

Estudo da viabilidade do pêlo do cão Serra da Estrela para a produção de compósitos verdes

Versão Final Após Defesa

Alexandra Soledade da Costa Gomes

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Química Industrial
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Doutora Joana Magalhães Gonçalves Costa Vieira
Co-orientador: Prof. Doutor André Ferreira Costa Vieira

dezembro de 2023

Declaração de Integridade

Eu, Alexandra Soledade da Costa Gomes, que abaixo assino, estudante com o número de inscrição M11095 no 2º ciclo de estudos do curso de química industrial da Faculdade de Ciências, declaro ter desenvolvido o presente trabalho e elaborado o presente texto em total consonância com o **Código de Integridades da Universidade da Beira Interior**.

Mais concretamente afirmo não ter incorrido em qualquer das variedades de Fraude Académica, e que aqui declaro conhecer, que em particular atendi à exigida referência de frases, extratos, imagens e outras formas de trabalho intelectual, e assumindo assim na íntegra as responsabilidades da autoria.

Universidade da Beira Interior, Covilhã 05 /01 /2024

Dedicatória



Agradecimentos

Agradeço à minha orientadora Doutora Joana, por ter aceitado embarcar neste projeto numa altura tão turbulenta. Por toda a dedicação, paciência, incentivo e por me ter motivado ao longo de todo o projeto.

Ao meu co-orientador Professor Doutor André pelas valiosas contribuições dadas durante todo o processo.

Ao Professor assistente Paulo Santos pelo apoio prestado no laboratório de compósitos.

Ao Professor Doutor Paulo Fiadeiro pelo valioso auxílio na tarefa da molhabilidade das fibras.

À Nikky pela gentileza de fornecer a matéria-prima que me permitiu desenvolver este trabalho.

Agradeço também às unidades de investigação FibEnTech-UBI, no âmbito do projeto referência UIDB/00195/2020, e C-MAST-UBI, no âmbito do projeto de referência UIDB/00151/2020, ambos financiados pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, IP/MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC).

Aos meus pais, pelo apoio, força e amor incondicional. Sem vocês a realização desse sonho não seria possível.

Ao Daniel, por toda a dedicação, paciência e companheirismo.

Resumo

A emergência ambiental tem alertado consumidores e indústrias a escolher produtos derivados de fontes renováveis em detrimento de derivados de petróleo. No caso particular da indústria de compósitos, os trabalhos de I&D têm sido constantes de modo a conseguir a substituição das fibras sintéticas tradicionais por fibras naturais, mantendo ou melhorando as propriedades do material. Os compósitos verdes são ecológicos, de baixo custo, baixo peso e boas propriedades mecânicas e térmicas, tornando-os essenciais para manter a sustentabilidade na indústria dos materiais.

As fibras naturais de origem vegetal dominam o campo de pesquisa de fibras substitutas às fibras sintéticas, deste modo no presente trabalho foi estudada a viabilidade de aplicação de fibra natural de origem animal, o pêlo de lã de cão Serra da Estrela, em compósitos verdes.

Neste trabalho foram desenvolvidos compósitos com lã de cão Serra da Estrela com diferentes tratamentos químicos e resina epóxi verde, realizou-se a caracterização das fibras por Difração de Raios-X (DR-X), a sua análise no Microscópio eletrónico de varrimento (SEM) e ainda a molhabilidade da fibra. Foram ainda estudadas e analisadas as propriedades mecânicas dos compósitos através dos ensaios mecânicos de tração, flexão e relaxamento. Por fim, foi realizada uma discussão crítica dos resultados obtidos nos ensaios realizados, onde foi possível verificar que o tratamento com o álcool polivinílico (PVA) danificou a fibra, comprometendo o desempenho do compósito, e que o compósito de fibra de lã de cão sem tratamento e a tratada com hidróxido de sódio (NaOH) tiveram comportamentos similares, pelo que foi possível verificar que o tratamento com NaOH apenas funcionou como um tratamento de lavagem das fibras.

Palavras-chave

Compósitos verdes; fibras animais; fibra de lã de cão Serra da Estrela; resina epóxida verde

Abstract

The environmental emergency has alerted consumers and industries to choose products derived from renewable sources over petroleum end products. In the particular case of the composite industry, R&D work has been constant in order to achieve the replacement of traditional synthetic fibers with natural fibers, maintaining or improving the properties of the material. Green composites are environmentally friendly, low cost, low weight and have good mechanical and thermal properties, making them essential for maintaining sustainability in the materials industry.

Natural fibers of vegetable origin dominate the field of research into substitute fibers for synthetic fibers, so in the present work the feasibility of applying a natural fiber of animal origin, the wool hair of the Serra da Estrela Mountain dog, in green composites was studied.

In this work, composites were developed with Serra da Estrela dog wool with different chemical treatments and green epoxy resin, the fibers were characterized by X-Ray Diffraction (XRD), their analysis using the Scanning Electron Microscope (SEM) and also the wettability of the fiber. The mechanical properties of the composites were also studied and analyzed through mechanical tensile, flexion and relaxation tests. Finally, a critical discussion of the results obtained in the tests carried out was done, and it was possible to verify that the treatment with polyvinyl alcohol (PVA) damaged the fiber, compromising the performance of the composite, and that the untreated dog wool fiber composite and the one treated with sodium hydroxide (NaOH) had similar behavior, so it was possible to verify that the NaOH treatment only worked as a fiber washing treatment.

Keywords

Green composites; animal fibers; Serra da Estrela dog wool fiber; green epoxy resin

Índice

Capítulo I - Enquadramento	1
1. Objetivos	2
2. Organização da Dissertação	2
Capítulo II – Estado da Arte	5
1. Materiais Compósitos	5
1.1. Biocompósitos	6
1.1.1. Compósitos verdes reforçados com fibras naturais	7
1.2. Matriz	10
1.2.1. Resina Epóxida	12
1.2.1.1. Processo de cura e pós cura	13
1.2.1.2. Resina epóxida verde	15
1.3. Fibras de Reforço	18
1.3.1. Fibra de Vidro	21
1.3.2. Fibra de lã de cão Serra da Estrela	22
Capítulo III – Materiais e Métodos	25
1. Materiais	25
1.1. Fibras	25
1.1.1. Lã de pêlo de cão Serra da Estrela	25
1.1.2. Fibra de vidro	25
1.2. Resinas	25
2. Métodos	26
2.1. Caracterização das fibras	26
2.1.1. Difração de Raios-X (DR-X)	27
2.1.2. Microscópio Eletrónico de Varrimento (SEM)	27
2.1.3. Teste ótico de molhabilidade das fibras de lã de cão Serra da Estrela	27
2.2. Tratamentos Químicos das fibras de lã de cão Serra da Estrela	29
2.2.1. Tratamento com Álcool Polivinílico (PVA)	29
2.2.2. Tratamento com Hidróxido de Sódio (NaOH)	32
2.3. Produção das placas de compósito	34
2.4. Testes Mecânicos	40
2.4.1. Ensaios de Tração	40
2.4.2. Ensaios de Flexão	41

2.4.3. Ensaio de Relaxamento	43
Capítulo IV – Resultados e Discussão	44
1. Caracterização das Fibras	44
1.1 Difração de Raios-x (DR-X)	44
1.2 Microscópio eletrônico de varrimento (SEM)	45
1.3 Teste ótico de molhabilidade das fibras de lã de cão Serra da Estrela	47
2. Testes Mecânicos	48
2.1 Ensaio de Tração	48
2.2 Ensaio de Flexão	51
2.3 Ensaio de Relaxamento	55
Capítulo V – Conclusões e Trabalhos Futuros	56
1. Objetivos Alcançados	56
2. Contribuição deste Estudo	57
3. Trabalhos Futuros	57
Referências Bibliográficas	58
Anexos	64
Anexo A	66
Anexo B	74
Anexo C	82
Anexo D	86
Anexo E	90
Anexo F	94
Anexo G	98

Lista de Figuras

Capítulo I

Figura 1 – Esquema organização dissertação	3
--	---

Capítulo II

Figura 2 – Evolução dos materiais compósitos	6
Figura 3 – Classificação de compósitos ecológicos	7
Figura 4 – Trilogia do desempenho e sucesso dos novos compósitos reforçados com fibras naturais	8
Figura 5 – Os três núcleos de sustentabilidade	9
Figura 6 – Estrutura anel epóxi	13
Figura 7 – Processo de cura resina epóxida	13
Figura 8 – Fases de Cura da resina	14
Figura 9 – Fontes renováveis para sintetizar a resina epóxida de base biológica	16
Figura 10 – Diferentes rotas de produção da resina epóxida convencional e epóxida verde	17
Figura 11 – Reação obtenção da epicloridrina a partir do processo convencional e processo verde	17
Figura 12 – Resultados comparativos do estudo do ciclo de vida das resinas Epóxidas verde e convencional	18
Figura 13 – Classificação dos materiais compósitos relativamente ao seu reforço	18
Figura 14 – Exemplos de fibras naturais	19
Figura 15 – Configurações da fibra de vidro	21
Figura 16 – Estrutura queratina	23
Figura 17 – Estrutura básica da lã	24
Figura 18 – Distribuição do número de cães por mil habitantes na Europa	24

Capítulo III

Figura 19 – Porta amostras para a realização do DR-X	27
Figura 20 – Estrutura para a realização do teste de molhabilidade da fibra	28
Figura 21 – Gota de resina com a demonstração do raio maior e raio menor	28
Figura 22 – Representação da extração sólido-líquido	29

Figura 23 - Secagem das fibras na estufa	30
Figura 24 - Recuperação do solvente	30
Figura 25 - Fibra de pêlo de cão embebida na solução de PVA	31
Figura 26 - a) Fibras no processo de filtração a vácuo; b) Aspeto das fibras de pêlo de cão após a filtração	31
Figura 27 - a) Fibras a secar na estufa; b) Aspeto das fibras após secagem na estufa	32
Figura 28 - Fibra de pêlo de cão embebida na solução de NaOH	33
Figura 29 - a) Fibras no processo de filtração a vácuo; b) Aspeto das fibras de pêlo de cão após a filtração a vácuo	33
Figura 30 - a) Fibras a secar na estufa; b) Aspeto das fibras depois de secas	34
Figura 31 - Esquema de produção das placas de compósito	34
Figura 32 - Mistura da resina com endurecedor	35
Figura 33 - Mistura da matriz com a fibra de reforço	35
Figura 34 - Fibras de reforço embebidas na matriz dispersas no molde	36
Figura 35 - Fibra total no molde	36
Figura 36 - Placa de compósito sob vácuo	37
Figura 37 - Placa de compósito a secar na estufa entre vidros	37
Figura 38 - Placas de compósito produzidas	38
Figura 39 - Provetes cortados na máquina de corte CNC por jato de água	39
Figura 40 - Ensaio de tração	41
Figura 41 - Ensaio flexão	42
Capítulo IV	
Figura 42 - Padrões de DR-X para o pêlo de cão Serra da Estrela	45
Figura 43 - Imagens obtidas no SEM com ampliação 1.00 K	45
Figura 44 - Imagens obtidas no SEM	46
Figura 45 - Escamas do subpêlo da Fptq	46
Figura 46 - Molhabilidade da fibra de lã de cão Serra da Estrela com a resina epóxida verde	47
Figura 47 - Resultados da resistência à tração (MPa)	48
Figura 48 - Gráfico de tensão/deformação do ensaio à tração em função da deformação	49
Figura 49 - Resultados da deformação na rutura (%)	49
Figura 50 - Resultados Módulo de Young (GPa)	50

Figura 51 - Gráfico da curva média tensão/deformação devida a um carregamento à flexão em função da deformação	52
Figura 52– Resultados da resistência à flexão (MPa)	53
Figura 53 - Resultados da deformação máxima à flexão (%)	54
Figura 54 – Resultados do módulo de rigidez à flexão (GPa)	55
Figura 55 – Gráfico da tensão de relaxamento (Mpa) em função do Tempo (min) com o ajuste do modelo KWW	55
Anexo C	
Figura c 1- Gota de resina com a demonstração do raio maior e raio menor	83
Anexo D	
Figura D1 - Lavagem das fibras com a solução de NaOH com auxílio do agitador mecânico de pás	87
Figura D2 - a) Fibras a secas no suporte A; b) Fibras a secar no suporte B	88
Anexo E	
Figura E1- Rotor a homogeneizar a resina e o endurecedor com a fibra de vidro	91
Figura E2 -Mistura sob vácuo	92
Figura E3 - Compósito no saco de vácuo	92
Figura E4 - Compósito de fibra de vidro	93
Anexo F	
Figura F1 - Mistura da resina com endurecedor	95
Figura F2 - Mistura da matriz com a fibra	96
Figura F3 - Fibra de pêlo de cão no molde	96
Figura F4 - Compósito no saco de vácuo	97
Figura F5 - Compósito com pêlo de cão tal e qual	97

Lista de Tabelas

Capítulo II

Tabela 1 - Recursos naturais para o desenvolvimento de produtos de base biológica	11
Tabela 2- Propriedades de algumas fibras naturais vegetais e animais	20
Tabela 3 - Comparação dos aspetos técnicos e ambientais entre fibras naturais e sintéticas	21
Tabela 4 - Composição dos diferentes tipos de fibra de vidro	22
Tabela 5 - Características da fibra de vidro tipo E	22

Capítulo III

Tabela 6 - Dados da viscosidade da resina SR Greenepoxy 56/SD Surf Clear	25
Tabela 7 - Tempo de gel da resina SR Greenepoxy 56/SD Surf Clear	26
Tabela 8 - Dados da viscosidade da resina SR8100/SD 3304	26
Tabela 9 - Tempo de gel da resina SR8100/SD 3304	26
Tabela 10 - Dimensões dos provetes	40
Tabela 11 - Distância entre apoios ensaio de flexão	42
Tabela 12 - Resultados do estado de isotensão e isodeformação dos diferentes compósitos	51
Tabela 13 - Resultados da tenacidade dos diferentes compósitos	53

Lista de Acrónimos

DR-X	Difração de Raios-X
FEDIAF	Federação Europeia da Indústria de Alimentos para Animais de Estimação
FpNaOH	Fibra de pêlo de cão Serra da Estrela tratada com NaOH
Fptq	Fibra de pêlo de cão Serra da Estrela tal e qual
FpPVA	Fibra de pêlo de cão Serra da Estrela tratada com PVA
I&D	Investigação e desenvolvimento
M_{Ec}X_{Fv}	Matriz epóxida convencional reforçada com fibra de vidro
M_{Ev}X_{FpNaOH}	Matriz epóxida verde reforçada com fibra de pêlo de cão Serra da Estrela tratada com NaOH
M_{Ev}X_{Fptq}	Matriz epóxida verde reforçada com fibra de pêlo de cão Serra da Estrela tal e qual
M_{Ev}X_{FpPVA}	Matriz epóxida verde reforçada com fibra de pêlo de cão Serra da Estrela tratada com PVA
NaOH	Hidróxido de Sódio
PVA	Álcool Polivinílico
ROI	Região de interesse
SEM	Microscopia eletrónica de varrimento
UBI	Universidade da Beira Interior

Capítulo I – Enquadramento

A preocupação da sociedade pelo meio ambiente tem aumentando continuamente ao longo dos últimos anos. A influência social, as novas orientações sobre reciclagem, o marketing verde e a mudança intelectual têm sensibilizado os consumidores a eleger produtos provenientes de fontes renováveis. O consumismo generalizado da população, levou a um aumento da utilização de recursos naturais para que fosse possível suprimir as necessidades populacionais. Neste sentido, os governos e as organizações internacionais têm promulgado regras e restrições na utilização dos recursos naturais. Neste contexto, a indústria de compósitos necessita de trabalhos I&D que possam resultar no desenvolvimento de alternativas e eventual remoção de derivados de petróleo na sua produção, e assim, desenvolver compósitos ecológicos, também denominados de compósitos verdes, de modo a aumentar a sustentabilidade nesta indústria (Kamarudin et al., 2022; Peças et al., 2018).

A procura por materiais mais ecológicos com ênfase em matérias-primas renováveis tem sido uma constante, assim, os investigadores tentam substituir as fibras sintéticas como material de reforço de compósitos pelas fibras naturais. As fibras sintéticas são derivadas de combustíveis fósseis, é usada demasiada energia na sua produção e não são biodegradáveis. Em contrapartida, as fibras naturais são biodegradáveis e não são tóxicas para os animais e ambiente. Sendo os combustíveis fósseis umas das principais causas da degradação ambiental e que gera mais preocupação na sua preservação, a substituição de materiais daí derivados torna-se inevitável. Assim, os compósitos reforçados com fibras naturais têm demonstrado ser uma forma eficaz de melhorar a qualidade dos produtos em relação ao meio ambiente, tornando-se extremamente importantes (Kamarudin et al., 2022; Manivannan et al., 2020; Rwawiire et al., 2015).

As comunidades científicas em todo o mundo têm investigado os aspetos promissores da aplicabilidade comercial das fibras naturais, bem como o seu desempenho e sustentabilidade. Fibras naturais como juta, cana-de-açúcar, sisal, coco, cascas de milho, bambu e cânhamo têm tido desempenhos bem sucedidos na fabricação de biocompósitos, provando a sua capacidade para substituir as fibras sintéticas no reforço de materiais compósitos (Conzatti et al., 2012; Manivannan et al., 2020; Ramachandran et al., 2022; Suriani et al., 2021).

Na literatura as fibras mais estudadas são as fibras de origem vegetal. Sendo estas fibras classificadas como fibras naturais, esta é uma opção atraente para a indústria de compósitos, pois a elevada exigência e demanda por fibras, gera a necessidade de pesquisar e identificar novas fibras que possam ter potencial para a produção deste tipo de materiais (Peças et al., 2018; Ramamoorthy et al., 2018).

Neste contexto, o presente trabalho pretende investigar a aplicação de uma fibra de origem animal inovadora e não explorada pela literatura com o intuito de aumentar o leque de opções de fibras naturais para reforço em biocompósitos. Presentemente, da revisão bibliográfica efetuada, foi encontrado um número muito limitado de artigos em que é usado fibras de pêlo de cão como reforço numa matriz polimérica para produção de compósitos.

1. Objetivos

A presente dissertação tem como principal objetivo estudar a viabilidade da aplicação da fibra natural de pêlo de cão Serra da Estrela, na produção de um compósito verde. De modo a efetuar este estudo vai-se usar o resíduo de pêlo de cão Serra da Estrela (raça autóctone), como reforço fibra natural animal e uma resina epóxida verde (de base vegetal), como matriz para a produção de um compósito verde. Para cumprir este objetivo principal, o trabalho foi dividido em 3 tarefas:

1. Fazer os tratamentos químicos e a caracterização das fibras naturais de pêlo do cão Serra da Estrela.
2. Desenvolver e produzir quatro placas de compósito, uma de resina epóxida convencional (de base de petróleo) com fibra de vidro, e as restantes três com fibra de pêlo de cão e resina epóxida verde (de base vegetal) sendo que a primeira placa a fibra de pêlo de cão tem um tratamento com Hidróxido de Sódio (NaOH), na segunda a fibra de reforço tem um tratamento de Álcool Polivinílico (PVA) e na terceira, a fibra sem tratamento, ou seja, o pêlo tal e qual extraído do cão Serra da Estrela.
3. Caracterizar e avaliar os compósitos produzidos mecanicamente.

2. Organização da dissertação

Esta dissertação é constituída por 5 capítulos, em que o capítulo I apresenta os objetivos e a organização do documento. O capítulo II é constituído pelo estado da arte em que é realizada uma revisão bibliográfica sobre o tema. O capítulo III descreve os materiais e os métodos utilizados no desenvolvimento experimental. No capítulo IV são apresentados e discutidos os resultados obtidos experimentalmente. No capítulo V encontra-se a conclusão e perspetivas de trabalhos futuros. Por fim encontram-se os anexos em que no anexo A e B encontram-se as fichas técnicas da resina epóxida verde e epóxida convencional respetivamente, no anexo C o cálculo do volume da gota, no anexo D otimização do tratamento da fibra de pêlo de cão com NaOH, no anexo E a produção da placa de compósito com fibra de vidro, no anexo F a produção da placa de compósito com fibra de pêlo de cão e no anexo G encontram-se as comunicações científicas na forma de um poster no âmbito do evento do dia internacional da mulher na engenharia promovido pela comissão para a igualdade, faculdade de engenharia da UBI (Universidade da Beira Interior) em conjunto com o colégio de engenharia de materiais da região centro e órgãos regionais e nacionais da ordem dos engenheiros sob o projeto INOVC+ no

dia 23 de junho de 2023. Na Figura 1 está representado de forma simplificada o enquadramento desta dissertação.

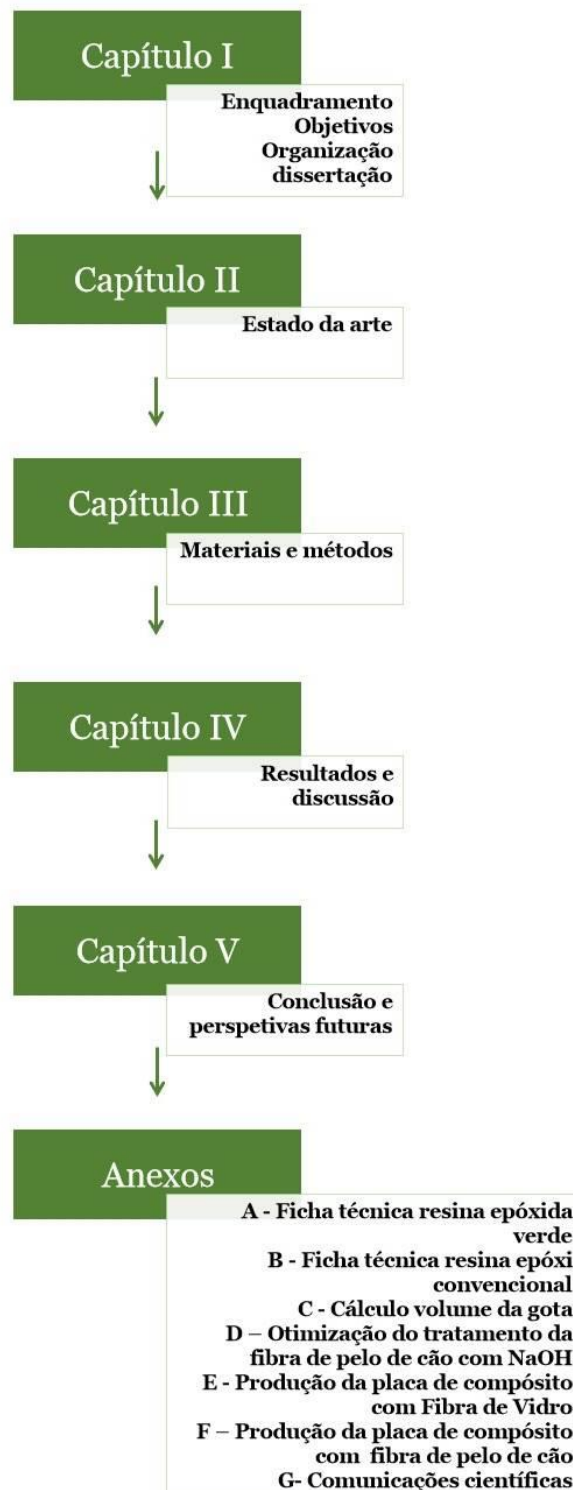


Figura 1 - Esquema organização dissertação

Capítulo II – Estado da Arte

1. Materiais Compósitos

Os materiais são parte indispensável no cotidiano desde o início da vida na terra. Ao longo do tempo foram desenvolvidos e investigados incontáveis novos materiais, tanto que a busca por materiais inovadores se mantém ininterrupta. Na atualidade, os materiais compósitos são considerados uma das conquistas mais significativas na área dos materiais, sendo reconhecidos como os materiais com mais potencial e promissores disponíveis no mercado mundial (Islam et al., 2022; Rakesh & Singh, 2019).

Os compósitos verdes de matriz polimérica reforçados com fibras naturais têm um elevado interesse devido ao seu baixo peso, natureza ecológica, biodegradabilidade, baixo custo e propriedades mecânicas e térmicas nobres. Essas propriedades tornam estes materiais únicos para diversas aplicações como por exemplo no setor aeronáutico, automotivo e ferroviário (Khalid et al., 2021; Thakur et al., 2017).

Na área da ciência dos materiais, os compósitos são materiais multifásicos com a combinação artificial e heterogênea de dois constituintes de fases diferentes, obtidos pela combinação de dois ou mais componentes fisicamente distintos. Esses componentes são constituídos por uma fase contínua denominada matriz e uma fase descontínua denominada reforço. O reforço normalmente suporta a carga, à medida que a matriz mantém o compósito ligado e também transfere carga para os diferentes constituintes do reforço (Islam et al., 2022; Rakesh & Singh, 2019; Thakur et al., 2017).

