



# **ReWoodenTex: Sustentabilidade e Valorização de Resíduos Industriais por Meio de Compósitos de Fibras Naturais de Madeira e Linho**

**Sofia Martins Gomes**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

**Engenharia e Gestão Industrial**

(2º ciclo de estudos)

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Doutora Tânia Daniela Felgueiras de Miranda Lima  
Coorientador: Mestre Paulo Sérgio Pina dos Santos



## **Declaração de Integridade**

Eu, Sofia Martins Gomes, que abaixo assino, estudante com o número de inscrição M13067 de Engenharia e Gestão Industrial da Faculdade de Engenharias, 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 07 /10 /2024

(assinatura conforme Cartão de Cidadão ou preferencialmente  
assinatura digital no documento original se naquele mesmo formato)



# Agradecimentos

Em primeiro lugar, expresso o meu agradecimento aos meus orientadores. À Professora Doutora Tânia Lima, pela motivação, conhecimento partilhado e rigor académico que foram imprescindíveis não apenas no desenvolvimento desta dissertação, mas também para a minha formação ao longo do mestrado em Engenharia e Gestão Industrial. Ao Professor Paulo Santos, deixo um agradecimento pelo acompanhamento muito dedicado e atento durante a realização da parte laboratorial. Foi fundamental para o sucesso do meu trabalho e para o meu crescimento intelectual.

À empresa Wd Retail – Soluções para Ponto de Venda, Lda., que gentilmente forneceu resíduos de madeira, provenientes dos processos de maquinação utilizados para o fabrico dos seus produtos, permitindo, desta forma, a realização do caso prático desta dissertação. Em particular, expresso a minha gratidão ao Engenheiro Hugo Nobre, que, em nome da empresa, acompanhou e incentivou o desenvolvimento deste trabalho.

Com um carinho especial, aos meus pais, por acreditarem sempre em mim e por estarem ao meu lado em todas as minhas escolhas ao longo do meu percurso académico. À minha irmã, pelo companheirismo e tranquilidade que sempre me transmitiu. És a minha maior inspiração.

Ao Vasco, agradeço pelo apoio e amor em todos os momentos. Obrigada por acreditares em mim mesmo nos momentos em que eu duvidei.

Aos meus avós, aos meus tios e ao meu primo por serem uma presença constante e me acompanharem em todas as fases da minha vida.

Aos meus amigos de longa data, obrigada por estarem ao meu lado não só nos momentos de conquista, mas também durante os desafios. E às amigas recentes, colegas de mestrado, que foram companheiras incríveis nestes últimos dois anos.

A cada um de vocês, o meu sincero obrigada por terem desempenhado um papel indispensável nesta etapa da minha vida.



## Resumo

A sustentabilidade é cada vez mais reconhecida como uma prioridade global, sendo o conceito de desenvolvimento sustentável adotado por governos, organizações e pela sociedade em geral. Um ponto central deste conceito é a economia circular, que visa reduzir o desperdício e reutilizar recursos, gerando benefícios económicos e ambientais.

Com a crescente produção de resíduos, particularmente industriais, a gestão eficaz dos mesmos torna-se imprescindível. Neste contexto, os materiais compósitos surgem como uma solução promissora para a gestão de resíduos industriais. Esta dissertação foca-se em dar continuidade aos avanços conseguidos nas práticas de economia circular através do desenvolvimento de um material compósito sustentável utilizando resíduos industriais de madeira e outras fibras naturais. Assim, foram fabricados painéis sanduíche com uma matriz epóxi reforçada com resíduos de madeira no núcleo e fibras de linho nas camadas externas.

A metodologia foi iniciada pela separação dos resíduos de madeira por tamanho e granulometria. Os resíduos foram adicionados à matriz nas dimensões e percentagem ideal determinada por testes mecânicos. De seguida, foi fabricada a sanduíche, através do método de moldação manual, e determinadas as suas propriedades mecânicas.

Os ensaios de flexão revelaram que o reforço com fibras de linho aumentou significativamente a resistência à flexão do material devido à sua rigidez. A resistência à compressão lateral e horizontal da sanduíche foi de 61 MPa e 97 MPa, respetivamente, indicando um bom desempenho. Nos testes de relaxação de tensões, ocorre a redução da tensão ao longo do tempo e os dados experimentais foram ajustados com sucesso pelo modelo de Kohlrausch-Williams-Watts (KWW), a curto e longo prazo. Em termos de fluência, o deslocamento aumenta ao longo do tempo e o modelo KWW foi preferível para previsões a curto prazo e o modelo de *Findley* para previsões a longo prazo.

Embora o custo de produção seja relativamente elevado, os benefícios ecológicos e as propriedades mecânicas favoráveis podem justificar esse custo em aplicações específicas.

## Palavras-chave

Gestão de resíduos; Compósitos; Matriz epóxi; Fibras Naturais; Resíduos de Madeira; Fibras de Linho; Sanduíche; Propriedades Mecânicas.



# **Abstract**

Sustainability is increasingly recognized as a global priority, with the concept of sustainable development being adopted by governments, organizations and society at large. A key aspect of this concept is the circular economy, which aims to reduce waste and maximize resource reuse, offering both economic and environmental benefits.

With the growing production of waste, particularly industrial waste, effective waste management becomes crucial. In this context, composite materials emerge as a promising solution for industrial waste management. This dissertation focuses on advancing circular economy practices through the development of a sustainable composite material using wood waste and other natural fibers. Sandwich panels were produced with an epoxy resin matrix reinforced with wood waste in the core and flax fibers in the outer layers.

The methodology began with the separation of wood waste by size and granulation. The waste was added to the matrix in the optimum size and percentage determined by mechanical tests. The sandwich was then manufactured using the manual moulding method and its mechanical properties were determined.

Flexural tests revealed that the reinforcement with flax fibers significantly increased the material's flexural strength due to its rigidity. The lateral and horizontal compressive strength of the sandwich was 61 MPa and 97 MPa respectively, indicating good performance. In the stress relaxation tests, stress reduction occurs over time and the experimental data was successfully fitted by the Kohlrausch-Williams-Watts (KWW) model in the short and long term. In terms of creep, displacement increases over time and the KWW model was preferable for short-term predictions and the Findley model for long-term predictions.

Although the production cost is relatively high, the ecological benefits and favorable mechanical properties may justify this cost for specific applications.

# **Keywords**

Waste management; Composites; Epoxy resin; Natural fibers; Wood Waste; Flax fibers; Sandwich; Mechanical properties.



# Índice

Capítulo 1 .....	1
Introdução .....	1
1.1. Contextualização .....	1
1.2. Objetivos .....	6
1.3. Metodologia .....	6
1.4. Estrutura .....	8
Capítulo 2.....	9
Desenvolvimento Sustentável e Economia Circular .....	9
2.1. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável .....	9
2.2. Economia Circular .....	11
2.2.1. <i>Green Deal Europeu</i> .....	15
Capítulo 3.....	19
Gestão de Resíduos .....	19
3.1. Resíduos .....	19
3.2. Política Nacional de Gestão de Resíduos .....	20
3.3. Gestão de Resíduos Não Urbanos .....	23
Capítulo 4.....	31
Materiais Compósitos .....	31
4.1. Definição .....	31
4.2. Classificação dos Materiais Compósitos .....	32
4.3. Matriz .....	37
4.3.1. Matrizes Poliméricas .....	37
4.3.2. Matrizes Metálicas .....	40
4.3.3. Matrizes Cerâmicas.....	41
4.4. Fibras.....	42
4.4.1. Fibras Naturais .....	43
4.5. Processos de Fabrico de Compósitos de Polímeros Reforçados por Fibras ....	48
4.5.1. Moldagem Manual.....	49

4.5.2.	<i>Spray Lay-up</i> .....	49
4.5.3.	Moldagem por Injeção .....	50
4.5.4.	Moldagem por Compressão .....	50
4.5.5.	Moldagem por Transferência de Resina .....	50
4.5.6.	Enrolamento Filamentar.....	51
4.5.7.	Pultrusão .....	51
4.5.8.	Moldagem em Autoclave.....	51
4.6.	Aplicações dos Materiais Compósitos .....	52
4.7.	Materiais Compósitos com Reforço de Madeira .....	53
4.7.1.	Propriedades de compósitos com reforço de madeira.....	53
4.7.2.	Aplicação de Compósitos com Reforço de Madeira.....	59
Capítulo 5	.....	62
Caso Prático.....	.....	63
5.1.	Recolha e Análise Granulométrica dos resíduos .....	63
5.1.1.	Equipamento.....	66
5.2.	Núcleo do painel sanduíche.....	67
5.2.1.	Fabricação do núcleo.....	67
5.2.2.	Provetes .....	72
5.2.3.	Equipamentos .....	74
5.2.4.	Procedimento experimental.....	75
5.3.	Painel sanduíche.....	78
5.3.1.	Fabricação da sanduíche .....	78
5.3.2.	Provetes .....	80
5.3.3.	Equipamentos .....	81
5.3.4.	Procedimento experimental.....	82
Capítulo 6	.....	84
Apresentação e Discussão dos Resultados .....	.....	85
6.1.	Ensaio de Flexão em Três Pontos do núcleo.....	85
6.2.	Ensaio de dureza do núcleo .....	93

6.3.	Ensaios de Flexão em Três Pontos da Sanduíche .....	94
6.4.	Ensaios de Compressão da Sanduíche .....	95
6.4.1.	Compressão Lateral .....	95
6.4.2.	Compressão Horizontal .....	97
6.5.	Ensaios de Fluência e Relaxação do Núcleo e da Sanduíche .....	99
6.6.	Custos de produção .....	115
Capítulo 7	.....	117
Considerações Finais	.....	117
7.1.	Conclusões.....	117
7.2.	Limitações .....	118
7.3.	Perspetivas Futuras.....	119
Referências	.....	121



# Lista de Figuras

Figura 1 - Estrutura de resíduos setoriais por principais atividades económicas (INE, 2023).....	3
Figura 2 - Resíduos setoriais por principal operação de gestão (INE, 2023). ....	4
Figura 3 - Resíduos setoriais perigosos por setores económicos (INE, 2023). ....	4
Figura 4 - 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável - Agenda 2030 (United Nations, 2015). ....	9
Figura 5 - Modelo de economia circular (Parlamento Europeu, 2023). ....	12
Figura 6 - Modelo de Economia Circular (Bourguignon, 2016).....	13
Figura 7 - Diferentes classes de resíduos segundo a Lista Europeia de Resíduos (APA, 2020). ....	19
Figura 8 - Princípios da hierarquia dos resíduos (Adaptado do Presidência do Conselho de Ministros, 2023a).....	23
Figura 9 - Principais características inerentes à visão do PERNU 2030 (Presidência do Conselho de Ministros, 2023b).....	25
Figura 10 - Objetivos operacionais do PERNU 2030 (Adaptada de APA, 2022; Presidência do Conselho de Ministros, 2023b).....	26
Figura 11 - Representações esquemáticas das várias características geométricas e espaciais das partículas da fase dispersa que podem influenciar as propriedades dos compósitos: (a) concentração, (b) tamanho, (c) forma, (d) distribuição, e (e) orientação (Callister & Rethwisch, 2018).....	32
Figura 12 - Classificação dos materiais compósitos em função da matriz. (Adaptado de Sharma <i>et al.</i> , 2022). ....	32
Figura 13 - Classificação dos materiais compósitos em função do reforço. (Adaptado de Callister & Rethwisch, 2018). ....	33
Figura 14 - Representações esquemáticas de fibras (a) contínuas e alinhadas, (b) descontínuas e alinhadas, e (c) descontínuas e orientadas aleatoriamente. (Callister & Rethwisch, 2018) .....	34
Figura 15 - Quatro classes de compósitos laminares ou laminados (Callister & Rethwisch, 2018).....	35
Figura 16 - Representação esquemática de um painel sanduíche (Callister & Rethwisch, 2018).....	36
Figura 17 - Classificação de fibras naturais (Adaptado de Elfaleh <i>et al.</i> , 2023).....	44
Figura 18 – Microestrutura das fibras naturais: Talo de linho, adaptado de (Elfaleh <i>et al.</i> , 2023).....	46

Figura 19 – Distribuição por processos de fabricação no mercado global de materiais compósitos (Lunetto <i>et al.</i> , 2023).....	48
Figura 20 - Aplicações dos Materiais Compósitos em termos de volume (Bernatas <i>et al.</i> , 2021).....	52
Figura 21 - As aplicações dos WPCs em construções de edifícios (Xu <i>et al.</i> , 2022). ....	60
Figura 22 - As aplicações dos WPCs em tetos e revestimentos internos ou externos (Xu <i>et al.</i> , 2022). ....	60
Figura 23 - As aplicações dos WPCs em mobiliário, produtos de cozinha e de casa de banho (Xu <i>et al.</i> , 2022). ....	60
Figura 24 – Equipamento utilizado na análise granulométrica por peneiração a seco..	64
Figura 25 - Partículas de madeira obtidas após peneiração a seco: 0,15 mm e 0,3 mm.	65
Figura 26 – Gráfico de distribuição granulométrica dos resíduos industriais de madeira. ....	65
Figura 27 – (a) Visão geral do tamanho e geometria das partículas (b) Dimensão de duas partículas específicas.....	66
Figura 28 – (a) Aparelho de revestimento de ouro Q150R ES, da marca <i>Quorum</i> ; (b) SEM modelo S-3400N, da marca <i>Hitachi</i> . ....	67
Figura 29 – Esquema ilustrativo do processo melhorado para a fabricação de compósitos para o núcleo da sanduíche. ....	70
Figura 30 – Comparação entre materiais contendo 30 wt. % de partículas de madeira de 0,300 mm: a) Procedimento sem vácuo e pressão; b) Procedimento com vácuo e pressão durante a cura à temperatura ambiente. ....	71
Figura 31 – Compósitos com 40 wt. % e 50 wt. % de partículas de madeira de 0,300mm, obtidos na terceira fase de fabricação. ....	72
Figura 32 – Máquina de ensaios universal, modelo AGS-X, da marca <i>Shimadzu</i> . ....	74
Figura 33 – AVK-C2 <i>Hardness Tester</i> , da marca <i>Mitutoyo</i> . ....	75
Figura 34 – Esquema ilustrativo das imagens visualizadas nos ensaios de dureza, com as diagonais d1 e d2 (em mm) utilizadas para o cálculo da dureza HV. ....	75
Figura 35 – Ensaio de flexão em três pontos: a) Geometria dos provetes; b) Vista esquemática da montagem do ensaio; c) Utilização do equipamento de ensaio universal para caracterização dos provetes. ....	76
Figura 36 – Esquema ilustrativo da montagem do painel sanduíche. ....	79
Figura 37 – Processo de cura da sanduíche: a) prensa; b) detalhe da válvula de vácuo. ....	80
Figura 38 – Máquina de ensaios universal, modelo AG-IC, da marca <i>Shimadzu</i> . ....	82
Figura 39 - Posição do provete nos ensaios de flexão em três pontos. ....	82
Figura 40 – Posição do provete nos ensaios de compressão lateral. ....	84

Figura 41 – Posição do provete nos ensaios de compressão horizontal. ....	84
Figura 42 – Curvas características de tensão-deformação de flexão: (a) Amostra de controlo; (b) Amostra com 30 wt. % partículas de madeira de 0,300mm. ....	85
Figura 43 – Relação entre o tamanho médio das partículas e as propriedades de flexão - análise comparativa entre o processo sem e com Pressão e Vácuo: (a) Tensão máxima; (b) Módulo de rigidez; (c) Deformação de flexão. ....	88
Figura 44 – Gráfico da tensão máxima de flexão dos materiais compósitos. ....	90
Figura 45 – Gráfico do módulo de rigidez dos materiais compósitos. ....	90
Figura 46 – Gráfico de deformação de flexão dos materiais compósitos. ....	91
Figura 47 – Curvas representativas de tensão-deformação de flexão. Comparação entre a matriz de controlo e os materiais compósitos (para o núcleo) com partículas de madeira de 0,300 mm. ....	92
Figura 48 – Imagens SEM dos materiais compósitos com 40 wt. % de reforço de partículas de madeira de 0,300 mm- (a) ampliação 100x e (b) ampliação 150x. ....	92
Figura 49 – Dureza de <i>Vickers</i> da matriz de controlo e dos materiais compósitos (para o núcleo) com partículas de madeira de 0,300 mm. ....	93
Figura 50 – Imagens SEM das indentações de microdureza de <i>Vickers</i> da matriz de controlo (a) e do material compósito com 40 wt. % de partículas de madeira de 0,300 mm (b), e respetivas distâncias das diagonais. ....	94
Figura 51 – Danos típicos verificados nos ensaios de flexão em três pontos da sanduiche. ....	94
Figura 52 – Curvas típicas: a) Tensão versus deslocamento, da face isolada; b) Tensão de flexão da face versus deslocamento e tensão de corte do núcleo versus deslocamento, da sanduiche. ....	95
Figura 53 – Diferentes danos no teste de compressão lateral: a) rotura por compressão ao corte do núcleo; b) “Shear crimping” na pele e falha por compressão do núcleo; c) esmagamento da pele e falha do núcleo. ....	96
Figura 54 – Curva representativa do painel sanduiche nos ensaios de compressão lateral: Tensão vs Deformação. ....	97
Figura 55 – Provete representativo nos ensaios de compressão horizontal: a) Antes do ensaio, visto ao microscópio; b) Após o ensaio, visto a olho nu e ao microscópio. ....	98
Figura 56 – Curva representativa do painel sanduiche nos ensaios de compressão horizontal: Tensão vs Deformação. ....	98
Figura 57 – Curva de fluência do núcleo da sanduiche para uma tensão de flexão de 42 MPa. ....	99
Figura 58 – Curvas de relaxação de tensões: a) Matriz epóxi; b) Núcleo da sanduiche; c) Sanduiche; d) Diferentes materiais para uma tensão de flexão de 21 MPa ....	100

Figura 59 – Variação da tensão de flexão para os três materiais.....	102
Figura 60 – Comparação entre curva média experimental e a construída pelo modelo KWW para a matriz: a) Tensão de flexão de 21 MPa; b) Parâmetros KWW versus tensão de flexão; c) Tensão de flexão de 73,5 MPa.....	103
Figura 61 – Comparação entre curva média experimental e a construída pelo modelo KWW para a sanduíche: a) Tensão de flexão de 21 MPa; b) Parâmetros KWW versus tensão de flexão; c) Tensão de flexão de 27 MPa. ....	104
Figura 62 – Validação do modelo para 100 horas e para a sanduiche a uma tensão de flexão de 27 MPa. ....	105
Figura 63 – Curvas de fluência: a) Matriz epóxi; b) Núcleo da sanduíche; c) Sanduíche; d) Diferentes materiais para uma tensão de flexão de 21 MPa.....	107
Figura 64 – Variação do deslocamento para os três materiais.....	109
Figura 65 – Comparação entre a curva média experimental e a prevista pelo modelo KWW e pelo modelo de Findley para a matriz: a) Tensão de flexão de 21 MPa; b) Parâmetros do modelo KWW versus tensão de flexão; c) Parâmetros do modelo de Findley versus tensão de flexão; d) Tensão de flexão de 73,5 MPa. ....	110
Figura 66 – Comparação entre a curva média experimental e a prevista pelo modelo KWW e pelo modelo de Findley para a sanduíche: a) Tensão de flexão de 21 MPa; b) Parâmetros do modelo KWW versus tensão de flexão; c) Parâmetros do modelo de Findley versus tensão de flexão; d) Tensão de flexão de 27 MPa. ....	111
Figura 67 – Validação dos modelos para 100 h e para a sanduiche a uma tensão de flexão de 27 MPa.....	112

# Lista de Tabelas

Tabela 1 - Fatores condicionantes e de incentivo à implementação de práticas de prevenção (Adaptado de Presidência do Conselho de Ministros, 2023b).....	24
Tabela 2 - Monitorização dos Objetivos Operacionais do PERNU 2030 (Adaptado de Presidência do Conselho de Ministros, 2023b).....	26
Tabela 3 - Indicadores estratégicos do PERNU 2030 e metas associadas (Adaptado de Presidência do Conselho de Ministros, 2023b).....	27
Tabela 4 - Operações de gestão a que os resíduos não urbanos perigosos foram sujeitos, no ano de 2019 (Adaptado de Presidência do Conselho de Ministros, 2023b).....	30
Tabela 5 - Classes e exemplos de matrizes de materiais compósitos (Adaptado de Hull & Clyne, 2019). .....	37
Tabela 6 - Propriedades das matrizes poliméricas, termoendurecíveis e termoplástico (Adaptado de Hull & Clyne, 2019).....	39
Tabela 7 - Propriedades das Matrizes Metálicas (Adaptado de Hull & Clyne, 2019).....	40
Tabela 8 - Categorização de fibras dos materiais compósitos (Chawla, 2019).....	42
Tabela 9 - Origem, propriedades e aplicações de fibras naturais (Elfaleh <i>et al.</i> , 2023; Radoor <i>et al.</i> , 2020; Tuğluca <i>et al.</i> , 2023; Zor <i>et al.</i> , 2016). .....	45
Tabela 10 – Características químicas das fibras de madeira (Chauhan <i>et al.</i> , 2022; Elfaleh <i>et al.</i> , 2023).....	47
Tabela 11 – Propriedades mecânicas e físicas das fibras de madeira (Chauhan <i>et al.</i> , 2022; Elfaleh <i>et al.</i> , 2023). .....	47
Tabela 12 - Tamanho, Percentagem de peso e tipos de partículas de madeira utilizadas no estudo de (Chauhah <i>et al.</i> , 2021).....	54
Tabela 13 - Percentagem de peso da matriz de PP e partículas de madeira dos materiais compósitos no estudo de Nukala <i>et al.</i> (2022). .....	56
Tabela 14 - Fibras, número de camadas de fibras e direção das fibras dos materiais compósitos no estudo de Vignesh <i>et al.</i> (2017). .....	57
Tabela 15 - Materiais compósitos de fibras naturais e respetivas aplicações na indústria automóvel (Adaptado de Wazeer <i>et al.</i> , 2023). .....	61
Tabela 16 – Principais propriedades físicas da resina epóxi, do endurecedor e da matriz curada (Sicomín, 2016).....	68
Tabela 17 – Proporções utilizadas na fase inicial de fabricação de materiais compósitos para o núcleo da sanduíche.....	68
Tabela 18 – Provetes para ensaios de flexão em três pontos.....	73
Tabela 19 – Propriedades das fibras de linho (Elfaleh <i>et al.</i> , 2023).....	78
Tabela 20 – Composição do painel sanduíche. ....	78

Tabela 21 – Dimensões de referências dos provetes para realização dos ensaios ao painel sanduíche. ....	81
Tabela 22 - Propriedades mecânicas dos materiais compósitos (para o núcleo) da primeira fase de fabricação. ....	86
Tabela 23 - Propriedades mecânicas dos materiais compósitos (para o núcleo) da segunda fase de fabricação. ....	87
Tabela 24 - Propriedades mecânicas dos materiais compósitos (para o núcleo) da terceira fase de fabricação. ....	89
Tabela 25 - Parâmetros e precisão do modelo KWW para a relaxação de tensões: matriz epóxi, núcleo e sanduíche. ....	106
Tabela 26 - Valores das equações que se ajustam ao modelo KWW. ....	106
Tabela 27 – Parâmetros e precisão do modelo KWW para a fluência de tensões: matriz epóxi, núcleo e sanduíche. ....	113
Tabela 28 - Parâmetros e precisão do modelo da lei de Findley para a fluência de tensões: matriz epóxi, núcleo e sanduíche. ....	114
Tabela 29 - Valores das equações que se ajustam ao modelo KWW. ....	115
Tabela 30 - Valores das equações que se ajustam ao modelo Findley. ....	115
Tabela 31 – Custos de produção da sanduíche por m <sup>2</sup> . ....	116

## Lista de Acrónimos

APA	Agência Portuguesa do Ambiente
CCRD	Comissões de Coordenação e Desenvolvimento Regional
EC	Economia Circular
GEE	Gases Efeito de Estufa
HV	Dureza de <i>Vickers</i>
INE	Instituto Nacional de Estatística
KWW	Kohlrausch-Williams-Watts
ODS	Objetivo de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
OP	Objetivos Operacionais
PE	Polietileno
PERNU	Plano Estratégico para os Resíduos Não Urbanos
PERSU	Plano Estratégico para os Resíduos Urbanos
PNGR	Plano Nacional de Gestão de Resíduos
PP	Polipropileno
RGGR	Regime Geral de Gestão de Resíduos
RP	Resíduos Perigosos
SEM	Microscopia Eletrónica de Varrimento
UE	União Europeia
WPCs	<i>Wood Polymer Composites</i>



# Capítulo 1

## Introdução

Neste primeiro capítulo apresenta-se a contextualização do trabalho, o objetivo geral e os objetivos específicos, a metodologia utilizada, e por fim, a estrutura deste documento.

### 1.1. Contextualização

No panorama global, a sustentabilidade é, cada vez mais, uma questão de primordial importância, sendo esta definida como a “capacidade de satisfazer as nossas necessidades no presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras satisfazerem as suas próprias necessidades” (BCSD Portugal, 2021).

A sustentabilidade representa uma abordagem holística que requer a integração, de forma conjunta, de três dimensões fundamentais: ambiental, social e económica. No âmbito da dimensão ambiental, é fundamental priorizar a conservação e gestão responsável dos recursos naturais, a mitigação dos impactos negativos no ar, água e solo, a preservação da biodiversidade e a promoção de práticas de produção e consumo responsáveis. No que diz respeito à dimensão social, é essencial reconhecer como pilares o respeito pelos direitos humanos, a igualdade de oportunidades, a promoção de uma sociedade justa e inclusiva, a distribuição equitativa dos recursos, a valorização e respeito à diversidade cultural. Quanto à dimensão económica da sustentabilidade, esta refere-se à promoção da prosperidade em todos os níveis da sociedade e à eficiência das atividades económicas, de forma a contribuir para a geração de riqueza e empregos dignos (BCSD Portugal, 2021).

Ao longo do tempo, o conceito de sustentabilidade começou por ser associado à defesa pela justiça social, ao conservacionismo, ao internacionalismo e outros movimentos do passado. No final do século XX, estas ideias convergiram no conceito de desenvolvimento sustentável, que segundo o Relatório Brundtland de 1987 é “o desenvolvimento que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras satisfazerem as suas próprias necessidades, garantindo o equilíbrio entre o crescimento económico, o cuidado com o ambiente e o bem-estar social” (BCSD Portugal, 2021).

Os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) definidos pela Organização das Nações Unidas visam garantir um Desenvolvimento Sustentável global através da

concentração de esforços de diversos países para alcançar um bem comum (United Nations, 2015). Estes objetivos estão relacionados com diversas temáticas, os quais incluem, no que diz respeito às organização e indústria, a modernização das indústrias para uma maior eficiência e adoção de práticas ambientalmente corretas (ODS 7) e a gestão e uso de recursos naturais mais sustentáveis, a redução do desperdício e a geração de resíduos (ODS 12) (United Nations, 2019a, 2019b).

Assim, o conceito de desenvolvimento sustentável tem sido progressivamente utilizado por uma ampla variedade de entidades, incluindo organizações governamentais e não-governamentais, empresas públicas e privadas, bem como pela sociedade em geral. No âmbito empresarial, o crescente movimento em direção à sustentabilidade nas empresas inicialmente resultou no surgimento de novos requisitos legais, que implicavam custos financeiros. Posteriormente, essa evolução conduziu à consciencialização e ao reconhecimento de que a integração de aspetos ambientais e sociais nos processos de decisão podiam gerar novas oportunidades de negócio, e ter um impacto direto na criação de valor económico (BCSD Portugal, 2021). A sustentabilidade empresarial pode ser definida como a capacidade de uma empresa gerir as suas operações e criar valor a longo prazo, e em simultâneo, promover benefícios sociais e ambientais para os seus *stakeholders*<sup>1</sup> (BCSD Portugal, 2021).

A economia circular (EC) é um conceito fundamental no desenvolvimento sustentável, que promove a prosperidade e a oportunidade económica, maior bem-estar social e proteção do meio ambiente (Global Compact Network Portugal, 2015). Este é um termo oposto ao modelo linear, no qual os recursos são extraídos, utilizados e descartados. Em contraste, a EC visa minimizar o desperdício e maximizar a reutilização de recursos, através da reciclagem ou do reaproveitamento de produtos e materiais (Ellen MacArthur Foundation, 2015; Parlamento Europeu, 2023).

No âmbito desta dissertação, em que se reconhece a importância da minimização da produção de resíduos industriais e da sua reutilização como elementos-chave na transição para a economia circular, torna-se pertinente examinar não apenas os dados referentes às quantidades de resíduos gerados, mas também os métodos de gestão de resíduos atualmente adotados. No contexto específico de Portugal, no ano de 2022, foram recolhidos 5,3 milhões de toneladas de resíduos urbanos, enquanto que o tecido empresarial gerou um total de 14,4 milhões de toneladas de resíduos setoriais, também

---

<sup>1</sup> Qualquer indivíduo ou grupo que possa afetar ou ser afetado pela realização dos objetivos de uma organização (Freeman, 2015).

designados de resíduos não urbanos. Dos resíduos urbanos gerados em 2022, o indicador de preparação para a reutilização e reciclagem registou um ligeiro acréscimo, atingindo 33%, distando ainda 18 pontos percentuais da meta de 55% apontada para 2025. Relativamente aos resíduos setoriais gerados em 2022, cerca de 90,20% da totalidade gerada, que corresponde a 13,0 milhões de toneladas, foram remetidos para operações de valorização (INE, 2023).

Na Figura 1 está representada a estrutura de resíduos setoriais por atividades setoriais, sendo importante evidenciar que a Indústria Transformadora foi o terceiro maior grupo gerador de resíduos setoriais em 2022, com um total de 3,1 milhões de toneladas (21,4%) (INE, 2023).

