



**Politécnico
de Viseu**

Escola Superior
de Tecnologia
e Gestão de Viseu

Produção e Caracterização de Compósitos de Matriz Polimérica Reforçados com Fibras Naturais

Adalgisa Conceição Andrade de Carvalho

Dissertação

Mestrado em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

Trabalho efetuado sob a orientação de:
Professora Doutora Cristina Maria Nogueira Romão
Professor Doutor Serafim Paulo Melo de
Oliveira

Setembro de 2022



**Politécnico
de Viseu**

Escola Superior
de Tecnologia
e Gestão de Viseu

Produção e Caracterização de Compósitos de Matriz Polimérica Reforçados com Fibras Naturais

Adalgisa Conceição Andrade de Carvalho

Dissertação

Mestrado em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

Trabalho efetuado sob a orientação de:

Professora Doutora Cristina Maria Nogueira Romão

Professor Doutor Serafim Paulo Melo de Oliveira

Setembro de 2022

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos os que me auxiliaram na realização deste trabalho.

Primeiramente agradeço aos meus orientadores, à Professora Doutora Cristina Romão e ao Professor Doutor Serafim de Oliveira, por toda a dedicação, paciência, companheirismo, compreensão e apoio, em todos os aspetos, para que este trabalho se pudesse concretizar. Agradeço pela disponibilidade, amizade e simpatia, que constituíram um estímulo constante e uma vontade de sempre caminhar em frente e nunca desfalecer.

Agradeço ao Engenheiro Nelson Rodrigues pelo fabrico dos moldes utilizados neste trabalho, pela pronta disponibilidade e apoio, sempre que foi necessário, e pela paciência.

Agradeço à Engenheira Tânia Ferreira pela disponibilidade e apoio prestado no laboratório da termodinâmica e pela simpatia e amizade.

À minha família que sempre me apoiou, estando sempre presente, um muito obrigado a todos eles pelo incentivo e encorajamento para nunca desistir dos meus objetivos.

Por fim, o mais importante, agradeço a Deus pelo dom da paciência e discernimento, pela saúde e força, por estar comigo em todos os momentos, minha luz.

Resumo

Com a crescente preocupação ambiental, a indústria dos materiais compósitos tem vindo a substituir as tradicionais fibras de vidro por fibras naturais de origem vegetal, pois estas podem ser encontradas com abundância na natureza, são biodegradáveis, amigas do ambiente, não são tóxicas e são de baixo custo. Apresentam ainda boas propriedades mecânicas, boas propriedades de isolamento térmico e acústico e baixo peso. Apesar das vantagens supramencionadas, as fibras vegetais também apresentam algumas limitações, como por exemplo: baixa resistência à temperatura e fraca adesão com as matrizes poliméricas sintéticas, principalmente com as termoplásticas, por serem hidrofílicas. A adesão entre as duas fases tem vindo a ser melhorada submetendo as fibras vegetais a tratamentos físicos e/ou químicos.

No presente trabalho produziram-se e caracterizaram-se compósitos laminados de matriz de epóxico reforçada com fibras da casca de eucalipto. A casca de eucalipto é considerada como um subproduto de baixo valor económico, ou seja, um resíduo. Este facto e o de não serem encontrados trabalhos de investigação com fibras extraídas da casca de eucalipto, nomeadamente como reforço de compósitos, constituíram a principal motivação para a seleção deste material para o desenvolvimento deste trabalho. Utilizou-se a casca de eucalipto da espécie *E. globulus*, que é a espécie predominante em Portugal. A resina utilizada é a *Surf Clear EVO*, uma resina considerada de última geração, desenvolvida com recurso a novas formulações mais ecológicas, ou seja, um material mais amigo do ambiente, pois contém na sua composição 40 % de “Carbono Verde”, proveniente de biomassa. De acordo com a sua ficha técnica é compatível com fibras naturais.

Foram produzidas e utilizadas fibras de pequenas dimensões, 40 mm, distribuídas de forma aleatória numa “espécie de manta”. Os compósitos laminados foram produzidos por moldação manual seguido de compressão em molde fechado. Foram também fabricadas placas reforçadas com fibras de sisal, de linho e de vidro, de forma a ter um resultado comparativo.

As fibras da casca de eucalipto foram primeiramente extraídas, utilizando o método de maceração, ou seja, as cascas de eucalipto foram deixadas na água à uma temperatura ambiente durante uma semana, em seguida, foram higienizadas com água de forma a eliminar impurezas superficiais.

Com as cascas higienizadas, as mesmas foram “batidas” com um martelo, para facilitar

o processo da extração das fibras, em seguida as fibras extraídas foram secas de forma natural. Um lote de fibras foi submetido ao tratamento de mercerização numa solução aquosa de hidróxido de sódio com concentração de 30%. As fibras da casca de eucalipto maceradas foram caracterizadas fisicamente, tendo-se determinado as suas dimensões e a densidade, concluindo-se que possuem uma densidade inferior à da maioria das fibras vegetais.

Todos os compósitos produzidos foram estudados microscopicamente e sujeitos a ensaios de tração, constatando que, de entre todos, os compósitos reforçados com fibras da casca de eucalipto, macerada e mercerizada, são os que apresentam menor resistência à tração, 30 e 27 MPa respetivamente, sendo inferior à resistência à tração da matriz sem reforço. Por outro lado, o valor do módulo de elasticidade dos compósitos reforçados com essas fibras é superior ao valor encontrado para a resina individualmente. Em termos de aderência não se observou arrancamento das fibras extraídas da casca de eucalipto.

Os compósitos reforçados com fibra de vidro são os que apresentam uma resistência à tração mais elevada, 94 MPa, apesar de não apresentarem um valor de módulo de elasticidade superior aos compósitos reforçados com fibras naturais (linho e sisal). O compósito reforçado com fibra de sisal apresenta um módulo de elasticidade dentro do indicado na bibliografia, 5,7 GPa.

Palavras Chaves: Materiais compósitos, fibras naturais, matriz polimérica, fibras da casca de eucalipto.

Abstract

With the growing concern for the environment, the composite materials industry has been replacing traditional glass fibers with natural fibers of vegetable origin, as these can be found in abundance in nature, are biodegradable, environmentally friendly, are non-toxic and are of low cost. They also have good mechanical properties, good thermal and acoustic insulation properties, and low weight. Despite the advantages, vegetable fibers also have some limitations, such as: low temperature resistance and poor adhesion with synthetic polymeric matrices, especially thermoplastic ones, as they are hydrophilic. The adhesion between the two phases has been improved by subjecting the plant fibers to physical and/or chemical treatments.

In the present work, laminated composites of epoxide matrix reinforced with eucalyptus bark fibers were produced and characterized. Eucalyptus bark is considered a by-product of low economic value, that is, a residue. This fact and the fact that no research works were found with fibers extracted from eucalyptus bark, namely as reinforcement for composites, constituted the main motivation for selecting this material for the development of this work. The eucalyptus bark of the *E. globulus* species, which is the predominant species in Portugal, was used. The resin used is Surf Clear EVO, a resin considered to be of the latest generation, developed using new, more ecological formulations, that is, a more environmentally friendly material, as it contains 40% of “Green Carbon” in its composition, from biomass. According to its technical sheet, it is compatible with natural fibers.

Fibers with short dimensions, 40 mm, were produced and used randomly distributed in a “kind of blanket”. Laminated composites were produced by manual molding followed by compression in a closed mold. Plates reinforced with sisal, flax and glass fibers were also manufactured, to have a comparative result.

The eucalyptus bark fibers were first extracted using the maceration method, that is, the eucalyptus barks were left in water at room temperature for a week, then washed with water to eliminate surface impurities.

With the peels sanitized, they were “crushed” with a hammer, to facilitate the fiber extraction process, then the extracted fibers were dried in a natural way. A batch of fibers was submitted to the mercerization treatment in an aqueous solution of sodium hydroxide with a concentration of 30%. The macerated eucalyptus bark fibers were physically characterized, having determined their dimensions and density, concluding that they have a lower density than

most plant fibers.

All composites produced were studied microscopically and subjected to tensile tests, noting that, among all, the composites reinforced with macerated and mercerized eucalyptus bark fibers are those with the lowest tensile strength, 30 and 27 MPa respectively, being lower than the tensile strength of the matrix without reinforcement. On the other hand, the value of the modulus of elasticity of composites reinforced with these fibers is higher than the value found for the resin individually. In terms of adhesion, no pulling of fibers extracted from eucalyptus bark was observed.

Composites reinforced with glass fiber are those with the highest tensile strength, 94 MPa, despite not having a higher modulus of elasticity than composites reinforced with natural fibers (flax and sisal). The composite reinforced with sisal fiber presents an elastic modulus within that indicated in the bibliography, 5.7 GPa.

Keywords: Composite materials, natural fibers, polymeric matrix, eucalyptus bark fibers.

Índice Geral

1. Introdução.....	1
1.1. Objetivos	2
1.1.1. Objetivos específicos	2
1.2. Estrutura da dissertação	3
2. Estado da Arte.....	4
2.1. Introdução	4
2.2. Materiais Compósitos	5
2.2.1. A fase matriz.....	6
2.2.1.1. Matriz Polimérica.....	6
2.2.1.2. Matriz termoplástica	7
2.2.1.3. Matriz termoendurecível.....	8
2.2.2. A fase reforço ou dispersa	8
2.2.3. Interface entre a matriz e o reforço	10
2.3. Fibras Naturais	11
2.3.1. Fibras vegetais	12
2.3.1.1. Fibra de sisal	15
2.3.1.2. Fibra de linho	16
2.4. Fibras sintéticas.....	17
2.4.1. Fibra de vidro.....	17
2.5. Fibra da casca de eucalipto	18
2.5.1. Tipos de casca de eucalipto	19
2.6. Tratamento de fibras	21
2.6.1. Tratamentos químicos.....	22
2.6.1.1. Tratamento alcalino (NaOH) – Mercerização.....	22
2.7. Aplicação de materiais compósitos reforçados com fibras naturais	22
3. Procedimento Experimental	25
3.1. Casca de eucalipto	25
3.2. Extração de fibras da casca de eucalipto.....	25
3.2.1. Maceração em água	26
3.2.2. Mercerização.....	27
3.3. Caracterização física das fibras.....	28
3.3.1. Caracterização dimensional das fibras.....	29
3.3.2. Densidade.....	31
3.4. Produção de materiais compósitos.....	31
3.4.1. Materiais e Métodos.....	31
3.4.1.1. Matriz.....	32
3.4.1.2. Fibras.....	32
3.4.1.3. Molde	36

3.4.1.3.1. Molde para a produção de compósitos	36
3.4.1.3.2. Molde para a produção de placas de resina pura	37
3.4.1.3.3. Preparação do molde.....	38
3.4.1.4. Procedimento de fabrico de material compósito.....	39
3.4.1.4.1. Processo da obtenção das mantas de fibra.....	39
3.4.1.4.2. Preparação da matriz termoendurecível epóxico	39
3.4.1.4.3. Produção das placas em material compósito e em resina pura	40
3.4.1.5. Corte e preparação dos provetes	41
3.4.1.6. Ensaio de tração	42
3. Resultados e Discussão.....	44
4.1. Caracterização de fibras extraídas da casca de eucalipto.....	44
4.1.1. Cor da fibra	44
4.1.2. Densidade.....	45
4.1.3. Morfologia das fibras.....	45
4.2. Caracterização da resina (<i>SR Surf Clear EVO</i>).....	45
4.3. Caracterização mecânica dos compósitos.....	46
4.4. Observação da zona de fratura dos provetes.....	49
5. Conclusões e Trabalhos Futuros	52
Referência Bibliográfica.....	55
Apêndice.....	62
Anexos.....	64

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Propriedades e requisitos de uma matriz polimérica	7
Tabela 2 – Constituintes químicos de fibras naturais vegetais	13
Tabela 3 – Propriedades mecânicas de algumas fibras naturais vegetais	14
Tabela-4- Propriedades mecânicas de algumas fibras de vidro do tipo E, S e R	18
Tabela 5 – Comparação das propriedades das fibras de sisal, linho e de vidro do tipo E.	18
Tabela 6 – Massa por unidade de comprimento	30
Tabela 7 – Propriedades da resina de epóxido, do catalisador e da mistura resina/catalisador e da resina após cura [ficha técnica da resina, Anexo A].....	32
Tabela 8 – Proporções das misturas utilizadas para a produção de compósitos.....	33
Tabela 9 – Tensão máxima de rotura e módulo de elasticidade dos compósitos e da resina .	47

Índice de Figuras

Figura 1 – Fase de um material compósito.....	5
Figura 2 – Classificação dos compósitos.....	6
Figura 3 – Classificação de material compósito segundo o reforço.	9
Figura 4 – Interfaces e interfases em um material compósito: a) ligação entre as fases primárias e secundárias; b) adição de um terceiro elemento para ligar as fases primária e secundária a fim de formar uma interfase; c) formação de uma interfase por solução das fases primária e secundária	11
Figura 5 – Origem das fibras naturais.....	11
Figura 6 – Classificação das fibras de origem vegetal.	12
Figura 7 – a) Planta de sisal; b) fibra de sisal	15
Figura 8 – a) Planta do linho; b) Fibra de linho.....	16
Figura 9 – Casca lisa do eucalipto	20
Figura 10– Casca esfoliante.....	20
Figura 11 – Casca lisa vermelha.....	20
Figura 12 – Casca Rugosa	21
Figura 13 – Casca com forma de escamas.....	21
Figura 14 – a) Componentes interiores de Mercedes Benz classe A, b) Componentes interiores de Mercedes Benz classe E.....	23
Figura 15 – a) Casa feito com fibra de cânhamo, b) Telha de fibra de coco.....	23
Figura 16 – Quadro de bicicleta em material compósito híbrido (fibras de carbono/fibras de linho) e capacete em material compósito reforçado com fibras de linho	24
Figura 17– Casca de eucalipto.....	25
Figura 18 – Casca de eucalipto macerada.....	26
Figura 19 – Feixes de fibras secas	27
Figura 20 – Tratamento alcalino de hidróxido de sódio	27
Figura 21 – Medição de pH	28
Figura 22 – Fibras mercerizadas secas.	28
Figura 23 – a) Espessura da fibra; b) largura da fibra	29
Figura 24 – a) Microscópio da <i>Carl Zeiss</i> , Axiotech 100HD, b) Medição do comprimento de fibras	29
Figura 25 – Balança analítica	30
Figura 26– Fibras cortadas a 40 mm – a) Fibras de linho; b) Fibras de sisal; c) Fibras da casca de eucalipto.....	34
Figura 27 – Molde para a produção dos compósitos	37
Figura 28 – Placa superior otimizado	37
Figura 29 – Molde para a produção da placa de resina pura	38
Figura 30 – Desmoldante.....	39

Figura 31 – a) Manta de fibra de linho, b) Manta de fibra de sisal, c) Manta de fibra de vidro, d) Manta de fibra da casca de eucalipto macerada, e) Manta de fibra da casca de eucalipto mercerizada.....	39
Figura 32 – Prensa Hidráulica e molde submetido à compressão	40
Figura 33 – a) Placa de compósito reforçado com fibra de sisal, b) Placa de compósito reforçado com fibra de linho, c) Placa de compósito reforçado com de fibra de vidro, d) Placa de compósito reforçado com fibras de eucalipto macerada, e) Placa de compósito reforçado com fibras de eucalipto mercerizada com Hidróxido de sódio a 30%, f) Placa de resina epóxido.....	41
Figura 34 – a) Corte do provete, b) Esquadrejadora.....	41
Figura 35 –Placas de alumínio coladas nas extremidades dos provetes.....	42
Figura 36 – Ensaio de tração -Montagem do extensómetro no provete	43
Figura 37 – Cor da fibra, a) Fibra macerada, b) Fibra macerada após secagem, c) Fibra mercerizada após secagem.....	44
Figura 38 – Análise microscópica- a) Feixe de fibras macerada; b) Feixe de fibras mercerizadas.....	45
Figura 39 – Propriedades mecânicas da resina utilizada como matriz na produção dos compósitos. Fonte: Sicomin Epoxy Systems.....	46
Figura 40 – Metodologia de recolha de dados das propriedades mecânicas. a) curva total de um ensaio de tração, para determinação da tensão máxima suportada, ponto máximo da curva e b) curva parcial do ensaio de tração para determinação do módulo de elasticidade.	47
Figura 41 – Tensão máxima suportada pelos compósitos e resina.....	48
Figura 42– Módulo de elasticidade dos compósitos e da resina.....	49
Figura 43 – Microscópio GSZ	50
Figura 44 – Zona de fratura dos provetes reforçados com fibra de linho (a), fibra de sisal (b) e fibra de vidro (c)	50
Figura 45 – Zona de fratura dos provetes reforçados com fibra macerada (a) e fibra mercerizada(b).....	51

Índice de Gráficos

Gráfico1 – Perda de humidade da fibra de sisal.	35
Gráfico2 – Perda de humidade da fibra de linho.	35
Gráfico 3 – Perda de humidade da fibra da casca de eucalipto macerada.....	36
Gráfico 4 – Perda de humidade da fibra da casca de eucalipto mercerizada.....	36

Lista de Abreviaturas

SiO₂	Dióxido de silício
NaOH	Hidróxido de sódio
ρ	Densidade (g/cm ³)
m	Massa (g)
V	Volume (cm ³)
V_m	Volume médio (cm ³)
C	Comprimento (mm)
L_m	Largura média (mm)
e_m	Espessura média (mm)
σ	Tensão (MPa)
L_0	Comprimento útil
F	Força (N)
A	Área da secção transversal (mm ²)
E	Módulo de elasticidade (GPa)
V_{int}	Volume interior do molde
m_f	Massa da fibra;
ρ_f	Densidade da fibra
m_r	Massa da resina
ρ_r	Densidade da resina

1. Introdução

Desde o início da civilização que as fibras naturais de origem vegetal desempenham um papel muito importante na sociedade, desde o fabrico de cordas, tapetes, artesanatos, mantas, barbantes, confecção de tecidos e, mais recentemente, em setores industriais de alta tecnologia. Com isso as fibras vegetais têm vindo a ganhar novos parâmetros de estudo, possibilitando a sua utilização como reforço de compósitos de matriz polimérica devido à combinação do bom desempenho e versatilidade com a vantagem de processamento simples e de baixo custo [1].

O uso de fibras vegetais como reforço de materiais compósitos tem estado em constante crescimento, uma vez que apresentam múltiplas vantagens, tais como: material renovável e de fácil acesso, menos abrasivas do que as fibras sintéticas e são materiais biodegradáveis. Diversos setores industriais, como a indústria automobilista, naval e aeronáutica, têm vindo a procurar alternativas que visem diminuir os impactos ambientais consequentes dos processos produtivos industriais [2].

Os compósitos reforçados com fibras podem ser constituídos por vários tipos de reforços e matrizes poliméricas, o que leva à produção de uma vasta gama de produtos com vantagens na indústria de construção, indústria aeronáutica e indústria automóvel, como por exemplo: peso reduzido, elevada resistência e rigidez específica, elevada resistência à corrosão e facilidade de aplicação em obra [3].

Os materiais compósitos possuem características mecânicas, físicas e químicas próprias, que resultam da combinação de propriedades e da interação entre o reforço, que é responsável por grande parte da resistência e rigidez do material, e a matriz, que garante a transferência de carga entre as fibras [3].

As fibras de sisal são produzidas a partir das folhas da planta *Agavesisalana*, originária do México e, atualmente, cultivada em várias regiões do mundo [19]. O linho está entre as espécies de plantas mais antigas cultivadas no mundo, sendo a *Linum usitatissimum L* a espécie mais comum [23]. Ambas as fibras têm vindo a ser estudadas nos últimos anos, devido às suas propriedades mecânicas próximas das fibras de vidro, em especial as fibras de linho que se encontram entre as mais fortes das fibras lignocelulósicas. Contudo, existem vários fatores que prejudicam o uso dessas fibras nos compósitos, tais como a falta de dados relativamente às propriedades mecânicas com diferentes proporções entre as fases dos compósitos e a incompatibilidade química entre a fibra e a matriz [10].

1.1. Objetivos

O presente trabalho tem como principal objetivo o estudo, desenvolvimento e caracterização mecânica de compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras naturais de origem vegetal. Para a produção dos referidos compósitos foram selecionadas fibras provenientes da casca de eucalipto e uma matriz de epóxido de base ecológica, designada de *Surf Clear EVO*. As fibras de casca de eucalipto não existem no mercado pelo que, tanto quanto se sabe, ainda não foram estudadas.

