 220	4 - 6	15 - 40	
Algodão	Gossypium	-	1,51	400	12	0,3 - 10	
Caraua	Ananas lucidus	7 - 10	1,4	87 - 1150	11,8 - 96	1,3 - 4,9	
Linho	Linum usitatissimum	25	1,4	800 - 1500	60 - 80	1,2 - 1,6	
Cânhamo	Cannabis sativa	25 - 600	1,48	550 - 900	70	1,6 - 4	
Henequen	Agave fourcroydes	-	1,2 - 1,4	430 - 570	10 - 16,3	3,7 - 5,9	
Juta	Corchorus	25 - 250	1,3 - 1,48	393 - 800	0,13 - 26,5	1,16 - 1,80	
Kenaf	Hibiscus cannabinus	-	1,25 - 1,40	284 - 930	21 - 60	1,6	
Urtiga	Urtica dioica	25 - 40	1,594	650	38	1,7	
Palmeira	Borassus flabellifer	-	1,09 - 1,38	276 - 281	8,9 - 22,9	-	
Ananás	Ananas comosus	50	1,44	413 - 1627	60 - 82	14,5	
Rami	Boehmeria nivea	20 - 280	1,3 - 1,5	400 - 938	61,4 - 128	3,6 - 3,8	
Casca de arroz	Oryza sativa	-	0,5 - 0,7	-	-	-	
Sisal	Agave sisalana	50 - 200	1,3 - 1,4	390 - 450	12 - 41	2,3 - 2,5	
Madeira dura	-	-	0,3 - 0,88	51 - 121	5,2 - 15,6	-	
Madeira macia	-	-	0,30 - 0,59	45,5 - 111	3,6 - 14,3	4,4	
Fibra	Nome	Composição química					
	Botanico	Hemicelulose [%]	Celulose [%]	Pectina [%]	Lignina [%]	Cera [%]	Cinza [%]
Abaca	Musa textilis	15 - 17	56 - 63	0,5 - 1,8	7 - 9	-	3
Alfa	Stipa tenacissima	24	45	14,9	24	5	-
Bambo	Bambusoideae	30	26 - 43	-	5 - 31	10	-
Bagação	Graminear Saccharum officinarum	38 - 32	25 - 45	-	15 - 25	-	-
Banana	Musa	17 - 21	63 - 83	3 - 5	5	11	-
Coco	Cocos nucifera	41 - 45	36 - 43	3 - 4	0,15 - 0,25	-	-
Algodão	Gossypium	3	83 - 91	0,6	-	8 - 9	-
Caraua	Ananas lucidus	9,9	73,6	-	7,5	-	-
Linho	Linum usitatissimum	19 - 21	64 - 72	1,8 - 2,3	2 - 2,2	-	-
Cânhamo	Cannabis sativa	0,9	70 - 74	0,8	3,7 - 5,7	1,2 - 6,2	0,8
Henequen	Agave fourcroydes	4 - 8	75 - 78	-	13 - 14	-	3
Juta	Corchorus	18 - 22	61 - 72	0,2	12 - 13	0,5	0,5 - 2
Kenaf	Hibiscus cannabinus	4 - 13	45 - 57	0,6	22	0,8	2 - 5
Urtiga	Urtica dioica	5,4	86	0,6	4	3,1	-
Palmeira	Borassus flabellifer	22,8	58,58	-	13,48	0,35	-
Ananás	Ananas comosus	4 - 6	70 - 75	-	8 - 11	1 - 2	1 - 3
Rami	Boehmeria nivea	5 - 15	69 - 91	1,9	0,4 - 0,7	-	-
Casca de arroz	Oryza sativa	-	38 - 45	-	-	-	20
Sisal	Agave sisalana	10	78	-	8	2	1
Madeira dura	-	-	43 - 47	-	25 - 35	-	-
Madeira macia	-	-	40 - 44	-	25 - 29	-	-

2.2. Extração e preparação das fibras

Antes das fibras poderem ser utilizadas na produção de materiais compósitos, têm de passar por várias etapas desde a recolha da planta até à preparação da fibra.

Existem várias técnicas, das quais se destaca, a técnica de maceração, que é geralmente empregue para separar os feixes de fibras da folha e do floema das plantas fibrosas através de um descortecedor, que é uma das máquinas mais utilizadas para retirar os feixes de fibras do caule ou da folha. As folhas são esmagadas e batidas por uma roda giratória com facas cegas embutidas, de forma que apenas permaneçam as fibras. As restantes partes da folha ou caule são lavadas com água. As fibras descascadas são então lavadas antes de secar ao sol ou com ar quente. As fibras secas são penteadas e classificadas em vários graus.

A maceração é a passagem da fibra colhida, sem sementes, a tratamento químico ou biológico para tornar os feixes das fibras mais facilmente separáveis da parte lenhosa do caule, para que a sua remoção seja mais fácil. Existem dois tipos tradicionais de maceração: maceração com orvalho e maceração com água. A maceração com orvalho implica deixar o caule da planta no campo para apodrecer.

Neste processo, a maceração é constantemente monitorada para garantir que as fibras se separem do núcleo sem muita deterioração da qualidade. A maceração por orvalho é a mais popular na Europa, embora dependa fortemente da localização geográfica, produz fibras mais grossas e de qualidade inferior do que as produzidas com a técnica de maceração em água. A maceração com água envolve a imersão dos caules na água (lagoas ou tanques e rios de movimento lento). Esta técnica pode exigir grande quantidade de água limpa e, portanto, torna-se cara, mas resulta em fibras de maior qualidade e produz resíduos de fermentação ambientalmente inaceitáveis [7].

Segundo Asokan Pappu et al [8], plantas de sisal têm sido cultivadas em Bhopal, Índia Central (figura 2.2 (a)), sob condições climáticas desde baixas a altas temperaturas, de -6°C a 42°C. As folhas de sisal são colhidas, após três anos de serem plantadas, como mostra a figura 2.2 (b). Estas folhas de sisal são processadas mecanicamente numa máquina, do tipo raspador, projetada e fabricada especialmente para extrair estas fibras. Após 48h as fibras de serem colhidas. estas foram extraídas, e, posteriormente, realizou-se o processamento, limpeza e o “penteado”. As fibras extraídas continham pouca cera e resíduos indesejados. Foram inicialmente processadas

por uma lavagem em água morna e secas ao sol por cerca de 4 horas em condições naturais (temperatura 32 °C). [8]



Figura 2.2 - Plantas de sisal: (a) crescimento das plantas cultivadas após três anos de transplante de bulbilhos do viveiro; (b) folhas de sisal colhidas. [8]

K. Obi Reddy et al [9] documenta a extração de fibra de ficus (*Ficus religiosa*), planta nativa da Índia, Sri Lanka, Nepal, China e Vietname. Esta extração passou pela recolha de folhas caídas, depois mergulhadas em água por três semanas e, em seguida, a camada esverdeada da superfície das folhas foi removida manualmente com uma escova macia. As fibras foram cuidadosamente lavadas com água da torneira, seguido de água destilada e secas ao sol durante uma semana. Em seguida, as fibras foram mantidas em estufa a 105 °C durante 24 h para remoção da humidade. Cada folha colhida dá origem a 35% de fibra [9].

Outra planta onde se procede a extração de fibras, é o milho, Maepa et al [10] mostra que são extraídas as borlas que se formam no topo das hastes (figura 2.3). Esta extração passou por embeber as borlas em água por um dia (24h) e alguns materiais presentes foram dissolvidas na água. A seguir, estas foram separadas e cuidadosamente lavadas com água da torneira, seguido de uma lavagem com água destilada. Depois foram secas ao sol durante uma semana.

Posteriormente, as borlas de milho foram mantidas em estufa durante 24 horas a uma temperatura que varia entre 105 a 110 °C, com o intuito de remover a humidade residual existente. Algumas borlas foram tratadas com solução aquosa de hidróxido de sódio (NaOH) a

5%, à temperatura ambiente, mantendo a proporção da solução de 20:1 durante 45 minutos para remover a hemicelulose e os materiais gordurosos. Depois, foram lavadas repetidamente com água e tratadas com ácido acético diluído para neutralizar a reação. Por fim, as borlas foram lavadas com água destilada antes da secagem em estufa durante 24 h [10].

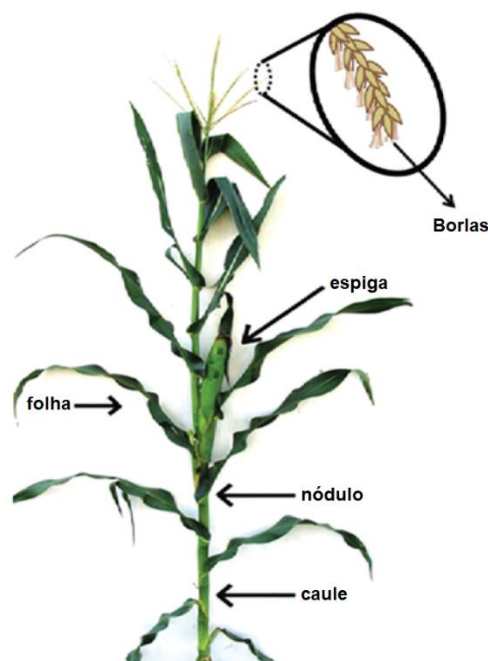


Figura 2.3 - Fotografia da planta de milho com a sua borla no topo do caule. [10]

Podem ser utilizados métodos alternativos como pode exemplo os métodos químicos em vez dos métodos convencionais mecânicos. A modificação química das fibras naturais é um processo que altera permanentemente a natureza das paredes das células das fibras, quebrando as moléculas poliméricas na sua superfície. Os diferentes produtos químicos que podem ser usados para o tratamento de superfície das fibras naturais estão listados na tabela 2.2. A modificação química proporciona mais estabilidade dimensional, reduz a capacidade de absorção de água e dá resistência à fibra contra a decomposição fúngica [11].

Tabela 2.2 - Tratamentos químicos para fibras vegetais. [11]

Nome do tratamento	Químico(s) usado(s)	Estrutura química	Força do químico
Tratamento de benzoilação	Cloreto de benzoila	C ₇ H ₅ ClO	-
Modificação por ciclohexano	Ciclohexano/Etanol	C ₆ H ₁₂ /C ₂ H ₆ O	1:1 vol/vol
Tratamento alcalino	Hidróxido de sódio	NaOH	5%, 10%, 15%
Tratamento por fluorocarboneto	PERIGUARD UFC		50 g/L
Tratamento de silicone	PERISOFT MSA		20 g/L
Tratamento de isocianato	Tetracloro de carbono e dilaurato de dibutilestano	CCl ₄ e C ₃₂ H ₆₄ O ₄ S _n	-
Tratamento de peróxido	Péroxido de benzoila ou peróxido de dicumilo	C ₁₄ H ₁₀ O ₄ ou C ₁₈ H ₂₂ O ₂	6% de solução em acetona
Tratamento por permanganato	Permanganato de potássio	KMnO ₄	0,005% em acetona
Tratamento por acetilação	Silano	SiH ₄	5 wt% em metanol
Tratamento com resina epóxi flexível	Resina epóxi flexível		1 g resina: 200 ml acetona
Tratamento com ácido sulfúrico	Ácido sulfúrico	H ₂ SO ₄	1,0% (wt/vol)
Eterificação	Brometo de dodecano, NaOH, isopropanol	C ₁₀ H ₂₁ Br, C ₃ H ₈ O	12 ml de brometo de dodecano em solução de isopropanol
Modificação com anidrido maleico	Anidrido maleico	C ₄ H ₂ O ₃	20 wt% solução em acetona
Tratamento por ácido esteárico	Ácido esteárico	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	1% solução em álcool etílico
Modificação com alquil ceteno dímero	Alquil ceteno dímero		3 - 5% alquil ceteno dímero em n-hexano
Tratamento com ácido etilenodiamino tetra-acético	EDTA	C ₁₀ H ₁₆ N ₂ O ₈	Solução de 5 g/l

Por exemplo, devido à pouca eficiência de métodos mecânicos para a extração da fibra de junco, Edeerozey et al [12] utilizaram a extração química por processo de alcalinização a frio e a quente, sendo este um método barato e eficaz para melhorar o desempenho mecânico da fibra natural. Este tratamento alcalino foi também realizado por Naili et al [13] utilizando duas concentrações diferentes de NaOH (4 e 8%) na presença, e/ou não, de ditionato de sódio Na₂S₂O₄ (agente alcalinizante) e hipoclorito de sódio NaOCl (agente de deslignificação com cloro).

Para melhorar a ligação entre a matriz polimérica e o reforço verde, existem tratamentos do reforço que possibilitam esta melhor adesão. Nithesh et al [14] retratam fibras de juta lavadas com água destilada para remover a sujidade e impurezas residuais e, posteriormente, secas durante 24 a 48 h. Após secagem, as fibras foram tratadas quimicamente com solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 5%.

O efeito da % em peso da composição dos compósitos de resina de epóxi Araldite AW106 com a resina retirada da casca de castanha de caju, ou do inglês, *cashew nut shell liquid* (CNSL) nas propriedades mecânicas à tração é evidente a partir dos gráficos da figura 2.4, da tensão vs extensão dos compósitos verdes reforçados por fibra de juta, ou do inglês, *jute fiber reinforced green composites* (JFRGC) [14].

Pode-se verificar que a extensão aumentou em 33,33% e a resistência à tração diminuiu em 20,74% quando JFRGC com 20%wt de CNSL comparado com 15%wt de amostra composta de CNSL. Portanto, fica comprovado que o tratamento com NaOH tem efeito significativo na resistência à tração e contribuiu com 98,35% para a variação da resistência à tração [14].

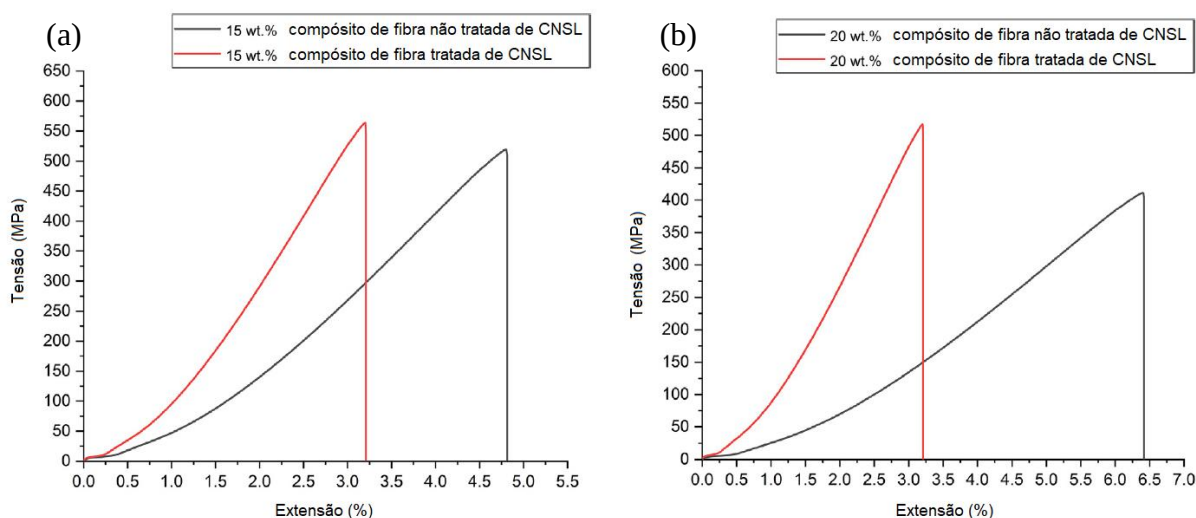


Figura 2.4 - Comparação da resistência à tração de compósitos verdes reforçados por fibra de juta (JFRGC) com e sem tratamento de NaOH com: (a) 15%wt de CNSL na resina epóxi; (b) 20%wt de CNSL na resina epóxi. [14]

É também retratado na literatura por Pires et al [15] o resultado de um tratamento alcalino mais prolongado em fibras de juta relativamente ao aumento da rugosidade das fibras. Assim, foi realizado o tratamento alcalino das fibras utilizando uma solução de hidróxido de sódio, NaOH (5% em massa), à temperatura ambiente durante 6 horas. Após o tratamento, as fibras foram lavadas até que a solução aquosa apresentasse um pH neutro. De seguida, as fibras foram secas em estufa a 60 °C até que não apresentassem alteração de massa. As micrografias da superfície das fibras de juta sem tratamento e com tratamento, são mostradas na figura 2.5. Estas demonstram que o tratamento alcalino aumentou a rugosidade das fibras, provavelmente devido à remoção da hemicelulose e lignina. As modificações observadas na superfície das fibras podem resultar numa maior efetividade de difusão da matriz polimérica nas regiões interfibrilares, levando a um aumento da adesão interfacial entre fibra e matriz [15].

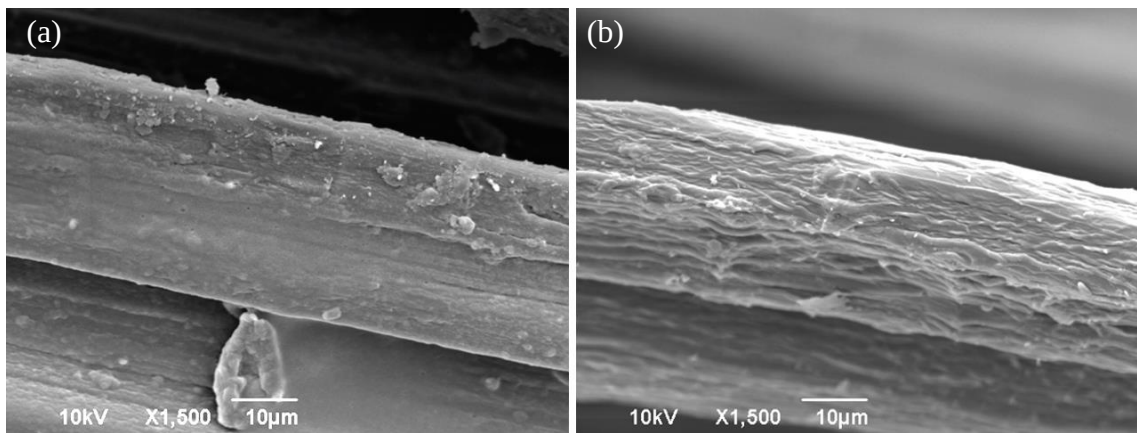


Figura 2.5 - Micrografias das fibras de juta: (a) sem tratamento; (b) com tratamento alcalino.
[15]

Existem outros tratamentos que podem ser aplicados ao material de reforço, como é o caso do tratamento com ácido esteárico ($C_{18}H_{36}O_2$), em que o ácido é adicionado a uma solução de álcool etílico (C_2H_5OH), até 10% do peso total das fibras a serem tratadas, a solução obtida é adicionando gota a gota sobre as fibras, que são depois secas em estufa; tratamento com peróxido, onde as fibras são imersas em uma solução de peróxido de benzoíla ($C_{14}H_{10}O_4$) em acetona ($CH_3(CO)CH_3$) por cerca de meia hora, depois decantadas e secas; tratamento com silanos (SiH_4), as fibras são imersas em uma solução 3:2 de álcool:água, contendo um promotor de adesão à base de silanos durante 2h em pH 4, depois estas são enxaguadas em água e secas em estufa. Os silanos devem reagir com os grupos de hidroxilo das fibras e melhorar a sua qualidade superficial. Todos estes processos foram estudados recentemente e destacaram melhorias na ligação dos dois materiais, levando a um aumento significativo das propriedades mecânicas [16].

Os efeitos de diversos parâmetros sobre as propriedades mecânicas de compósitos poliméricos reforçados com fibra de sisal, são apresentados na tabela 2.3 [17], de onde se pode concluir que os parâmetros, tais como a orientação das fibras, a percentagem em peso da fibra ou a fração em volume e o comprimento das fibras exibiram influência notável e significativa nas propriedades mecânicas dos vários compósitos à base de polímeros termoendurecíveis. A partir das observações, constatam-se alguns resultados contraditórios que ocorreram em alguns casos para o mesmo parâmetro com diferentes combinações de compósitos. Por exemplo, o comprimento da fibra indica o aumento ou diminuição do TS para diferentes compósitos

reforçados com fibra com comprimento de fibra crescente. Isso aconteceu devido à contribuição de vários fatores como compatibilidade entre a fibra e a matriz, método de fabricação, composição química das fibras naturais, orientação das fibras, morfologia da fibra, número de extremidades da fibra, etc.[17].