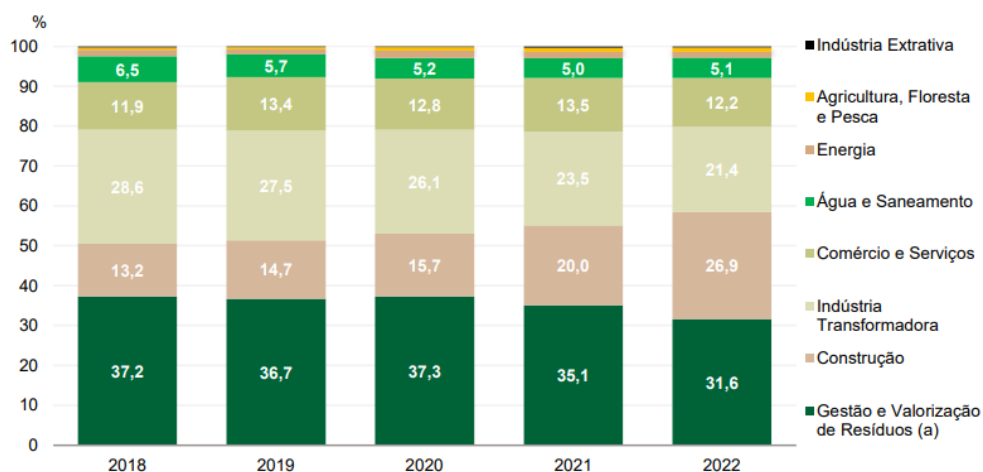


Figura 1 - Estrutura de resíduos setoriais por principais atividades económicas (INE, 2023).

A evolução, entre 2018 e 2022, das quantidades de resíduos encaminhadas para o processo de eliminação ou valorização pode ser observada na Figura 2. Ao longo destes 5 anos não foram registadas alterações significativas relativamente à proporção de resíduos encaminhados para valorização, sendo atingido o valor médio de 86,10% nos últimos 5 anos (INE, 2023).

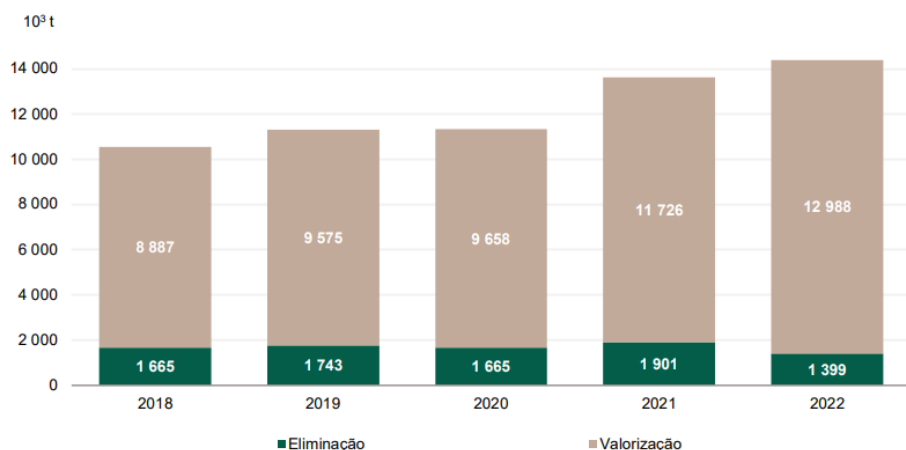


Figura 2 - Resíduos setoriais por principal operação de gestão (INE, 2023).

Relativamente aos resíduos setoriais perigosos, a sua importância relativa fixou-se, em 2022, em 6% da quantidade total gerada, o que corresponde a 869 mil toneladas, valor inferior em 386 mil toneladas comparativamente a 2021. Ao analisar a proporção destes resíduos perigosos (RP) por principais atividades económicas, destaca-se, mais uma vez, o setor da Indústria Transformadora, concentrando 35,50% do total, equivalente a cerca de 308 mil toneladas, conforme ilustrado na Figura 3 (INE, 2023).

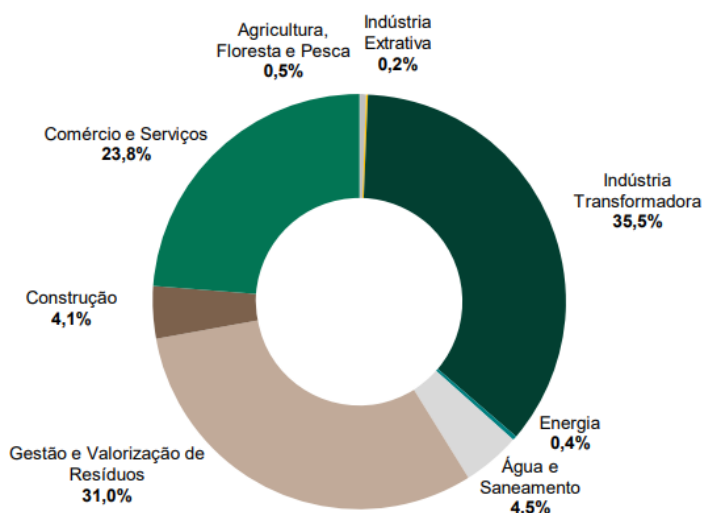


Figura 3 - Resíduos setoriais perigosos por setores económicos (INE, 2023).

Uma análise suplementar, realizada pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA), neste caso no período entre 2009 e 2020, mostrou a relação entre os processos de valorização e a eliminação de RP gerados em Portugal, que tem apresentado flutuações, verificando-se uma predominância das operações de eliminação. Em termos absolutos, a fração de RP submetidos a operações de eliminação, em relação ao volume total de resíduos

recebidos anualmente, registrou um aumento de 27 pontos percentuais entre os anos de 2009 e 2020 (APA, 2023).

No que diz respeito às diferentes modalidades de operações de eliminação a que os RP gerados em Portugal foram submetidos em 2020, destaca-se a deposição em aterros e os tratamentos físico-químicos e biológicos, correspondendo, respetivamente, a 39% e 46% do total de resíduos sujeitos a operações de eliminação (APA, 2023).

Quanto à valorização dos RP no mesmo período, destacam-se as operações de reciclagem de metais e compostos metálicos (20%), a refinação de óleos e outras formas de reutilização de óleos (16%), e a valorização energética (11%). De referir ainda que as operações de valorização intermediárias, tais como tratamentos mecânicos e químicos, triagem, produção de combustíveis alternativos, despoluição e desmantelamento, representaram 28% do total de resíduos encaminhados para valorização (APA, 2023). Adicionalmente, devem-se salientar as operações de armazenamento de resíduos, que constituíram 18% do total de RP valorizados e 9% do total de RP eliminados em 2020 (APA, 2023).

Com a crescente produção de resíduos, particularmente provenientes de atividades industriais, a gestão eficaz destes resíduos torna-se imprescindível. A transformação destes resíduos em recursos é uma estratégia que não só contribui para a sustentabilidade ambiental, como também pode resultar em oportunidades económicas significativas (Moigne, 2021).

Neste contexto, os materiais compósitos surgem como uma solução promissora para a problemática da gestão incorreta dos resíduos industriais. Apesar das melhorias significativas já realizadas neste âmbito, ainda uma parcela significativa destes resíduos é submetida a processos de eliminação. Com este propósito, os materiais compósitos reforçados com resíduos de fibras naturais, como, por exemplo os resíduos de madeira, têm sido utilizados em diversos estudos e apresentam propriedades interessantes como a baixa densidade, a elevada rigidez e o baixo custo. Além disso, têm processos de fabricação menos complexos (Mendes *et al.*, 2021).

Posto isto, a presente dissertação tem como objetivo dar continuidade aos esforços que têm sido realizados na implementação da EC nos processos de gestão de resíduos industriais. Assim sendo, procura-se identificar uma solução viável que permita

proporcionar “uma nova vida” a resíduos industriais de madeira e outras fibras naturais, como por exemplo, o linho.

## **1.2. Objetivos**

Esta dissertação foca-se no reaproveitamento de resíduos industriais de madeira e outras fibras naturais, proporcionando, assim, uma segunda vida para resíduos que seriam depositados em aterros. O objetivo geral é desenvolver um novo material compósito sustentável que permita a valorização de resíduos industriais.

Para a concretização do objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre as temáticas dos materiais compósitos, valorização de resíduos, EC e desenvolvimento sustentável;
- Selecionar os resíduos industriais, de madeira e fibras naturais, adequados para a fabricação de novos materiais;
- Testar mecanicamente as diferentes formulações de materiais compósitos e produzir um material estrutural;
- Realizar testes de caracterização mecânica ao material compósito para avaliar e maximizar as suas propriedades;
- Realizar um estudo abrangente de viabilidade do material compósito e a sua aplicação, em alternativa a materiais já utilizados.

## **1.3. Metodologia**

A ciência pode ser definida de maneiras diferentes, contudo, segundo Bhattacharjee (2012), é o conjunto sistemático e organizado de conhecimento em qualquer área de investigação, que seja adquirido usando o método científico. Este segundo conceito pode ser definido como o conjunto normalizado de técnicas e ferramentas que tem como objetivo adquirir conhecimento científico, permitindo aos investigadores fazer observações e testar teorias de modo imparcial e independente. Este método deve possuir algumas características, tais como, ser coerente, válido, replicável e, por último, ser revisto por outros investigadores com o intuito de melhorar o conhecimento já existente (Bhattacharjee, 2012; Borges *et al.*, 2015).

Assim sendo, a investigação científica baseia-se em teorias e observações, conseguindo abordar dois níveis – teórico e empírico – havendo uma diferença evidente entre os dois. No nível teórico, o foco recai no desenvolvimento de conceitos teóricos através da análise de fenómenos e relações observadas pelos investigadores (Bhattacharjee, 2012). No nível

empírico, foca-se na visão da realidade, devido à aplicação dos próprios conceitos teóricos, com o objetivo de atualizar e melhorar as teorias já existentes (Bhattacharjee, 2012).

O processo de investigação pode ser efetuado duas formas, indutiva ou dedutiva, sendo ambas fundamentais e críticas no avanço da ciência. Na investigação indutiva, o objetivo do investigador é inferir conceitos teóricos e padrões através de dados observados (Bhattacharjee, 2012; Borges *et al.*, 2015). Por outro lado, no caso da investigação dedutiva, o objetivo do investigador é testar conceitos e padrões conhecidos da teoria, dando uso de novos dados empíricos (Bhattacharjee, 2012; Borges *et al.*, 2015).

Em relação à abordagem ao problema e à realidade do estudo, numa investigação pode-se optar por dois tipos de abordagem (Borges *et al.*, 2015):

- Abordagem quantitativa: na qual se utilizam medidas quantificáveis para testar hipóteses, através da recolha de dados, ou procurando padrões quantificáveis relacionados com conceitos empíricos, sendo esta abordagem associada a uma investigação dedutiva. Os métodos quantitativos implicam um aprofundamento da revisão da literatura e a elaboração de um plano de investigação com objetivos bem definidos;
- Abordagem qualitativa: na qual se trabalha com valores, representações, atitudes e opiniões, isto é, com informações provenientes da observação ou discurso, centrando-se mais na compreensão dos significados, sendo esta abordagem associada a uma investigação indutiva e descritiva. Os métodos qualitativos utilizam, de modo geral, procedimentos interpretativos e não experimentais.

Apesar de serem conceitos de natureza bastante diferente, dependendo dos objetivos de cada investigação, podem ser usadas ambas as abordagens em conjunto (Borges *et al.*, 2015).

Posto isto, nesta dissertação optou-se por uma investigação dedutiva, onde será testada a hipótese de utilização de materiais compósitos de madeira e outras fibras naturais, de forma a identificar uma possível solução para o reaproveitamento de resíduos industriais.

Para se poder alcançar o sucesso num projeto de investigação, existe um conjunto de etapas que devem ser seguidas (Oliveira & Ferreira, 2014):

1. Definição do problema;

2. Revisão da literatura;
3. Modelo de análise;
4. Recolha e tratamento de dados;
5. Análise e interpretação de dados;
6. Conclusões e propostas para trabalhos futuros.

Para a revisão bibliográfica, a informação utilizada foi proveniente, maioritariamente, da pesquisa de informação em artigos científicos, livros e dissertações de mestrado. As bases de dados científicas utilizadas foram o *Web of Science*, *Scopus* e a *Science Direct*, bem como *websites* institucionais. Todas as referências bibliográficas citadas ao longo da revisão da literatura estão devidamente identificadas na bibliografia de acordo com o estilo de referenciação *American Psychological Association*. Para auxiliar no processo de referenciação, recorreu-se ao *Mendeley Desktop*.

#### 1.4. Estrutura

Esta dissertação encontra-se dividida em seis capítulos:

- **Introdução:** no primeiro capítulo é apresentada a contextualização do tema, os objetivos, a metodologia e a estrutura da dissertação.
- **Desenvolvimento sustentável e economia circular:** no segundo capítulo serão abordados os conceitos de desenvolvimento sustentável, acompanhado por uma breve abordagem aos objetivos de desenvolvimento sustentável, e de EC.
- **Gestão de resíduos:** no terceiro capítulo, serão abordadas a definição e classificação de resíduos, bem como a política nacional adotada para a sua gestão. Ainda neste capítulo, o foco direciona-se para a problemática da gestão de resíduos industriais.
- **Materiais compósitos:** no quarto capítulo é apresentada uma breve abordagem aos materiais compósitos, começando pelas principais definições, aspetos e aplicações. Posteriormente, o foco direciona-se para os materiais compósitos reforçados com madeira e as suas propriedades, onde também serão apresentadas aplicações práticas dos mesmos.
- **Caso prático:** no quinto capítulo são apresentados os materiais, equipamentos e procedimento experimental adotado no caso prático.
- **Apresentação e discussão dos resultados:** no sexto capítulo foram apresentados e analisados os resultados obtidos nos testes realizados ao longo do caso prático.
- **Considerações finais:** no último capítulo são apresentadas as conclusões do estudo efetuado, bem como as perspetivas para trabalhos futuros.

## Capítulo 2

# Desenvolvimento Sustentável e Economia Circular

Neste capítulo será apresentada uma breve abordagem aos objetivos de desenvolvimento sustentável, o conceito de EC e os princípios em que esta se baseia. Por fim, será apresentado o *Green Deal Europeu*.

### 2.1. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

No início do ano de 2016 entrou em vigor a resolução da ONU “Transformar o nosso mundo: Agenda 2030 de Desenvolvimento sustentável”. A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável é uma agenda alargada e ambiciosa, composta por 17 objetivos principais, que aborda várias dimensões do desenvolvimento sustentável (social, económico, ambiental) e que promove a paz, a justiça e instituições eficazes (Global Compact Network Portugal, 2015).

Assim sendo, a Agenda 2030 e estes 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) – Figura 4 – representam, segundo Ban Ki-moon, uma “visão comum para a Humanidade, um contrato entre os líderes mundiais e os povos. São uma lista das coisas a fazer em nome dos povos e do planeta” (United Nations, 2015).



Figura 4 - 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável - Agenda 2030 (United Nations, 2015).

A incorporação da Agenda 2030 nas estratégias, planos e políticas nacionais articula-se por cinco áreas temáticas, identificadas como os 5Ps (Ministério dos Negócios Estrangeiros, 2017):

- **Pessoas (ODS 1 ao 6):** refletindo o compromisso de erradicar a pobreza e a fome em todas as suas formas, assegurando que todos possam alcançar o seu potencial com respeito à dignidade e igualdade, num ambiente saudável.
- **Prosperidade (ODS 7 ao 10):** garantindo que todos tenham acesso a uma vida próspera e de plena realização pessoal e que o desenvolvimento económico, social e tecnológico ocorra em equilíbrio com a natureza.
- **Planeta (ODS 11 ao 15):** reforçando a convicção da necessidade de proteger o planeta contra a degradação, através de padrões sustentáveis de consumo e produção, gestão sustentável de recursos naturais e ações urgentes contra as mudanças climáticas, considerando as necessidades das gerações presentes e futuras.
- **Paz (ODS 16):** destacando o compromisso de promover sociedades pacíficas, justas e inclusivas, livres do medo e da violência, reconhecendo a interdependência entre desenvolvimento sustentável e paz.
- **Parcerias (ODS 17):** mobilizando recursos para a implementação da Agenda 2030 por meio de uma Parceria Global para o Desenvolvimento Sustentável revitalizada, fortalecendo o espírito de solidariedade global, com ênfase nos mais pobres e vulneráveis, e com a participação de todos os países, partes interessadas e pessoas.

Portugal, como elemento ativo deste movimento de transformação, decidiu concentrar os seus esforços em seis objetivos, considerados prioritários: garantir uma educação de alta qualidade (ODS 4), promover a igualdade de género (ODS 5), investir em indústria, inovação e infraestrutura (ODS 9), buscar a redução das desigualdades de oportunidades (ODS 10), enfrentar as mudanças climáticas (ODS 13) e preservar a vida marinha (ODS 14) (Ministério dos Negócios Estrangeiros, 2017).

O Instituto Nacional de Estatística (INE) publica, desde 2018, um relatório estatístico anual sobre os ODS, para medir o progresso nacional. O INE tem vindo a reforçar a quantidade e a qualidade da informação disponibilizada. Os indicadores disponíveis para Portugal cobrem 69% do total dos 248 indicadores da ONU. Desses indicadores anualmente monitorizados, 61% apresentaram uma trajetória positiva, face a 2015, enquanto 11% evoluíram em sentido contrário e 10% não registaram qualquer alteração (PT Sustentável, 2023).

Em relação aos indicadores que medem o progresso dos ODS prioritários, definidos anteriormente, 54% evoluíram positivamente e 14% registaram uma evolução negativa. Portugal acompanha a evolução estatística de 124 metas, tendo em conta o número de indicadores monitorizados e a sua alocação nos ODS. Isto representa uma cobertura de 74% das metas. A avaliação global da evolução das metas revela que mais de 60% das metas monitorizadas progrediram positivamente (PT Sustentável, 2023).

Os ODS 1, 6, 7 e 8 destacam-se pelo facto de apresentarem a maior percentagem de metas com uma evolução positiva face a 2015. De referir, no caso do ODS 7, que duas das suas metas foram atingidas: (1) Assegurar o acesso de todos a serviços energéticos modernos, fiáveis e a preços acessíveis e (2) Participação das energias renováveis no cabaz energético mundial, e o mesmo acontece com o ODS 3, com metas atingidas na redução da mortalidade materna; mortalidade de nados vivos e crianças com menos de cinco anos; mortalidade neonatal. O ODS 9, por outro lado, é o que apresenta o pior desempenho, com 38% das metas a evoluírem no sentido oposto ao desejável. Os ODS 5, 12 e 14 carecem de dados para mais de 60% das metas estabelecidas (PT Sustentável, 2023).

No que diz respeito às organizações e indústria, dos 17 objetivos é importante destacar o ODS 7 e o ODS 12, que dizem respeito à Indústria, Inovação e Infraestruturas e Produção e Consumos Sustentáveis, respetivamente. O ODS 7 foca-se no desenvolvimento de infraestruturas sustentáveis, na promoção da industrialização inclusiva, na modernização das indústrias para uma maior eficiência e adoção de práticas ambientalmente corretas, no fortalecimento da investigação científica e tecnológica, em facilitar o desenvolvimento de infraestruturas em países em desenvolvimento e aumentar o acesso às tecnologias de informação e comunicação (United Nations, 2019b). Em relação ao ODS 12, é uma meta que promove uma gestão e uso de recursos naturais mais sustentável, a redução do desperdício e a geração de resíduos, o incentivo às empresas para adotarem práticas sustentáveis, e a promoção de compras públicas sustentáveis de acordo com políticas e prioridades nacionais (United Nations, 2019a).

## **2.2. Economia Circular**

A EC é um modelo de produção e consumo que envolve a partilha, locação, reutilização, reparação, renovação e reciclagem de materiais e produtos existentes sempre que possível para que o ciclo de vida dos produtos se torne mais alargado. Na prática, a EC forma um ciclo que implica a redução de desperdício e resíduos para o mínimo possível

e a valorização máxima dos produtos e materiais, devendo seguir a sequência representada na Figura 5 (Parlamento Europeu, 2023).

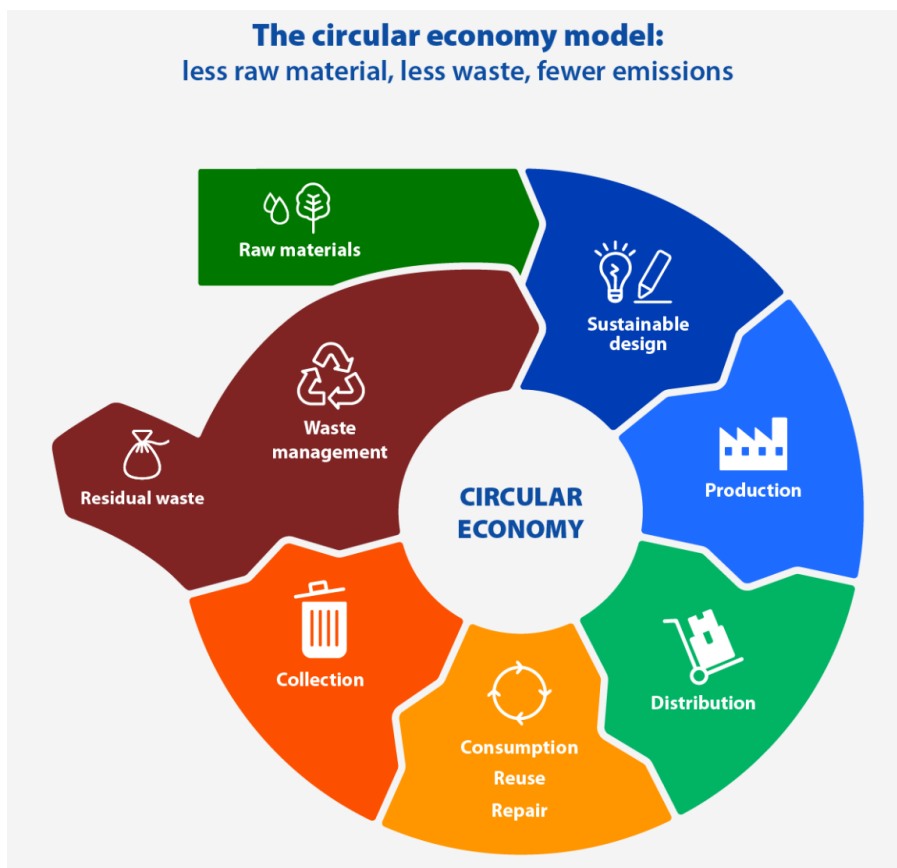


Figura 5 - Modelo de economia circular (Parlamento Europeu, 2023).

Este modelo representa um afastamento do modelo económico tradicional, designado de Economia Linear, que se baseia no padrão de extrair, fabricar, consumir e descartar, dependendo de grandes quantidades de materiais e energias de baixo custo e alta disponibilidade.

A EC baseia-se em três princípios (Ellen MacArthur Foundation, 2015):

- **Princípio 1:** Preservar e melhorar o capital natural através do controlo das reservas finitas e equilibrando os fluxos de recursos renováveis;
- **Princípio 2:** Otimizar o rendimento dos recursos, fazendo circular produtos, componentes e materiais com a maior utilidade possível, em qualquer momento, nos ciclos técnicos e biológicos;
- **Princípio 3:** Promover a eficácia do sistema, revelando e projetando as externalidades negativas.

Além destes 3 princípios, na Figura 6 é possível ainda observar o ciclo biológico, no lado esquerdo, que representa os materiais consumidos e que através da sua degradação podem retornar de forma segura à terra, e o ciclo técnico, no lado direito, que diz respeito aos produtos que são consumidos como produto final, ao invés de como matéria-prima, e apresentam a possibilidade de serem reutilizados ou reciclados (Ellen MacArthur Foundation, 2022).

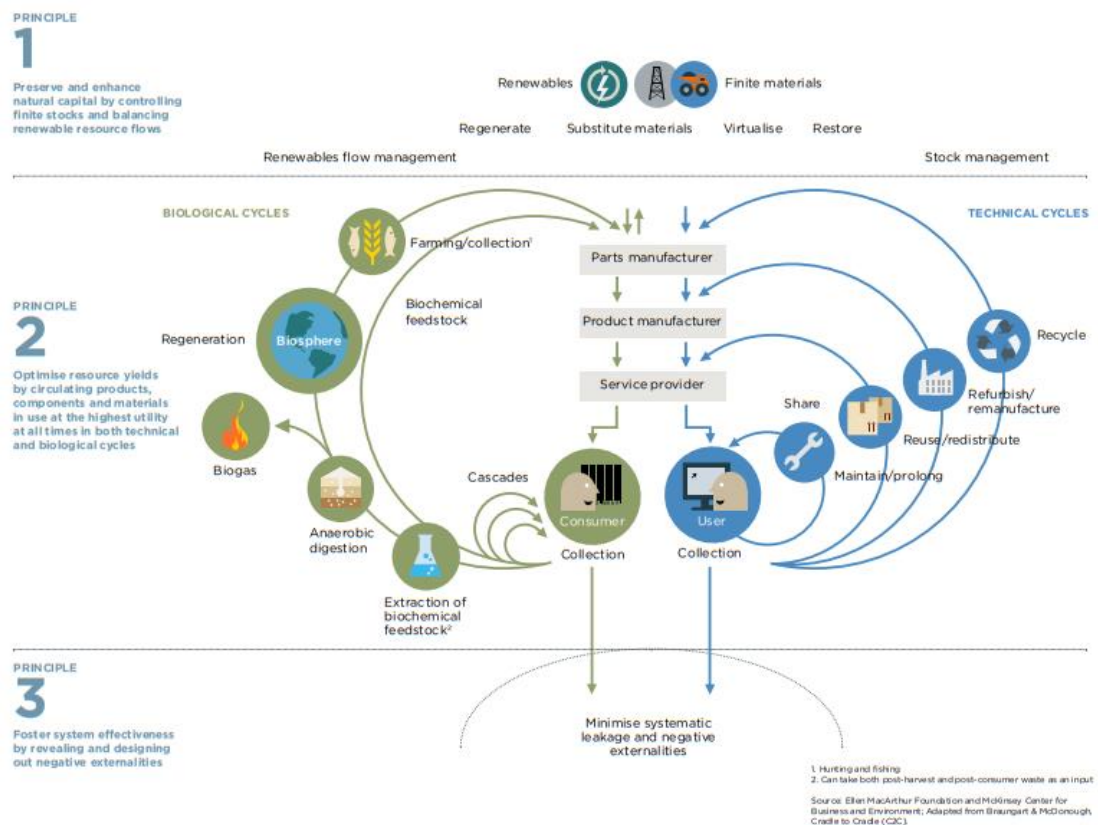


Figura 6 - Modelo de Economia Circular (Bourguignon, 2016)

A mudança para um modelo de EC pode traduzir-se em benefícios em diversos aspetos, tais como na (Parlamento Europeu, 2023):

- **Proteção do ambiente**

A reutilização e reciclagem de produtos são medidas que podem retardar a utilização de recursos naturais, mitigar a perturbação dos ecossistemas e *habitats* e contribuir para a preservação da biodiversidade. Além disso, a adoção do modelo circular oferece a vantagem adicional de redução das emissões anuais de Gases Efeito de Estufa (GEE). Conforme reportado pela Agência Europeia do Ambiente, os processos industriais e a utilização de produtos são responsáveis por 9,10% das emissões de GEE na União Europeia (UE), enquanto que a gestão de resíduos representa 3,32%. A conceção e produção de produtos mais eficientes

e sustentáveis desde a sua origem podem contribuir significativamente para a redução do consumo de energia e recursos, uma vez que é estimado que mais de 80% do impacto ambiental de um produto seja determinado durante a sua fase de conceção. Uma transição para produtos com melhor durabilidade, passíveis de reutilização, aprimoramento e reparação, resultaria na diminuição da quantidade de resíduos. A problemática das embalagens é particularmente evidente, com a média europeia de aproximadamente 180 quilogramas de resíduos de embalagens gerados anualmente por habitante.

#### **Redução da dependência de matéria-prima**

A disponibilidade limitada de matérias-primas essenciais salienta a necessidade de estratégias eficazes que garantam o fornecimento estável e sustentável. A interdependência entre os países da UE e outros países em relação às matérias-primas é notável, uma vez que, conforme indicado pela Eurostat, cerca de metade das matérias-primas que a UE consome são importadas (Eurostat, 2023). O valor total do comércio de matérias-primas entre a UE e os restantes países do mundo triplicou desde 2022, sendo que os aumentos das exportações têm se vindo a notar de forma mais acelerada. No entanto, a UE continua ainda a importar mais do que exporta, o que resultou, em 2021, num défice comercial de 35,5 mil milhões de euros. A adoção de práticas de reciclagem de matérias-primas permite mitigar riscos associados à oferta, tais como a volatilidade dos preços, disponibilidade limitada e dependência.

#### **Criação de emprego e economia do consumidor**

O avanço para a EC é considerado um impulso para aumentar a competitividade, fomentar a inovação, estimular o crescimento económico e criar empregos, prevendo-se a criação de aproximadamente 700.000 empregos apenas na UE até 2030. A reconfiguração de materiais e produtos para a sua utilização circular também pode ser vista como um impulsionador da inovação em diversos setores da economia. Desta forma, os consumidores podem beneficiar através da disponibilização de produtos com melhor durabilidade e inovadores, os quais tendem a melhorar a qualidade de vida e a economizar recursos financeiros a longo prazo.

Apesar dos benefícios, a transição de um modelo de economia linear para um modelo de EC apresenta alguns desafios como a necessidade: (1) de elevado investimento financeiro; (2) de mudanças sistemáticas, no comportamento do consumidor e nos modelos de negócios em prática na atualidade; e (3) de conhecimento técnico,

imprescindível ao processo de transição e gestão deste tipo de economia (Bourguignon, 2016).

### **2.2.1. Green Deal Europeu**

Pela primeira vez na história, a sustentabilidade está entre as prioridades centrais na definição de políticas europeias, sendo o Pacto Ecológico Europeu, também conhecido por *Green Deal Europeu*, a primeira das seis prioridades da Comissão Europeia para o período de 2019 a 2024 (APA, 2021a).

O *Green Deal Europeu* foi apresentado em dezembro de 2019 pela Comissão Europeia, abrangendo um conjunto de medidas destinadas a facilitar uma transição sustentável para empresas e cidadãos europeus. O objetivo principal é alcançar a neutralidade climática até 2050, tornando a Europa o primeiro continente a atingir esse marco, contribuindo assim para atenuar os impactos do aquecimento global (BCSD Portugal, n.d.).