1.1.1. Objetivos específicos

- Extração das fibras da casca de eucalipto, através do processo de maceração;
- Estudo das propriedades físicas das fibras (caracterização dimensional e cálculo da densidade);
- Modificação superficial das fibras de eucalipto com tratamento químico de mercerização (imersão em solução aquosa de hidróxido de sódio);
- Produção de compósitos laminados reforçados com fibras de eucalipto maceradas e mercerizadas. Foram produzidos compósitos reforçados com fibras de vidro, de sisal e de linho para comparação de propriedades. As fibras foram aplicadas na forma de uma “espécie” de manta de filamentos curtos e aleatórios produzidos no decorrer do trabalho;
- Estudo da interface matriz/fibra;
- Estudo das propriedades mecânicas à tração dos compósitos produzidos;
- Comparação e análise dos resultados obtidos.

1.2. Estrutura da dissertação

Esta dissertação está organizada em 5 capítulos, que englobam os capítulos da introdução até ao das conclusões e trabalhos futuros.

No capítulo 1 inclui-se uma breve introdução sobre os materiais compósitos, bem como sobre as fibras naturais vegetais, e definem-se os objetivos do presente trabalho.

No capítulo 2 encontra-se o enquadramento teórico. Realizou-se a pesquisa e análise de estudos já efetuados acerca dos materiais compósitos, das fibras naturais, das matrizes poliméricas, dando a conhecer as suas características e as suas aplicações. Fez-se uma pesquisa sobre o tipo de cascas e eucalipto existentes, sobre o eucalipto em Portugal.

O capítulo 3 refere-se aos procedimentos, materiais e técnicas utilizados durante todo o procedimento experimental. São abordados a extração de fibras da casca de eucalipto e o tratamento químico realizado às fibras. A caracterização física das fibras da casca de eucalipto, a produção dos compósitos e o procedimento usado para fabricar os provetes para os ensaios de tração são tópicos que também se abordam neste capítulo.

Capítulo 4, neste capítulo tratam-se e analisam-se os resultados obtidos, comparam-se as características mecânicas dos compósitos reforçados com fibra de eucalipto, sem tratamento e com tratamento de mercerização, com os compósitos reforçados com fibras de sisal, linho e de vidro.

Capítulo 5, neste capítulo apresentam-se as principais conclusões tiradas após a realização do trabalho e algumas considerações finais da dissertação, bem como algumas sugestões para futuros trabalhos.

2. Estado da Arte

2.1. Introdução

Os compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras naturais de origem vegetal têm vindo a ser desenvolvidos nas últimas duas décadas, devido à grande quantidade e variedade deste tipo de fibra encontrado na natureza. [4]

As fibras naturais têm suscitado grande interesse na última década como um possível substituto das fibras sintéticas, como por exemplo a fibra de vidro, que entre essas é uma das mais utilizadas. Apesar de as fibras naturais ainda estarem longe de apresentarem características mecânicas semelhantes às das fibras artificiais, os tratamentos recentemente desenvolvidos para as fibras têm melhorado estas propriedades consideravelmente. [5]

Apesar de todo o esforço que tem sido levado a cabo para a utilização de fibras naturais, estas possuem algumas limitações inerentes à sua natureza. Um dos fatores que tem maior influência nas propriedades mecânicas dos compósitos é a adesão entre os dois componentes. A interface fibra/matriz atua diretamente sobre as propriedades mecânicas e químicas do compósito criado. Uma boa interface entre os dois constituintes permite uma elevada transferência de carga da matriz para a fibra, melhorando a resistência mecânica. Contudo, em compósitos reforçados com fibras vegetais, as propriedades mecânicas podem ser prejudicadas devido à natureza hidrofílica destas fibras e à natureza hidrofóbica da matriz polimérica, podendo promover uma fraca interface entre os dois componentes [6].

Este estudo de investigação apresenta as seguintes vantagens [5]:

- Recurso renovável, a produção requer pouca energia;
- Reciclagem térmica é possível, as fibras de vidro provocam problemas em fornos de combustão;
- Redução do peso específico, o que resulta numa maior resistência e rigidez específica relativamente às fibras de vidro;
- Preço da matéria-prima é baixo;
- Boas propriedades isolantes, térmicas e acústicas;
- Boas propriedades mecânicas.

Como desvantagens, podem enumerar-se as seguintes [5]:

- Características mecânicas inferiores, particularmente na resistência ao impacto;
- Qualidade variável, nomeadamente devido à idade da planta e à influência das condições atmosféricas;
- Higroscopia;
- Temperatura de processamento limitada;
- Baixa durabilidade, apesar de já existirem tratamentos de fibra que a melhorem significativamente;
- Fraca resistência ao fogo;
- Biodegradabilidade, pode ser uma desvantagem na medida em que reduz as características mecânicas do compósito ao longo do tempo.

2.2. Materiais Compósitos

Os materiais compósitos podem ser definidos como misturas (ao nível macroscópico) não solúveis de dois ou mais constituintes com distintas composições e estruturas que estabelecem entre si uma interface reconhecida e cujas propriedades se combinam e não podem ser obtidas simplesmente pela soma dos diferentes materiais individualmente, em que um dos materiais garante a ligação – matriz – e o outro a resistência – reforço. [7]

Os materiais compósitos são classificados pelo tipo de matriz, que é a fase contínua, e esta envolve uma outra fase, designada por reforço ou fase dispersa. [8]

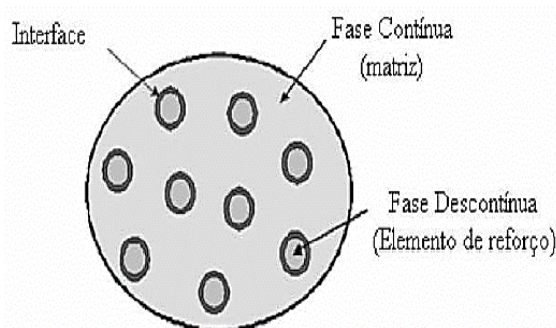


Figura 1 – Fase de um material compósito [9]

2.2.1. A fase matriz

A fase matriz pode ser metálica, polimérica ou cerâmica, e confere estrutura ao material compósito preenchendo os espaços vazios entre a fase de reforço e mantendo-a na sua posição.

A matriz de um material compósito desempenha as seguintes funções [10]:

- Manter as fibras na orientação e localização desejada no caso de compósitos fibrosos;
- Proteger o reforço de um ambiente adverso, e danos causado por temperatura, humidade, produtos químicos e degradação por adesão;
- Melhorar as propriedades transversais dos compósitos;
- Transferir as forças de corte interlaminar;
- Melhorar a resistência ao impacto e à fratura do compósito.

Os compósitos podem ser classificados em relação ao tipo de material da sua fase matriz, de acordo com as seguintes classes apresentadas na **Figura 2**:

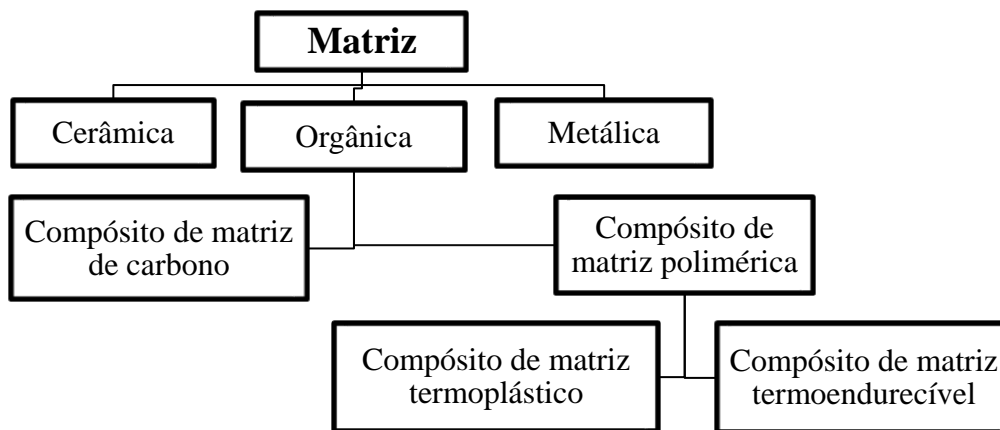


Figura 2 – Classificação dos compósitos [9]

2.2.1.1. Matriz Polimérica

As matrizes poliméricas são constituídas por moléculas de grandes dimensões (macromoléculas), estas, na sua cadeia principal, são constituídas por unidades repetitivas designadas por monómeros, unidos por ligações primárias (fortes), porém, as ligações entre as moléculas podem ser fortes ou fracas, consoante se trate de uma matriz termoendurecível ou termoplástica respetivamente. Estas matrizes dividem-se em duas categorias principais que

são os termoplásticos e os termoendurecíveis [9]. Na **Tabela 1** são apresentados as propriedades e os requisitos a considerar na escolha da matriz polimérica.

Tabela 1 – Propriedades e requisitos de uma matriz polimérica. [7]

Propriedades	Requisitos
Mecânicas	Resistência à tração elevada
	Ductilidade
	Resistência ao corte
	Tenacidade
	Resistência ao impacto
Químicas	Boa adesão às fibras
	Resistência à degradação em ambientes quimicamente agressivos
	Baixa absorção de humidade
Térmicas	Resistência a temperaturas extremas
	Coefficiente de dilatação térmica próxima do da fibra
	Baixa condutividade térmica
Outras propriedades	Baixo Custo
	Solidificação ou cura rápidas

2.2.1.2. Matriz termoplástica

A matriz termoplástica normalmente é apresentada na forma de grânulos à temperatura ambiente e é passível de ser processada pelo binómio calor/pressão. São aplicadas em processos de fabrico como: injeção, extrusão e termoformação. Uma vez que durante o processo de aquecimento dos materiais termoplásticos ocorre a destruição das ligações secundárias entre as macromoléculas, torna-se possível a reconformação destes. Estes materiais salientam-se por apresentarem maior resistência ao impacto (maior tenacidade) e menor higroscopicidade quando comparados com os polímeros termoendurecíveis.

O crescimento da utilização dos compósitos de matriz polimérica termoplástica é condicionado pela maior dificuldade em impregnar completamente os reforços [9].

Na realização deste trabalho a utilização de matrizes termoplástica podia ainda

conduzir à degradação térmica das fibras durante o processamento, pois os termoplásticos requerem temperatura no processo de fabrico e as fibras vegetais têm uma resistência à temperatura relativamente baixa (200 – 300°C).

2.2.1.3. Matriz termoendurecível

As matrizes termoendurecíveis apresentam-se no estado líquido à temperatura ambiente, tendo em conta uma viscosidade de baixo valor antes do processo de cura, possibilitando assim uma fácil impregnação das fibras que constituem o reforço. Quando adicionado um agente endurecedor à resina, promove-se uma reação de formação de novas ligações primárias (processo de cura) e o conjunto assume a geometria pretendida final [11]. Estes materiais apresentam, habitualmente, uma boa estabilidade térmica e dimensional, quando comparados com as resinas do tipo termoplástico. Apresentam também rigidez, resistência elétrica e química melhoradas. São usadas em maior número de aplicações quando se pretende uma melhoria do desempenho mecânico.

A principal vantagem sobre os termoplásticos é a facilidade de impregnação do reforço, uma vez que a viscosidade, antes da cura, é muito mais baixa do que a dos termoplásticos. Uma característica fundamental destas resinas é a temperatura limite de funcionamento, especialmente as temperaturas ditas de transição e a temperatura de deflexão sob carga. As resinas termoendurecíveis mais utilizadas no fabrico de compósitos para aplicações não estruturais e semiestruturais são os poliésteres insaturados, as resinas de viniléster e as resinas fenólicas. Em compostos avançados de alta resistência, os epóxidos, as bismaleimidas e as poliamidas são as mais comuns. [9].

2.2.2. A fase reforço ou dispersa

Os reforços podem ter várias formas, como por exemplo: partículas, flocos, fibras curtas, fibras contínuas ou folhas [10]. No geral, o reforço proporciona resistência e rigidez ao compósito, mas também aumenta a resistência ao calor, à corrosão e condutividade. O reforço pode ser desenvolvido para facultar todas ou apenas uma destas características, dependendo dos requisitos exigidos pelo novo material. Para o reforço representar uma vantagem para o compósito este deve ser mais forte e rígido que a matriz. Deste modo, a boa interação entre matriz e reforço pode ser garantida pela criação de uma interface entre ambos que possa

adequar a resistência e rigidez do reforço com a ductilidade da matriz [8].

Nos compósitos reforçados com fibras, geralmente a distribuição uniforme das fibras resulta em melhores combinações de propriedades, os resultados mecânicos dependem de variáveis como o comportamento de tensão-deformação entre as fases fibra e matriz, frações volumétricas e direção na qual se aplica a carga.

Uma vez que as orientações das fibras interferem nas propriedades dos compósitos, é possível classificar os compósitos em função do arranjo das fibras, da seguinte forma: fibras contínuas alinhadas, fibras descontínuas alinhadas e fibras descontínuas aleatórias.

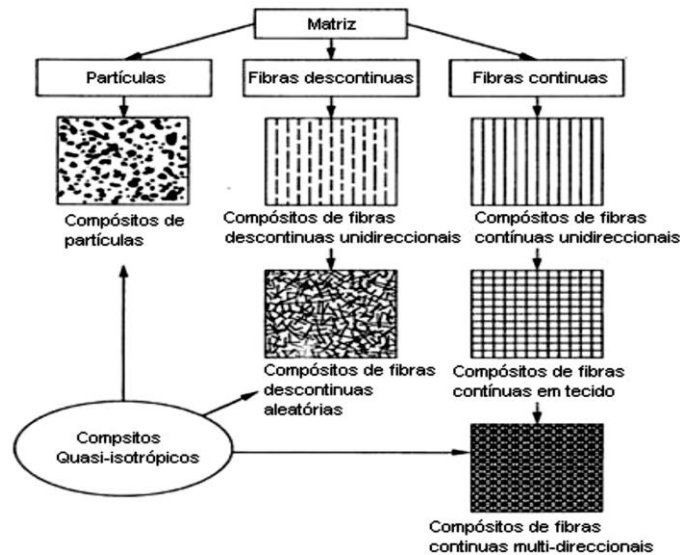


Figura 3 – Classificação de material compósito segundo o reforço [12].

Como se pode verificar na **Figura 3**, as fibras longas são alinhadas, enquanto as fibras curtas são alinhadas ou orientadas aleatoriamente. A resistência mecânica depende também das dimensões das fibras.

Compósitos reforçados com fibras contínuas apresentam um melhor desempenho mecânico, pois as propriedades destes compósitos são anisotrópicas, ou seja, apresentam alta rigidez e resistência à tração na direção das fibras, mas, por outro lado, apresentam um baixo rendimento mecânico sob tração na direção transversal, nesta direção a sua resistência é controlada pelas propriedades da matriz.

Compósitos reforçados com fibras descontínuas alinhadas, conseguem atingir um módulo de elasticidade e resistência à tração de 90% e 50% respetivamente, quando

comparadas com compósitos reforçados com fibras contínuas. Os compósitos reforçados com fibras descontínuas aleatórias têm uma eficiência de transferência de carga de aproximadamente um quinto em relação aos compósitos reforçados com fibras contínuas, contudo, apresentam a vantagem de terem propriedades mecânicas isotrópicas, ou seja, apresentam as mesmas propriedades em todas as direções [13, 14].

Nos compósitos reforçados com fibras, quanto menor o diâmetro e maior o comprimento da fibra, maior é a superfície de contato entre as duas fases. O reforço proporcionado depende também do quão eficiente é a transferência de carregamento da matriz para as fibras.

2.2.3. Interface entre a matriz e o reforço

A interface entre a matriz e o reforço (**Figura 4.a**) influencia diretamente as propriedades finais do material compósito, uma vez que apesar dos materiais primários serem geralmente insolúveis entre si, é necessário que haja ligação química entre a matriz e o reforço para que se mantenha a coesão e a distribuição das cargas entre as fases do compósito. Quando há a predominância dessa afinidade química na interface ocorre a formação de uma fase intermediária ou interfase que une a primeira e a segunda fase do compósito, como pode ser observado na **Figura 4.b**. Essa fase intermediária é consolidada pelas forças intermoleculares e energia livre de superfície, podendo ser encontrada por todo o material (**Figura 4.b**). A qualidade dessa interfase depende de alguns fatores como a humidade, a reação química, as tensões residuais, a morfologia da superfície e a rugosidade dos materiais [10].

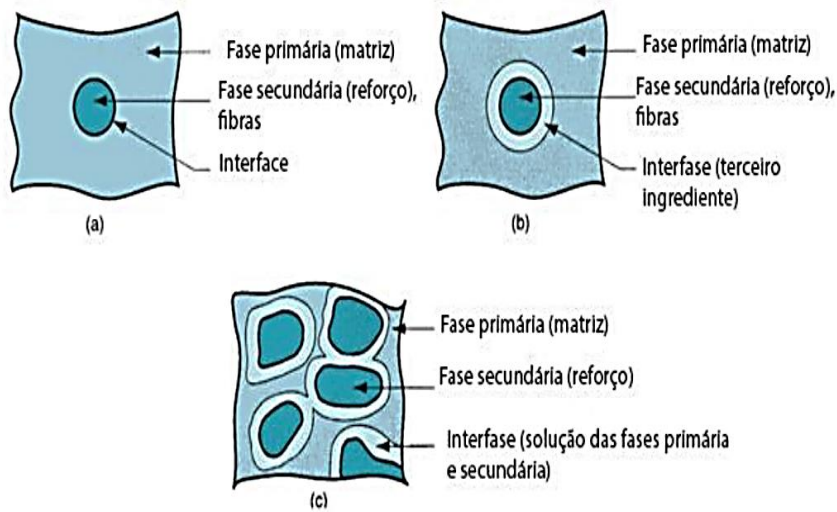


Figura 4 – Interfaces e interfases em um material compósito: a) ligação entre as fases primárias e secundárias; b) adição de um terceiro elemento para ligar as fases primária e secundária a fim de formar uma interfase; c) formação de uma interfase por solução das fases primária e secundária [10].

2.3. Fibras Naturais

As fibras naturais são biodegradáveis, leves, resistentes e de baixo custo, tendo vindo cada vez mais a substituir, com sucesso, as fibras de vidro e minerais em inúmeras aplicações de engenharia, desde as indústrias aeroespacial e automóvel até a embalagem de produtos e à construção civil [15].

Elas podem ser divididas em três grupos de acordo com a sua origem: animal, vegetal e mineral (**Figura 5**).

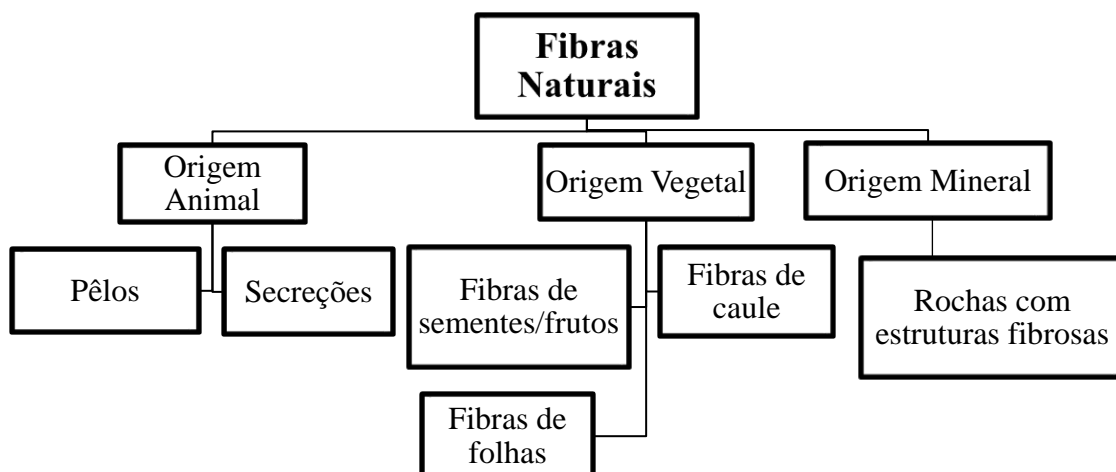


Figura 5 – Origem das fibras naturais [15].