Tabela 2.3 - Efeito de vários tratamentos químicos nas propriedades mecânicas de compósitos poliméricos com fibras de sisal. [17]

Especificações do tratamento da fibra	Material	Método de fabricação	Taxa de abastecimento	Observação
Permanganato de potássio: solução de 0,05% de KMnO ₄ por 24 h a 23°C. Silano: solução de 2% em álcool por 24h a 23°C.	Sisal/Epóxi Sisal/VE	Método de moldagem RTM	Taxa de deformação: 1,389x10 ⁻⁵ /s, 1,389x10 ⁻⁴ /s, e 1,389x10 ⁻³ /s	TS: Permanganato > Silano
Bicarbonato de sódio (0, 24 ,120 & 240 h)	Sisal/Epóxi	-		FS aumenta com o tempo de exposição ao bicarbonato de sódio ate 120h. A exposição durante 120h das fibras de sisal mostra uma melhoria à flexão e ao módulo de flexão para os compósitos.
NaOH (2, 4, 6% por 1, 5 e 24 h), APS (0,1% volume em HCl), e GPS (0,5% volume em HCl). Tratamento individual e combinado.	Sisal/ Benzoxazina/ Epóxi	Prensa de compressão	TS = 5 mm/min FS = 1,28 mm/min	Melhoria nas propriedades de tensão e flexão. No entanto, IS diminuiu devido ao tratamento, embora seja mais prejudicial para o tratamento combinado.
20% em peso de NaOH por 1 h 5% em peso na solução de silano e metanol por 1,5 h (individual e combinado)	Sisal/Epóxi	Moldagem por compressão	TS = 2 mm/min	Tensão e módulo de tensão: (NaOH + Silano) > NaOH > Silano. Propriedades de tensão aumentaram com o carregamento de fibra.
5% solução de NaOH por 30 min. 0,002% KMnO ₄ /acetona por 3 min. Solução de NaOH bem agitada com 50 ml de cloreto de benzoila por 15 min, de seguida agitar em etanol por 1 h. Vinil tris (2-etoximetoxi) silano (0,6 %) por 1 h.	Sisal/PE	RTM	TS = 5 mm/min FS = 5 mm/min	Todos os tratamentos melhoraram as propriedade de flexão e tensão. IS diminuiu em todos os tratamentos. Tratamentos de KMnO ₄ e silanos mostraram uma melhoria dos compósitos quanto às propriedades de etensão, flexão e impacto.
Acetilação, acrilção, permanganato e silano	Sisal/PE	Tecnica de laminagem manual	-	Aumento significativo no TS devido aos vários tratamentos. TS mais alto para o tratamento de acetilação. Diminuição de IS devido ao tratamento, exceto para acrilato.
NaOH - fervido e tratado (5, 10 e 18%), ácido acético a 20% e metanol	Sisal/PE	Método de laminagem manual	-	As propriedades de tração e flexão melhoraram devido aos tratamentos. Melhoria: fervido em NaOH > tratado com NaOH > Metanol > Ácido acético.
Solução de acetona KMnO ₄ 0,055% por 2 min, peróxido de dicumil (DCP) solução de acetona (concentração de 6%) por 1,5 h 6% de silano	Sisal/HDPE	-	-	Tensão de corte interfacial dos compósitos de testes de tração: KMnO ₄ > MPS > DCP > APS > não tratado.
Pré-tratamento de NaOH: 5% à temperatura ambiente por 2 h, 6% de peróxido de benzoila (BP) com solução de acetona à temperatura de 70°C por 30 min.	Sisal/ Banana/PLA	Extrusão de parafuso duplo seguida por processo de moldagem por injeção	-	TS, FS e IS melhoraram devido ao tratamento por NaOH e Peróxido de Benzoila.
Solução de NaOH a 10% (concentração em massa) por 3 h	Sisal/PLA	Processo de moldagem por compressão	-	Diminuição de TS, FS e IS devido ao tratamento. IS aumentado devido ao uso de fibras misturadas não tratadas / tratadas no
NaOH (7% em peso), ultrassom (individual e combinado)	Sisal/PP	Processo de moldagem por compressão	TS = 30 mm/min	TS e TM melhoraram devido ao tratamento. As mais altas propriedades de tração para a combinação NaOH + ultrassom.
1 (N) NaOH à temperatura ambiente e PP enxertado com anidrido maleico (MAPP) (individual e combinado) Carregamento de fibra: 0 - 40% (incremento 10) Solução de hidróxido de sódio 0,5 N por 48 h Solução de NaOH 2 M sob condições ambientais	Sisal/PP	Técnica de mistura por fusão	TS = FS = 5 mm/min	TS e FS: (NaOH + MAPP) > MAPP NaOH > não tratado. TS e FS também influenciados pelo carregamento de fibra.
NaOH (0,5, 1, 2, 4 e 10% por 1 h à temperatura ambiente)	Sisal/PP Sisal/Proteína de soja Sisal/Óleo de palma/ Borracha natural	Prensa quente Método de frabrico manual Os materiais compósitos foram preparados num moinho de dois rolos de laboratório (150x300 mm).	- Taxa de deformação = 0,05 min ⁻¹ -	Não causa impacto significativo no TS devido ao tratamento por NaOH Tensão de rotura e TM aumentaram devido à pré-tensão da fibra e tratamento com NaOH Aumento do TS para a concentração até 4%
Solução de NaOH a 5% por 1 h	Sisal/Vidro/ Epóxi	Técnica de <i>lay-up</i> manual		Aumento marginal em IS devido ao tratamento com NaOH
Solução aquosa de NaOH a 18% por 30 min	Sisal/Carbon/ PE	Técnica de <i>lay-up</i> manual		Propriedades de tração e flexão melhoradas devido ao tratamento com NaOH
NaOH, acetilação, KMnO ₄ , Peróxido (peróxido de benzoila (BPO) e DCP), Silano, Ácido esteárico, Anidrido maleico HDPE	Sisal/Carbon/ HDPE	Técnica de moldagem por compressão	50 mm/min ⁻¹	TS e TM: NaOH <anidrido acético <ácido esteárico <KMnO ₄ <anidrido maleico <silano-A <DCP <BPO

2.3. Processos de fabrico dos compósitos

A maioria dos processos de fabrico atuais usados para produzir compósitos reforçados por fibras naturais (NFRC) incluem moldagem por compressão, moldagem por transferência de resina, moldagem por injeção, prensagem a quente e moldagem por infusão a vácuo. A baixa estabilidade das fibras naturais durante os processos, apresenta desafios no processamento dos NFRC usando estes processos de manufatura, visto que estes são principalmente projetados/desenvolvidos com base em compósitos reforçados com fibras sintéticas. Portanto, o pré-tratamento (químico ou físico) das fibras naturais torna-se parte integrante do processamento dos NFRC nestes processos de moldagem convencionais. O pré-tratamento das fibras melhora as interações interfaciais fibra-matriz, melhorando assim a capacidade de processamento e as propriedades dos NFRC.

Alguns dos processos mais comuns (tabela 2.4), tais como moldagem por compressão, moldagem por injeção ou extrusão são considerados adequados e extensivamente investigados para produzir componentes de NFRC, reforçadas com fibras curtas [1].

Tabela 2.4 - Técnicas de fabrico usadas para produzir NFRC. [1]

Combinação fibra-matriz	Método de processamento	Caraterísticas do processo típico
Linho, sisal, bambu, cânhamo, madeira de pinho, folhas de tamareira, casca de arroz	Composição (parafuso simples ou duplo) + Moldagem por injeção	Conteúdo de fibra (% em peso): <40 Comprimento da fibra (mm): 0,1 a 1 Anisotropia: Média Complexidade da peça: Alta
Sisal, fio de juta, fibra de folha de ananás, cânhamo, kenaf, coco, serradura	Moldagem por compressão	Conteúdo de fibra (% em peso): <40 Comprimento da fibra (mm): >10 Anisotropia: Baixa Complexidade da peça: Baixa
Sisal, cânhamo, casca de arroz	Extrusão	Conteúdo de fibra (% em peso): <40 Comprimento da fibra (mm): 1 a 25 Anisotropia: Alta Complexidade da peça: Baixa

Existem no entanto, métodos mais simples e tecnologicamente menos exigentes de se produzirem materiais compósitos, tal como exemplificado por Ridzuan et al [18], onde a resina foi misturada com o endurecedor na proporção de 3,5:1, conforme especificação do fabricante, na preparação dos provetes. Cada uma das fibras foi preparada na forma de partículas, conforme mostrado na figura 2.6 (a), usando uma retificadora. As fibras foram processadas por moagem e peneiramento, foram repetidos vários ciclos para produzir partículas de menor dimensão. O tamanho da fibra obtida no processo de peneiramento variou de 17 a 45 μm . As fibras naturais forma então misturadas na resina e esta mistura foi agitada através de um agitador magnético durante 30 min a uma temperatura constante de 70°C para obtenção de uma solução homogênea. A mistura foi, posteriormente desgaseificada num forno com vácuo a 80 °C para remover as bolhas de ar existentes. Em seguida, a quantidade recomendada de endurecedor foi misturada por 3 minutos. Esta foi vertida lentamente nos moldes retangulares até que estivessem cheios e nivelados. Antes da cura, a mistura foi novamente desgaseificada num forno com vácuo para remover as bolhas de ar presentes nos provetes. Por último, a mistura foi então curada a 80°C durante 2 h e deixada a arrefecer até à temperatura ambiente ($\sim 25^\circ\text{C}$). Os provetes foram cortados em dimensões de 30×50×10 mm, conforme mostrado na figura 2.6 (b), com auxílio de uma ferramenta de corte Dremel 4000 [18].

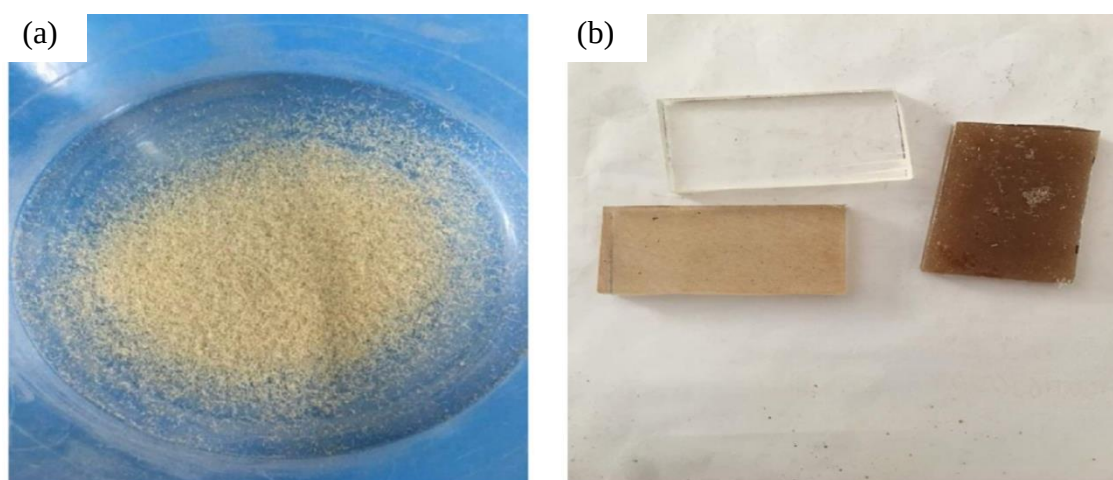


Figura 2.6 - Amostras de compósitos de resina epóxi com fibras naturais: (a) partículas de reforço; (b) provetes. [18]

2.4. Compósitos de matriz epoxídica

2.4.1. Aplicações

O uso de fibras naturais no fabrico de automóveis foi iniciado em 1942, por Henry Ford, por meio de experiências com soja para a produção de componentes. Atualmente, empresas de renome do ramo automóvel, tais como a BMW, Ford, Renault, Volvo, Mercedes, entre outras, usam compósitos de reforços naturais em coberturas nas portas dianteiras (1,2–1,9 kg), portas traseiras (0,8–1,6 kg), porta-malas (1,5– 2,5 kg), “prateleiras” (até 3,0 kg) e encostos dos bancos (1,7–2,0 kg) como representado na figura 2.7 [19].



Figura 2.7 - Fibras naturais de linho, cânhamo, sisal e lã usadas no automóvel da Mercedes Benz E-class. [19]

Os compósitos naturais, tal como o *Biotex Flax*, desempenham um papel importante também no setor da energia, sendo que uma das áreas principais é o fabrico de turbinas eólicas de telhado. O projeto e a fabricação das pás são feitos com base nas características de desempenho

da fibra de linho *Biotex* usando tecnologia *twistless*. O principal foco das pesquisas realizadas nesta área está na redução do custo da energia eólica através da fabricação de pás de rotores sustentáveis de uma turbina eólica de 1 kW. A equipa testou vários materiais para a produção económica destas pás, no entanto o linho *Biotex* apresentou os melhores resultados para aplicações leves na fabricação de pás de turbinas conforme mostrado na figura 2.8 [19].



Figura 2.8 - Lâminas de pás eólicas com fibras naturais. [19]

2.5. Conteira

A planta *Hedychium gardnerianum*, é oriunda dos Himalaias, mas tornou-se invasora nos Açores sendo atualmente considerada uma das piores espécies vegetais invasoras do arquipélago, estando presente em sete das nove ilhas dos Açores. O seu grande potencial está no uso das suas fibras.

Biodegradáveis e renováveis, as fibras da conteira permitem fabricar embalagens de materiais biocompósitos com potencial para substituir os plásticos descartáveis [20]. As fibras do caule da conteira são dos resíduos vegetais mais abundantes e disponíveis no arquipélago dos Açores

e ainda não foi devidamente estudada como reforço de fibra vegetal [21]. Nos Açores, a planta invasora é considerada um dos maiores perigos para a floresta nativa, provocando um enorme impacto nos habitats e nas espécies nela presentes. Assim, esta é uma planta a ter em conta na sua remoção da natureza [22].

Hedychium gardnerianum Sheppard ex Ker-Gawler, é uma erva perene rizomatosa da família *Zingiberaceae*, comumente chamada de Conteira. Possui um caule que se pode estender por até 2 m de comprimento, com folhas oblongas chegando a 30 cm e várias flores de tonalidade alaranjada numa haste que pode ter de 20 a 30 cm de comprimento, como é possível ver na figura 2.9. Foi introduzida nos Açores a partir dos Himalaias, em meados do século XIX, e está generalizada em todas as ilhas açorianas, exceto no Corvo [23].



Figura 2.9 - *Hedychium gardnerianum*. [22]

Segundo Vasconcelos et al [24], as fibras de conteira têm como tendência geral um comportamento frágil quando aplicadas a cargas de tração se utilizadas individualmente, no entanto se agrupadas em feixes, com cerca de 30 fibras, estas apresentam um comportamento quase-dúctil (figura 2.10 (a) e figura 2.10 (c)). As fibras de conteira apresentam, numa média, diâmetros que podem variar de 5 a 20 μm (figura 2.10 (b)), e a sua secção transversal pode apresentar geometrias nem sempre circulares. Devido à presença de vários tipos de defeitos presente nas fibras, cada uma delas pode fraturar a diferentes valores de tensão/extensão [24].

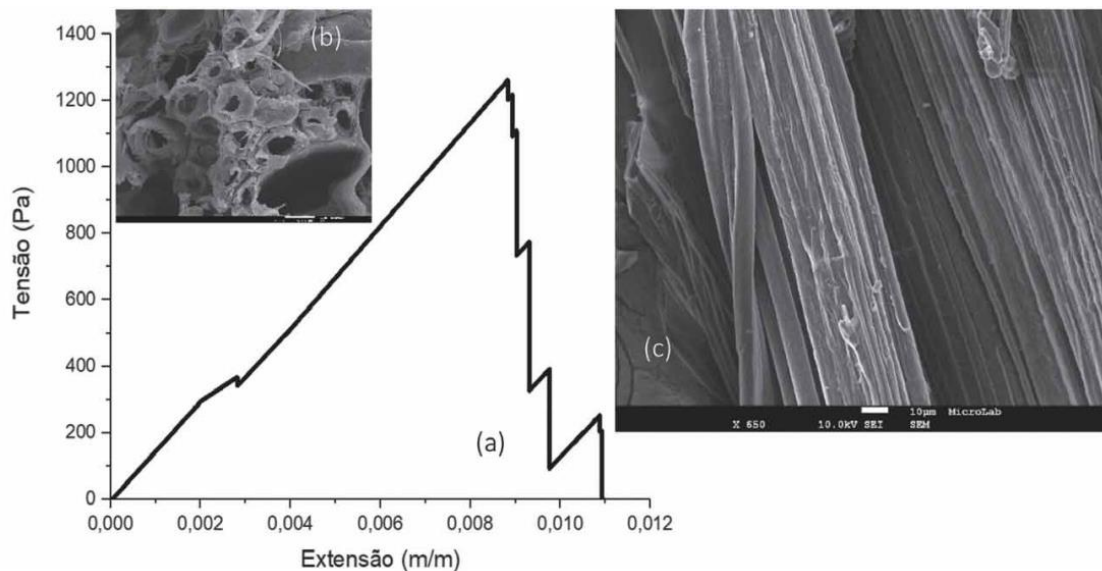


Figura 2.10 – Fibras de conteira: (a) comportamento mecânico de 30 filamentos; (b) MEV da secção transversal; (c) MEV de um feixe de fibras de conteira. [24]

Dado serem fibras vegetais, estas são totalmente biodegradáveis e de origem renovável, e assim, permitem desenvolver materiais compósitos avançados e compatíveis com o meio ambiente. Podem ser usados para o fabrico de diversos produtos, desde o ramo automóvel, construção, mobiliário e também embalagens leves e resistentes (figura 2.11), que ajudam no consumo sustentável levando a uma diminuição da pegada ecológica [20].



Figura 2.11 - Protótipos de cuvetes de biocompósito de fibra e matriz de conteira. [20]

Capítulo 3

Materiais e métodos

Neste capítulo serão apresentados os materiais e os métodos, bem como todos os equipamentos utilizados na elaboração do presente trabalho.

3.1. Materiais

Para o fabrico dos materiais compósitos foi necessária a produção de moldes com as dimensões dos provetes de acordo com a norma EN ISO 527-4 [25]. Para tal foi utilizada borracha de silicone RTV491 com o catalisador 431 a 5% fornecidos por MR Dinis dos Santos, Lda [26] (figura 3.1). Como contramolde, foram usados provetes de aço com a geometria pretendida de acordo com a norma EN ISO 527-4 [25].

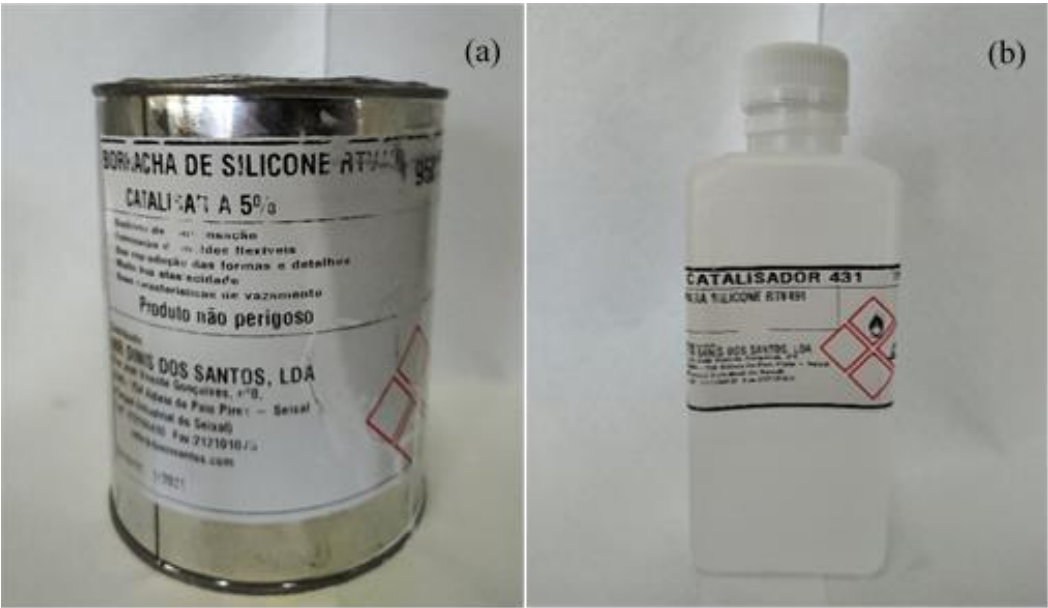


Figura 3.1 - Materiais utilizados para o fabrico dos moldes: (a) borracha de silicone RTV491; (b) catalisador 431.

Tabela 3.1 - Propriedades físicas e mecânicas dos materiais para o fabrico dos moldes. [27]

PRODUTO	Propriedades físicas		Propriedades mecânicas							Funcionalidades
	Aparência	Viscosidade [cPs]	Catalisador (adicionar 5% à RTV)	Tempo aprox. de trabalho [h]	Tempo aprox. desmoldagem [h]	Dureza [ShA]	Tensão de rotura [kg/cm ²]	Alongamento [%]	Tensão de corte [kg/cm]	
ESQUIM RTV-491	Branco	30.000	CAT - 431	3	22	22	40	350	22	Uso geral, elevada tensão de corte Versatil para todos os materiais de derrame
			CAT - 421		24	16	35	400	22	
			CAT - 451		24	12	34	500	22	

A fibra dos materiais compósitos utilizada neste trabalho, foi a fibra de conteira na forma de partículas e na forma de fibras curtas com respetivamente 0,5 mm (figura 3.2 (a)) e 12 mm de comprimento (figura 3.2 (b)). As fibras foram fornecidas pela *Fibrenamics Azores* [28] já com a dimensão pretendida, onde passaram previamente por várias etapas:

Recolha – corte do caule de conteira;

Desidratação - secagem em estufa a 70 °C para a extração da humidade (60%) durante 48 h;

Corte e Crivagem - corte e crivagem através de trituradores mecânicos de lâminas para obtenção das dimensões pretendidas (0,5, 6 e 12 mm);

Segmentação – realizada através de peneiros moleculares de modo a homogeneizar a dimensão da fibra.