O processo de produção de materiais compósitos poliméricos reforçados com fibras envolve uma sequência de etapas, como seleção de fibras de reforço e as suas formas, seleção e aplicação da matriz polimérica, adesão da matriz ao reforço, desmoldagem e cura, e no final, se necessário, o corte. O método de processamento industrial vai depender da complexidade do projeto, qualidade do produto, tolerância dimensional, custo, tempo e volume de produção. O tipo de matriz, tipo de reforço, fração de volume, viscosidade, comportamento higroscópico da matriz e do reforço, bem como a temperatura de processamento e o tempo de gel da matriz são pontos a termos em consideração para a escolha do processo de produção (Islam et al., 2022).

Dentro das diferentes classes de compósitos, os de matriz polimérica estão a substituir abundantemente os materiais convencionais. Nestes compósitos a matriz é um componente polimérico, constituído maioritariamente à base de hidrocarbonetos, enquanto os materiais de reforço são principalmente fibras sintéticas, usualmente vidro, carbono e aramida (Islam et al., 2022; Rakesh & Singh, 2019; Thakur et al., 2017).

Os compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras sintéticas são usados em diversas aplicações com elevada eficiência, mas é muito complicado separar ou reutilizar os seus componentes após a sua vida útil, provocando uma elevada preocupação para a conservação do meio ambiente. Deste modo, os novos materiais compósitos estão a ser desenvolvidos e redesenhados com o intuito de introduzir no mercado novos produtos de uma forma sustentável e responsável. Na Figura 2 está representada a evolução dos materiais compósitos desde os compósitos tradicionais até aos compósitos verdes (Islam et al., 2022; Peças et al., 2018).



Figura 2 - Evolução dos materiais compósitos

1.1. Biocompósitos

O conceito de química verde e a política de desenvolvimento sustentável, juntamente com o consumismo das populações ao longo dos anos impõe às indústrias e à tecnologia uma mudança de paradigma no uso de matérias-primas à base de petróleo para a utilização de recursos renováveis. De facto, o esgotamento dos recursos de combustíveis fósseis, juntamente com os problemas dos aterros de resíduos e a crescente consciência ecológica, social e económica, bem como o elevado custo dos recursos petrolíferos tem aumentado a busca pela utilização de materiais mais verdes, sustentáveis e ecologicamente corretos. Neste sentido, os biocompósitos podem ser uma base para a produção de diversos produtos eco eficientes e sustentáveis que são capazes de competir no mercado atual, com os produtos feitos exclusivamente com matérias-primas à base de petróleo (Kamarudin et al., 2022; Ramachandran et al., 2022; Thakur et al., 2017).

Biocompósitos são produzidos a partir de recursos renováveis e/ou naturais, devido à sua biodegradabilidade e propriedades sustentáveis, são considerados materiais de última geração. Os biocompósitos podem ser classificados como compósitos verdes, em que todos os

constituintes são provenientes de recursos renováveis ou parcialmente ecológicos, em que um dos constituintes, fibra ou matriz, é obtido de recursos renováveis e o outro constituinte é derivado de petróleo (Figura 3). Os biocompósitos têm sido muito estudados e utilizados devido a características interessantes como a biodegradabilidade, baixo custo, elevada disponibilidade, menor necessidade de energia na sua produção e benefícios ambientais, para além de terem aplicabilidade em diversos setores como automóvel, marinha, aeroespacial, aplicações estruturais e de infraestrutura, embalagens e indústria eletrónica (Ahmad et al., 2022; Islam et al., 2022; Peças et al., 2018).

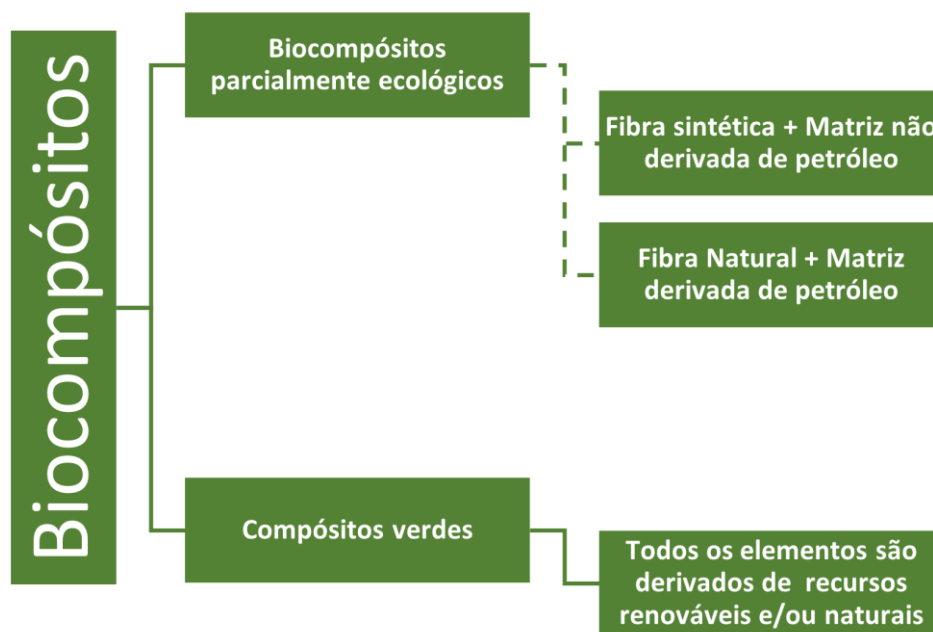


Figura 3 - Classificação de compósitos ecológicos

1.1.1. Compósitos verdes reforçados com fibras naturais

O uso de recursos naturais para desenvolver materiais de alto desempenho está a aumentar. Assim, as fibras naturais surgiram como uma nova geração de reforço e suplemento para polímeros. A relação custo-eficácia, renovabilidade, fácil disponibilidade e biodegradabilidade são algumas das vantagens significativas das fibras naturais que lhes permite competir com as fibras sintéticas tradicionais como, vidro, carbono e aramida em aplicações industriais atuais (Islam et al., 2022; Kamarudin et al., 2022; Suriani et al., 2021).

Quando falamos de sustentabilidade de um produto referimo-nos à geração de um menor impacto ambiental possível. As empresas devem seguir modelos de negócio com opções mais ecológicas, isto é, devem ter em conta o tipo de matéria-prima e a disponibilidade desta a nível local. Empresas de âmbito nacional oferecem benefícios tanto a nível económico como ambiental e social. A nível económico promovem a economia local empregando mão de obra e utilizando matérias-primas locais. A nível ambiental o transporte das matérias-primas são

através de trajetos mais rápidos e curtos diminuindo as emissões de CO2 e gerando menos resíduos e desperdício de embalagem. A nível social estas empresas oferecem produtos e soluções adequadas às necessidades do mercado do país (Rico,2014).

As fibras naturais podem ser obtidas a partir de resíduos gerados de culturas agrícolas, de criação de animais e até de alguns tipos comércio, ajudando desta forma a resolver problemas de descarte de resíduos e a reduzirem a poluição ambiental, mas também podem ser obtidas a partir de culturas agrícolas criadas para a produção destas fibras. Neste contexto, o uso de fibras naturais criaria oportunidades de emprego em regiões menos desenvolvidas, ajudando a alcançar os objetivos de desenvolvimento sustentável das Nações Unidas. Deste modo, as fibras naturais não só são uma opção atraente para as indústrias enfrentarem os desafios socioeconómicos e ambientais, como também desempenharão um papel crucial no desenvolvimento socioeconómico da nossa sociedade (Islam et al., 2022; Kamarudin et al., 2022; Peças et al., 2018; Suriani et al., 2021).

Os atributos específicos das fibras naturais sustentam a inovação, proporcionando assim uma maior procura no mercado, estimulando oportunidades e o sucesso comercial de novos compósitos reforçados com fibras naturais (Ramachandran et al., 2022). A trilogia de desempenho e sucesso comercial destes materiais está representada na Figura 4.

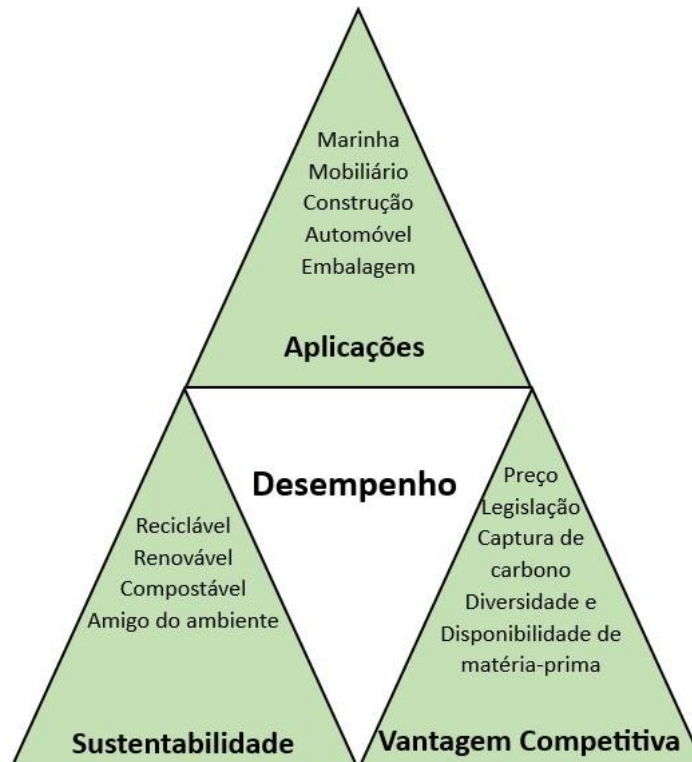


Figura 4 - Trilogia do desempenho e sucesso dos novos compósitos reforçados com fibras naturais adaptado de (Ramachandran et al., 2022)

O desenvolvimento de compósitos de matriz polimérica verde reforçados com fibras naturais (vegetais ou animais) enquadram-se no conceito de sustentabilidade, que é baseado em três núcleos principais formados pelo ponto de vista ambiental, social e económico. Os três núcleos em que se baseia o conceito de sustentabilidade está representado na Figura 5. Para alcançar a sustentabilidade é necessário seguir os padrões de consumo e produção, desde a seleção das matérias-primas, tecnologias e processos de produção utilizados até ao produto final. Assim, a produção de compósitos verdes reforçados com fibras naturais tem baixo impacto ambiental, é ecologicamente correto, uma vez que a sua produção tem um consumo de energia de cerca de 9,55 MJ/kg que é uma quantidade bem menor quando comparada à energia consumida pelos compósitos tradicionais reforçados com fibras sintéticas, por exemplo, com fibra de vidro que consome cerca de 54,7 MJ/kg (Kamarudin et al., 2022; Khalid et al., 2021).



Figura 5 - Os três núcleos de sustentabilidade adaptado de (Kamarudin et al., 2022)

Estima-se que os compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais tenham uma taxa de crescimento anual composta de 9,4% entre o período 2021-2027. Prevê-se ainda que a Europa permaneça como o maior mercado para estes materiais nos próximos anos devido à sua política e ao elevado nível de aceitação de compósitos ecologicamente corretos por parte das indústrias e dos governos (Kamarudin et al., 2022).

Apesar de o mercado mostrar uma demanda e crescimento contínuo por materiais compósitos reforçados com fibras naturais, existem ainda alguns desafios em relação à utilização de fibras naturais como a qualidade da fibra, estabilidade térmica, capacidade de absorção de água e incompatibilidade com matrizes poliméricas. No entanto, um bom equilíbrio entre o desempenho do compósito e o custo da produção pode ser alcançado com a seleção adequada de materiais e designs. A relação custo-eficácia destes materiais é uma das principais

motivações para o uso em aplicações industriais, bem como pela pesquisa incessante para melhorar o seu desempenho (Kamarudin et al., 2022; Khalid et al., 2021).

1.2. Matriz

A matriz dos materiais compósitos é responsável pela junção das fibras e definição do formato da peça, tendo como função estabilizar a forma do material de reforço permitindo mantê-lo nas posições pretendidas de modo a transferir e distribuir as solicitações mecânicas igualmente por todo o compósito. Para além de proteger o material de reforço do ambiente externo, nomeadamente a agressões químicas e físicas, como por exemplo, a abrasão, absorção de água, impacto, ataques químicos, entre outros (Ferreira, 2016; Mendonça, 2019; Tomar, 2018).

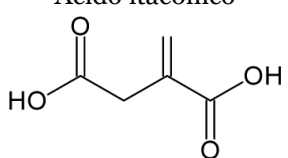
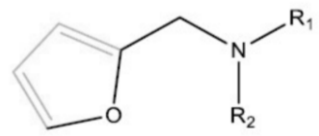
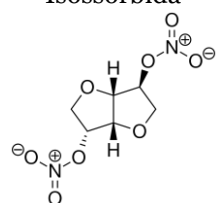
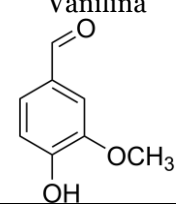
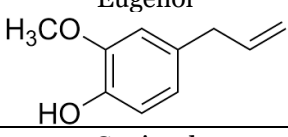
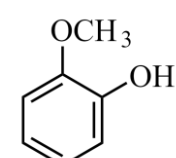
As matrizes podem ser classificadas como matrizes metálicas, cerâmicas ou poliméricas, no entanto as poliméricas têm uma elevada aplicabilidade devido à sua fácil utilização e às suas boas propriedades mecânicas e químicas. Na seleção de uma resina devem ser considerados fatores como a viscosidade, a interação resina/reforço, o custo, o desempenho térmico e o desempenho mecânico (Castro, 2013; Mendonça, 2019; Tomar, 2018).

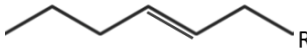
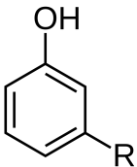
As resinas podem ser de origem natural e petroquímica, as naturais são obtidas recorrendo-se a fontes vegetais, enquanto as petroquímicas são obtidas a partir de combustíveis fósseis. As resinas que são provenientes do petróleo, geram grandes impactos ambientais principalmente no seu processo de extração e refinação. Atualmente as matrizes poliméricas com origem em derivados do petróleo são as mais utilizadas. Estas podem ser divididas em dois grupos, as matrizes termoplásticas, como polipropileno, polietileno, e as matrizes termoendurecíveis (resinas) como, as epóxicas, as vinil éster e as fenólicas. A principal diferença entre estes dois tipos de matrizes, encontra-se no facto de, nas termoplásticas as moléculas estarem ligadas entre si por ligações químicas secundárias, permitindo que sob aquecimento se consiga obter uma nova forma geométrica, enquanto que nas termoendurecíveis as moléculas estabelecem ligações cruzadas, dando origem a uma estrutura tridimensional rígida que não permite que haja alteração na sua geometria (Bai, 2013; Mendonça, 2019; Ramos, 2018; Tomar, 2018).

As resinas de base biológica são produzidas a partir de componentes renováveis como sacarose, lignina e óleos vegetais. Estas apresentam vantagens comparativamente com as resinas derivadas do petróleo, uma vez que utilizam de menos 65% de energia necessária na sua produção. Isto torna-as energeticamente eficientes e seguras, uma vez que são biodegradáveis e não tóxicas, e sendo produzidas a partir de biomassa faz com que sejam totalmente renováveis e recicláveis. Resinas fenólicas de base biológica, epóxi de base biológica, poliuretano de base biológica, acetato de celulose e biopoliésteres são exemplos de resinas de base biológica mais populares. No entanto, deve ter-se em consideração que devido às estruturas complexas dos recursos de biomassa, não é prático ou eficiente utilizá-las diretamente para sintetizar resinas termoendurecíveis de base biológica. Deste modo, a biomassa precisa ser transformada em

moléculas intermédias com grupos funcionais úteis ou mais simples que facilitem a reação química de sintetização da resina de base biológica. Na Tabela 1 estão apresentados de forma resumida os elementos de base biológica que podem dar origem às resinas termoendurecíveis e outros subprodutos da reação (Akter et al., 2022; Ares-Elejoste et al., 2023).

Tabela 1 - Recursos naturais para o desenvolvimento de produtos de base biológica (adaptado de (Ares-Elejoste et al., 2023))

Recurso	Produtos químicos relacionados	Grupo funcional	Produtos de base biológica
Carboidrato	<p>Ácido itacónico</p> 	Carboxilo; Ligação dupla c-c	Resina epóxida; Resina Poliéster; Diluentes reativos de resina de poliéster
	<p>Furfuril amina</p> 	Grupo furano	Benzoxazina; Resina epóxida
	<p>Isossorbida</p> 	Álcoois; Diheterociclos	Resina epóxida; Resina Poliéster; Agentes de cura
Lignina	<p>Vanilina</p> 	Aldeído	Benzoxazina; Resina epóxida
	<p>Eugenol</p> 	Ligação dupla c-c	Benzoxazina; Resina epóxida
	<p>Guaiacol</p> 	Ligação dupla c-c	Diluentes reativos de resina de poliéster
Óleos vegetais	Glicerídeo	Grupo éster; Cadeia alifática insaturada	Resina epóxida; Agentes de cura; Resina Poliéster;

		Diluentes reativos de resina de poliéster
	<p>Cardanol</p> 	Cadeia alifática insaturada Benzoxazina; Resina epóxida

1.2.1. Resina Epóxida

Dentro dos grupos dos polímeros termoendurecíveis, as resinas epóxidas são consideradas uma das classes mais importantes. Comparativamente a outras resinas termoendurecíveis, estas apresentam maior desempenho uma vez que apresentam melhores propriedades mecânicas, térmicas e elétricas, bem como maior resistência à absorção de humidade, líquidos e a ambientes corrosivos. Para além disso, as resinas epóxidas devido à ausência de estireno faz com que as emissões durante o processo de cura sejam significativamente menos tóxicas. Deste modo o seu manuseio é mais seguro tornando possível a sua utilização na produção de compósitos por moldação manual. Outra vantagem das resinas epóxidas, é a facilidade que têm em ser impregnadas no reforço e no seu manuseamento durante a produção, devido à sua baixa viscosidade antes da cura, bem como apresentarem grupos polares na sua estrutura que lhes permite excelente adesão a uma elevada diversidade de materiais de reforço. Estas resinas são mais caras, no entanto, as suas excelentes propriedades e a durabilidade em serviço tornam a relação custo/benefício bastante vantajosa (Bai, 2013; Duro, 2013; Ferreira, 2016; Mendonça, 2019; Ramos, 2018).

Em virtude das excelentes e diversas gamas de propriedades apresentadas pelas resinas epóxidas, elas são utilizadas como resinas de alto desempenho em diversas aplicações industriais como, revestimentos protetores, adesivos estruturais e matriz para compósitos reforçados com fibras (Bai, 2013; Castro, 2013).

As resinas epóxidas caracterizam-se por apresentarem grupos reativos denominados anéis epóxi, que são constituídos por um átomo de oxigénio que se liga a dois átomos de carbono na sua molécula, conforme mostrado na Figura 6 (Bai, 2013; Duro, 2013).

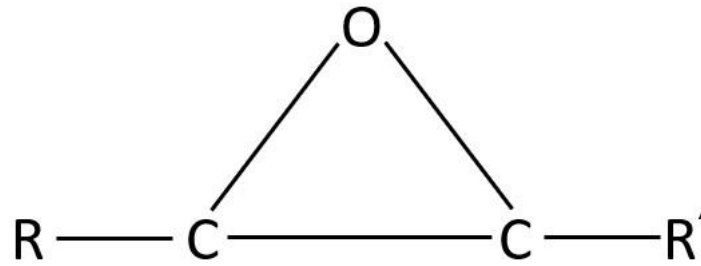


Figura 6 - Estrutura anel epóxi

1.2.1.1. **Processo de cura e pós cura**

O processo de cura envolve mudanças nas propriedades da resina por meio de reações químicas. Este processo é iniciado com a adição de um endurecedor, ou agente de cura, na resina. Quando a resina e o endurecedor são misturados, reagem de modo a formar uma rede tridimensional (Bai, 2013; Castro, 2013).

O anel epóxi é altamente reativo devido a uma distorção angular na sua estrutura. Deste modo o anel pode ser aberto facilmente fazendo-o reagir com o endurecedor. Normalmente os endurecedores são constituídos por grupos amina (NH_2) nas extremidades, que irão reagir com os dois grupos reativos presentes no anel epóxi, formando uma rede tridimensional, tal como se encontra representado na Figura 7. A reação de cura é exotérmica, uma vez que ocorre libertação de calor (Bai, 2013; Duro, 2013; Ramos, 2018; Silva, 2020).

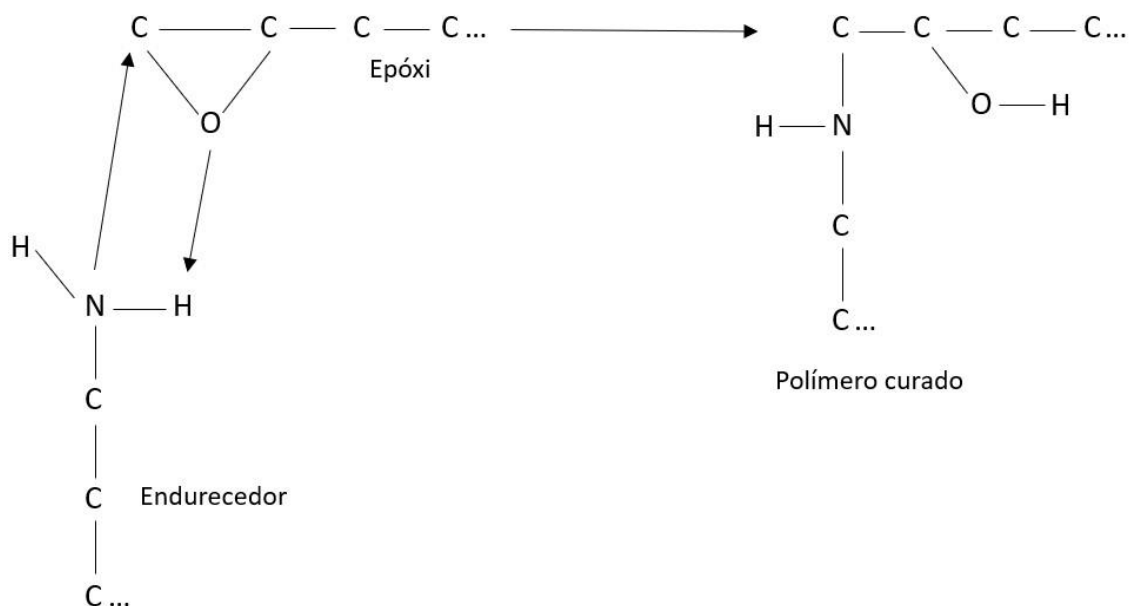


Figura 7 - Processo de cura resina epóxida

Durante o processo de cura as propriedades físicas e químicas dos reagentes sofrem alterações, como o aumento do peso molecular e da viscosidade do sistema resinoso. Estas alterações são provocadas pela reticulação que ocorre na cadeia polimérica durante a reação. Assim, é possível definir duas etapas fundamentais associadas a essas mudanças, a gelificação e a vitrificação (Bai, 2013). Inicialmente a resina encontra-se num estado líquido de baixa viscosidade. À medida que a reação avança, ocorrem alterações na viscosidade do sistema, a densidade das ligações cruzadas aumenta bem como a ramificação das cadeias, até que se forma um gel altamente viscoso. Este processo é denominado gelificação, ou seja, é caracterizado pela transição do estado líquido para o estado gel. Nesta fase, nem todos os grupos epóxi reagiram, então para garantir a reação completa e obter as propriedades mecânicas e físicas finais da resina é necessário pós-curar a resina. A este processo chama-se vitrificação. Após esta fase, pode-se considerar que a cura está finalizada. As fases do processo de cura da resina estão representadas na Figura 8 (Bai, 2013; Ferreira, 2016; Ramos, 2018; Silva, 2020).