2.3.1. Fibras vegetais

As fibras de origem vegetal têm uma maior utilidade, são constituídas por celulose e podem ser classificadas de acordo com a parte da planta de onde foram extraídas, conforme se pode verificar na **Figura 6**.

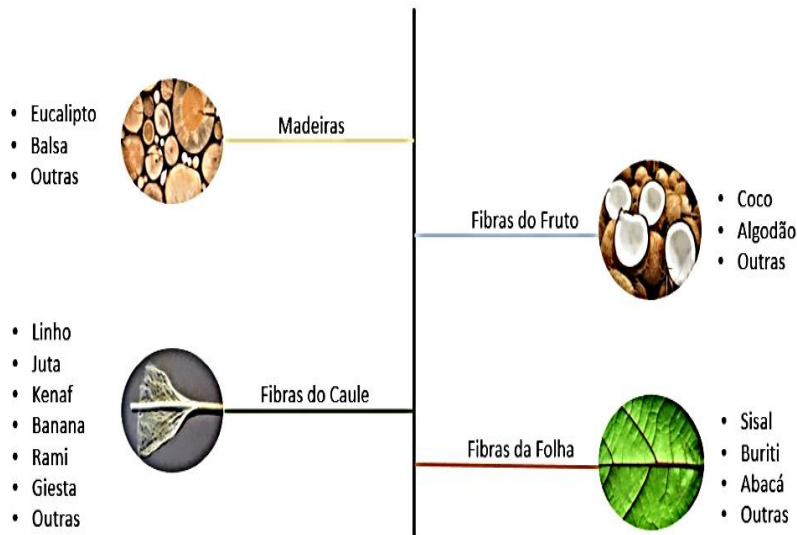


Figura 6 – Classificação das fibras de origem vegetal. [16]

As fibras naturais vegetais são materiais lignocelulósicos, ou seja, são fibras formadas basicamente por celulose, hemicelulose e lignina. Para além destes componentes também são encontrados compostos inorgânicos, hidratos de carbono simples, resinas e gorduras. As fibras são formadas por feixes de células individuais chamadas fibrilas, cada fibrila é composta por microfibrilas de celulose semicristalina envoltas numa matriz de hemicelulose e lignina, em teores variados. A composição química da fibra depende de vários fatores, entre eles as condições climáticas de plantio e a idade da planta.

O principal componente das fibras naturais é a celulose, responsável pela resistência mecânica das fibras, devido ao seu alto grau de polimerização e orientação molecular [13].

Na **Tabela 2** é apresentada a composição química de algumas fibras vegetais. [12]

Tabela 2 – Constituintes químicos de fibras naturais vegetais. [12]

Origem	Fibras	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lenhina (%)	Pectina (%)
Semente	Algodão	82 - 96	2 - 6,4	0 - 5	<1 - 7
Fruto	Coco	43 - 46	0,25	45 - 46	3 - 4
Caule	Juta	51 - 84	12 - 20	5 - 13	0,2
	Linho	60 - 81	14 - 20,6	2,2 - 5	1 - 4
	Cânhamo	70 - 92	18 - 22	3 - 5	1
	Rami	68 - 76	13 - 15	0,6 - 1	2
	Kenaf	44 - 87	22	15 - 19	2
Folha	Sisal	43 - 78	10 - 24	4 - 12	0,8 - 2
	Abacá	61 - 64	21	12	0,8

As fibras vegetais são utilizadas como matéria-prima em diferentes setores de atividade, aplicadas em diversas situações. As principais aplicações estão relacionadas com o uso artesanal, comercial e industrial. Atualmente estes materiais têm vindo a ser utilizados como alternativa às fibras sintéticas em vários segmentos, como por exemplo: aplicações estruturais e não estruturais para construções, automóveis e equipamentos desportivos [16].

As fibras vegetais utilizadas como reforço de materiais compósitos, apresentam algumas vantagens, como:

- Baixa densidade;
- Existem em uma vasta quantidade na natureza e são renováveis;
- São renováveis, biodegradáveis, não são tóxicas e apresentam boas propriedades de isolamento.

Em comparação com os compósitos reforçados com fibra de vidro, as fibras vegetais apresentam também algumas vantagens, tais como [16]:

- A produção de fibras naturais envolve um menor impacto ambiental;

- Os compósitos reforçados com fibras naturais têm maior teor de fibra para um desempenho equivalente, reduzindo assim o teor da base do polímero que é mais poluente;

Assim como vantagens, os compósitos reforçados com fibras vegetais apresentam algumas desvantagens quando comparados com os reforçados com fibra de vidro, como por exemplo [16,17]:

- Fraca compatibilidade entre a fibra e a matriz, apresentando ainda uma elevada absorção de humidade, mas que pode ser melhorada com algum tipo de tratamento superficial;
- Temperatura de processamento, as componentes celulósicas das fibras degradam-se a temperaturas relativamente baixas, de 200 – 300°C, ocorrendo emissões voláteis, com consequente perda de cor e redução das propriedades mecânicas do compósito;
- Preço variável.

Na tabela seguinte são apresentadas algumas propriedades mecânicas de fibras vegetais.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas de algumas fibras naturais vegetais. [18]

Fibras	Densidade (g/cm³)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação (%)
Algodão	1,5 – 1,6	287 - 597	5,5 - 12,6	7,0 - 8,0
Curauá	1,1	636 - 1.000	26 - 36	2 - 4
Coco	1,18 - 1,45	95 - 149	2,80 - 13,7	3,3 - 5,1
Juta	1,3 - 1,5	320 - 773	12,0 - 128	1,3 - 2,8
Linho	1,5	345 - 1035	27,6	2,7 - 3,2
Malva	1,41	160	17,4	5,2
Piçava	1,0 - 1,2	143	5,60	5,9
Rami	1,51	393 - 900	7,30 - 25,0	1,8 - 5,3
Sisal	1,27 - 1,50	126 - 800	3,80 - 62,0	2,8 - 10

2.3.1.1. Fibra de sisal

O sisal é uma planta pertencente ao género *Agave*, da classe das Monocotiledóneas, da família *Agavaceae*, subfamília *Agavoidea* e da espécie *A. Sisalana*. É uma planta que engloba um grupo definido de plantas de consistência herbácea e escapo floral saliente, que pode atingir 12 ou mais metros de altura. A denominação *Agave*, dada ao género da planta, é derivada aos agavos, que em grego significa admirável, magnífico. As folhas de arranjo regular, aliado à posição altaneira do seu escapo floral, confere-lhe uma aparência estética de beleza invulgar [19]. É uma planta considerada indígena na América Central e do Sul, a sua plantação teve início no final do século XVII e no início do século XIX, nos continentes africano e asiático. É uma planta que cresce em diferentes condições climatéricas e ecológicas, desde o calor quente e húmido do Quênia e da Tanzânia, ao clima tropical do Brasil, Costa da Florida, *Hawai*, e das ilhas das Caraíbas, como também na China [20].



Figura 7 – a) Planta de sisal [21]; b) Fibra de sisal

Para o processo de extração da fibra de sisal, estas passam pelas seguintes etapas [22]:

1ª – Lavagem: após a colheita das folhas de sisal, estas passam por um processo de lavagem a fim de excluir as impurezas e a polpa existente;

2ª – Desfibramento: nesta fase separa-se a polpa das fibras, raspando as folhas mecanicamente, utilizando um equipamento denominado de “maquina do agave”, em seguida as fibras são lavadas com um jato de água;

3ª – Secagem: após a segunda fase as fibras passam pelo processo de secagem ao ar durante 24 horas, utilizando um suporte de madeira;

4ª – Limpeza da fibra já seca: com uma bateadeira, retiram-se as impurezas aderentes às fibras. Terminado este processo, as fibras são enfardadas para serem comercializadas.

2.3.1.2. Fibra de linho

O linho é uma planta herbácea que pertence à família das lináceas, *Linum usitatissimum*, é originária do Egito e pode atingir até um metro de altura. É composta por uma substância fibrosa, da qual se extraem as fibras longas para o fabrico de tecidos, e por uma substância lenhosa. As suas fibras são obtidas partir do caule [23].



Figura 8 – a) Planta do linho [24]; b) Fibra de linho

O processo de extração de fibra de linho envolve as seguintes etapas:

1ª – Ripanço: após a colheita os caules de linho passam pelo processo de ripanço, ou seja, faz-se a separação das sementes,

2ª – Maceração: nesta etapa ocorre a separação da parte lenhosa da parte fibrosa. A maceração pode ser efetuada de três formas: maceração por água, por orvalho ou química. Na maceração por água, a fibra de linho, proveniente do caule das plantas, é disposta sob a forma de feixes, sendo estes posteriormente imersos em água durante um período de 8 a 10 dias, para que ocorra fermentação bacteriana e amolecimento do caule, destruindo assim os tecidos da estrutura celular. De seguida os feixes de linho são colocados a secar ao sol. Na maceração por orvalho, os feixes são espalhados no terreno de cultivo e induzidos à fermentação, através da humidade do orvalho, chuva ou até mesmo da irrigação. Na maceração química, os tecidos da estrutura celular são imersos em ácido acético até que os feixes amoleçam, sendo de seguida lavados em água e por fim secos.

3ª – Trituração ou Maçagem: após a secagem, o linho passa pelo processo de trituração da parte lenhosa, que consiste na passagem do caule entre rolos. Após este processo, o linho é aquecido aos molhos em fornos, semelhante ao forno de pão, sendo de seguida espadelado, obtendo-se assim uma separação completa do material lenhoso das fibras de linho, e por fim estas podem ser penteadas de forma a separá-las de acordo com o seu comprimento [23].

2.4. Fibras sintéticas

As fibras sintéticas são derivadas de polímeros não naturais, ou seja, normalmente são materiais produzidos em laboratórios a partir do petróleo ou gás natural. Na sua produção incluem-se materiais como as poliamidas, os acrílicos, os poliuretanos e o polietileno. Estas fibras são produzidas em massa, todos os anos. Existem diversos tipos de fibras sintéticas, mas as mais utilizadas em materiais compósitos são as fibras de vidro, carbono e de aramida [25].

2.4.1. Fibra de vidro

As fibras de vidro são as mais utilizadas como reforço de materiais compósitos. Sendo o vidro um material amorfo e inorgânico, é constituído maioritariamente (50 a 70% em peso) por sílica (SiO_2). Existem três tipos de fibras de vidro mais comuns: fibras de vidro do tipo E, do tipo S e do tipo R [12]. Estas fibras possuem características muito distintas, sendo a fibra tipo E a mais utilizada nos materiais compósitos, uma vez que possui uma boa resistência química, baixo custo, boas propriedades mecânicas e elétricas.

Por outro lado, as fibras do tipo R e do tipo S são mais utilizadas na indústria aeronáutica, por possuírem um custo mais elevado, em relação às do tipo E, e por possuem menor densidade, maior resistência à tração, maior módulo de elasticidade e boa resistência à corrosão [13].

Na **Tabela 4** são apresentadas algumas propriedades das fibras de vidro.

Tabela-4- Propriedades mecânicas de algumas fibras de vidro do tipo E, S e R [12].

Propriedades	Vidro E	Vidro S	Vidro R
Densidade (g/cm ³)	2,6	2,49	2,55
Modulo de Elasticidade (GPa)	73,0	85,5	86,0
Resistência à tração (MPa)	3400	4580	4400
Deformação à rotura (%)	4,4	5,3	5,2
Coefficiente de expansão térmica (10 ⁻⁶ /°C)	5,0	2,9	4,0
Diâmetro das fibras (µm)	3-20	8-13	5-24

O presente trabalho visa caracterizar compósitos reforçados com: fibras vegetais da casca de eucalipto, fibras de sisal, fibras de linho e fibras de vidro do tipo E. Uma das grandes vantagens das fibras vegetais em relação às fibras do vidro é que a sua densidade é significativamente mais baixa, possibilitando o fabrico de materiais compósitos mais leves. Na **Tabela 5** apresenta-se um resumo das propriedades mecânicas e da densidade encontradas na bibliografia consultada. Para fibras da casca de eucalipto não são apresentados resultados pois não foram encontrados.

Tabela 5 – Comparação das propriedades das fibras de sisal, linho e de vidro do tipo E.

Fibras	Densidade (g/cm ³)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação (%)
Linho	1,5	345 - 1035	27,6	2,7 - 3,2
Sisal	1,27 - 1,50	126 - 800	3,80 - 62,0	2,8 - 10
Vidro E	2,6	3400	73,0	4,4

2.5. Fibra da casca de eucalipto

Neste trabalho utilizou-se fibras de casca de eucalipto para a produção de materiais compósitos. Utilizou-se casca de eucalipto da espécie *E. globulus*, uma vez que é uma

espécie predominante em Portugal, sendo sobretudo conhecida pela sua forte propensão na indústria de papel.

A casca é uma cobertura exterior de toda a árvore, desde as raízes até o tronco e ramos. Ela possui tecidos específicos para transportar a seiva orgânica elaborada pelas folhas, para armazenar substâncias energéticas e nutrientes minerais, oferece suporte e resistência à árvore. [26].

A visão económica das cascas de eucalipto tem vindo a mudar com o tempo. Ela foi considerada inicialmente como um resíduo ou como um fator de “aborrecimento” nos processos industriais. Portanto, durante os anos setenta, com a antevisão de possível falta de fibras para o setor de papel, foi assim colocada como uma provável matéria-prima fibrosa, embora de segunda categoria. Porém, com o aumento da crise energética, a casca de eucalipto foi considerada como um combustível barato e oportuno. Além de resolver o problema de acumulação de resíduos industriais, permitiu-se ainda obter energia a partir de um combustível barato [27].

As cascas dos eucaliptos têm utilidades valiosas para a sociedade, servem como combustível, como cobertura morta ao solo, como adubo, para a produção de carvão vegetal, além de favorecer fitoquímicos (óleos essenciais, taninos, compostos fenólicos, etc.) [27]. Apesar de as cascas de eucaliptos possuírem utilidades valiosas, ainda não se conhecem trabalhos realizados com fibras extraídas das cascas de eucaliptos para reforço de materiais compósitos, conseguir transformar um subproduto considerado resíduo em um produto de valor acrescentado.

2.5.1. Tipos de casca de eucalipto

Existem diversos tipos de cascas de eucalipto, mas os mais comuns são:

Cascas lisas e brilhantes - As cascas mortas saem e deixam exposta a casca lisa e de cor clara (exemplo, *E. grandis*, *E. saligna*, *E. viminalis*, *E. globulos*, *E. camaldulensis*, *Corymbia citriodora*, *Crymbia maculata*, etc.). Esta é o tipo de casca utilizada para a extração de fibras para a realização deste trabalho [26].



Figura 9 – Casca lisa do eucalipto [26]

Cascas esfoliantes – são cascas que se soltam em pequenos pedaços, lembrando um pedaço de papel que se vai desprendendo. Ocorrem em espécies de casca lisa, em determinadas épocas do ano (exemplo, *E. grandis*) [26].



Figura 10– Casca esfoliante [26]

Cascas vermelhas ou sangrentas – são variantes das cascas lisas, só que as cascas lisas que se soltam são de cores vermelhas ou acastanhadas (exemplo, *E. urograndis*, *Corymbia citriodora*) [26].



Figura 11 – Casca lisa vermelha [26]

Cascas permanentes enrugadas, rugosas, suberosas e protuberantes – são cascas que apresentam características semelhantes à de uma corda ou de estrias (exemplo, *E.*

paniculata, E. acmenioides, E.obliqua, E. microcorys) [26].



Figura 12– Casca Rugosa [26]

Cascas em formas de escamas – são cascas externas que não se soltam, mas rompem em forma de escamas ou de uma rede (como é o exemplo de *E.terrelaris* e *E. cloeziana*) [26].



Figura 13 – Casca com forma de escamas [26]

2.6. Tratamento de fibras

As fibras naturais apresentam uma certa incompatibilidade com a matriz polimérica não polar e absorvem uma elevada percentagem de água, uma vez que são materiais hidrofílicos. Estes fatores influenciam as propriedades mecânicas dos materiais compósitos. Com o objetivo de melhorar a adesão da fibra à matriz polimérica e reduzir a absorção da água, a superfície da fibra pode ser modificada por tratamentos físicos e químicos [28]. Para a realização deste trabalho selecionou-se o tratamento químico com hidróxido de sódio, sendo este um dos tratamentos mais comumente aplicado às fibras naturais.

2.6.1. Tratamentos químicos

As fibras naturais possuem características polares fortes, o que pode causar um problema de incompatibilidade na ligação com a maioria das matrizes poliméricas. Os processos de tratamento químico de superfície aumentam o custo das fibras naturais, mas podem melhorar a propriedade de adesão da interface entre a fibra e a matriz e diminuem a absorção de água pelas fibras. Portanto, tratamentos químicos são considerados como modificadores das propriedades das fibras [10]. Como exemplos de tratamento químico, tem-se o tratamento alcalino (utilizando frequentemente o hidróxido de sódio (NaOH)), o tratamento com silano, a acetilização, entre outros.

2.6.1.1. Tratamento alcalino (NaOH) – Mercerização

O tratamento alcalino consiste na imersão das fibras numa solução alcalina de hidróxido de sódio por um determinado período, ou seja, ocorre a mercerização. Este tratamento consiste na remoção de cera e óleos que cobrem a superfície externa da fibra e também interagindo com os seus componentes estruturais (celulose, hemicelulose e lignina), desestabilizando as ligações de hidrogénio que unem as cadeias de celulose. Os componentes estruturais amorfos (hemicelulose e lignina) são os mais afetados por este tratamento, por serem facilmente solubilizados, e promovem a separação do feixe em fibras elementares. A remoção de materiais amorfos hidrofílicos, como a hemicelulose, causa uma diminuição do caráter polar da fibra, o que juntamente com o aumento da área e rugosidade superficial, resulta numa melhor compatibilidade e interação com as matrizes poliméricas [15, 40].

2.7. Aplicação de materiais compósitos reforçados com fibras naturais

Com a crescente procura de novos recursos, utilizar materiais renováveis e sustentáveis de baixo custo e abundantes fez com que o interesse pela utilização de fibras naturais em materiais compósitos tenha tido um crescimento acentuado nos últimos anos.

Atualmente existem várias indústrias que usam materiais compósitos reforçados com fibras vegetais nos seus produtos, como por exemplo: indústria automóvel, indústria aeroespacial, indústria naval, construção civil, desporto, mobiliário, entre outras.

Indústria automóvel

Atualmente são incorporados, em diversos modelos de automóveis, vários compósitos com fibras naturais. A título de exemplo, têm sido utilizados em componentes de revestimentos internos, painéis laterais, filtros acústicos, isolamento frontal, caixas de rodas, estofos e isolamento do capô [11].

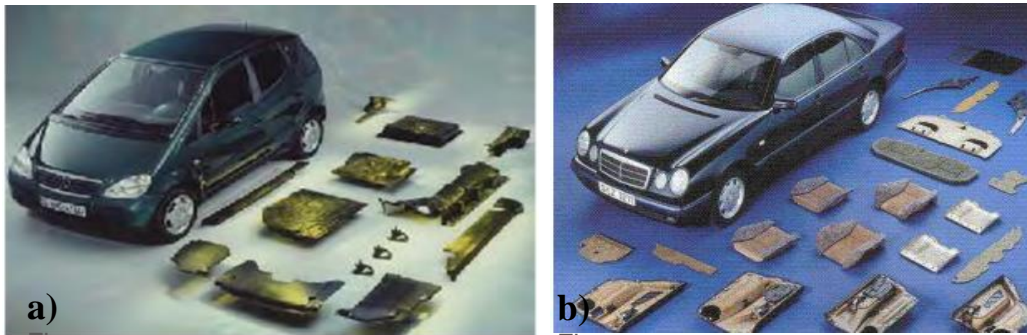


Figura 14 – a) Componentes interiores de Mercedes Benz classe A, b) Componentes interiores de Mercedes Benz classe E. [29]

Indústria de construção civil

A indústria de construção civil é um dos maiores mercados do consumo de fibras naturais, uma vez que uma grande maioria de fibras vegetais é consumida no fabrico de adornos, cercas, grades, perfis para portas e janelas, persianas, telhas, mantas para isolamento térmico e acústico de casas, blocos, argamassas, entre outras aplicações. Na figura 15- a) mostra-se um protótipo de uma casa em cânhamo, desenvolvido pela *University of Bath* (Reino Unido) em parceria com o gabinete de arquitetura *Modcell* (Reino Unido) no âmbito do projeto *BaleHaus@Bath* [30] e na figura 15-b apresenta-se uma telha feita a partir de fibra de coco [31].