O pacto inclui um conjunto de princípios políticos fundamentais e soluções destinadas a garantir uma transição justa e socialmente equitativa, apoiada por investimentos em tecnologias verdes e uma legislação climática que confere força de lei a esse compromisso. O *Green Deal Europeu* é concebido como uma estratégia de crescimento para a EU e abrange todos os setores de atividade, incluindo transportes, agricultura, alimentação, indústria e infraestrutura (BCSD Portugal, n.d.).

Segundo a APA, o *Green Deal Europeu* propõe (APA, 2021a):

- O aumento da ambição climática da UE nos horizontes de 2030 e 2050;
- A disponibilização de energia limpa, a ser utilizada de modo eficiente;
- A mobilização da indústria para a EC e limpa;
- A construção sustentável e eficiente na utilização de recursos;
- A aceleração da mudança para uma mobilidade sustentável e inteligente;
- O acesso à alimentação justa, saudável e amiga do ambiente;
- A preservação e recuperação dos ecossistemas e biodiversidade;
- A ambição de alcançar um ambiente livre de substâncias tóxicas.

No contexto da mobilização da indústria para a economia circular e limpa, surgiu em março de 2020, um plano de ação para a EC, apresentado também pela Comissão Europeia. Este plano de ação, que engloba iniciativas ao longo de todo o ciclo de vida dos produtos, determina a forma como os produtos devem ser concebidos, promove

processos de EC, incentiva o consumo sustentável e ambiciona garantir que o desperdício seja evitado e que os recursos utilizados sejam mantidos na economia da UE pelo maior tempo possível (APA, 2021a; European Commission, 2020; Parlamento Europeu, 2023). No contexto do *Green Deal* Europeu, o Plano de Ação para a EC foi revisto e foram apresentadas 35 ações legislativas para atingir os seguintes objetivos (APA, 2021a; European Commission, 2020):

- Estabelecer como regra que os produtos sejam sustentáveis na UE;
- Capacitar os consumidores e os compradores públicos;
- Focar nos setores que usam mais recursos e nos quais o potencial de circularidade é mais elevado, como os produtos eletrônicos e as tecnologias de informação e comunicação, as baterias e veículos, as embalagens, os plásticos, os têxteis, a construção e edifícios, os alimentos, a água e os nutrientes;
- Assegurar a produção de menos resíduos;
- Fazer com que a circularidade funcione para pessoas, regiões e cidades;
- Liderar os esforços globais na implementação da EC.

Para além das ações mencionadas, o Plano de ação inclui ainda três medidas transversais para fortalecer as sinergias entre a circularidade da economia e a redução das emissões de gases com efeito de estufa, promover medidas económicas que direcionem os investimentos e financiamentos para modelos de produção e de consumo mais sustentáveis e usar a investigação, a inovação e a digitalização como meio para promover a transição para uma EC (APA, 2021a).

A implementação das políticas do *Green Deal* Europeu é um processo bastante complexo, sendo a sua monitorização uma etapa essencial para que, sempre que necessário, as mesmas sejam ajustadas. Neste sentido, a Comissão Europeia faz uso de um conjunto de ferramentas abrangentes (APA, 2021a):

- A monitorização periódica dos ODS pelo Eurostat;
- A publicação regular de um Relatório de Prospetiva Estratégica, no qual se analisam as competências, vulnerabilidades e oportunidades que os estados-membros devem considerar para reforçar a sua resiliência;
- O Semestre Europeu, um mecanismo de coordenação das políticas económicas, sociais e orçamentais, que faz parte da estrutura-quadro de governança da UE;
- O 8º Programa de Ação em Matéria de Ambiente, direcionado especificamente para apoiar a governança e monitorização do Pacto Ecológico Europeu.

Este conjunto articulado de ferramentas de governança e monitorização dos objetivos de sustentabilidade da Europa e do Mundo é coerente e interligado, permitindo que os países europeus avaliem o seu progresso e identifiquem necessidades de adaptação na execução do Pacto Ecológico Europeu (APA, 2021a).



# Capítulo 3

## Gestão de Resíduos

Neste capítulo, será abordada a definição e classificação de resíduos, bem como a política nacional adotada para a sua gestão. Por fim, o foco direciona-se para a gestão específica de resíduos industriais.

### 3.1. Resíduos

De acordo com alínea a) do artigo 3º do Decreto-Lei nº 11/2023, de 10 de fevereiro, resíduo é definido como “qualquer substância ou objeto de que o detentor se desfaz ou tem a intenção ou a obrigação de se desfazer.”

A Lista Europeia de Resíduos (LER), publicada pela Decisão 2014/955/UE da Comissão Europeia, que emenda a Decisão 2000/532/CE, mencionada no artigo 7.º da Diretiva Quadro sobre Resíduos (DQR), representa uma lista padronizada de resíduos, considerando tanto a sua origem quanto a sua composição (APA, 2020).

A Lista Europeia de Resíduos (LER) é composta por 20 capítulos com códigos de dois dígitos de 01 a 20, cada um abrangendo resíduos associados a uma área específica de atividade geradora de resíduos, como industrial, urbana, agrícola e hospitalar, ou a processos produtivo (Figura 7). Na LER, cada capítulo é subdividido em um ou mais subcapítulos, identificados por um código de quatro dígitos, e dentro de cada subcapítulo, há uma descrição detalhada dos resíduos associados, designadas de entradas, identificados por códigos de seis dígitos (APA, 2020).

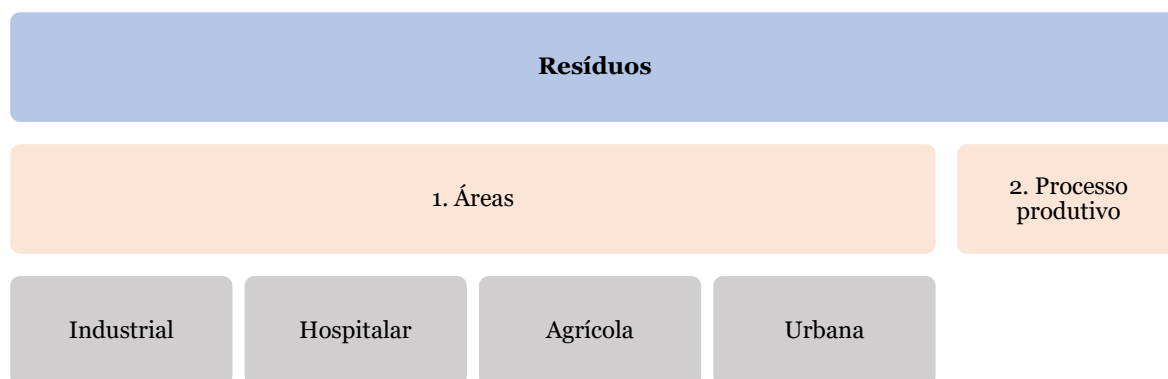


Figura 7 - Diferentes classes de resíduos segundo a Lista Europeia de Resíduos (APA, 2020).

Os resíduos industriais são resíduos resultantes de atividade industrial, bem como de atividades de produção ou associados à distribuição de eletricidade, gás ou água. Por sua vez, os resíduos hospitalares são resíduos cujas atividades se concentram na prestação de cuidados de saúde a seres humanos e a animais, abrangendo áreas da prevenção, diagnóstico, tratamento, reabilitação ou investigação e ensino, bem como de outras atividades envolvendo procedimentos invasivos. Os resíduos agrícolas, tal com o nome indica, são resíduos provenientes de exploração agrícola e/ou pecuária, ou similar (APA, 2021d). Por último, os resíduos urbanos são resíduos de recolha indiferenciada e de recolha seletiva provenientes de habitações ou de outras origens, caso sejam semelhantes aos resíduos das habitações na sua natureza e composição (APA, 2021f).

Adicionalmente à classificação mencionada, determinados resíduos são classificados como perigosos, identificados com base nas suas propriedades e nos critérios de classificação estabelecidos por lei (APA, 2021e). É importante mencionar que o facto de um resíduo conter substâncias consideradas perigosas, não é suficiente para lhe ser atribuído o título de perigoso. Desta forma, a atribuição de perigosidade a um resíduo depende, somente, dos seus constituintes e da sua concentração (APA, 2020).

Os RP são gerados predominantemente no sector industrial, essencialmente na Indústria Transformadora, mas também na saúde, na agricultura, no comércio, nos serviços e até nas casas dos cidadãos comuns. Devido à sua perigosidade quer para a saúde humana, quer para o ambiente, deve ser levada a cabo uma correta gestão deste tipo de resíduos (APA, 2021e).

### **3.2. Política Nacional de Gestão de Resíduos**

O planeamento e a gestão de resíduos são competências da APA, de forma a prevenir ou reduzir a sua produção. A APA procura promover a eficiência na utilização de recursos, baseada nos princípios da hierarquia dos resíduos e da EC (APA, 2021c).

A gestão da recolha, transporte e tratamento de resíduos é regulamentada abrangendo resíduos urbanos e resíduos não urbanos, nomeadamente resíduos hospitalares e industriais, e incluindo os RP. Algumas tipologias de resíduos têm uma abordagem diferenciada, conhecidos como fluxos específicos de resíduos, como no caso de resíduos de construção e demolição, resíduos de pilhas e acumuladores, óleos usados, embalagens e resíduos de embalagens, resíduos de equipamentos elétricos e eletrónicos, pneus usados e veículos em fim de vida (APA, 2021c).

O novo Regime Geral de Gestão de Resíduos (RGGR), anexo I do Decreto-Lei n.º 102 - D/2020, de 10 de dezembro, regulamenta a adoção de planos estratégicos nacionais para a prevenção e gestão de resíduos. Neste contexto, foi definido o Plano Nacional de Gestão de Resíduos (PNGR 2030), que constitui um instrumento de planeamento macro da política de resíduos, que estabelece as diretrizes estratégicas de âmbito nacional da política de resíduos e as regras orientadoras de atuação, as prioridades, as metas a atingir e as ações a implementar para assegurar a concretização dos princípios da gestão de resíduos e o alcance dos objetivos delineados no RGGR. Este plano deve ser objeto de desenvolvimento pelos planos de gestão de resíduos urbanos e de resíduos não urbanos (Presidência do Conselho de Ministros, 2023c).

O PNGR 2030 é fundamentado nos objetivos estratégicos de prevenção da produção de resíduos em termos de quantidade e perigosidade, de promoção da eficiência e suficiência na utilização de recursos, e de minimização dos impactes ambientais adversos, mediante uma abordagem integrada e sustentável na gestão de resíduos. Este foco visa garantir a gestão sustentável dos recursos naturais, promovendo a sua utilização racional e promovendo os princípios da EC. O propósito subjacente é fortalecer a adoção de fontes de energia renovável e aumentar a eficiência energética, com o intuito de proteger, conservar e melhorar a qualidade ambiental e a saúde humana (Presidência do Conselho de Ministros, 2023c).

A política de resíduos integra as componentes da prevenção, produção e gestão de resíduos, e tem como objetivo fundamental a minimização dos impactes negativos resultantes destas atividades na saúde humana e no ambiente (Presidência do Conselho de Ministros, 2023c).

A gestão de resíduos abrange um conjunto de atividades para controlar resíduos desde a sua origem até ao seu destino final, englobando a recolha, transporte, triagem, valorização ou a eliminação de resíduos, incluindo a supervisão destas operações, a manutenção dos locais de eliminação após encerramento, e as ações empreendidas na qualidade de comerciante ou corretor de resíduos. Esta gestão deve ser realizada de acordo com os princípios definidos no RGGR e legislação aplicável (Presidência do Conselho de Ministros, 2023c).

Como referido anteriormente, a gestão de resíduos tem como princípio a hierarquia dos resíduos (Figura 8), que estabelece que a política e a legislação em matéria de resíduos,

respeitando a seguinte ordem de prioridades (APA, 2021b; Presidência do Conselho de Ministros, 2023c):

1. Prevenção: adoção de medidas antes de uma substância, material ou produto assumir a natureza de resíduo, destinadas a reduzir:
  - a. A quantidade de resíduos produzidos, designadamente através da reutilização de produtos ou do prolongamento do tempo de vida dos produtos;
  - b. Os impactes adversos no ambiente e na saúde humana resultantes dos resíduos produzidos;
  - c. O teor de substâncias nocivas presentes nos materiais e nos produtos.
2. Preparação para reutilização: operação mediante a qual produtos ou componentes que não sejam resíduos são utilizados novamente para o mesmo fim para que foram concebidos.
3. Reciclagem: operação de valorização da qual os materiais constituintes dos resíduos são novamente transformados em produtos, materiais ou substâncias para o seu fim original ou para outros fins, mas que não inclui a valorização energética nem o reprocessamento em materiais que possam ser utilizados como combustível ou em operações de enchimento.
4. Outros tipos de valorização: operação cujo resultado principal seja a transformação dos resíduos de modo a servirem um fim útil, substituindo outros materiais que, caso contrário, teriam sido utilizados para um fim específico ou a preparação dos resíduos para esse fim na instalação ou conjunto da economia.
5. Eliminação: Operação que não seja de valorização, ainda que se verifique como consequência secundária a recuperação de substâncias ou de energia.



Figura 8 - Princípios da hierarquia dos resíduos (Adaptado do Presidência do Conselho de Ministros, 2023a).

Outro princípio fundamental da gestão de resíduos é a atribuição da responsabilidade pela gestão dos mesmos e custos associados ao produtor original dos resíduos, podendo esta responsabilidade ser alargada, mediante legislação, ao produtor do produto que deu origem aos resíduos, e partilhada pelos distribuidores desse produto. É importante salientar que este princípio não é aplicável aos resíduos urbanos, os quais têm a sua gestão sob responsabilidade dos sistemas municipais ou multimunicipais (APA, 2021b).

Apesar do papel da APA e das Comissões de Coordenação e Desenvolvimento Regional (CCRD) no licenciamento e supervisão da gestão de resíduos, é esperado que todos os indivíduos e entidades contribuam para a prevenção e separação de resíduos, facilitando a sua recolha seletiva e, posteriormente, a sua valorização (APA, 2021b).

### **3.3. Gestão de Resíduos Não Urbanos**

O PNGR 2030, referido na **seção 3.2**, deve estabelecer regras orientadoras que assegurem a coerência com o Plano Estratégico para os Resíduos Urbanos (PERSU 2030), aprovado pela Resolução do Conselho de Ministros n.º 30/2023, de 24 de março, e o Plano Estratégico para os Resíduos Não Urbanos (PERNU 2030), aprovado pela Resolução do Conselho de Ministros n.º 127/2023, de 18 de outubro (Presidência do Conselho de Ministros, 2023b).

No âmbito desta dissertação, e tendo em consideração que os resíduos industriais são categorizados como resíduos não urbanos, importa analisar o PERNU 2030. O PERNU

2030 constitui um instrumento de destaque na política de gestão de resíduos não urbanos em Portugal, delineando uma visão abrangente, objetivos definidos, metas globais e específicas, além de medidas concretas, direcionadas para diferentes setores de atividade, nomeadamente o industrial, hospitalar, de agricultura, e de construção, que devem ser implementadas até o ano de 2030 (APA, 2022; Presidência do Conselho de Ministros, 2023b). Este plano substitui os anteriores planos setoriais, nomeadamente o Plano Estratégico de Gestão dos Resíduos Industriais (PESGRI), o Plano Nacional de Prevenção de Resíduos Industriais (PNAPRI) e o Plano Estratégico dos Resíduos Hospitalares (PERH) (Presidência do Conselho de Ministros, 2023b).

Antes da aprovação do PERNU 2030, foi importante conhecer os fatores condicionantes e de incentivo, identificados junto de empresas, à implementação de práticas de prevenção nos diferentes setores de atividade, representados na Tabela 1 (Presidência do Conselho de Ministros, 2023b).

Tabela 1 - Fatores condicionantes e de incentivo à implementação de práticas de prevenção (Adaptado de Presidência do Conselho de Ministros, 2023b).

<b>Fatores Condicionantes</b>	<b>Fatores de Incentivo</b>
Acesso à informação	Incentivos técnicos
Desconhecimento das tecnologias existentes no mercado	Existência de estudos que comprovem os benefícios económicos e de negócio decorrentes da integração de práticas de prevenção
O nível de poluição gerado pelos processos é baixo e não justifica a integração	Partilha de boas práticas e casos de aplicação de práticas de prevenção noutras organizações com a mesma atividade
Os recursos humanos não se encontram tecnicamente preparados	Demonstração de impactes substanciais na eliminação e/ou redução dos resíduos gerados
Falta de apoio técnico para avaliar corretamente opções e alternativas de prevenção	Incentivos económico-financeiros
Desafios de Gestão	Pressão do contexto (mercado, clientes, utentes, concorrentes) para integração de práticas de prevenção
Falta/desconhecimento de incentivos financeiros ou fiscais para realização de investimentos	Existência de incentivos fiscais ou financeiros que enquadrem investimentos em práticas de prevenção
Falta de competitividade decorrente da integração de práticas de prevenção	Incentivos sociais e políticos
Aumento dos custos de produção decorrente da integração de práticas de prevenção	Existência de legislação e obrigatoriedade de implementação de práticas de prevenção

Sobreposição dos objetivos de gestão (p.e. cumprimento de prazos), com a integração de práticas de prevenção	Pressão de associações, nomeadamente ambientais
Estratégia empresarial	Pressão de comunidades vizinhas
Falta de bases económico-financeiras sólidas para avaliação de investimentos e tomada de decisão	
Estratégia empresarial não passa pelo investimento em práticas de prevenção	
A integração de práticas de prevenção não é prioritária	
A integração de práticas de prevenção apenas é aplicável aquando da existência de obrigatoriedades legais	

O PERNU 2030 segue uma visão alinhada com o PNGR, o qual estabelece como principal objetivo “promover a prevenção e gestão de resíduos integrados no ciclo de vida dos produtos, centradas numa economia tendencialmente circular e garantirem uma maior eficiência na utilização de recursos naturais” (Presidência do Conselho de Ministros, 2023b). O diagrama apresentado na Figura 9 enquadra as principais características inerentes à visão do PERNU 2030 (Presidência do Conselho de Ministros, 2023b).



Figura 9 - Principais características inerentes à visão do PERNU 2030 (Presidência do Conselho de Ministros, 2023b).

Alinhados com a visão para o PERNU, foram definidos quatro objetivos operacionais (OP), apresentados na Figura 10 (APA, 2022; Presidência do Conselho de Ministros, 2023b).

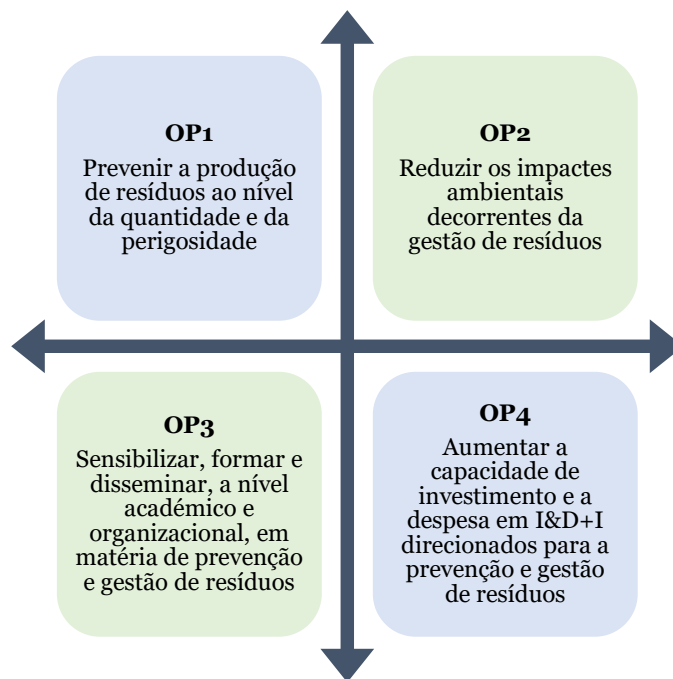


Figura 10 - Objetivos operacionais do PERNU 2030 (Adaptada de APA, 2022; Presidência do Conselho de Ministros, 2023b).

Os OP foram desdobrados em metas específicas e são passíveis de monitorização, conforme demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Monitorização dos Objetivos Operacionais do PERNU 2030 (Adaptado de Presidência do Conselho de Ministros, 2023b).

OP	Meta	Indicador
OP1, OP2, OP3	Reduzir a quantidade de resíduos não urbanos produzidos em Portugal	Produção de resíduos não urbanos
	Diminuir em quantidade e representatividade a produção de resíduos não urbanos perigosos	Produção de resíduos não urbanos perigosos
OP2, OP3	Dissociar o crescimento económico do consumo intermédio de materiais	Produto Interno Bruto/Consumo interno de materiais
	Diminuir o rácio entre a produção de resíduos não urbanos e o Produto Interno Bruto	Produção de resíduos não urbanos/Produto Interno Bruto
	Reintrodução de resíduos não urbanos na economia	Quantidade de resíduos não urbanos sujeitos a operações de valorização (não energética) / Quantidade de resíduos não urbanos produzidos
	Manter a tendência de crescente representatividade de operações de valorização	Quantidade de resíduos não urbanos sujeitos a operações de valorização / Quantidade de resíduos não urbanos produzidos

	Diminuir a quantidade de resíduos não urbanos direcionados para operações de eliminação	Quantidade de resíduos não urbanos sujeitos a operações de eliminação
<b>OP4</b>	Aumentar a despesa total e respetiva representatividade dos investimentos de I&D (Investigação e Desenvolvimento) com objetivos socioeconómicos ambientais	Despesa em I&D com objetivo ambiental/Despesa total em I&D

Na Tabela 3 encontram-se listados os valores de referência correspondentes ao ano de 2019, juntamente com as metas numéricas estabelecidas para o ano de 2030, referentes a cada um dos indicadores estratégicos que requerem monitorização para o cumprimento do PERNU 2030.

Tabela 3 - Indicadores estratégicos do PERNU 2030 e metas associadas (Adaptado de Presidência do Conselho de Ministros, 2023b).

<b>Indicador</b>	<b>Valor de referência (2019)</b>	<b>Meta (2030)</b>
Produção de resíduos não urbanos	11 427 435 toneladas	9 320 010 toneladas (Redução de 18,4% face a 2019)
Produção de resíduos não urbanos perigosos	1.066.055 toneladas	599.261 toneladas (Redução de 43,80% face a 2019)
Produto Interno Bruto/Consumo interno de materiais	1,181 euros/tonelada	1,666 euros/tonelada
Produção de resíduos não urbanos/Produto Interno Bruto	0,056 toneladas/euro	0,040 toneladas/euro
Quantidade de resíduos não urbanos sujeitos a operações de eliminação	1.751.501 toneladas	811 087 toneladas (Redução de 53,70% face a 2019)
Quantidade de resíduos não urbanos sujeitos a operações de valorização não energética/ Quantidade de resíduos não urbanos produzidos	82,70%	90,20%
Quantidade de resíduos não urbanos sujeitos a operações de valorização / Quantidades de resíduos não urbanos produzidos	84,70%	91,30%
Despesa em I&D com objetivo ambiental/Despesa total em I&D	6,40%	17,10%

O PERNU 2030, além de definir ações transversais para a prevenção e gestão de todos os resíduos não urbanos, contempla ainda um conjunto de ações para setores específicos.

No contexto desta dissertação, é pertinente focar o setor industrial, o qual inclui as seguintes ações específicas (APA, 2022; Presidência do Conselho de Ministros, 2023b):

- Elaborar e divulgar documentos, com informação relevantes, e direcionados a setores industriais considerados como prioritários;
- Promover acordos voluntários com setores de maior prioridade que estimulem a sustentabilidade;
- Criar condições para o crescimento do mercado de materiais reciclados e de produtos que incorporam esses mesmos materiais:
  - Aumentar a credibilidade dos materiais reciclados e dos produtos que os incorporam, promovendo, assim, a sua procura e a estabilidade do mercado, através de requisitos de qualidade e certificados comprovativos;
  - Disseminar e fomentar a capacidade nacional de valorização de resíduos industriais, por meio da divulgação de: i) informação sobre a disponibilidade de materiais reciclados e produtos que incorporam estes materiais; ii) informação estruturada sobre os processos de reciclagem/valorização de resíduos, as características técnicas de materiais reciclados e as possibilidades da sua integração em produtos.
  - Promover a cooperação entre os operadores de gestão de resíduos industriais, as indústrias, as entidades do sistema científico e tecnológico, e as universidades, para, através do desenvolvimento de novas formas de reciclagem de resíduos para os quais atualmente não existem soluções, por meio de projetos de I&D+I (Investigação, Desenvolvimento e Inovação);
  - Estabelecimento de taxas mínimas de incorporação de matérias-primas secundárias em determinados produtos ou materiais colocados no mercado.
- Incentivar a simbiose industrial entre empresas.

De referir que as ações de prevenção e gestão direcionadas para os resíduos industriais são, de forma geral, as mais abrangentes do PERNU 2030, tendo em conta a sua natureza diversificada, os objetivos económicos, a dimensão e a realidade das entidades que compõem o sector industrial (Presidência do Conselho de Ministros, 2023b).

Na Resolução do Conselho de Ministros que aprovou o PERNU 2030 foram ainda criteriosamente analisados dados que se revelam pertinentes para analisar no contexto desta dissertação.

A gestão de resíduos não urbanos em Portugal tem sido objeto de mudanças significativas, verificando-se uma tendência crescente para que as quantidades produzidas sejam encaminhadas para operações de valorização. Durante o período entre 2009 e 2019, observou-se uma redução progressiva da representatividade de operações de eliminação e valorização energética, diminuindo de 33,84% para 15,33% e de 2,87% para 1,98%, respetivamente. Em contrapartida, ocorreu um aumento da representatividade de resíduos não urbanos tratados por via de outras operações de valorização, aumentando de 63,29% para 82,70% (Presidência do Conselho de Ministros, 2023b).

Apesar disso, é possível observar disparidades entre os resíduos não urbanos perigosos e os resíduos não urbanos não perigosos, no que concerne às alterações ocorridas na predominância das operações de eliminação em comparação com as operações de valorização, entre 2009 e 2019 (Presidência do Conselho de Ministros, 2023b):

- No que respeita aos resíduos não urbanos **perigosos**, verificou-se um aumento da representatividade de operações de eliminação. A percentagem deste tipo de resíduos submetidos a operações de eliminação face ao valor total aumentou de 52,43% para 60,06%.
- Pelo contrário, no caso de resíduos não urbanos **não perigosos**, verificou-se um aumento da representatividade das operações de valorização, que não sejam valorização energética. A percentagem deste tipo de resíduos submetidos a operações de valorização, excluindo a valorização energética, registou um aumento significativo de 64,96% para 87,45%.

Tendo em conta que o foco desta dissertação reside em resíduos de madeira provenientes do setor industrial, é relevante analisar as quantidades de resíduos gerados e as operações de gestão adotadas para o caso específico dos resíduos não urbanos de madeira.

Em 2019, a produção de resíduos não urbanos perigosos de madeira totalizou 1.042 toneladas, enquanto os resíduos não urbanos não perigosos de madeira alcançaram a quantidade de 451.756 toneladas. Na Tabela 4, é apresentada a representatividade, em percentagem, das operações de eliminação e de valorização, tanto para os resíduos não urbanos perigosos de madeira quanto para os resíduos não urbanos não perigosos de madeira (Presidência do Conselho de Ministros, 2023b).

Tabela 4 - Operações de gestão a que os resíduos não urbanos perigosos foram sujeitos, no ano de 2019 (Adaptado de Presidência do Conselho de Ministros, 2023b).

		<b>Quantidade [t]</b>	<b>Operações de valorização [% sobre a produção]</b>	<b>Operações de eliminação [% sobre a produção]</b>
<b>Resíduos não urbanos de madeira</b>	<b>Perigosos</b>	1 042	25,24 %	74,76 %
	<b>Não Perigosos</b>	451 756	99,32 %	0,68 %

Assim como observado nos resíduos não urbanos em geral, os resíduos não urbanos de madeira, perigosos e não perigosos, diferem em relação de predominância das operações de gestão, sendo a eliminação a mais comum para os RP e a valorização para os resíduos não perigosos.

# Capítulo 4

## Materiais Compósitos

Neste capítulo apresenta-se uma breve abordagem aos materiais compósitos, começando pelas principais definições, aspetos e aplicações. Posteriormente, o foco direciona-se para os materiais compósitos reforçados com madeira, onde também serão apresentadas aplicações práticas dos mesmos.

### 4.1. Definição

Um material compósito define-se como uma mistura de dois ou mais materiais distintos, com interface entre eles, cujas propriedades finais são superiores às propriedades dos materiais constituintes isoladamente (Askeland & Wright, 2016).

Um material compósito estrutural é, de forma geral, constituído por uma fase contínua, designada por matriz, e por uma fase dispersa, designada por reforço (Altenbach *et al.*, 2018).

Enquanto que a fase matricial tem como principal função envolver o material de reforço e mantê-lo unido e na forma adequada, e o reforço permite ao compósito aprimorar as suas propriedades mecânicas (Sharma *et al.*, 2020, 2022). Além disso, a matriz é, maioritariamente, o material mais rígido e de menor resistência entre os dois constituintes (Altenbach *et al.*, 2018).

As propriedades de um material compósito dependem, entre outros, dos seguintes fatores (Altenbach *et al.*, 2018):

- Das propriedades dos materiais constituintes, ou seja, da matriz e do reforço;
- Da geometria da fase dispersa;
- Da natureza e qualidade da interface matriz-reforço.

Neste contexto, a geometria da fase dispersa corresponde à concentração, tamanho e forma das partículas, à sua distribuição e, por último, à sua orientação, conforme ilustrado na Figura 11.