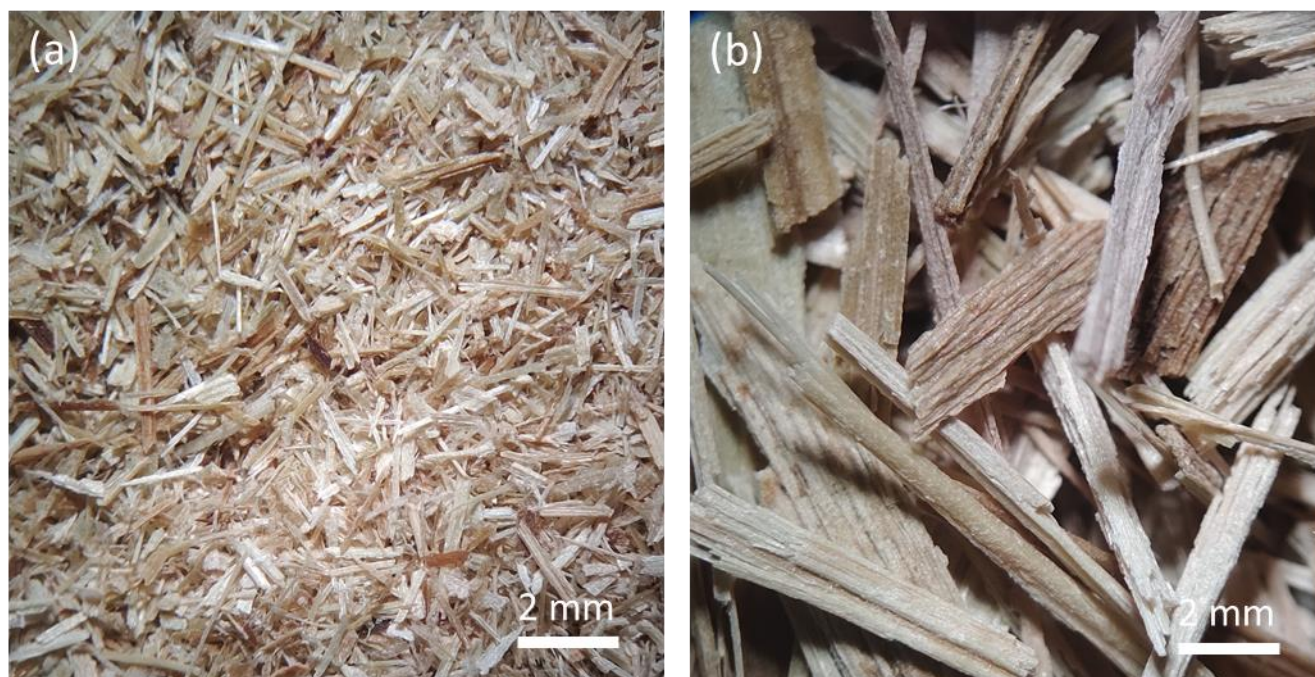


Figura 3.2 - Fibras de conteira: (a) 0.5 mm; (b) 12 mm.

O material polimérico utilizado para a matriz dos compósitos foi a resina epóxi SR 1500 (figura 3.3 (a)) com o endurecedor SD 2505 (figura 3.3 (b)) a 33%, fornecidos pela MR Dinis dos Santos, Lda [26]. As propriedades do material da matriz dos provetes de compósito podem ser observadas na tabela 3.2.

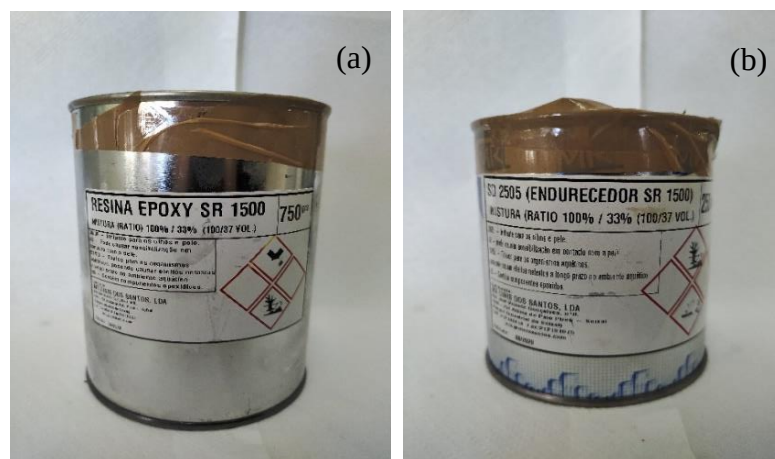


Figura 3.3 - Materiais utilizados para a matriz dos compósitos: (a) resina epóxi SR 1500; (b) endurecedor SD 2505.

Tabela 3.2 - Propriedades da resina e do endurecedor. [29]

	SR 1500	SD 2505
Densidade a 20°C [g/cm ³]	1,13	1
Aspecto	Liquido	Liquido
Viscosidade a 20°C [cPs]	2100	280
Relação de mistura (em peso)	100	33
Relação de mistura (em volume)	100	37

3.2. Preparação da fibra

Previamente à produção dos compósitos, as fibras sofreram um tratamento alcalino, o qual consistiu em mergulhar as fibras numa solução aquosa de 5% de NaOH (hidróxido de sódio) durante 30 minutos à temperatura ambiente. Seguidamente, estas foram lavadas várias vezes em água destilada de modo a eliminar a solução de NaOH presente nas fibras. A lavagem foi efetuada até a água da lavagem apresentar um pH neutro de 7.

Após o processo de lavagem, passou-se ao processo de secagem, onde as fibras foram colocadas num tabuleiro de alumínio numa estufa *Binder* ED115/E2 a 70° C durante 24h.

Na figura 3.4 é possível verificar as etapas utilizadas para o tratamento das fibras com a solução aquosa de 5% de NaOH.

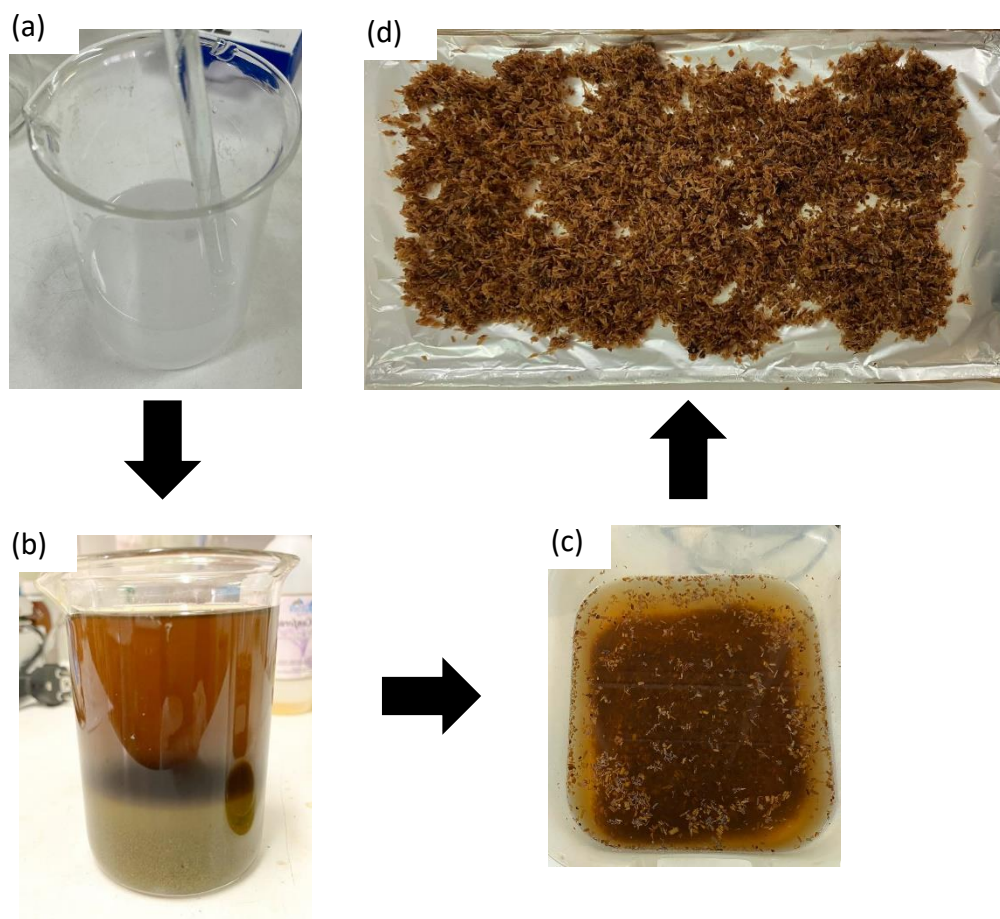


Figura 3.4 - Etapas do tratamento da fibra com NaOH: (a) produção da solução aquosa com 5% de NaOH; (b) imersão das fibras na solução aquosa; (c) lavagem da fibra para eliminação do NaOH; (d) secagem da fibra em estufa.

É de salientar que antes e após o tratamento com NaOH, as fibras foram observadas macograficamente através de uma lupa 30x *Leica Zoom 2000*, a fim de se observar a influencia do tratamento na superfície das fibras.

3.3. Produção dos moldes

Os provetes de aço utilizados como contramolde foram maquinados anteriormente nas oficinas da EST Setúbal com as dimensões definidas pela norma EN ISO 527-4 [26] de acordo com a figura 3.5.

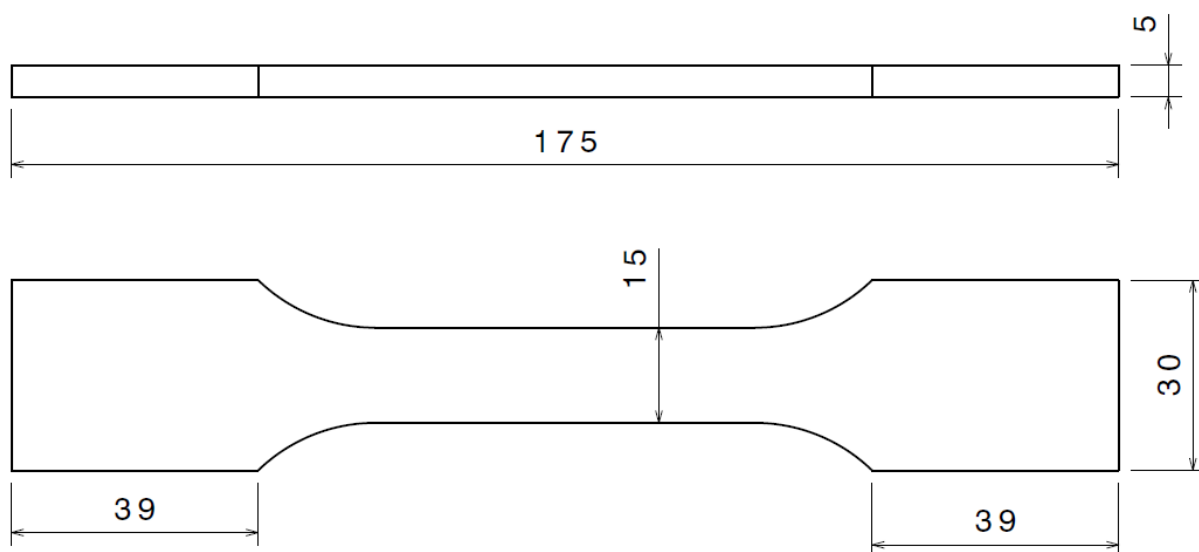


Figura 3.5 - Representação gráfica dos provetes normalizados.

Os moldes de silicone para o fabrico dos provetes de compósitos foram construídos utilizando a borracha de silicone RTV 491 à qual foi adicionada 5% de catalisador 431.

Os provetes de aço previamente maquinados foram colocados no fundo de um recipiente de alumínio descartável de forma a ser possível a moldação de quatro provetes de compósitos ao mesmo tempo (figura 3.6 (a)). Após a colocação dos provetes no fundo do recipiente, a mistura do silicone com o catalisador foi vertida cuidadosamente sobre os provetes, de forma que estes não se deslocassem (figura 3.6 (b)). Após a cura do silicone durante 24 horas à temperatura ambiente, de acordo com o fornecedor [27] (figura 3.6 (c)), os provetes de aço (contramolde) foram retirados do molde de silicone com a ajuda de um x-ato com cuidado para não o danificar (figura 3.6 (d)).

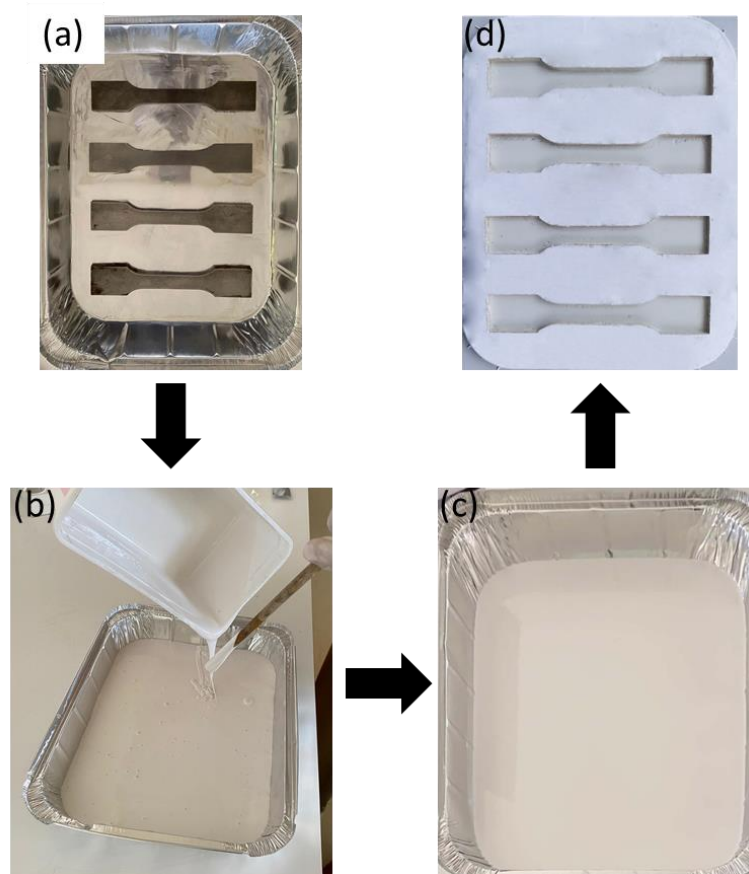


Figura 3.6 - Etapas da produção do molde: (a) colocação dos provetes de aço no fundo do recipiente; (b) inserção da borracha de silicone misturada com catalisador; (c) cura da borracha de silicone; (d) desmoldagem dos provetes de aço (molde finalizado).

3.4. Fabrico dos compósitos

A resina foi previamente mantida na estufa a 40 °C durante 24 h, de forma a reduzir a sua viscosidade. Após esse tempo, a resina foi misturada com as fibras através de um agitador mecânico até que a mistura ficasse homogênea, este processo foi realizado à temperatura ambiente durante cerca de 5 minutos.

Após a mistura das fibras na resina, foi adicionado 33% de endurecedor e envolvido na mistura anterior com cuidado para não criar bolhas. Por fim, esta mistura foi vertida nos moldes de silicone previamente fabricados. Os provetes foram então mantidos à temperatura ambiente

durante 48 h e posteriormente colocados em estufa a 40 °C durante mais 48 h para a cura de acordo com o fornecedor da resina [27] (figura 3.7).

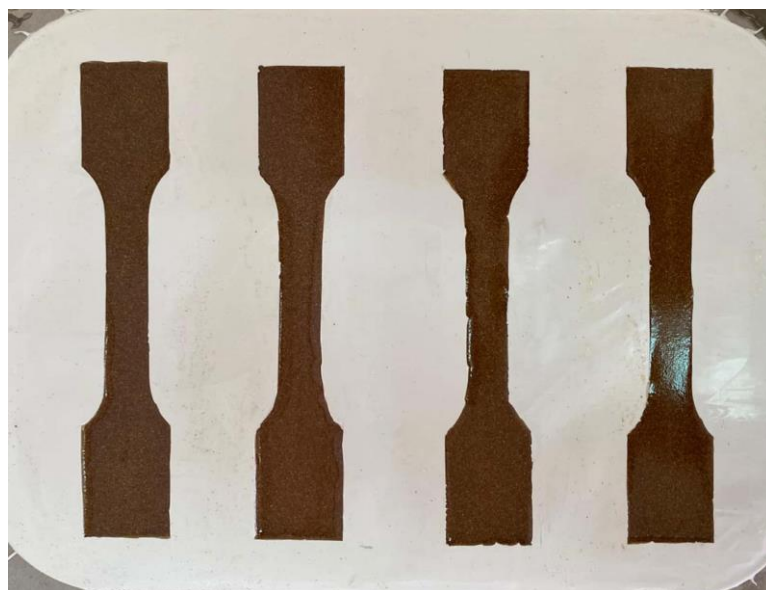


Figura 3.7 - Provets em cura.

Foram fabricados provetes de compósitos de resina epóxi reforçados com fibras de conteira para cada um dos tamanhos de fibra (0,5 mm e 12 mm), com diferentes percentagens em peso de fibra: 0; 2,5; 5; 7,5; 10 %wt.

Foram produzidos 36 provetes, 4 provetes por cada %wt em estudo, como é possível observar na tabela 3.3.

A nomenclatura utilizada para a numeração dos provetes é a definida pela referência mostrada na figura 3.8:

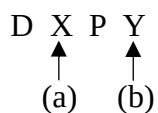


Figura 3.8 - Nomenclatura utilizada para numeração dos provetes.

onde:

(a) – Dimensão do comprimento da fibra (0,5 mm ou 12 mm);

(b) – Percentagem em peso de fibra.

Tabela 3.3 - Composição dos provetes.

Proвете	% de resina + endurecedor (%wt)	% de fibra (%wt)	Tamanho da fibra (mm)
D 0 P 0	100	0	0
D 0.5 P 2.5	97,5	2,5	0,5
D 0.5 P 5	95	5	0,5
D 0.5 P 7.5	92,5	7,5	0,5
D 0.5 P 10	90	10	0,5
D 12 P 2.5	97,5	2,5	12
D 12 P 5	95	5	12
D 12 P 7.5	92,5	7,5	12
D 12 P 10	90	10	12

Após a cura, os provetes foram desmoldados e sofreram um processo de acabamento. Este consistiu em lixar os provetes numa lixadeira *Buehler METASERV 2000* (figura 3.9), utilizando lixa de granulometria 800 e lixa de granulometria 1000 de modo a eliminar os defeitos superficiais.



Figura 3.9 - Lixadeira *Buehler METASERV 2000*.

3.5. Determinação da densidade

A densidade dos compósitos foi determinada através do método de Arquimedes. Para tal, foram cortadas duas porções de cada provete após realizados os ensaios de tração, e pesados dentro e fora de água destilada, como mostra a figura 3.10. Foram realizados 8 ensaios por cada material.