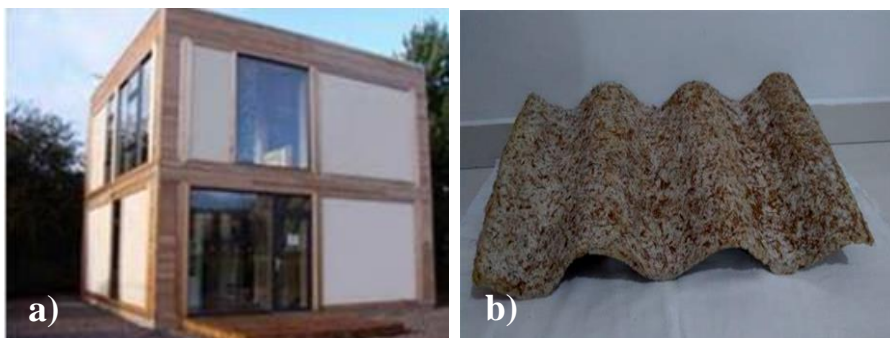


Figura 15 – a) Casa feita com fibra de cânhamo [30], b) Telha de fibra de coco [31].

Indústria de equipamentos de desporto

Alguns exemplos de aplicação de materiais compósitos na indústria de equipamentos de desporto são capacetes de bicicleta reforçados com fibra de linho e quadros de bicicleta reforçados com fibras de linho e de carbono [30].

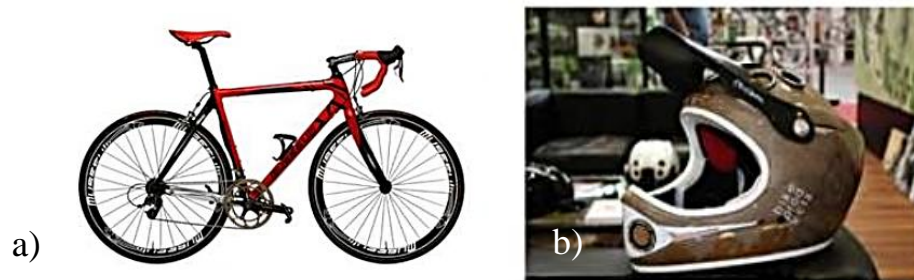


Figura 16 – a) Quadro de bicicleta em material compósito híbrido (fibras de carbono/fibras de linho), b) capacete em material compósito reforçado com fibras de linho [30]

3. Procedimento Experimental

Neste capítulo será efetuada a descrição de todos os materiais, técnicas e procedimentos adotados para o desenvolvimento da parte experimental da dissertação. Inicialmente serão descritas as técnicas utilizadas para a extração de fibras da casca de eucalipto e para a caracterização física das fibras produzidas. Em seguida, serão descritos os meios e procedimentos utilizados para a fabricação de compósitos laminados reforçados com fibras de eucalipto, linho, sisal e de vidro, bem como de uma placa somente de resina epóxico. Para finalizar são apresentados os métodos utilizados para caracterização das propriedades mecânicas dos compósitos produzidos.

3.1. Casca de eucalipto

As fibras estudadas neste trabalho são fibras provenientes da casca de eucalipto da espécie *Eucalypto globulus*, uma espécie predominante em Portugal. As cascas utilizadas são provenientes de árvores com cerca de 4 a 6 anos de idade.



Figura 17– Casca de eucalipto

3.2. Extração de fibras da casca de eucalipto

As cascas inicialmente passaram pelo processo de maceração, para facilitar o desfibramento, posteriormente foram secas naturalmente, e, por fim, um lote foi submetido ao tratamento químico de mercerização, numa solução aquosa de hidróxido de sódio com concentração de 30%. Optou-se por uma solução alcalina de 30% uma vez que, segundo Celso Foelkel [26], a casca de eucalipto suporta concentrações elevadas, entre 27 e 33%.

3.2.1. Maceração em água

A maceração é uma etapa importante para a extração de fibras de qualidade. O processo de maceração é, muitas vezes, um processo longo, dependendo do tipo de fibras, podendo demorar dias, ou até meses, até terminar o processo por completo. Para a realização deste trabalho utilizou-se inicialmente a maceração em água à temperatura ambiente, com as cascas de eucalipto imergidas em água durante 72h. Contudo, este processo veio demonstrar que 72h não eram suficientes para iniciar o processo do desfibramento, pois as cascas continuavam ainda duras. Por isso, passou-se a deixar as cascas de eucalipto imersas na água durante uma semana [32], com a necessidade de mudança de água a cada 24 horas. Durante este período foi-se avaliando a evolução do estado das cascas, tendo-se concluído que seria uma duração satisfatória para o processo de desfibramento.



Figura 18– Casca de eucalipto macerada

Concluída a maceração passou-se para a fase de extração de fibras. Para este processo, com a ajuda de um martelo, as cascas foram previamente “batidas” para facilitar o desfibramento. Posteriormente, para obtenção de um melhor resultado, o desfibramento foi efetuado com as próprias mãos. Terminado o processo, as fibras extraídas foram secas de forma natural durante 72h.



Figura 19– Feixes de fibras secas

Uma vez secas, metade de feixe de fibras passou por um processo de tratamento em solução aquosa alcalina de hidróxido de sódio (concentração de 30%) à temperatura ambiente.

3.2.2. Mercerização

A mercerização consiste em sujeitar as fibras à ação de uma solução de uma base forte, neste caso o hidróxido de sódio (NaOH), a uma temperatura adequada. É um método muito utilizado, que tem como objetivo melhorar a superfície das fibras, promovendo um aumento da superfície rugosa e melhorando assim a adesão entre a fibra e a matriz, através da quebra de ligações de hidrogénio que unem as cadeias moleculares.

Para a realização deste trabalho, foram seguidos os seguintes passos para o processo de mercerização [35, 36 adaptado]:

- Pesaram-se cerca de 90g de fibras;
- Mediu-se 1 litro de solução alcalina de hidróxido de sódio (concentração de 30%);
- Em seguida as fibras foram imersas na solução de hidróxido de sódio durante 72h (**Figura 20**);



Figura 20– Tratamento alcalino de hidróxido de sódio

- Após as 72h as fibras foram lavadas com água corrente e, de seguida, utilizou-se água destilada para terminar o processo de lavagem até atingir um pH neutro (**Figura 21**).



Figura 21 – Medição de pH

- Posteriormente as fibras passaram pelo processo de secagem de forma natural durante 72h (**Figura 22**)



Figura 22– Fibras mercerizadas secas.

3.3. Caracterização física das fibras

As fibras da casca de eucalipto foram caracterizadas fisicamente, tendo-se determinado as suas dimensões e a densidade. O cálculo da densidade requereu a determinação da massa de cada fibra bem como do seu volume médio.

3.3.1. Caracterização dimensional das fibras

A caracterização dimensional, consistiu em medir o comprimento, a largura e a espessura das fibras. Para isso foram selecionadas 100 fibras, com diferentes comprimentos. Para conhecer a largura e a espessura de cada fibra foram selecionadas 20 fibras. Foram efetuadas 3 medições para a largura e espessura de cada fibra, ao longo do comprimento das fibras, conforme se pode verificar na **Figura 23**, abaixo apresentada.

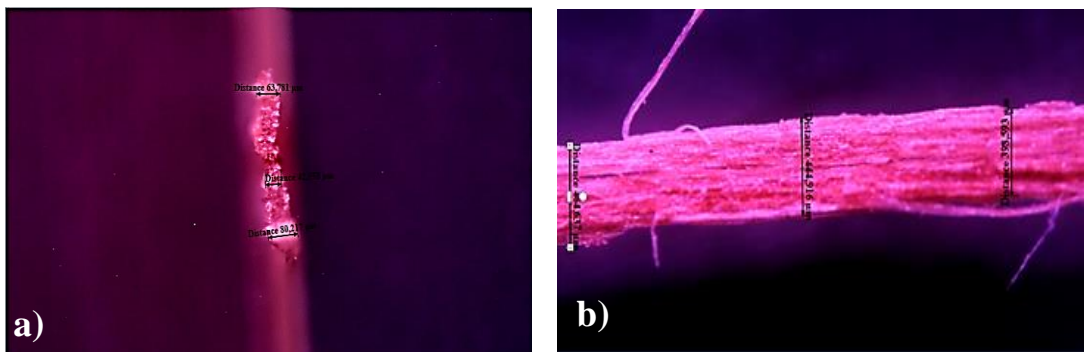


Figura 23 – a) Espessura de um feixe de fibras; b) Largura de um feixe de fibras

As medições de espessura e de largura foram realizadas em um microscópio ótico, da marca *Carl Zeiss*, modelo *Axiotech 100 HD*, utilizando a objetiva de 10X. A medição do comprimento foi realizada manualmente utilizando uma régua (**Figura 24**).



Figura 24 – a) Microscópio da *Carl Zeiss*, Axiotech 100HD, b) Medição do comprimento das fibras

Após a análise microscópica, verificou-se que as fibras produzidas não são fibras elementares, mas sim pequenos feixes com secção transversal retangular, pelo que foi possível o cálculo do seu volume médio a partir da **expressão 1**:

$$V_m = C \times L_m \times e_m, \text{ onde:} \quad (1)$$

V_m = Volume médio

C = Comprimento

L_m = Largura média

e_m = Espessura média.

Para a determinação do volume médio fez-se um cálculo por aproximação. Das 100 fibras, foi realizada a medição de largura e de espessura, conforme descrito anteriormente, de apenas 20 fibras. Determinou-se a espessura média e a largura média de cada fibra, para assim, conseguir calcular o volume médio de cada fibra. Conhecendo o comprimento total das 100 fibras selecionadas inicialmente, estas foram pesadas numa balança analítica com uma precisão de 0,001g (**Figura 25**) e procedeu-se à determinação do parâmetro massa por unidade de comprimento (**Tabela 6**).

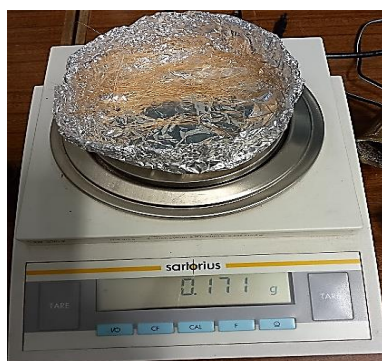


Figura 25 – Balança analítica

Tabela 6 – Massa por unidade de comprimento

Massa total de 100 fibras	0,171
Comprimento total de 100 fibras (mm)	10571
Massa por unidade do comprimento (g/mm)	1,62E-05

Os valores obtidos na **tabela 6** foram necessários para o cálculo da densidade das fibras/feixes de fibras extraídos da casca de eucalipto, tratado no subcapítulo a seguir **3.3.2.**

3.3.2. Densidade

A densidade é uma propriedade física que associa a massa de um material ao volume que ele ocupa, ela pode ser utilizada para caracterizar diferentes materiais, tais como, líquidos, sólidos ou gases. A densidade é determinada através da **expressão 2**:

$$\rho = \frac{m}{V}, \text{ onde:} \quad (2)$$

ρ = densidade (g/cm³)

m = massa (g)

V = volume (cm³).

Calculada a massa de cada fibra (produto do seu comprimento pela massa por unidade de comprimento) e o seu volume médio procedeu-se de seguida à determinação da respetiva densidade. A densidade das fibras da casca de eucalipto foi calculada considerando a média das densidades calculadas para cada uma das 20 fibras medidas, tendo-se concluído tem uma densidade de 1,085g/cm³, inferior à das fibras de sisal, de linho e de vidro. Segundo referências bibliográficas consultadas [18,12], a fibra de sisal tem uma densidade de 1,27 g/cm³, a fibra de linho 1,5 g/cm³ e a fibra de vidro tipo E 2,6 g/cm³.

3.4. Produção de materiais compósitos

3.4.1. Materiais e Métodos

Nesta fase abordam-se todos os tipos de materiais e métodos utilizados na produção dos materiais compósitos. Produziram-se compósitos laminados reforçados com fibras curtas de casca de eucalipto, maceradas e mercerizadas. Para comparação de propriedades foram também produzidos compósitos reforçados com fibras de sisal e de linho, bem como de vidro. A matriz selecionada é uma resina de epóxido de última geração, parcialmente ecológica. Os compósitos foram produzidos em molde fechado, após impregnação manual das fibras que se apresentavam na forma de uma “espécie” de manta de fibras curtas orientadas aleatoriamente. Adicionalmente, foram produzidas placas de resina pura para confirmação das suas propriedades mecânicas.

3.4.1.1. Matriz

Foi selecionada a resina *Surf Clear EVO*, uma resina de epóxico bicomponente com boa compatibilidade com as fibras naturais vegetais e boas propriedades mecânicas, produzida pela SICOMIN. É uma resina que apresenta na sua composição estruturas químicas renováveis, produzidas pela natureza e pela biomassa. A resina *Surf Clear EVO* é produzida com um teor de “carbono verde” de aproximadamente 40%. O catalisador utilizado para esta resina é também produzido pela mesma empresa e tem referência *SD EVO Médium*. É importante o cuidado na escolha deste componente, pois a sua ação afeta a resistência química, as propriedades físicas, as propriedades mecânicas e a resistência térmica do material. Na **Tabela 7** são apresentadas algumas propriedades da resina, do catalisador e da resina curada (24h à temperatura ambiente +16h à temperatura de 60°C) [ficha técnica da resina, Anexo A].

Tabela 7 – Propriedades da resina de epóxico, do catalisador e da mistura resina/catalisador e da resina após cura [ficha técnica da resina, Anexo A]

Propriedades	Resina epóxico	Catalisador	Mistura
Densidade (g/cm ³) - (20°C)	1,18	0,992	1,1
Aspeto	Violeta	Transparente	Transparente
Viscosidade (25°C)	1550	100	
Relação de mistura (em peso)	100	39	
Pós cura			
Tensão máxima à tração (N/mm ²)	70		
Módulo de elasticidade (N/mm ²)	3400		

3.4.1.2. Fibras

Com este trabalho pretende-se obter materiais compósitos com uma percentagem significativa de fibras, pelo que se decidiu utilizar uma razão fibra/matriz de 30% em fração mássica, ou seja, a massa de fibra a utilizar será 30% da massa de resina. A escolha da utilização de uma fração mássica de 30% deve-se ao facto de que segundo Mesquita, Pedro [37], os compósitos reforçados com fibras de sisal tiveram uma melhoria significativa das propriedades mecânicas, em relação aos compósitos reforçados com 10 e 20%.

Para calcular a massa da resina a utilizar, bem como a massa de fibra, considerou-se a relação mássica supramencionada, a densidade dos dois materiais, o volume interior do molde (162 cm³) e a **expressão 3**.

$$V_{int} = \frac{m_f}{\rho_f} + \frac{m_r}{\rho_r} \quad (3)$$

em que:

V_{int} - Volume interior do molde;

m_f - massa da fibra;

ρ_f - densidade da fibra;

m_r - massa da resina;

ρ_r - densidade da resina

Após conclusão dos cálculos, efetuados para os quatro tipos de fibra, chegou-se aos resultados apresentados na **Tabela 8**.

Tabela 8 – Proporções das misturas utilizadas para a produção de compósitos

Material das placas/ quantidade de misturas	Resina (g)	Catalisador (g)	Fibra (g)
Fibra de sisal	140	55	42
Fibra de linho	146	57	43
Fibra de vidro	158	61	47
Fibra de eucalipto	137	53	41

Sabendo a quantidade de fibra a utilizar, iniciou-se a sua preparação. Primeiramente, as fibras foram cortadas num comprimento de 40 mm (**Figura 26**).

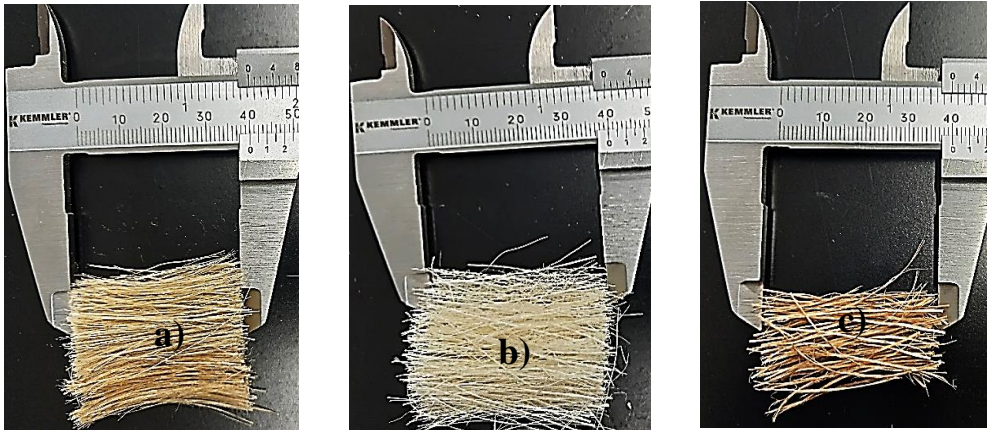


Figura 26– Fibras cortadas a 40 mm – a) Fibras de linho; b) Fibras de sisal; c) Fibras da casca de eucalipto

Em seguida, todas as fibras vegetais passaram por um processo de secagem em estufa, a uma temperatura de 100°C, até se verificar a estabilização da perda de massa. Foi efetuada a medição de massa a cada 10 minutos. Verificou-se que todas elas apresentam o mesmo comportamento, ou seja, a perda de massa era significativa apenas nos primeiros dez minutos. A humidade das fibras foi calculada na base seca, através da **expressão 4**, abaixo apresentada:

$$H(\%) = \frac{m_i - m_f}{m_f} \times 100, \quad (4)$$

Em que:

H (%) – Humidade

m_i – Massa inicial das fibras

m_f – Massa final das fibras

Nos **gráficos 1, 2, 3 e 4** apresentam-se a perda de humidade das respetivas fibras.

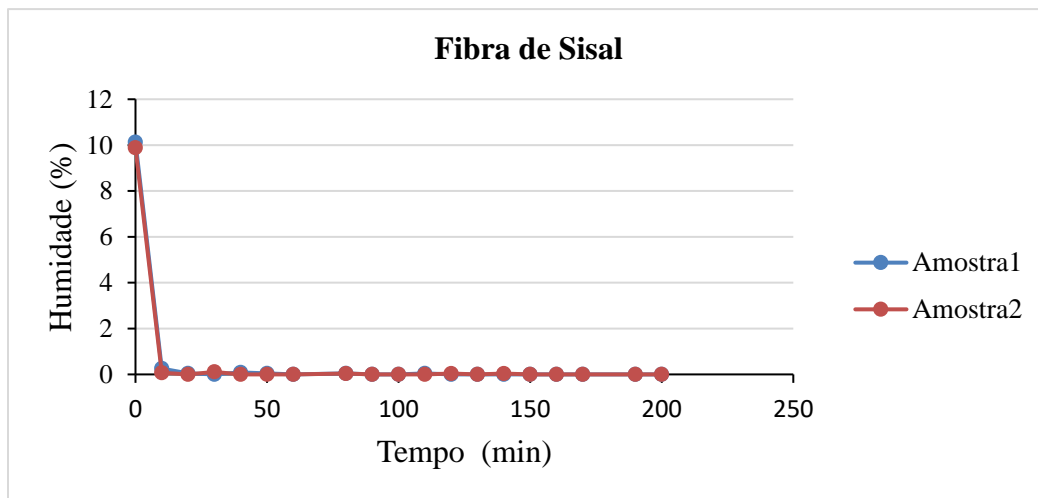


Gráfico1 – Perda de humidade da fibra de sisal.