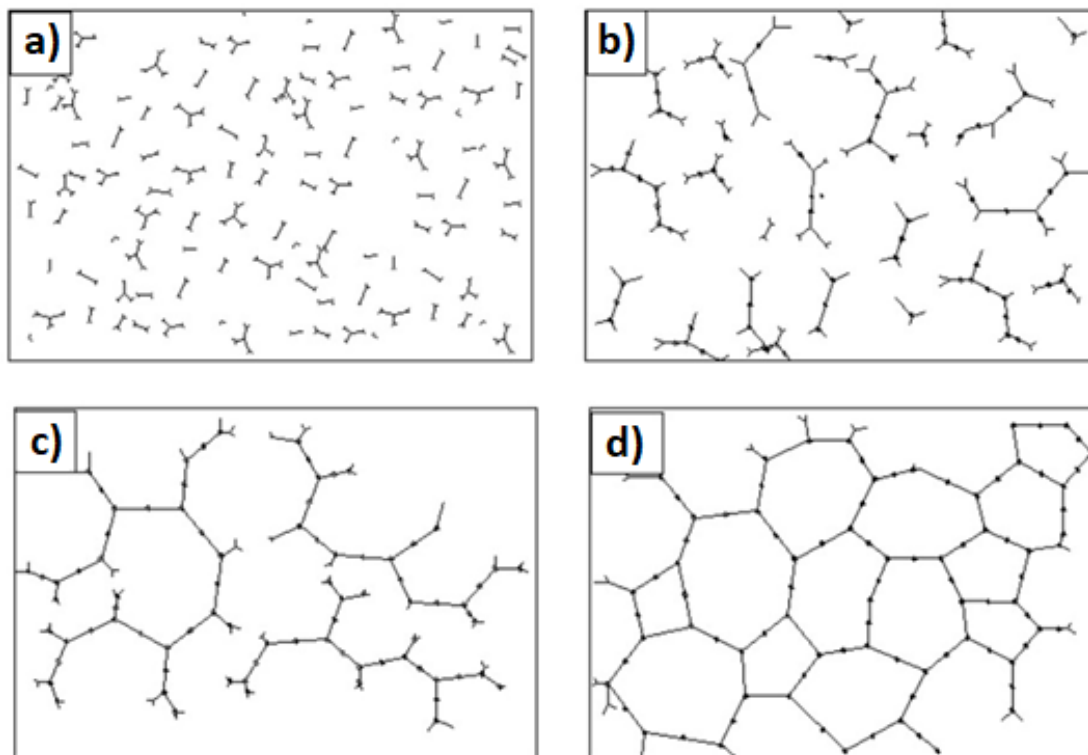


Figura 8 - Fases de cura da resina- a) Indução – Polímero e endurecedor antes da reação. b) Gelificação – Início da cura representado pelo aumento do tamanho das moléculas. c) Vitrificação – Formação da rede reticulada. d) Processo de cura completo (Silva, 2020)

A seleção das condições de cura e pós cura das resinas epóxicas é de extrema importância para que as propriedades sejam potencializadas e o material atinja o seu máximo desempenho. A estequiometria resina/endurecedor influencia a cura da resina, influenciando negativamente as propriedades finais pretendidas. Deste modo deve sempre ser respeitada a proporção de endurecedor /resina indicada pelo fornecedor. O tempo de gel é considerado um

dos parâmetros mais importantes para determinar a vida útil das resinas e o seu controle de qualidade. O tempo de gel é o intervalo entre a mistura inicial resina/endurecedor e a gelificação. Com o seu conhecimento é possível controlá-lo através da alteração da temperatura, teor e tipo de endurecedor, bem como estimar a temperatura e o tempo ideais para a cura do material (Duro, 2013; Ramos, 2018; Silva, 2020).

A temperatura também é uma das condições a ter em consideração. As resinas epóxicas podem ser curadas tanto à temperatura ambiente como a elevadas temperaturas. Assim, o aumento da temperatura no qual a resina é curada resulta na diminuição do tempo de cura. No entanto, a temperatura de cura nunca deve exceder a temperatura de transição vítrea do polímero, uma vez que acima desta temperatura existe uma perda das propriedades mecânicas. Deste modo, no processo de cura é necessário encontrar um equilíbrio entre a temperatura de cura e pós-cura e duração da mesma, de modo a alcançar as propriedades finais pretendidas para o material, de acordo com a informação disponibilizada pelo fornecedor da resina (Ferreira, 2016; Ramos, 2018).

1.2.1.2. Resina epóxida verde

Na sociedade atual, a incerteza em termos de preço e disponibilidade finita de produtos petroquímicos, bem como a procura por materiais ecologicamente corretos, mas com bom desempenho, tem crescido de forma acentuada e consistente. Neste sentido, com as tendências políticas e institucionais em direção aos princípios do desenvolvimento sustentável, tem havido uma constante pressão sob as indústrias químicas para que estas adotem o conceito de química sustentável, isto é, sintetizar produtos químicos utilizando recursos renováveis bem como produtos de base biológica (Auvergne et al., 2014; Baroncini et al., 2016; Ma et al., 2016; Thakur et al., 2017).

A resina epóxida verde é um produto de base biológica, que pode ser sintetizada através de diferentes recursos, tal como apresentado na Figura 9. No entanto os óleos vegetais são as matérias-primas mais adequadas para sintetizar este tipo de resina, uma vez que por conterem ligações duplas insaturadas, tornam-se uma melhor opção para promover reações de epoxidação (Ares-Elejoste et al., 2023).

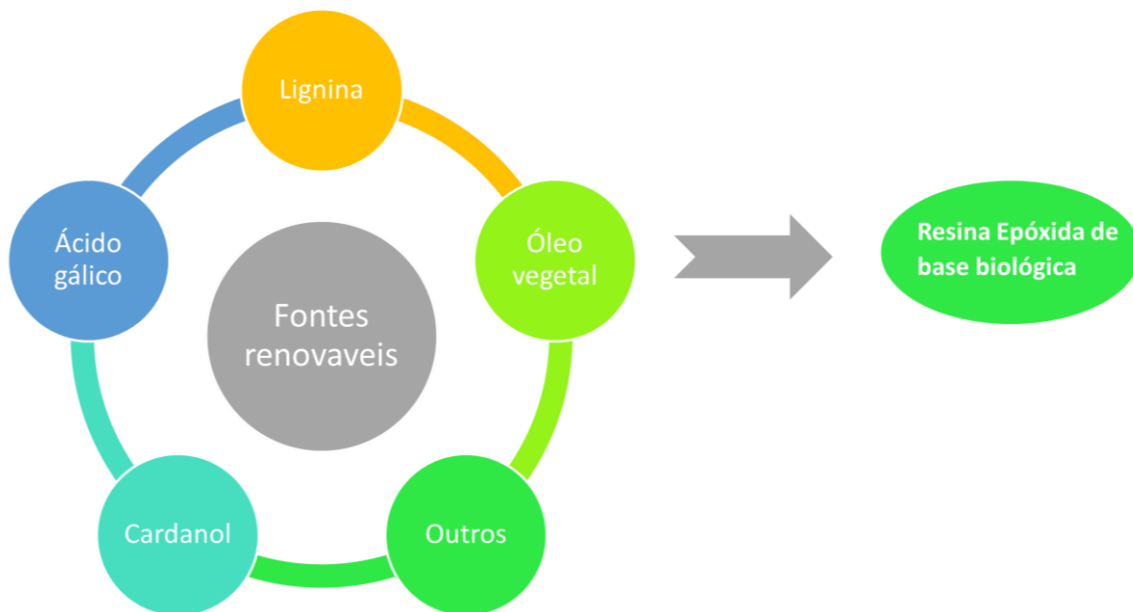


Figura 9 – Fontes renováveis para sintetizar a resina epóxida de base biológica (Ares-Elejoste et al., 2023)

O facto de ser uma resina de base biológica não significa que seja biodegradável, uma vez que a biodegradabilidade é uma funcionalidade conferida ao material quer este seja de base biológica ou não. Existe uma tendência e uma procura crescente no mercado por materiais sustentáveis de base biológica com ênfase no seu desempenho e resistência e não na sua biodegradabilidade (Auvergne et al., 2014).

A produção de resina epóxida parcial ou totalmente de base biológica é um desafio para a indústria. Deste modo existe uma necessidade de alterar os processos de produção com o intuito de reduzir os impactos ambientais e o uso de combustíveis fósseis. A resina epóxida verde obtida a partir de óleo vegetal, obtém os monómeros epóxi (Epicloridrina) a partir do glicerol, que é um produto de base biológica de 3ª geração, isto é, é obtido a partir de resíduos oleoquímicos, enquanto a resina epóxida convencional obtém o mesmo monómero a partir de derivados de petróleo (Sicomini, 2023). Os diferentes processos de obtenção da epicloridrina estão apresentados na Figura 10.



Figura 10 - Diferentes rotas de produção da resina epóxida convencional e epóxida verde adaptado de (Sicomín, 2023)

A conversão do glicerol em epicloridrina, tem demonstrado ser economicamente atraente, tornando-se um produto sustentável e eco eficiente cada vez mais importante na medida em que pode substituir produtos obtidos exclusivamente de matérias-primas de petróleo (Auvergne et al., 2014; Shibata & Nakai, 2010). A reação de obtenção da epicloridrina no processo verde e convencional estão apresentadas na Figura 11.

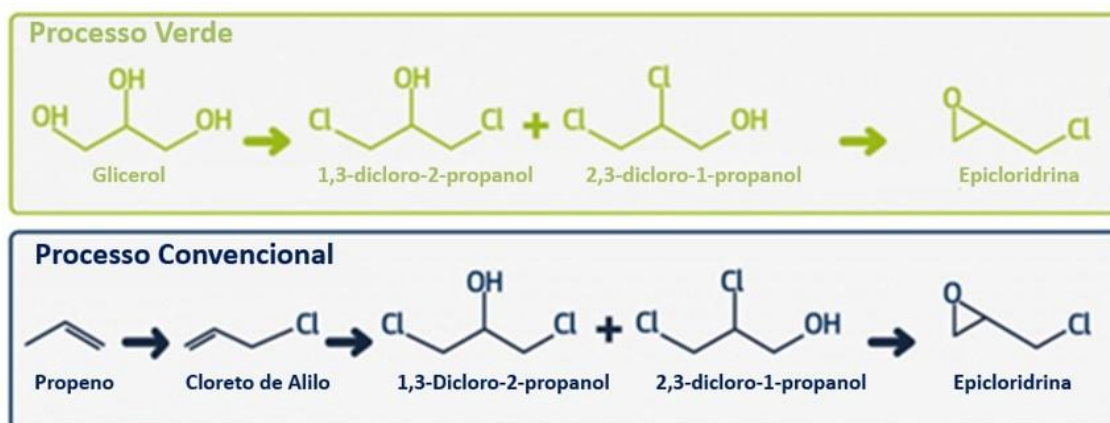


Figura 11 - Reação obtenção da epicloridrina a partir do processo convencional e processo verde adaptado de (Sicomín, 2023)

Segundo um estudo realizado ao ciclo de vida da resina produzida pelo processo verde e pelo processo petrolífero, permitiu concluir que a resina epóxida verde é mais amiga do ambiente, contribui para uma diminuição da acidificação das chuvas e é menos tóxica para o ser

humano. O único ponto em que perde para a resina epóxida convencional é na eutrofização dos solos, no entanto esse problema está relacionado com os pesticidas e fertilizantes utilizados no cultivo das oleaginosas (Sicomín, 2023). Na Figura 12 estão apresentados os resultados comparativos das duas resinas obtidos num estudo comparativo do ciclo de vida das resinas epóxidas verde e convencional.

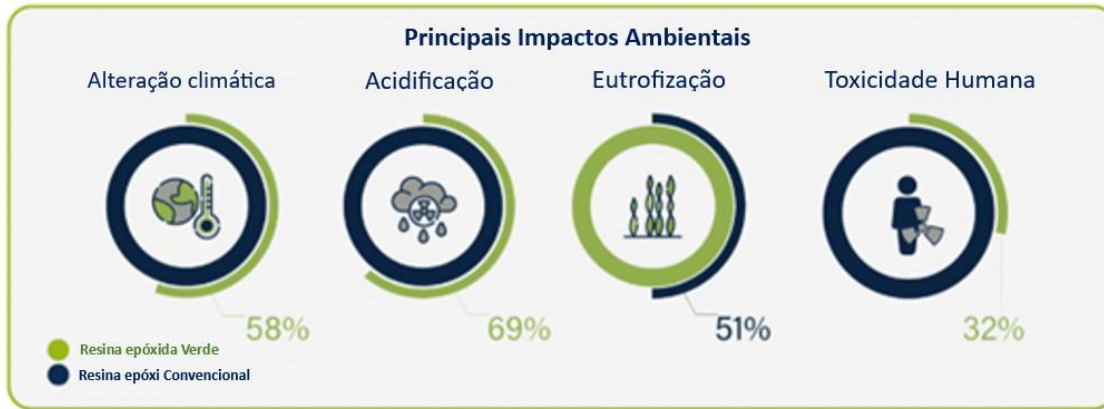


Figura 12 - Resultados comparativos do estudo do ciclo de vida das resinas Epóxicas verde e convencional adaptado de (Sicomín, 2023)

1.3. Fibras de Reforço

O reforço é a fase descontínua dos materiais compósitos, sendo mais resistente do que a matriz, é o elemento responsável por suportar praticamente a totalidade do esforço mecânico sobre o material. As fibras de reforço têm como finalidade a melhoria das propriedades físicas e mecânicas do material. Portanto devem ter elevada resistência mecânica e rigidez, devendo ainda aumentar a resistência térmica e a condutividade (Carvalho, 2015; Jesus, 2021; Teixeira, 2012).

A fase descontínua pode ser constituída por partículas ou fibras. Apesar das partículas serem mais económicas, os compósitos resultantes apresentam menor resistência e rigidez à tração comparativamente aos compósitos resultantes de fibras. Isto deve-se ao facto da área superficial da fibra em contacto com a matriz ser superior comparativamente à de uma partícula, tornando os compósitos reforçados com fibra mais resistentes à tração. Assim, quando a fibra é puxada da resina vai resistir mais ao arrancamento quanto maior for o seu comprimento. Deste modo, as fibras são o tipo de reforço mais utilizado em compósitos (Tanzi et al., 2019; Zão, 2018). A Figura 13 representa a classificação dos materiais compósitos relativamente ao seu reforço.

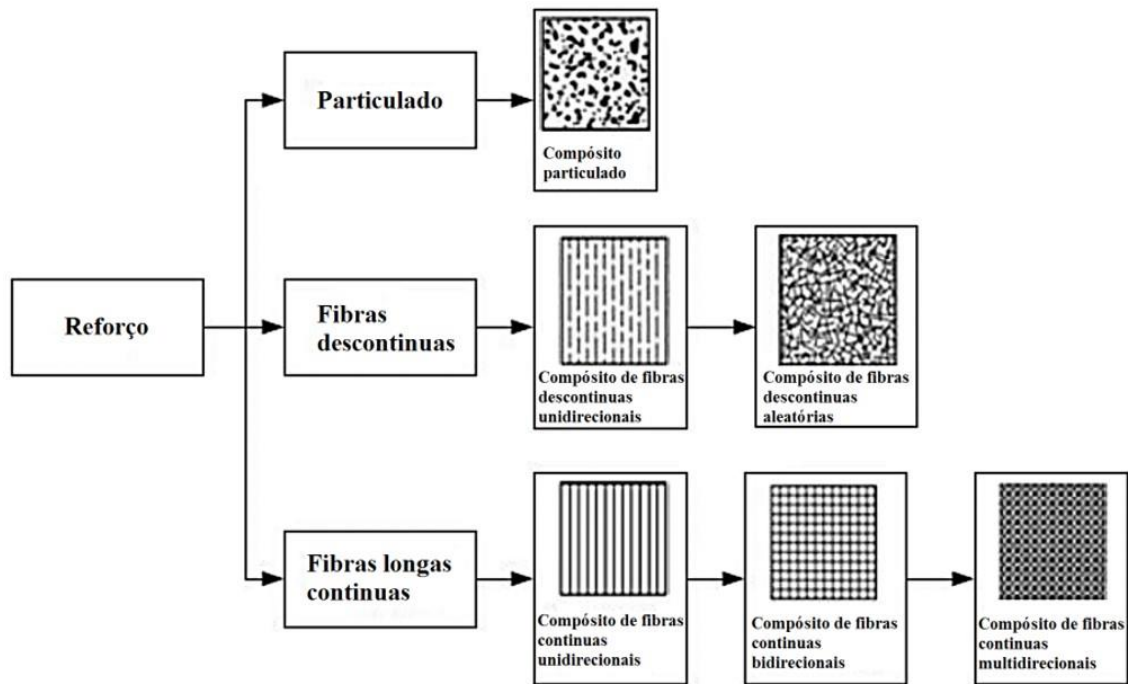


Figura 13 - Classificação dos materiais compósitos relativamente ao seu reforço (Carvalho, 2015)

O desempenho dos materiais compósitos está dependente de parâmetros como: tipo, comprimento, orientação, composição e fração volúmica das fibras, bem como a forma como se dispõem no interior da matriz. A interação do reforço com a matriz também é de extrema importância, uma vez que uma boa adesão é imprescindível para que a distribuição do esforço ocorra do mesmo modo em todas as fibras (Carvalho, 2015; Jesus, 2021).

As fibras de reforço podem ser naturais ou sintéticas. As fibras naturais podem ser de origem animal, vegetal ou mineral. Alguns exemplos deste tipo de fibra estão apresentados na Figura 14 (Rajesh et al., 2018; Tanzi et al., 2019). Na Tabela 2 estão apresentadas algumas propriedades de fibras naturais animais e vegetais.

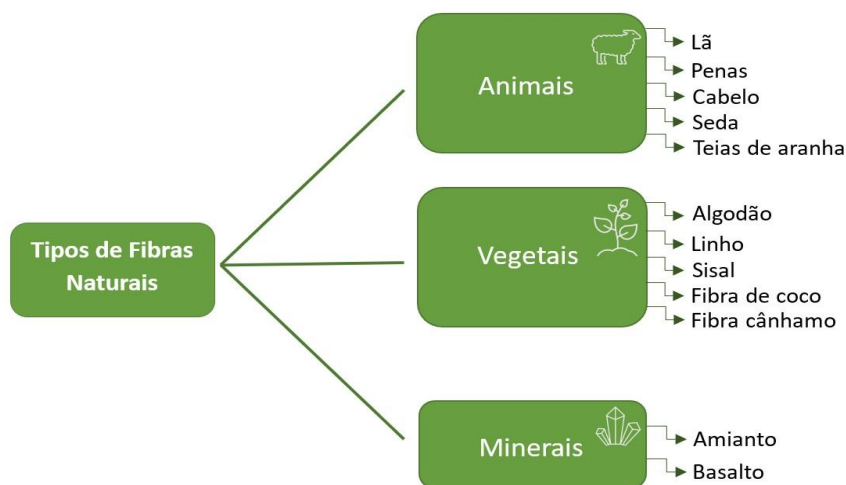


Figura 14 -Exemplos de Fibras Naturais

Tabela 2- Propriedades de algumas fibras naturais vegetais e animais (Mann et al., 2019)

Fibra	Densidade (g/cm³)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Young à tração (GPa)
Algodão	1,5-1,6	287-800	5,5-13
Linho	1,4	345-1830	27-80
Cânhamo	1,4	550-1110	58-70
Lã de ovelha	1,3	50-315	2,3-5
Seda	1,3	100-1500	5-25
Penas	0,9	100-203	3-10

No grupo das fibras sintéticas destacam-se as fibras de vidro, carbono e aramida, sendo as fibras de vidro as mais utilizadas como reforço de materiais compósitos. Este tipo de fibras dominam o mercado devido à facilidade em serem adaptadas às necessidades e a sua produção ser um processo controlado. No entanto, a aplicação de fibras naturais está em constante crescimento, e estão a tornar-se cada vez mais atraentes para a indústria. Isso deve-se principalmente aos benefícios que apresentam em relação as fibras sintéticas, como baixo custo de produção e de descarte, são potencialmente biodegradáveis, provenientes de processos ecologicamente corretos, recursos abundantes e renováveis, para além de, baixa densidade, alto amortecimento termo-acústico, menos danos ao equipamento de processamento, boas propriedades mecânicas relativas, baixo consumo de energia de produção. No entanto, também apresentam a desvantagem de depender de fatores ambientais, originando uma variabilidade de propriedades no material e uma taxa de produção lenta. A grande desvantagem na utilização de fibras naturais na produção de compósitos é o facto de grande parte destas fibras, à exceção das minerais, serem maioritariamente de natureza hidrofílica, o que as torna suscetíveis à absorção de humidade e originam uma má ligação ao material polimérico. Deste modo, as fibras naturais são submetidas os tratamentos químicos com o intuito de melhorar a adesão da fibra na matriz. (Fiore, 2020; Peças et al., 2018; Rajesh et al., 2018; Sanjay et al., 2016; Tanzi et al., 2019). Na Tabela 3 estão representadas de modo comparativo as propriedades das fibras naturais e sintéticas.

A maioria das fibras sintéticas apresentam elevados impactos na produção e baixa reciclabilidade. Deste modo, o uso de fibras convencionais como a fibra de vidro têm vindo a ser substituídas por reforços de origem natural. (Carvalho, 2015; Jesus, 2021; Thakur et al., 2017).

Tabela 3 - Comparação dos aspetos técnicos e ambientais entre fibras naturais e sintéticas adaptado de (Sanjay et al., 2016)

Aspetos	Propriedades	Fibras naturais	Fibras sintéticas
Técnicos	Propriedades mecânicas	Moderado	Alto
	Sensibilidade à humidade	Alto	Baixo
	Sensibilidade térmica	Alto	Baixo
Ambientais	Recurso	Infinito	Limitado
	Produção	Baixo	Alto
	Reciclabilidade	Bom	Moderado

1.3.1. Fibra de vidro

As configurações da fibra de vidro que têm sido as mais utilizadas para reforçar matrizes poliméricas, estão ilustradas na Figura 15, sendo que 90% dos polímeros reforçados com fibras incorporam este tipo de fibra. A sua vasta aplicação deve-se ao facto de apresentarem elevada resistência e preço relativamente reduzido e fácil processamento. Os compósitos de matriz polimérica reforçados com fibra de vidro também apresentam boa resistência ao calor, à humidade, à corrosão, e boas propriedades de isolamento elétrico. Para além disso, as fibras são imunes a ataques biológicos e têm boa resistência a solventes e produtos químicos devido ao vidro ser um material cerâmico praticamente inerte (Jesus, 2021; Romão, 2003; Teixeira, 2012; Zão, 2018).



a)



b)

Figura 15 - Configurações da fibra de vidro a) tecido ortogonal b) manta aleatória (Jesus, 2021)

Os diferentes tipos de fibras de vidro são denominados por letras. A fibra de vidro tipo E é destinada a produtos que necessitem de boa resistência mecânica e isolamento térmico; a fibra de vidro tipo S proporciona uma elevada resistência mecânica; a fibra de vidro tipo C apresenta uma maior resistência a ataques químicos, sendo utilizada em ambientes extremamente alcalinos ou ácidos e as fibras de vidro tipo A são utilizadas com o intuito de

melhorar o aspeto do compósito (Jesus, 2021; Teixeira, 2012; Zão, 2018). As composições dos diferentes tipos de fibras de vidro estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Composição dos diferentes tipos de fibra de vidro adaptado de (Teixeira, 2012)

Tipo de fibra	Constituintes						
	SiO₂	Al₂O₃	CaO	MgO	Na₂O	K₂O	B₂O₃
A	72,0	1,0	8,0	4,0	14,0	-	-
C	64,6	4,1	13,4	3,3	8,5	1,1	4,7
E	55,2	14,5	18,7	4,6	0,3	0,2	6,5
S	64,4	25,0	-	10,3	0,3	-	-

A fibra de vidro E é a mais utilizada, representando cerca de 80% a 90% da produção comercial de fibra de vidro. A sua elevada utilização esta relacionada com o seu baixo custo, para além de fornecer propriedades mecânicas, químicas e elétricas bastante atrativas (Jesus, 2021; Teixeira, 2012). Na Tabela 5 estão apresentadas as principais propriedades físico-mecânicas relativas a este tipo de fibra de vidro.

Tabela 5 - Propriedades da fibra de vidro tipo E adaptado de (Hu et al., 2016)

Propriedades da Fibra de Vidro tipo E	
Resistência a tração da fibra virgem (MPa)	3140
Modulo de elasticidade (GPa)	73
Densidade (g/cm³)	2,54
Alongamento (%)	4,8
Temperatura do ponto de amolecimento (°C)	850

1.3.2. Fibra de lã de cão Serra da Estrela

O cão Serra da Estrela é uma das raças mais antigas da península ibérica sendo proveniente da região montanhosa da Serra da Estrela. Estes cães apresentam duas variedades de pêlo, os de pêlo curto e os de pêlo comprido. A variedade de pêlo comprido apresenta um pêlo bastante abundante, forte, moderadamente grosso e com pouca aspereza, assemelhando-se ao pêlo de ovelha. O subpêlo é constituído por abundantes pêlos finos, curtos, e embaraçados,

normalmente mais claros que a pelagem (Cruz, 2007). Devido a este facto, o pêlo do cão Serra da Estrela também pode ser denominado de lã.