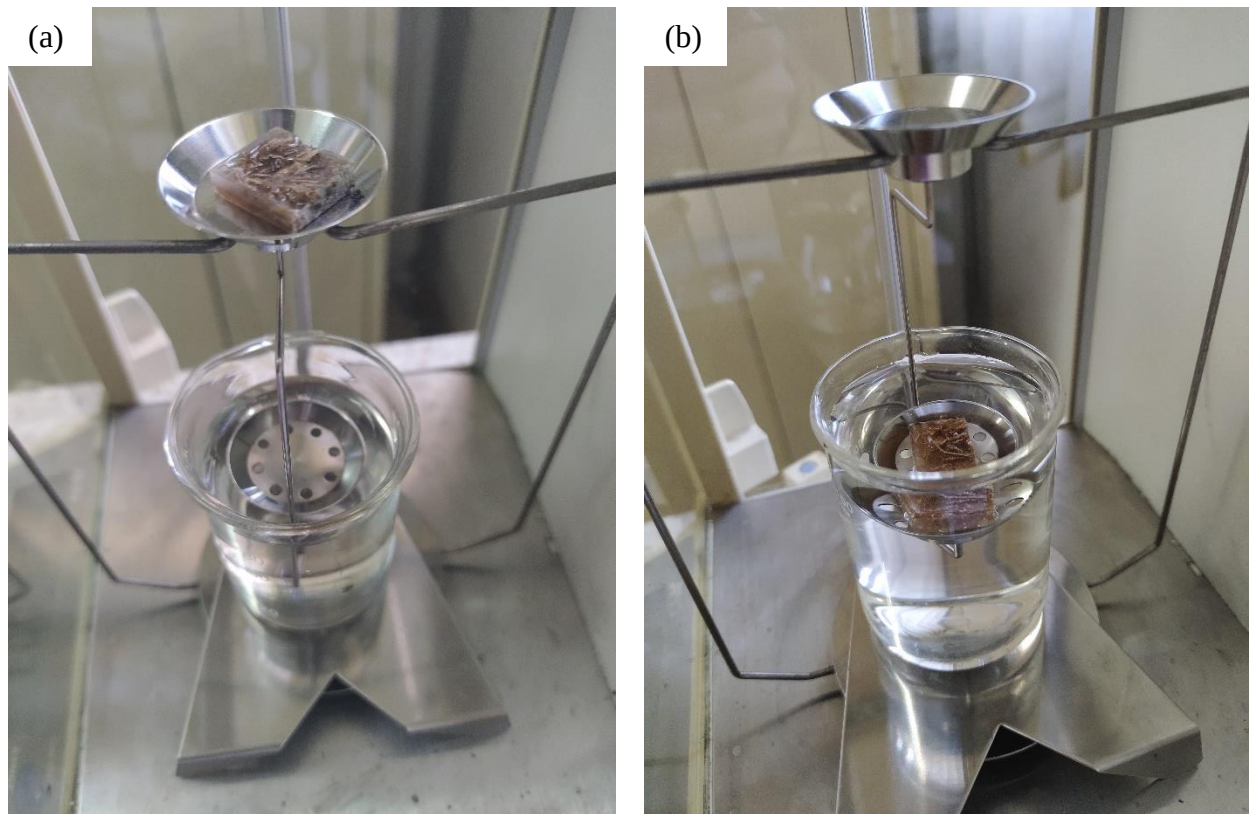


Figura 3.10 - Método de Arquimedes: (a) pesagem fora de água; (b) pesagem dentro de água.

A densidade dos compósitos foi calculada através da equação (1) [30]:

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

onde m^L é a massa do corpo no ar [g], m^F é a massa do corpo submerso no fluido [g], e por fim, ρ^F é a densidade do fluido de imersão [g/cm³] que é de 1 g/cm³ para a água destilada.

3.6. Ensaios mecânicos

As propriedades mecânicas dos compósitos foram avaliadas através da realização de ensaios de tração e de ensaios de dureza.

3.6.1. Ensaios de tração

Os ensaios de tração tiveram como objetivo determinar as propriedades mecânicas dos materiais compósitos produzidos. O módulo de *Young* foi determinado através do declive da reta do gráfico tensão/extensão, através da lei de Hooke. A tensão de rotura foi determinada para a tensão máxima da curva. A extensão à fratura equivale ao valor de extensão máxima correspondente à tensão de fratura. A tenacidade foi calculada através da integração da área do gráfico.

Os ensaios de tração foram executados na máquina TS300 da *Impact Test Equipment Lda* com uma célula de carga de 50 kN. Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente com uma velocidade de deslocação do travessão de 0,5 mm/min. De forma a monitorizar a extensão dos provetes, foi utilizado um extensómetro axial de contacto tipo “clip-on” da *Epsilon Model 3542* com 50 mm de extensão máxima (figura 3.11). Foram realizados 4 ensaios de tração por cada %wt de material estudado.

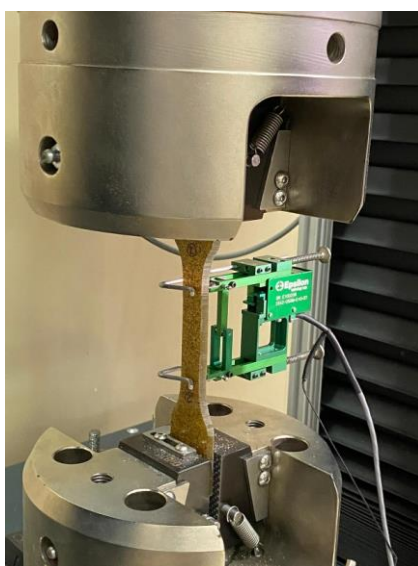


Figura 3.11 - Montagem experimental de um ensaio de tração com o extensómetro acoplado.

Após os ensaios de tração, foram realizadas macrografias nas zonas de fratura utilizando uma lupa 30x *Leica Zoom 2000*.

Foram igualmente realizadas micrografias às amostras após-fratura dos provetes D 0.5 P 2.5, D 0.5 P 10, D 12 P 2.5 e D 12 P 10, onde foram observadas ao microscópio eletrónico de varrimento (MEV), FEG-SEM JEOL JSM-7001F, no laboratório de Microscopia Eletrónica – MicroLab do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, após revestimento através da deposição de uma fina camada de Ouro-paládio (Au-Pd).

3.6.2. Ensaios de dureza

Os ensaios de dureza foram realizados com o propósito de estudar esta propriedade do material. Estes foram efetuados na máquina *INNOVATEST FALCON 450* (figura 3.12) com o software de aquisição de dados da *ImpressionsTM*.

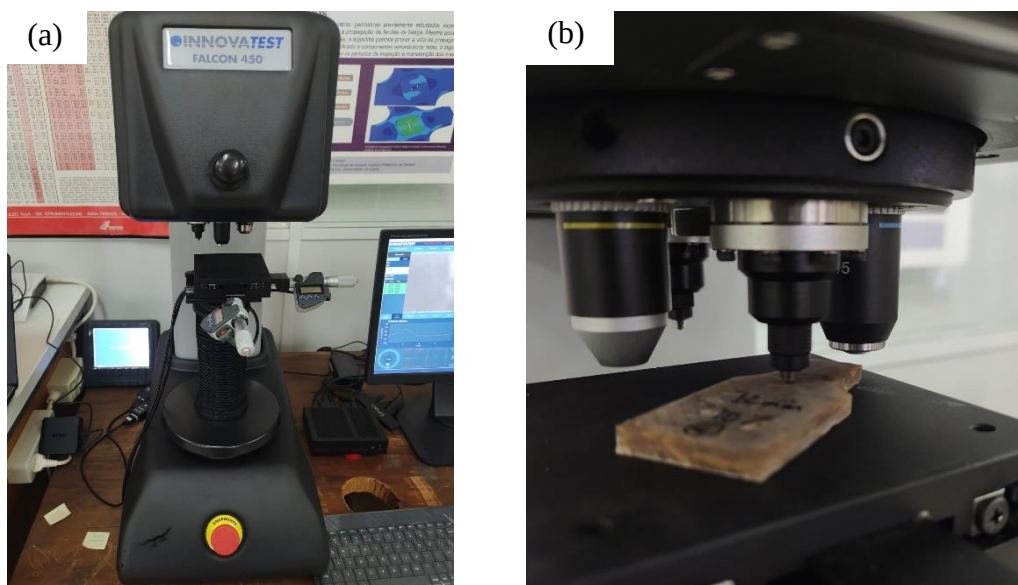


Figura 3.12 - Ensaio de dureza: (a) máquina de ensaios de dureza; (b) ensaio a decorrer.

Para caraterizar a dureza do material foi utilizada a unidade de dureza de *Vickers*. É um método de classificação da dureza de materiais com base em ensaios laboratoriais. Este processo utiliza uma ponta com a geometria de uma pirâmide, de diamante, com um ângulo de diedro de 136°,

onde é comprimido pela força aplicada “F” na superfície do material. A área "A" da área criada é calculada medindo as suas diagonais (figura 3.13).

Para estudar a dureza dos compósitos, realizaram-se 16 ensaios por cada tipo de material produzido, com uma força aplicada de 2 kg.

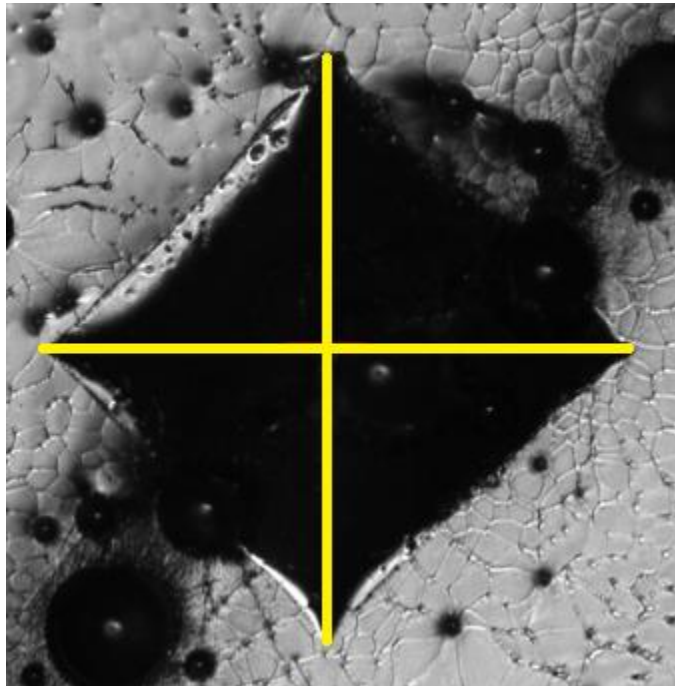


Figura 3.13 - Exemplo de ensaio de dureza.

Capítulo 4

Resultados

São apresentados neste capítulo os resultados obtidos a partir dos ensaios laboratoriais realizados. Serão feitas breves descrições e apreciações dos resultados bem como das macro e micrografias.

4.1. Macrografias

Na Figura 4.1 podem-se observar o antes e após o tratamento de NaOH das fibras de 0,5 mm (figura 4.1 (a) e (b)) e das fibras de 12 mm (figura 4.1 (c) e (d)).

Pode-se verificar, para ambos os comprimentos, que existe uma diminuição da espessura das fibras e ficando a superfície da fibra mais rugosa, aumentando a fibrose superficial.



Figura 4.1 - Fibras de conteira: (a) de 0,5 mm antes do tratamento; (b) de 0,5 mm após o tratamento; (c) de 12 mm antes do tratamento; (d) de 12 mm após o tratamento.

A Figura 4.2 mostra as macrografias aos provetes de resina epóxi com partículas de fibras de conteira de 0,5 mm de comprimento, para as diferentes percentagens de fibra em peso (2,5; 5; 7,5; 10). É desta forma, possível verificar que à medida que a % de conteira na resina aumenta, as bolhas de ar no compósito também aumentam, ou seja, a inserção de 10% de partículas de conteira na resina epóxi dificulta a realização da mistura resina/fibra (Figura 4.2(d)). Ao contrário, no provete D 0,5 P 2,5 (Figura 4.2 (a)) verifica-se uma diminuição de bolhas de ar, no entanto o compósito apresenta zonas com aglomerados de fibras e zonas sem fibras, indicando que este compósito apresenta uma menor homogeneização resina/fibra.

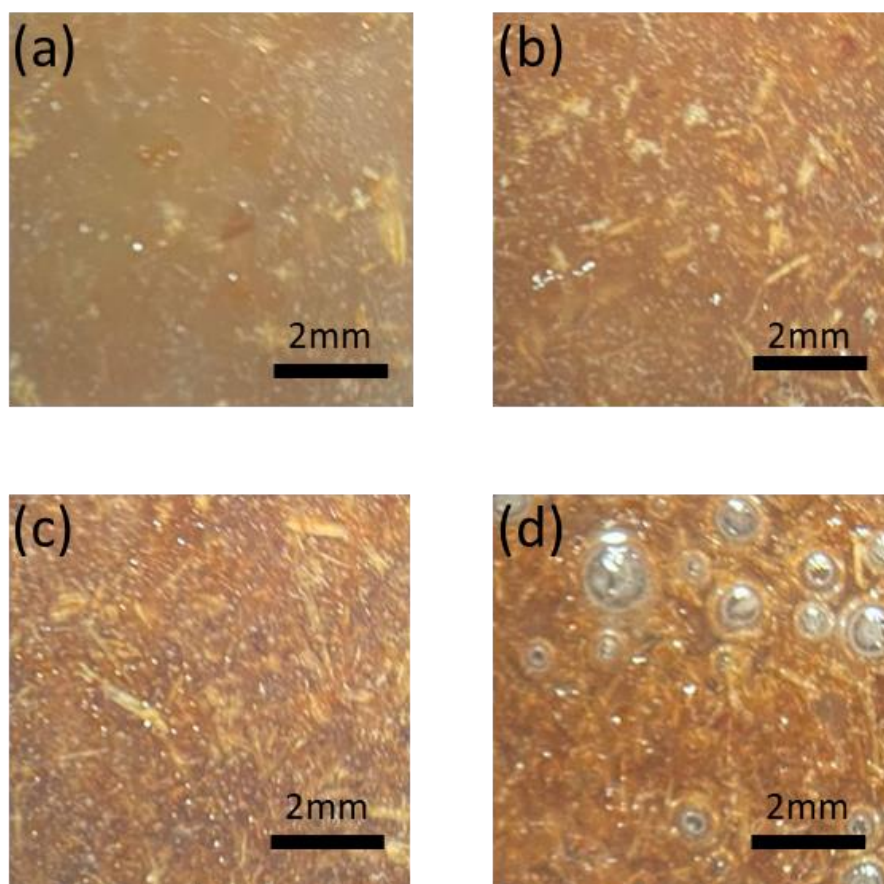


Figura 4.2 - Macrografia dos provetes com partículas: (a) D 0.5 P 2.5; (b) D 0.5 P 5; (c) D 0.5 P 7.5; (d) D 0.5 P 10.

A Figura 4.3 mostra as macrografias aos provetes de resina epóxi com fibras curtas de conteira de 12 mm de comprimento, para as diferentes percentagens de fibra em peso (2,5; 5; 7,5; 10). Através da figura 4.3 é possível verificar que, com o aumento da percentagem de fibra, aumenta significativamente a quantidade de fibra por área. Há também um aumento pouco significativo

da porosidade do compósito comparado com os provetes de partículas, e há uma homogeneidade maior de fibras/resina por área. Salienta-se que existiu uma elevada dificuldade em homogeneizar as fibras curtas pela área do provete, dado que estas são maiores que as fibras de partículas. Pode-se ainda observar que nos provetes D 12 P 10 (Figura 4.3 (d)), existe uma maior concentração de fibras e consequentemente uma menor área de resina sem fibras. No provete D 12 P 2.5 (Figura 4.3 (a)) pode-se constatar o inverso, menor concentração de fibras e maior quantidade de área apenas com resina epóxi, ou seja, apresentando uma menor homogeneização fibra/resina.

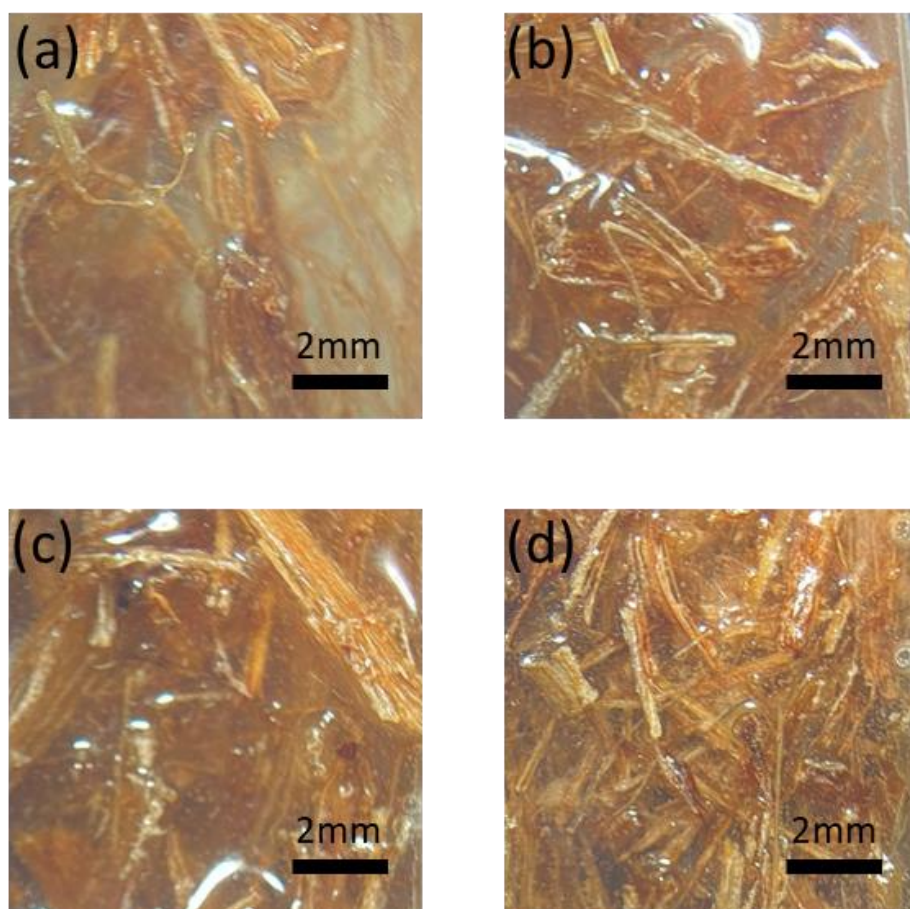


Figura 4.3 - Macrografia dos provetes com fibras curtas: (a) D 12 P 2.5; (b) D 12 P 5; (c) D 12 P 7.5; (d) D 12 P 10.

4.2. Densidade

Os resultados da densidade média dos compósitos de resina epóxi com 2,5, 5, 7,5 e 10%wt, em peso de fibra de conteira (P 2.5; P 5; P 7.5; P10), são apresentados na tabela 4.1, tanto para as partículas com 0,5mm (D 0.5), como para as fibras curtas de 12mm (D 12). É também apresentado o resultado da densidade do compósito sem fibras de para comparação (D 0 P 0), sendo este material o que apresenta um valor superior da densidade.

Os resultados mostram que a densidade não sofre alteração significativa com a adição de fibras tanto na forma de partículas como na forma de fibras curtas. A maior diferença, ainda que pouco significativa, é observada nos provetes com adição de 7,5%wt de conteira de 0,5 mm, verificando-se um decréscimo de 1,77% na densidade em relação aos provetes sem adição de fibras.

Tabela 4.1 – Densidade dos compósitos de resina epóxi com fibras de conteira.

	ρ (g/cm ³)				
	P 0	P 2.5	P 5	P 7.5	P 10
D 0	1,160 ± 0,003	-	-	-	-
D 0.5	-	1,153 ± 0,008	1,153 ± 0,006	1,140 ± 0,003	1,142 ± 0,005
D 12	-	1,153 ± 0,006	1,155 ± 0,004	1,150 ± 0,013	1,151 ± 0,006

4.3. Dureza

Na figura 4.4. está representada a variação da dureza em relação à %wt de fibra de conteira para os compósitos de resina epóxi com fibras de partículas (0,5 mm) e com fibras curtas (12 mm), assim como para o compósito de referência sem fibra (D 0 P 0).

É possível observar que a dureza aumentou em todos os compósitos em relação aos provetes sem fibra. O maior aumento verificou-se nos provetes D 12 P 7.5, correspondendo a um aumento de 16,71%.

Nos provetes com partículas de conteira de 0,5 mm a dureza aumentou conforme o aumento de percentagem de fibra, o que não aconteceu com os provetes de conteira de 12 mm, onde houve um aumento crescente nas percentagens de 2,5, 5 e 7,5%wt, no entanto, constatou-se um decréscimo de 13,7% para o caso dos provetes com 10% (D 12 P 10), em relação aos provetes com 7,5%wt (D 12 P 7.5). Os valores referentes à figura 4.4 podem ser consultados na tabela A.1 do anexo A.

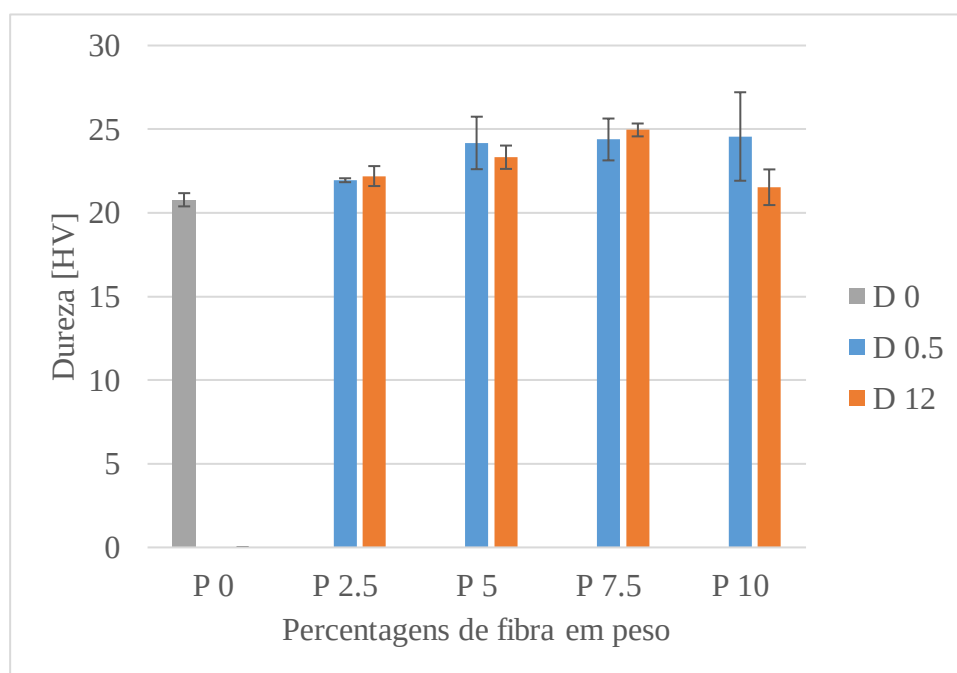


Figura 4.4 - Dureza *Vickers* dos compósitos de resina epóxi com fibras de conteira.