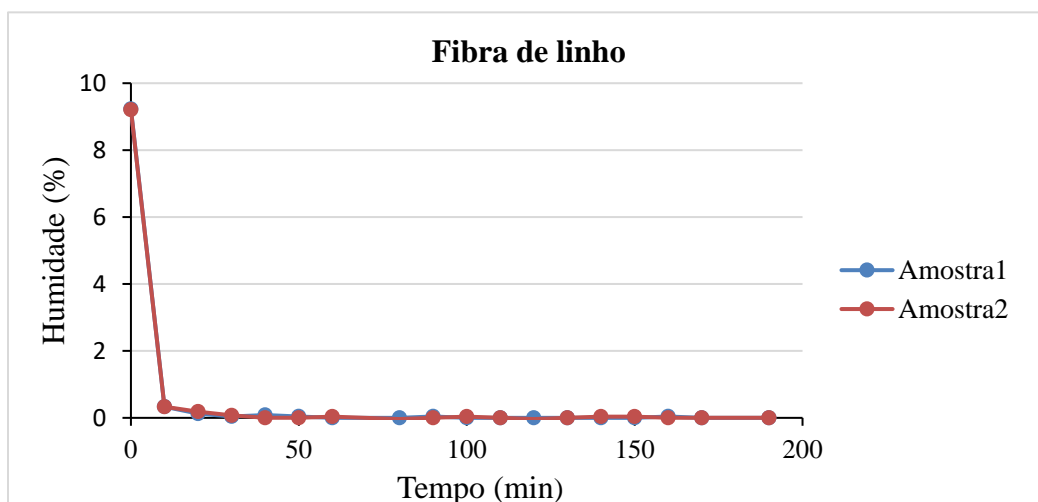


Gráfico2 – Perda de humidade da fibra de linho.

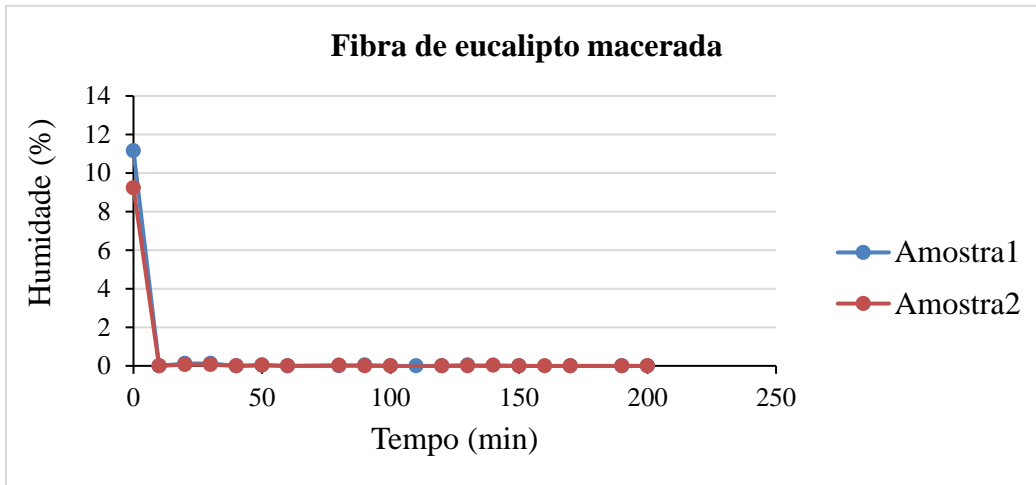


Gráfico 3 – Perda de humidade da fibra da casca de eucalipto macerada

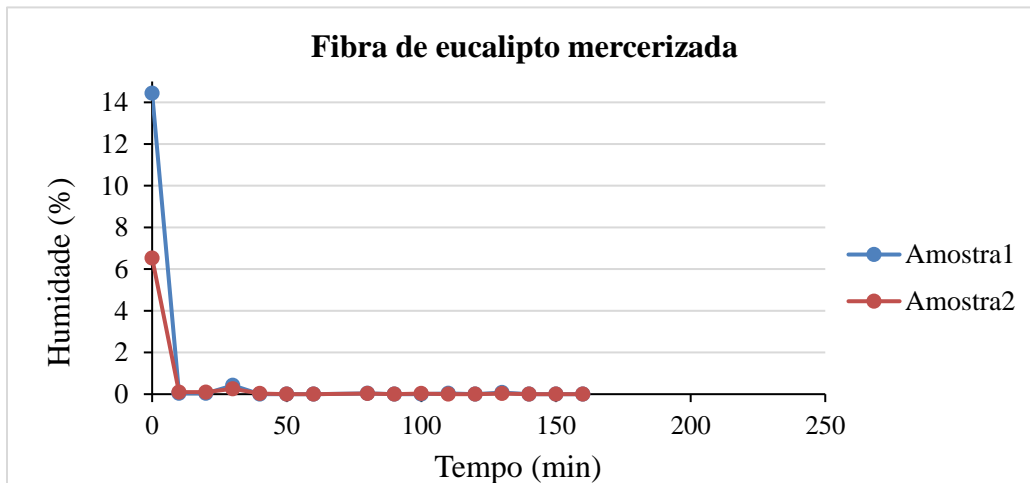


Gráfico 4 – Perda de humidade da fibra da casca de eucalipto mercerizada

3.4.1.3. Molde

3.4.1.3.1. Molde para a produção de compósitos

O molde utilizado foi projetado e produzido no Departamento da Engenharia Mecânica e Gestão Industrial no âmbito deste trabalho. Trata-se de um molde em alumínio com as seguintes dimensões interiores: 270 mm x 150 mm x 4 mm.

É constituído por três partes (**Figura 27**), para facilitar a desmoldação das placas produzidas e contempla canais para saída do excesso de resina. As dimensões interiores tiveram em consideração as dimensões normalizadas dos provetes de ensaio.

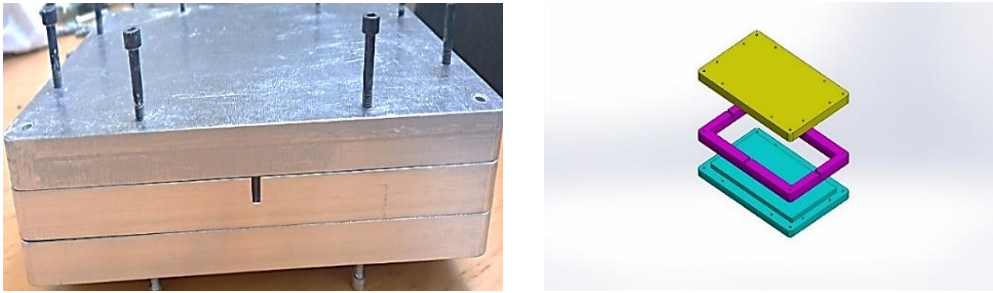


Figura 27 – Molde para a produção dos compósitos

No decorrer da realização deste trabalho houve a necessidade de efetuar otimizações no molde, uma vez que as placas produzidas apresentavam alguns defeitos, nomeadamente porosidades. Estas resultaram da formação de bolhas de ar durante a mistura da resina com o catalisador ou então durante as fases de produção do compósito ou de cura da resina. Posto isso, fez-se a alteração do *design* do molde inserindo pequenos rasgos na superfície de encosto da placa superior, como se pode ver na **Figura 28** abaixo apresentada.

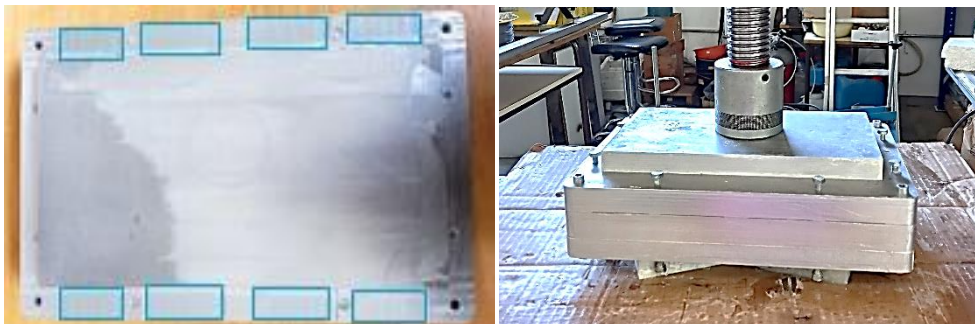


Figura 28 – Placa superior otimizada

3.4.1.3.2. Molde para a produção de placas de resina pura

O molde desenvolvido para a produção de placas de resina pura (**Figura 29**) foi pensado e desenhado de forma que as bolhas de ar, inseridas durante as fases de mistura da resina com o catalisador, de enchimento do molde ou de cura da resina, fossem removidas com facilidade. Para verificar o que se passava com a resina durante o processo de cura, optou-se por uma das partes do molde ser em vidro. Este molde possibilitou que o vazamento da resina no seu interior fosse efetuado na posição vertical, ficando com a parte superior totalmente aberta. Esta posição de enchimento foi adotada para facilitar a saída das bolhas de ar.



Figura 29 – Molde para a produção da placa de resina pura

3.4.1.3.3. Preparação do molde

Antes de iniciar o processo de fabrico, quer das placas de compósito quer das placas de resina, teve de se preparar o molde. Efetuou-se uma limpeza com um produto próprio a fim de remover as impurezas e as gorduras superficiais. Em seguida aplicaram-se três camadas de desmoldante em toda a superfície do molde, seguindo o seguinte procedimento:

- Aplicação de uma primeira camada de desmoldante;
- Aguardar 10 minutos e efetuar polimento com um pano de algodão;
- Aguardar mais 30 minutos, a fim de secar o desmoldante;
- Repetir o procedimento mais duas vezes.

Os desmoldantes são agentes que, aplicados na superfície de moldes, evitam que a peça moldada tenha aderência ao molde. É um material muito variado, pois cada tipo de material usado na produção da peça moldada exige que o desmoldante esteja de acordo com as suas características físicas e reações químicas. Os desmoldantes protegem os moldes, reduzem os custos de limpeza e conferem um excelente acabamento às peças fabricadas.

O desmoldante utilizado neste trabalho (**Figura 30**) é uma cera de uso industrial, muito utilizado no fabrico de peças com resina de poliéster, viniléster, uretano-acrílico, epóxido, como é o caso da sua utilização neste trabalho.



Figura 30 – Desmoldante

3.4.1.4. Procedimento de fabrico de material compósito

Os procedimentos seguidos para o fabrico do material compósito, descritos a seguir, foram efetuados tanto para as fibras de sisal, de linho e de vidro, como para as fibras das cascas de eucalipto maceradas e mercerizadas

3.4.1.4.1. Processo da obtenção das mantas de fibra

Com as fibras cortadas com 40 mm de comprimento e secas (exceto as fibras de vidro), fez-se a distribuição das mesmas de forma aleatória no molde e de seguida foram prensadas, de forma a obter uma “espécie” de manta (**Figura 31**) que facilite o processo de produção do material compósito.

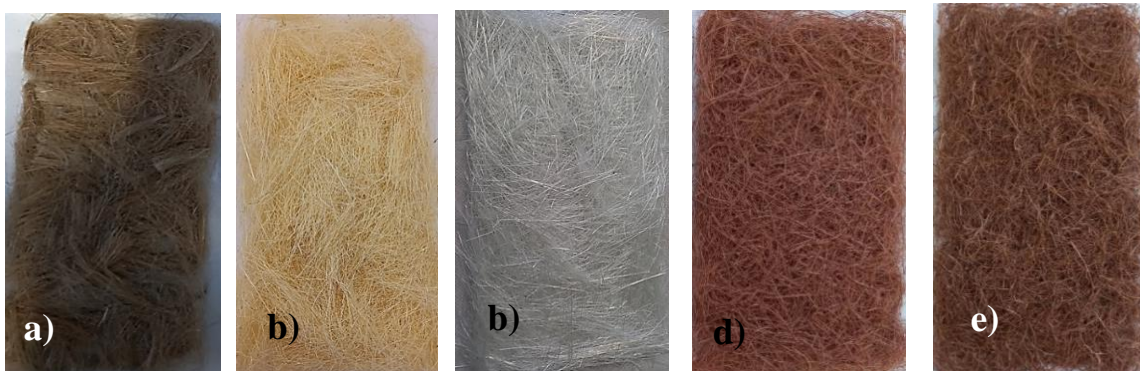


Figura 31 – a) Manta de fibra de linho, b) Manta de fibra de sisal, c) Manta de fibra de vidro, d) Manta de fibra da casca de eucalipto macerada, e) Manta de fibra da casca de eucalipto mercerizada

3.4.1.4.2. Preparação da matriz termoendurecível epóxido

A preparação da matriz termoendurecível foi realizada num recipiente de metal, utilizou-se um pincel para auxiliar na mistura da resina com o catalisador. Utilizou-se uma balança analítica, onde foi efetuada a medição de massa da resina e do catalisador, de acordo com a informação constante na ficha técnica da SICOMIN. A relação da mistura foi de 100

gramas de resina para 39 gramas de catalisador. A mistura foi efetuada à temperatura ambiente. A relação entre a fibra e a matriz utilizada para a produção de compósito é de 30% em fração mássica, conforme mencionado anteriormente.

3.4.1.4.3. Produção das placas em material compósito e em resina pura

Primeiramente aplicou-se uma camada de resina no molde e, com ajuda de um pincel, espalhou-se de forma a ficar com uma espessura uniforme. Em seguida colocou-se a manta de fibra, exercendo sempre pressão com o pincel para promover uma melhor impregnação da fibra com resina. Repetiu-se o mesmo procedimento até completar a distribuição completa de fibra e de resina, acrescentou-se um excesso de resina no final. Para a produção das placas reforçadas com fibra de sisal e de linho efetuou-se a distribuição das fibras por três mantas, enquanto que para fibras de casca de eucalipto maceradas, fibras de casca de eucalipto mercerizadas e fibras de vidro foram utilizadas quatro mantas. Por fim, fechou-se o molde e em seguida este foi colocado numa prensa hidráulica de 30 toneladas (**Figura 32**) durante 24h à temperatura ambiente.



Figura 32 – Prensa Hidráulica e molde submetido à compressão

Após o processo de cura da resina, o compósito foi retirado do molde, limpo de rebarbas e, por fim, submetido ao processo de pós-cura durante 16h numa estufa a 60°C, como indicado na ficha técnica da resina. Foram também produzidas placas de resina pura, para confirmação das propriedades mecânicas, utilizando o molde e seguindo o método descritos no subcapítulo 3.4.1.3.2. Na figura seguinte mostram-se algumas das placas produzidas.

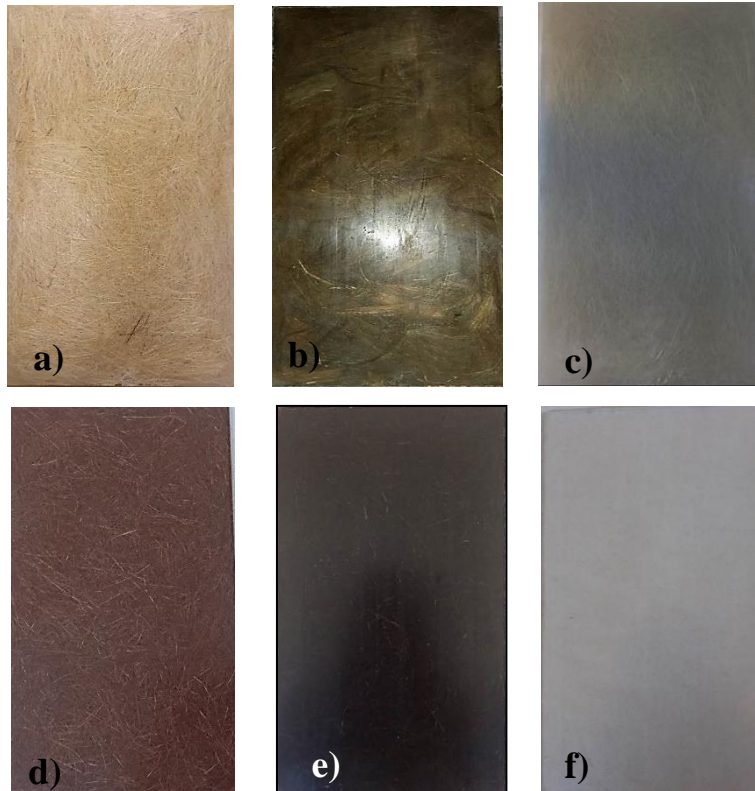


Figura 33– a) Placa de compósito reforçado com fibra de sisal, b) Placa de compósito reforçado com fibra de linho, c) Placa de compósito reforçado com de fibra de vidro, d) Placa de compósito reforçado com fibras de eucalipto macerada, e) Placa de compósito reforçado com fibras de eucalipto mercerizada com Hidróxido, f) Placa de resina epóxido

3.4.1.5. Corte e preparação dos provetes

Os provetes de ensaio, para caracterização mecânica à tração, foram cortados numa esquadrejadora do Pavilhão de Engenharia de Madeiras. A esquadrejadora é um equipamento industrial que permite uma agilidade nos trabalhos, faz cortes precisos e mantém um bom acabamento nas peças. Os provetes, de geometria retangular, foram cortados com as seguintes dimensões normalizadas (ISO 527–4): 270mm x 25mm x 4mm.

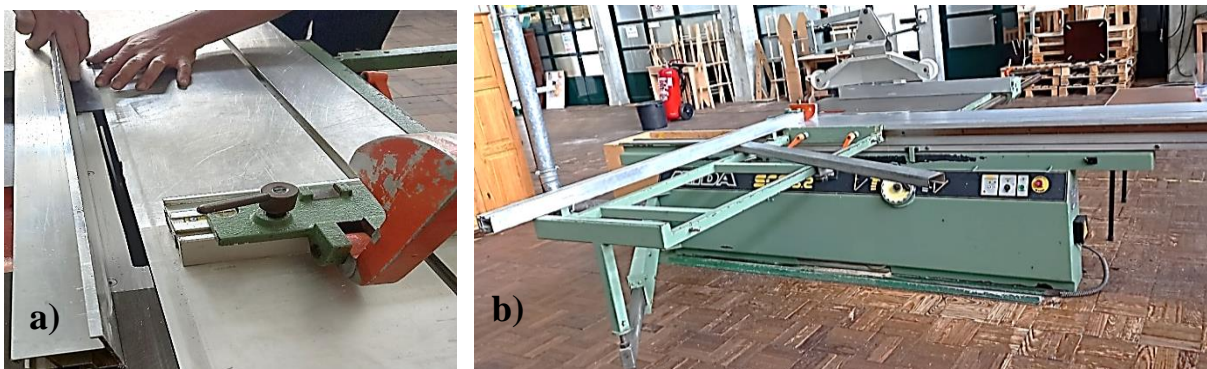


Figura 34– a) Corte do provete, b) Esquadrejadora

Foram coladas placas de alumínio (**Figura 35**) com dimensões 50mm x 25mm na extremidade dos provetes. As placas, previstas na norma de ensaio, foram coladas com resina Araldite e têm como objetivo reforçar as extremidades dos provetes, evitando assim que os mesmos partam na zona da amarra durante o ensaio de tração.

As placas de alumínio foram lixadas, assim como as extremidades dos provetes, afim de criar rugosidade nas superfícies, promovendo uma maior adesão da resina à superfície das placas e dos provetes.



Figura 35–Placas de alumínio coladas nas extremidades dos provetes

3.4.1.6. Ensaio de tração

O ensaio de tração é um tipo de ensaio mecânico utilizado no ramo da engenharia que visa estudar a resistência dos materiais quando estão sujeitos a um esforço de tração. Um provete é submetido a uma carga de tração, onde são verificadas as variações de comprimento e a força aplicada. Quando é aplicada uma tensão ao material este sofre uma certa deformação que é resultante da condição do material. O provete é colocado numa máquina de ensaios de tração, onde é distendido por um travessão móvel. Foram utilizados um extensómetro e uma célula de carga que medem, respetivamente, o alongamento e a magnitude da carga aplicada. Assim, com o passar do tempo a tensão vai aumentando até à rotura do provete.

Para os ensaios realizados neste trabalho foram produzidos cinco provetes de cada uma das placas, com dimensões de 270mm x 25mm x 4mm, como já referido no **subcapítulo 3.4.1.5**.

Os ensaios foram realizados segundo a norma ISO 527–4, conforme já mencionado anteriormente, utilizando uma máquina de ensaios de tração INSTRON, modelo 4206 (**Figura 36**). Foi utilizada uma célula de carga de 100 KN e um extensómetro da marca INSTRON com um comprimento útil (L_0) de 50mm. Este ensaio pretende determinar os valores de tensão

de rotura e do módulo de elasticidade, para isso seguiu-se as orientações impostas pela norma, usando uma velocidade de ensaio de 2mm/min.