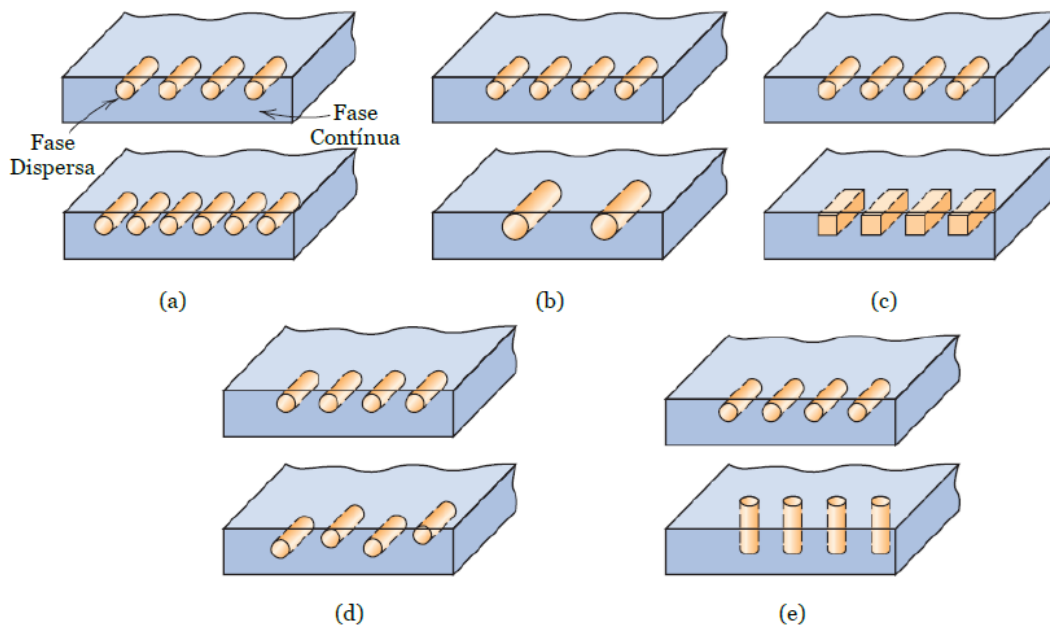


Figura 11 - Representações esquemáticas das várias características geométricas e espaciais das partículas da fase dispersa que podem influenciar as propriedades dos compósitos: (a) concentração, (b) tamanho, (c) forma, (d) distribuição, e (e) orientação (Callister & Rethwisch, 2018)

## 4.2. Classificação dos Materiais Compósitos

Os materiais compósitos podem ser classificados consoantes os materiais que o constituem: a matriz (Sharma et al., 2022) e o reforço (Callister & Rethwisch, 2018).

Em função da matriz, existem três tipos de materiais compósitos: compósitos de matriz metálica, compósitos de matriz cerâmica e compósitos de matriz polimérica – Figura 12 (Sharma et al., 2022). Na **seção 4.3** irão ser apresentados os três tipos de matriz e as respetivas características.

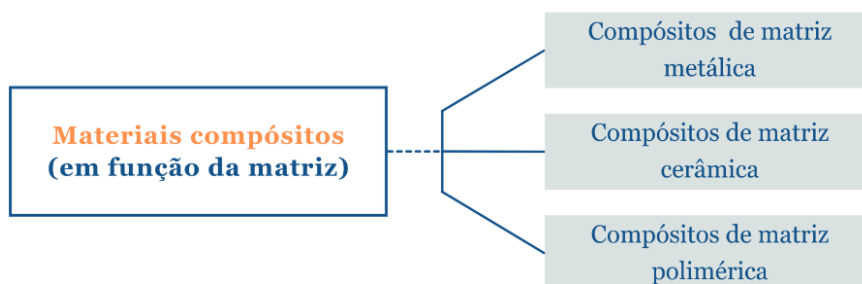


Figura 12 - Classificação dos materiais compósitos em função da matriz. (Adaptado de Sharma et al., 2022).

Em relação à classificação dos materiais compósitos com base nos reforços, existem três tipologias: reforçado com partículas, reforçado com fibras e reforço estrutural, como é possível observar na Figura 13.

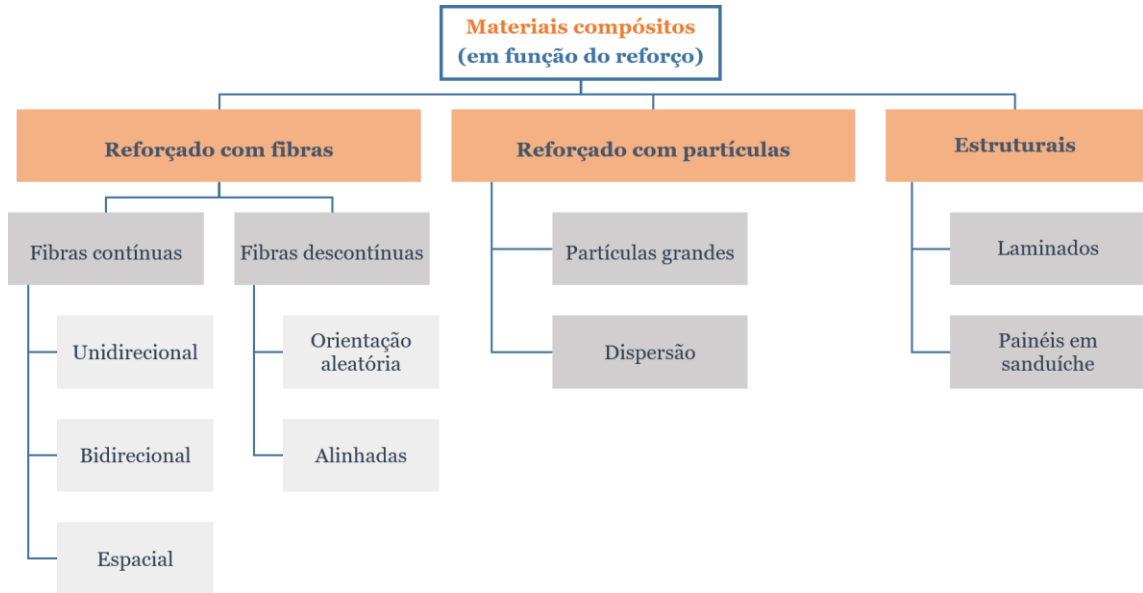


Figura 13 - Classificação dos materiais compósitos em função do reforço. (Adaptado de Callister & Rethwisch, 2018).

Em relação aos compósitos reforçados com fibras, estas podem ser contínuas ou descontínuas. As fibras contínuas, também designadas por fibras longas, apresentam uma orientação unidirecional, bidirecional ou espacial. Por outro lado, as fibras descontínuas, também conhecidas por curtas, apresentam uma orientação aleatória ou alinhada. Os compósitos reforçados com partículas subdividem-se em reforços em partículas grandes e por dispersão. Por último, os painéis “sanduíche” ou os laminados são considerados compósitos estruturais (Callister & Rethwisch, 2018).

Os compósitos reforçados com fibra classificam-se conforme o seu comprimento, sendo que as fibras curtas, ou descontínuas, comparadas com as fibras longas, ou contínuas, apresentam uma melhor resistência. De modo, a distinguir as fibras curtas das longas, foi definido um comprimento crítico ( $l_c$ ) para cada tipo de fibra, dependente do seu diâmetro ( $d$ ), da resistência da fibra ( $\sigma_f^*$ ) e da resistência da ligação matriz-fibra ( $\tau_c$ ), de acordo com a Equação 1 (Callister & Rethwisch, 2018).

$$l_c = \frac{\sigma_f^* \times d}{2 \times \tau_c} \quad (1)$$

No caso do comprimento da fibra exceder o valor crítico, é classificada como fibra contínua, caso contrário, é definida como fibra descontínua (Callister & Rethwisch, 2018). As fibras contínuas estão normalmente alinhadas, enquanto que as fibras descontínuas podem estar alinhadas, orientadas aleatoriamente, ou parcialmente orientadas. É importante salientar, que são obtidas melhores propriedades globais do compósito quando a distribuição das fibras é uniforme (Callister & Rethwisch, 2018).

Na Figura 14, estão representadas esquematicamente três situações: fibras contínuas (longas) e alinhadas; fibras descontínuas (curtas) e alinhadas e fibras descontínuas com orientação aleatória.

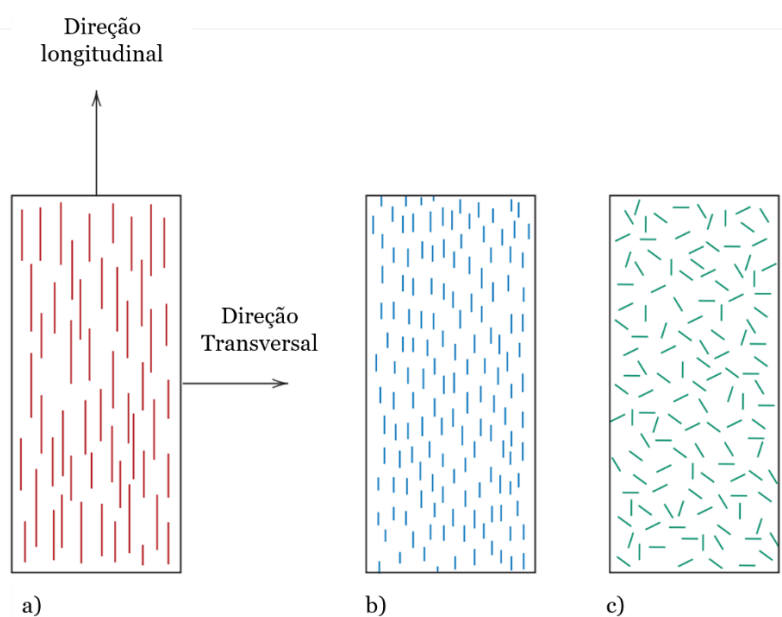


Figura 14 - Representações esquemáticas de fibras (a) contínuas e alinhadas, (b) descontínuas e alinhadas, e (c) descontínuas e orientadas aleatoriamente. (Callister & Rethwisch, 2018)

O reforço com fibras procura melhorar propriedades como a rigidez, sendo que o comprimento, orientação, forma e características da fibra influenciam diretamente as propriedades finais do compósito, mesmo que o seu volume face ao volume final varie apenas entre os 30 e os 70% (Altenbach *et al.*, 2018).

Relativamente aos compósitos reforçados com partículas, as duas subclasses distinguem-se pelo mecanismo de reforço e pela resistência. No caso das partículas grandes, estas suportam uma fração de carga transferida pela própria matriz. Por outro lado, os compósitos com o aumento da resistência por dispersão apresentam diâmetros de partículas inferiores, entre 0,01 e 0,1 micron. Na maioria dos casos, a matriz é responsável por suportar grande parte da carga que é aplicada, no entanto, no caso destas

pequenas partículas dispersas o mesmo não acontece, tendo em conta que o movimento é dificultado (Callister & Rethwisch, 2018).

Os enchimentos e o betão são dois exemplos de materiais compósitos reforçados com partículas grandes. No caso do enchimento, este tem a capacidade de melhorar as propriedades e substituir parte do volume do material. O betão é constituído por uma matriz de cimento, onde as partículas são, essencialmente, areia e brita (Callister & Rethwisch, 2018).

Dois exemplos de compósitos reforçado com partículas por dispersão são o alumínio com óxido de alumínio e o níquel com óxido de tório disperso, sabendo que os metais e ligas metálicas tem a capacidade de aumento da resistência por dispersão (Callister & Rethwisch, 2018).

Por fim, os materiais compósitos estruturais apresentam múltiplas camadas e baixa densidade, sendo utilizados em aplicações que requerem integridade estrutural, onde são necessárias elevadas resistências à tração, compressão e torção, e rigidez. As propriedades destes compósitos dependem não só das propriedades dos materiais constituintes, mas também da conceção geométrica dos elementos estruturais. Os compósitos laminados e os painéis sanduíche são dois dos compósitos estruturais mais comuns (Callister & Rethwisch, 2018).

Os compósitos estruturais laminados são constituídos por lâminas ou painéis bidimensionais, onde cada uma das camadas possui uma direção pré-definida de alta resistência. Existem quatro classes de compósitos laminares ou laminados: unidirecional, *cross-ply* (camadas cruzadas), *angle-ply* (camadas angulares), multidirecional, conforme ilustrado na Figura 15 (Callister & Rethwisch, 2018).

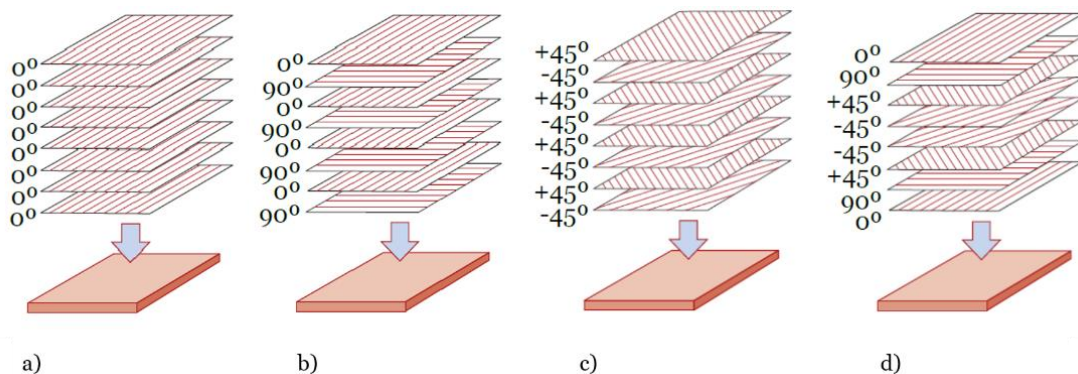


Figura 15 - Quatro classes de compósitos laminares ou laminados (Callister & Rethwisch, 2018)

Nos laminados unidirecionais, a orientação da direção de alta resistência para todas as lâminas é a mesma; nos laminados *cross-ply*, as orientações variam entre os  $0^\circ$  e os  $90^\circ$ ; nos laminados *angle-ply*, as camadas sucessivas alternam entre as orientações de alta resistência  $+\theta$  e  $-\theta$ , como por exemplo  $\pm 45^\circ$ ; e os laminados multidirecionais exibem variadas orientações de alta resistência (Callister & Rethwisch, 2018).

Os painéis sanduíche, a outra subclasse de compósitos estruturais, são concebidos para serem painéis leves, mas com rigidez e resistência elevadas. Um painel sanduíche constituídos por duas folhas externas separadas, também designadas por faces, ligadas fortemente a um núcleo espesso. As folhas externas são constituídas por materiais rígidos e fortes, como por exemplo, ligas de alumínio, ligas de aço, ligas de aço inoxidável, polímeros reforçados com fibra ou contraplacados de madeira. O material do núcleo é leve e apresenta um baixo módulo de elasticidade. Relativamente às suas funções, este fornece suporte contínuo para as faces se manterem unidas e suporta tensões de corte. Por fim, é importante mencionar que as tensões de tração e compressão do núcleo são inferiores às apresentadas pelas faces. Na Figura 16, apresenta-se uma representação esquemática de um painel sanduíche com uma estrutura em favo de mel (núcleo) (Callister & Rethwisch, 2018).

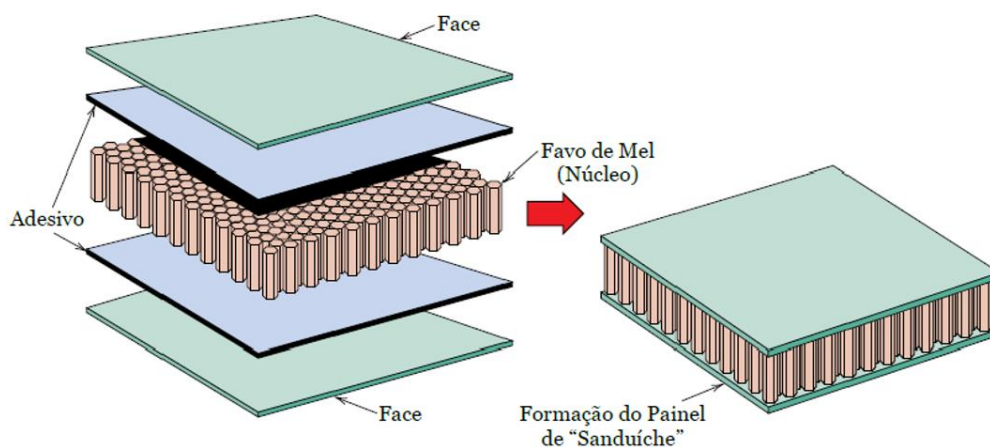


Figura 16 - Representação esquemática de um painel sanduíche (Callister & Rethwisch, 2018)

### 4.3. Matriz

Segundo Callister & Rethwisch (2018), a fase contínua de um material compósito, designada por matriz, desempenha 3 funções essenciais:

- Unir e transmitir uma carga aplicada externamente ao material de reforço;
- Proteger o material de reforço contra danos superficiais resultantes de abrasão mecânica ou reações químicas com o ambiente;
- Prevenir a propagação de fissuras de fibra para fibra, evitando assim falhas catastróficas.

Assim sendo, a matriz é um material monolítico no qual o reforço, geralmente embutido, deve ser uniformemente distribuído por toda a sua extensão (Sharma et al., 2020).

Hull & Clyne (2019) classificaram as matrizes como matrizes poliméricas (termoendurecíveis e termoplásticas), matrizes metálicas e matrizes cerâmicas. Na Tabela 5 apresentam-se as diferentes classes de matrizes, incluindo exemplos representativos de cada uma delas.

Tabela 5 - Classes e exemplos de matrizes de materiais compósitos (Adaptado de Hull & Clyne, 2019).

		Exemplos
Matrizes	1. Matrizes poliméricas	Termoendurecíveis a) Epóxi b) Poliéster Insaturado c) Vinil Éster
		Termoplásticas a) Poliéster Éter Cetona (PEEK) b) Policarbonato c) Poliuretano
	2. Matrizes Metálicas	a) Alumínio b) Magnésio c) Titânio
	3. Matrizes Cerâmicas	a) Borossilicato

#### 4.3.1. Matrizes Poliméricas

Os polímeros são materiais estruturalmente mais complexos que os metais e as cerâmicas. Relativamente ao custo e processamento, são materiais mais baratos e facilmente processados. Por outro lado, os polímeros têm menor resistência e módulo de elasticidade e limites de utilização a temperaturas mais baixas (Chawla, 2019).

Os polímeros são suscetíveis à degradação por exposição prolongada à luz ultravioleta e solventes específicos. Apesar de serem considerados maus condutores de calor e de

eletricidade devido à predominância de ligações covalentes, os polímeros são geralmente mais resistentes a produtos químicos do que os metais. Estruturalmente, são macromoléculas em forma de cadeia, formadas por átomos de carbono ligados covalentemente. A formação dessas moléculas maiores a partir de monómeros ocorre por meio da polimerização, que pode ocorrer por condensação, envolvendo a reação gradual de subprodutos como água, ou por adição, onde os monômeros se unem sem gerar subprodutos, frequentemente na presença de catalisadores (Chawla, 2019).

Enquanto os polímeros termoendurecíveis são produzidos por reações de condensação, os polímeros termoplásticos são produzidos por reações de adição. Os polímeros termoendurecíveis sofrem uma reação de cura que envolve a ligação cruzada das cadeias poliméricas, e endurecem durante essa reação. Neste caso, a reação é iniciada por agentes químicos adequados ou pela aplicação de calor e pressão. Já os termoplásticos são polímeros que sob a aplicação de calor e pressão amolecem ou tornam-se plásticos. Após arrefecimento até à temperatura ambiente, ocorre o endurecimento dos termoplásticos (Chawla, 2019).

Relativamente às propriedades de ambos os tipos de polímeros, existem algumas diferenças notórias. Os polímeros termoendurecíveis são considerados mais frágeis quando comparados com os termoplásticos. Apesar disso, os polímeros termoendurecíveis, matrizes epóxis, poliésteres insaturados e vinil ésteres, têm um custo inferior, e por esse motivo, são os mais utilizados entre os dois (Hull & Clyne, 2019). Hull & Clyne (2019) compararam as propriedades de alguns polímeros termoendurecíveis e termoplásticos, e essa comparação pode ser observada na Tabela 6.

Tabela 6 - Propriedades das matrizes poliméricas, termoendurecíveis e termoplástico (Adaptado de Hull & Clyne, 2019).

		Propriedades das Matrizes Poliméricas					
		Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	Módulo de Young [GPa]	Módulo de Rigidez [GPa]	Coefficiente de Poisson	Resistência à Tração [GPa]	Coefficiente de Expansão Térmica [10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> ]
Termoendurecíveis	Epóxi	1,25	3,50	1,27	0,38	0,04	58
	Poliéster	1,38	3	1,10	0,37	0,04	150
Termoplásticos	PEEK	1,30	4	1,40	0,37	0,07	45
	Polycarbonato	1,15	2,40	0,90	0,33	0,06	70
	Poliuretano	1,20	0,01	0,003	0,46	0,02	200

As matrizes poliméricas mais utilizadas, por serem menos dispendiosas, são os poliésteres e vinil ésteres, sendo amplamente utilizadas como matrizes de compósitos reforçados com fibras de vidro (Callister & Rethwisch, 2018).

O poliéster insaturado possui uma boa resistência à água, a diversos produtos químicos, e ao “envelhecimento”, além de ser economicamente acessível. Pode suportar temperaturas de até cerca de 80 °C. Contudo, apresentam desvantagens, sendo uma das mais relevantes, a elevada contração durante o processo de cura, podendo atingir os 8% (Chawla, 2019).

Em relação às matrizes epóxi, que apesar de serem consideravelmente mais caras, estas são utilizadas em aplicações comerciais e aeroespaciais, apresentando melhores propriedades mecânicas e resistência à humidade. Comparativamente aos poliésteres insaturados, as matrizes epóxi demonstram uma reduzida percentagem de contração na

reação de cura e são consideradas matrizes curadas e de fácil armazenamento (Callister & Rethwisch, 2018).

Os compósitos de matriz de epóxi, inicialmente formulados para temperaturas de serviço<sup>2</sup> até 180 °C, foram, mais tarde, reconhecidos pela sua suscetibilidade a efeitos higrotérmicos<sup>3</sup>, limitando sua temperatura de serviço a 120 °C. Assim sendo, o baixo desempenho em ambientes com temperaturas elevadas e elevadas percentagens de humidade é uma importante limitação das matrizes epóxi (Chawla, 2019).

### 4.3.2. Matrizes Metálicas

Os metais são materiais bastantes versáteis, sendo considerandos como materiais resistentes. Têm a capacidade de serem deformados plasticamente e podem ser fortalecidos com uma grande variedade de métodos (Chawla, 2019). Os metais utilizados nos compósitos são geralmente dúcteis e isotrópicos (Hull & Clyne, 2019).

O desenvolvimento de compósitos de matriz metálica tem-se concentrado em três metais: alumínio, magnésio e titânio. As propriedades típicas destas matrizes metálicas foram comparadas por Hull e Clyne, (2019), e são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Propriedades das Matrizes Metálicas (Adaptado de Hull & Clyne, 2019).

Propriedades das Matrizes Metálicas						
	Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	Módulo de Young [GPa]	Módulo de Rigidez [GPa]	Coefficiente de Poisson	Resistência à Tração [GPa]	Coefficiente de Expansão Térmica [10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> ]
Alumínio	2,71	70	26	0,33	0,10-0,30	24
Magnésio	1,74	45	7,50	0,33	0,10-0,20	26
Titânio	4,51	115	44	0,33	0,40-1,00	10

<sup>2</sup> Faixa de temperatura em que um material mantém as suas propriedades sem sofrer degradação (Advanced Architectural Products, 2023).

<sup>3</sup> Efeito combinado de temperatura e humidade (Chawla, 2019).

Os materiais compósitos de matriz metálica podem ser utilizados a temperaturas de serviço mais elevadas do que os seus homólogos de metal de base. Além disso, o reforço, neste caso, tem a capacidade de melhorar a rigidez, a resistência à abrasão, a resistência à fluência, a condutividade térmica e a estabilidade dimensional. Algumas das vantagens destes materiais em relação aos compósitos de matriz polimérica incluem temperaturas de funcionamento mais elevadas, não inflamabilidade e maior resistência à degradação por fluidos orgânicos. Os compósitos de matriz metálica têm um custo significativamente superior, quando comparados aos compósitos de matriz polimérica e, por conseguinte, a sua utilização ainda é bastante restrita (Callister & Rethwisch, 2018).

Apesar disso, os compósitos de matriz metálica são cada vez mais utilizados na indústria automóvel e aeronáutico/aeroespacial, proporcionando vantagens como a baixa densidade, a resistência ao desgaste e excelentes propriedades térmicas em componentes como motores e antenas espaciais (Callister & Rethwisch, 2018).

#### **4.3.3. Matrizes Cerâmicas**

Os materiais cerâmicos são muito duros e quebradiços, sendo geralmente constituídos por um ou mais metais combinados com um não metal, como o oxigénio, o carbono ou o azoto (Chawla, 2019). Relativamente às suas características, como pontos negativos, as cerâmicas apresentam baixas resistência à tração e baixa tenacidade, e como pontos positivos, têm módulos elásticos elevados, baixas densidades, e suportam temperaturas muito elevadas (Callister & Rethwisch, 2018; Chawla, 2019).

O último ponto tem muita importância e é a verdadeira “força-motriz” para os esforços que têm sido feitos no desenvolvimento de cerâmicas mais resistentes, uma vez que, apesar de serem inerentemente resistentes à oxidação e deterioração quando expostos a temperaturas elevadas, a predisposição para a fratura limita o potencial de compósitos com matrizes cerâmicas como candidatos ideais para aplicações na indústria automóvel e aeronáutica, onde são atingidas elevadas temperatura e sujeitos a tensões severas (Callister & Rethwisch, 2018; Chawla, 2019).

Assim sendo, a maior desvantagem dos materiais cerâmicos são a extrema fragilidade, apresentando uma resistência à tração entre 1 a 5 MPa $\sqrt{m}$ . Nesse sentido, surgiu uma abordagem, na qual a matriz cerâmica é reforçada com fibras ou partículas de outra cerâmica, tendo uma resistência à fratura melhorada para valores entre cerca de 6 e 20 MPa $\sqrt{m}$  (Callister & Rethwisch, 2018).

## 4.4. Fibras

Os reforços têm um papel essencial na definição dos materiais compósitos, e estes podem apresentar-se sob a forma de partículas, de fibras descontínuas, também designadas de *whiskers*, fibras contínuas ou de tecido. No entanto, a fibra é a forma mais frequente, uma vez que permitem a obtenção de materiais compósitos mais rígidos e resistentes que as demais opções (Chawla, 2019).

Chawla (2019) categorizou as fibras em 7 tipos distintos, apresentados na Tabela 8: fibras de vidro, fibras de basalto, fibras de boro, fibras de carbono, fibras cerâmicas, fibras orgânicas, e *whiskers*.

Tabela 8 - Categorização de fibras dos materiais compósitos (Chawla, 2019).

<b>Fibras</b>	1. Fibras de Vidro	
	2. Fibras de Basalto	
	3. Fibras de Boro	
	4. Fibras de Carbono	
	5. Fibras Cerâmicas	<ul style="list-style-type: none"><li>· Fibras de óxido</li><li>· Fibras sem óxido</li></ul>
	6. Fibras Orgânicas	<ul style="list-style-type: none"><li>· Fibras de Polietileno (PE)</li><li>· Fibras de Aramida</li></ul>
	7. <i>Whiskers</i>	<ul style="list-style-type: none"><li>· Fibras sem óxido</li><li>· Fibras de Carboneto de Silício</li></ul>

Os materiais compósitos reforçados com fibras sintéticas, como fibras de aramida, carbono e vidro são amplamente aplicados em diversos setores, incluindo o automóvel, de construção civil e aeronáutico. Entre os tipos de fibras mencionados, as fibras de vidro são as que têm maior destaque, devido às suas propriedades mecânicas únicas e ao baixo custo de produção (Elfaleh *et al.*, 2023).

Apesar disso, verifica-se, atualmente, um crescente interesse e preferência por fibras naturais na elaboração de materiais compósitos, em substituição às fibras sintéticas, cuja toxicidade para a saúde humana tem sido comprovada (Siva *et al.*, 2021).

#### **4.4.1. Fibras Naturais**

As fibras naturais apresentam diversas vantagens significativas, quando comparadas a fibras sintéticas nomeadamente (Kumar *et al.*, 2021; Siva *et al.*, 2020, 2021):

- Disponibilidade abundante;
- Densidade substancialmente inferior;
- Custo inferior;
- Excelente isolamento térmico;
- Melhor durabilidade;
- Processo de fabricação mais seguro;
- Natureza biodegradável;
- Boa resistência elétrica;
- Maior facilidade em moldagem por compressão.

As fibras naturais têm algumas desvantagens, relacionadas com a absorção de água e instabilidade térmica, no entanto, estas podem ser resolvidas através de tratamento químicos (Kumar *et al.*, 2021).

O desenvolvimento de materiais compósitos com fibras naturais tem aumentado particularmente em áreas como a construção civil, equipamentos desportivos, automóveis, aeronaves, navios, eletrodomésticos e têxteis (Siva *et al.*, 2020).

Na indústria dos compósitos, existe uma variedade de fibras naturais, que podem ser utilizadas como reforço: fibras longas (linho, juta, rami, cânhamo e *kenaf*); sementes (algodão, côco e *kapok*); folhas (ananás, banana e *sisal*); ervas e canas (milho, arroz e trigo), grãos (cânhamo, juta e *kenaf*); e raízes e madeira (Elfaleh *et al.*, 2023).

De acordo com a sua origem, as fibras naturais podem ser classificadas em: fibras naturais de origem animal, fibras naturais de origem mineral, fibras naturais de celulose, conforme se apresenta na Figura 17.