4.4. Ensaio de Tração

Através dos ensaios de tração, foram obtidas as curvas tensão-extensão para os vários provetes de compósitos de resina epóxi reforçados com 2,5, 5, 7,5 e 10%wt de partículas e de fibras curtas de conteira (0,5 mm e 12 mm) e também para os provetes de resina epóxi sem fibra, 0%wt.

Todos os resultados dos ensaios experimentais dos vários provetes ensaiados estão representados nas figuras A.1 a A.9 no Anexo A, nas figuras 4.5 e 4.6 encontram-se os

diagramas de tensão vs extensão longitudinal representativos para cada um dos tamanhos de fibra, tendo sempre como comparação um ensaio de tração de um provete de resina epóxi.

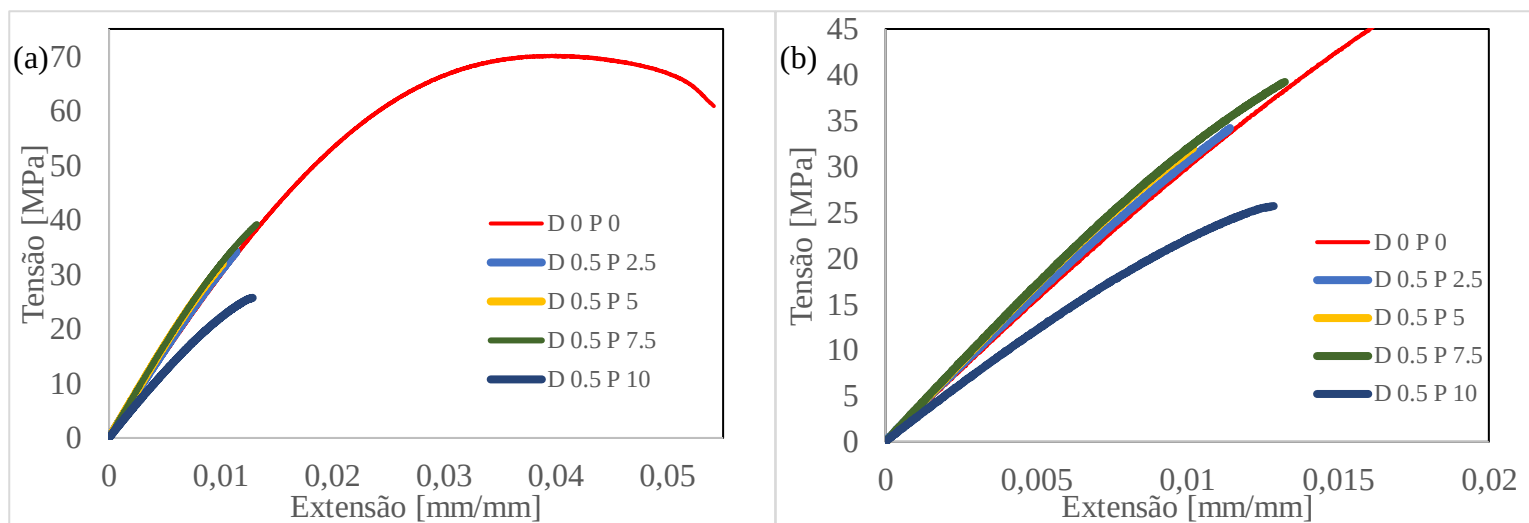


Figura 4.5 – Tensão-extensão para os provetes com coneteira de 0,5 mm: (a) curvas típicas da tensão-extensão; (b) ampliação da zona linear.

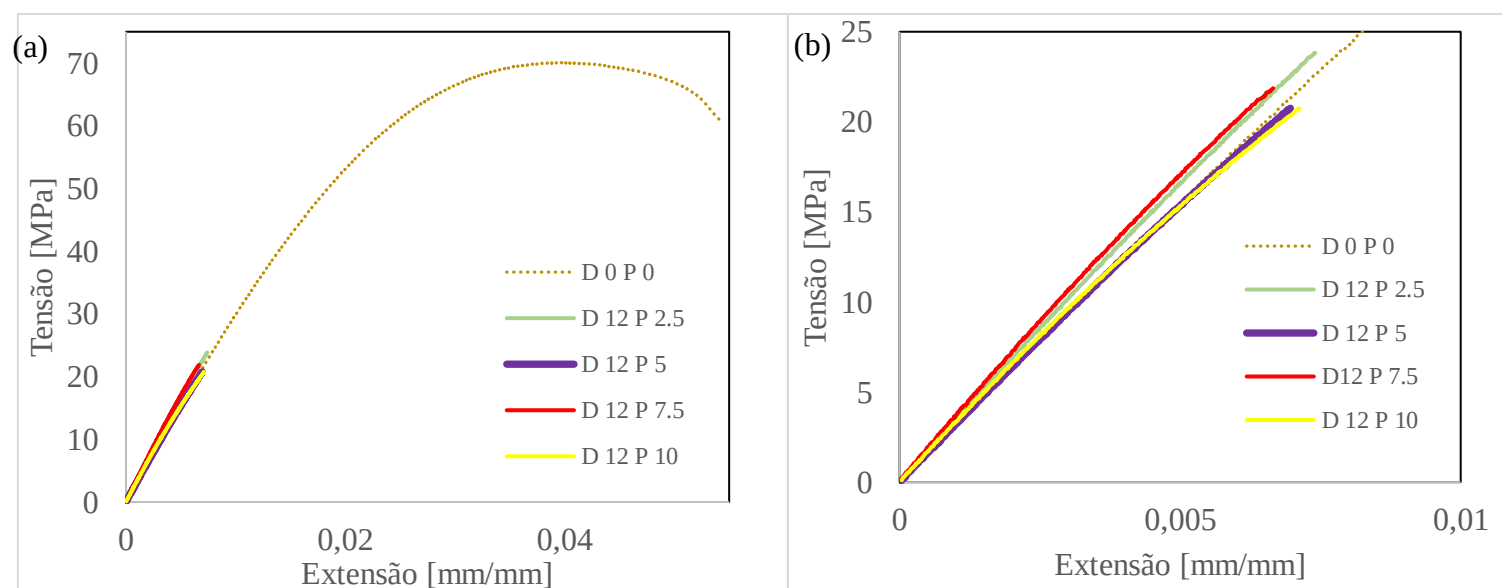


Figura 4.6 - Tensão-extensão para provetes com coneteira de 12 mm: (a) curvas típicas da tensão-extensão; (b) ampliação da zona linear.

Observa-se em ambas as figuras, 4.5 e 4.6, que o compósito sem fibras de coneteira, ou seja, o provete D 0 P 0, apresenta um comportamento plástico em comparação aos restantes provetes

que apresentam um comportamento maioritariamente frágil. Os resultados mostram também que todos os compósitos reforçados com fibras de conteira, apresentam uma menor resistência mecânica à tração e uma menor ductilidade do que a resina epóxi, evidenciando que a inserção de fibras de conteira na resina epoxídica provoca uma fragilidade nos compósitos.

4.4.1. Módulo de Young

Os resultados obtidos para o módulo de *Young*, ou módulo de elasticidade à tração, são apresentados na figura 4.7 (valores apresentados na tabela A.2 do anexo A), na qual pode-se observar que a adição de fibra na resina epóxi conduz a um aumento do módulo de *Young*, ou seja, um aumento da rigidez do material, com a exceção dos compósitos com 10%wt de adição de fibras, tanto no caso de partículas como nas fibras curtas. Nestes provetes, verificou-se no entanto, uma descida acentuada de 24,4% nos compósitos de partículas de 0,5mm (D 0.5 P 10) em comparação aos provetes de fibras curtas (D 12 P 10).

Os valores mais elevados do módulo de elasticidade foram obtidos para os compósitos com percentagens de fibra de 5%wt e 7,5%wt, tanto para os compósitos de partículas como para os de fibras curtas, verificando-se um aumento máximo de 15,11% em relação aos provetes de resina epóxi.

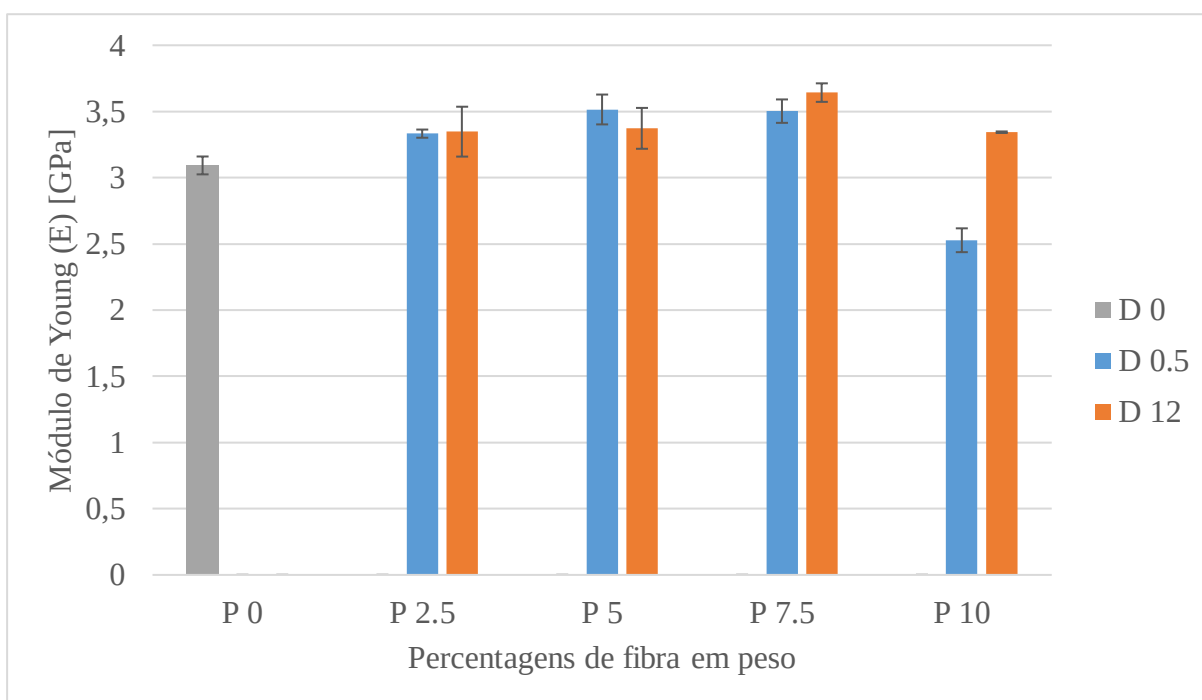


Figura 4.7 - Módulo de Young (E) dos compósitos de resina epóxi com fibras de conteira.

4.4.2. Extensão à fratura

Tal como observado anteriormente nas figuras 4.5 e 4.6, a adição de fibras e partículas naturais de conteira nos compósitos de matriz polimérica, provoca uma diminuição na sua ductilidade.

Na figura 4.8 pode-se observar a variação da extensão à fratura para os vários provetes ensaiados, mostrando uma redução da extensão à fratura para todos os compósitos reforçados a fibras de conteira em comparação aos provetes de resina epóxi. Verificando-se assim uma redução na extensão à fratura na ordem dos 70% nos provetes D 0.5 e de 85% nos provetes D 12, mostrando que os compósitos de resina epóxi reforçados com partículas de fibras de conteira apesar da sua inferior extensão à fratura em relação aos compósitos sem fibra, conseguem apresentar um comportamento superior aquando da adição de partículas curtas.

Os valores correspondentes ao gráfico da figura 4.8 podem ser consultados na tabela A.3 do anexo A.

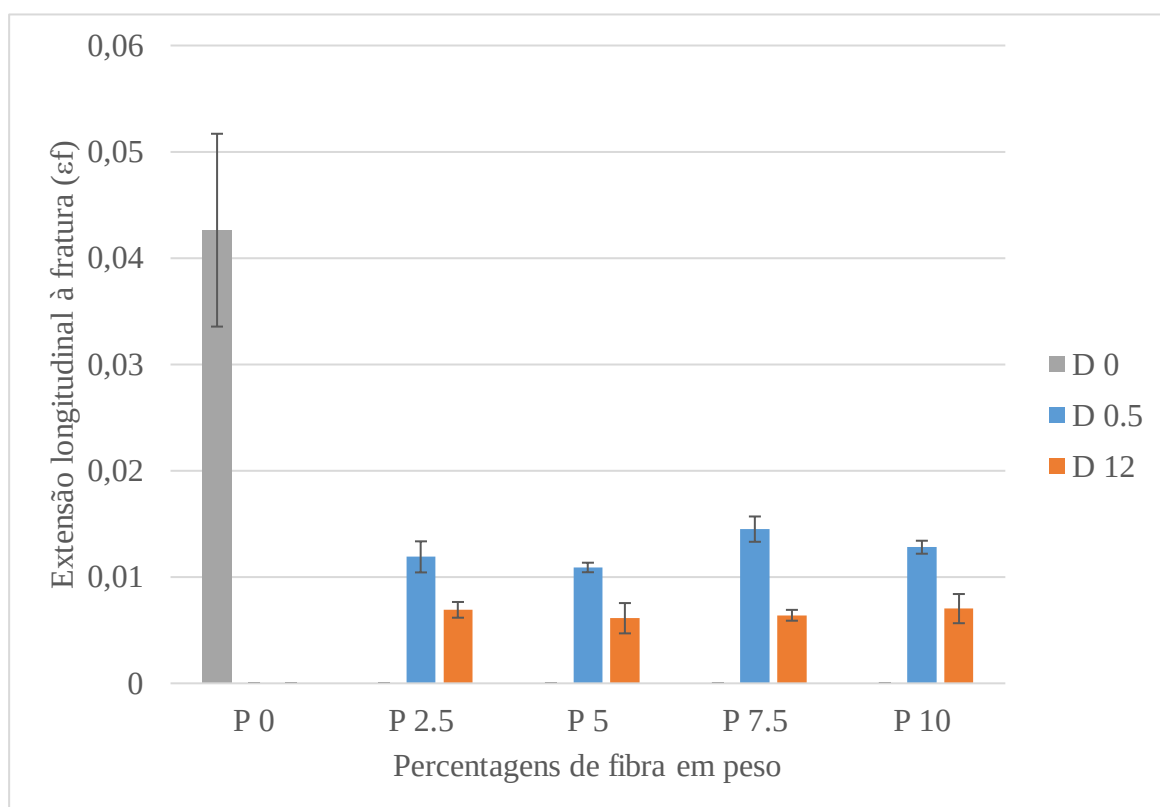


Figura 4.8 – Extensão longitudinal à fratura (ϵ_f) dos compósitos de resina epóxi com fibras de conteira.

4.4.3. Tensão de rotura

Com a adição de fibras curtas e de partículas de fibras de conteira nos compósitos de resina epoxídica, conduziu a uma redução da tensão de rotura dos provetes, também já anteriormente observada nas figuras 4.5 e 4.6. Essa redução foi superior no caso dos compósitos com de fibras curtas de 12 mm na ordem dos 70%, dado que o aumento do tamanho da fibra provoca uma maior área para a fraca adesão entre a fibra e a resina. Nos compósitos de fibras de partículas de 0,5 mm a diminuição apresentou-se na ordem dos 50%.

O valor máximo de tensão de rotura dos compósitos com fibras, foi obtido nos provetes com as fibras de 0,5 mm e com uma percentagem de 7,5%wt (D 0.5 P 7.5). No caso do compósito com fibras de 12 mm a tensão de rotura máxima foi obtida para a percentagem de 2,5%wt (D 12 P 2.5).

Através da figura 4.9 e dos valores presentes na tabela A.4 no anexo A, verifica-se que os compósitos reforçados com partículas de conteira (D 0.5) apresentam uma tensão de rotura superior aos compósitos reforçados com fibras curtas (D 12), chegando a ser de 29% nos provetes com 7,5%wt de fibras. Isto deve-se provavelmente a uma melhor adesão da resina às partículas de conteira do que às fibras curtas devido à área da superfície das partículas ser menor do que a das fibras curtas e da miscibilidade superior da resina nas partículas em comparação às fibras curtas aquando do fabrico dos compósitos.

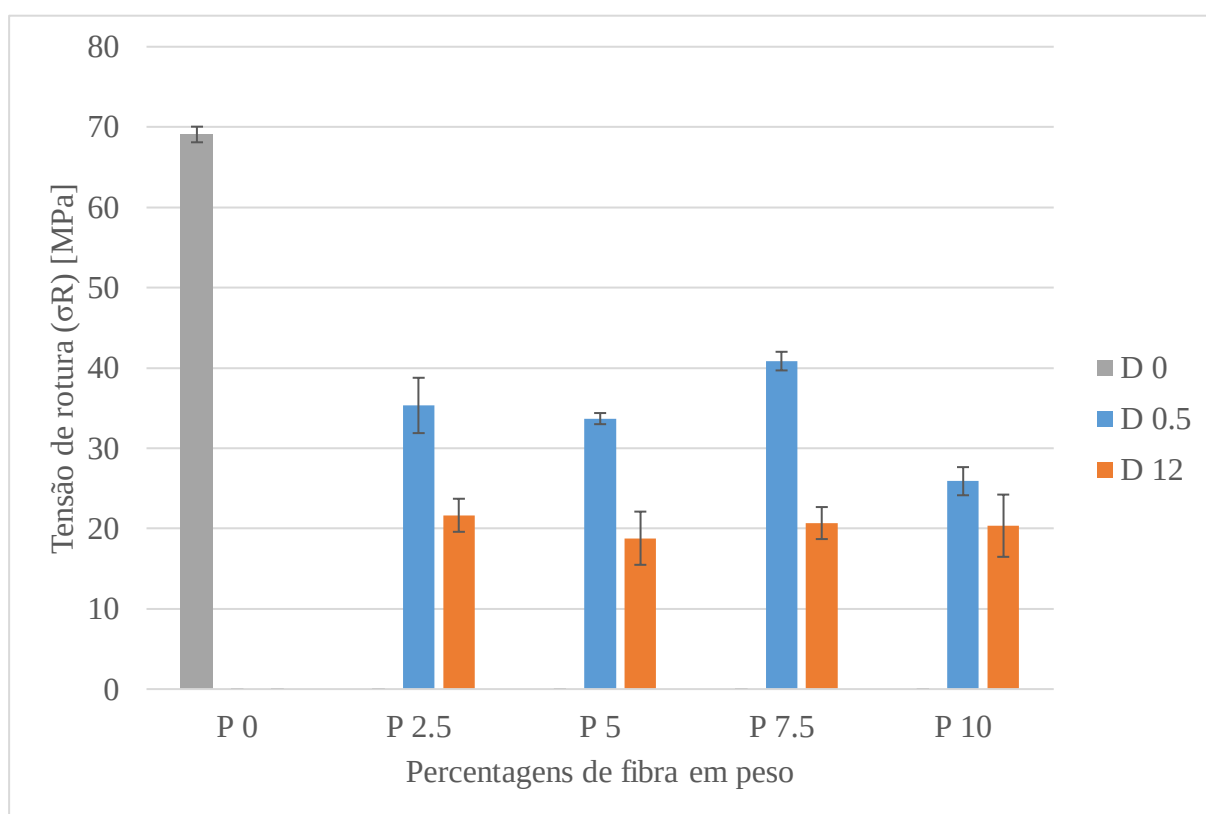


Figura 4.9 - Tensão de rotura (σ_R) dos compósitos de epóxi com fibras de conteira.

4.4.4. Tenacidade à fratura específica

A adição de conteira à matriz de epóxi conduz a uma redução da tenacidade à fratura específica, tal como esperado, uma vez que os provetes reforçados com fibras de conteira apresentam uma menor ductilidade e uma menor tensão de rotura.

A tenacidade à fratura específica é obtida pela área subjacente da curva do ensaio de tração tensão-extensão (figuras 4.5 e 4.6), desde o início do ensaio até à fratura (separação do provete em dois). Esta grandeza representa a relação que existe entre a quantidade de energia contida numa dada região e o volume ou a massa por esta ocupada.

A partir da figura 4.10 é possível verificar que com a adição de fibra, a tenacidade à fratura dos provetes diminui drasticamente, apresentando uma diminuição em média de 89% nos provetes com fibras de partículas e uma diminuição de 97% nos provetes de fibras curtas. Os valores referentes à figura 4.10 encontram-se na tabela A.5 do anexo A.