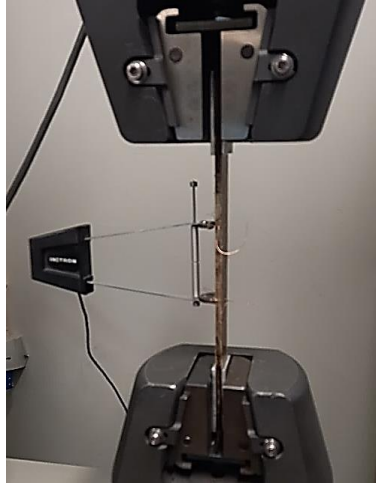


Figura 36 – Ensaio de tração -Montagem do extensómetro no provete

4. Resultados e Discussão

Neste capítulo são apresentados e analisados todos os resultados obtidos durante o procedimento experimental, visando a caracterização de fibras extraídas da casca de eucalipto, da resina utilizada como matriz e de todos os compósitos produzidos.

4.1 Caracterização de fibras extraídas da casca de eucalipto

Neste ponto é apresentada a caracterização de fibras/feixes de fibras extraídas da casca de eucalipto e que serão utilizadas como reforço. Atendendo à secção retangular de fibras/ feixe de fibras, avaliou-se o comprimento, a largura e a espessura de várias amostras. Os dados recolhidos permitiram determinar o volume médio das fibras e assim, após secagem e pesagem, encontrar a massa específica e calcular a quantidade de material a adicionar para a produção de compósitos.

4.1.1. Cor da fibra

A cor da fibra da casca do eucalipto teve algumas alterações ao longo das várias etapas do processo sem que ocorresse tingimento. Na primeira fase, as fibras em contacto com o hidróxido de sódio, sofreram uma mudança significativa na cor, passaram de cor branco-torrado a cor escura (conhecido como licor negro na produção da pasta de papel) que resulta duma mistura de matéria inorgânica com matéria orgânica (lignina, polissacarídeos, ácidos carboxílicos e extrativos) [38]. Na segunda fase, após 24 h de secagem em estufa, as fibras apresentaram nova alteração na cor, passando a uma cor avermelhada (**Figura 37b**) ou a cor castanha (**Figura 37c**).

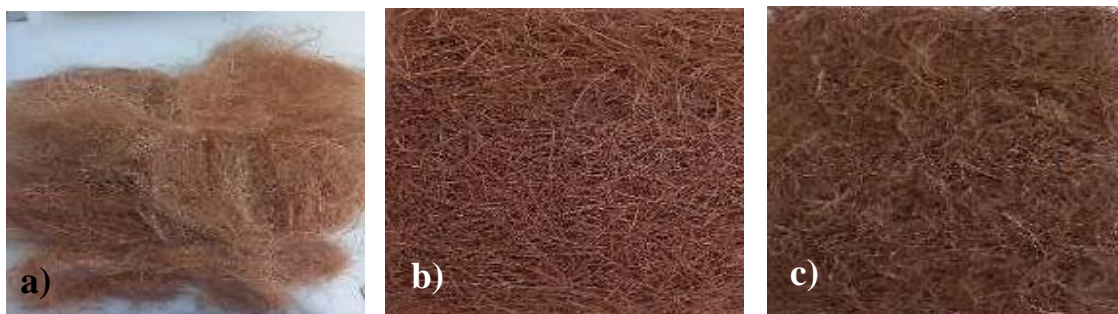


Figura 37 – Cor da fibra, a) Fibra macerada, b) Fibra macerada após secagem, c) Fibra mercerizada após secagem

4.1.2. Densidade

A densidade da fibra da casca de eucalipto foi calculada segundo a **expressão 2** e procedimento descritos no **subcapítulo 3.3.2.** O resultado obtido foi de $1,085 \text{ g/cm}^3$, uma densidade inferior à de outras fibras, como por exemplo a fibra de linho com $1,5 \text{ g/cm}^3$ e de sisal com $1,27 \text{ g/cm}^3$.

4.1.3. Morfologia das fibras

A morfologia das fibras foi analisada através de microscópio ótico de reflexão tendo sido obtidas as imagens apresentadas nas **Figuras 38**.

Dessas observações foi possível detetar a presença de alguns feixes de fibras nas amostras em análise.

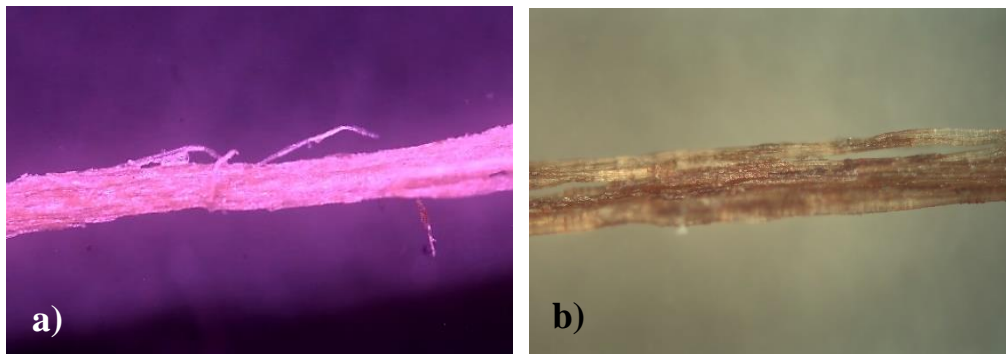



Figura 38 – Análise microscópica- a) Feixe de fibras macerada; b) Feixe de fibras mercerizadas

4.2. Caracterização da resina (*SR Surf Clear EVO*)

Na produção dos compósitos utilizou-se como matriz um material polimérico termoendurecível (resina de epóxido) com a designação *SR Surf Clear EVO*. Embora, a ficha técnica do produto apresente valores referentes às propriedades mecânicas (**Figura 39**), foi tema deste trabalho a produção de provetes de secção retangular para avaliar a tensão máxima suportada e o seu módulo de elasticidade desta. Os valores de propriedades mecânicas, obtidos a partir dos ensaios permitem uma melhor análise dos resultados alcançados pelos compósitos reforçados com fibras. Os ensaios de tração efetuados permitiram determinar uma tensão máxima e um módulo de elasticidade para a resina de $64 \pm 4 \text{ MPa}$ e $2,8 \pm 0,4 \text{ GPa}$, respetivamente (**Tabela 9**), ficando ligeiramente abaixo dos valores indicados pelo fornecedor

70 MPa e 3,4 GPa. Esta diferença de valores pode resultar das condições de produção dos provetes não serem tão eficientes quanto as utilizadas pelo fornecedor.



E1577.11 / 756,1 / E1577.13 / E1577.10
V 2.1 - 11 juin 2019
Page 7 / 9

Mechanical properties on cast resin :

		SR Surf Clear EVO / SD EVO Slow		SR Surf Clear EVO / SD EVO Medium	
Curing cycles	→	24 h @ Ta + 16 h @ 60 °C		24 h @ Ta + 16 h @ 60 °C	
Tensile Modulus	N/mm ²	3 400		3 400	
Maximum strength	N/mm ²	72		70	
Breaking Strength	N/mm ²	67		66	
Elongation at max strength	%	3,9		4,1	
Elongation at break	%	5,1		6	

Figura 39 – Propriedades mecânicas da resina utilizada como matriz na produção dos compósitos. Fonte: Sicomin Epoxy Systems.

4.3. Caracterização mecânica dos compósitos.

No capítulo 3 foi abordado o ensaio de tração como principal metodologia para avaliação das propriedades mecânicas dos compósitos. Com base nesses ensaios determinaram-se valores de tensão máxima e de módulo de elasticidade para os diferentes compósitos produzidos. Para uma melhor compreensão da metodologia de recolha desses dados, apresentam-se duas imagens (**Figura 40**) exemplificativas.

Na **Figura 40a** é apresentada a curva total de um ensaio de tração, sendo que a tensão máxima corresponde ao valor máximo da curva. Na **Figura 40b** é mostrado o método de determinação do módulo de elasticidade, sendo este calculado, de acordo com a norma ISO 524 – 4, a partir no declive da curva no intervalo de deformação de 0,0005 e 0,0025.

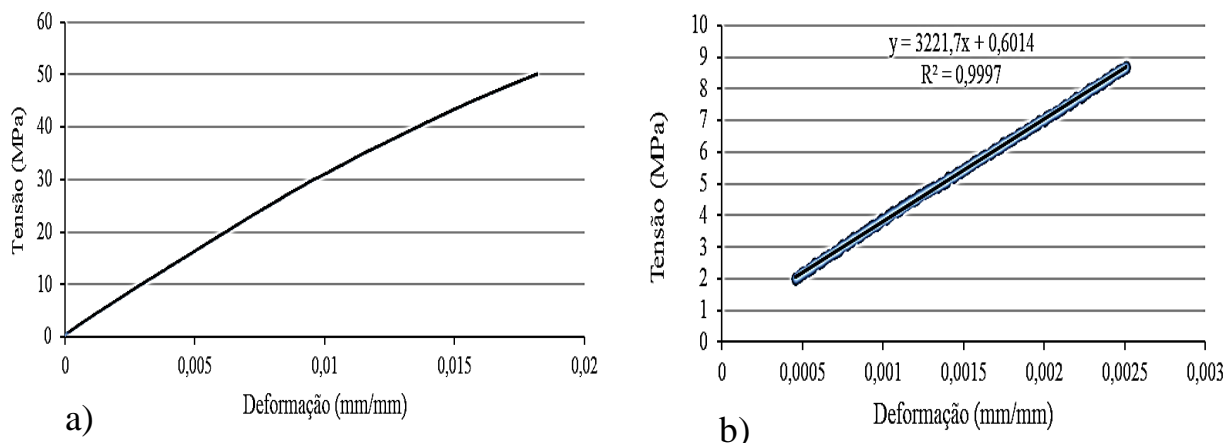


Figura 40 – Metodologia de recolha de dados das propriedades mecânicas. a) curva total de um ensaio de tração, para determinação da tensão máxima suportada, ponto máximo da curva e b) curva parcial do ensaio de tração para determinação do módulo de elasticidade.

Após análise das curvas referentes a todos ensaios realizados aos compósitos e à resina, procedeu-se à compilação dos dados tal qual se encontram na **Tabela 9** ou, para uma comparação mais rápida, nos gráficos da **Figura 41 e 42**.

Tabela 9 – Tensão máxima de rotura e módulo de elasticidade dos compósitos e da resina

Material de reforço do compósito	Tensão Máxima (MPa)		Módulo de Elasticidade (GPa)	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Resina	64	5	2,8	0,4
Linho	58	9	6,8	2,0
Sisal	65	9	5,7	1,0
Vidro	94	11	5,5	0,9
Eucalipto macerada	30	4	3,5	0,4
Eucalipto mercerizada	27	3	3,9	0,4

Observando os valores de tensão máxima (**Figura 41**), observa-se que a resistência à tração da resina não reforçada apresenta valores semelhantes à dos compósitos onde foi utilizado linho ou sisal como reforço. Embora não ocorra aumento da resistência mecânica dos compósitos reforçados com linho ou sisal, outros autores encontraram melhorias na utilização destas fibras como reforço. [10, 33].

Quando as fibras de vidro foram utilizadas como reforço, observa-se um aumento da resistência mecânica em cerca de 46%, este aumento deve-se à elevada resistência mecânica das fibras de vidro e ao seu tratamento de superfície que garantem a criação de uma interface matriz/fibra de melhor qualidade. Segundo Maciel et al [39], o compósito de matriz epoxídica reforçado com 30% de fibra de vidro apresenta uma resistência à tração de 50,3 MPa, valor inferior ao obtido na realização deste trabalho, 94 MPa.

Compósitos reforçados com fibras de casca de eucalipto não introduziram qualquer melhoria na resistência mecânica da resina, em oposição, estas fibras levaram a um decréscimo de cerca de 50% na resistência à tração. Este decréscimo mostra que a qualidade das fibras de eucalipto necessita de ser melhorada. Os resultados obtidos para os compósitos reforçados com os diferentes tipos fibras de casca de eucalipto (maceradas e mercerizadas) são semelhantes entre si.

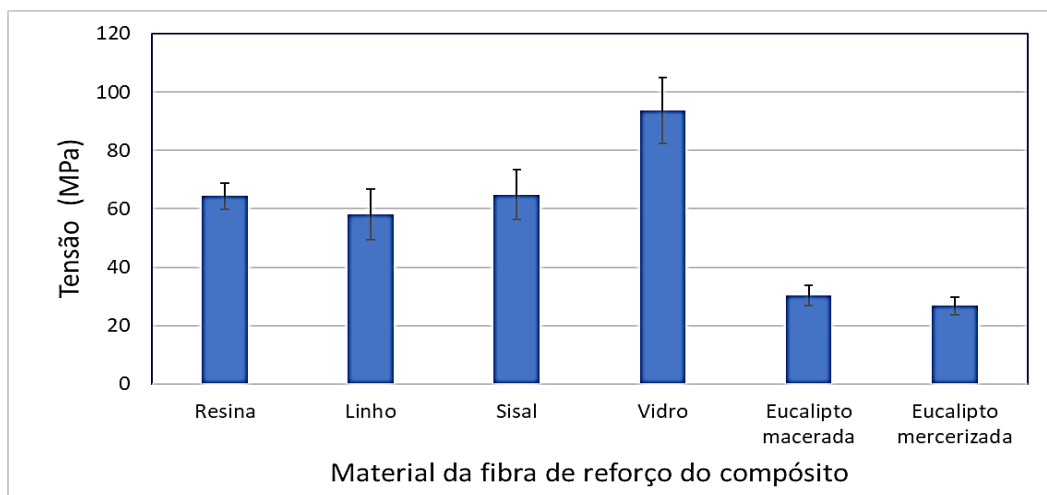


Figura 41 – Tensão máxima suportada pelos compósitos e resina

O módulo de elasticidade (**Figura 42**) obtido para a resina, tal como referido anteriormente, é ligeiramente inferior aos valores indicados pelo fornecedor (**Figura 39 e Tabela 9**). Quando se compara o módulo de elasticidade da resina com o módulo de elasticidade dos compósitos avaliados, verifica-se que houve um aumento do módulo de elasticidade para qualquer um dos compósitos produzidos, sejam eles reforçados com fibras de casca de eucalipto, sejam reforçados com fibras de linho, sisal ou vidro. Estes valores indicam uma clara melhoria da rigidez da matriz quando reforçada com qualquer das fibras. As fibras de casca de eucalipto conseguiram impor um aumento de rigidez de 25% ou 40%, dependendo do tratamento a que foram sujeitas, no entanto, este aumento é inferior ao conseguido com o uso de fibras de vidro (96%) ou de sisal (100%) ou de linho (140%). O aumento de rigidez induzido pelas fibras de vidro está diretamente relacionado com o seu elevado módulo de elasticidade, prevendo-se que o aumento de rigidez observado nos compósitos reforçados com fibras de casca de eucalipto também esteja inteiramente relacionado com um maior módulo de elasticidade destas (valor não determinado). Estes resultados transmitem algum grau de confiança na utilidade destas fibras como reforço eficaz para compósitos de matriz polimérica.

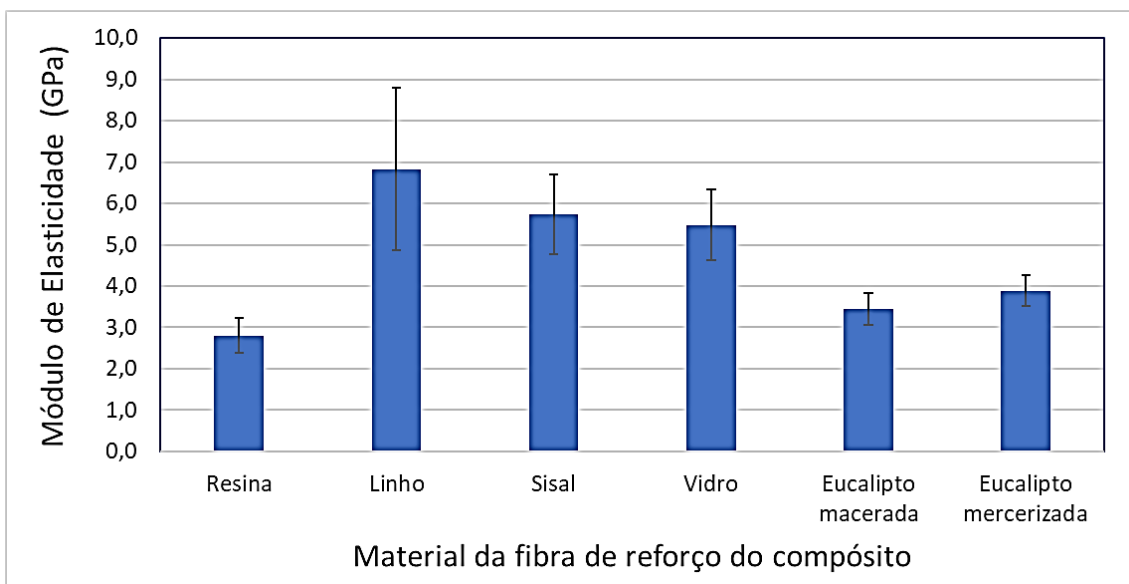


Figura 42 – Módulo de elasticidade dos compósitos e da resina

4.4. Observação da zona de fratura dos provetes

A zona de fratura dos provetes é um bom indicador da eficiência dos reforços no

compósito. A rotura das fibras junto à superfície de rotura da matriz corresponde a uma boa interface matriz/reforço e, por conseguinte, boa eficiência das fibras enquanto reforço, enquanto que o arrancamento das fibras do interior da matriz corresponde a uma fraca interface matriz/reforço [9]. Neste trabalho, todos os provetes testados em tração foram recolhidos para observação da superfície de fratura, através do microscópio GSZ modelo 24818 (**Figura 43**).



Figura 43 – Microscópio GSZ

Na **Figura 44** observa-se a região de fratura dos provetes de material compósito reforçado com fibras de linho (a), sisal (b) e vidro (c), podendo observar-se que os compósitos reforçados com fibras de linho apresentam um forte arrancamento da fibra enquanto que para os outros dois tipos de reforço ocorre uma boa aderência pois não há evidência de arrancamento das fibras.

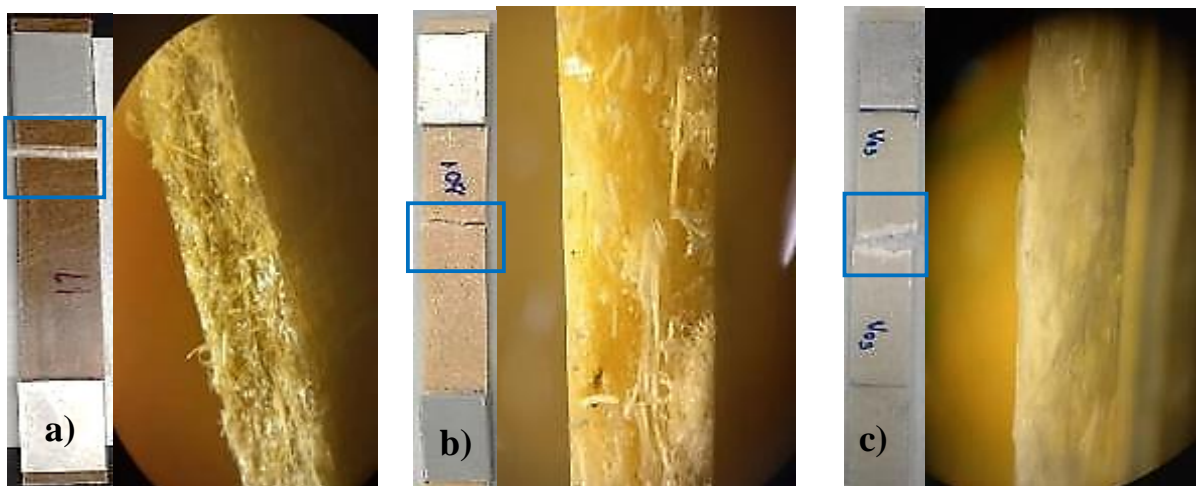


Figura 44 – Zona de fratura dos provetes reforçados com fibra de linho (a), fibra de sisal (b) e fibra de vidro (c)

A zona de fratura dos compósitos reforçados com fibras da casca de eucalipto (**Figura 45**) aparenta ter baixo arrancamento quer para as fibras maceradas quer para as fibras mecerizadas. Este baixo arrancamento é um excelente indicador da resistência da interface, embora a baixa resistência mecânica destas fibras também conduz à eliminação do arrancamento. Nestas imagens, pode ainda observar-se a presença de bolha de ar que também conduziram a uma diminuição da resistência mecânica destes compósitos.