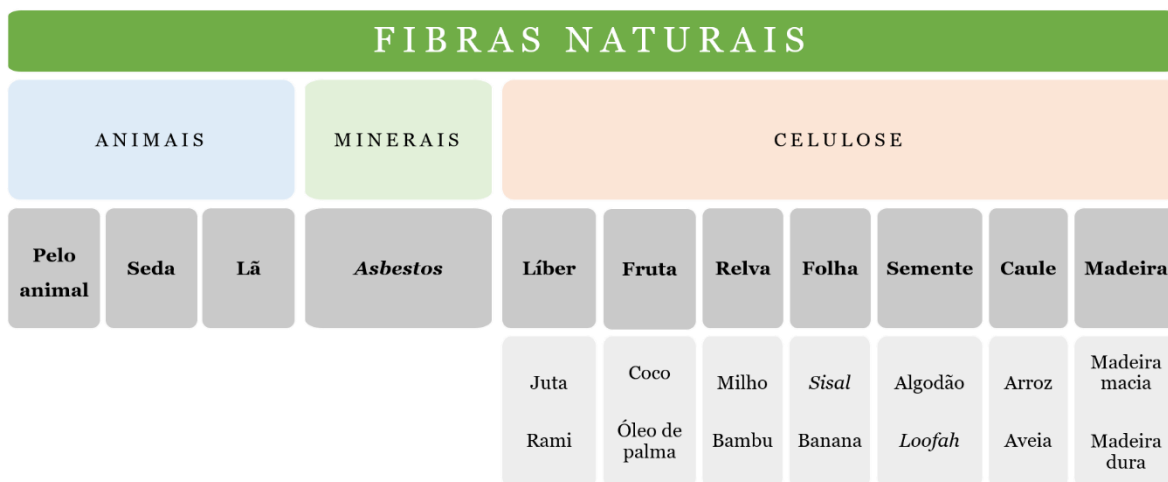


Figura 17 - Classificação de fibras naturais (Adaptado de Elfaleh *et al.*, 2023)

Numa revisão realizada por Elfaleh *et al.*, (2023), foram comparadas as fibras naturais com maior produção e comercialização mundial. Em destaque, encontram-se as fibras naturais derivadas de madeira, com uma produção mundial de 1.750.000 mil milhões de toneladas, e fibras naturais de casca de arroz, com produção mundial de 160.000 mil milhões de toneladas.

O processo de extração das fibras naturais da sua fonte de origem é uma etapa fundamental na produção de compósitos reforçado por fibras. Existem diferentes metodologias para o efetuar (Elfaleh *et al.*, 2023; Fazita *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2016):

- Método de decorticação: método comum na extração de fibras naturais de plantas com caules fibrosos, como linho, cânhamo e juta. Envolve a remoção da parte externa do caule, chamada casca, para revelar as fibras internas. A decorticação pode ser feita de forma mecânica ou química, dependendo da planta e das condições de processamento.
- Método *retting*: tratamento microbiológico que separa as fibras vegetais dos caules, através da exposição a microrganismos, como bactérias e fungos. Este método pode ser realizado ao ar livre, em água ou com agentes químicos específicos.
- Método *blow molding*: método usado, por exemplo, na extração de fibras de bambu. Envolve o uso de uma extrusora de rosca que aquece e amolece as fibras de bambu, que são então “sopradas” para formar fibras contínuas. Através deste método, obtém-se fibras de bambu de alta qualidade e com boa resistência mecânica.
- Método *enzimático*: a extração de fibras naturais também pode ser obtida através do uso de enzimas específicas que quebram os componentes não fibrosos das

plantas. Este método é eficaz para fibras de sisal e *kenaf*, e proporciona a obtenção de fibras de alta qualidade e com baixo teor de impurezas.

Na Tabela 9 apresentam-se alguns detalhes sobre a origem, propriedades e aplicações de alguns tipos de fibras naturais.

Tabela 9 - Origem, propriedades e aplicações de fibras naturais (Elfaleh *et al.*, 2023; Radoor *et al.*, 2020; Tuğluca *et al.*, 2023; Zor *et al.*, 2016).

<b>Fibra Natural</b>	<b>Origem</b>	<b>Propriedades</b>	<b>Aplicações</b>
<b>Fibra de Algodão</b>	<i>Gossypium arboretum</i> Cultivada principalmente na América, África e Europa (Espanha)	Fibras designadas <i>linters</i> Comprimento de 2-5 mm Diâmetro de 18µm Excelentes propriedades mecânicas e físicas	Indústria têxteis
<b>Fibra de Rami</b>	Arbusto <i>Boehmeria nivea</i> do Leste Asiático	Fibras longas (40-450 mm) Diâmetro médio de 45 µm Mais longas e rígidas que as fibras de linho	Estudos em compósitos com matriz polimérica (PP e PLA)
<b>Fibra de Sisal</b>	Planta Agave sisalana Nativa da América do Norte e do Sul	Cada planta de sisal tem 200 a 250 folhas, contendo 1.000 e 1.200 feixes Comprimento médio de 3 mm	Construção civil Indústria automóvel, naval e agrícola Fabricação de móveis Reforço de compósitos
<b>Fibra Kenaf</b>	Planta <i>Hibiscus cannabinus</i> Originária de África	Crescimento rápido Baixa densidade Boas propriedades mecânicas	Indústria de papel, têxtil e automóvel.
<b>Fibra de Linho</b>	Planta <i>Linum Usitatissuim</i> Cultivada principalmente no Mediterrâneo (Europa e Egito) e Índia	Fibra longa (média de 33 mm) Baixa densidade Alta tenacidade e resistência	Indústria automóvel e têxtil Reforço de compósitos
<b>Fibra de Cânhamo</b>	Planta <i>Cannabis sativa L</i> Encontrada em regiões moderadas e tropicais	Fibras longas Crescimento rápido Boas propriedades mecânicas Boa resistência à água	Indústria têxtil, de papel, automóvel e naval
<b>Fibra de Juta</b>	Planta <i>Corchorus Capsularis</i> Produzido principalmente Índia, China, Bangladesh	Resistentes a ambientes húmidos Resistentes a altas temperaturas	Embalagens, cordas, fios, decorações, móveis, e Indústria automóvel. Reforço de compósitos

<b>Fibra de banana/ abacá</b>	Bananeira Cultivada no Sudoeste Asiático e regiões tropicais e subtropicais	Boa resistência Boa flexibilidade Boa resistência à água	Cordas e Indústria automóvel e papel Reforço de compósitos
<b>Fibra de Madeira</b>	Árvores caducas (no caso das fibras de madeira dura) Árvores coníferas (no caso das fibras de madeira macia)	Crescimento rápido (madeiras macias) Estrutura cristalina forte Boas propriedades mecânicas e físicas	Indústria automóvel Construção civil Mobiliário Embalagens

Relativamente à sua microestrutura, as fibras naturais são compostas por duas paredes distintas: a parede primária e a parede secundária, que se divide ainda em parede externa S1 (100-200 nm), parede central S2 (0,5-8 nm) e parede interna S3 (70-100 nm), conforme mostrado na Figura 18.

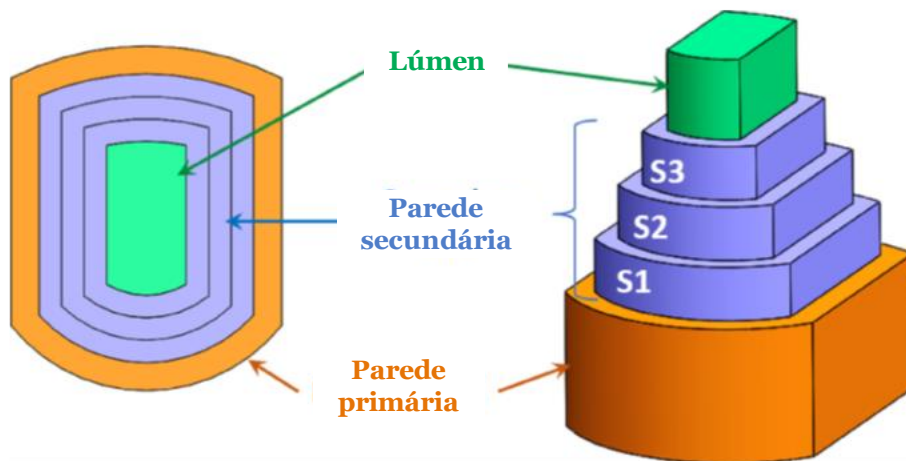


Figura 18 – Microestrutura das fibras naturais: Talo de linho, adaptado de (Elfaleh *et al.*, 2023).

A parede primária, caracterizada pela presença de hemicelulose, pectinas, proteínas e microfibrilas de celulose desordenadas, confere à fibra alguma flexibilidade, permite o seu crescimento e atua como suporte estrutural da mesma. Em contrapartida, a parede secundária exibe uma rigidez significativamente maior, desempenhando um papel crucial nas elevadas propriedades mecânicas da fibra. Semelhante à composição da parede primária, a parede secundária é composta pelos mesmos constituintes, mas diferencia-se pela maior proporção de celulose e pela presença de lignina (Elfaleh *et al.*, 2023). É importante salientar que a composição das fibras naturais é influenciada por fatores como a sua origem botânica, as condições climáticas, a fase de maturidade e o método de extração (Bismarck *et al.*, 2005; Elfaleh *et al.*, 2023).

No contexto desta dissertação, é de maior relevância direcionar o foco para as características químicas das fibras de madeira, as quais são detalhadas na Tabela 10, abrangendo as fibras provenientes de madeira dura e madeira macia.

Tabela 10 – Características químicas das fibras de madeira (Chauhan *et al.*, 2022; Elfaleh *et al.*, 2023).

<b>Fibra</b>	<b>Celulose [% do peso]</b>	<b>Hemicelulose [% do peso]</b>	<b>Lignina [% do peso]</b>
<b>Madeira Dura</b>	31-64	25-40	14-34
<b>Madeira Macia</b>	30-60	20-30	21-37

No que diz respeito às propriedades das fibras naturais, estas são variáveis, mesmo entre os mesmos tipos de fibras, devido à influência de uma ampla diversidade de fatores. Estes fatores incluem a composição química, condições de crescimento, tais como o tipo de solo, o clima e as condições de envelhecimento, o método de extração, o tratamento da superfície, a estrutura celular, o período e a técnica de colheita, a idade da planta, a fonte e o armazenamento. Além disso, a natureza hidrofílica e o teor de umidade das fibras são outros aspectos que tendem a influenciar em particular as propriedades mecânicas (Chauhan *et al.*, 2022).

A Tabela 11 mostra as principais propriedades, tanto mecânicas como físicas, observadas em fibras provenientes de madeira, dura e macia.

Tabela 11 – Propriedades mecânicas e físicas das fibras de madeira (Chauhan *et al.*, 2022; Elfaleh *et al.*, 2023).

<b>Fibras</b>	<b>Propriedades Mecânicas</b> (Elfaleh <i>et al.</i> , 2023)				<b>Propriedade Físicas</b> (Chauhan <i>et al.</i> , 2022)	
	Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	Resistência à tração [MPa]	Módulo de <i>Young</i> [GPa]	Alongamento na rutura [%]	Comprimento da fibra [mm]	Diâmetro da fibra [μm]
Madeira dura	0,3 - 1,2	_____	5.2 - 37.9	_____	1-2	10-50
Madeira macia	0,3 - 1.5	600 - 1000	3.6 - 40	4.4	2-6	20-40

## 4.5. Processos de Fabrico de Compósitos de Polímeros Reforçados por Fibras

Os processos de fabrico desempenham um papel crucial nas propriedades finais dos compósitos de polímeros reforçados com fibras e, como tal, devem ser criteriosamente selecionados visando o seu desempenho otimizado. Geralmente, as técnicas de fabricação são determinadas com base em parâmetros como temperatura, pressão e parâmetros da fibra, incluindo *aspect ratio* e fração volumétrica. A otimização do *aspect ratio* e da fração volumétrica das fibras são elementos-chave na fabricação deste tipo de compósitos (Ismail *et al.*, 2022).

No mercado de materiais compósitos, os processos de *lay-up* apresentam uma posição de liderança, seguidos pelos métodos de moldagem por injeção, moldagem por compressão, moldagem por transferência de resina, enrolamento filamental, e pultrusão (Figura 19) (Lunetto *et al.*, 2023).

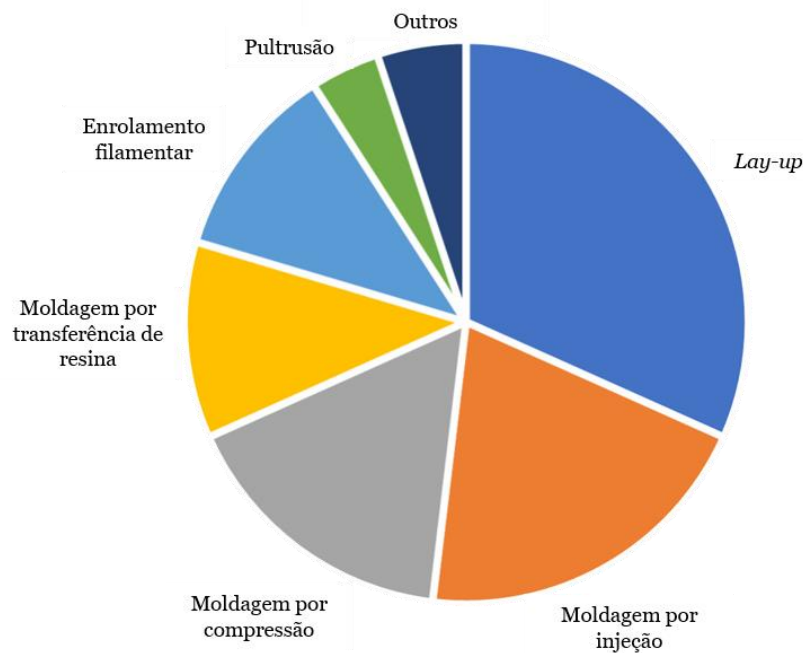


Figura 19 – Distribuição por processos de fabricação no mercado global de materiais compósitos (Lunetto *et al.*, 2023).

No contexto particular dos compósitos reforçados com fibras naturais, a seleção da técnica de fabricação é ainda mais limitada devido à exigência de baixas temperaturas de processamento (Ismail *et al.*, 2022).

#### **4.5.1. Moldagem Manual**

A moldagem manual, conhecido como *hand lay-up*, é um dos processos de fabrico de materiais compósitos mais comum, caracterizando-se pela sua simplicidade operacional, custo reduzido e requisitos de *skills* relativamente baixos (Ismail *et al.*, 2022). Este processo é classificado com um método de moldagem de contacto aberto (Sumithra *et al.*, 2023).

Esta técnica envolve a disposição manual dos reforços de fibras no molde, seguida pela aplicação da matriz. Antes da colocação das fibras, é uniformemente distribuída uma camada de matriz na superfície do molde. A matriz utilizada neste processo é geralmente uma resina líquida termoendurecível, como poliéster ou epóxi. Esta matriz é aplicada sobre os reforços de fibra, sendo espalhada camada por camada, utilizando um rolo, até atingir a espessura desejada. É importante notar que a fração de peso do reforço no laminado final geralmente excede os 30–50% (Lunetto *et al.*, 2023; Ngo, 2020).

É pertinente realçar que este procedimento está associado a algumas limitações visuais, manifestadas pela aparência dos compósitos resultantes e presença de espaços vazios. A mitigação destes defeitos pode ser realizada mediante a implementação de técnicas refinadas. Frequentemente, a moldagem manual é adotada em conjunto com processos de moldagem por compressão, aplicação de vácuo e seguido de moldagem em autoclave, para otimizar a qualidade e as propriedades dos compósitos produzidos (Ismail *et al.*, 2022).

#### **4.5.2. *Spray Lay-up***

O *spray lay-up* é outro método de moldagem de contacto aberto e apresenta semelhanças com a técnica de moldagem manual, contudo, diferencia-se pelo facto de uma mistura de fibras e resina ser pulverizada diretamente sobre a superfície do molde (Lunetto *et al.*, 2023; Sumithra *et al.*, 2023).

Os materiais aplicados nesta técnica são análogos aos utilizados na moldagem manual, sendo também comum o uso de um rolo para consolidar a mistura. A proporção de reforço em peso no laminado final pode variar entre 15 e 40%, enquanto o comprimento típico das fibras situa-se entre 10 mm e 40 mm. Em termos de eficiência produtiva, e comparado à moldagem manual, o processo de pulverização demonstra possuir uma taxa de produção superior (Lunetto *et al.*, 2023).

### **4.5.3. Moldagem por Injeção**

Ao contrário dos processos de fabrico descritos anteriormente, a moldagem por injeção é um procedimento fechado. Este método, caracterizado por ser rápido, volumoso e de baixa pressão, é frequentemente aplicado na produção de materiais termoplásticos reforçados como fibras de vidro picadas em matriz de *Nylon*, por exemplo (Sumithra *et al.*, 2023).

A moldagem por injeção surgiu há cerca de 150 anos, sendo que na década de 1960 foram introduzidas as máquinas de moldagem por injeção, que ainda são utilizadas atualmente. Geralmente, a taxa de injeção é de 1:1, e um molde multicavidade tem a capacidade de fabricar uma grande quantidade de componentes num curto período de tempo (Sumithra *et al.*, 2023).

### **4.5.4. Moldagem por Compressão**

A moldagem por compressão é uma técnica tradicional aplicada para fabricar compósitos tanto termoendurecíveis como termoplásticos. Durante este processo, são aplicadas pressão e temperatura de forma a consolidar completamente os compósitos, promovendo o processo de endurecimento completo. Dependendo do compósito pretendido, tanto a temperatura como a pressão são variadas e controladas (Ismail *et al.*, 2022).

Esta técnica é principalmente aplicada na produção de compósitos de grandes dimensões, geometrias complexas, sendo o controlo da espessura uma questão desafiadora. Em comparação com outros processos de fabrico, a moldagem por compressão é considerada o processo mais económico para peças compósitas de alta qualidade (Ismail *et al.*, 2022; Ngo, 2020).

### **4.5.5. Moldagem por Transferência de Resina**

A moldagem por transferência de resina é uma técnica de fabricação com popularidade crescente devido à sua capacidade de produção de compósitos com um bom acabamento superficial e baixo teor de espaços vazios. Trata-se de uma técnica de molde fechado que dificilmente liberta substâncias voláteis na atmosfera durante o processo de fabricação. A resina é injetada diretamente no molde fechado, composto por duas metades, sem exposição direta ao ar. Os reforços são previamente posicionados no molde fechado e as resinas são transportadas para impregnar as fibras através de um método de pressão ou vácuo (Ismail *et al.*, 2022).

Esta técnica é aplicada na fabricação de peças de alta qualidade para aplicações de alto desempenho, como nos setores aeronáutico/aeroespacial e automóvel. A alta qualidade superficial é alcançada com temperaturas de molde e pressões relativamente baixas, que consequentemente reduz o custo em ferramentas (Ismail *et al.*, 2022).

#### **4.5.6. Enrolamento Filamentar**

O enrolamento filamentar é característico de componentes ocos de secção circular ou oval, como tubos e tanques. Os filamentos de fibras são submetidos a um banho de matriz antes de serem enrolados num mandril com várias orientações, controladas pelo mecanismo de alimentação das fibras e pela velocidade de rotação do mandril. As propriedades mecânicas dos compósitos resultantes são determinadas por fatores como o ângulo de enrolamento e a pressão de arrasto. Um avanço recente nesta técnica é o uso de robôs (produção inteligente) (Ismail *et al.*, 2022).

#### **4.5.7. Pultrusão**

A pultrusão é um processo avançado de fabricação utilizado na produção de compósitos de fibras unidirecionais. Inicialmente, as fibras são retiradas de *rovings*<sup>4</sup> e impregnadas em matriz por meio de uma prensa aquecida, que permite controlar tanto a impregnação das fibras quanto o teor de matriz. À medida que os compósitos passam pela prensa, estes são curadas e, de seguida, são cortados no comprimento desejado. As matrizes usadas neste processo são geralmente termoendurecíveis, como por exemplo, poliéster, éster vinílico e resinas fenólicas (Ismail *et al.*, 2022).

A pultrusão destaca-se pela sua eficiência, resultando em peças com boa molhabilidade, alta qualidade superficial e propriedades mecânicas superiores devido à alta fração volumétrica de fibra alcançada. No entanto, o elevado custo das prensas aquecidas é uma limitação à utilização desta técnica (Ismail *et al.*, 2022).

#### **4.5.8. Moldagem em Autoclave**

No processo de moldagem em autoclave, o compósito e o molde são colocados dentro de um autoclave, em vácuo, e sujeitos a uma pressão externa entre 3,5 e 7 bar (Lunetto *et al.*, 2023). Para acelerar o processo de cura e aumentar a produtividade, a autoclave é frequentemente aquecida (Nele *et al.*, 2016). Assim sendo, esta técnica permite o processamento de matrizes a elevada temperatura, tais como as matrizes epóxis. O

---

<sup>4</sup> Um conjunto de cordões ou cabos recolhidos num feixe paralelo sem torção (Addcomposites, 2022).

compósito produzido é mais denso e, ao contrário do que é obtido por moldagem manual, isento de vazios e defeitos (Lunetto *et al.*, 2023).

Por este motivo, a moldagem em autoclave é a técnica preferencial para compósitos aeronáuticos, sendo utilizada em mais de 98% dos compósitos fabricados neste setor (Li *et al.*, 2018).

Devido aos longos ciclos de cura, a taxa de produção é baixa e o tamanho da peça é limitado às dimensões da autoclave (Lunetto *et al.*, 2023).

#### 4.6. Aplicações dos Materiais Compósitos

Num estudo realizado por Bernatas *et al.* (2021), verificou-se que a utilização de compósitos têm vindo a ganhar destaque, em particular os compósitos de polímeros reforçados por fibras.

O mercado global de compósitos atingiu 17,7 mil toneladas, sendo que 21% do seu consumo mundial ocorre na Europa. As principais aplicações industriais que utilizam materiais compósitos, em termos de volume (Figura 20), são de transporte, construção civil, equipamentos elétricos e eletrônicos, e tubagens e tanques (Bernatas *et al.*, 2021).

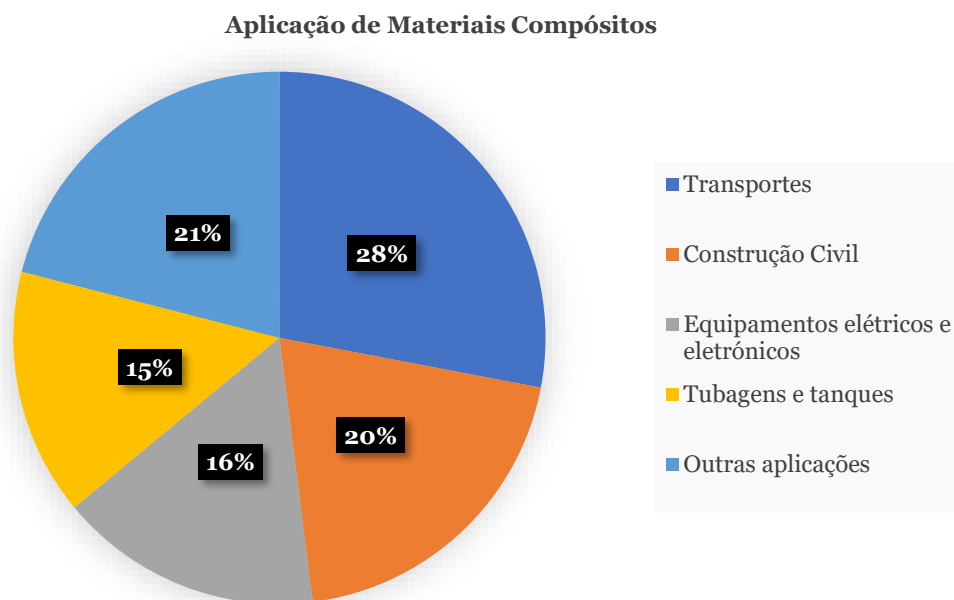


Figura 20 - Aplicações dos Materiais Compósitos em termos de volume (Bernatas *et al.*, 2021)

## 4.7. Materiais Compósitos com Reforço de Madeira

Embora existam diversas opções de fibras naturais utilizadas na fabricação de materiais compósitos, este trabalho concentra-se especificamente em compósitos reforçados com madeira.

Recentemente, os compósitos com fibras de madeira têm-se destacado como uma área de investigação bastante dinâmica, atraindo a atenção dos investigadores na procura por materiais sustentáveis. De seguida, serão abordadas as propriedades destes compósitos, discutindo os fatores que as influenciam, e também analisando as diversas aplicações para estes materiais inovadores.

### 4.7.1. Propriedades de compósitos com reforço de madeira

As propriedades de compósitos com fibras naturais têm sido alvo de diversos estudos, ao longo dos últimos anos, e os materiais compósitos reforçados com madeira não são exceção. Estas propriedades podem ser significativamente influenciadas por diversos fatores, incluindo:

- Tamanho, percentagem de peso, orientação e tipos de fibras de madeira;
- Tipos de polímeros usados na matriz do compósito;
- Combinação das fibras de madeira com outras fibras, sintéticas ou naturais, formando compósitos híbridos.

Mendes *et al.* (2021) estudaram a utilização de partículas de madeira de *Pinus elliottii* como reforço de materiais compósitos com matriz polimérica de resina epóxi. Os autores adicionaram resíduos de madeira, com diferentes tamanhos (0,30, 0,60 e 1,19 mm) na matriz de resina epóxi para analisar a influência do tamanho do reforço de madeira nas propriedades mecânicas e microestruturais dos compósitos resultantes. Relativamente aos resultados, verificaram que o tamanho foi determinante em mudanças nas propriedades dos materiais compósitos.

Apesar da interação matriz-reforço não estar otimizada, foi possível observar que os compósitos com partículas de madeira de 1,19 mm apresentaram maior resistência à tração, enquanto os compósitos com partículas de madeira de 0,30 mm apresentaram maior ductilidade. Os autores concluíram que a partículas de madeira de *Pinus elliottii* pode ser utilizada como um reforço eficaz em matrizes poliméricas para produzir compósitos de resina epóxi e madeira onde a resistência à tração é o fator mais importante (Mendes *et al.*, 2021).

Chauhah *et al.* (2021) realizaram um estudo onde combinaram fibras sintéticas de vidro com fibras naturais de madeira numa matriz de resina epóxi. O foco do estudo foi avaliar o impacto de diferentes parâmetros, tamanho, percentagem de peso, e tipos de partículas de madeira, na resistência à tração dos materiais compósitos, como representado na Tabela 12. Em relação às tipologias de partículas de madeira, é importante mencionar que estas são três espécies de madeira dura (M. Z. R. Khan *et al.*, 2020).

Tabela 12 - Tamanho, Percentagem de peso e tipos de partículas de madeira utilizadas no estudo de (Chauhah *et al.*, 2021)

Parâmetro			
Tamanho da partículas de madeira [ $\mu\text{m}$ ]	300	450	600
Percentagem de peso [%]	10	15	20
Tipo de partículas de madeira	<i>Rubber</i>	<i>Teak</i>	<i>Sal</i>

Os autores desenvolveram um modelo de regressão para prever os valores da resistência à tração, e validaram a sua eficácia através da comparação das previsões com os valores obtidos em experiências. Além de evidenciarem que o modelo desenvolvido era válido, os autores constataram, também, que os três parâmetros impactam a resistência à tração dos materiais compósitos, sendo os níveis ótimos identificados como: tamanho de 550,83  $\mu\text{m}$ , percentagem de peso de 18% e tipo de partículas de madeira *Rubber* (Chauhah *et al.*, 2021).

Um estudo realizado por Dinesh *et al.* (2020) abordou a influência de um segundo reforço de partículas de madeira de madeira, *Rosewood* e *Padauk*, em compósitos de matriz de epóxi com fibras de juta. Foram fabricados quatro laminados usando o processo de moldagem manual, variando as proporções de partículas de madeira de *Rosewood* e *Padauk* em três deles, e um quarto compósito sem adição de partículas de madeira.

Os compósitos desenvolvidos foram analisados quanto às características mecânicas, térmicas, absorção de água e biodegradação. Com base nos resultados dos testes, os autores obtiveram as seguintes conclusões (Dinesh *et al.*, 2020):

- A resistência à tração máxima foi obtida nos compósitos reforçados com madeira de *Padauk* (43 MPa), cerca do dobro daquela que foi obtida nos compósitos com partículas de madeira de *Rosewood* (23,90 MPa);

- A resistência à flexão, resistência à compressão, dureza e energia absorvida durante o impacto foram maiores para os compósitos de juta-epóxi com partículas de madeira de *Padauk* devido a uma melhor aderência com a matriz;
- A estabilidade térmica dos compósitos com partículas de madeira de *Rosewood* foi superior em comparação com os compósitos com partículas de madeira de *Padauk*.
- As características de biodegradação foram superiores para os compósitos de juta-epóxi sem qualquer reforço de partículas de madeira. No entanto, em relação à absorção de água, os compósitos com partículas de madeira mostraram possuir uma melhor resistência.

Ainda com a utilização de uma matriz epóxi, outro estudo conduzido por Jain & Gupta (2018) investigou o impacto da hibridação de dois tipos de reforço de madeira, *SalWood* e *TeakWood*, em materiais compósitos. Os compósitos foram preparados utilizando a técnica de moldagem manual, mantendo uma percentagem constante de 33% em peso do teor total de partículas de madeira, mas com proporções variáveis de *SalWood* e *TeakWood*, e as propriedades dos compósitos fabricados foram analisadas.

Os resultados sugeriram que as propriedades mecânicas, térmicas e de resistência à água foram significativamente aprimoradas com hibridização de dois tipos de madeira. O melhor desempenho mecânico entre todos os compósitos foi obtido no compósito híbrido de epóxi/madeira com proporções iguais de *SalWood* e *TeakWood* (Jain & Gupta, 2018).

Para além da matriz de epóxi, também a matriz de polipropileno (PP) pode ser utilizada em materiais compósitos reforçados com madeira. Num estudo realizado por Nukala *et al.* (2022), foram fabricados, por moldagem por compressão, e caracterizados compósitos de madeira e polímero (*Wood Polymer Composites - WPCs*), utilizando PP reciclado (rPP) e partículas de madeira proveniente de resíduos de madeira. Foram estudadas diversas propriedades mecânicas nomeadamente, a resistência à tração, as propriedades de flexão, a fluência e a dureza, além de características como a morfologia, as propriedades térmicas, a degradação por água e o ângulo de contato (Nukala *et al.*, 2022).

Os autores focaram-se apenas na influência da percentagem de peso das partículas de madeira nas propriedades dos materiais compósitos, fabricando 5 compósitos com percentagens diferentes de matriz e reforço (Tabela 13).

Tabela 13 - Percentagem de peso da matriz de PP e partículas de madeira dos materiais compósitos no estudo de Nukala *et al.* (2022).