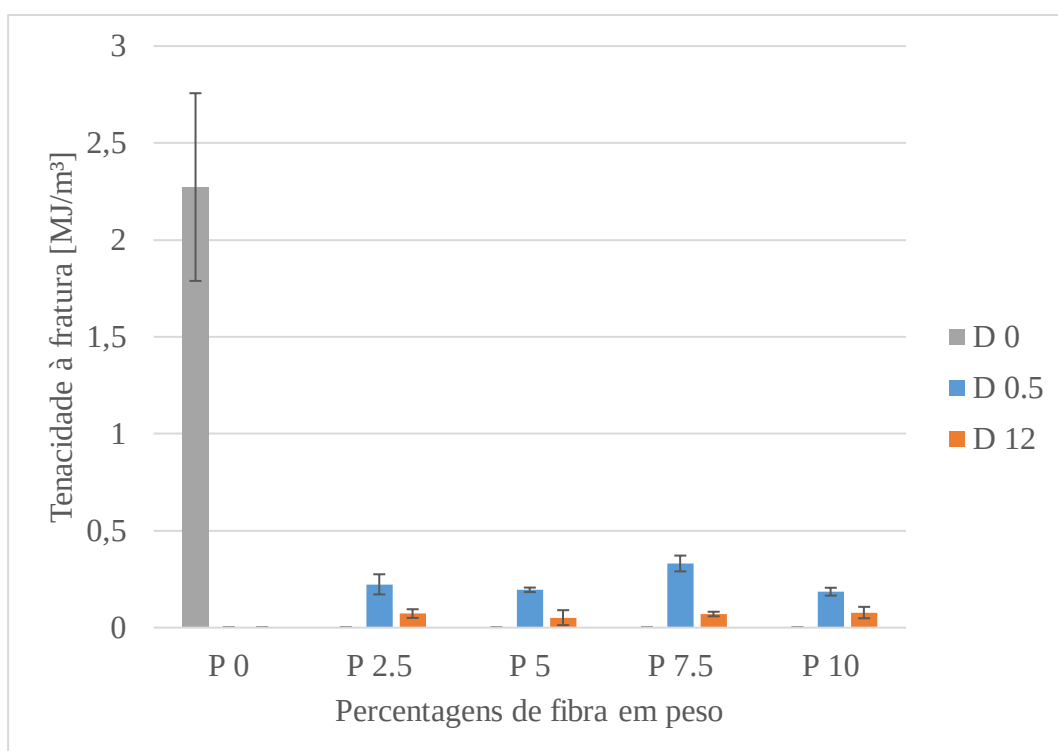


Figura 4.10 - Tenacidade à fratura específica (w_f) dos compósitos de epóxi com fibras de conteira.

4.5. Macrografia da zona de fratura dos provetes

Na figura 4.11 e na figura 4.12, são apresentadas as macrografias das zonas de fratura dos provetes de 0,5 mm e 12 mm de fibras de conteira, respetivamente.

Através da figura 4.11, pode-se observar que os provetes D 0.5 com fibras de partículas, após os ensaios de tração apresentaram uma fratura frágil. Também é visível que com o aumento da percentagem de fibra, a porosidade presente nos provetes aumentou, diminuindo a homogeneidade, ligação matriz/fibra, fazendo com que a zona de fratura se tornasse mais irregular e porosa, tal como se pode verificar na figura 4.12 (d).

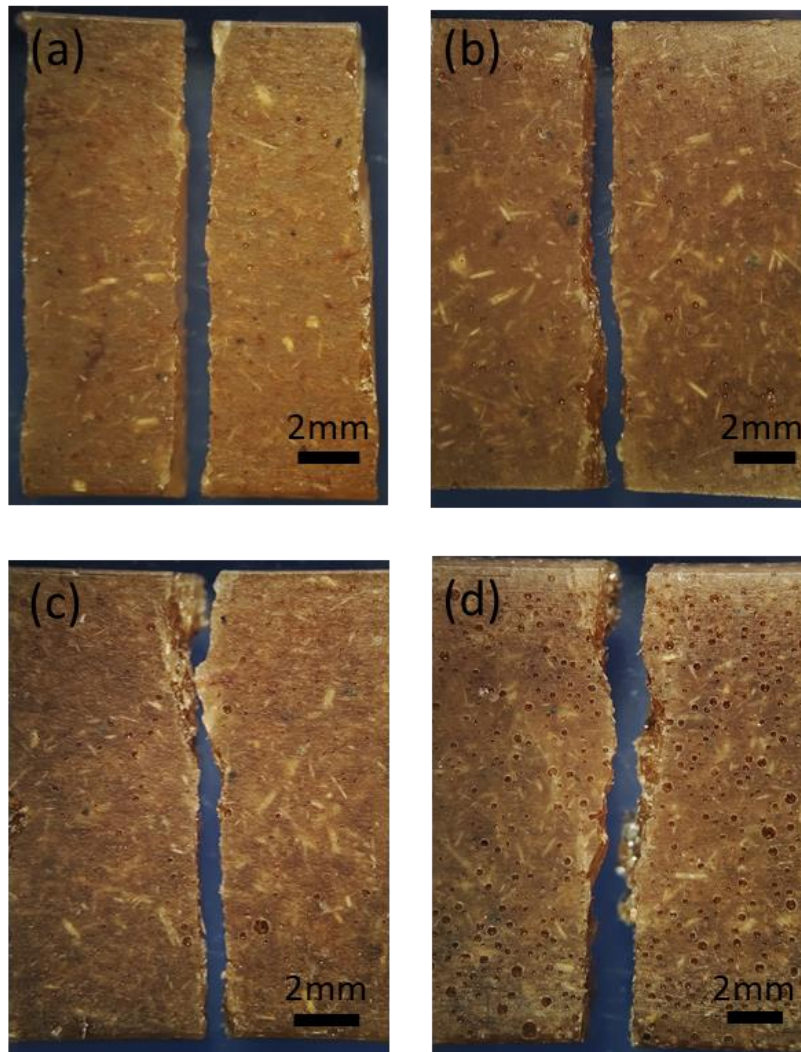


Figura 4.11 - Macrografia da zona de fratura dos provetes com conteira de 0.5 mm: (a) D 0.5 P 2.5; (b) D 0.5 P 5; (c) D 0.5 P 7.5; (d) D 0.5 P 10.

Os provetes fraturados após os ensaios de tração representados na figura 4.12, são referentes aos compósitos D 12 com fibras curtas de conteira, e mostram um aumento da irregularidade na zona de fratura com o aumento da %wt de conteira introduzida no compósito, no entanto,

apresentam uma menor porosidade em relação aos provetes reforçados com partículas de conteira.

Verificam-se também fibras fraturadas na zona de fratura, ou seja, não apresentando descolamento entre as fibras de conteira e a matriz epoxídica, revelando uma boa adesão entre a matriz e a fibra.

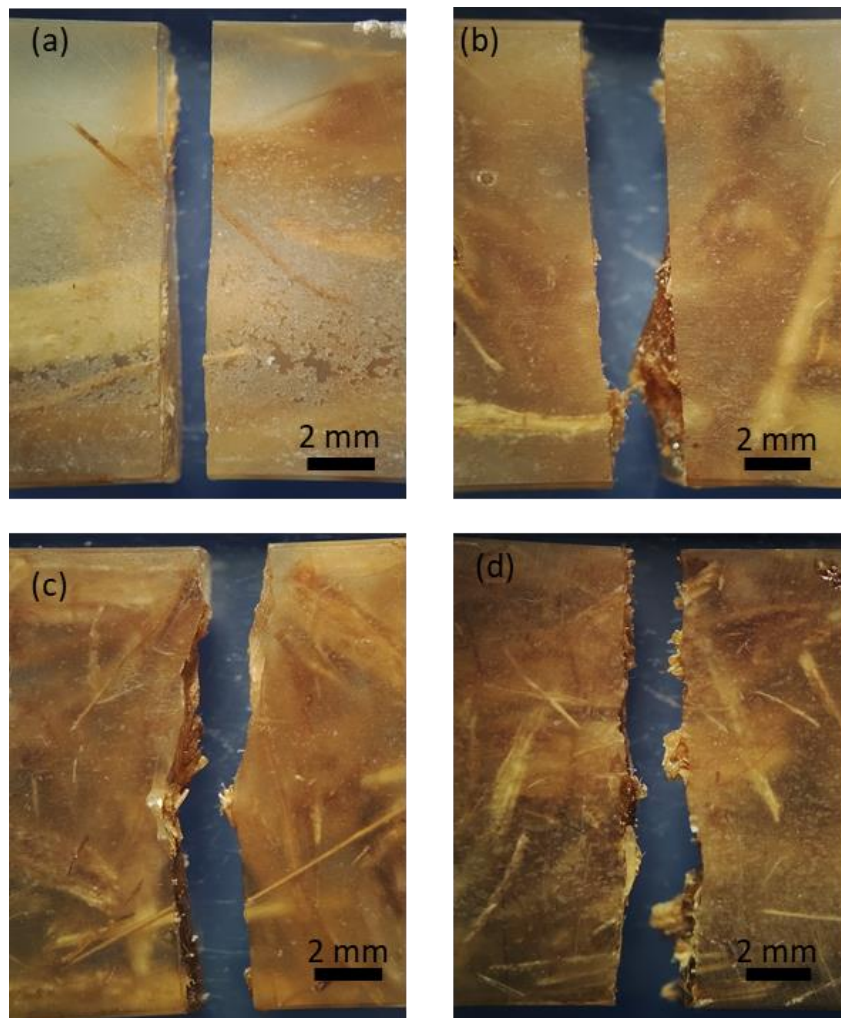


Figura 4.12 - Macrografia da zona de fratura dos provetes com conteira de 12 mm: (a) D 12 P 2.5; (b) D 12 P 5; (c) D 12 P 7.5; (d) D 12 P 10.

4.6. Micrografia da zona de fratura dos provetes

Na figura 4.13 são apresentadas as fotomicrografias com uma ampliação de 40x das superfícies de fratura dos compósitos produzidos no presente trabalho, obtidas através de MEV.

Foram realizadas as microscopias aos provetes com a menor e a maior %wt de fibra de conteira, para ambos os tamanhos de fibra (partículas e fibras curtas), ou seja, foram analisados os provetes D 0.5 P 2.5 (Figura 4.13 (a)), D 0.5 P 10 (Figura 4.13 (b)), D 12 P 2.5 (Figura 4.13 (c)), D 12 P 10 (Figura 4.13 (d)).

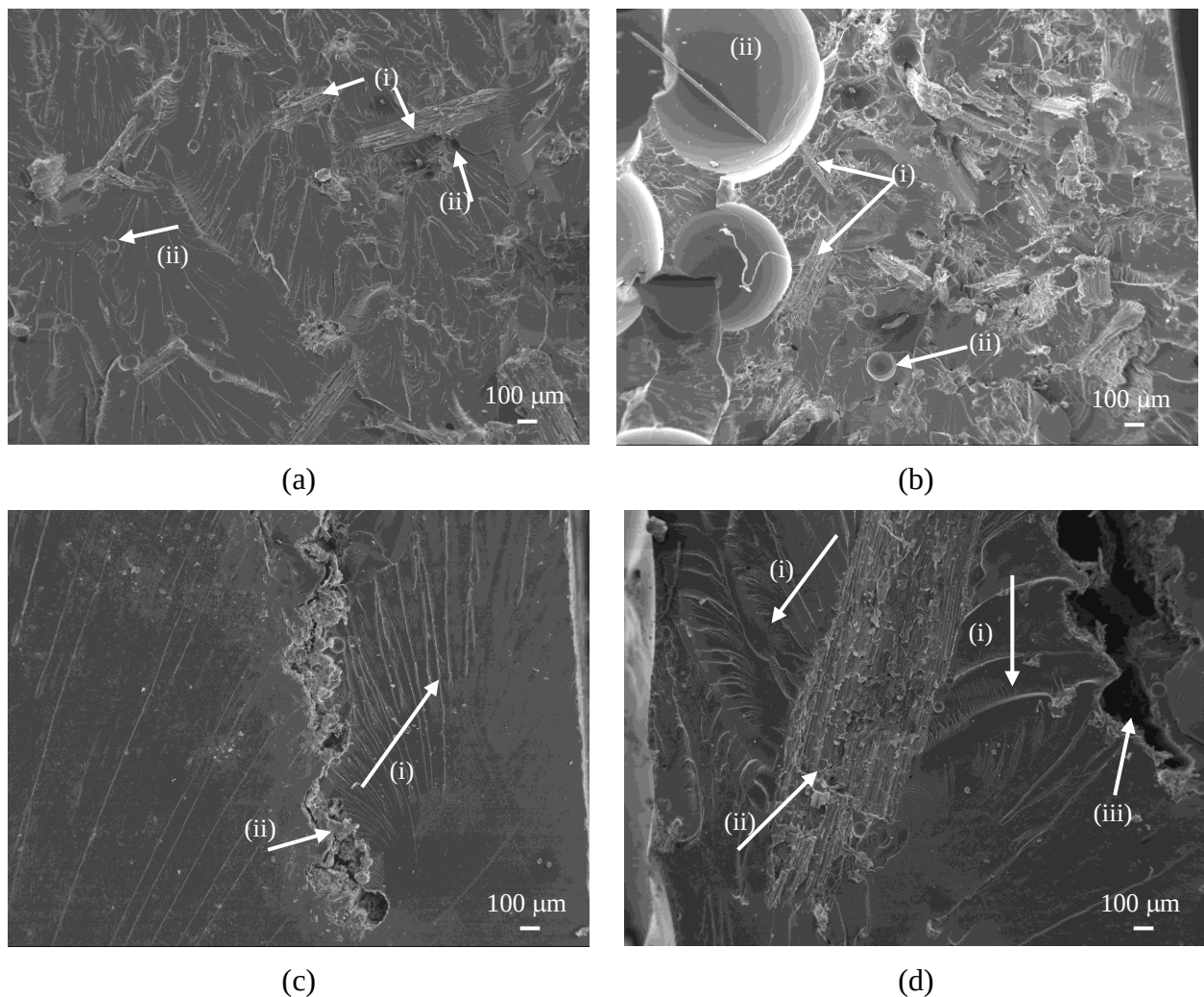


Figura 4.13 – MEV com ampliação a 40x: (a) D 0.5 P 2.5; (b) D 0.5 P 10; (c) D 12 P 2.5; (d) D 12 P 10.

Por análise comparativa das micrografias, pode-se observar que para ambos os tipos de fibras D 0.5 e D 12, os compósitos com 10%wt, apresentam maior porosidade (figura 4.13 (b)(ii)), maior quantidade de fibra (figura 4.13 (b)(i) e (d)(ii)) e maior heterogeneidade na sua distribuição (figura 4.13 (b)(i)). Através da comparação das superfícies de fratura das amostras com fibras de partículas de 0,5 mm da figura 4.13 (a) e 4.13 (b) com as de 12 mm, representadas nas figuras 4.13 (c) e (d), observa-se que para a mesma percentagem, em peso, de fibra de conteira, as amostras de 0,5 mm apresentam maior quantidade de fibra na superfície de fratura, o que seria de esperar, uma vez que a percentagem de fibra é dada em massa. Assim, quanto maior for o seu comprimento, menor será a quantidade de fibras presentes no compósito. Nas superfícies de fratura, são ainda visíveis estrias (figura 4.13 (c)(i) e (d)(i)), as quais estão associadas a uma zona de elevada concentração de tensões, revelando a direção da propagação de fenda. Também se podem observar regiões em que a fibra está fortemente aderida à matriz (figura 4.13 (d)(ii)) e outras zonas em que a fibra está ausente (figura 4.13 (d) (iii)).

Na figura 4.14 estão representadas as micrografias às superfícies de fratura dos provetes dos compósitos de resina epóxi reforçada com fibras curtas de 12 mm para diferentes ampliações.

Através da figura 4.14 (a) verifica-se que nos compósitos de resina reforçados a fibras curtas de conteira, as fibras organizam-se em forma de feixes de fibras, rodeados pela resina epóxi, tal como já observado anteriormente para menores ampliações (figura 4.13). A observação em MEV com maiores ampliações (figura 4.14), revelou que as fibras curtas de conteira fraturaram transversalmente à carga (figura 4.14 (a)(i)). Em alguns casos é visível que as fibrilas exteriores dos feixes de fibras ficaram aderidas à matriz enquanto os interiores descolaram devido ao esforço de tração. Este fenómeno aconteceu tanto em fibras que estavam alinhadas axialmente com o eixo de tração (figura 4.14 (b)(ii) e (d)(ii)), assim como as que estavam noutras direções. Também foi observado um descolamento entre o exterior dos feixes de fibras e a matriz (figura 4.14 (a)(i) e figura 4.14 (d)(i)). Foi também possível observar a desfibrilação que ocorre nas fibras (figura 4.14 (c)). Junto das fibras observaram-se estrias na resina epóxi, resultantes da propagação da fenda (figura 4.14 (a)(iii) e (c)(iii)).

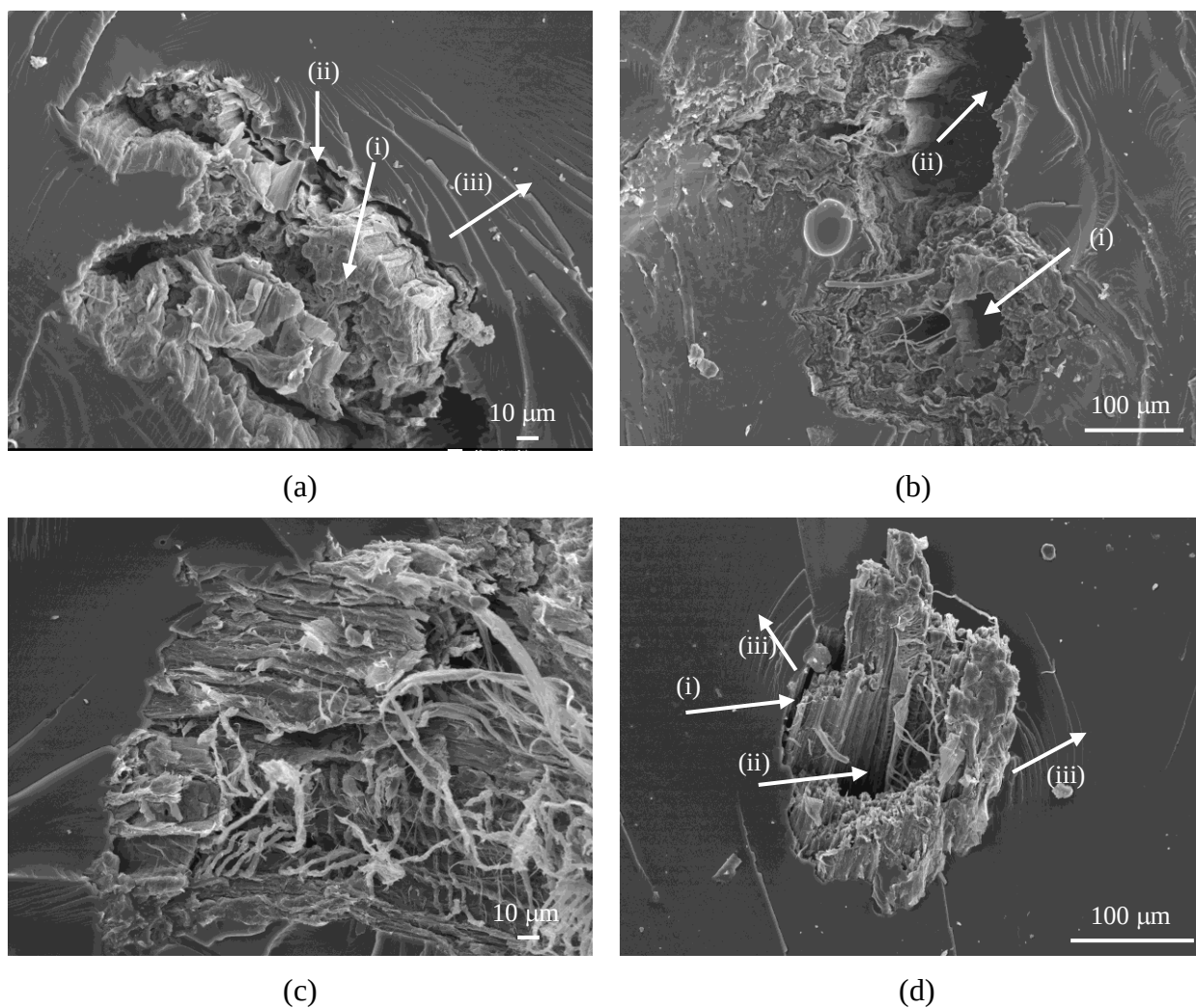


Figura 4.14 – MEV aos provetes com fibras curtas de 12 mm: (a) D 12 P 2.5 300x; (b) D 12 P 2.5 200x; (c) D 12 P 10 400x; (d) D 12 P 10 250x.

Na figura 4.15 estão representadas as micrografias às superfícies de fratura dos provetes dos compósitos de resina epóxi reforçada com fibras de partículas de 0,5 mm para diferentes ampliações.