Figura 45 – Zona de fratura dos provetes reforçados com fibra macerada (a) e fibra mercerizada (b)

5. Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste trabalho foram produzidos e caracterizados compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras naturais. O objetivo foi extrair fibras de casca de eucalipto, caracterizá-las e utilizá-las como reforço de uma matriz epóxido (matriz mais ecológica, com cerca de 40% “Carbono Verde”, proveniente de biomassa) para a produção de compósitos. Além destes compósitos, produziram-se compósitos reforçados com fibras de linho, de sisal, de vidro e uma placa de resina epóxido não reforçada com o propósito de fazer comparações das suas propriedades mecânicas (tensão máxima e módulo de elasticidade) e da região da fratura.

A extração de fibras da casca de eucalipto foi um processo manual com maceração em água à temperatura ambiente durante uma semana, tendo, inicialmente, sido testado um período de 72 horas que se mostrou insuficiente. As fibras produzidas foram consideradas como feixes de fibras e apresentam uma secção retangular. O processo de extração das fibras da casca de eucalipto foi um grande desafio encontrado nesta dissertação.

A fibra extraída da casca de eucalipto tem densidade de $1,085 \text{ g/cm}^3$, valor inferior à das outras fibras vegetais. As fibras de linho têm densidade de $1,5 \text{ g/cm}^3$ e as de sisal $1,27 \text{ g/cm}^3$, enquanto a densidade das fibras sintéticas (vidro) é de $2,6 \text{ g/cm}^3$.

A produção dos compósitos foi realizada utilizando um molde cujo desenvolvimento é parte integrante desta dissertação e foi otimizado ao longo do processo produtivo, essencialmente para melhorar a eliminação de bolhas de ar que, inicialmente, ficavam retidas no interior do compósito.

Ultrapassadas todas dificuldades do processo e extração das fibras, foram produzidas placas, $270\text{mm} \times 150\text{mm} \times 4\text{mm}$, de compósito reforçado com fibra de linho, fibra de sisal, fibra de vidro, fibra da casca de eucalipto macerada e fibra da casca de eucalipto mercerizada, e também placas de resina epóxido *SR Surf Clear EVO* não reforçada, as quais foram cortadas em provetes de $270\text{mm} \times 25\text{mm} \times 4 \text{ mm}$ para realizar os ensaios de tração, norma ISO 527- 4, e avaliar as suas propriedades mecânicas.

Durante o ensaio de tração houve a recolha de valores de força e deslocamento, no entanto, a dificuldade na fixação do extensómetro não permitiu a recolha de todos os dados ao longo do ensaio, conduzindo, desta forma, à impossibilidade em avaliar a deformação dos compósitos.

Verificou-se que, de entre todos, os compósitos reforçados com fibras da casca de eucalipto macerada ou mercerizada, são os que apresentam menor resistência à tração, 30 e 27 MPa respetivamente, sendo inferior à resistência à tração da matriz sem reforço. Por outro lado, o valor do módulo de elasticidade dos compósitos reforçados com essas fibras é superior ao valor encontrado para a resina individualmente. Em termos de aderência não se observou arrancamento das fibras extraídas da casca de eucalipto.

Apesar das evoluções ocorridas a nível do molde utilizado para a produção dos compósitos, verificou-se que a resistência à tração e o módulo de elasticidade da matriz não reforçada estão abaixo dos valores publicados pelo fornecedor. O mesmo se verifica relativamente aos compósitos reforçados com fibras de linho, sisal e de vidro quando comparados com valores publicados em outros estudos, sendo um indicador que continua a haver necessidade de melhorias a nível da preparação dos compósitos.

Tal como esperado, os compósitos reforçados com fibra de vidro são os que apresentam uma resistência à tração mais elevada, 94 MPa, apesar de não apresentarem um valor de módulo de elasticidade superior aos compósitos reforçados com fibras naturais (linho e sisal). O compósito reforçado com fibra de sisal apresenta um módulo de elasticidade dentro do indicado na bibliografia, 5,7 GPa.

O compósito reforçado com fibras de linho apresenta um forte arrancamento da fibra, enquanto que para os compósitos reforçados com fibras de sisal e de vidro, não houve evidência de arrancamento das fibras, pelo que se pode avaliar que houve uma boa aderência entre a fibra e a matriz. Quanto as fibras recorçados com fibras da casca de eucalipto, em ambos os casos (macerada e mercerizada) apresentam um arrancamento baixo das fibras, o que significa que teve uma boa resistência na interface.

Sugestões para trabalhos futuros

A presente dissertação teve em conta apenas parte de uma completa e detalhada caracterização mecânica de compósitos reforçados com fibras naturais. Para trabalho futuro, sugere-se a realização dos seguintes estudos:

- Aperfeiçoamento do processo de extração de fibras da casca de eucalipto;
- Estudo das propriedades químicas das fibras da casca de eucalipto;
- Caracterização mecânica de fibras elementares e de feixes de fibras;
- Estudar a influência da utilização de outras matrizes, bem como outras orientações das fibras na produção de materiais compósitos;
- Utilização de um outro tipo de método para a produção do compósito, como por exemplo a utilização do processo em vácuo;
- Realização de ensaios de flexão (que não foi possível realizar neste trabalho).

Referências Bibliográficas

[1] **Araújo, Mário Eduardo Santiago (2013)**. Avaliação e caracterização de compósitos de matriz poliéster reforçadas com fibras de sisal (Agave Sisalana). Bacharel em Engenharia de Materiais, Campus de Marabá, Universidade Federal do Pará.

[2] **de Jesus, Luiz Carlos Correia, da Luz, Sandra Maria, Leão, Rosineide Miranda, Zattera, Ademir José, Amico, Sandro Campos. (2019)**. Comportamento térmico de compósitos de poliestireno reciclado reforçado com celulose de bagaço de cana. Artigo em Revista, v. 24, n.03, e-12425.

[3] **Zão, Tiago Nuno Barbosa de Azevedo Barros. (2018)**. Desenvolvimento e caracterização de compósitos de polímeros bio derivados reforçados com fibras para aplicações estruturais. Dissertação em Engenharia Militar. Academia Militar. Instituto Superior Técnico de Lisboa.

[4] **Wearn, Y. N., Montagna, L. S., & Passador, F. R. (2020)**. Compósitos de fibra de coco/LDPE: Efeito do tratamento superficial das fibras de coco em compósitos verdes. *Matéria* (Rio de Janeiro), 25(1), e-12548.

[5] **Almeida, Nuno Miguel Bastos Gomes de (2012)**. Estudo Estrutural de compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de Juta. Dissertação em Mestrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

[6] **Pereira, W. A., Ceron, I., Silva, M. S. e, Freitas, M. P. C. de, Silva, E. R. da, & Costa, F. M. da. (2021)**. Desenvolvimento de compósitos poliméricos reforçados com fibra da folha do buriti. *Matéria* (Rio de Janeiro), 26(1), e12932. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620210001.1232>.

[7] **Moreira, Anabela Mendes. (2008).** “Materiais de Construção I”. Apontamentos Instituto Politécnico de Tomar.

[8] **Ventura, Ana Mafalda F. M. (2009).** Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas. *Ciência & Tecnologia dos Materiais* 21, n. 3/4, 2009.

[9] **Veiga, N. A. (2014).** Comportamento à fratura em modo I de compósitos de matriz polimérica, reforçados com fibras de juta INEGI. Dissertação em Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

[10] **Carvalho, Guilherme Campos (2020).** Estudo das propriedades mecânicas de compósitos com matriz de epóxi reforçados com fios de sisal e linho. Dissertação em Engenharia Industrial. Instituto Politécnico de Bragança.

[11] **Pereira, Júlio Miguel da Cruz Rodrigues. (2017).** Desenvolvimento e fabrico de compósitos de matriz polimérica com fibras naturais. Project Master in Product Design Engineering. Escola Superior e Tecnologia e Gestão. Instituto Politécnico de Leiria.

[12] **De Castro, Bruno Francisco Morte. (2013).** Estudo e caracterização mecânica de Compósitos reforçados com fibras naturais. Dissertação em Mecânica — Materiais e tecnologias de fabrico. Instituto Superior de Engenharia do Porto.

[13] **Guimarães, Fernando Alves (2018)** - avaliação das propriedades mecânicas de um compósito híbrido de matriz termoplástica PPS reforçado com fibras de carbono contínuas e descontínuas. Dissertação de mestrado em engenharia mecânica na área de materiais. Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

[14] **Targa, Gabriel Norcia e, (2011)**. Compósito reforçado por laminado de bambu com matriz de poliuretano e epóxi: desenvolvimento, produção e caracterização mecânica. Dissertação de Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Santa Catarina.

[15] **Tomar, Sara de Melo. (2018)**. Comportamento mecânico de materiais compósitos de origem natural. Dissertação em Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

[16] **Da Silva, Nuno Sousa Diogo (2017)**. Estudo e Caracterização Mecânica de Compósitos de Matriz Polimérica Reforçado com Fibras de Eucalipto. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia do Porto.

[17] **Rossinaldo, João Adriano, Pallone, Eliria M. J. A. Materiais compósitos. Ciência e tecnologia dos materiais.** Faculdade de Zootecnia e Engenharia. Universidade de São Paulo.

[18] **Vanderlei, Rafael Marques. (2016)**. Confeção e caracterização mecânica de compósitos de matriz epoxídica reforçada com fibras de rami. Dissertação em Engenharia dos Materiais. Universidade Tecnológica Federal do Pará. Campus Londrina.

[19] **Takahashi, Rafael, Léo C.O.Pereira, DênioR.C.de Oliveira, Roberto T Fujiyama. (2011)**. Fabricação de mantas de fibras de sisal e de curauá para fabricação de material compósito. Artigo em conferência. XXXIX Congresso Brasileiro de Educação. Brasil.

[20] **Costa, José Eduardo Gonçalves. (2013)**. Estudo da degradação de geotêxtis em fibra natural. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade do Minho. Escola de Engenharia.

[21] https://www.researchgate.net/figure/Figura-10-Planta-do-Agave-sisalana-com-quase-2-m-de-altura_fig1_351229045.

[22] **Duro, Ana Catarina Ferreira Murça. (2013).** Desenvolvimento e caracterização de compósitos reforçados com fibras de linho e sisal. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros. Universidade do Minho. Escola de Engenharia.

[23] **Souto, Pedro Valadres. (09/06/09).** Linho. Guia de turismo científico de Guimarães.

[24] <https://naraguichontextil.wordpress.com/2019/04/10/conheca-mais-sobre-as-fibras-naturais-linho/>.

[25] **Leite, Fernando Luís Pinheiro Pires (2017).** Durabilidade de compósitos de matriz termoplástica/termoendurecível reforçada com fibras sintéticas e naturais. Tese de Mestrado. Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros. Universidade do Minho. Escola de Engenharia.

[26] **Foelkel, Celso.** Casca de Eucalipto. Livro. Eucalyptus Online Bool & Newsletter.

[27]. **Dos Santos, Fernanda Abreu. (2013).** Desempenho e conformidade de biossorbentes produzidos a partir de resíduos florestais e sua aplicação no tratamento de cromo de efluente industrial de galvanoplastia. Tese de Mestrado em Engenharia e Tecnologia dos Materiais. Faculdade de Engenharia. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

[28] **Del Pino, Gilberto García, Kieling, Antonio Claudio, Neto, José Costa de Macêdo, Rivera, Jose Luis Valin, Dos Santos, Marcos Dantas Valenzuela, Maria das Graças da Silva, Días, Francisco Rolando Valenzuela. (2018).** Estudo da Interação fibra – matriz em compósitos com fibras vegetais. *Scientia Amazonia*, v.7, n03, B12-B19.

[29] **Furtado, Samuel Cezinando Ribeiro. (2009).** Cálculo estrutural numérico e experimental da carenagem de um veículo. Dissertação em Engenharia Mecânica. Instituto Superior Técnico. Universidade de Lisboa.

[30] **Romão, Cristina Maria Nogueira. (2012).** Compósito de matriz termoplástica de baixa viscosidade reforçados com fibras naturais de origem vegetal. Tese de Programa Doutoral em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Departamento de Engenharia Mecânica.

[31] **Virino, Francisco Paulo Serpa. (2018).** Materiais compósitos na indústria da construção civil- Cenário, desafios e oportunidades. Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Ceará. Centro Tecnologia. Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil.

[32] **L.F.S de Azevedo, R.A.E.M. Paiva. (2014).** Desenvolvimento de painéis mdf utilizando fibra do coco babaçu e eucalipto. 21º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Cuiabá, Brasil.

[33] **Gontijo, Layne Oliveira de Lucas. (2018).** Caracterização físico química do efeito de mercerização sobre fibras de piaçava *Attalea funífera*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos. Pontifícia Universidade Católica. Rio de Janeiro.

[34] **G. Santos W., H. Guerreiro. H. L., A. Borges. G. (2018).** Influencia do tratamento químico na fibra de coco para utilização em compósito polimérico. XXII Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Universidade Federal do Amazonas, Faculdade de Ciências Agrárias, Departamento de Engenharia Agrícola e Solos. Universidade Federal do Pará, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química. Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Instituto de Geociências e Engenharias, Faculdade de Engenharia de Materiais.

[35] **Sanchez, Elisabete M. S., Cavani, Claudia S., Claudinete V.Leal, Sanchez, Caio G. (2010).** Compósito de resina de poliéster insaturado com bagaço de cana de açúcar: Influencia do tratamento das fibras e propriedades. Artigo Científico. Polímeros, vol. 20, nº 3, p. 194-200. z, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.

[36] **De Azevedo, Lisiane Fernanda Simeão, Paiva, António Ernandes Macêdo. (2012).** Processamento químico com NaOH para a construção painéis de MDF à base de fibras de coco, babaçu e eucalipto. Artigo Científico. ISBN 978-85-62830-10-5. Departamento de Mecânica e Materiais- IFMA.

[37] **Mesquita, Pedro Henrique Xavier. (2018).** Caracterização mecânica de compósitos de matriz epóxi reforçado com fibras de sisal em diferentes orientações com auxílio da correlação digital de imagens. Dissertação em Ciência e Engenharia de materiais. Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Mossoró-RN.

[38] **Andreuccetti, Melissa Tatiana. (2010).** Caracterização do licor negro de eucalipto na etapa de evaporação e correlação de suas propriedades. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química.

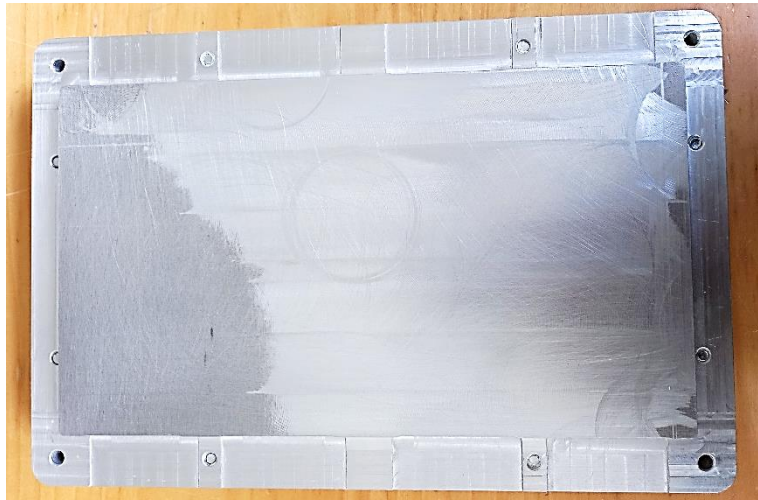
[39] **Maciel, Natália de Oliveira Roque, Ribeiro, Carolina Gomes Dias, Ferreira, Jordana Barreto, Vieira, Janaina da Silva, Margem, Frederico Muylaert, Vieira, Carlos Maurício Fontes, Monteiro, Sérgio Neves. (2016).** Comparative mechanical analysis between epoxy composite reinforced with curaua and epoxy composite reinforced with

fiberglass. Contribuição técnica ao 71º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 16º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas. 26 a 30 de setembro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

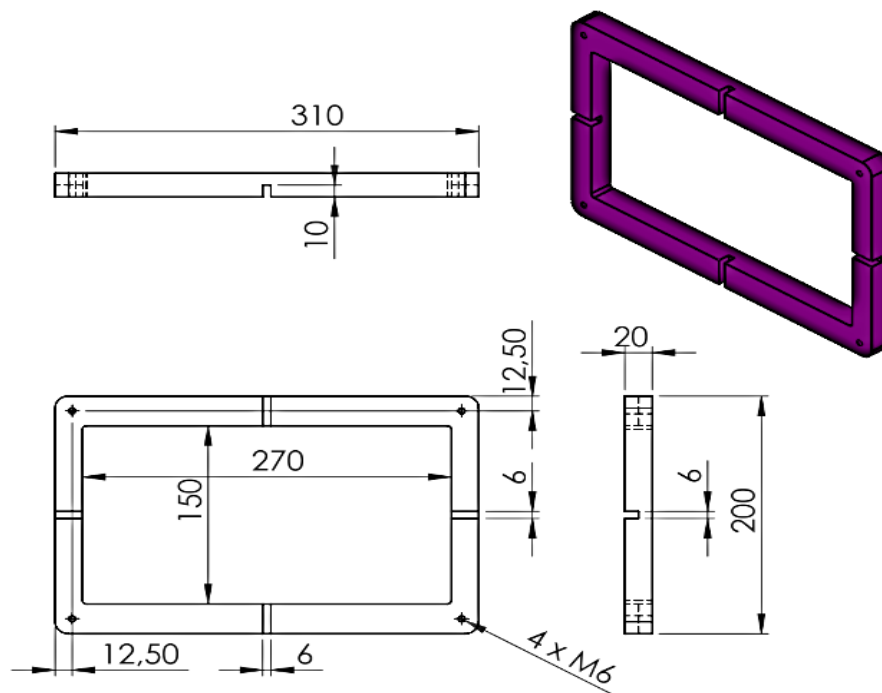
[40] da Silva, Alan Miguel Brum. (2017). Modificação superficial de fibras de curauá por silanização. Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

Apêndice

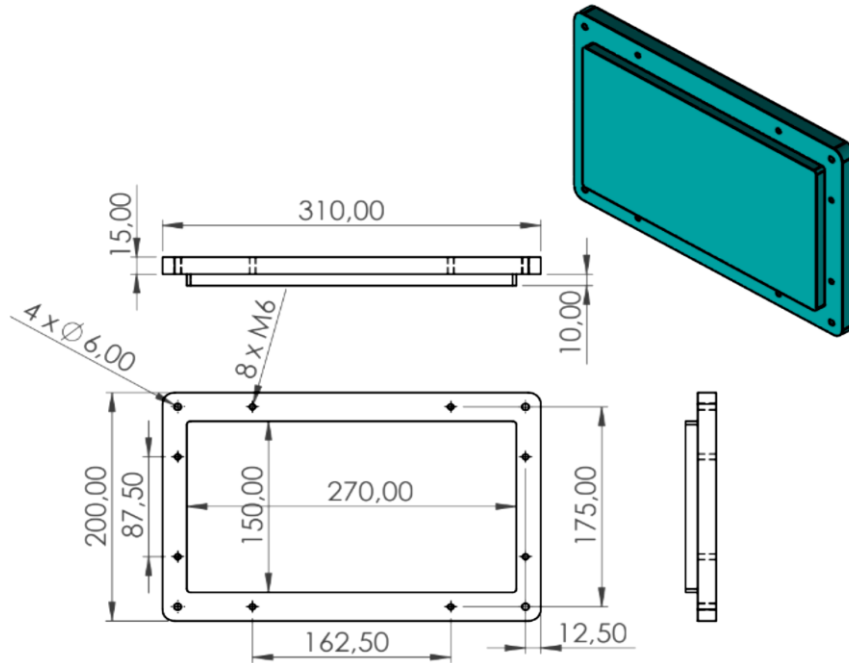
Apêndice A – Molde superior



Apêndice B - Molde intermédio



Apêndice C - Molde inferior



Anexos

Anexo A (Ficha técnica da resina epóxido SICOMIN CLEAR EVO)



E1577.11 / 756,1 / E1577.13 / E1577.10
V 2.1 - 11 juin 2019
Page 1 / 9

SR Surf Clear EVO / SD EVO Epoxy system for surfboards



Sicomin Surf Clear EVO epoxy system is specially formulated for the manufacturing of surf boards.

Surf Clear EVO is suitable for hand lay up of glass, carbon, aramid, natural and synthetic fibers.

Surf Clear EVO is compatible with all commercial foams: polystyrene, polyurethane, cross-linked & linear PVC foams and others.