Nome do compósito	Matriz de PP [% de peso]	Reforço de madeira [% de peso]
rPP	100	0
rPPSD1	90	10
rPPSD2	80	20
rPPSD3	70	30
rPPSD4	60	40

Os resultados indicaram que as propriedades mecânicas e térmicas apresentaram melhorias com o aumento da percentagem de partículas de madeira. Destacou-se o compósito rPPSD4 que apresentou maior resistência à tração e flexão, maior estabilidade térmica, maior dureza, apesar de apresentar uma absorção de água mais elevada. Os autores comprovaram ainda que as propriedades dos compósitos rPPSD eram similares aos compósitos constituídos de madeira virgem e plástico, sugerindo que têm potencial como um material alternativo sustentável para substituir compósitos não sustentáveis (Nukala *et al.*, 2022).

O PE também tem sido amplamente utilizado na fabricação de compósitos com fibras de madeira, no entanto algumas propriedades mecânicas da madeira por vezes limitam as suas aplicações. Nesse sentido, Guo *et al.* (2019) propuseram uma abordagem para melhorar essas propriedades, introduzindo uma segunda fibra, desta vez sintética, de carbono, através da moldagem por injeção direta. Os compósitos híbridos resultantes foram avaliados quanto às propriedades mecânicas e comportamento de absorção de água.

Os compósitos híbridos, com duas fibras diferentes, apresentaram um aumento de 40% na resistência à tração e um aumento de 253% no módulo de elasticidade. O estudo sugere que a adição de uma pequena quantidade de fibras de carbono pode ser uma abordagem eficaz para melhorar as propriedades mecânicas sem elevados custos operacionais adicionais (Guo *et al.*, 2019).

A orientação das fibras pode também ser um fator impactante nas propriedades de materiais compósitos. Para estudar esta influência e ainda a incorporação de um reforço secundário de madeira em compósitos de matriz de poliéster com fibras naturais de malva indiana, Vignesh *et al.* (2017) fabricaram seis compósitos diferentes (Tabela 14) através de moldagem por compressão.

Tabela 14 - Fibras, número de camadas de fibras e direção das fibras dos materiais compósitos no estudo de Vignesh *et al.* (2017).

<b>Fibras/Camadas/Direção</b>	<b>Compósito</b>
Fibra de malva indiana, camada única	IMFSL
Fibra de malva indiana + Reforço de madeira, camada única	IMFSLF
Fibra de malva indiana, camada dupla, direção longitudinal	IMFDLL
Fibra de malva indiana + Reforço de madeira, camada dupla, direção longitudinal	IMFDLLF
Fibra de malva indiana, camada dupla, direção bidirecional	IMFDLB
Fibra de malva indiana + Reforço de madeira, camada dupla, direção bidirecional	IMFDLBF

No reforço de fibra em camada única, o compósito IMFSLF apresentou propriedades superiores no que diz respeito à resistência à tração, à flexão e ao impacto. Nos reforços de fibra em camada dupla, o compósito que apresentou melhores propriedades foi o IMFDLLF, ainda melhores que o IMFSLF. Além disso, os resultados deste estudo confirmaram que a hibridação de fibra de malva indiana e fibras de madeiras em compósitos de poliéster, permitem a fabricação de produtos como capacetes e tubos de construção civil a um custo mais acessível, mantendo elevada resistência, rigidez e baixa absorção de calor (Vignesh *et al.*, 2017).

A hibridação da madeira com outras fibras naturais foi também investigada por Zhang *et al.* (2018), neste caso com fibras de linho. Neste estudo, as fibras de linho foram incorporadas, em percentagens de peso crescentes, como reforço adicional em materiais compósitos de matriz de PE de alta densidade e reforçados com pó de madeira. Utilizando um rácio específico, os compósitos foram fabricados mediante a mistura dos diferentes componentes num misturador de alta velocidade e subsequente processo de extrusão. De seguida, foi realizada a análise das propriedades dos compósitos obtidos.

Os resultados provaram que o desempenho mecânico dos compósitos pode ser notavelmente melhorado pela adição de uma quantidade limitada de fibras de linho. A resistência e o módulo de flexão aumentaram em 14,6% e 51,4%, respetivamente, para apenas um teor de fibra de linho de 9% do peso, enquanto que a resistência ao impacto aumentou em 26,5%, para um teor de fibra de linho de 12% do peso. Além disso, a resistência à fluência e a tenacidade do compósito foram significativamente melhoradas sem alterar o teor plástico do material compósito. O aprimoramento da maioria das propriedades é atribuído principalmente à elevada resistência das fibras de linho e a excelente compatibilidade tanto com o pó de madeira quanto com a matriz de PE (Zhang *et al.*, 2018).

Outro estudo realizado por Di *et al.* (2023) estudou a capacidade das fibras de linho na melhoria das propriedades de reforço de madeira. Neste estudo, foi investigado um novo método para fortalecer vigas de madeira laminada (*Glulam*) através da fabricação de compósitos poliméricos reforçados com fibras de linho. O *Glulam* apresenta frequentemente danos sob cargas de flexão, devido a defeitos naturais da madeira, resultando em resistências à carga e deformação reduzidas. Nesse sentido, os autores fortaleceram as vigas de madeira com um segundo reforço, fibras de linho, variando o comprimento e número de camadas da ligação do linho nas vigas fortalecidas, para avaliar o seu impacto na resistência à flexão.

Os resultados mostraram uma melhoria significativa com o aumento do comprimento da ligação, mas o impacto do número de camadas foi menor. Mostrou-se ainda que o fortalecimento com fibras de linho aumentou a resistência à flexão e capacidade de absorção de energia dos materiais compósitos. Desta forma, o estudo concluiu que o método proposto é eficaz, economicamente viável e sugere futuras investigações sobre o desempenho a longo prazo em aplicações práticas (Di *et al.*, 2023).

Para aplicações de longa duração sujeitas a carregamentos contínuos, torna-se essencial analisar o comportamento de relaxação de tensões e a fluência dos compósitos termoplásticos reforçados com fibras de madeira.

Wang *et al.* (2015) investigaram o comportamento de fluência de compósitos à base de polietileno de alta densidade (PEAD) reforçados com quatro diferentes tamanhos de fibras de madeira (120–80, 80–40, 40–20 e 20–10 *mesh*). A um nível de carga constante, os compósitos fabricados com fibras de madeira de maior tamanho apresentaram uma melhor resistência à fluência do que os fabricados com fibras de menor tamanho, para a temperatura ambiente e nas várias temperaturas estudadas. As propriedades de fluência dos compósitos com fibras de madeira menores foram mais dependentes da temperatura do que aqueles com fibras de maior tamanho. Também a deformação inicial e a deformação por fluência de todos os compósitos, aumentaram a um nível de carga fixo quando a temperatura foi aumentada (Wang *et al.*, 2015).

Bouafif *et al.* (2013) no seu trabalho investigaram o efeito da temperatura, do teor de madeira, do tipo e tamanho das partículas de madeira, bem como o processo de fabrico no comportamento de fluência de compósitos de polietileno de alta densidade reforçado com partículas de madeira, realizando ensaios de fluência de curta duração. Os autores concluíram que o aumento do teor de partículas de madeira diminuiu a fluência dos

compósitos, devido ao aumento da rigidez dos compósitos. Os compósitos à base de fibras de pinho apresentaram a melhor resistência à fluência entre as fibras estudadas, devido à composição química da superfície da fibra de madeira e a eficiência do mecanismo de adesão entre as fibras de madeira e a matriz do polietileno de alta densidade. Os processos de injeção e compressão resultaram num melhor desempenho de fluência em comparação com a extrusão, devido às variações nas microestruturas dos compósitos. O tamanho das partículas não apresentou impactes significativos nas propriedades de fluência (Bouafif et al., 2013).

Por fim, Georgiopoulos et al. (2015) estudaram o comportamento de deformação por fluência de curta duração em modo de tração e de flexão simples de compósitos fabricados a partir de uma matriz biodegradável, reforçados com três diferentes tipos de fibras de madeira e com diferentes concentrações, a 20 e 30 wt%. Os resultados mostraram que a deformação por fluência é significativamente reduzida com a incorporação de fibras de madeira na matriz em todos os casos considerados, revelando um material com maior estabilidade dimensional. As fibras de *Lignocel* fornecem o melhor reforço à matriz e para uma baixa quantidade (20%), justificado pela natureza diferente da fibra e/ou ao seu maior comprimento, enquanto a 30 wt%, o comportamento de fluência à tração se deteriora devido à agregação de partículas. Por outro lado, as fibras de *Arbocel* de menor comprimento proporcionam maior estabilidade à fluência, tanto no modo de tração como de flexão (Georgiopoulos et al., 2015).

#### **4.7.2. Aplicação de Compósitos com Reforço de Madeira**

Tendo em conta as propriedades inatas únicas de compósitos à base de madeira, especialmente quando incorporados em matriz poliméricas, tais como propriedades de isolamento térmico, dureza, estética, leveza e resistência à corrosão, estes têm sido considerados materiais úteis em vários domínios e setores (Renner et al., 2021).

Segundo Xu et al. (2022), os WPCs têm sido principalmente aplicados na construção civil (Figura 21), em tetos e revestimentos interiores e exteriores (Figura 22), e em mobiliário, produtos de cozinha e de casa de banho (Figura 23).



Figura 21 - As aplicações dos WPCs em construções de edifícios (Xu *et al.*, 2022).



Figura 22 - As aplicações dos WPCs em tetos e revestimentos internos ou externos (Xu *et al.*, 2022).



Figura 23 - As aplicações dos WPCs em mobiliário, produtos de cozinha e de casa de banho (Xu *et al.*, 2022).

De acordo com Wazeer *et al.* (2023), os WPCs são também usados em aplicações na indústria automóvel. O estudo de revisão aborda diversas aplicações de materiais compósitos com fibras naturais nesse setor, e nesse sentido, as aplicações específicas que utilizam, em particular fibra de madeira, serão apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15 - Materiais compósitos de fibras naturais e respetivas aplicações na indústria automóvel (Adaptado de Wazeer *et al.*, 2023).

<b>Empresa</b>	<b>Fibras Naturais</b>	<b>Matriz</b>	<b>Aplicações</b>
Audi	Fibra de madeira, linho e sisal	PP, Epóxi, Poliuretano	Encostos dos bancos, painéis das portas laterais e traseiras, forro do porta-bagagem, suporte para chapéus, forro do pneu.
BMW	Fibra de <i>kenaf</i> , linho, cânhamo, e madeira	PP	Painéis de acabamento das portas, forro do tejadilho, forro do porta-bagagem, encostos dos bancos, painéis de isolamento acústico, painel de instrumentos.
Citröen	Fibra de madeira e linho	Epóxi	Painéis de portas interiores
Ford Motors	Fibra de madeira, palha de trigo, coco, soja e palha de arroz	PP, Poliuretano	Compartimentos de armazenamento internos, bancos, encostos de cabeça, forro do tejadilho
General Motors	Fibra de madeira, <i>kenaf</i> , linho e algodão	PP, Poliéster	Encosto de banco, acabamentos, prateleira traseira, caixa de carga, painéis de porta, bandejas de bagagem, isolante, revestimento do tejadilho
Honda	Fibra de madeira	—	Partes da área do piso



# Capítulo 5

## Caso Prático

Neste capítulo, serão descritos os materiais e equipamentos utilizados, assim como o procedimento experimental seguido ao longo da execução do caso prático desta dissertação.

### 5.1. Recolha e Análise Granulométrica dos resíduos

O propósito deste caso prático consiste no desenvolvimento de um novo material compósito, uma sanduiche com propriedades mecânicas otimizadas, que promova a valorização e reutilização de resíduos industriais de madeira e fibras de linho. A transformação de resíduos de fibras de madeira em recursos não só impulsiona a sustentabilidade e promove a EC, mas também pode representar uma alternativa à deposição destes resíduos em aterros.

Para que este objetivo fosse atingido, foram realizadas visitas à **Wd Retail – Soluções para Ponto de Venda, Lda.**, uma empresa de serviços e produção direcionada para o *design* de produto, soluções de *merchandising* e *trade marketing* para o ponto de venda. A empresa, gentilmente, forneceu resíduos de madeira, em formato de serradura com diferentes tamanhos; provenientes dos processos de maquinação utilizados para o fabrico dos seus produtos.

Utilizando os resíduos de madeira disponibilizados pela empresa, procedeu-se a uma análise granulométrica por peneiração a seco (Figura 24). Este método possibilita a categorização do material granular com base na distribuição do tamanho das partículas, considerando uma dimensão máxima estabelecida para as mesmas.



Figura 24 – Equipamento utilizado na análise granulométrica por peneiração a seco.

Inicialmente, foram selecionados os crivos adequados, em conformidade com a faixa de tamanhos das partículas presentes na amostra. Garantiu-se que tanto a amostra como os crivos estavam completamente secos. A disposição das peneiras, de cima para baixo, foi realizada em ordem decrescente do tamanho das aberturas, estando organizada da seguinte forma: 2,36 mm, 1,18 mm, 0,85 mm, 0,60 mm, 0,30 mm, 0,15 mm, 0,075 mm. No fundo do equipamento, foi posicionado um recipiente para recolha das partículas com dimensões inferiores a 0,075 mm.

Uma quantidade de amostra foi colocada no crivo superior. De forma a garantir que todas as partículas tivessem a oportunidade de passar pelas aberturas até serem retidas no crivo, dependendo da sua dimensão, determinou-se o ciclo de agitação de 10 minutos, com intervalos de tempo de 10 segundos. Este procedimento foi repetido cinco vezes, utilizando quantidades similares de amostra em cada procedimento.

Após a separação da amostra por tamanho, procedeu-se à pesagem individual da quantidade de material retida em cada crivo. Na Figura 25, observam-se as frações da amostra com maior quantidade, as quais contém as partículas de 0,15 mm e 0,30 mm, dois dos tamanhos selecionados durante a recolha.



Figura 25 - Partículas de madeira obtidas após peneiração a seco: 0,15 mm e 0,3 mm.

Com base nas pesagens, foram calculadas as percentagens correspondentes à fração de cada peneira em relação ao peso total da amostra aplicada, e construiu-se um gráfico com a distribuição do tamanho das partículas. O gráfico de distribuição granulométrica, apresentado na Figura 26, mostra o tamanho das partículas no eixo das abscissas, e as percentagens relativas e acumuladas de cada fração da amostra no eixo das ordenadas, posicionadas no lado esquerdo e direito do gráfico, respetivamente.

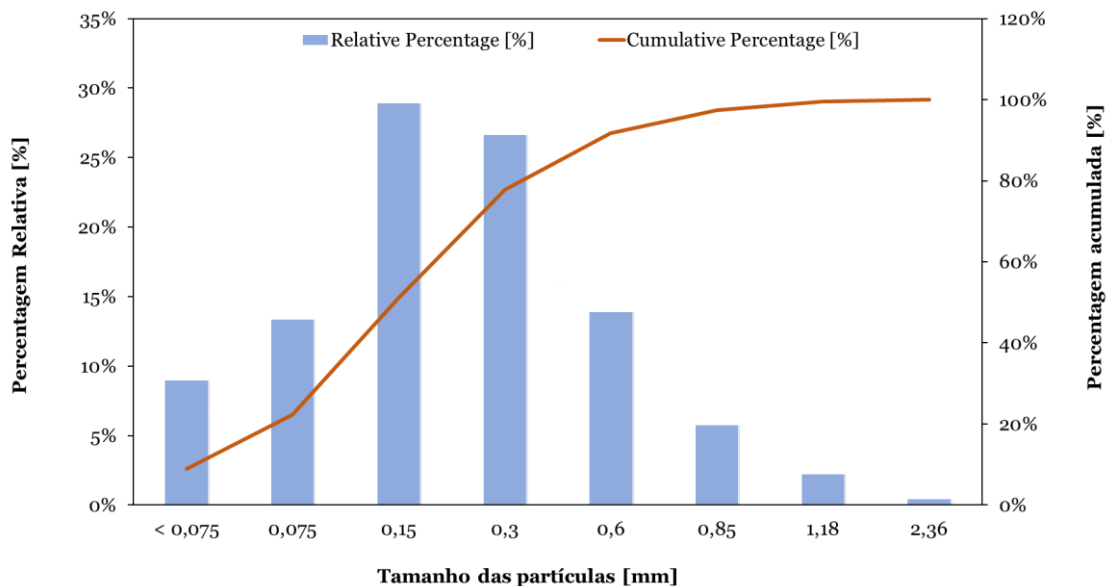


Figura 26 – Gráfico de distribuição granulométrica dos resíduos industriais de madeira.

Para uma análise mais detalhada das partículas, utilizou-se a microscopia eletrônica de varrimento (SEM). Na Figura 27 a), observa-se que as partículas em estudo apresentam uma dispersão significativa em termos de dimensões e geometria. Como exemplo, a Figura 27 b) mostra a dispersão em termos de dimensões de duas partículas específicas: o comprimento varia entre 0,623 mm e 1,57 mm e a largura varia entre os 0,174 mm e 0,187 mm.

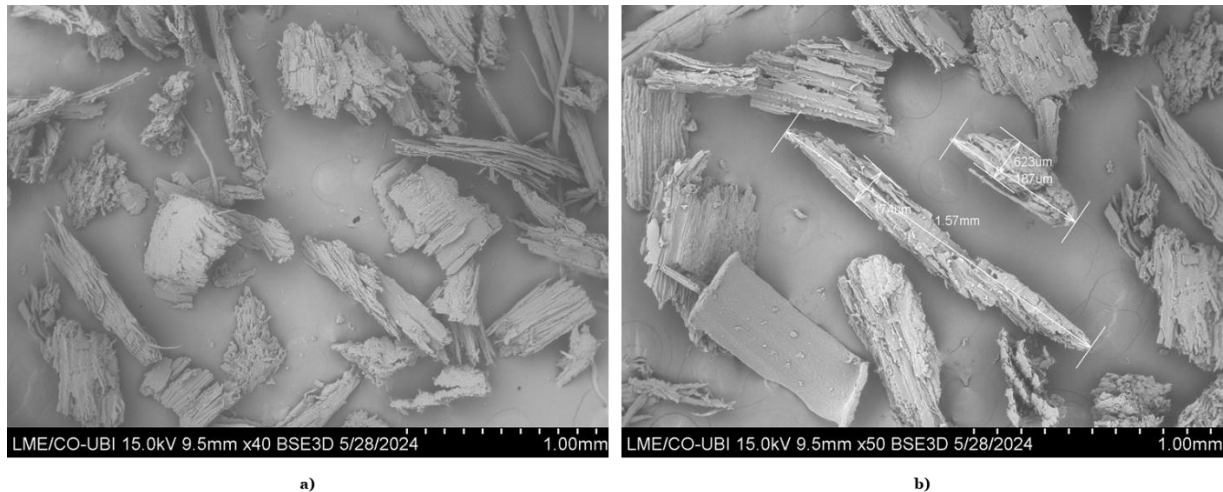
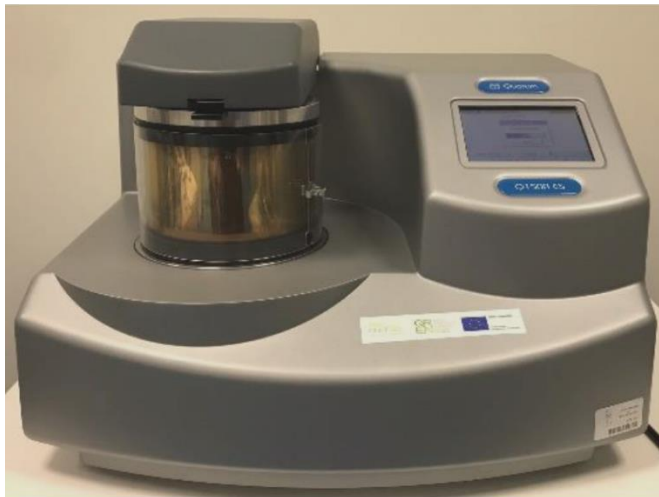


Figura 27 – (a) Visão geral do tamanho e geometria das partículas (b) Dimensão de duas partículas específicas.

### 5.1.1. Equipamento

Para o SEM, foi utilizado um equipamento da marca *Hitachi*, modelo S-3400N, equipado com um *software* de aquisição e análise de dados *Quantax ESPRIT*. Tendo em conta a baixa condutividade das partículas, as amostras foram inicialmente revestidas a ouro utilizando o equipamento da marca *Quorum* e modelo Q150R ES, e só depois colocadas no SEM. A Figura 28 mostra-nos ambos os equipamentos.



a)



b)

Figura 28 – (a) Aparelho de revestimento de ouro Q150R ES, da marca *Quorum*; (b) SEM modelo S-3400N, da marca *Hitachi*.

## 5.2. Núcleo do painel sanduíche

Para a sanduíche, foi inicialmente determinado que o seu núcleo seria composto por matriz epóxi reforçada com resíduos de madeira. Nesta seção, será descrito o processo de fabricação e otimização do mesmo e a análise subsequente de vários núcleos para determinar as dimensões das partículas e a percentagem ideal em peso do reforço.

### 5.2.1. Fabricação do núcleo

Em relação ao processo de fabrico do núcleo da sanduíche, inicialmente foram produzidos nove materiais compósitos. A primeira matriz foi de controlo, fabricada manualmente com resina SR GreenPoxy 56 e o endurecedor SD Surf Clear, fornecidos pela empresa Sicomin, para comparação das propriedades mecânicas. Na Tabela 16 encontram-se as propriedades de ambos os materiais.

Os restantes oito materiais foram fabricados com percentagens em peso (wt. %) de fibras de madeira de 20% e 30%, diferindo o tamanho das partículas entre 0,075 mm, 0,150 mm, uma combinação dessas duas dimensões, e 0,300 mm. A escolha das dimensões das partículas nesta fase inicial foi determinada de acordo com a quantidade disponível previamente determinada.

Tabela 16 – Principais propriedades físicas da resina epóxi, do endurecedor e da matriz curada (Sicomín, 2016).

	SR GreenPoxy 56	SD Surf Clear	Matriz Curada (24h a 23°C + 24h a 40°C)
Aspeto/Cor	Líquido incolor	Líquido incolor	_____
Viscosidade a 20°C [mPa s ± 20%]	1400	60	900
Percentagem do teor de carbono de base biológica	50-58	0	35-41
Densidade a 20°C [g/cm <sup>3</sup> ]	1,198	0,958	1,193
Rácio de peso [g]	100	38	_____

A matriz de controlo foi preparada de acordo com as diretrizes estabelecidas pelo fabricante, sendo adicionadas 15,2 gramas de endurecedor a 40 gramas de resina, o que equivale a 38 wt. % da resina (Sicomín, 2016). No caso dos materiais contendo partículas de madeira foram acrescentadas as gramas de serradura, correspondentes a 20 wt. % e 30 wt. % da resina com endurecedor. Na Tabela 17, é possível observar as quantidades utilizadas nos nove materiais fabricados.

Tabela 17 – Proporções utilizadas na fase inicial de fabricação de materiais compósitos para o núcleo da sanduíche.

	Percentagem em peso de partículas de madeira [%]	Resina e endurecedor [g]	Partículas de madeira [g]
1	0 wt. % de Partículas de madeira (Controlo)	55,2	0
2	20 wt. % de Partículas de madeira 0,075 mm	55,2	11,04
3	30 wt. % de Partículas de madeira 0,075 mm	55,2	16,56
4	20 wt. % de Partículas de madeira 0,150 mm	55,2	11,04
5	30 wt. % de Partículas de madeira 0,150 mm	55,2	16,56
6	10 wt. % de Partículas de madeira 0,150 mm e 10 wt. % de Partículas de madeira 0,075 mm	55,2	5,52 + 5,52
7	15 wt. % de Partículas de madeira 0,150 mm e 15 wt. % de Partículas de madeira 0,075 mm	55,2	8,28 + 8,28
8	20 wt. % de Partículas de madeira 0,300 mm	55,2	11,04
9	30 wt. % de Partículas de madeira 0,300 mm	55,2	16,56

Após a realização das pesagens, a mistura foi submetida a um processo de degaseificação numa panela de vácuo por um período de 10 minutos, sob pressão negativa de  $0,9 \pm 0,1$  bar. Posteriormente, a composição obtida foi misturada manualmente, de forma cuidadosa, até se obter a homogeneidade adequada, e vertida para um molde de cartão com dimensões de  $3 \times 120 \times 80$  mm<sup>3</sup>, previamente fabricado e protegido com um plástico técnico para o efeito. Por fim, todas as matrizes foram curadas à temperatura ambiente ( $18 \pm 2^\circ\text{C}$ ) durante 24 horas e, em seguida, submetidas a um processo de pós-cura numa estufa durante 24 horas a  $40^\circ\text{C}$ .

Considerando a análise do aspeto visual e das propriedades mecânicas obtidos na fabricação inicial, optou-se por efetuar uma segunda fabricação, utilizando as mesmas proporções de partículas de madeira das dimensões utilizadas anteriormente (20 wt. % e 30 wt. %). Alguns dos procedimentos foram modificados de forma a evitar espaços vazios no interior do compósito e uniformizar a espessuras dos materiais.

Os procedimentos utilizados na pesagem dos constituintes mantiveram-se consistentes com as práticas adotadas na fabricação anterior. Em seguida, a composição resultante foi misturada manualmente, com precisão, até obter a homogeneidade adequada. Posteriormente, a mistura foi submetida a um processo de degaseificação numa panela de vácuo por um período de 10 minutos, sob pressão negativa de  $0,9 \pm 0,1$  bar.

Por fim, a mistura foi também vertida para um molde de cartão com as mesmas dimensões utilizadas anteriormente e submetida novamente a um processo de degaseificação, durante cerca de 30 minutos. Com o auxílio de um cartão, foram removidos, manualmente, os espaços vazios de maiores dimensões. Após este procedimento, os materiais seguiram o processo de cura à temperatura ambiente numa prensa hidráulica à pressão de 2,5 kN, durante 24 horas. O processo de pós-cura foi realizado na estufa a  $40^\circ\text{C}$ , durante 24 horas. O novo procedimento, realizado na segunda fase de fabricação, é esquematizado na Figura 29.

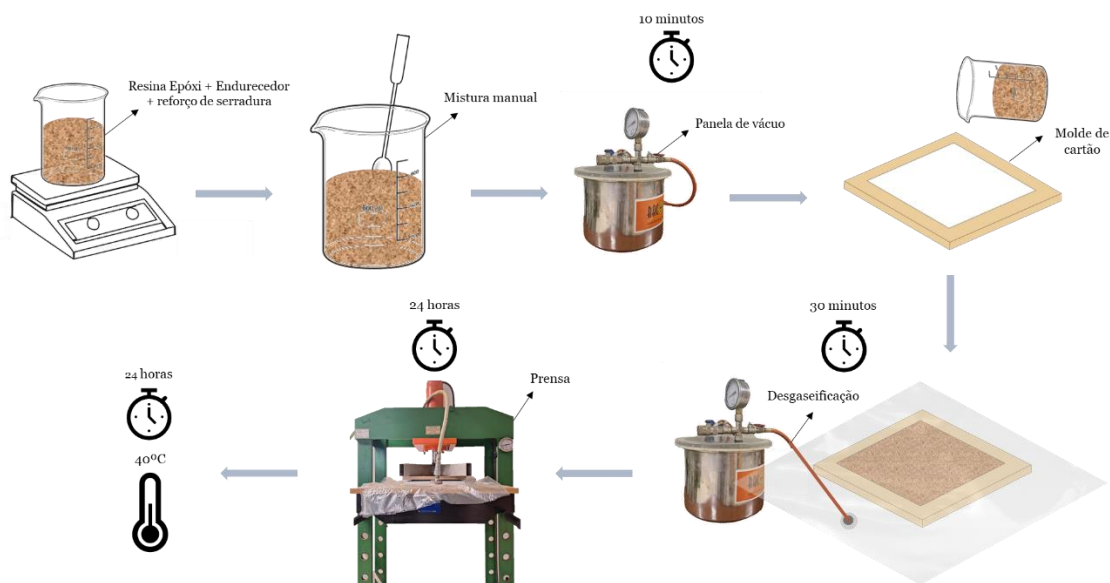


Figura 29 – Esquema ilustrativo do processo melhorado para a fabricação de compósitos para o núcleo da sanduíche.

As modificações implementadas nos procedimentos entre a primeira e segunda fabricação resultaram na eliminação de espaços vazios e na uniformização das espessuras dos materiais, conforme ilustrado na Figura 30. Em virtude da introdução destas melhorias no processo de produção, na produção dos compósitos subsequentes este segundo procedimento foi adotado. Na figura 30 a) são facilmente identificáveis áreas onde ficaram alojadas uma grande quantidade de bolhas de ar (castanho claro). Após alteração do processo de produção, a amostra fabricada, na Figura 30 b), apresenta um aspeto uniforme. A otimização destes parâmetros, vácuo e pressão, permite a substancial redução/eliminação dos defeitos e a melhoria das propriedades finais do compósito (Ayana et al., 2024; Ismail *et al.*, 2022; Sharma et al., 2016).

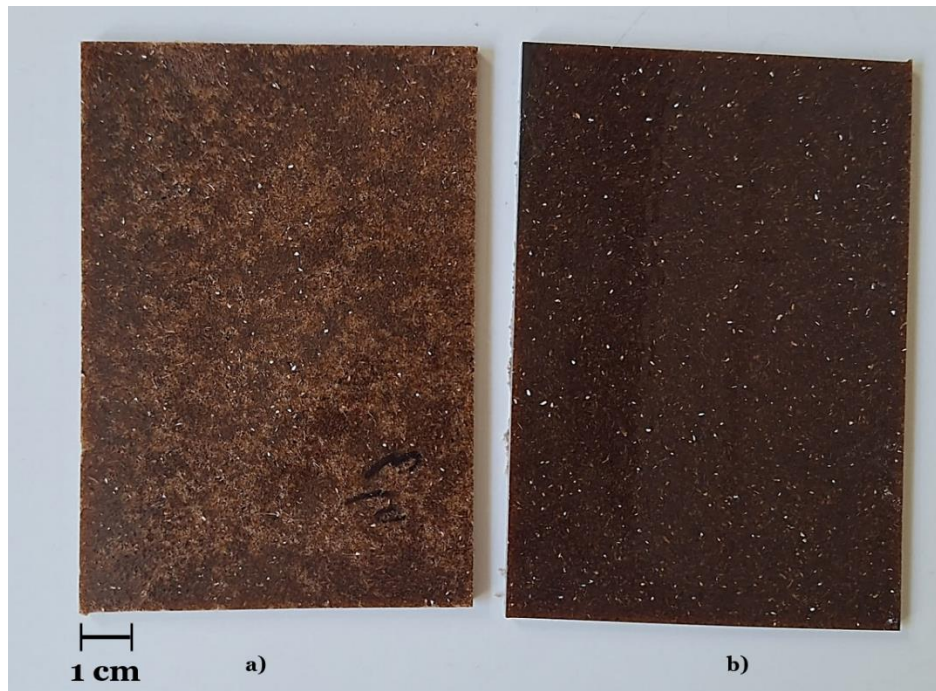


Figura 30 – Comparação entre materiais contendo 30 wt. % de partículas de madeira de 0,300 mm: a) Procedimento sem vácuo e pressão; b) Procedimento com vácuo e pressão durante a cura à temperatura ambiente.