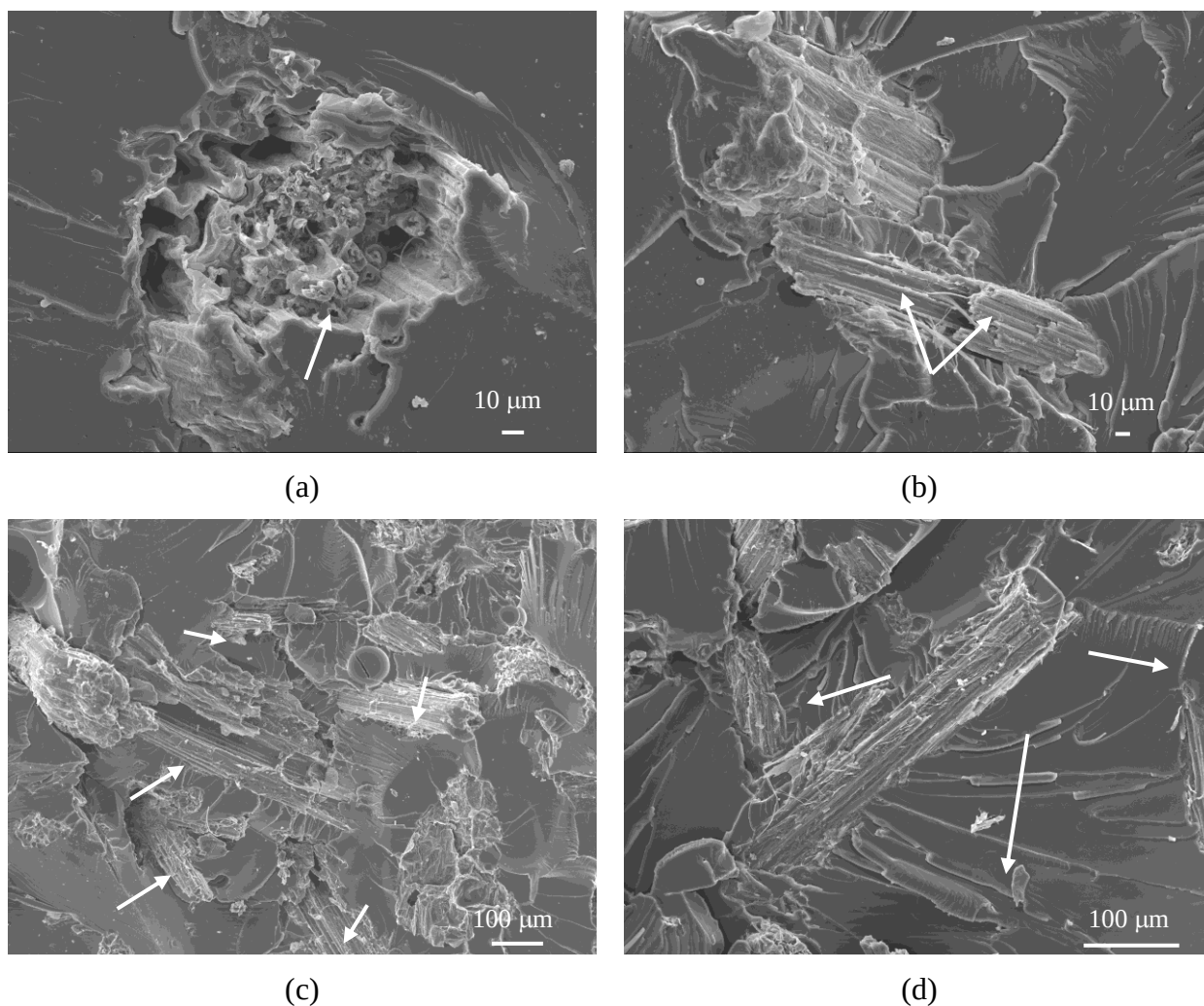


Figura 4.15 – MEV aos provetes com fibras de partículas de 0.5 mm: (a) D 0.5 P 2.5 500x; (b) D 0.5 P 2.5 300x; (c) D 0.5 P 10 100x; (d) D 0.5 P 10 200x.

Na figura 4.15 (a) é possível verificar que as fibras de partículas também se organizam em feixes de fibras tal como as fibras curtas (figura 2.14).

Na figura 4.15 (b) é possível verificar que as fibras partem e decolam mesmo quando não estão alinhadas com a carga. Comportamento também observado para maiores %wt de fibras, como acontece na figura 4.15 (c). Na figura 4.15 (d) as setas indicam a direção e o sentido da propagação da fenda, que tem iniciação nas fibras.

Capítulo 5

Discussão

Neste capítulo é discutido todo o conteúdo laboratorial realizado e comparado com resultados presentes na literatura.

O presente trabalho teve como objetivo o fabrico de compósitos de matriz epoxídica com fibras de conteira. As fibras foram inicialmente tratadas numa solução alcalina que conduziu em parte à desfibrilação da conteira (figura 4.1). O tratamento alcalino tem sido vastamente utilizado noutros trabalhos para retirar alguns constituintes das fibras, como ceras, óleos, lignina e hemicelulose da superfície, o que conduz a um aumento da rugosidade da superfície e converte os grupos hidroxilos da fibra por ionização, promovendo desta forma a adesão da fibra hidrofílica à matriz hidrofóbica [31]. No presente trabalho, através da análise das superfícies de fratura após ensaios de tração, verificou-se que grande parte das fibras ficaram aderidas após o ensaio, o que demonstra uma boa adesão fibra/matriz (figura 4.13, 4.14 e 4.15). Contudo, foi observada heterogeneidade na distribuição da fibra, a qual foi mais evidente (figuras 4.11 e 4.12) para os materiais compósitos obtidos com as fibras de 12 mm, a qual pode ser atribuída a diferenças na hidrofiliabilidade entre a conteira e a epóxi.

Os materiais obtidos neste trabalho apresentaram uma densidade média de $1,15 \text{ g/cm}^3$ independentemente da percentagem de fibra, o que sugere que à medida que a quantidade de fibra aumenta, a porosidade aumenta numa proporção que resulta na ausência de alteração da densidade dos compósitos. Durante o fabrico, à medida que se aumenta a quantidade de fibra, a mistura torna-se mais viscosa, facilitando a incorporação de ar, o que resulta num aumento da porosidade. Pela análise das figuras 4.11 e 4.12, pode-se ver que para ambos os tamanhos de fibra estudados, existe um aumento de porosidade com a quantidade de fibra. Tal aumento tem sido reportado noutros estudos [18, 17, 32]. As densidades dos compósitos apresentaram valores menores que os obtidos por Jai Inder Preet Singh et al [33], em que os compósitos de epóxi/juta, pelos autores estudados, obtiveram valores de densidade de $1,3 \text{ g/cm}^3$ [33].

Os resultados mostram que a incorporação de fibra na resina epóxi conduz a um aumento da dureza, tal deve-se a que a fibra vai constranger a deformação plástica da resina epoxídica. Tem-se verificado em múltiplos trabalhos que a incorporação de partículas no seio da resina epóxi conduz a este efeito [6, 34].

A caracterização mecânica através dos ensaios de tração mostrou um aumento do módulo de elasticidade. Os valores do módulo de elasticidade dos materiais produzidos, são superiores aos obtidos por Ming Qiu Zhang et al [32], para compósitos de fibra curta de sisal/resina epóxi, que apresentaram valores de $2,7 \text{ GPa}$. Contudo, os valores reportados por estes autores são menores aos obtidos no presente trabalho, o que pode dever-se ao tipo de resina usado.

Os resultados mostraram uma diminuição da resistência à tração dos compósitos comparativamente com a resina epóxi [32]. A diminuição da resistência à tração de materiais compósitos epóxi/fibras naturais foi também reportada por Engin Sarikaya et al [35]. Nesse trabalho a incorporação de fibras de bétula, palma e eucalipto na resina epóxi conduziu a uma diminuição de 70 MPa (epóxi) para valores de tensão de rotura entre 30 e 45 MPa, dependendo do tipo de fibra usada [35].

A observação MEV das superfícies de fratura dos compósitos testados no presente trabalho, mostrou que as fibras foram locais de concentração de tensões que conduziram à iniciação da fratura da matriz epoxídica (figura 4.14 e 4.15), dado que se podem observar estrias concêntricas na matriz epoxídica junto às fibras. Contudo, estas foram capazes de suportar carga após a fratura da matriz, dado que foi possível observar um estiramento da fibra, principalmente no caso das fibras curtas (figura 4.14).

No presente trabalho, o maior valor de tensão de rotura obtido foi com os provetes D 0.5 P 7.5 (40,8 MPa). Este valor é superior ao reportado por Jai Inder Preet Singh et al [33], os quais obtiveram para compósitos de epóxi/fibra de juta 28 MPa. Também, Dayadi Nageswara Rao et al [36], obtiveram valores menores para compósitos de epóxi com fibras naturais de pêlo de bode (18,5 MPa), banana (15,4 MPa) e pelo de bode com banana (24 MPa). No entanto, os valores da tensão de rotura obtidos no presente trabalho são inferiores aos reportados por Fernanda Luz et al [37], que apresentaram 86,4 MPa de tensão de rotura para provetes de epóxi reforçados com 30% de fibras de ananás (PALF) [37]. Na tabela 5.1, são apresentados os valores de tensão de rotura, compilados por R. Jeyapragash et al [38] para compósitos de fibras naturais à base de resina epóxi.

Tabela 5.1 - Comportamento mecânico de compósitos verdes. [38]

SI Nº	Compósitos	Tensão de rotura (MPa)
1	Epóxi - coco	23,68
2	Epóxi - sisal	37,40
3	Epóxi - juta	43,00
4	Epóxi - banana	59,00
5	Epóxi - bagaço	42,40
6	Epóxi - linho	59,85
7	Epóxi - areca	27,50
8	Epóxi - rami	90,00
9	Epóxi - camará	19,08
10	Epóxi - pseudo caule de banana	45,57
11	Epóxi - casca de amendoim	18,09
12	Epóxi - casca de arroz	23,00
13	Epóxi - medula de coco	9,00
14	Epóxi - banana + sisal	25,00
15	Epóxi - luffa + casca de arroz	39,31

A menor tensão de rotura, observada no presente trabalho, foi obtida para uma quantidade de fibra de conteira de 10%wt, independentemente do comprimento da fibra utilizada (partículas ou curtas). Tal pode ser justificado pela maior heterogeneidade na distribuição da fibra e maior porosidade dos materiais produzidos que se observou para esta percentagem (figuras 4.11 e 4.12). Ming Qiu Zhang et al [32], verificou o aumento da porosidade com a percentagem de fibra de sisal, o que conduziu a uma diminuição da tensão de rotura a partir de uma percentagem de 15%. No presente trabalho verificou-se ainda uma diminuição de 21 a 49% da tensão de rotura para as fibras curtas (12 mm), comparativamente com as fibras por partículas (0,5 mm). Tal pode ser explicado pela diminuição do número de fibras com o aumento do seu tamanho, pelo que é provável uma menor quantidade de fibras capaz de defletir a propagação da fratura. Este resultado sugere que deverá existir um tamanho ideal de fibra para o qual a tensão de rotura é máxima, tal como S. Vigneshwaran et al [6] verifica.

Os resultados mostram uma diminuição da ductilidade com a adição de fibra, este fenómeno está presente em exemplos na literatura, em que R. Siva et al [39] demonstra que a adição de fibra de banana origina uma diminuição da ductilidade, devendo-se ao facto de pouca homogeneidade na dispersão das fibras no compósito.

De modo geral, as propriedades mecânicas dos compósitos dependem da quantidade fibra e do seu tamanho. Tendo-se verificado os melhores resultados para os compósitos com 7,5%wt, de fibra de 0,5 mm.

Capítulo 6

Conclusões e Proposta de Trabalhos Futuros

O presente capítulo documenta todas as conclusões inerentes ao tema, tendo em conta todo o trabalho realizado e o trabalho que ainda poderá ser feito futuramente.

6.1. Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo produzir e estudar compósitos de resina epóxi/fibras de coneteira, para tal foram fabricados materiais com percentagens em peso de fibras de coneteira de 2,5 a 10%wt e dois tamanhos distintos (0,5 mm e 12 mm). Os resultados obtidos mostraram que:

- É possível o fabrico destes materiais através de vazamento em moldes de silicone;
- A porosidade aumenta com o aumento da quantidade e do comprimento da fibra;
- A adição de fibra à resina epóxi conduz a um aumento da dureza do material;
- Existe uma diminuição da resistência mecânica e da ductilidade com a incorporação da fibra na resina;
- O tamanho da fibra tem impacto na resistência mecânica e ductilidade dos compósitos, tendo-se verificado, menor resistência e ductilidade para os compósitos de 12 mm;
- Os compósitos que exibiram as melhores propriedades foram fabricados utilizando fibras de coneteira com comprimento de 0,5 mm e com 7,5%wt de quantidade;

Em suma, os materiais obtidos têm uma maior rigidez e dureza do que a resina epóxi, contudo exibem menor ductilidade e resistência à tração. Estes materiais deverão ser aplicados no fabrico de peças onde os esforços mecânicos sejam limitados. São esteticamente apelativos, pelo que podem ser utilizados para fins decorativos, como por exemplo mobiliário ou acabamentos interiores de automóveis.

6.2. Propostas de trabalhos futuros

Como proposta para trabalhos futuros sugere-se:

- A produção dos materiais sobre vácuo de forma a diminuir a porosidade;
- Estudar o efeito de outros tratamentos da fibra;
- Estudar o efeito do tamanho da fibra na resistência mecânica;
- Determinar a resistência à flexão, impacto e ao desgaste dos materiais produzidos.

Bibliografia

- [1] Balla, V. K., Kate, K. H., Satyavolu, J., Singh, P., Tadimeti, J. G. D., Additive manufacturing of natural fiber reinforced polymer composites: Processing and prospects, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 174, 2019.
- [2] Thakur, V. K., Singha, A. S., Thakur, M. K., Green Composites from Natural Fibers: Mechanical and Chemical Aging Properties, *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, Vol. 17, 2012.
- [3] Zini, E., Scandola, M., Green Composites: An Overview, *Polymer composites*, Vol. 32, pp. 1905–1915, 2011.
- [4] Mazzanti, V., Pariente, R., Bonanno, A., Ruiz de Ballesteros, O., Mollica, F., Filippone, G., Reinforcing mechanisms of natural fibers in green composites: Role of fibers morphology in a PLA/hemp model system, *Composites Science and Technology*, Vol. 180, pp. 51–59, 2019.
- [5] Akil, H.M., Omar, M.F., Mazuki, A.A.M., Safiee, S., Ishak, Z.A.M., Abu Bakar, A., Kenaf fiber reinforced composites: A review, *Materials and Design*, Vol. 32, pp. 4107-4121, 2011.
- [6] Vigneshwaran, S., Sundarakannan, R., John, K. M., Johnson, R. D. J., Prasath, K. A., Ajith, S., Arumugaprabu, V., Uthayakumar, M., Recent advancement in the natural fiber polymer composites: A comprehensive review, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 277, 2020.
- [7] Shekar, H. S. S., Ramachandra, M., Green Composites: A Review, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, pp. 2518-2526, 2018.

- [8] Pappu, A., Saxena, M., Thakur, V. K., Sharma, A., Haque, R., Facile extraction, processing and characterization of biorenewable sisal fibers for multifunctional applications, *Journal of Macromolecular Science, Part A: pure and applied chemistry*, Vol. 53, pp. 424-432, 2016.
- [9] Reddy, K. O., Maheswari, C. U., Muzenda, E., Shukla, M., Rajulu, A. V., Extraction and Characterization of Cellulose from Pretreated Ficus (Peepal Tree) Leaf Fibers, *Journal of Natural Fibers*, Vol. 13, pp. 54-64, 2016.
- [10] Maepa, C. E., Jayaramudu, J., Okonkwo, J. O., Ray, S. S., Sadiku, E. R., Ramontja, J., Extraction and Characterization of Natural Cellulose Fibers from Maize Tassel, *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, Vol. 20, pp. 99-109, 2015.
- [11] Sood, M., Dwivedi, G., Effect of fiber treatment on flexural properties of natural fiber reinforced composites: A review, *Egyptian Journal of Petroleum*, 2017.
- [12] Edeerozey, A. M. M., Akil, H., Azhar, A.B., Ariffin, M. I. Z., Chemical modification of kenaf fibers, *Materials Letters*, Vol. 61, pp. 2023–2025, 2007.
- [13] Naili, H., Jelidi, A., Limam, O., Ramzi, K., Extraction process optimization of Juncus plant fibers for its use in a green composite, *Industrial Crops & Products*, Vol. 107, pp. 172-183, 2017.
- [14] Naik, N., Shivamurthy, B., Thimappa, B. H. S., Govil, A., Gupta, P., Patra, R., Enhancing the mechanical properties of jute fiber reinforced green composites varying cashew nutshell liquid composition and using mercerizing process, *Materials Today: Proceedings*, 2019.
- [15] Pires, E. N., Merlini, C., Al-Qureshi, H. A., Salmória, G. V., Barra, G. M. O., Efeito do Tratamento Alcalino de Fibras de Juta no Comportamento Mecânico de Compósitos de Matriz Epóxi, *Polímeros*, Vol. 22, pp. 339-344, 2012.

- [16] La Mantia, F. P., Morreale, M., Green composites: A brief review, *Composites: Part A*, Vol. 42, pp. 579–588, 2011.
- [17] Senthilkumar, K., Saba, N., Rajini, N., Chandrasekar, M., Jawaid, M., Siengchin, S., Alotman, O, Y, Mechanical properties evaluation of sisal fibre reinforced polymer composites: A review, *Construction and Building Materials*, Vol. 174, pp. 713-729, 2018.
- [18] Ridzuan, M. J. M., Majid, M. S. A., Khasri, A., Gan, E. H. D., Razlan, Z. M., Syahrullail, S., Effect of pineapple leaf (PALF), napier, and hempfibres as filler on the scratch resistance of epoxycomposites, *Journal of Materials Research and Technology*, 2019.
- [19] Mann, G. S., Singh, L. P., Kumar, P., Singh, S., Green composites: A review of processing technologies and recent applications, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, pp. 1-27, 2018.
- [20] Vasconcelos, H. C., Eleutérico, T., Pinto, A. S., Meirelles, M. G., Pereira, M. J., Amorim, R., Plantas invasoras, *Revista da ciência elementar*, 2019.
- [21] Eleutérico, T., Pinto, A. S., Pereira, M. J., Vasconcelos, H. C., Preliminary Structural and Thermal Characterization of Conteira's (*Hedychium gardnerianum*) Fibers for Further Functionalization with Silica Colloidal Nanoparticles, *Procedia Engineering*, Vol. 200, pp. 162-169, 2017.
- [22] César Almeida Andrade, Rui, Avaliação de métodos de controlo mecânicos e químicos da espécie invasora *Hedychium gardnerianum* Sheppard ex Ker Gawl. na ilha de São Miguel - Açores, Dissertação de Mestrado em Gestão e Conservação da Natureza, Universidade dos Açores, 2014.

- [23] Medeiros, J. R., Campos, L. B., Mendonça, S. C., Davin, L. B., Lewis, N. G., Composition and antimicrobial activity of the essential oils from invasive species of the Azores, *Hedychium gardnerianum* and *Pittosporum undulatum*, *Phytochemistry*, Vol. 64, pp. 561-565, 2003.
- [24] Vasconcelos, H. C., Eleutério, T., Antes quebrar que ceder? Que comportamento mecânico têm as fibras de conteira?, *UA ciência*, pp. 28-29, 2019.
- [25] 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).
- [26] MR Dinis dos Santos, LDA, available at: <https://www.dinissantos.com>. Acedido em dezembro de 2020.
- [27] ESQUIM S.A., CHEMICAL SPECIALTIES, “SILICONE ELASTOMERS”, available at: <https://www.esquim.com/wp-content/uploads/2016/10/Catálogo-Moldeados-EN.pdf> . Acedido em dezembro de 2020.
- [28] Fibrenamics Azores, available at: <http://green.fibrenamics.com/newsletter/fibrenamics-azores>. Acedido em dezembro de 2020.
- [29] Rebelco, available at: <http://www.rebelco.pt/files/SR%201500-%20PORT%20.pdf>. Acedido em dezembro de 2020.
- [30] Amiri, A., Triplett, Z., Moreira, A., Brezinka, N., Alcock, M., Ulven, C. A., Standard density measurement method development for flax fiber, *Industrial Crops and Products*, Vol. 96, pp. 196-202, 2017.