As fibras animais são uma perspetiva atraente para o desenvolvimento de materiais compósitos sustentáveis, e apesar de haver menos trabalhos de investigação disponíveis sobre compósitos reforçados com fibras animais do que reforçados com fibras naturais obtidas de plantas, os investigadores têm aumentado o foco neste tipo de fibras devido às suas propriedades estruturais excecionais bem como as suas excelentes propriedades mecânicas e físico-químicas, demonstrando ser uma alternativa notável como material de reforço (Mann et al., 2023; Ramachandran et al., 2022; Thakur et al., 2017).

Fibras animais como lã, penas, cabelo e seda são constituídas por um importante elemento proteico chamado queratina (Figura 16). A queratina é uma proteína estrutural fibrosa, sendo considerada o principal constituinte da lã, pêlos, chifres, penas e outros revestimentos externos de mamíferos, répteis e aves. As fibras de queratina são formadas por proteínas e longas cadeias de aminoácidos, sendo um material oco, leve e resistente. A queratina tem sido um tema de investigação com um elevado aumento de procura devido à facilidade com que podem ser convertidas em biomateriais, bem como o peso leve, baixo custo, natureza ecológica e insolubilidade em solventes orgânicos. Para além disso apresentam um bom comportamento hidrofóbico e capacidade de amortecer o som (Hong & Wool, 2005; Mann et al., 2023; Thakur et al., 2017).

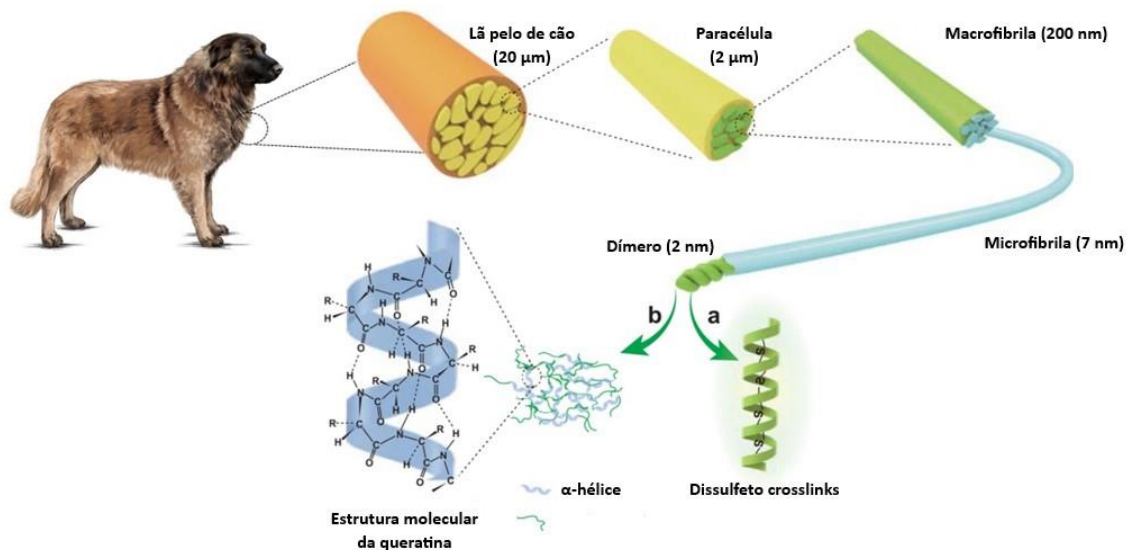


Figura 16 - Estrutura queratina

A estrutura da fibra de lã de cão esta compreendida em 3 partes (Figura 17): a camada externa que consta num revestimento externo escamoso composto por cutículas; o córtex que consiste em células queratinizadas e a medula ou núcleo oco. A estrutura oca é que faz com que tenha boas propriedades para um material de isolamento térmico-acústico (Thakur et al., 2017).

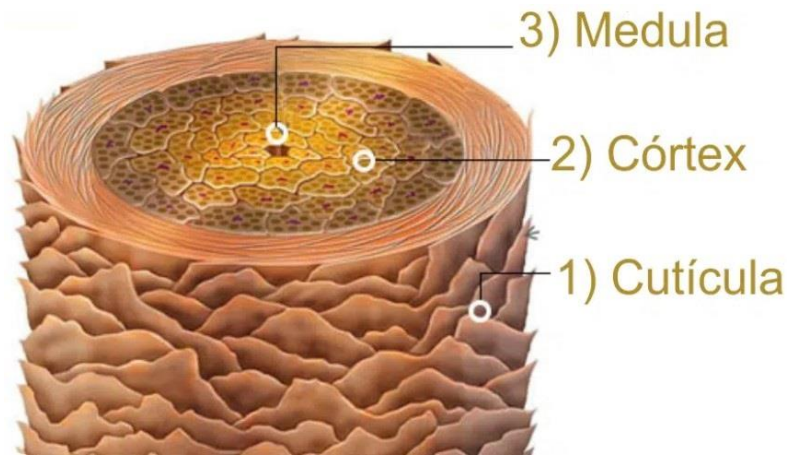


Figura 17 - Estrutura básica da lã (Mattos, 2021)

Nos últimos anos ocorreu um aumento dos animais de estimação a nível mundial, segundo os dados da Federação Europeia da Indústria de Alimentos para Animais de Estimação (FEDIAF), e relativo ao ano de 2021 só na Europa existiam 92 milhões de cães, sendo Portugal o quinto país da Europa com mais cães por mil habitantes (ver Figura 18). Com o número de animais de estimação a aumentar, consequentemente o número de lojas de tosquiagem de animais também tem aumentado. Esta indústria gera uma elevada quantidade de resíduos queratinosos (os pêlos dos animais) que acabam em aterros sanitários, contribuindo para os milhões de toneladas de material à base de queratina descartados anualmente no mundo. Portanto, recolher esses resíduos de lojas de animais e convertê-los em fibras de reforço será uma maneira inovadora e sustentável de tratar estes resíduos. (FEDIAF | *The voice of the European pet food industry*, 2023; Lima et al., 2022; Ramamoorthy et al., 2018; Thakur et al., 2017).

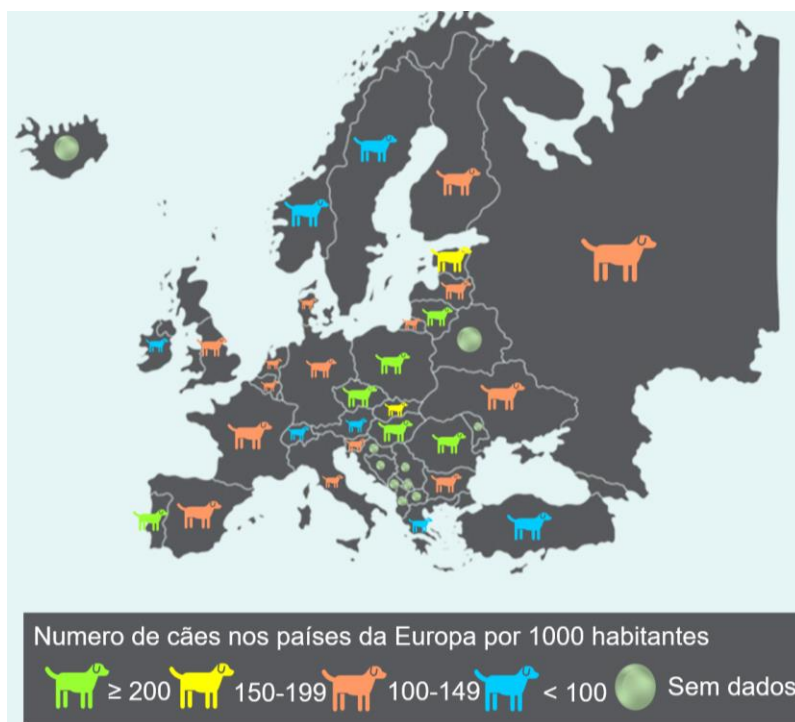


Figura 18 - Distribuição do número de cães por mil habitantes na Europa

Capítulo III – Materiais e Métodos

1. Materiais

1.1. Fibras

1.1.1. Lã de pêlo de cão Serra da Estrela

A lã de cão Serra da Estrela utilizada para a produção do compósito verde foi obtida a partir da escovagem de uma cadela de raça Serra da Estrela de pêlo comprido, obtido na época de mudança de pêlo (primavera e outono). De acordo com o autor Ramamoorthy et al. (2018) a densidade da lã de cão está compreendida entre 1,31-1,34 g/cm³, que compreende a densidade da lã de ovelha 1,3 g/cm³ de acordo com a Tabela 2. Conforme esta informação para os cálculos foi assumido o valor de densidade de 1,3 g/cm³.

1.1.2. Fibra de vidro

A fibra de vidro utilizada para a produção do compósito tradicional é do tipo E, cujas características se encontram na Tabela 5.

1.2. Resinas

Para a produção do compósito verde utilizou-se a resina SR GreenPoxy 56 com o endurecedor SD Surf Clear da marca Sicomin. Os dados referentes à viscosidade e ao tempo de gel da resina (tempo de operação com a resina antes de esta entrar em gel) em função da temperatura, apresentam-se nas Tabelas 6 e 7 respetivamente. A seleção da resina verde utilizada para este trabalho foi efetuada tendo em conta o estudo realizado por Terry & Taylor (2021), onde concluiu que de entre 9 resinas epóxicas de base biológica testadas, a resina SR GreenPoxy 56 é uma das mais promissoras e com bom desempenho para aplicações em materiais compósitos para aplicações marinhas, equipamento desportivo e energia do vento. A ficha técnica desta resina encontra-se no Anexo A.

Tabela 6- Dados da viscosidade da resina SR Greenepoxy 56/SD Surf Clear

<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Viscosidade (mPa.s ± 20%)</i>
15	2500
20	1400
25	800
30	500
40	250

Tabela 7 - Tempo de gel da resina SR Greenepoxy 56/SD Surf Clear

Temperatura (°C)	Tempo de gel na espessura de 1mm (min)
20	240
25	190
30	145
40	85

O compósito tradicional foi produzido com a resina SR8100 e com o endurecedor SD 3304 da marca Sicomin, cujas informações da viscosidade e o tempo de gel em função da temperatura, se encontram nas Tabelas 8 e 9 respetivamente. A ficha técnica referente a esta resina encontra-se no Anexo B.

Tabela 8 - Dados da viscosidade da resina SR8100/SD 3304

Temperatura (°C)	Viscosidade (mPa.s)
15	2350 ± 450
20	1250 ± 250
25	765 ± 155
30	475 ± 95
40	0 ± 0

Tabela 9- Tempo de gel da resina SR8100/SD 3304

Temperatura (°C)	Tempo de gel na espessura de 1mm (min)
20	390
25	250
30	180

2. Métodos

2.1. Caracterização das fibras

De modo a proceder à caracterização das fibras de lã de pêlo de cão Serra da Estrela com e sem tratamento, começou-se por realizar difração de Raios-X (DR-X) de modo a avaliar a influência dos tratamentos na cristalinidade das fibras, seguido de microscopia eletrónica de varrimento (SEM) para verificar as dimensões das fibras bem como as diferenças das escamas nos diferentes tratamentos. Por fim, por meio de um sistema ótico desenvolvido na Universidade da Beira Interior avaliou-se a molhabilidade das diferentes fibras medindo o ângulo de contacto da resina com a fibra.

2.1.1. Difração de Raios-X (DR-X)

O DR-X foi realizado num difratômetro da marca Rigaku de modelo DMAX 111/C e a preparação das amostras foi efetuada como demonstrado na Figura 19. O ensaio foi realizado com um varrimento no intervalo entre 5 e 50 graus.



Figura 19 - Porta amostras para a realização do DR-X

2.1.2. Microscópio Eletrônico de Varrimento (SEM)

As imagens de alta resolução da fibra foram obtidas num microscópio eletrônico de varrimento (SEM) da marca HITACHI de modelo S-3400N. Todas as amostras analisadas foram previamente revestidas a ouro.

.

2.1.3. Teste ótico de molhabilidade das fibras de lã de cão Serra da Estrela

A molhabilidade das fibras foi testada utilizando uma câmara de modelo Guppy Pro F503c com uma resolução de 1940×1292 pixels. A estrutura para a realização dos ensaios está apresentada na Figura 20, em que nas fibras de lã de cão foi colocado um peso de estanho com uma massa de 0,15 g com o intuito de manter a fibra esticada durante o teste. As imagens foram obtidas apresentando uma região de interesse (ROI) de 586×1292 pixels, em que cada pixel tem um tamanho de 5,74 μm .

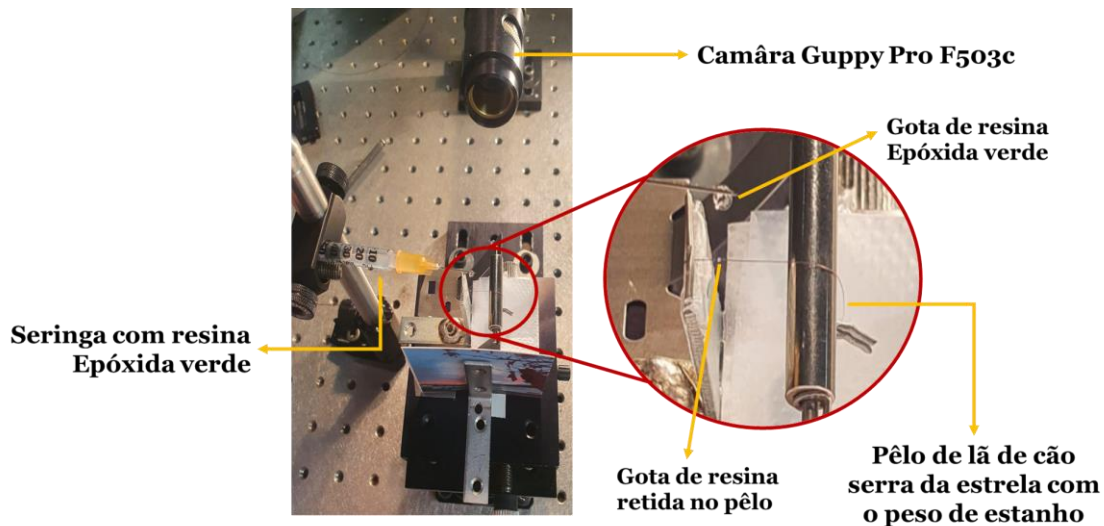


Figura 20 - Estrutura para a realização do teste de molhabilidade da fibra

A gota de resina apresenta um volume de $18,53 \mu\text{L}$. O volume da gota de resina foi calculado através do volume de um elipsoide de revolução, em que o valor foi calculado através da média entre raio maior ($2a_0$) e o raio menor ($2a_1$), tal como demonstrado na Figura 21. Os cálculos encontram-se no Anexo C.

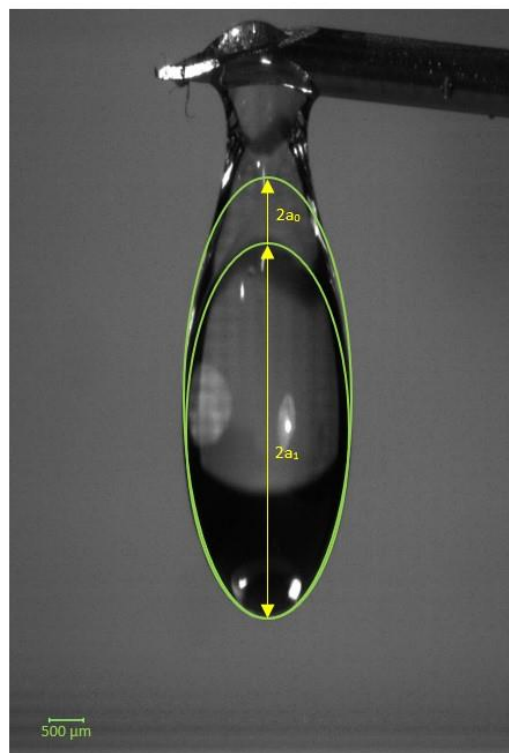


Figura 21 - Gota de resina com a demonstração do raio maior e raio menor

2.2. Tratamentos Químicos das fibras de lã de cão Serra da Estrela

Os compósitos verdes foram produzidos com lã de cão tal e qual, e com lã de cão tratada quimicamente. Foram realizados dois tratamentos químicos de modo a poder comparar qual dos três tipos de lã de cão (lã tal e qual, lã com o tratamento PVA e lã com o tratamento NaOH), tem melhor desempenho quando incorporada na estrutura do compósito. Assim, as amostras vão a denominação segundo o esquema: M_xR_y , em que M significa matriz e cujo índice x toma a designação de Ec (epóxida convencional) ou Ev (epóxida verde) e em que R significa reforço e cujo índice y toma a designação de Fv (fibra de vidro), Fptq (fibra de pêlo tal e qual), FpPVA (fibra de pêlo com tratamento PVA) ou FpNaOH (fibra de pêlo com tratamento NaOH). De acordo com o encontrado na literatura (Conzatti et al., 2012) o tratamento com PVA foi utilizado em lã de ovelha, e devido às suas semelhanças com o pêlo de lã de cão da Serra da Estrela foi decidido utilizar este tratamento. Por outro lado, o tratamento com NaOH foi escolhido por se ter encontrado na literatura (Claudivan da Silva et al., 2020) este tratamento aplicado em pêlo de cão. Os procedimentos adotados para estes dois tratamentos foram uma adaptação da descrição encontrada na literatura.

2.2.1. Tratamento com Álcool Polivinílico (PVA)

Realizou-se uma extração sólido-líquido com um volume de 200ml de acetona durante 2h, com o intuito de remover as gorduras e os ácidos gordos naturalmente presentes no pêlo de cão (Figura 22).



Figura 22 - Representação da extração sólido-líquido

Posteriormente as fibras foram secas na estufa a uma temperatura de 105°C durante 24h (Figura 23).



Figura 23 - Secagem das fibras na estufa

De modo a tornar o processo mais sustentável, separou-se o solvente do subproduto da extração, através de um processo de destilação por pressão reduzida (Figura 24), com o intuito de reaproveitar o subproduto para a produção de sabão, e o solvente para reutilizar. No entanto, após o processo de destilação reduzida, o subproduto obtido não era suficiente para realizar o restante procedimento, mas, contudo, recuperou-se o solvente.

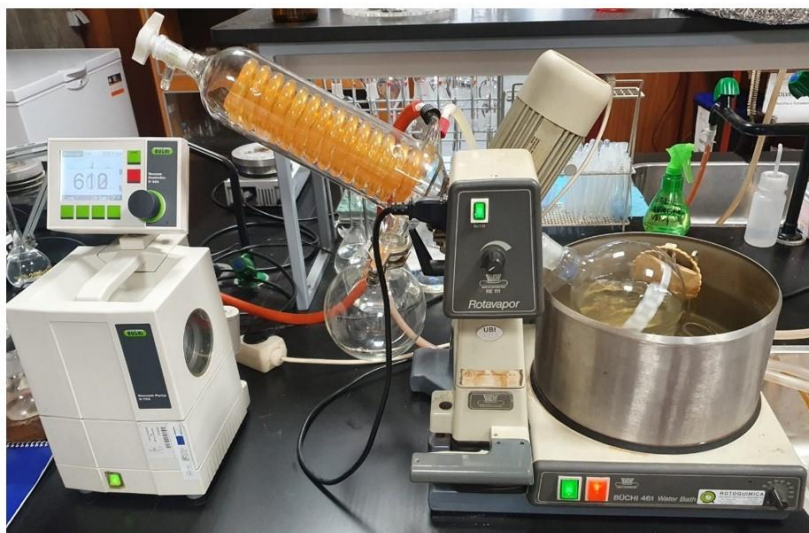


Figura 24 - Recuperação do solvente

Após a secagem, as fibras foram embebidas numa solução de PVA contendo 3% em peso de PVA. A solução foi preparada sob agitação de 300 RPM a uma temperatura de 90°C. Quando o PVA se dissolveu totalmente, as fibras foram embebidas na solução durante 2h (Figura 25).



Figura 25 - Fibra de pêlo de cão embebida na solução de PVA

Posteriormente, através de um processo de filtração a vácuo (Figura 26) retirou-se o excesso de água das fibras.



Figura 26 - a) Fibras no processo de filtração a vácuo; b) Aspeto das fibras de pêlo de cão após a filtração

Finalmente, as fibras foram secas na estufa a uma temperatura de 60°C durante 24h. Na Figura 27 podemos ver as fibras a secar na estufa, e o aspeto das fibras após secagem.



Figura 27 - a) Fibras a secar na estufa; b) Aspeto das fibras após secagem na estufa

2.2.2. Tratamento com Hidróxido de Sódio (NaOH)

Inicialmente fez-se o tratamento da fibra de lã de cão com uma solução de NaOH 0,05M com auxílio de um rotor e não resultou. Esta primeira metodologia para este tratamento está descrita no anexo D.

De modo a otimizar o tratamento das fibras de lã de cão, estas foram lavadas com uma solução de NaOH 0,05M (Figura 28), em que a solução foi trocada de 30 minutos em 30 minutos por três vezes a uma temperatura de 40°C, de modo a garantir uma melhor lavagem das fibras.



Figura 28 - Fibra de pêlo de cão embebida na solução de NaOH

Após a lavagem, o excesso da solução foi retirado recorrendo a uma filtração a vácuo (Figura 29).

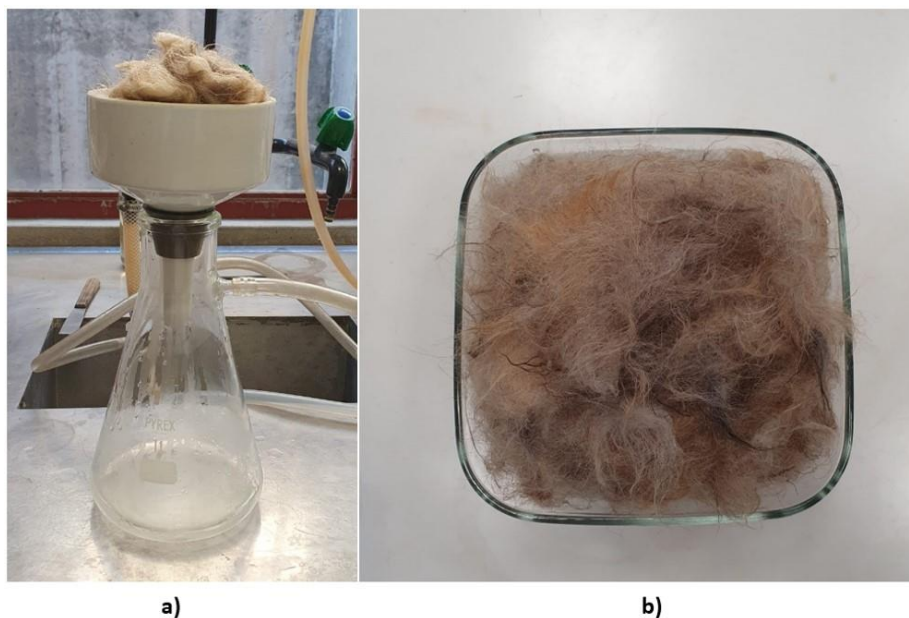


Figura 29 - a) Fibras no processo de filtração a vácuo; b) Aspeto das fibras de pêlo de cão após a filtração a vácuo

Posteriormente as fibras foram secas na estufa a uma temperatura de 60°C durante 24h (Figura 30).



Figura 30 - a) Fibras a secar na estufa; b) Aspetto das fibras depois de secas

2.3. Produção das placas de compósito

As placas de compósito foram produzidas conforme o esquema apresentado na Figura 31. O molde apresenta as dimensões 29×17×0,1 cm. Todas as massas medidas, tanto de resina como de fibra, para a produção das placas de compósito foram inicialmente determinadas de forma a cumprirem as dimensões do molde e as mesmas frações volúmicas. No entanto, depois de produzidas verificou-se que a dimensão da espessura das placas de lã de cão eram superiores a 0,1 cm, o que no final traduziu-se numa diferente fração volúmica dos componentes da placa. Deste modo, a placa de fibra de vidro produzidas apresentou uma fração volúmica de 72% resina e 28% de fibra de vidro, já as placas produzidas com lã de pêlo de cão apresentaram uma fração volúmica de 35% de resina e 65% de fibra.