Uma terceira fase de fabricação foi realizada, na qual a proporção de partículas de madeira foi aumentada. Nesta fase, foram produzidos cinco materiais distintos: quatro com 40 wt. % de partículas de madeira de dimensões de 0,075 mm, 0,150 mm, uma combinação dessas duas dimensões, e 0,300 mm; e um quinto material com 50 wt. % de partículas de dimensões de 0,300 mm.

O processo de fabricação, cura e pós-cura foi conduzido de acordo com o procedimento aprimorado descrito anteriormente, utilizando vácuo e pressão, e a Figura 31 mostra os dois compósitos obtidos com o mesmo tamanho de partículas de madeira e diferentes percentagens.

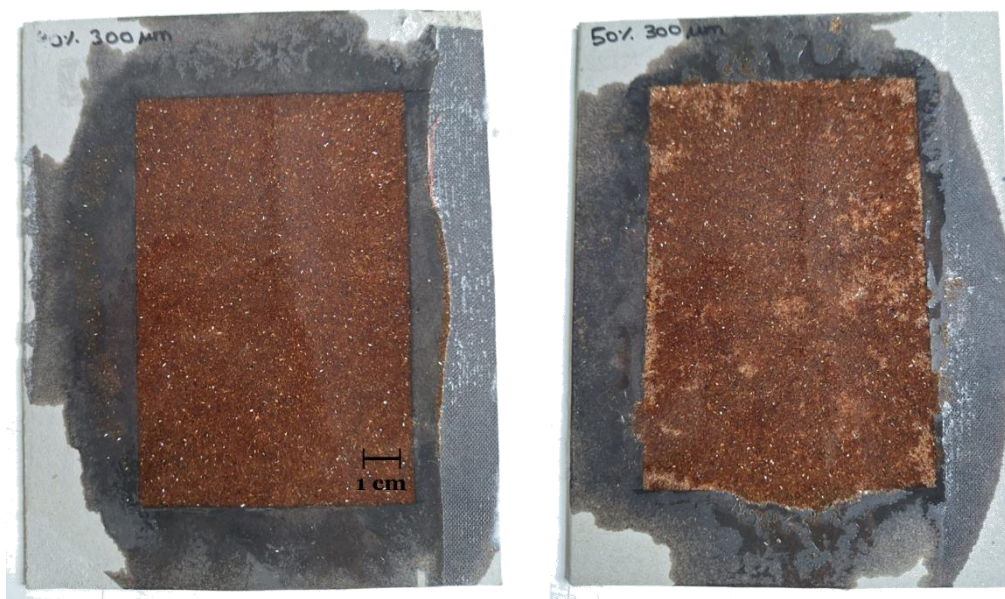


Figura 31 – Compósitos com 40 wt. % e 50 wt. % de partículas de madeira de 0,300mm, obtidos na terceira fase de fabricação.

### 5.2.2. Provetes

Para a obtenção dos provetes durante as três fases de fabricação, foi realizado o corte dos materiais compósitos com a máquina de corte Struers Accutom 2. De forma a evitar o aquecimento do compósito, foi utilizado um disco diamantado com refrigeração a água.

As dimensões dos provetes para os ensaios de flexão em três pontos – comprimento de  $80 \pm 2$  mm, largura de  $10 \pm 0,5$  mm e espessura de  $4 \pm 0,8$  mm – foram determinadas de acordo com a norma BS EN ISO 178:2003, onde é descrito um procedimento para avaliação das propriedades de flexão de um material termoendurecido (BSI, 2003).

Na Tabela 18, encontram-se indicadas os provetes cortados de cada amostra para os diferentes os ensaios de flexão em três pontos, totalizando **110 provetes**.

Tabela 18 – Provetes para ensaios de flexão em três pontos.

	<b>Amostras</b>	Ensaio de flexão em três pontos	Nº de provetes
	Controlo	5	5
Primeira fase de fabricação	8 amostras com reforço de partículas de madeira	8 × 5	40
Segunda fase de fabricação	8 amostras com reforço de partículas de madeira	8 × 5	40
Terceira fase de fabricação	5 amostras com reforço de partículas de madeira	5 × 5	25
	Total		110

Os ensaios de dureza foram conduzidos exclusivamente na amostra de controlo e nas amostras com partículas de madeira de 0,300 mm com diferentes percentagens em peso (20 wt. %, 30 wt. %, 40 wt. %, 50 wt. %). Para cada ensaio, foi necessário o corte de apenas um provete, totalizando, assim, **cinco provetes**.

Relativamente aos ensaios de fluência e relaxação na amostra de controlo e na amostra com 40 wt. % de partículas de madeira de 0,300 mm, foram cortados e preparados pelo menos três provetes para cada condição de ensaio, a diferentes tensões (detalhados na seção 5.2.4.). No total, foram cortados **54 provetes**, distribuídos da seguinte maneira:

- Matriz de Controlo
  - 15 provetes para ensaios de relaxação;
  - 15 provetes para ensaios de fluência.
- Núcleo com 40% wt. de Partículas de 0,300 mm:
  - 12 provetes para ensaios de relaxação;
  - 12 provetes para ensaios de fluência.

Tendo em conta que, na análise posterior dos resultados, os valores de flexão em três pontos serviram de referência para os valores de fluência e relaxação, optou-se por cortar os provetes nas mesmas dimensões (comprimento de  $80 \pm 2$  mm, largura de  $10 \pm 0,5$  mm e espessura de  $4 \pm 0,8$  mm) para garantir a coerência entre os ensaios.

### 5.2.3. Equipamentos

Para a realização dos **ensaios estáticos de flexão em três pontos** foi utilizada uma máquina de ensaios universal, modelo AGS-X, da marca *Shimadzu*, equipada com uma célula de carga de 10 kN, ilustrada na Figura 32. Os dados foram registados utilizando o software *Trapezium X*, versão 1.4.0, e o mesmo tem a capacidade de apresentar os resultados na versão *Excel*.



Figura 32 – Máquina de ensaios universal, modelo AGS-X, da marca *Shimadzu*.

Os **ensaios de fluência e relaxação** do núcleo e da sanduiche foram, uma vez mais, efetuados na mesma máquina de ensaios universal. Neste caso, o software *Trapezium X* registou os dados relativos ao tempo, força e deslocamento.

Para a realização dos **ensaios de dureza**, o equipamento utilizado foi da marca *Mitutoyo*, modelo *AVK-C2 Hardness Tester*, (Figura 33). O equipamento fornece ao utilizador os valores da dureza Vickers (HV), bem como das distâncias diagonais ( $d_1$  e  $d_2$ ).



Figura 33 – AVK-C2 *Hardness Tester*, da marca *Mitutoyo*.

A Figura 34 apresenta uma ilustração do tipo de imagem que se consegue observar no equipamento, incluindo as medidas das duas diagonais.

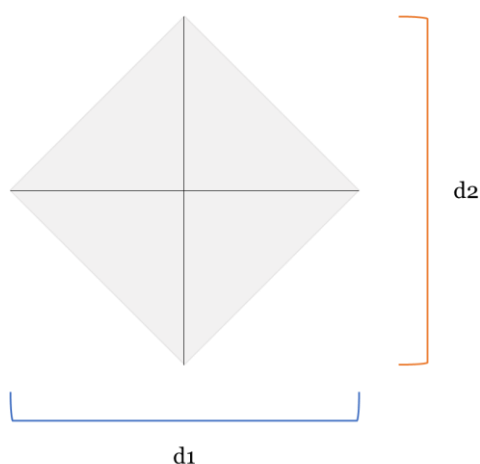


Figura 34 – Esquema ilustrativo das imagens visualizadas nos ensaios de dureza, com as diagonais  $d_1$  e  $d_2$  (em mm) utilizadas para o cálculo da dureza HV.

#### 5.2.4. Procedimento experimental

Os provetes, enumerados na **secção 5.2.2**, foram inicialmente testados por meio de ensaios de **flexão de três pontos**. Os ensaios foram efetuados à temperatura ambiente, utilizando os provetes com as dimensões determinadas anteriormente– Figura 35. A distância entre apoios, designada de *span* ( $L$ ), conforme estipulado pela norma, deve respeitar a seguinte equação, na qual  $t$  representa a espessura média do material a ser testado (BSI, 2003):

$$L = (16 \pm 1) \times t \quad (2)$$

Considerando a espessuras média dos provetes, adotou-se um *span* de 60 mm para os ensaios de flexão de três pontos, também ilustrada na Figura 35. Para cada condição, foram testadas cinco amostras, com uma taxa de deslocamento de 2 mm/min.

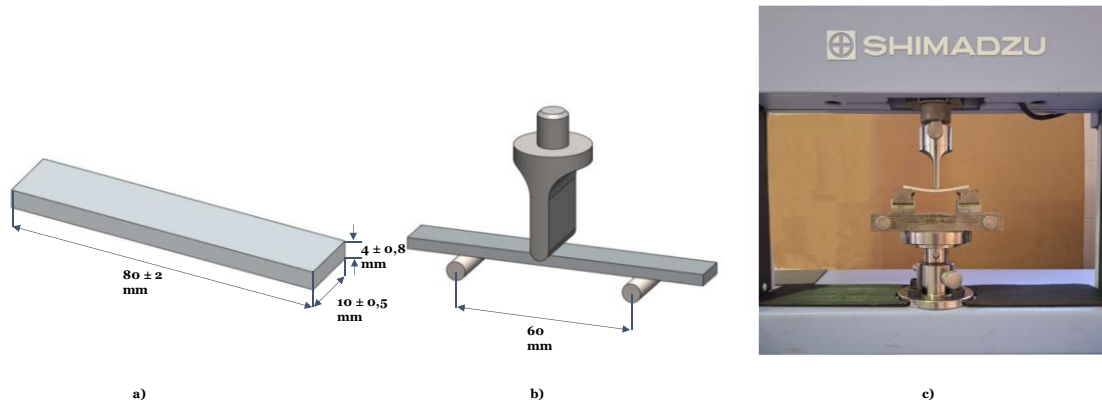


Figura 35 – Ensaio de flexão em três pontos: a) Geometria dos provetes; b) Vista esquemática da montagem do ensaio; c) Utilização do equipamento de ensaio universal para caracterização dos provetes.

A tensão de flexão foi obtida a partir da tensão nominal na secção central entre apoios, pela equação 3 (BSI, 2003):

$$\sigma = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (3)$$

na qual  $P$  é a carga,  $L$  a distância entre apoios,  $b$  a largura e  $h$  a espessura da amostra. A partir da relação da teoria de vigas de flexão elástica linear, o módulo de rigidez foi determinado de acordo com a equação 4:

$$E = \frac{\Delta P \cdot L^3}{48 \cdot \Delta u \cdot I} \quad (4)$$

na qual  $I$ ,  $\Delta P$  e  $\Delta u$  são o momento de inércia da secção transversal, o intervalo de carga e o intervalo de deslocamento de flexão entre apoios para um intervalo na região linear do gráfico de carga versus deslocamento, respetivamente.

Por fim, a deformação de flexão foi calculada de acordo com a equação 5 (BSI, 2003):

$$\varepsilon_f = \frac{6 \cdot S \cdot h}{L^2} \quad (5)$$

em que  $S$  é a deflexão,  $L$  a distância entre apoios e  $h$  a espessura do provete.

Após realização dos ensaios de flexão em três pontos, determinou-se que as partículas de madeira mais adequadas para serem utilizadas como núcleo da sanduíche, na qual serão incorporadas as camadas de fibra de linho, foram as partículas de dimensões de 0,300mm. De seguida, foi necessário estabelecer a percentagem em peso de madeira adequada, com o principal objetivo de maximizar a utilização de resíduos de madeira, sem comprometer significativamente as propriedades mecânicas do material final.

Nesse sentido, a **dureza** da matriz de controlo e dos compósitos com 20, 30, 40, 50 wt. % partículas de 0,300 mm foi medida utilizando uma máquina de ensaio de dureza *Vickers*. Aplicou-se uma carga de dureza *Vickers* de 0,2 urante 10 s, e os valores da dureza foram registados em unidades HV. O processo foi repetido em cinco pontos diferente dos provetes de cada material compósito, de modo a obter-se um valor medio.

Apesar do valor de HV ser fornecido pelo próprio equipamento, o mesmo foi confirmado através da equação 6:

$$HV = 1,852 \frac{F}{d^2} \quad (6)$$

em que  $F$  é carga, em kgf, e  $d$  é a média aritmética das duas diagonais,  $d_1$  e  $d_2$ , em mm.

Por fim, para a matriz de controlo e para o núcleo de 40 wt. % de partículas de 0,300 mm foram realizados ensaios de **relaxação de tensões e fluência**. No caso dos ensaios de relaxação, este foram conduzidos à temperatura ambiente, em conformidade com a norma ASTM E328 (ASTM, 2020b). Foi aplicada uma deformação fixa, correspondente a 21, 42, 52,5, 63 e 84 MPa para a matriz de controlo, e a 12, 21, 27 e 33 MPa para o compósito com 40 wt. % de reforço, e a tensão registada durante o tempo de carregamento (180 minutos). Por outro lado, os testes de fluência foram conduzidos à temperatura ambiente e de acordo com a norma ASTM D2990, onde foi aplicada uma tensão de flexão fixa (com os mesmos valores anteriormente mencionados) e o deslocamento foi registado durante o mesmo tempo de carregamento (ASTM, 2017).

Os valores utilizados em ambos os ensaios, com pelo menos três provetes, foram selecionados para garantir que todos os testes viscoelásticos fossem realizados dentro do regime elástico.

### 5.3. Painel sanduíche

Após a seleção da percentagem ideal das partículas de madeira com 0,300 mm, de 40 wt. %, para o núcleo, e preparação das fibras de linho para o revestimento, cujas propriedades são apresentadas na Tabela 18, foi iniciado o processo de produção da sanduíche. A fabricação da sanduíche por meio do método de moldagem manual, seguida pelos procedimentos realizados para análise das propriedades mecânicas, será descrita ao longo desta seção.

Tabela 19 – Propriedades das fibras de linho (Elfaleh *et al.*, 2023).

Propriedades	
<b>Densidade</b> [g/cm <sup>3</sup> ]	0,6 – 1,5
<b>Resistência à tração</b> [MPa]	88 – 1600
<b>Módulo de Young</b> [GPa]	24 – 80
<b>Alongamento na rutura</b> [%]	1,2 – 10

#### 5.3.1. Fabricação da sanduíche

Para a fabricação da sanduíche, inicialmente foram pesadas e medidas as quantidades necessárias de resina epóxi e endurecedor, partículas de madeira e fibras de linho, descritas na Tabela 19.

Tabela 20 – Composição do painel sanduíche.

			Quantidades
Constituintes da Sanduíche	<b>Núcleo</b>	Partículas de madeira 0,300 mm	71,76 g
		Resina Epóxi e Endurecedor	130 g + 49,4 g
	<b>Camadas externas</b>	Fibras de linho	4 camadas de 220 cm × 200 cm
		Resina Epóxi e Endurecedor	100 g + 38 g

Após as misturas serem submetidas a um processo de desgaseificação numa panela de vácuo por um período de 10 minutos, iniciou-se o processo de montagem do painel sanduíche, esquematizado na Figura 36. Inicialmente, foi aplicada a primeira camada de matriz epóxi. Em seguida, posicionou-se a primeira camada de fibras de linho, que foi impregnada com a matriz, garantindo-se a quantidade controlada de  $20 \pm 5,0$  ml resina entre camadas, com o auxílio de uma seringa. O procedimento de aplicação da matriz,

colocação da fibra e impregnação foi repetido para mais uma camada de linho. Posteriormente, foi colocado um molde de cartão com dimensões de  $9 \times 200 \times 160 \text{ mm}^3$ , dentro do qual foi vertida a mistura destinada ao núcleo da sanduíche, composto por partículas de madeira de  $0,300 \text{ mm}$  (40 wt. %) e matriz epóxi. Por fim, a sequência de aplicação da matriz, colocação das fibras de linho e impregnação foi novamente repetida para as duas últimas camadas.

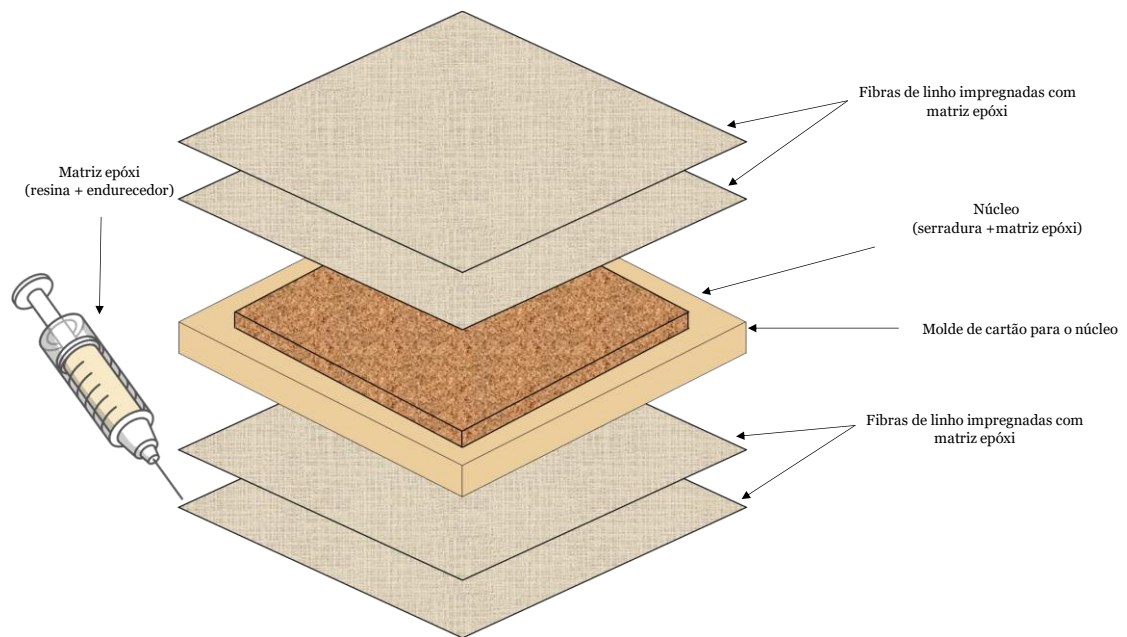


Figura 36 – Esquema ilustrativo da montagem do painel sanduíche.

O processo de cura (Figura 37) foi, de modo semelhante à fabricação dos materiais compósitos para o núcleo, iniciado com a degaseificação da estrutura sanduíche por aproximadamente 30 minutos. Nesta fase, dando uso a um cartão, manualmente foram removidos alguns dos vazios de maiores dimensões. Após esse período, o vácuo foi desligado e a cura da sanduíche ocorreu à temperatura ambiente na prensa, durante 24 horas. Seguiu-se uma pós-cura na estufa a  $40^\circ\text{C}$ , também por 24 horas.



Figura 37 – Processo de cura da sanduíche: a) prensa; b) detalhe da válvula de vácuo.

### 5.3.2. Provetes

Após a produção do painel sanduíche, procedeu-se ao corte da sanduíche para a realização de ensaios de flexão em três pontos, relaxação de tensões e fluência, de compressão (lateral e horizontal). Estes testes foram fundamentais para a determinação das propriedades mecânicas do painel sanduíche, possibilitando assim a avaliação das suas potenciais aplicações.

O corte dos provetes, utilizando a máquina de corte Struers Accutom 2, foi executado conforme as normas específicas de cada procedimento. Na Tabela 21, encontram-se disponíveis os valores de referência utilizados para determinar as dimensões dos diferentes provetes. Além disso, a tabela indica o número de provetes cortados para cada ensaio.

De salientar que, no caso dos provetes para ensaios de fluência e relaxação, optou-se por manter as dimensões semelhantes aos ensaios de flexão em três pontos, uma vez que estes serviram de referência na posterior análise de resultados. No caso dos ensaios de compressão na horizontal, foi necessário cortar os provetes em dimensões menores do que as especificadas pela norma devido às limitações do equipamento utilizado.

Assim sendo, os fatores que influenciaram a escolha das dimensões incluíram: valores de referência normativos, as limitações do equipamento disponível, e o objetivo de minimizar o desperdício de material.

Tabela 21 – Dimensões de referências dos provetes para realização dos ensaios ao painel sanduíche.

Ensaio	Norma	Dimensões [mm]				Nº provetes
		Largura (L) [mm]	Comprimento (C) [mm]	Espessura (E) [mm]	Span (S) [mm]	
Flexão em 3 pontos	ASTM C393	75	200	10 ± 1,0	150	4
Relaxação de tensões	ASTM E328	75	200	10 ± 1,0	150	12
Fluência	ASTM D2990	75	200	10 ± 1,0	150	12
Compressão lateral	ASTM C-364	$50 \leq W \leq (8 \times T)$	$\leq (8 \times T)$	10 ± 1,0	/	4
Compressão horizontal	ASTM C-365	> 25	> 25	10 ± 1,0	/	4

### 5.3.3. Equipamentos

Analogamente ao núcleo, os ensaios estáticos de **flexão em três pontos** da sanduíche foram realizados com uma máquina de ensaios universal, modelo AGS-X, da marca *Shimadzu* e os dados foram registados utilizando o software *Trapezium X*, versão 1.4.0.

Adicionalmente, neste equipamento e software, foram conduzidos os ensaios de **fluência e relaxação** da sanduíche. Os dados relativos ao tempo, força e deslocamentos foram devidamente registados.

Relativamente aos ensaios de **compressão**, lateral e horizontal, estes foram realizados em outra máquina de ensaios universal, modelo AG-IC, da marca *Shimadzu*, equipada com uma célula com carga de 50kN (Figura 38). Os dados de força, deslocamento, tensão e deformação foram também registados utilizando o software *Trapezium X*.



Figura 38 – Máquina de ensaios universal, modelo AG-IC, da marca *Shimadzu*.

#### 5.3.4. Procedimento experimental

Os provetes, com largura de 75 mm e comprimento de 200 mm, foram inicialmente testados por meio de ensaios de **flexão em três pontos**, cuja posição do provete se encontra ilustrada na Figura 39. Em semelhança aos ensaios efetuados ao núcleo, estes foram realizados à temperatura ambiente. O *span*, conforme estipulado pela norma ASTM C393, deve ser 150 mm (ASTM, 2020a). De salientar, que foram considerados pelo menos cinco ensaios da sanduíche validos, com uma taxa de deslocamento de 3 mm/min.

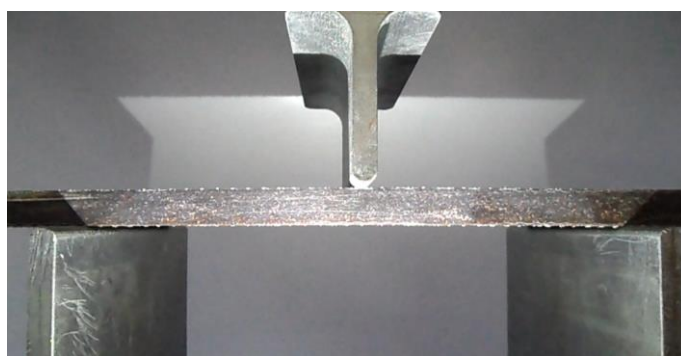


Figura 39 - Posição do provete nos ensaios de flexão em três pontos.

A tensão de corte do núcleo e a tensão de flexão da face foram determinadas como recomendado pela norma ASTM C393, utilizando as seguintes equações (7 e 8) (ASTM, 2020a):

$$\tau = \frac{P}{(d + c) \times b} \quad (7)$$

$$\sigma = \frac{P \times L}{2 \times t \times (d + c) \times b} \quad (8)$$

onde  $\tau$  é a tensão de corte do núcleo (MPa),  $P$  a carga (N),  $d$  a espessura da sanduíche (mm),  $c$  a espessura do núcleo (mm),  $b$  a largura da sanduíche (mm),  $\sigma$  a tensão de flexão da face (MPa),  $L$  o *span* (mm) e  $t$  a espessura da face (mm).

De seguida, foram realizados ensaios de **relaxação** de tensões à temperatura ambiente, de acordo com a mesma norma ASTM E328 utilizada anteriormente nos ensaios ao núcleo (ASTM, 2020b). Desta vez, foi aplicada uma deformação fixa, correspondente a 12, 21, 27 e 33 MPa, e a tensão foi registada durante o tempo de carregamento (180 minutos). Os testes de **fluência** foram igualmente conduzidos à temperatura ambiente, seguindo a norma ASTM D2990, onde foi aplicada uma tensão de flexão fixa (12, 21, 27 e 33 MPa) e o deslocamento foi registado durante o mesmo tempo de carregamento (ASTM, 2017).

Os valores médios obtidos em ambas as caracterizações, resultaram de pelo menos três ensaios válidos, de forma a garantir que todos os testes viscoelásticos fossem realizados dentro do regime elástico.

Relativamente aos ensaios de **compressão lateral**, estes foram realizados à temperatura ambiente. Tal como o nome indica, os provetes foram posicionados verticalmente (Figura 40) com objetivo de avaliar a capacidade da sanduíche em suportar cargas de compressão progressivamente crescente. Como estipulado pela norma ASTM C-364, a taxa de deslocamento foi de 0,5 mm/min, e o ensaio foi repetido para quatro provetes (ASTM, 2007).

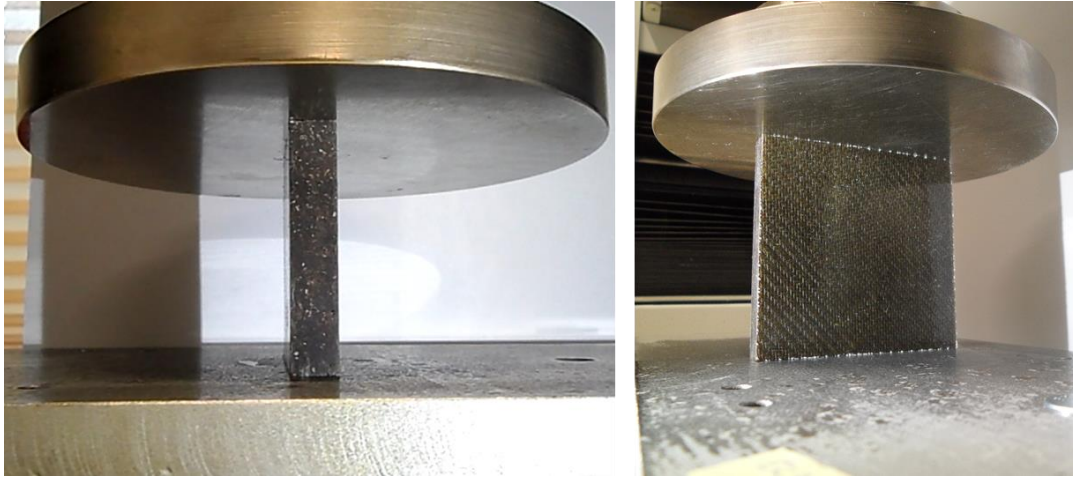


Figura 40 – Posição do provete nos ensaios de compressão lateral.

Por fim, foram realizados ensaios de **compressão horizontal** ao painel sanduíche, à temperatura ambiente. Desta vez, os provetes foram colocados na posição horizontal (Figura 41) para averiguar a capacidade do material em suportar cargas de compressão progressivamente crescente. A taxa de deslocamento foi de 0,5 mm/min, conforme definido pela norma ASTM C-364, e o ensaio foi repetido para quatro provetes (ASTM, 2005).



Figura 41 – Posição do provete nos ensaios de compressão horizontal.

# Capítulo 6

## Apresentação e Discussão dos Resultados

Este capítulo explora em detalhe os resultados dos diversos ensaios realizados ao longo do caso prático, fornecendo uma análise minuciosa das características mecânicas dos materiais compósitos produzidos. Esta discussão incluiu os resultados tanto do núcleo quanto do painel sanduíche final.

### 6.1. Ensaios de Flexão em Três Pontos do núcleo

Na fase inicial de fabricação dos compósitos para o núcleo da sanduiche, foram produzidos o compósito de controlo, apenas com resina epóxi e endurecedor, e oito compósitos com 20 wt. % e 30 wt. % partículas de madeira de diferentes dimensões – 0,075 mm, 0,150mm, 0,075 mm e 0,150mm, 0,300 mm.

A análise dos primeiros ensaios mecânicos, realizados por meio de flexão em 3 pontos, permitiu determinar os valores de tensão máxima, rigidez e deformação dos materiais fabricados, utilizando uma taxa de deslocamento de 2 mm/min. Para cada amostra, foram considerados cinco ensaios. A Figura 42 apresenta as curvas características de tensão-deformação de flexão de duas amostras fabricadas nesta primeira fase, amostra de controlo (Figura 42a)) e amostra com 30 wt. % partículas de madeira de 0,300mm (Figura 42b)), demonstrando a repetibilidade dos ensaios.