- [31] Gomes, A., Matsuo, T., Goda, K., Ohgi, J, Development and effect of alkali treatment on tensile properties of curaua fiber green composites, *Composites: Part A*, Vol. 38, pp. 1811–1820, 2007.
- [32] Zhang, M. Q., Rong, M. Z., Lu, X., Fully biodegradable natural fiber composites from renewable resources: All-plant fiber composites, *Composites Science and Technology*, Vol. 65, pp. 2514–2525, 2005.
- [33] Singh, J. I. P., Singh, S., Dhawan, V., Effect of alkali treatment on mechanical properties of jute fiber-reinforced partially biodegradable green composites using epoxy resin matrix, *Polymers and Polymer Composites*, pp. 1-10, 2019.
- [34] Ramachandran, M., Bansal, S., Fegade, V., Raichurkar, P., Analysis of Bamboo Fibre Composite with Polyester and Epoxy Resin, *International Journal on Textile Engineering and Processes*, Vol. 1, pp. 2395-3578, 2015.
- [35] Sarikaya, E., Çallioğlu, H., Demirel, H., Production of epoxy composites reinforced by different natural fibers and their mechanical properties, *Composites Part B*, Vol. 167, pp. 461–466, 2019.
- [36] Rao, D. N., Mukesh, G., Ramesh, A., Anjaneyulu, T., Investigations on the mechanical properties of hybrid goat hair and banana fiber reinforced polymer composites, *Materials Today: Proceedings*, 2020.
- [37] Luz, F. S., Ramos, F. J. H. T. V., Nascimento, L. F. C., Figueiredo, A. B. S., Monteiro, S. N., Critical length and interfacial strength of PALF and coir fiber incorporated in epoxy resin matrix, *Journal of Materials Research and Technology*, 2018.

[38] Jeyapragash, R., Srinivasan, V., Sathiyamurthy, S., Mechanical properties of natural fiber/particulate reinforced epoxy composites - A review of the literature, *Materials Today: Proceedings*, 2019.

[39] Siva, R., Kesavaram, B., Martin, J. J., Mathiselvan, G., Navas, K. B., Sangeetha, M., Mechanical behavior of sisal and banana fiber reinforced hybrid epoxy composites, *Materials Today: Proceedings*, 2020.

Anexo A

Registo dos Ensaio Experimentais

Tabela A.1 - Dureza média *Vickers* dos compósitos de resina epóxi com fibras de conteira.

	Dureza [HV]				
	P 0	P 2.5	P 5	P 7.5	P 10
D 0	20,78 ± 0,40	-	-	-	-
D 0.5	-	21,95 ± 0,12	24,18 ± 1,57	24,39 ± 1,25	24,56 ± 2,65
D 12	-	22,20 ± 0,60	23,32 ± 0,70	24,95 ± 0,39	21,53 ± 1,07

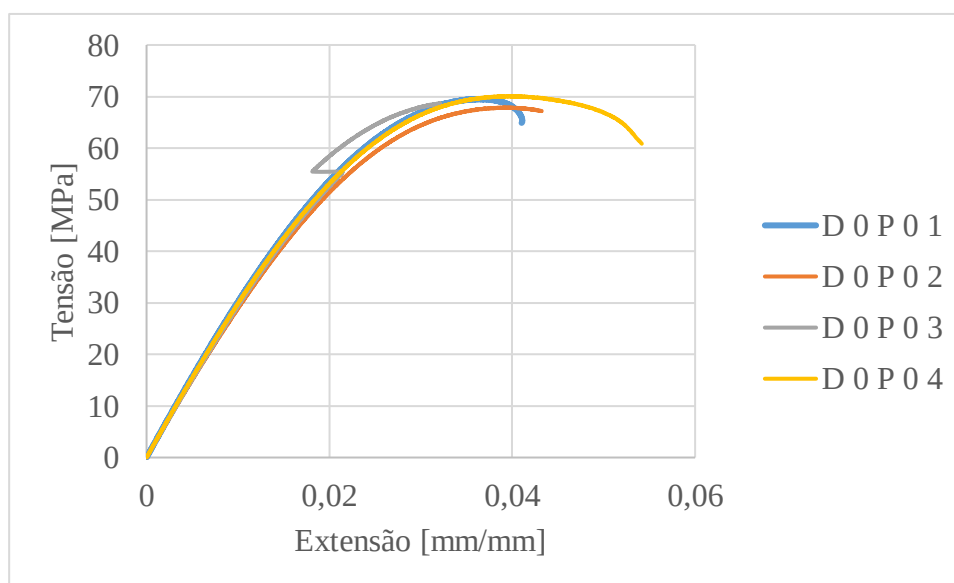


Figura A.1 – Ensaio experimentais dos provetes D 0 P 0.

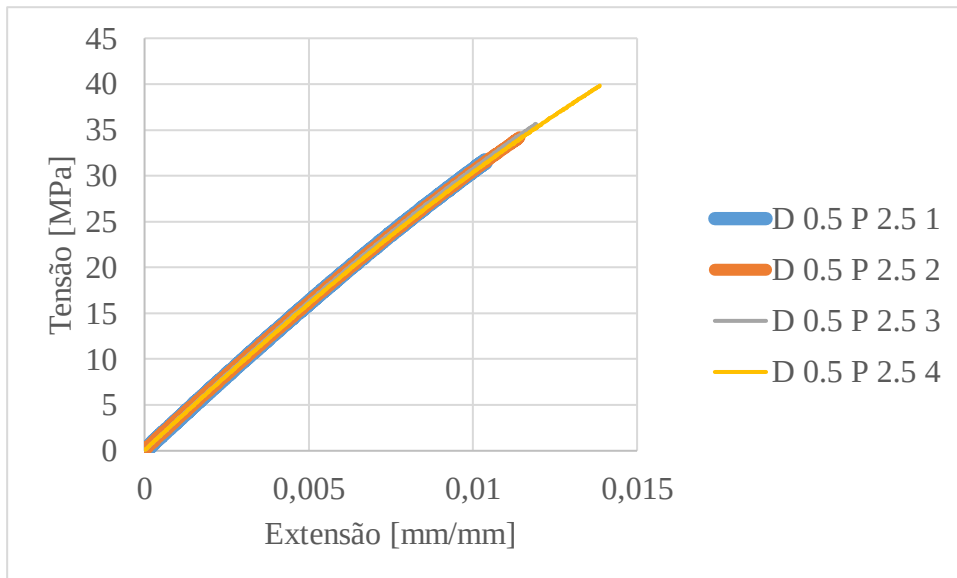


Figura A.2 – Ensaio experimentais dos provetes D 0.5 P 2.5.

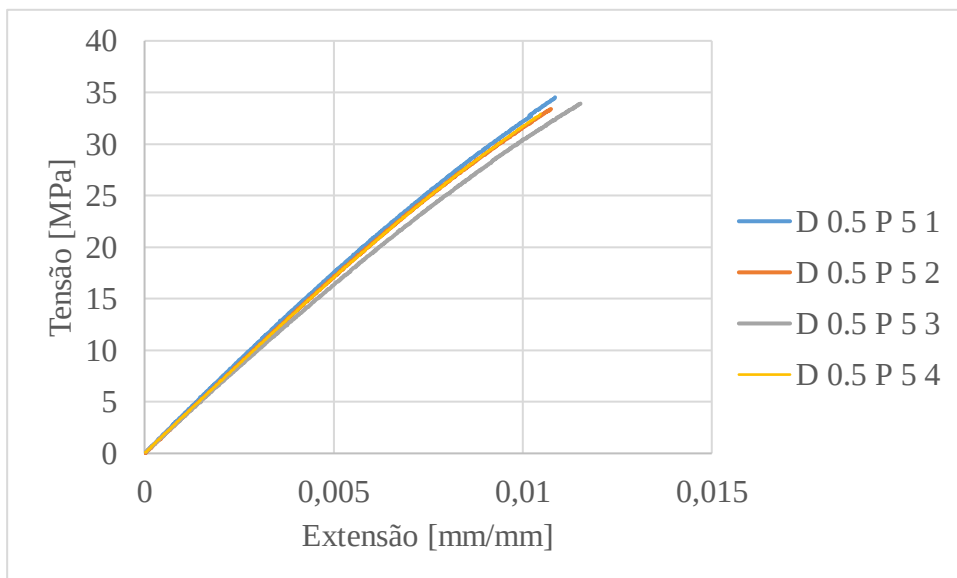


Figura A.3 – Ensaio experimentais dos provetes D 0.5 P 5.

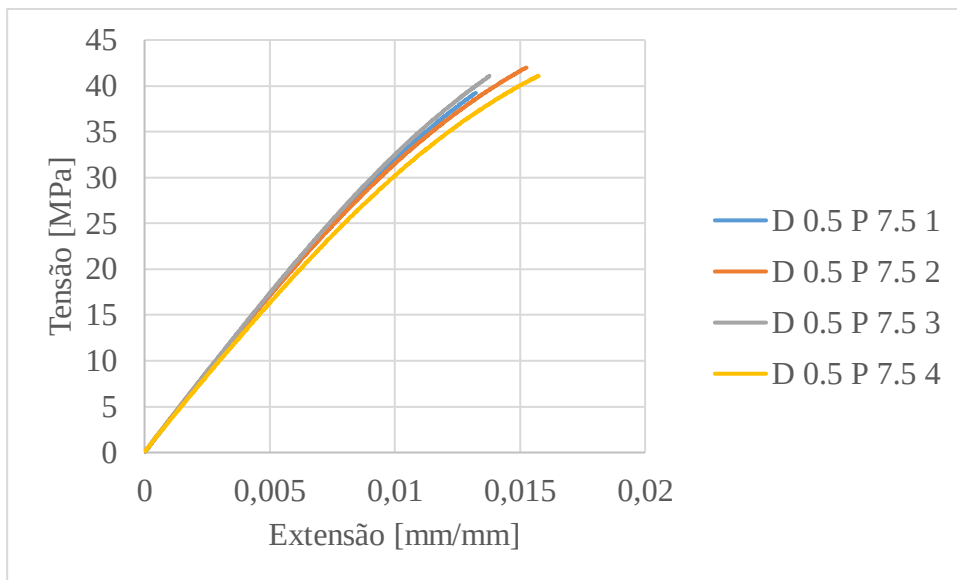


Figura A.4 – Ensaio experimentais dos provetes D 0.5 P 7.5.

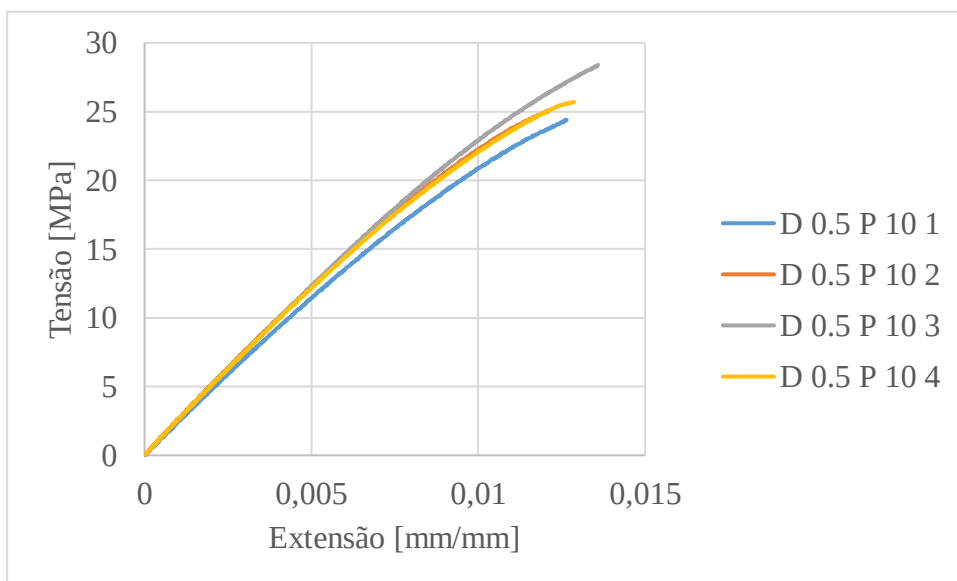


Figura A.5 – Ensaio experimentais dos provetes D 0.5 P 10.

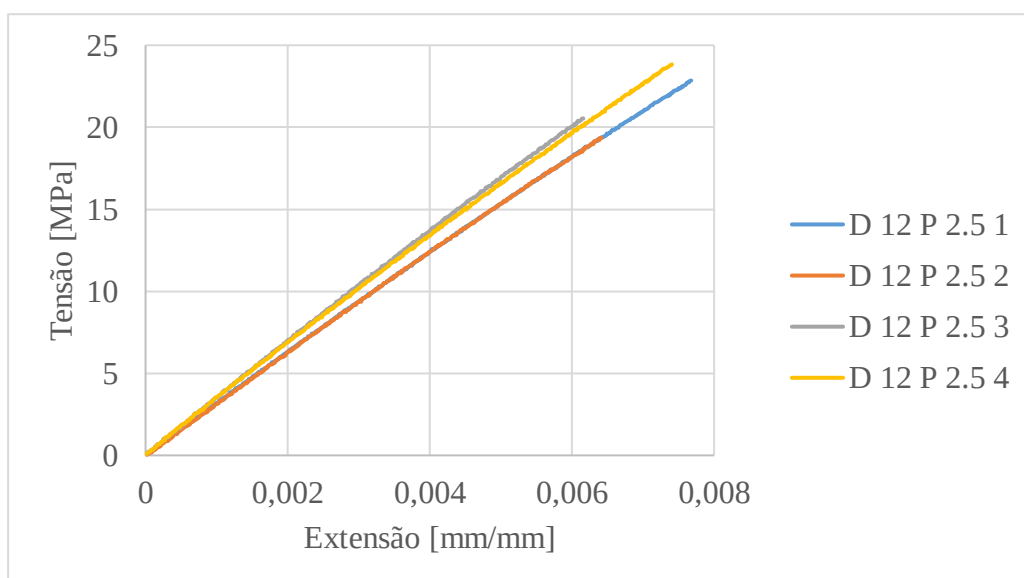


Figura A.6 – Ensaios experimentais dos provetes D 12 P 2.5.

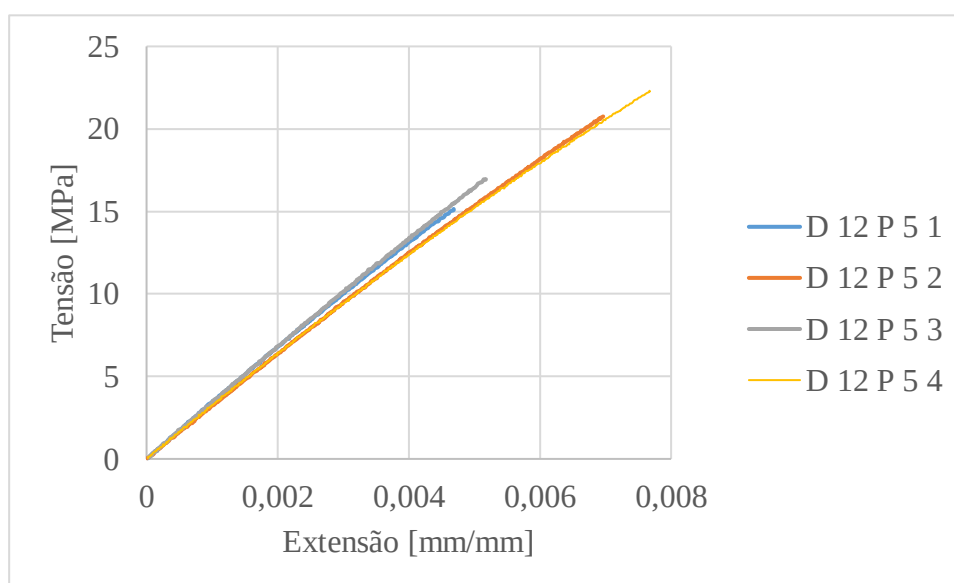


Figura A.7 – Ensaios experimentais dos provetes D 12 P 5.

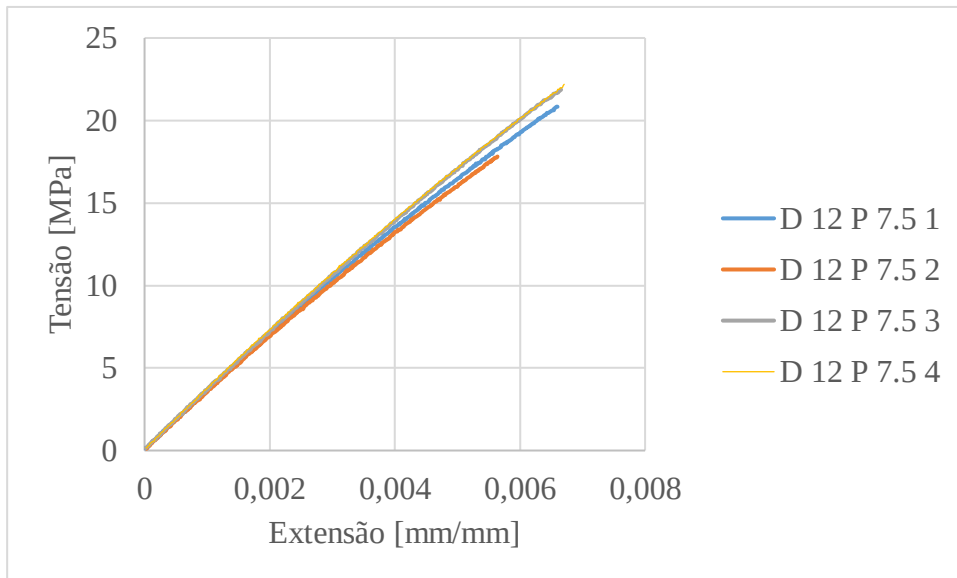


Figura A.8 – Ensaios experimentais dos provetes D 12 P 7.5.

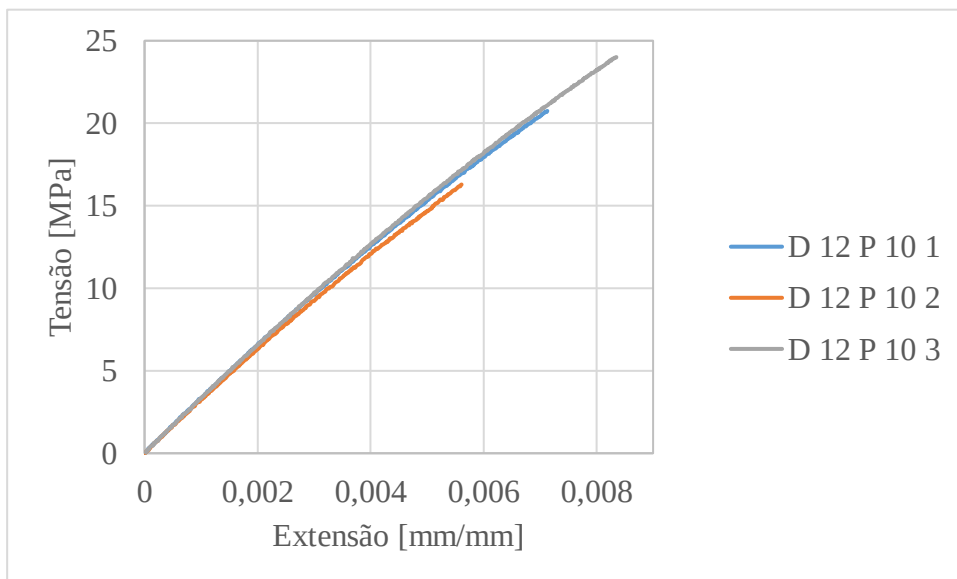


Figura A.9 – Ensaios experimentais dos provetes D 12 P 10.

Tabela A.2 – Módulo de *Young* dos compósitos de resina epóxi com fibras de conteira.

	E [GPa]				
	P 0	P 2.5	P 5	P 7.5	P 10
D 0	3,09 ± 0,07	-	-	-	-
D 0.5	-	3,33 ± 0,03	3,52 ± 0,11	3,50 ± 0,09	2,53 ± 0,09
D 12	-	3,35 ± 0,19	3,37 ± 0,15	3,64 ± 0,07	3,34 ± 0,01

Tabela A.3 – Extensão à fratura dos compósitos de resina epóxi com fibras de conteira.

	ϵ_f [mm/mm]				
	P 0	P 2.5	P 5	P 7.5	P 10
D 0	0,043 ± 0,009	-	-	-	-
D 0.5	-	0,012 ± 0,002	0,011 ± 0,0004	0,015 ± 0,001	0,013 ± 0,001
D 12	-	0,007 ± 0,001	0,006 ± 0,001	0,006 ± 0,001	0,007 ± 0,001

Tabela A.4 – Tensão de rotura dos compósitos de resina epóxi com fibras de conteira.

	σ_R [MPa]				
	P 0	P 2.5	P 5	P 7.5	P 10
D 0	69,07 ± 0,97	-	-	-	-
D 0.5	-	35,33 ± 3,45	33,69 ± 0,69	40,85 ± 1,16	25,89 ± 1,75
D 12	-	21,65 ± 2,06	18,79 ± 3,31	20,68 ± 1,99	20,35 ± 3,88

Tabela A.5 – Tenacidade à fratura específica dos compósitos de resina epóxi com fibras de conteira.

	w_f [MJ/m ³]				
	P 0	P 2.5	P 5	P 7.5	P 10
D 0	2,27 ± 0,48	-	-	-	-
D 0.5	-	0,22 ± 0,05	0,19 ± 0,01	0,33 ± 0,04	0,19 ± 0,02
D 12	-	0,07 ± 0,02	0,05 ± 0,04	0,07 ± 0,01	0,08 ± 0,03