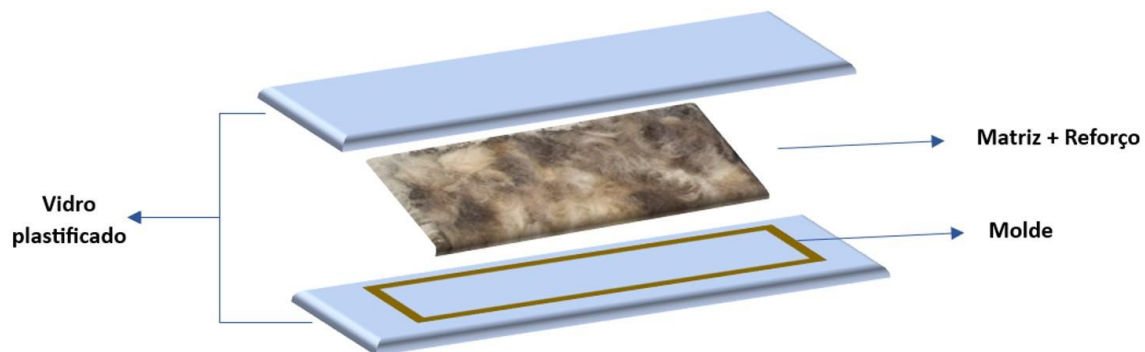


Figura 31 - Esquema de produção das placas de compósito

Após a preparação do molde, pesou-se a resina e o endurecedor e homogeneizou-se a mistura durante 5 minutos com o auxílio do rotor a aproximadamente 360 RPM (Figura 32).



Figura 32 - Mistura da resina com endurecedor

Lentamente e com o auxílio de uma vareta juntou-se parte da fibra de pêlo de cão até embeber todo o reforço na matriz (resina e endurecedor), tal como demonstrado na Figura 33.



Figura 33 - Mistura da matriz com a fibra de reforço

Após parte das fibras estarem embebidas na matriz, foram colocadas de forma homogênea no molde, como representado na Figura 34.



Figura 34 - Fibras de reforço embebidas na matriz dispersas no molde

A restante fibra foi adicionada por camadas e distribuída de maneira uniforme, como demonstrado na Figura 35.



Figura 35 - Fibra total no molde

Posteriormente foi colocado num saco de vácuo durante 4h (Figura 36).



Figura 36 - Placa de compósito sob vácuo

Após as 4h a cura foi realizada a temperatura ambiente até perfazer 24h. A pós-cura foi realizada colocando a placa de compósito numa estufa a 40 °C durante 24h entre os vidros para a placa não empenar (Figura 37).



Figura 37 - Placa de compósito a secar na estufa entre vidros

No final do procedimento, obtiveram-se as placas produzidas de onde se tiraram os provetes para serem caracterizadas (Figura 38). Como se pode observar na figura 35, apesar de

se terem utilizado as mesmas quantidades de fibra e resina para a produção das placas de compósito, é possível observar que a placa de fibra de vidro apresenta uma espessura menor (menor volume de fibra) comparativamente às placas produzidas com fibra de lã de cão.



Figura 38 - Placas de compósito produzidas – a) Compósito de fibra de vidro; b) Compósito de fibra de pêlo de cão Tal e Qual; c) Compósito de fibra de pêlo de cão com tratamento de PVA; d) Compósito de fibra de pêlo de cão com tratamento de NaOH

Os provetes retirados das placas de compósito produzidas para a realização dos ensaios mecânicos foram cortados com uma máquina CNC de jato de água (Figura 39).



a)



b)



c)



d)

Figura 39 - Provetes cortados na máquina de corte CNC por jato de água– a) Compósito de fibra de vidro; b) Compósito de fibra de pêlo de cão Tal e Qual; c) Compósito de fibra de pêlo de cão com tratamento de PVA; d) Compósito de fibra de pêlo de cão com tratamento de NaOH

A metodologia de produção do compósito foi otimizada conforme os erros detetados ao longo do processo, pelo que, todas as etapas realizadas para a otimização da metodologia de produção se encontram no Anexo E para a fibra de vidro e no anexo F para a fibra de pêlo de cão.

2.4. Testes mecânicos

Os testes mecânicos realizados foram os ensaios de tração, flexão e relaxamento, em que se usaram os provetes cortados na máquina de CNC por jato de água e em cada ensaio foram testadas 5 amostras. Os dados referentes às dimensões dos provetes ensaiados encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10 - Dimensões dos provetes

	<i>Espessura (mm)</i>	<i>Largura (mm)</i>
Compósito Fibra de Vidro	1,26	10
Compósito Fibra de pêlo de cão Tal e qual	2,51	10
Compósito Fibra de pêlo de cão com tratamento de PVA	4,17	10
Compósito Fibra de pêlo de cão com tratamento de NaOH	2,77	10

2.4.1. Ensaios de tração

As propriedades de tração foram determinadas segundo a norma ISO 527-4:2023 e ISO 527-1:2019. Os ensaios foram realizados numa máquina de ensaios mecânicos universal Shimazu, com uma célula de carga de 50 kN a uma velocidade de 2mm/min e a distância entre amarras foi de 100 mm (Figura 40).



Figura 40 - Ensaios de tração

Os valores de tensão e deformação à tração foram obtidos através das Equações 1 e 2 respectivamente.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{Equação 1}$$

onde σ é a tensão em MPa, F corresponde à força em Newton e A é a área do provete em mm².

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \quad \text{Equação 2}$$

onde ε corresponde à deformação à tração e é adimensional, ΔL_0 é o comprimento útil do provete em milímetros e L_0 representa o deslocamento do provete em milímetros.

2.4.2. Ensaios de Flexão

Os ensaios de flexão em três pontos foram realizados segundo a norma ISO 178:2019, numa máquina Shimadzu, modelo Autograph AGS-X com uma com uma célula de carga de 10 kN de modo a determinar a resistência à flexão dos provetes retirados das placas de compósito. Para a sua execução aplicou-se o ensaio de carregamento em três pontos, que consiste numa viga livremente apoiada carregada no meio do vão representada na Figura 41. O ensaio foi realizado a uma velocidade de 1,5 mm/min e a distância entre apoios dos diferentes tipos de provetes encontra-se na Tabela 11.

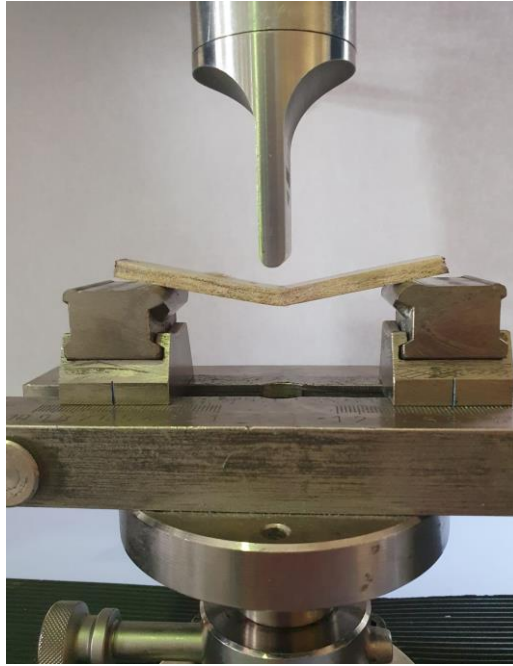


Figura 41 - Ensaio flexão

Tabela 11 - Distância entre apoios ensaio de flexão

	<i>Distância entre apoios (mm)</i>
Compósito Fibra de Vidro	20
Compósito Fibra de pêlo de cão Tal e qual	40
Compósito Fibra de pêlo de cão com tratamento de PVA	64
Compósito Fibra de pêlo de cão com tratamento de NaOH	44

Os valores de tensão e da deformação à flexão foram obtidos a partir das Equações 3 e 4 respectivamente.

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2}$$

Equação 3

na Equação 3, σ_f permite calcular a tensão devida a um carregamento de flexão em três pontos, F a força aplicada em Newton, L a distância entre apoios em milímetros, b e h a largura e espessura do provete em milímetros.

$$\varepsilon_f = \frac{6sh}{L^2} \tag{Equação 4}$$

onde ε_f corresponde à deformação devida a um carregamento de flexão, o s à deflexão em milímetros, h à espessura do provete em milímetros e o L à distância entre apoios em milímetros.

2.4.3. Ensaios de Relaxamento

Os ensaios de relaxamento foram realizados numa máquina Shimadzu, modelo Autograph AGS-X com uma célula de carga de 10 kN segundo a norma ASTM E328-21. Os provetes utilizados no ensaio apresentam as mesmas medidas dos utilizados nos ensaios de flexão. A aplicação da carga foi realizada a uma velocidade de 200 mm/min, e a flecha aplicada a meio do vão para os compósitos $M_{Ev}X_{FpNaOH}$ e $M_{Ev}X_{FpPVA}$ foi de 2 mm, enquanto para os de $M_{Ec}X_{Fv}$ foi de 1 mm. A tensão de relaxamento foi obtida através da Equação 3.

De modo a prever a resposta viscoelástica, utilizou-se o modelo Kohlrausch-Williams-Watts (KWW) uma vez que na literatura este se tem mostrado mais apropriado para modelar os processos de relaxamento (Rabiei et al., 2019; Reis, Silva, Santos, Parente, & Bezazi, 2020; Reis, Silva, Santos, Parente, Valvez, et al., 2020; Santos et al., 2020). De acordo com este modelo a evolução da tensão ao longo do tempo é dada pela Equação 5:

$$\varnothing = \frac{\sigma(t)}{\sigma_0} = e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^\beta} \tag{Equação 5}$$

onde $\sigma(t)$ é a tensão no tempo, σ_0 é em tensão em $t=0$, o β é um parâmetro adimensional conhecido como expoente de potência fracionária e o τ é o tempo de relaxação KWW (Rabiei et al., 2019).

Capítulo IV – Resultados e Discussão

1. Caracterização das Fibras

1.1 Difração de Raios-x (DR-X)

Os padrões DR-X obtidos para a fibra de pêlo de cão Serra da Estrela tal e qual (Fptq) e com os respectivos tratamentos (FpPVA e FpNaOH), são mostrados na Figura 42. Em todas as amostras de pêlo observaram-se dois fortes picos de difração nos ângulos 2θ , um cerca dos 9° e outro cerca dos 20° , correspondendo às estruturas α -hélice e β -plissada da queratina, respetivamente (Liu et al., 2017; Wang et al., 2018; Wu et al., 2017). O pico de difração no ângulo 2θ de cerca dos 20° apresenta-se com uma forma mais larga, devido ao empilhamento das estruturas β -plissadas (Wu et al., 2017). Curiosamente, quando comparamos a curva obtida para o pêlo de cão Serra da Estrela tal e qual (Fptq – Figura 40 a)) com os respetivos tratamentos (FpPVA e FpNaOH – Figura 40 b) e c), verificou-se que o tratamento com o PVA (FpPVA – Figura 40 b)) apresentou uma menor intensidade de difração em ambos os picos (ambas estruturas - α -hélice e β -plissada), sugerindo uma diminuição da cristalinidade do material, enquanto que com o tratamento com NaOH (FpNaOH – Figura 40 c)) apresentou uma maior intensidade de difração em ambos os picos (ambas estruturas - α -hélice e β -plissada) sendo mais acentuada no pico de 9° (ou seja, na estrutura α -hélice), sugerindo uma maior cristalinidade do material. Dos estudos de Wu et al. (2017) e Liu et al. (2016), podemos ver que tanto a queratina como a lã de ovelha têm dois picos de difração nestes mesmos dois ângulos 2θ (9° e 20°), tendo a queratina picos de difração com intensidade mais fraca, indicando uma cristalinidade mais baixa, principalmente no primeiro pico a 9° ou seja, menor quantidade de estruturas α -hélice.

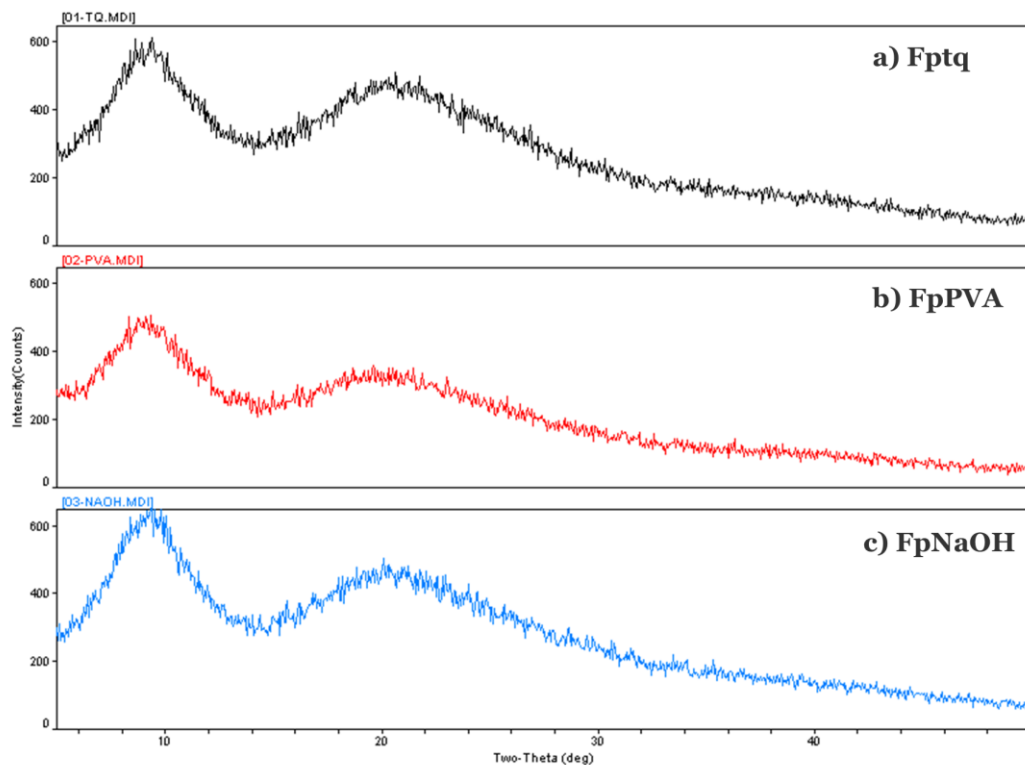


Figura 42 - Padrões de DR-X para o pêlo de cão Serra da Estrela: a) Pêlo tal e qual (Fptq); b) Pêlo com tratamento PVA (FpPVA); c) Pêlo com tratamento NaOH (FpNaOH)

1.2 Microscópio eletrónico de varrimento (SEM)

Analisando a Figura 43 podemos verificar que na FpNaOH as escamas presentes na sua superfície estão mais nítidas comparativamente a Fptq. Isso deve-se ao facto do tratamento com NaOH remover as ceras e gorduras naturalmente presentes no pêlo de cão. É também possível verificar que o tratamento não causou degradação da fibra, pelo que nos indica que o tratamento com NaOH é um bom processo de lavagem da fibra. O diâmetro das fibras de pêlo varia entre 114 μm e 76,7 μm .

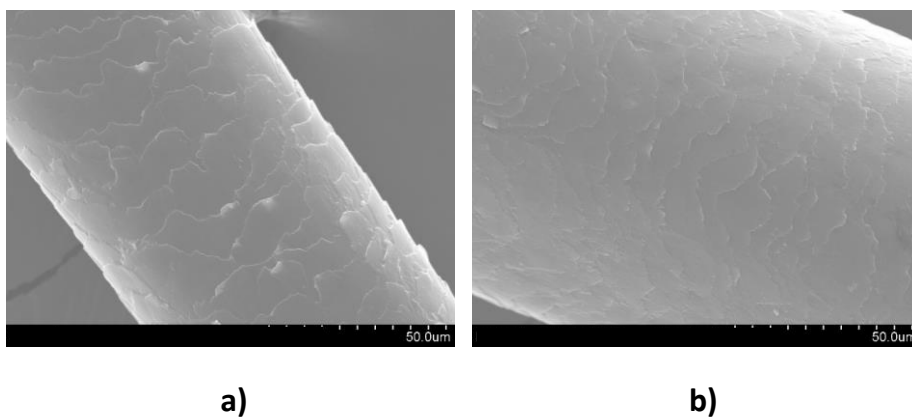


Figura 43 - Imagens obtidas no SEM com ampliação 1.00 K: a) amostra de pêlo com tratamento de NaOH (FpNaOH); b) amostra de pêlo tal e qual (Fptq)

Na FpPVA apresentada na Figura 43 podemos observar que o tratamento causou uma degradação da fibra, e que pelo facto do PVA ser um polímero, polimerizou aleatoriamente na superfície da fibra, causando as irregularidades visíveis na Figura 44 b).

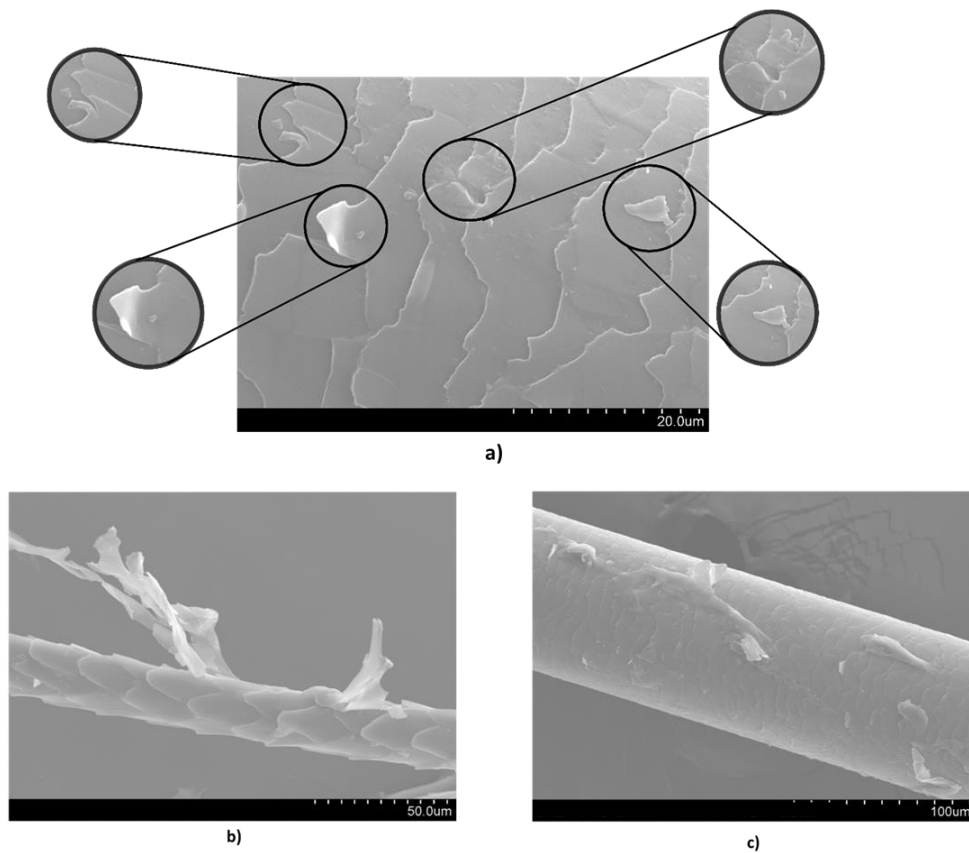


Figura 44 – Imagens obtidas no SEM: a) Pêlo com tratamento PVA – ampliação 1.00K; b) Subpêlo com tratamento de PVA- ampliação 750; c) Subpêlo com tratamento de PVA- ampliação 500

Na Figura 45 é possível verificar que as escamas do subpêlo da Fptq apresentam geometrias e diâmetros diferentes, que variam $19,3 \mu\text{m}$ e $24,9 \mu\text{m}$. Esta discrepância pode influenciar a adesão à matriz, uma vez que é uma característica do pêlo sem tratamento e deste modo irá influenciar em qualquer tratamento utilizado.

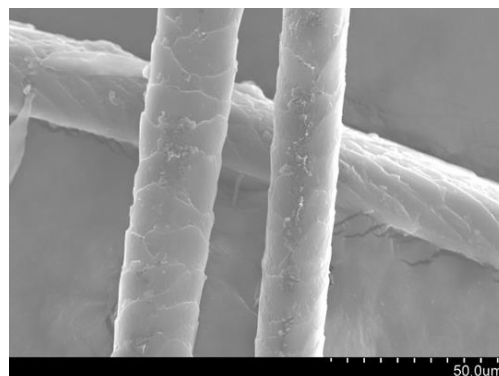


Figura 45 – Escamas do subpêlo da Fptq

1.3 Teste ótico de molhabilidade das fibras de lã de cão Serra da Estrela

O teste da molhabilidade da fibra foi inicialmente realizado com água, onde foi possível perceber que a fibra não conseguia reter nenhum fluido. Posteriormente realizou-se o ensaio com a resina epóxida verde onde é possível verificar na Figura 46 que na Fptq as gotas de resinas em contacto com a fibra têm um menor ângulo de contacto com a fibra. Já na FpNaOH o ângulo de contacto da gota de resina com a fibra é ligeiramente inferior, o que nos indica que a fibra tem uma melhor molhabilidade da resina. Isto deve-se ao facto de as ceras e as gorduras presentes na fibra terem sido removidas com o tratamento com NaOH, permitindo assim uma melhor adesão da resina na fibra. Por outro lado, é possível verificar que quando a gota da resina entra em contacto com a fibra divide-se em mais duas gotas, isto deve-se ao facto das escamas presentes no pêlo conferirem rugosidade na sua superfície dando origem a este fenómeno (Figura 43). No entanto, no FpPVA este fenómeno não se verifica tão significativamente devido à degradação da fibra pelo tratamento de PVA (Figura 44).

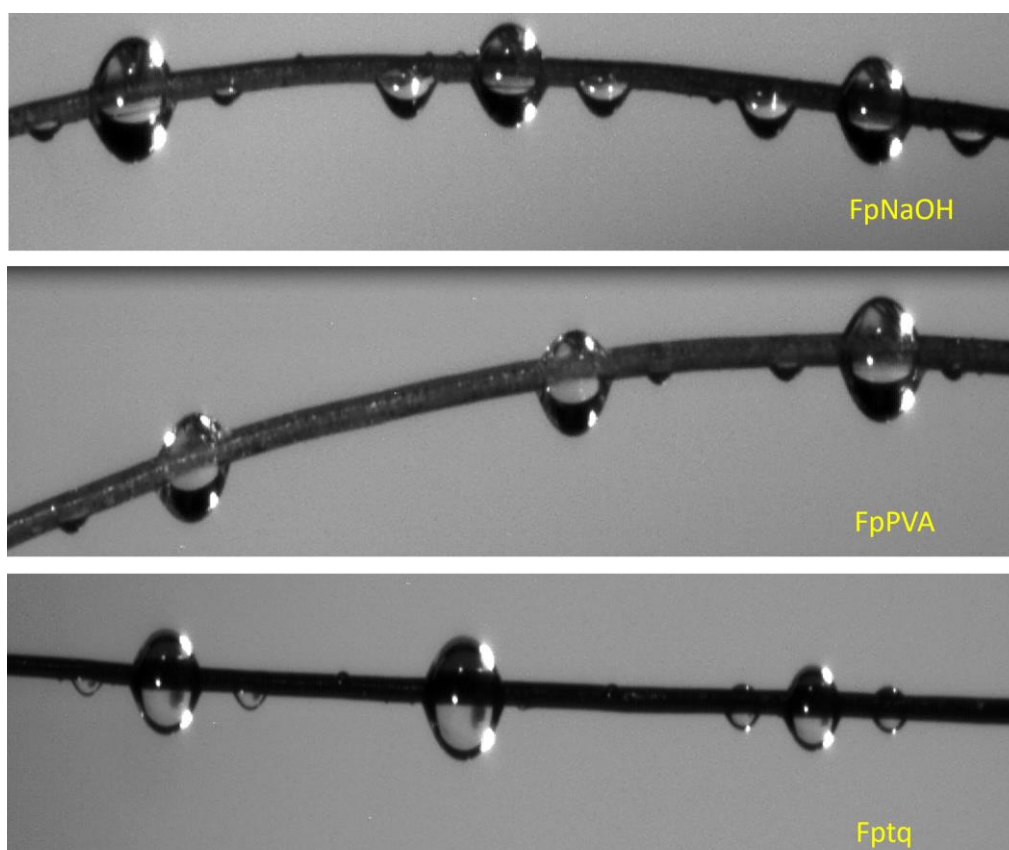


Figura 46 - Molhabilidade da fibra de lã de cão Serra da Estrela com a resina epóxida verde

2. Testes Mecânicos

2.1 Ensaios de Tração

Analisando os gráficos da Figura 47 e 48, podemos verificar que a $M_{Ec}X_{Fv}$ apresenta uma resistência à tração mais elevada comparativamente com os outros compósitos, o que já seria esperado. No entanto, analisando os compósitos com fibra de lã de cão, percebemos que o compósito de $M_{Ev}X_{Fptq}$ apresenta uma resistência à tração muito semelhante ao $M_{Ev}X_{FpNaOH}$ pelo que os tratamentos efetuados neste caso não demonstraram melhorar o desempenho dos compósitos no ensaio da tração. Ainda assim, o desempenho $M_{Ev}X_{FpPVA}$ foi bastante inferior, o que nos confirma que houve realmente degradação da fibra, como o anteriormente discutido nas caracterizações das fibras por DR-X e SEM. O facto do desempenho do compósito $M_{Ev}X_{FpNaOH}$ ser muito idêntico ao $M_{Ev}X_{Fptq}$ também indica que o tratamento com NaOH não afetou a fibra, de onde se pode concluir que este tratamento não passa de um processo de lavagem das fibras. Da análise dos resultados foi ainda possível verificar que os compósitos reforçados com fibra de lã de cão apresentaram uma maior homogeneidade do que o $M_{Ec}X_{Fv}$ uma vez que a sua dispersão de resultados é muito menor. A resistência à tração da resina epóxida convencional é de 74 MPa (Anexo B). Comparando-a com o compósito $M_{Ec}X_{Fv}$, seria de esperar obter um valor pelo menos igual ao da resina, no entanto tal não se verificou devido à má distribuição das fibras de vidro na placa de compósito (ver Figura 37 a)) e à baixa fração volúmica que se traduziu mais num defeito do que num reforço. Relativamente à resina epóxida verde, esta apresenta uma resistência à tração de 48 MPa (Anexo A). Como seria esperado, uma vez que a fração volúmica de pêlo representa mais de metade da placa e a fibra de lã de cão é menos resistente, traduziu-se numa diminuição da resistência à tração.