Surf Clear EVO is compatible with all typical fillers used in the surf industry.

		SD EVO Slow	SD EVO Medium	SD EVO Fast
Reactivity level		Slow	Standard	Fast
Initial viscosity (mPa.s)	@ 20 °C	1020	1570	2000
	@ 30 °C	440	610	660
Pot Life (150 g)	@ 20 °C	01 h 10	10 min	8 min
	@ 30 °C	33 min	6 min	4 min
Mixing ratio	By weight	100 / 38	100 / 39	100 / 41
	By volume	100 / 50	100 / 50	100 / 50
	N/mm ²	72	70	68
% Elongation at max strength	%	3,9	4,1	4
TG1 max onset	°C	89	84	80
Gel Time	@ 20 °C	09 h 20	03 h 18	02 h 51
	@ 30 °C	05 h 00	01 h 57	01 h 42
Time to reach 400 mPa.s	@ 20 °C	04 h 20	-	01 h 08
	@ 30 °C	02 h 40	49 min	44 min
Demold time	@ 20 °C	28 h 00	09 h 54	08 h 33
	@ 30 °C	15 h 00	05 h 51	05 h 06



E1577.11 / 756,1 / E1577.13 / E1577.10

V 2.1 - 11 juin 2019

Page 2 / 9

Characteristics:

Ratio per volume 2:1.

High mechanical performance epoxy system recommended for surfboard production.

Yields surfboards with a flexible touch, high temperature and UV stability.

High surface and plug finishing, for high gloss requirement.

Other applications: surf repairs, fin boxes & plugs, pattern and model coating, etc...

Low odor and reduced skin aggression for a better work environment.

Advices for application:

Work in a clean environment with heating facility.

Ideal working temperature from 18 °C to 30 °C.

Maintain a constant temperature during lamination.

Avoid high ambient humidity.

Avoid exposure to U.V. during the cure. Laminates and coatings benefitting from a sun free post cure or polymerized for at least 7 days at 18°C will obtain greater U.V. resistance and mechanical properties

Do not dilute with solvents. Please consult our technical assistance.

The use of compatible pigments is possible.

Keep packaging well-sealed as hardeners are sensitive to carbonic gas and humidity.

A polyurethane or other top coat paint can (for best UV protection) be applied, without primer, after sanding the final layer of Surf Clear EVO.

Green Technology:

SICOMIN is heavily involved in green chemistry. When technology and availability of raw materials allows, we choose raw materials from biomass sourcing.

Surf Clear EVO epoxy resin is manufactured with a bio-based carbon content of about 40 % (resin alone)

OH additive, the shiniest Surf resin in the world

Sicomin offers the possibility to use an extra additive to mix with the resin Surf Clear EVO to improve the light radiance of the laminates applied on top of white PS or PU foams. Used for colored board, OH additive can modify the color perception (blue effect with carbon or pink effect with wood or linen fabrics), please test before to avoid any surprises.

Mixing: 1 g of OH for 1 kg of resin SR Surf Clear EVO - First mix resin and OH additive, then mix with hardener



SICOMIN Composites
Tel : +33 (0)4 42 42 30 20

31, avenue de la Lardière BP 23
Fax : +33 (0)4 42 81 29 29

13161 Châteauneuf-les-Martigues Cedex – France
E mail : composites@sicomin.com web : www.sicomin.com



Epoxy resin SR Surf Clear EVO

Appearance		liquid
Color		purple
Viscosity (mPa.s)	@ 15 °C	5500 ± 1100
	@ 20 °C	2925 ± 575
	@ 25 °C	1680 ± 320
	@ 30 °C	1070 ± 220
Density	@ 20 °C	1,1817
Refractive index	@ 25 °C	1,545 ± ,002
Storage (months)	@ Ta	24

Hardener(s)

		SD EVO Slow	SD EVO Medium	SD EVO Fast
Appearance		liquid	liquid	liquid
Color		colourless	light yellow	colourless
Gardner color		≤ 2	≤ 1	≤ 1
Reactivity level		Slow	Standard	Fast
Viscosity (mPa.s)	@ 15 °C	80 ± 15	180 ± 40	290 ± 60
	@ 20 °C	60 ± 15	120 ± 25	190 ± 40
	@ 25 °C	45 ± 10	80 ± 20	125 ± 25
	@ 30 °C	32 ± 6	60 ± 12	90 ± 20
Density	@ 20 °C	0,9710	0,9920	1,0000
Refractive index	@ 25 °C	1,471 ± ,002	1,5113 ± ,002	1,5169 ± ,002
Storage (months)	@ Ta	24	24	24

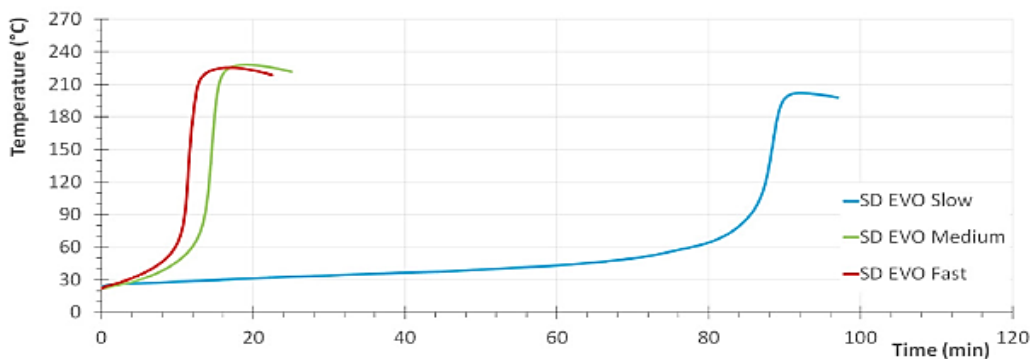


Mixe(s) SR Surf Clear EVO / SD EVO

		SD EVO Slow	SD EVO Medium	SD EVO Fast
Appearance		liquid	liquid	liquid
Color		purple	purple	purple
Mixing ratio				
	By weight	100 / 38	100 / 39	100 / 41
	By volume	100 / 50	100 / 50	100 / 50
Initial viscosity (mPa.s)	@ 20 °C	1020	1570	2000
PP 50 mm / 10 s ⁻¹	@ 30 °C	440	610	660
Density	@ 20 °C	1,1	1,1	1,1

Reactivity @ 20 °C for 150 g SR Surf Clear EVO / SD EVO

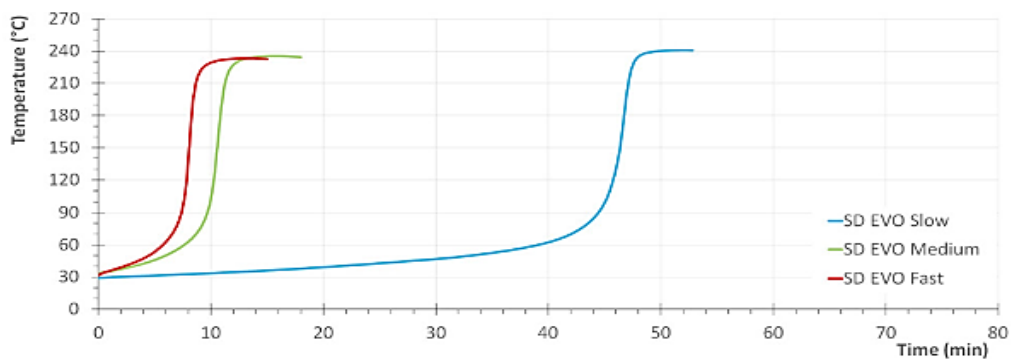
	SD EVO Slow	SD EVO Medium	SD EVO Fast
Exothermic temperature (°C)	202	228	225
Exothermic peak time	01 h 30	18 min	15 min
Time to reach 50 °C	01 h 10	10 min	8 min





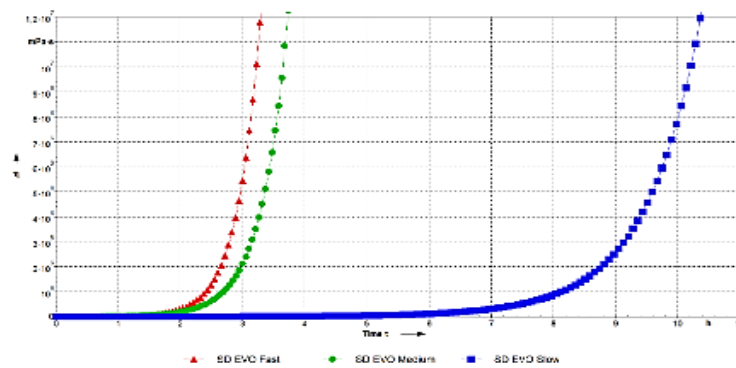
Reactivity @ 30 °C for 150 g SR Surf Clear EVO / SD EVO

	SD EVO Slow	SD EVO Medium	SD EVO Fast
Exothermic temperature (°C)	241	235	233
Exothermic peak time	53 min	14 min	12 min
Time to reach 50 °C	33 min	6 min	4 min



Reactivity on 1 mm thick layer

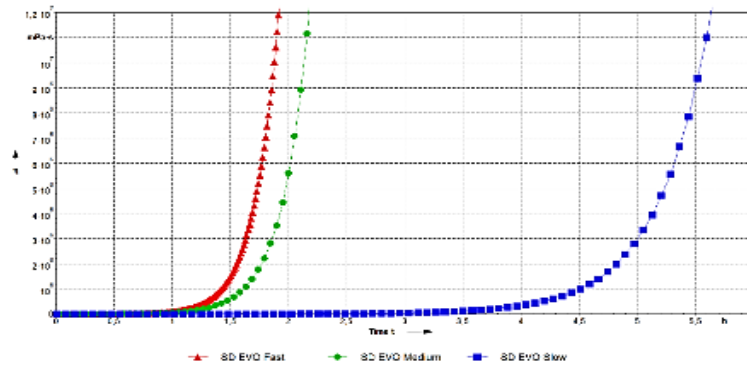
@ 20 °C



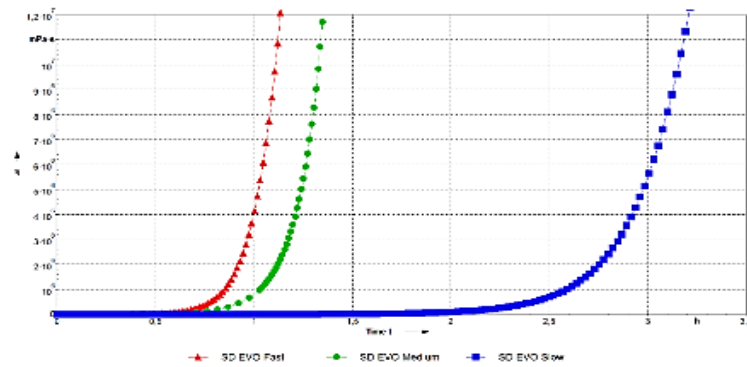


E1577.11 / 756,1 / E1577.13 / E1577.10
 V 2.1 - 11 juin 2019
 Page 6 / 9

@ 30 °C



@ 40 °C





Mechanical properties on cast resin :

		SR Surf Clear EVO / SD EVO Slow			SR Surf Clear EVO / SD EVO Medium		
Curing cycles		24 h @ Ta + 16 h @ 60 °C			24 h @ Ta + 16 h @ 60 °C		
Tensile							
Modulus	N/mm ²	3 400			3 400		
Maximum strength	N/mm ²	72			70		
Breaking Strength	N/mm ²	67			66		
Elongation at max strength	%	3,9			4,1		
Elongation at break	%	5,1			6		
Flexion							
Modulus	N/mm ²	3 100			3 200		
Maximum strength	N/mm ²	120			122		
Breaking Strength	N/mm ²	111			108		
Elongation at max strength	%	5,4			5,7		
Elongation at break	%	7,2			8,2		
Shear							
Breaking Strength	N/mm ²	47			49		
Compression							
Modulus	N/mm ²						
Yield strength	N/mm ²	99			105		
Offset compression yield	%	13,4			15,8		
Charpy impact strength							
Resilience	kJ/m ²	44			40		
DSC glass transition							
TG1 onset	°C	86			88		
TG1 max onset	°C	89			84		
DTMA glass transition							
TG tan delta	°C						
TeiG onset G'	°C						
TmG midpoint G'	°C						
TefG endpoint	°C						
TG peak G''	°C						



Mechanical properties on cast resin :

		SR Surf Clear EVO / SD EVO Fast	
Curing cycles	→	24 h @ Ta + 16 h @ 60 °C	
Tensile			
Modulus	N/mm ²	3 400	
Maximum strength	N/mm ²	68	
Breaking Strength	N/mm ²	65	
Elongation at max strength	%	4	
Elongation at break	%	6,5	
Flexion			
Modulus	N/mm ²	3 200	
Maximum strength	N/mm ²	117	
Breaking Strength	N/mm ²	103	
Elongation at max strength	%	5,6	
Elongation at break	%	8,5	
Shear			
Breaking Strength	N/mm ²	48	
Compression			
Modulus	N/mm ²		
Yield strength	N/mm ²	103	
Offset compression yield	%	14,3	
Charpy impact strength			
Resilience	kJ/m ²	38	
DSC glass transition			
TG1 onset	°C	80	
TG1 max onset	°C	80	
DTMA glass transition			
TG tan delta	°C		
TeiG onset G'	°C		
TmG midpoint G'	°C		
TefG endpoint	°C		
TG peak G''	°C		



Tests carried out on samples of pure cast resin, without prior degassing, between steel plates.

Measures undertaken according to the following norms:

Mechanical tests:

Tension:	NF EN ISO 527-2:2012
Flexion:	NF EN ISO 178:2011
Compression:	NF EN ISO 604:2004 or NF EN ISO 844:2014 (foam product)
Charpy impact strength:	NF EN ISO 179-1:2010
Shear Strength:	ASTM D732-17 (Punch Tool)
Interlaminar shrinkage strength:	ASTM D5528-13
Toughness (GIC et KIC) :	ISO 13586:2000

Water absorption: Internal. Polymerization according to cycle, machining, weighing, time spent in distilled water at 70 °C / 48 hours, weighing 1 hour after emerging,

Thermal tests:

Glass transition DSC:	NF EN ISO 11357-2:2014 -5°C to 180 °C under nitrogen gas
T_g , or Onset:	1 st scan at 20 °C/min
T_g , maximum or Onset:	2 nd scan at 20 °C/min

Glass transition DTMA:	Temperature ramp 0 °C to 180 °C @ 2°C/min under normal atmosphere
	NF EN ISO 11357-1:2016 T_g onset G'
	ASTM D4065-12 T_g peak G''

Physical tests:

Gardner color:	NF EN ISO 4630:2016	Visual method
Refractive index:	NF ISO 280:1999	
Viscosity:	NF EN ISO 3219:1994	Rheometer 50 mm, shear 10 s ⁻¹
Density on liquids:	ISO 2811-1:2016	Pycnometer
Density on solid:	NF EN ISO 1183-3:1999	Helium Pycnometer
Density on foam:	NF EN ISO 845:2009	
Gel time:	Cross G' G''	Rheometer CP50 - Shear rate 10 s ⁻¹
Green Carbone content:	ASTM D6866-16 or XP CEN/TS 16640 Avril 2014	

TA: Ambient temperature (20 to 25 °C)

LEGAL NOTES:

Information given in writing or verbally, in the context of our technical assistance and our trials, does not engage our responsibility. Information is given in good faith based on SICOMIN's current knowledge and experience of the products when properly stored, handled and applied under normal conditions in accordance with SICOMIN's recommendations. We advise users of SICOMIN products to check by some practical trials that they are suitable for the intended processes and applications. The customer's storage, the use, the implementation and the transformation of the supplied products are not under SICOMIN's control and entirely under the sole responsibility of the user.

SICOMIN reserves the right to change the properties of its products. All technical data stated in this Product Data Sheet are based on laboratory tests. Actual measured data and tolerance may vary due to circumstances beyond our control.

If our responsibility should nevertheless be involved, it would be, for all the damages, limited to the value of the goods supplied by us and processed by the customer. We guaranty the non-reproachable quality of our products, in the general context of sales and delivery. Users must always refer to the most recent issue of the local Product Data Sheet for the product concerned, copies of which will be supplied on request.

Ficha Técnica – SURF CLEAR EVO



Surf clear EVO

Sistema estratificação epoxy

Resina translúcida – verniz – estratificação - aplicações surf - excelente resistência aos UV

O sistema SURF CLEAR é um sistema epoxy bicomponente, especialmente formulado para a estratificação de artigos desportivos com fibras de vidro, carbono ou aramida, sendo compatível com todos os tipos de espumas (poliestireno, poliuretano, PVC, ...). Apresenta baixa viscosidade, boa resistência aos U.V, excelentes propriedades mecânicas, muito boa transparência e elevado brilho.

Este sistema é especialmente adaptado a fabricação de pranchas de surf e windsurf, podendo ser também utilizado para revestimento de papéis decorativos, formas em poliestireno ou como resina de vazamento translúcida.

Existem vários endurecedores, que permitem tempos de trabalhos variados, sendo que os mesmos podem ainda ser misturados entre eles para ajustar ao tempo de trabalho desejado.

Existem 3 endurecedores EVO com a mesma relação de mistura (2 / 1 em volume):

O Endurecedor Medium é recomendado para peças maiores, longboards, SUP ou no caso de temperaturas de trabalho elevadas (acima dos 35° C).

O Endurecedor Fast é recomendado para peças médias, shortboards ou quando a temperaturas de trabalho é de aproximadamente 20° C.

O Endurecedor Super Fast é recomendado para peças pequenas, acabamento e reparações ou quando a temperaturas de trabalho seja inferior a 18° C.

De modo a obter os melhores resultados devem ser adotadas, dentro do possível, as seguintes recomendações:

Temperatura de trabalho ideal: temperatura constante entre 18 e 30° C

Evitar trabalhar com humidade elevada.

Evitar expor as peças aos UV por um período de 7 dias (a 18° C), de modo a garantir melhor resistência aos U.V e melhores propriedades mecânicas.

Não diluir.

Pode ser aplicado diretamente um verniz (poliuretano ou outros) após lixagem da superfície em Surf Clear EVO.

A REBELCO pode fornecer em complemento, o aditivo OH que quando misturado com a Surf Clear Evo permite obter laminados extremamente brancos e brilhantes. Quando aplicado sobre cores escuras recomenda-se um ensaio prévio, pois pode haver alteração da cor final.

A Surf Clear EVO é uma resina de última geração com recurso a novas formulações mais ecológicas.

A Surf Clear EVO contém 40 % de “Carbono Verde” proveniente de biomassa.

REBELCO, Lda - Rua São Francisco, Parque Doroana, Armazém CG, 2645-019 Alcabideche, Portugal.
Telf (+351) 214566335 / www.rebelco.pt / e-mail geral@rebelco.pt

1

Ficha Técnica – SURF CLEAR EVO

Propriedades físicas

Componentes

	SR Surf Clear	SD SC Medium	SD SC Fast	SD SC Super Fast
Densidade (20° C)	1.18	0.992	1.006	1.022
Aspetto	Violeta	Transparente	Transparente	Transparente
Viscosidade a 25°C	1550	100	190	270
Relação de mistura (em peso)	100	39	41	43
Relação de mistura (em volume)	100	50	50	50

Mistura

Densidade 20°C (g/m3)	1,0	1,0	1,0
Aspetto	Transparente	Transparente	Transparente
Viscosidade da mistura a 30° C (Cps)	600±120	660±130	900±180
Pot life (150g a 20° C)	30 m	16 m	13 m
Tempo de gel em filme a 20°C	190 m	160 m	130 m
Tempo para lixagem a 25°C	12 h	10 h	6 a 8 h
Polimerização total a 20°C	14 Dias	14 Dias	14 Dias

Cuidados de utilização

Os postos de trabalho devem estar corretamente ventilados. Toda a manipulação destes produtos deve ser feita com luvas.

No caso de contacto com a pele, lavar imediatamente com água e sabão. Não utilizar solventes para remover o produto da pele.

No caso de contacto com os olhos, lavar imediatamente e abundantemente com água e consultar um médico. Forneça toda a informação necessária as pessoas que vão utilizar estes produtos.

Os valores indicados são fornecidos com base no conhecimento actual e são apenas indicativos não podendo ser usados para elaborar qualquer especificação técnica. Para mais informações consulte os nossos serviços técnicos.