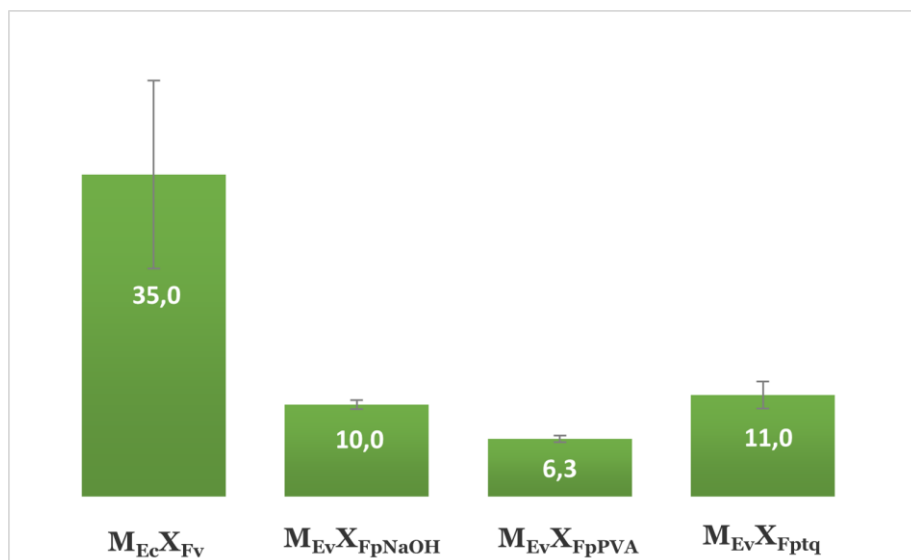


Figura 47 - Resultados da resistência à tração (MPa)

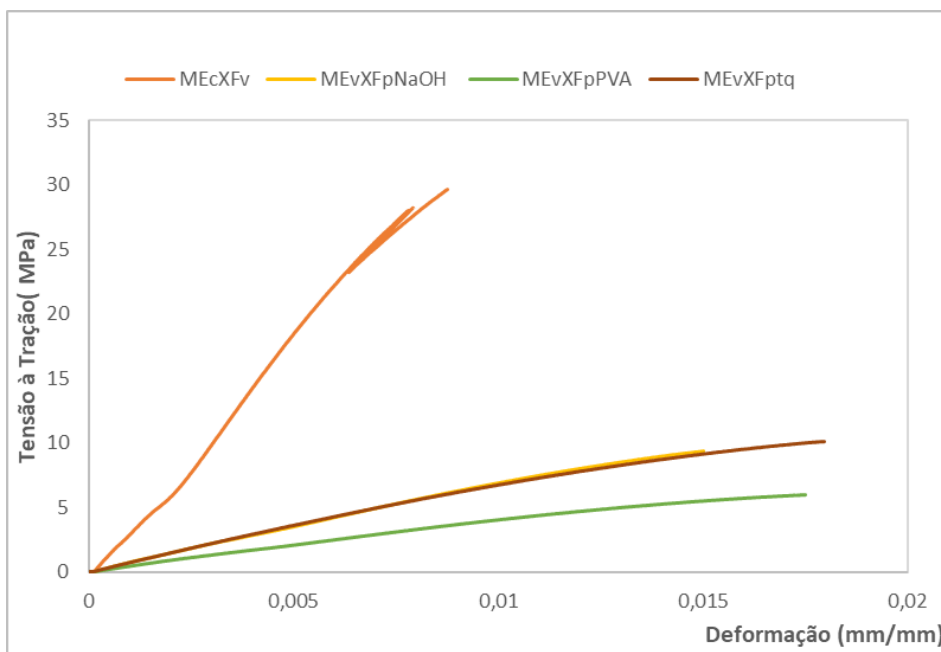


Figura 48 – Gráfico de tensão/deformação do ensaio à tração em função da deformação

Relativamente à deformação na rutura (Figura 49) podemos verificar que o $M_{Ec}X_{fv}$ é o que apresenta a menor deformação enquanto os restantes compósitos com e sem tratamentos apresentam valores muito similares. Em linha com os resultados discutidos anteriormente para a resistência à tração, as placas de compósito produzidas com resina epóxida verde (1,6% - ver Anexo A) apresentaram um valor superior de deformação à rutura, o que é justificado com o elevado volume de lã de pêlo de cão presente na placa. Já a placa produzida com a resina epóxida convencional apresentou uma diminuição do valor (3,1% - ver Anexo B), isto deve-se, ao facto da fibra estar mal distribuída e resultar como um defeito no desempenho mecânico do compósito e não como reforço.

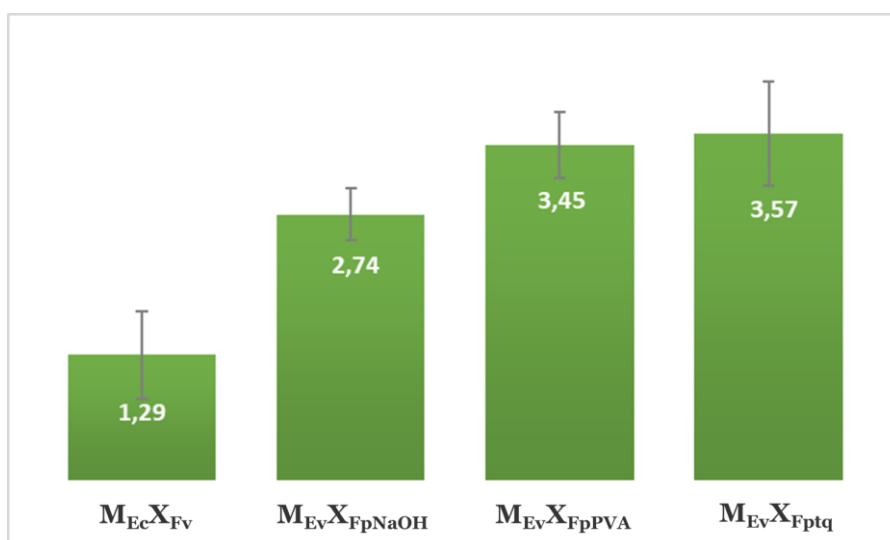


Figura 49 - Resultados da deformação na rutura (%)

De acordo com a Figura 50, podemos verificar que o módulo de Young $M_{Ec}X_{Fv}$, é de 3,5 GPa, ou seja, o valor é igual ao módulo de Young da resina epóxida convencional (Anexo B), o que nos indica que o provete é maioritariamente composto por resina. Isto deve-se ao facto de a proporção volúmica de fibra ser bastante reduzida em relação à de resina utilizada. Para além disso, o módulo de Young da fibra de vidro é de 73 MPa (ver Tabela 5), o que significa que o resultado obtido devia ter sido bastante superior se a fibra estivesse a funcionar corretamente como um reforço. Nos compósitos $M_{Ev}X_{FpNaOH}$, $M_{Ev}X_{FpPVA}$ o módulo de Young diminui quando comparado ao da resina Epóxida verde (Anexo A), isto deve-se ao facto do volume de pêlo de lã de cão ser bastante superior ao da resina, o que faz com que a elasticidade do compósito aumente. Segundo o autor Haris et al. (2022), existe uma relação linear entre o aumento do teor de fibra e o aumento do módulo de elasticidade do compósito, o que valida o resultado obtido.

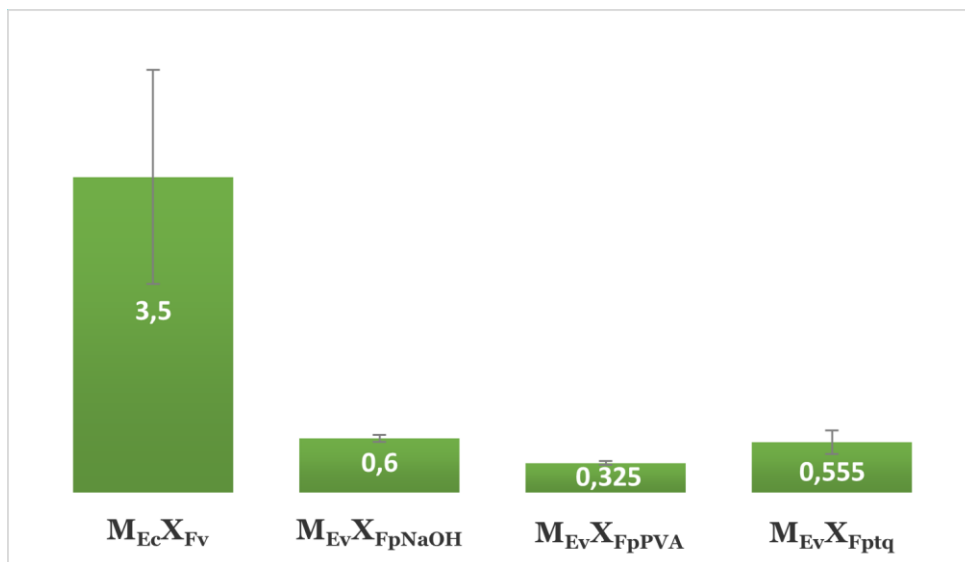


Figura 50 - Resultados Módulo de Young (GPa)

Fazendo um apanhado dos resultados à tração obtidos e comparando com os resultados apresentados na Tabela 2, podemos inferir que a fibra de lã de cão apesar de ter a mesma densidade do que a de lã de ovelha, apresenta uma resistência à tração e um módulo de Young bastante inferiores.

A lei das misturas permite calcular os valores limites para o módulo de young global do compósito, sabendo à partida o módulo elástico dos constituintes, fibra e matriz, e as respetivas frações volúmicas. Partindo das condições de isotensão e isodeformação de um compósito são obtidos os valores limites para o módulo de elasticidade do compósito pelas equações 6 e 7 respetivamente.

$$E_{C,T} = \frac{E_m \cdot E_f}{V_m \cdot E_f + V_f \cdot E_m}$$

Equação 6

onde $E_{C,T}$ representa o estado de isotensão, E_m e E_f o módulo de young da matriz e da fibra em N/mm², V_m e V_f representa a fração volúmica da matriz e da fibra respetivamente.

$$E_{C,L} = E_m \cdot V_m + E_f \cdot V_f$$

Equação 7

onde $E_{C,L}$ é o estado de isodeformação, E_m e E_f representam o módulo de young da matriz e da fibra em N/mm² e V_m e V_f representa a fração volúmica da matriz e da fibra respetivamente.

Analisando os valores do módulo de elasticidade apresentados na Tabela 12, podemos verificar que para o $M_{EC}X_{Fv}$ estão em concordância com o previsto pelo modelo teórico, estando mais aproximado do módulo considerando a condição de isotensão. A elevada diminuição entre o valor obtido experimentalmente para o valor teórico calculado na lei das misturas na condição de isotensão está relacionado com a elevada presença de ar nos compósitos devido ao procedimento experimental de desligar o vácuo ao fim de 4 horas (tempo de entrada em gel da resina) de acordo com a ficha técnica das resinas (Anexo A e Anexo B). Quando a bomba de vácuo foi desligada, o compósito ainda não tinha a cura completa permitindo a entrada de ar na estrutura do compósito e a recuperação de parte da espessura inicial.

Tabela 12 - Resultados do estado de isotensão e isodeformação dos diferentes compósitos

	Condição de Isotensão	Condição de Isodeformação	Valor obtido
$M_{EC}X_{Fv}$	4,23	22,67	3,5
$M_{Ev}X_{Fptq}$	3,56	3,56	0,56
$M_{Ev}X_{FpNaOH}$			0,60
$M_{Ev}X_{FpPVA}$			0,33

2.2 Ensaio de Flexão

Analisando o gráfico da Figura 51, podemos verificar que nos ensaios de flexão os compósitos mantêm a mesma tendência de comportamento dos ensaios de tração. O de $M_{EC}X_{Fv}$ é o que apresenta o maior valor da tensão à flexão de 154,9 MPa, enquanto para o $M_{Ev}X_{FpNaOH}$ e $M_{Ev}X_{Fptq}$ é de aproximadamente 26 MPa. Já para o de $M_{Ev}X_{FpPVA}$ é de 10,8 MPa que é o menor valor e bastante inferior ao dos outros compósitos, o que seria expectável devido à degradação da fibra pelo tratamento de PVA como discutido anteriormente.

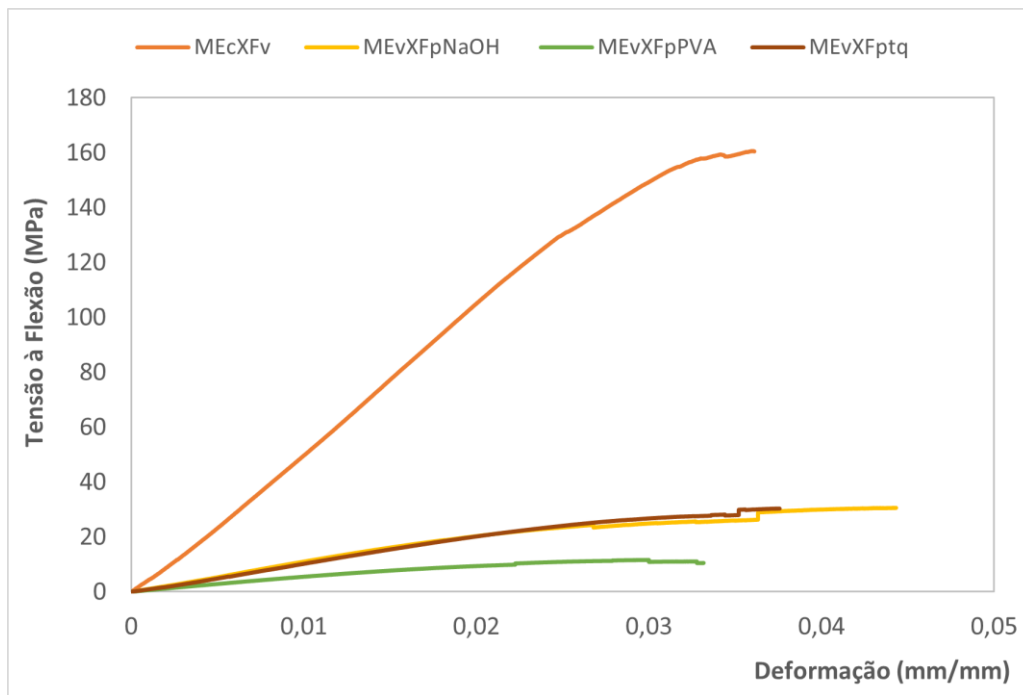


Figura 51 -Gráfico da curva média tensão/deformação devida a um carregamento à flexão em função da deformação

A tenacidade é obtida a partir da área sob a curva do gráfico tensão/deformação até ao ponto de rutura. A tenacidade foi calculada numericamente numa folha de cálculo em Excel, considerando o somatório das áreas de barras cuja largura é a diferença finita das deformações em dois pontos adjacentes da curva, e cuja altura corresponde ao valor da tensão do primeiro ponto. Analisando os resultados obtidos na Tabela 13 para os diferentes compósitos é possível verificar que o de $M_{EC}X_{Fv}$ consegue absorver uma maior energia até à rutura. Isto seria espetável uma vez que a fibra de vidro tem uma maior resistência e rigidez comparativamente ao pelo de lã de cão Serra da Estrela fazendo com que o $M_{EC}X_{Fv}$ consiga absorver uma maior energia até à rutura. Dos compósitos produzidos com fibra de lã de cão Serra da Estrela o de $M_{Ev}X_{FpNaOH}$ apresenta uma maior tenacidade que representa um desempenho ligeiramente melhor que o de $M_{Ev}X_{Fptq}$, o que nos indica que a lavagem da fibra com NaOH melhorou efetivamente a aderência ou molhabilidade como foi possível verificar na Figura 46, e conseqüentemente o desempenho do compósito. Já o de $M_{Ev}X_{FpPVA}$ tem uma tenacidade muito inferior, e inclusive o módulo de elasticidade é também mais reduzido, devido à degradação da fibra causada pelo tratamento com o PVA, tal como demonstrado na Figura 44.

Tabela 13 - Resultados da tenacidade dos diferentes compósitos

	Tenacidade (J/mm ³)
$M_{EC}X_{Fv}$	3,25
$M_{Ev}X_{Fptq}$	0,65
$M_{Ev}X_{FpNaOH}$	0,84
$M_{Ev}X_{FpPVA}$	0,24

Comparando os resultados da resistência à flexão apresentados na Figura 52 do compósito de $M_{EC}X_{Fv}$ com os da resina epóxida convencional (136 MPa – Anexo B) e tendo em consideração o elevado valor do desvio padrão devido à má distribuição das fibras no compósito e à elevada fração volúmica de resina, não se verificou grande disparidade entre os seus valores. Relativamente aos compósitos de $M_{Ev}X_{Fptq}$, $M_{Ev}X_{FpNaOH}$, $M_{Ev}X_{FpPVA}$ o valor da resistência à flexão é menor comparativamente com o da resina epóxida verde (114 MPa – Anexo A), o que seria de esperar uma vez que a fração volúmica do pêlo é bastante superior ao da resina, o que torna o provete menos rígido oferecendo uma menor resistência à carga.

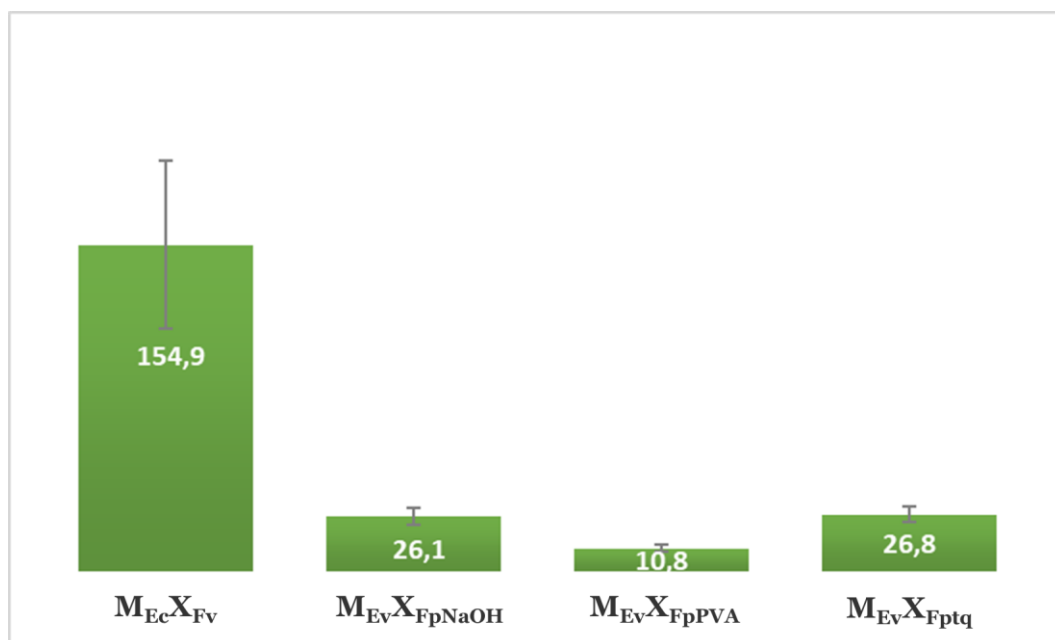


Figura 52 – Resultados da resistência à flexão (MPa)

Analisando o resultado de deformação máxima à flexão (Figura 53) do compósito de $M_{EC}X_{Fv}$, e comparando-o com o da resina epóxida convencional (9,9% - Anexo B), houve uma diminuição do valor. Apesar de neste compósito a resina estar em maior proporção volumétrica que a fibra de vidro, esta encontra-se mal distribuída pelo compósito comprometendo o desempenho mecânico à flexão da resina. Nos compósitos produzidos com lã de pêlo cão e

resina epóxida verde também houve uma diminuição do valor da deformação máxima à flexão quando comparado com o valor da resina (5,5% - Anexo A).

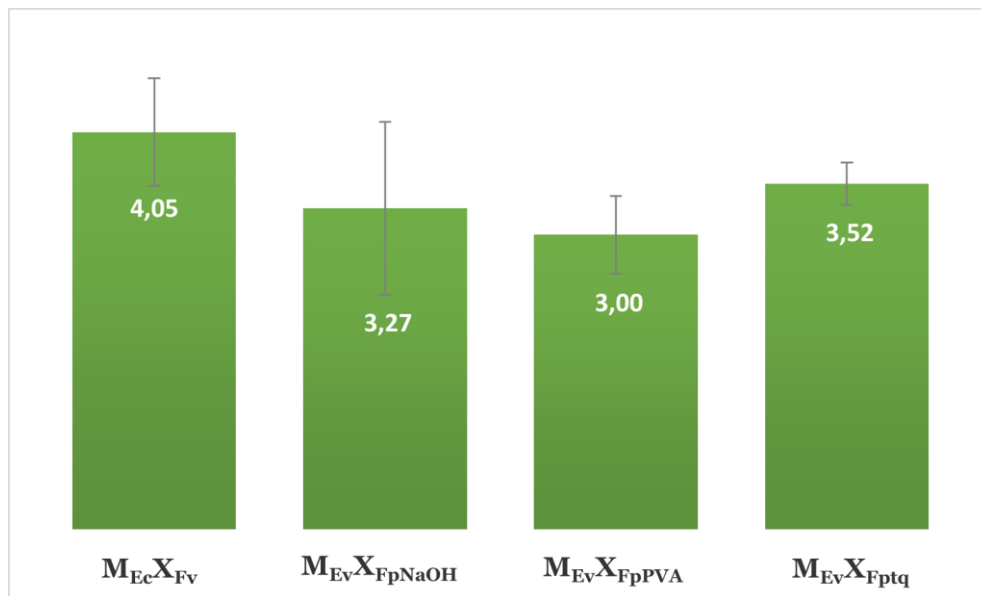


Figura 53 - Resultados da deformação máxima à flexão (%)

De acordo com a Figura 54 podemos verificar que o $M_{Ec}X_{Fv}$ apresenta um valor superior quando comparado com a resina Epóxida convencional (2,9 GPa – anexo B), uma vez que a fibra apresenta uma maior rigidez e conseqüentemente aumenta a rigidez do compósito. Nos compósitos produzidos com o pêlo de lã de cão serra da estrela, o $M_{Ev}X_{FNaOH}$ e o $M_{Ev}X_{Fptq}$ apresentaram o mesmo valor, demonstrando mais uma vez que o tratamento com NaOH não degrada a fibra. Quando comparado com a resina epóxida verde houve uma diminuição do valor do modulo de rigidez à flexão devido a elevada fração volúmica do pêlo de lã de cão que apresenta uma rigidez menor que a fibra de vidro diminuindo assim a rigidez do compósito. O $M_{Ev}X_{FPVA}$ apresenta um valor bastante inferior devido à degradação da fibra causada pelo tratamento com PVA.

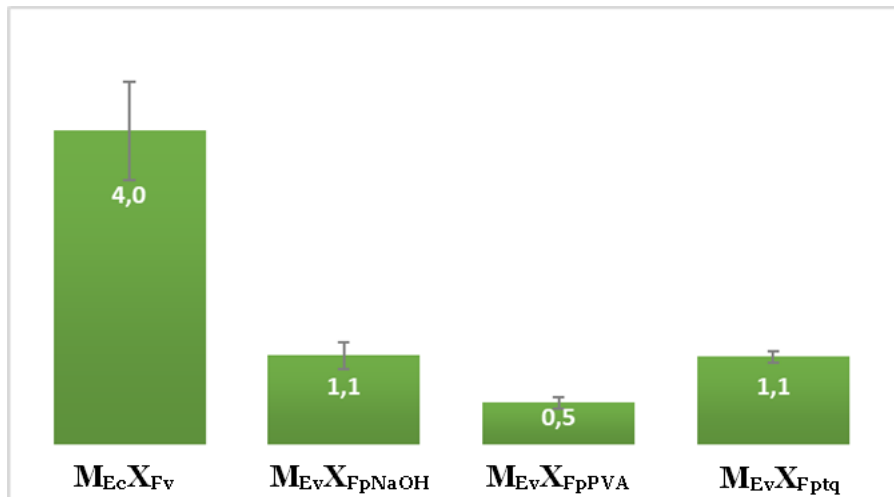


Figura 54 - Resultados do módulo rigidez à flexão (GPa)

2.3 Ensaios de Relaxamento

Analisando o gráfico da Figura 55 podemos verificar que $M_{Ev}X_{FpNaOH}$ e $M_{Ev}X_{Fptq}$ apresentam um comportamento viscoelástico muito semelhante, o que mais uma vez nos permite concluir que o tratamento de NaOH funciona como uma lavagem da fibra. O tratamento como PVA suportou a menor força enquanto o $M_{Ec}X_{Fv}$ a maior. Estes resultados vêm reforçar os dados acima discutidos, uma vez que o comportamento dos compósitos segue a mesma tendência em todos os ensaios mecânicos realizados. Podemos ainda concluir que o modelo KWW ajusta os dados com sucesso, uma vez que as curvas experimentais médias e a do modelo estão concordantes.

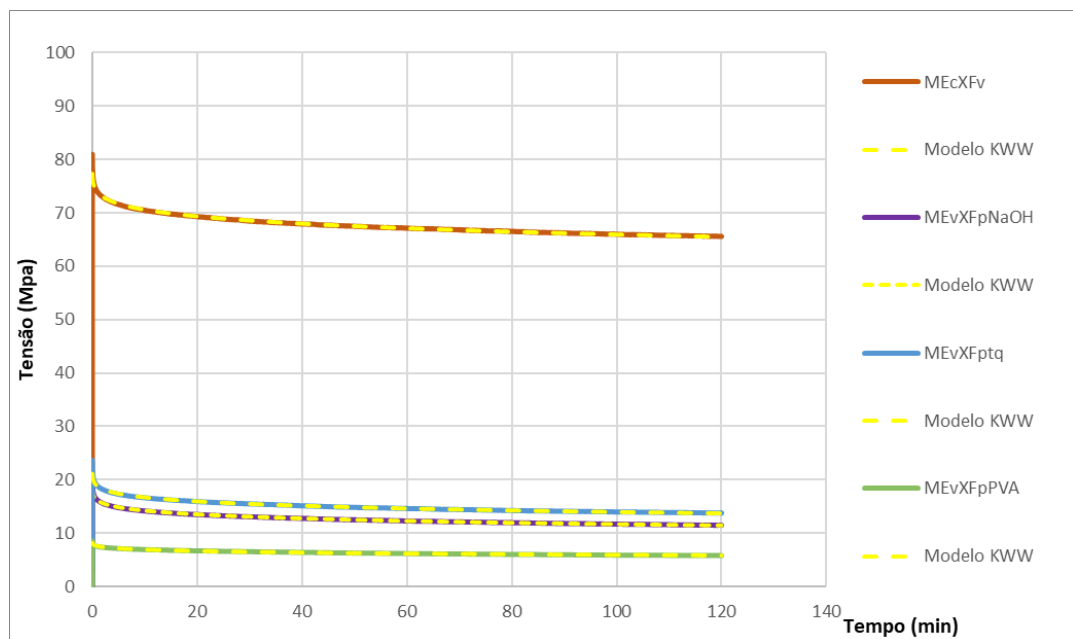


Figura 55 – Gráfico da tensão de relaxamento (Mpa) em função do Tempo (min) com o ajuste do modelo KWW

Capítulo V – Conclusões e Trabalhos Futuros

1. Objetivos Alcançados

Otimizando as proporções fibra/resina foi possível produzir um compósito homogêneo e com boa distribuição da lã de pêlo de cão, uma vez que o desvio padrão obtido é baixo nos diferentes ensaios realizados. Em contrapartida, no compósito produzido com a fibra de vidro o desvio padrão obtido foi elevado o que indica que este não será o melhor método para produzir o compósito com este tipo de fibra, não se conseguindo distribuir a fibra de vidro de forma homogênea.

Através dos tratamentos químicos realizados foi possível verificar que o PVA é um tratamento bastante agressivo para este tipo de fibra, uma vez foi verificado que a cristalinidade da fibra diminuiu (Figura 39) o que nos indicou que houve degradação da fibra, ou seja, a fibra ficou fragilizada podendo ter comprometido o seu desempenho mecânico. Por outro lado, pode também ter comprometido a adesão da fibra à resina e conseqüentemente o seu péssimo desempenho mecânico. Por outro lado, o tratamento com NaOH funcionou como uma lavagem da fibra removendo as ceras e gorduras naturalmente presentes na superfície da fibra, deste modo o seu desempenho mecânico revelou-se muito idêntico ao pêlo sem qualquer tratamento.

Os compósitos produzidos com fibra de lã de cão Serra da Estrela apresentam vantagens comparativamente com os compósitos de fibra de vidro, uma vez que têm menor custo de produção, para além de serem ecológicos e poderem dar utilidade a um subproduto residual de modo a aliviar a pressão dos aterros sanitários. Apesar de não poderem ser aplicados em estruturas que requeiram resistências mecânicas particularmente elevadas, podem ser aplicados em painéis de acabamentos de interiores automóveis, como painéis de portas, coberturas interiores dos veículos como o teto e os bancos traseiros, podendo ainda ser aplicados em paredes divisórias e como painéis decorativos em habitações, em peças de mobiliária como revestimento. No entanto, para aplicações estruturais é possível utilizar o compósito fibra de lã de cão Serra da Estrela em painéis sandwich. Estes painéis são constituídos por duas faces que se encontram separadas e coladas por um núcleo que normalmente é constituído por espumas poliméricas, madeiras ou favos de mel. Uma vez que as tensões no núcleo são bastante menores que nas faces dos painéis, a lã de cão Serra da Estrela seria uma opção mais sustentável e capaz de substituir os materiais convencionalmente utilizados.

2. Contribuição deste Estudo

A produção do compósito com fibra de lã de cão é mais um passo no caminho da sustentabilidade, uma vez que se conseguiu aproveitar um resíduo inexplorado e abundante nos aterros sanitários, juntamente com uma resina de base biológica e assim produzir um novo material capaz de substituir as fibras sintéticas utilizadas habitualmente.

3. Trabalhos Futuros

Futuramente seria interessante produzir o compósito de fibra de vidro com uma manta/tecido de fibra de vidro de modo a aumentar a homogeneidade da fibra no compósito. Por outro lado, também se poderia aprofundar este estudo produzindo um compósito com o pêlo de lã de cão a partir da fiação do pêlo de modo a produzir um tecido ou produzir um não tecido (equivalente à manta de vidro). Após a produção realizar os testes mecânicos de modo a verificar se aumenta a homogeneidade dos compósitos produzidos, bem como o aumento do desempenho mecânico de modo a utilizar estes compósitos em mais áreas e consequentemente aumentar a sustentabilidade em mais indústrias. De modo a promover um desempenho mecânico destes novos compósitos pode ser ainda importante avaliar e testar outros tratamentos químicos na fibra para melhorar a sua adesão à matriz sem danificar a estrutura da fibra. Segundo os autores Goda et al. (2006) e Kabir et al. (2012) a morfologia da superfície da fibra teve alterações quando tratadas com soluções de NaOH (1, 5 e 10%) com diferentes tempos de submersão das fibras (0,24 e 48 h), apesar destes estudos terem sido realizados em fibra naturais de origem vegetal, seria interessante ver o comportamento da fibra de lã de cão Serra da Estrela tratada com NaOH nas diferentes concentrações e tempo.

Referências Bibliográficas

- Ahmad, H., Chhipi-Shrestha, G., Hewage, K., & Sadiq, R. (2022). A Comprehensive Review on Construction Applications and Life Cycle Sustainability of Natural Fiber Biocomposites. *Sustainability*, *14*(23), 15905.
<https://doi.org/10.3390/su142315905>
- ASTM E328 (2021). Standard Test Methods for Stress Relaxation for Materials and Structures, American Society for Testing and Materials, Pensilvânia, EUA.
- Akter, M., Uddin, M. H., & Tania, I. S. (2022). Biocomposites based on natural fibers and polymers: A review on properties and potential applications. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, *41*(17–18), 705–742.
<https://doi.org/10.1177/07316844211070609>
- Ares-Elejoste, P., Seoane-Rivero, R., Gandarias, I., Iturmendi, A., & Gondra, K. (2023). Sustainable Alternatives for the Development of Thermoset Composites with Low Environmental Impact. *Polymers*, *15*(13), 2939.
<https://doi.org/10.3390/polym15132939>
- Auvergne, R., Caillol, S., David, G., Boutevin, B., & Pascault, J.-P. (2014). Biobased Thermosetting Epoxy: Present and Future. *Chemical Reviews*, *114*(2), 1082–1115.
<https://doi.org/10.1021/cr3001274>
- Bai, J. (Ed.). (2013). *Advanced fibre-reinforced polymer (FRP) composites for structural applications*. Woodhead Publ.
- Baroncini, E. A., Kumar Yadav, S., Palmese, G. R., & Stanzione, J. F. (2016). Recent advances in bio-based epoxy resins and bio-based epoxy curing agents. *Journal of Applied Polymer Science*, *133*(45), app.44103.
<https://doi.org/10.1002/app.44103>
- Carvalho, R. (2015). *Degradação mecânica em compósitos de vidro/epóxico sujeitos a soluções cimentícias* [Dissertação de Mestrado]. Faculdade Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Castro, B. F. M. de. (2013). *Estudo e Caracterização Mecânica de Compósitos Reforçados com Fibras Naturais* [Dissertação de Mestrado]. Instituto superior de engenharia do Porto.
- Claudivan da Silva, F., Felgueiras, H. P., Ladchumananandasivam, R., Ubiragi L. Mendes, J., de O. Souto Silva, K. K., & Zille, A. (2020). Dog Wool Microparticles/Polyurethane Composite for Thermal Insulation. *Polymers*, *12*(5), 1098.
<https://doi.org/10.3390/polym12051098>
- Conzatti, L., Giunco, F., Stagnaro, P., Capobianco, M., Castellano, M., & Marsano, E. (2012). Polyester-based biocomposites containing wool fibres. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *43*(7), 1113–1119.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.02.019>

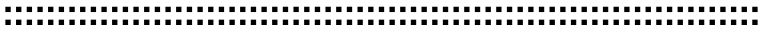
- Cruz, C. (2007). *As raças portuguesas de cães de gado e de pastoreio—Aspectos morfológicos e comportamentais*. Universidade Técnica de Lisboa.
- Duro, A. C. F. M. (2013). *Desenvolvimento e caracterização de compósitos reforçados com fibras de linho e sisal* [Dissertação de Mestrado]. Universidade do Minho.
- FEDIAF / *The voice of the European pet food industry*. (2023).
<https://europeanpetfood.org/>
- Ferreira, D. (2016). *Projeto e desenvolvimento de peça em compósito obtida em moldagem por transferência de resina para aplicação em telescópios* [Dissertação de Pós-graduação]. Universidade Federal de Itajubá.
- Fiore, V. (2020). Natural Fibres and Their Composites. *Polymers*, 12(10), 2380.
<https://doi.org/10.3390/polym12102380>
- Hong, C. K., & Wool, R. P. (2005). Development of a bio-based composite material from soybean oil and keratin fibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 95(6), 1524–1538.
<https://doi.org/10.1002/app.21044>
- Hu, N., Wang, K., Ma, H., Pan, W., & Chen, Q. (2016). R&D on glass fiber reinforced epoxy resin composites for superconducting Tokamak. *SpringerPlus*, 5(1), 1564.
<https://doi.org/10.1186/s40064-016-2995-6>
- Islam, M. Z., Sarker, M. E., Rahman, M. M., Islam, M. R., Ahmed, A. T. M. F., Mahmud, M. S., & Syduzzaman, M. (2022). Green composites from natural fibers and biopolymers: A review on processing, properties, and applications. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 41(13–14), 526–557.
<https://doi.org/10.1177/07316844211058708>
- ISO 178 (2019) *Plastics - Determination of flexural properties*, International Standard Organization, Switzerland.
- ISO 527-1 (2019) *Plastics - Determination of tensile properties — Part 1: General principles*, International Standard Organization, Switzerland.
- ISO 527-4 (2023) *Plastics - Determination of tensile properties — Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites*, International Standard Organization, Switzerland.
- Jesus, J. (2021). *Utilização de Compósitos de Polímero Reforçado com Fibras na Construção e Reabilitação: Casos de Estudo, Desafios Correntes e Perspectivas Futuras* [Dissertação de Mestrado]. Instituto Politécnico de Setúbal.
- Kamarudin, S. H., Mohd Basri, M. S., Rayung, M., Abu, F., Ahmad, S., Norizan, M. N., Osman, S., Sarifuddin, N., Desa, M. S. Z. M., Abdullah, U. H., Mohamed Amin Tawakkal, I. S., & Abdullah, L. C. (2022). A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composites (NFRPC) for Sustainable Industrial Applications. *Polymers*, 14(17), 3698.
<https://doi.org/10.3390/polym14173698>
- Khalid, M. Y., Al Rashid, A., Arif, Z. U., Ahmed, W., Arshad, H., & Zaidi, A. A. (2021). Natural fiber reinforced composites: Sustainable materials for emerging applications. *Results in Engineering*, 11, 100263.
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100263>
- Lima, D. F. C. D., Andreazzi, M. A., Gonçalves, J. E., Bello, J. R., Mardigan, L. P., Lizama, M. D. L. A. P., Toma, A. I., & Souza, H. V. D. (2022). Estudo sobre a

- hidrólise da α -queratina presente no pelo de cachorro. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, 13(2), 167–176.
<https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2022.002.0015>
- Liu, X., Nie, Y., Meng, X., Zhang, Z., Zhang, X., & Zhang, S. (2017). DBN-based ionic liquids with high capability for the dissolution of wool keratin. *RSC Advances*, 7(4), 1981–1988.
<https://doi.org/10.1039/C6RA26057H>
- Ma, S., Li, T., Liu, X., & Zhu, J. (2016). Research progress on bio-based thermosetting resins: Research progress on bio-based thermosetting resins. *Polymer International*, 65(2), 164–173.
<https://doi.org/10.1002/pi.5027>
- Manivannan, J., Rajesh, S., Mayandi, K., Rajini, N., Ismail, S. O., Mohammad, F., Kuzman, M. K., & Al-Lohedan, H. A. (2020). Animal fiber characterization and fiber loading effect on mechanical behaviors of sheep wool fiber reinforced polyester composites. *Journal of Natural Fibers*, 19(11), 4007–4023.
<https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1848743>
- Mann, G. S., Azum, N., Khan, A., Rub, M. A., Hassan, M. I., Fatima, K., & Asiri, A. M. (2023). Green Composites Based on Animal Fiber and Their Applications for a Sustainable Future. *Polymers*, 15(3), 601.
<https://doi.org/10.3390/polym15030601>
- Mann, G. S., Singh, J., & Bahl, A. (2019). *Benefits and limitations of using natural fibers as reinforcement materials*. 6(1).
- Mattos, L. (2021, fevereiro 1). *Sistema tegumentar – Anatomia papel e caneta*.
<https://anatomia-papel-e-caneta.com/sistema-tegumentar/>
- Mendonça, V. C. (2019). *Caracterização das propriedades mecânicas de uma resina epoxy reforçada com nanotubos de carbono e ferro*. Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.
- Peças, P., Carvalho, H., Salman, H., & Leite, M. (2018). Natural Fibre Composites and Their Applications: A Review. *Journal of Composites Science*, 2(4), 66.
<https://doi.org/10.3390/jcs2040066>
- Rabiei, N., Amirshahi, S. H., & Haghghat Kish, M. (2019). Description of physical aging kinetics of glassy polymers by interpretation of parameters of the Kohlrausch-Williams-Watts relaxation function via simulation. *Physical Review E*, 99(3), 032502.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.99.032502>
- Rajesh, G., Hemanth Nadh, B., & Guduru, R. C. C. (2018). Evaluating Tensile Properties of Animal and Hybrid Fiber Reinforced Polyester Composites. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 390, 012011.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/390/1/012011>
- Rakesh, P. K., & Singh, I. (Eds.). (2019). *Processing of Green Composites*. Springer Singapore.
<https://doi.org/10.1007/978-981-13-6019-0>
- Ramachandran, A., Mavinkere Rangappa, S., Kushvaha, V., Khan, A., Seingchin, S., & Dhakal, H. N. (2022). Modification of Fibers and Matrices in Natural Fiber

- Reinforced Polymer Composites: A Comprehensive Review. *Macromolecular Rapid Communications*, 43(17), 2100862.
<https://doi.org/10.1002/marc.202100862>
- Ramamoorthy, S., Ramadoss, M., Ramasamy, R., & Thangavel, K. (2018). Analysis of physical and thermal properties of chiengora fibers. *Journal of Natural Fibers*, 17(2), 246–257.
<https://doi.org/10.1080/15440478.2018.1479996>
- Ramos, M. I. (2018). *Produção e Caracterização de Materiais Compósitos à base de Aglomerado de Cortiça* [Dissertação de mestrado]. Instituto superior técnico.
- Reis, P. N. B., Silva, M. P., Santos, P., Parente, J. M., & Bezazi, A. (2020). Viscoelastic behaviour of composites with epoxy matrix filled by cork powder. *Composite Structures*, 234, 111669.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111669>
- Reis, P. N. B., Silva, M. P., Santos, P., Parente, J. M., Valvez, S., & Bezazi, A. (2020). Mechanical performance of an optimized cork agglomerate core-glass fibre sandwich panel. *Composite Structures*, 245, 112375.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112375>
- Rico, P. (2014). *Logística e sustentabilidade ambiental* [Dissertação de Mestrado]. Instituto Politécnico de Setúbal - Escola Superior de Ciências Empresariais
- Romão, C. (2003). *Estudo do Comportamento Mecânico de Materiais Compósitos de Matriz Polimérica Reforçados com Fibras Naturais* [Dissertação de Mestrado]. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Rwawiire, S., Tomkova, B., Militky, J., Jabbar, A., & Kale, B. M. (2015). Development of a biocomposite based on green epoxy polymer and natural cellulose fabric (bark cloth) for automotive instrument panel applications. *Composites Part B: Engineering*, 81, 149–157.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.06.021>
- Sanjay, M. R., Arpitha, G. R., Naik, L. L., Gopalakrishna, K., & Yogesha, B. (2016). Applications of Natural Fibers and Its Composites: An Overview. *Natural Resources*, 07(03), 108–114.
<https://doi.org/10.4236/nr.2016.73011>
- Santos, P., Parente, J. P., Valvez, S., Silva, M. P., & Reis, P. N. B. (2020). Hybridization effect on the bending properties of flax composites. *Procedia Structural Integrity*, 25, 370–377.
<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.04.042>
- Shibata, M., & Nakai, K. (2010). Preparation and properties of biocomposites composed of bio-based epoxy resin, tannic acid, and microfibrillated cellulose: Preparation and Properties of Biocomposites. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 48(4), 425–433.
<https://doi.org/10.1002/polb.21903>
- Sicomin. (2023). *GreenPoxy*. GreenPoxy. <https://greenpoxy.org/>
- Silva, S. O. (2020). *Controle de qualidade e desempenho de pré-impregnados fibra natural/ epóxi para produção de compósitos* [Dissertação de Mestrado]. Universidade de Brasília.

- Suriani, M. J., Zainudin, H. A., Ilyas, R. A., Petru, M., Sapuan, S. M., Ruzaidi, C. M., & Mustapha, R. (2021). Kenaf Fiber/Pet Yarn Reinforced Epoxy Hybrid Polymer Composites: Morphological, Tensile, and Flammability Properties. *Polymers*, *13*(9), 1532.
<https://doi.org/10.3390/polym13091532>
- Tanzi, M. C., Farè, S., & Candiani, G. (2019). Organization, Structure, and Properties of Materials. Em *Foundations of Biomaterials Engineering* (pp. 3–103). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101034-1.00001-3>
- Teixeira, D. (2012). *Influência da Restrição do Fluxo na Microestrutura e nas Propriedades Mecânicas de Compósitos de Poliamida 6.6 Reforçados por Fibras de Vidro Longas Obtidos por Injeção*. Universidade de Caxias do Sul.
- Terry, J. S., & Taylor, A. C. (2021). The properties and suitability of commercial bio-based epoxies for use in fiber-reinforced composites. *Journal of Applied Polymer Science*, *138*(20), 50417.
<https://doi.org/10.1002/app.50417>
- Thakur, V. K., Thakur, M. K., & Kessler, M. R. (Eds.). (2017). *Handbook of composites from renewable materials* (Vol. 6). John Wiley & Sons, Inc.
- Tomar, S. de M. (2018). *Comportamento Mecânico de Materiais Compósitos de Origem Natural* [Dissertação de Mestrado]. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- Wang, D., Yang, X.-H., Tang, R.-C., & Yao, F. (2018). Extraction of Keratin from Rabbit Hair by a Deep Eutectic Solvent and Its Characterization. *Polymers*, *10*(9), 993.
<https://doi.org/10.3390/polym10090993>
- Wu, M., Shen, S., Yang, X., & Tang, R. (2017). Preparation and study on the structure of keratin/PVA membrane containing wool fibers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *254*, 042030.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/254/4/042030>
- Zão, T. (2018). *Desenvolvimento e caracterização de compósitos de polímeros bio-derivados reforçados com fibras para aplicações estruturais* [Dissertação de Mestrado]. Técnico Lisboa.

Anexos



Anexo A

Ficha Técnica da Resina green epóxida

SR GreenPoxy 56 Clear epoxy resin

High bio-based content

SR GreenPoxy 56 resin is out coming from the latest innovations in bio-based chemistry.

SR GreenPoxy 56 resin is produce with a high content of carbon from plant origin. The bio-based Carbon content of our system is certified by an independent laboratory using Carbon 14 measurements (ASTM D6866 or XP CEN/TS 16640)

This is a significant technological advance on the following points:
Clarity, color, performances and guarantees of industrial tonnages availability.

SR GreenPoxy 56 is an epoxy resin which has up to 56% of its molecular structure coming from plant origin.

This percentage is function of the carbon origin contained in the epoxy molecule. The final rate of the mix bio-based carbon content will depend on the hardener choice.


SR GreenPoxy 56 resin is available with multiple hardeners to match your exact needs.



Applications

- Hand lamination for tooling or industrial parts
- RTM processes (infusion, injection...)
- Filament winding
- Hot or cold press
- Casting
- Bonding

Resin SR GreenPoxy 56:


Aspect / colour		Clear liquid
Storage		2 years, crystallisation free
Viscosity (mPa.s ± 20 %)	@ 15 °C	2500
	@ 20 °C	1400
	@ 25 °C	800
	@ 30 °C	500
	@ 40 °C	250
 % bio-based Carbon content		50 - 58
Color (Gardner)		2 max
Density ± 0.005	@ 20 °C	1.198
Refractive index ± 0.5 %	@ 25 °C	1.5350

SR GreenPoxy 56 / SD Surf Clear hardener mix example:

Hardener SD Surf Clear

Aspect / colour		Liquid / clear
Typical reactivity		Standard
Viscosity (mPa.s ± 20 %)	@ 15 °C	80
	@ 20 °C	60
	@ 25 °C	40
	@ 30 °C	30
% bio-based carbon content		0
Color (Gardner)		1 max
Density ± 0.005	@ 20 °C	0.958

SR GreenPoxy 56 / SD Surf Clear mix properties

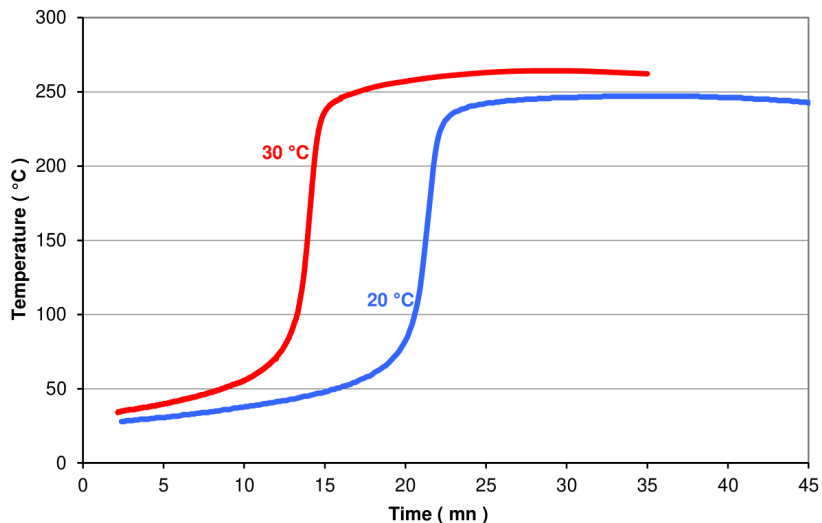
Weight ratio	100 / 37 g
Volume ratio	100 / 47 ml
 % mix bio-based carbon content	35-41
Mix viscosity (mPa.s ± 20 %)	
@ 20 °C	900
@ 30 °C	330
@ 40 °C	200

Reactivity – mass exotherm

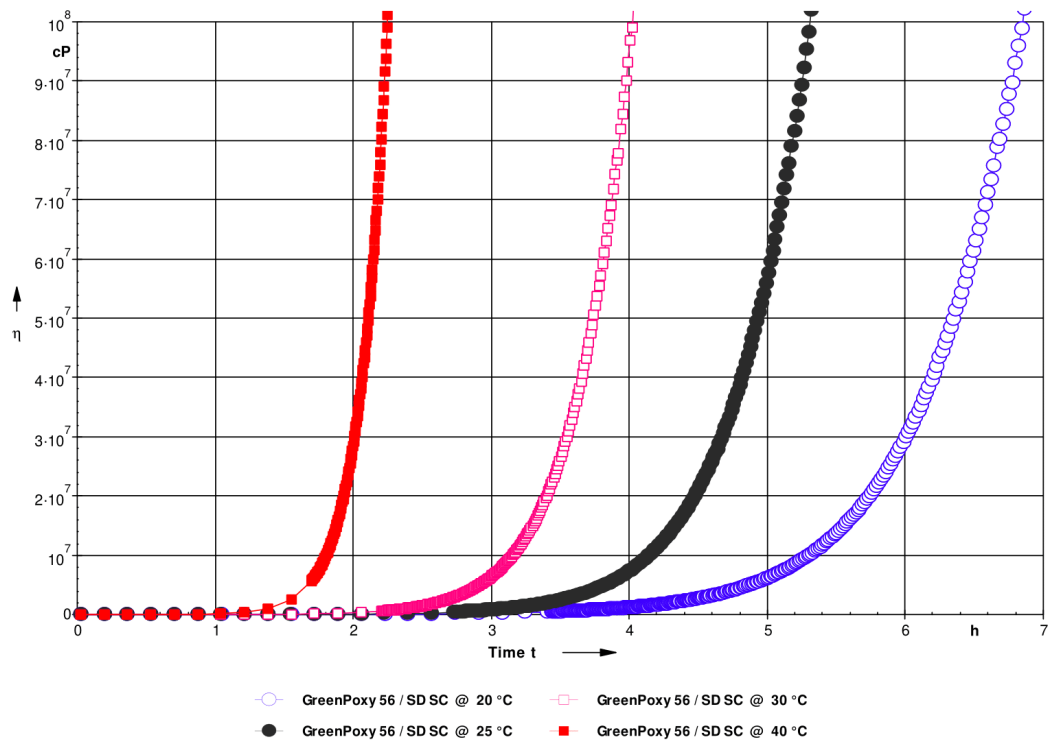
Exothermic peak on 500 g mix :	
@ 20 °C	250 °C
@ 30 °C	265 °C
Time to reach exothermic peak on 500 g mix :	
@ 20 °C	32'
@ 30 °C	28'
Time to reach 50 °C on 500 g mix :	
@ 20 °C	15'
@ 30 °C	8'

Exotherms on 500 g mix @ 20 and 30 °C:

NB: Large casting develop very exotherm temperature and high smokes densities



Reactivity – 1 mm film viscosity evolution



Gel time on 1 mm thickness:

@ 20 °C	4 h
@ 25 °C	3 h 10'
@ 30 °C	2 h 25'
@ 40 °C	1 h 25'

Mechanical properties on pure casted resin

		<i>SR GreenPoxy 56</i> <i>/ SD Surf Clear</i>	<i>SR GreenPoxy 56</i> <i>/ SD Surf Clear</i>	<i>SR GreenPoxy 56</i> <i>/ SD Surf Clear</i>
Curing cycle		7 days @ 23 °C	24 hrs @ 23 °C + 24 hrs @ 40 °C	24 hrs @ 23 °C + 4 hrs @ 40 °C + 8 hrs @ 60 °C
Tension				
Modulus of elasticity	N/mm ²	3 200	3 300	3 300
Maximum resistance	N/mm ²	50	49	51
Resistance at break	N/mm ²	49	48	51
Elongation at max. load	%	1.6	1.6	1.7
Elongation at break	%	1.6	1.6	1.7
Flexion				
Modulus of elasticity	N/mm ²	3 300	3 400	3 300
Maximum resistance	N/mm ²	114	114	123
Elongation at max. load	%	4,5	4,2	5,5
Elongation at break	%	4,7	5,5	6,4
Charpy impact strength				
Resilience	kJ/m ²	20	16	16
Glass transition				
Tg1 onset	°C	53	65	78 / 78
Tg1 onset maximum	°C	-	-	85

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

Measures undertaken according to the following norms:

Tension: Iso 527 - 2

Flexion : Iso 178

Charpy impact strength: NF T 51-035

Shear Strength ASTM D 732 - 93

Compressive NFT51-101

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

Glass transition DSC : ISO 11357-2 : 1999 -5°C to 180°C under nitrogen gaz

Tg1 or Onset : 1st point at 20 °C/mn Tg1 maximum or Onset : second passage

Glass transition by DMTA 2 °C/mn, 4 mm thickness, air

Physical tests according standard ::

Gardner color: NF EN ISO 4630 Visual method

Refractive index : NF ISO 280


Viscosity: NF EN ISO 3219 Rheometer 50 mm, shear 10s⁻¹

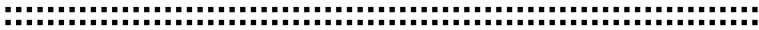
Density: NF EN ISO 2811-1 Pyknometer

Gel time : Cross G' G'' / rheometer CP50 - Shear rate 10 s⁻¹

GreenCarbon content: ASTM D6866 or XP CEN/TS 16640 Avril 2014

Other hardeners mix possibilities with *SR GreenPoxy 56 resin*

	Mixing By weight	 % mix bio-based content + 10 %	Tg 1 maximum or Onset (°C)	Best use
<i>SR GreenPoxy 56 / SD Glass One</i>	100 / 42	36	69	Clear laminates
<i>SR GreenPoxy 56 / SD 1213</i>	100 / 50	34	43	Large clear casting
<i>SR GreenPoxy 56 / SD 280x</i>	100 / 37	37	2806 : 66 2803 : 72 2801 : 80	Multipurpose
<i>SR GreenPoxy 56 / SD 477x</i>	100 / 29	40	4775: 80 4771: 74	Multipurpose
<i>SR GreenPoxy 56 / SD 550x</i>	100 / 37	37	5505 : 78 5503 : 85 5502 : 84	Multipurpose
<i>SR GreenPoxy 56 / SD 597.20</i>	100 / 21	42	100	Very large casting
<i>SR GreenPoxy 56 / SD 720x</i>	100 / 37	37	7206 : 84 7203 : 82 7201 : 80	Multipurpose
<i>SR GreenPoxy 56 / SD 860x</i>	100 / 37	37	8605 : 67 8601 : 56	Multipurpose
<i>SR GreenPoxy 56 / SD 882x</i>	8824 100 / 21 8822 100 / 31	42 39	8824 : 90 8822 : 71	Infusion
<i>SR GreenPoxy 56 / SZ 8525</i>	100 / 24	41	120	Hot process



Anexo B

Ficha Técnica da Resina epóxida convencional



SR 8100 / SD 3304
Page 1 / 7
Version 0

SR 8100 / SD 3304 Infusion System

SR 8100 is a two component epoxy system. It has been specially formulated for resin transfer processes, such as injection or infusion. This system has a very low viscosity at ambient temperature. High mechanical properties can be achieved. The cured system gives a temperature resistance up to 100°C (Tg 1) A post cure is needed before demolding



Epoxy resin SR 8100

Appearance		liquid
Color		yellow
Gardner color		2 ± 0
Platine Cobalt Color Index		
Viscosity (mPa.s)	@ 15 °C	2350 ± 450
	@ 20 °C	1250 ± 250
	@ 25 °C	765 ± 155
	@ 30 °C	475 ± 95
	@ 40 °C	0 ± 0
Density	@ 20 °C	1,1580
Refractive index	@ 25 °C	1,554 ± ,002
Storage (months)	@ Ta	24

Hardener(s)

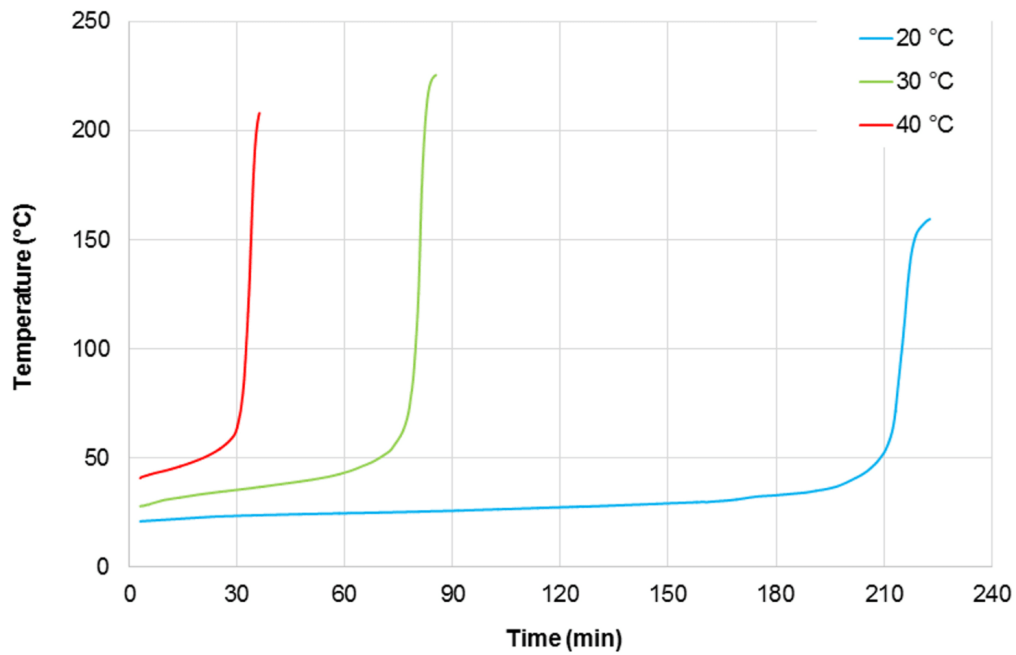
		SD 3304
Appearance		liquid
Color		colourless
Gardner color		0 ± 0
Platine Cobalt Color Index		40 ± 0
Reactivity level		Medium
Viscosity (mPa.s)	@ 15 °C	28 ± 5
	@ 20 °C	21 ± 4
	@ 25 °C	16 ± 3
	@ 30 °C	13 ± 3
	@ 40 °C	9 ± 2
Density	@ 20 °C	0,9230
Refractive index	@ 25 °C	1,4867 ± ,002
Storage (months)	@ Ta	24

Mixe(s) SR 8100 / SD 3304

		SD 3304
Appearance		liquid
Color		colourless
Mixing ratio		
	By weight	100 / 26
	By volume	100 / 33
Initial viscosity	@ 20 °C	380
PP 50 mm - 10 s-1 (mPa.s)	@ 30 °C	192

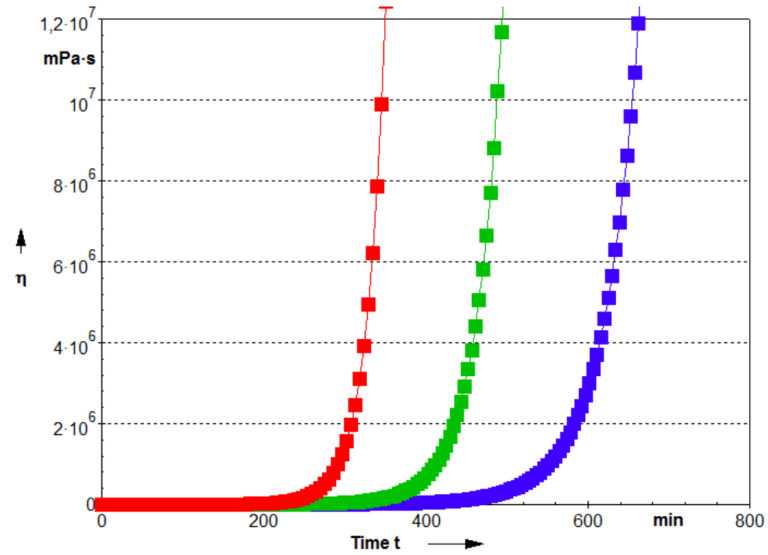
Reactivity on 500 g

	20 °C	30 °C	40 °C
Exothermic temperature (°C)	160	226	208
Time to reach exothermic peak (min)	223	85	36
Time to reach 50 °C (min)	209	69	20



Reactivity on 1 mm thick layer

@ 20, 25, 30 °C



Mechanical properties on cast resin :

		SR 8100 / SD 3304		
Curing cycles		24h @ TA + 16h @ 60°C	24h @ TA + 16h @ 60°C + 4h @ 80°C	+ 16h @ 60°C + 4h @ 80°C + 4h @ 120°C
Tensile				
Modulus	N/mm ²	3 500	3 400	3 300
Maximum strength	N/mm ²	74	79	76
Breaking Strength	N/mm ²	74	71	72
Elongation at max strength	%	3,1	4,6	5,7
Elongation at break	%	3,1	6,7	8,8
Flexion				
Modulus	N/mm ²	3 100	2 900	2 700
Maximum strength	N/mm ²	136	130	122
Breaking Strength	N/mm ²	88	82	95
Elongation at max strength	%	5,7	6,1	6,8
Elongation at break	%	9,9	11,7	11,6
Shear				
Breaking Strength	N/mm ²	51	50	50
Compression				
Modulus	N/mm ²			
Yield strength	N/mm ²	113	108	104
Offset compression yield	%	12,8	13,8	16,5
Charpy impact strength				
Resilience	kJ/m ²	36	61	32
DSC glass transition				
TG1 onset	°C	91	107	123
TG1 max onset	°C			125
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_{G1} or Onset:	1 st scan at 20 °C/min
T_{G1} maximum or Onset:	2nd 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	

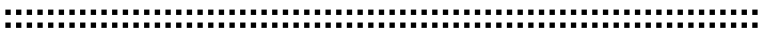
TA: Ambient temperature (20 to 25 °C)

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.



Anexo C

Cálculo volume da Gota

Na Figura C1 está apresentada uma foto tirada do sistema ótico onde se determinaram os raios das elipses para se proceder ao cálculo do volume da gota a partir de um elipsoide de revolução.

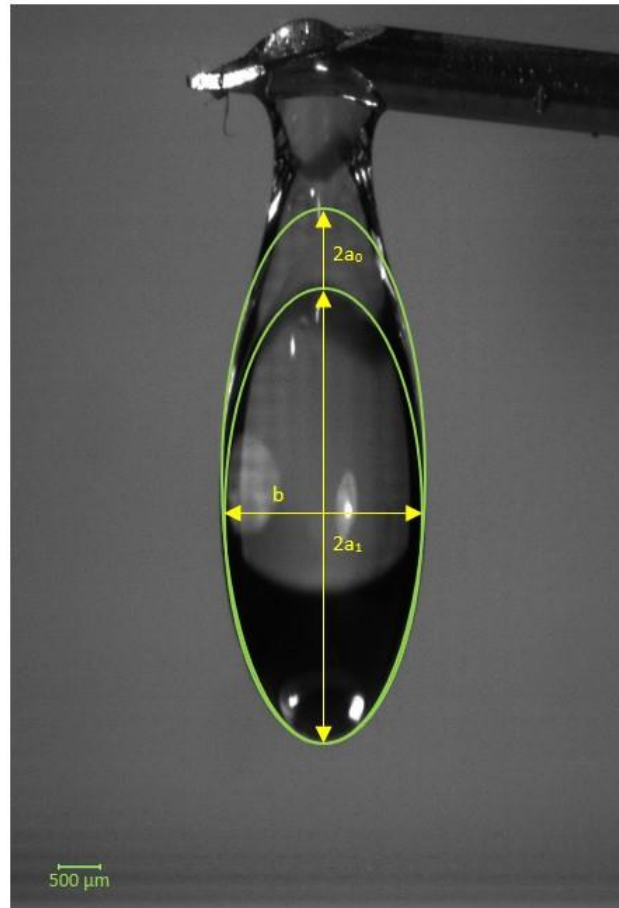


Figura C1- Gota de resina com a demonstração do raio maior e raio menor

O volume da gota de resina foi determinado através da Equação C1.

$$V = \frac{4}{3} \pi abc$$

Equação C1

onde V corresponde ao volume da gota, a é o raio em milímetros, o b corresponde ao diâmetro na horizontal em milímetros e c o diâmetro perpendicular ao plano também em milímetros. Como é um elipsoide de revolução na forma de charuto então assume-se que $b = c$.

A gota ao cair da ponta da seringa, alonga-se formando um raio maior (a_0) e um raio menor (a_1), tal como demonstrado na Figura C1. O volume total (\bar{V}) da gota foi obtido através da Equação C4 que é a média entre o volume da gota considerando o raio maior (V_0) obtido pela Equação C2 e o volume da gota considerando o raio menor (V_1) obtido pela Equação C3.

$$V_0 = \frac{4}{3}\pi a_0 b c \quad \text{Equação C2}$$

onde V_0 corresponde ao volume da gota considerando o raio maior em μL , a é o raio maior em milímetros, o b corresponde ao diâmetro na horizontal em milímetros e c o diâmetro perpendicular ao plano também em milímetros. Como é um elipsoide de revolução na forma de charuto então, $b = c$.

$$V_1 = \frac{4}{3}\pi a_1 b c \quad \text{Equação C3}$$

onde V_1 corresponde ao volume da gota considerando o raio menor em μL , a é o raio menor em milímetros, o b corresponde ao diâmetro na horizontal em milímetros e c o diâmetro perpendicular ao plano também em milímetros. Como é um elipsoide de revolução na forma de charuto então, $b = c$.

$$\bar{V} = \frac{V_0 + V_1}{2} \quad \text{Equação C4}$$

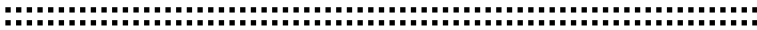
onde \bar{V} corresponde ao volume da gota em μL , V_0 corresponde ao volume da gota considerando o raio maior em μL e V_1 corresponde ao volume da gota considerando o raio menor em μL . Deste modo, está-se em condições de calcular o volume da gota utilizada no teste da molhabilidade.

$$V_0 = \frac{4}{3}\pi \cdot 3 \cdot 1,2 = V_0 = 19,3 \mu\text{L}$$

$$V_1 = \frac{4}{3}\pi \cdot 2,8 \cdot 1,2 = V_1 = 17,6 \mu\text{L}$$

$$\bar{V} = 18,5 \mu\text{L}$$

Então, o volume da gota utilizada é de 18,5 μL .



Anexo D

Otimização do tratamento da fibra de pêlo de cão com NaOH

No primeiro procedimento do tratamento com NaOH, as fibras de lã de cão foram lavadas com uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) 0,05M recorrendo-se a um agitador mecânico de pás. O tratamento foi realizado com uma agitação de 200 RPM a uma temperatura de 30°C durante duas horas. Após este procedimento o pêlo ficou aglomerado, tornando difícil o seu manuseamento como se pode ver na Figura D1.



Figura D1 - Lavagem das fibras com a solução de NaOH com auxílio do agitador mecânico de pás

Após o tratamento as fibras foram secas na estufa a uma temperatura de 60°C durante 24h. Inicialmente foram colocadas no suporte A para secar, no entanto verificou-se que a secagem não estava a ser eficiente e alterou-se para o suporte B (Figura D2). Como é possível verificar na Figura D2 as fibras ficaram bastante aglomeradas devido a utilização do agitador mecânico de pás o que não daria para obter o resultado desejado quando se procedesse à produção do compósito, por esse motivo alterou-se a metodologia do tratamento da fibra.

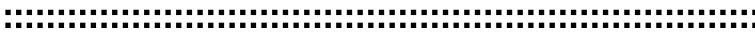


a)



b)

Figura D2 - a) Fibras a secas no suporte A; b) Fibras a secar no suporte B



Anexo E

Produção da placa de compósito com fibra de vidro

Para a produção do compósito com a fibra de vidro, começou-se por pesar a resina e o endurecedor, juntou-se a fibra de vidro à mistura e homogeneizou-se com o auxílio de um rotor. No entanto, verificou-se que a quantidade de resina não era suficiente para molhar uniformemente a fibra, como dá para visualizar na Figura E1, então optou-se por duplicar a quantidade de resina e no final calcular a percentagem de fibra presente no compósito.



Figura E1- Rotor a homogeneizar a resina e o endurecedor com a fibra de vidro

Colocou-se a mistura sob vácuo com o intuito de retirar as bolhas de ar (figura E2). No entanto verificou-se que não havia bolhas a retirar devido a baixa quantidade de resina.



Figura E2 - Mistura sob vácuo

Espalhou-se a pasta uniformemente pelo molde, colocou-se no saco de vácuo durante 4h (figura E3)

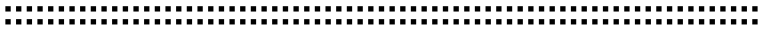


Figura E3 - Compósito no saco de vácuo

A cura foi realizada à temperatura ambiente até perfazer 24h. Após as 24h realizou-se a pós-cura colocando o compósito numa estufa a uma temperatura de 40°C durante 24h entre vidros para a placa não empenar. No final, verificou-se que a resina não espalhou uniformemente na superfície do compósito, criando diversas regiões onde a fibra estava seca, comprometendo o desempenho do compósito, como se pode verificar na Figura E4.



Figura E4 - Compósito de fibra de vidro



Anexo F

Produção da placa de compósito com fibra de pêlo de cão

Para a produção do compósito com a fibra de lã de cão pesou-se a resina e o endurecedor e homogeneizou-se a mistura com auxílio ao rotor (Figura F1)



Figura F1 - Mistura da resina com endurecedor

Lentamente e com o auxílio de uma vareta, juntou-se a fibra de pêlo de cão até embeber toda a mistura de resina (resina e endurecedor) na fibra, tal como demonstrado na Figura F2.



Figura F2 - Mistura da matriz com a fibra

Após parte das fibras estar embebida na matriz, colocou-se de forma homogênea no molde. A restante fibra foi adicionada por camadas e distribuída de maneira uniforme, como demonstrado na Figura F3.



Figura F3 - Fibra de pêlo de cão no molde

Posteriormente foi colocado num saco de vácuo durante 4h (Figura F4)

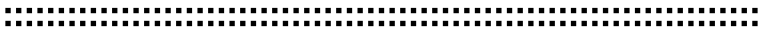


Figura F4 - Compósito no saco de vácuo

Após as 4h a cura foi realizada a temperatura ambiente até perfazer 24h. A pós-cura foi realizada também à temperatura ambiente durante 24h. No entanto, após a cura verificou-se que a resina não embebeu todas as fibras, como se pode verificar na Figura F5. Então, optou-se por diminuir a fração volúmica das fibras de modo a otimizar o processo.



Figura F5 - Compósito com pêlo de cão tal e qual



Anexo G

23 DE
JUNHO

CERTIFICADO

DAlexandra Soledade da Costa Gomes

Certifica-se que participou com o poster científico: “Aptidão do pelo do cão Serra da Estrela para a produção de compósitos verdes” no Dia Internacional da Mulher na Engenharia, no dia 23 de junho de 2023, na Faculdade de Engenharia da Universidade da Beira Interior.

O Presidente da Faculdade de Engenharia

Mário Marques Freire

Professor Doutor Mário Marques Freire

UNIVERSIDADE DE ENGENHARIA
ANFITEATRO 8.1
COVILHÃ - PORTUGAL



ORDEM
DOS ENGENHEIROS
REGIÃO CENTRO

CENTRO 2020



UNIÃO EUROPEIA
Fundo Social Europeu
Iniciativa Emprego Jovem