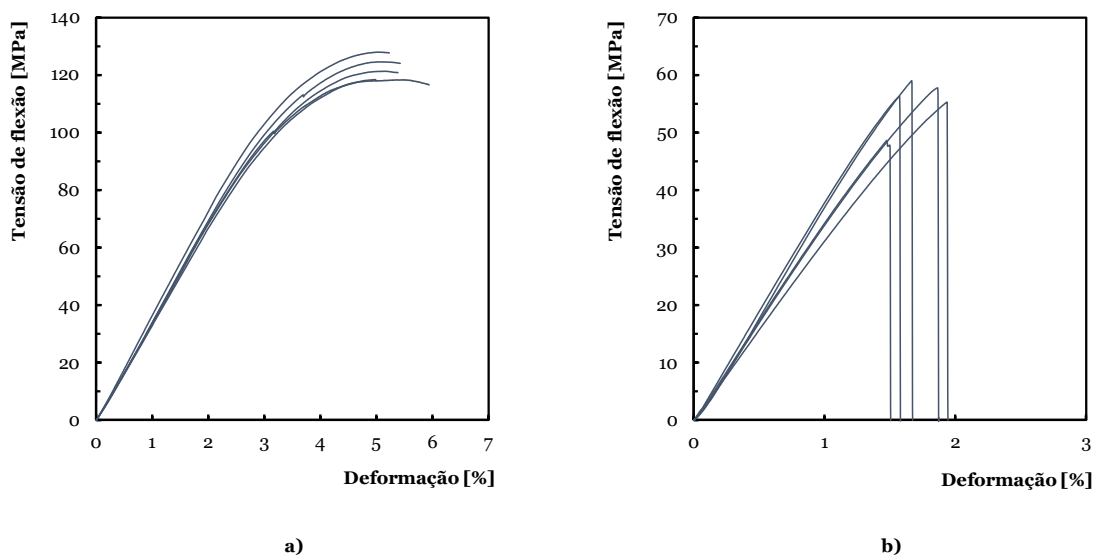


Figura 42 – Curvas características de tensão-deformação de flexão: (a) Amostra de controlo; (b) Amostra com 30 wt. % partículas de madeira de 0,300mm.

A Tabela 22 mostra os valores médios, e respetivo desvio-padrão, da tensão máxima, rigidez e deformação obtidas para os nove compósitos.

Tabela 22 - Propriedades mecânicas dos materiais compósitos (para o núcleo) da primeira fase de fabricação.

Primeira fase de fabricação					
Compósito		Tensão máxima [MPa]	Rigidez [GPa]	Deformação [%]	
Controlo		122,15 ± 4,15	3,50 ± 0,09	5,14 ± 0,13	
Partículas de madeira	0,075 mm	20 wt. %	64,35 ± 1,65	2,48 ± 0,17	4,11 ± 0,53
		30 wt. %	50,59 ± 5,49	2,61 ± 0,21	2,56 ± 0,23
	0,150 mm	20 wt. %	67,80 ± 3,19	3,40 ± 0,14	2,09 ± 0,13
		30 wt. %	30,90 ± 4,13	1,62 ± 0,26	2,31 ± 0,20
	0,300 mm	20 wt. %	56,73 ± 4,85	3,82 ± 0,23	1,48 ± 0,19
		30 wt. %	55,42 ± 4,04	3,55 ± 0,29	1,70 ± 0,19
	0,150 mm / 0,075 mm	10 wt. % / 10 wt. %	56,15 ± 4,37	2,36 ± 0,25	3,61 ± 0,67
		15 wt. % / 15 wt. %	39,27 ± 5,36	3,06 ± 0,20	1,42 ± 0,30

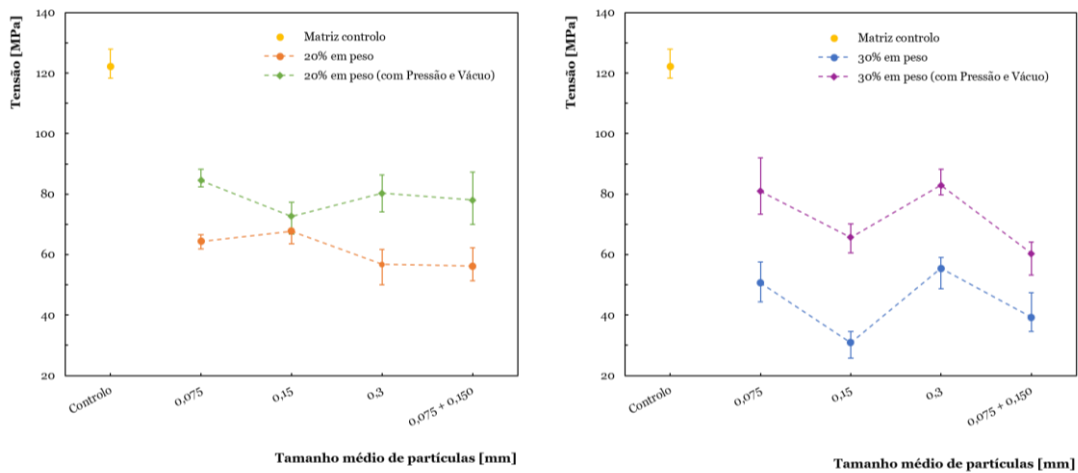
Além do aspeto visual dos materiais não ser satisfatório, devido à presença de espaços vazios, observou-se uma perda de propriedades significativa em relação ao controlo na maioria dos compósitos testados. Esta perda de propriedades deve-se essencialmente ao fato de as partículas serem aplicadas sem qualquer tratamento superficial e terem dispersão em termos de dimensões, provocando assim interfaces fracas, pouca compatibilidade e molhabilidade inadequada (Ayana et al., 2024).

Para aprimorar as propriedades, foi testado um novo procedimento, no qual foi aplicado vácuo e pressão durante a fase de cura dos materiais. Utilizando a mesma taxa de deslocamento, foram novamente realizados ensaios de flexão em 3 pontos, e os valores de tensão máxima, rigidez e deformação dos materiais fabricados foram comparados ao controlo, e são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 - Propriedades mecânicas dos materiais compósitos (para o núcleo) da segunda fase de fabricação.

Segunda fase de fabricação					
Compósito		Tensão máxima [MPa]	Rigidez [GPa]	Deformação [%]	
Controlo		122,15 ± 4,15	3,50 ± 0,09	5,14 ± 0,13	
Partículas de madeira	0,075 mm	20 wt. %	84,52 ± 2,27	4,60 ± 0,20	2,03 ± 0,09
		30 wt. %	80,94 ± 7,87	5,11 ± 0,68	1,69 ± 0,12
	0,150 mm	20 wt. %	72,68 ± 3,90	4,38 ± 0,25	1,75 ± 0,08
		30 wt. %	65,72 ± 4,81	5,00 ± 0,67	1,41 ± 0,08
	0,300 mm	20 wt. %	80,30 ± 6,15	5,63 ± 0,17	1,57 ± 0,13
		30 wt. %	82,87 ± 3,74	5,62 ± 0,64	1,63 ± 0,19
	0,150 mm / 0,075 mm	10 wt. % / 10 wt. %	78,05 ± 8,54	4,59 ± 0,21	1,79 ± 0,15
		15 wt. % / 15 wt. %	60,29 ± 6,15	4,45 ± 0,15	1,47 ± 0,15

A comparação entre as propriedades de tensão de flexão máxima, módulo de rigidez e deformação de flexão dos compósitos produzidos na primeira e segunda fabricação pode ser observada na Figura 43.



a)

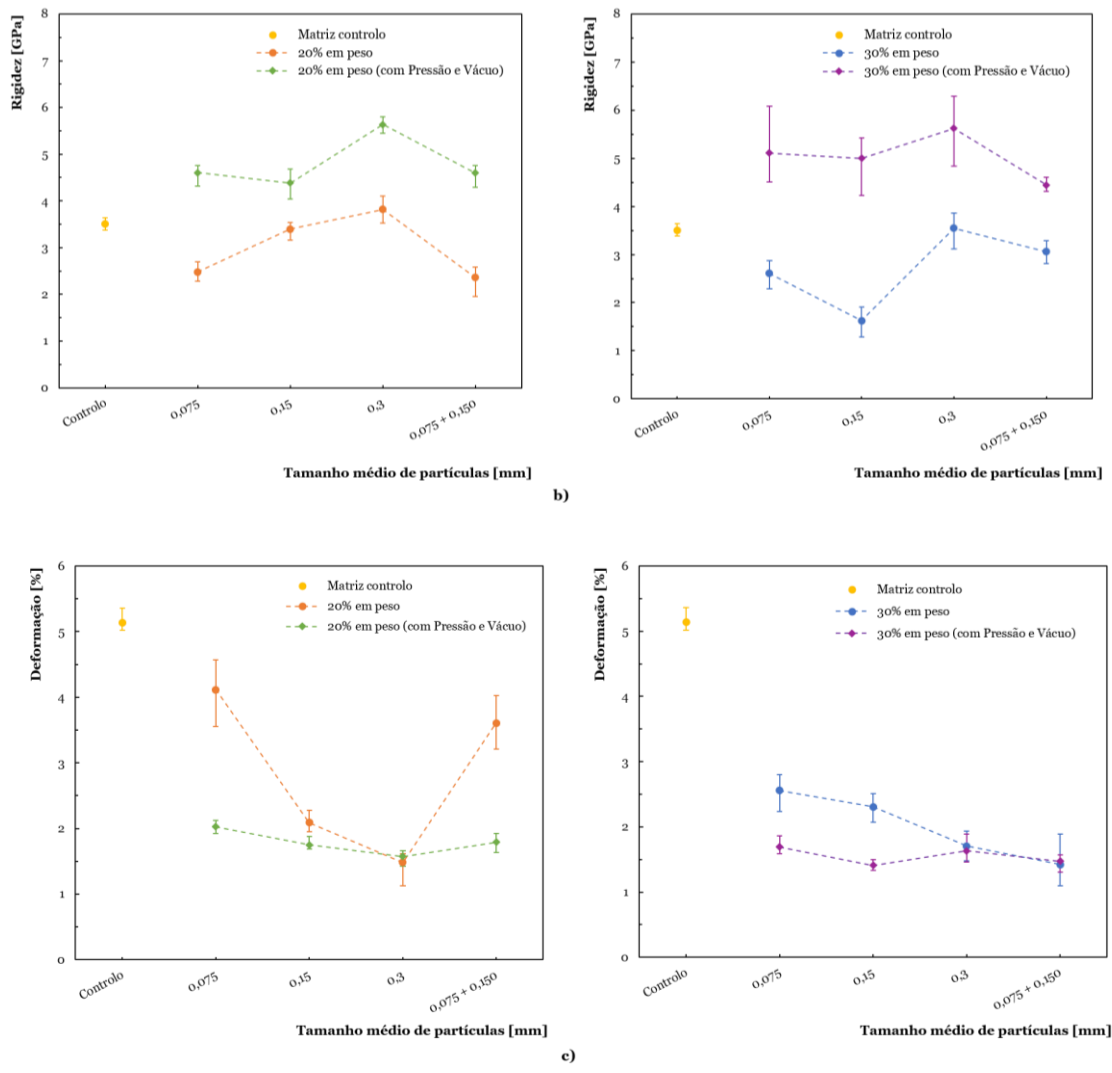


Figura 43 – Relação entre o tamanho médio das partículas e as propriedades de flexão - análise comparativa entre o processo sem e com Pressão e Vácuo: (a) Tensão máxima; (b) Módulo de rigidez; (c) Deformação de flexão.

Como é possível observar, as propriedades mecânicas foram bastante aprimoradas aplicando o segundo processo de fabricação. Relativamente à tensão máxima, os materiais com reforço de partículas de madeira sofreram uma perda menor em relação ao material de controlo, especialmente nos compósitos com partículas de dimensões de 0,075 mm e de 0,300 mm. No que diz respeito à rigidez, os resultados foram ainda mais satisfatórios, havendo um aumento de propriedades em relação a matriz de controlo em todos os compósitos. Destacam-se os compósitos com 20 wt. % e 30 wt. % de partículas de madeira de 0,300 mm, que tiveram um ganho de cerca de 60% na rigidez. Além disso, a percentagem de deformação foi ligeiramente reduzida na maioria dos compósitos com o aprimoramento do processo de fabricação.

A observação de melhorias nas propriedades de flexão ao empregar fibras de madeira de maior tamanho está em conformidade com estudos anteriores encontrados na literatura (Wang et al., 2015).

Os compósitos da terceira fase de fabricação para o núcleo, que passou pela tentativa de aumentar a percentagem de reforço de partículas de madeira, foram também testados com flexão em três pontos, cujo as propriedades mecânicas se encontram disponíveis na Tabela 24.

Tabela 24 - Propriedades mecânicas dos materiais compósitos (para o núcleo) da terceira fase de fabricação.

Terceira fase de fabricação						
Compósito		Tensão máxima [MPa]	Rigidez [GPa]	Deformação [%]		
Controlo		122,15 ± 4,15	3,50 ± 0,09	5,14 ± 0,13		
Partículas de madeira	0,075 mm	40 wt. %	54,50 ± 2,22	3,84 ± 0,31	1,56 ± 0,21	
	0,150 mm	40 wt. %	70,47 ± 6,23	5,15 ± 0,49	1,50 ± 0,15	
	0,300 mm	40 wt. %	71,03 ± 0,23	6,09 ± 0,62	1,26 ± 0,15	
		50 wt. %	59,90 ± 4,42	5,17 ± 1,16	1,30 ± 0,22	
	0,150 mm / 0,075 mm	20 wt. % / 20 wt. %	60,91 ± 2,63	4,65 ± 0,34	1,40 ± 0,09	

As propriedades mecânicas – tensão máxima, rigidez, e deformação – de todos compósitos produzidos para o núcleo do painel sanduíche, utilizando o procedimento com pressão e vácuo, foram organizadas por ordem crescente de percentagem de reforço de partículas de madeira, e são apresentadas nas Figuras 44, 45 e 46, respetivamente.

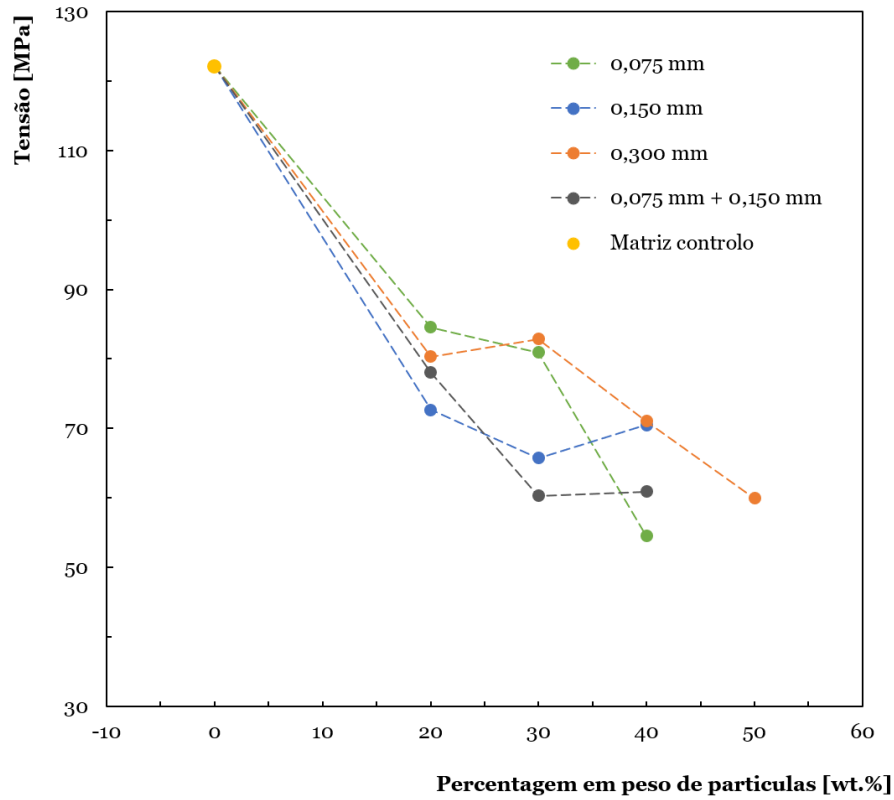


Figura 44 – Gráfico da tensão máxima de flexão dos materiais compósitos.

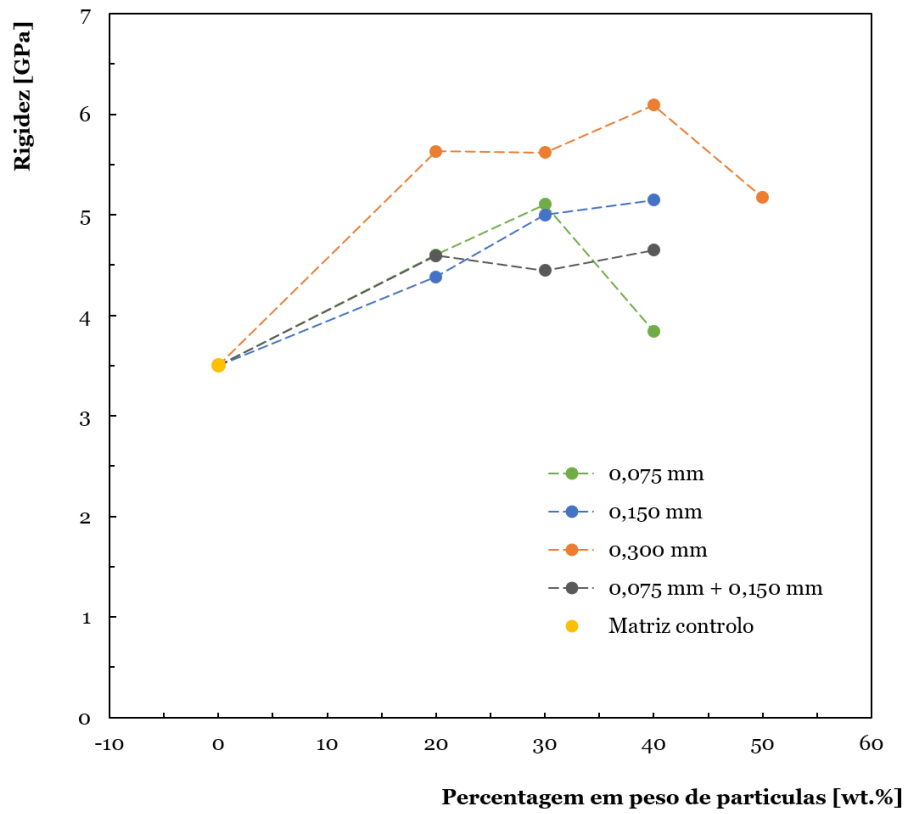


Figura 45 – Gráfico do módulo de rigidez dos materiais compósitos.

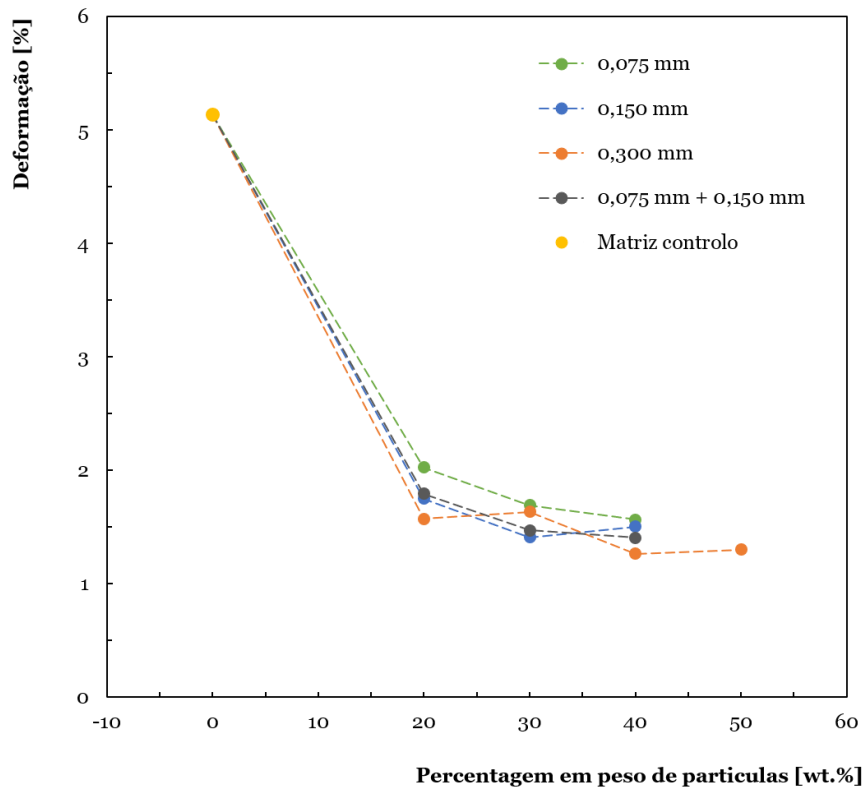


Figura 46 – Gráfico de deformação de flexão dos materiais compósitos.

Como é possível observar, as partículas com melhores resultados, principalmente na rigidez, foram as de dimensões de 0,300 mm. Em destaque, o compósito com 40% wt de partículas de madeira de 0,300 mm apresenta rigidez média de 6,09 GPa, ou seja, um aumento de cerca de 74% em comparação ao compósito de controle. No caso do compósito de 50 wt. % do mesmo reforço, este apresentou um desempenho inferior nas três propriedades mecânicas em análise em comparação com a percentagem anterior.

A Figura 47 ilustra uma comparação entre a curva representativa do controle com os compósitos reforçados com 20 wt. %, 30 wt. %, 40 wt. % e 50 wt. % de partículas de madeira de 0,300, uma vez que as amostras reforçadas com esta dimensão de partículas demonstraram os resultados mais favoráveis para o núcleo do painel sanduíche.

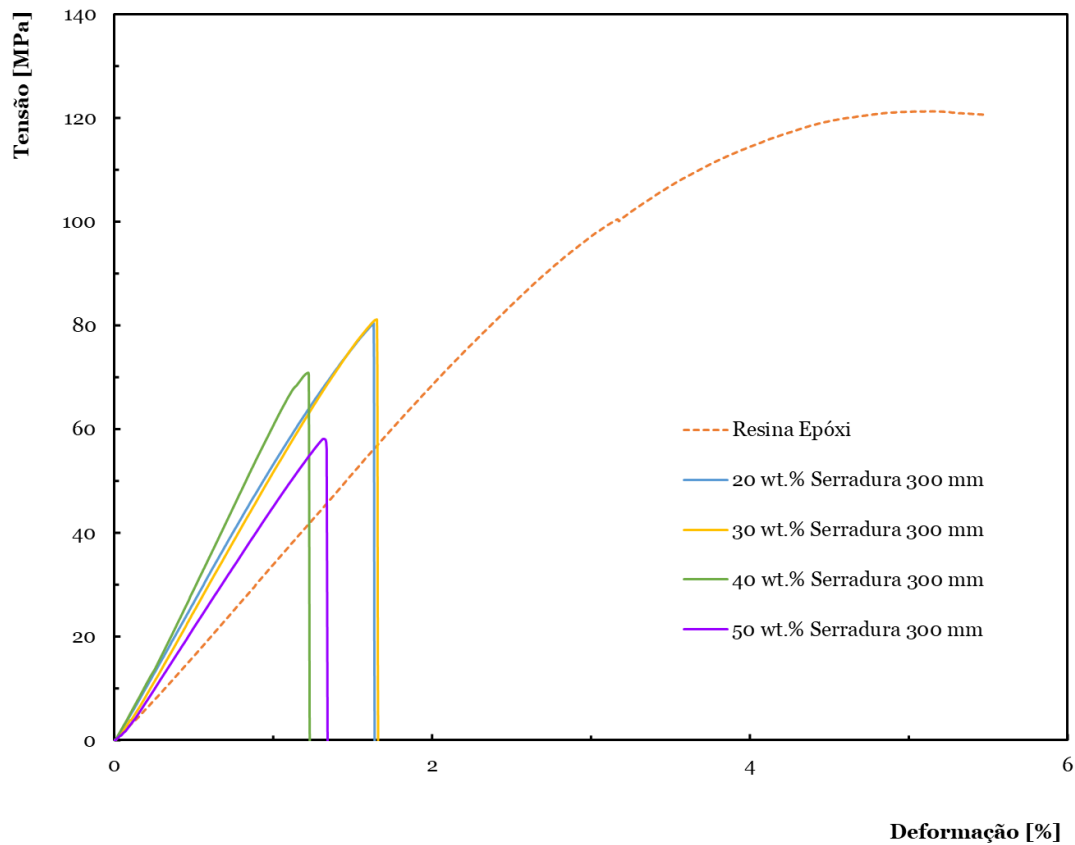


Figura 47 – Curvas representativas de tensão-deformação de flexão. Comparação entre a matriz de controle e os materiais compósitos (para o núcleo) com partículas de madeira de 0,300 mm.

As imagens SEM apresentadas na Figura 48 referem-se à superfície de fratura das amostras testadas com a matriz epóxi com 40 wt. % partículas de madeira de tamanho 0,300 mm, onde é possível observar a dispersão das partículas.

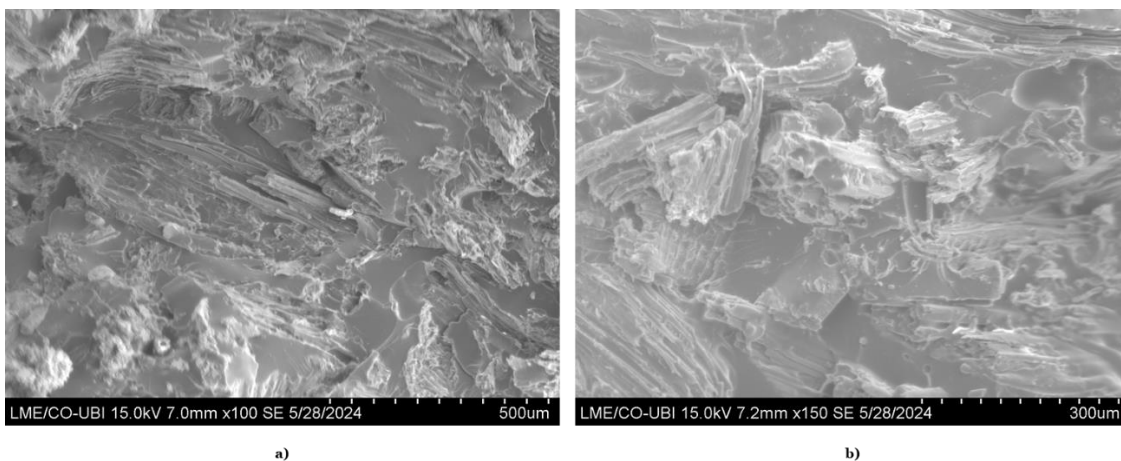


Figura 48 – Imagens SEM dos materiais compósitos com 40 wt. % de reforço de partículas de madeira de 0,300 mm- (a) ampliação 100x e (b) ampliação 150x.

## 6.2. Ensaio de dureza do núcleo

A Figura 49 mostra os valores de dureza, tanto da amostra de controlo, como dos compósitos reforçados com 20 wt. %, 30 wt. %, 40 wt. % e 50 wt. % de partículas de madeira de 0,300 mm.

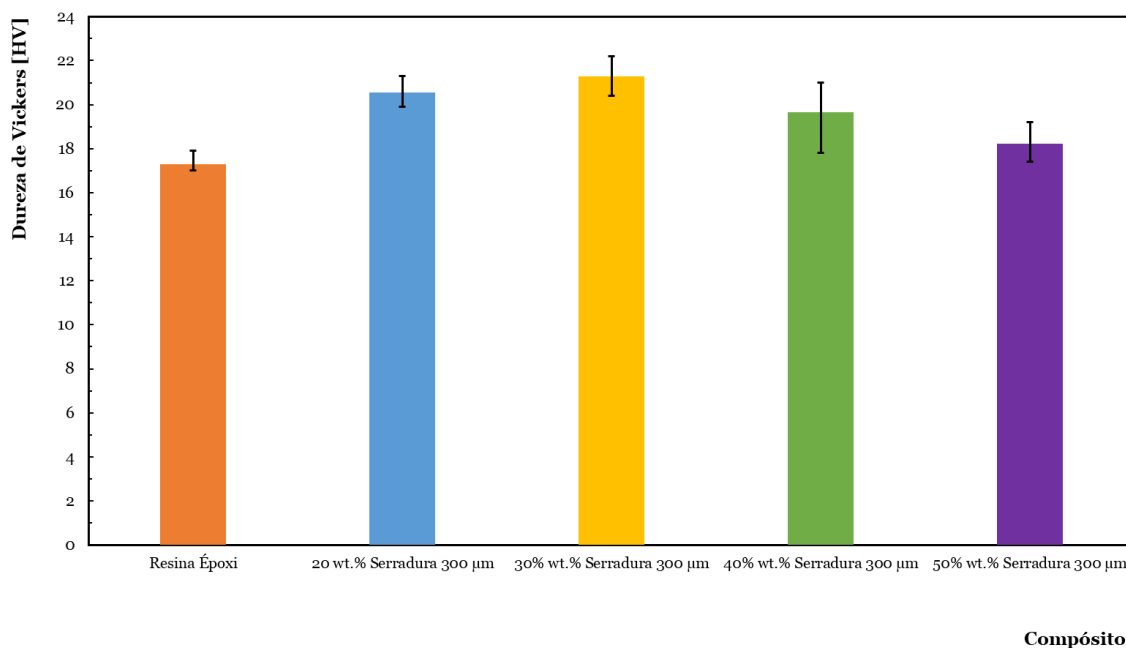


Figura 49 – Dureza de *Vickers* da matriz de controlo e dos materiais compósitos (para o núcleo) com partículas de madeira de 0,300 mm.

Embora o compósito com 30 wt. % de reforço seja a mais elevada, os compósitos com 20 wt. % e 40 wt. % apresentam durezas bastante semelhantes. Especificamente, em termos de dureza de *Vickers*, o compósito com 30 wt. % apresenta uma dureza média de 21,28 HV, o compósito com 20 wt. % tem dureza média de 20,54 HV, e o compósito com 40 wt. % possui uma dureza média de 19,64 HV.

Por outro lado, o compósito de 50 wt. % apresenta uma dureza inferior, mais próxima ao valor da amostra de controlo. O compósito com 50 wt. % de reforço apresenta um valor de dureza de 18,22 HV, enquanto a amostra de controlo possui dureza de 17,3 HV.

O facto de a dureza diminuir com o aumento da percentagem em peso, apesar de neste caso apenas a partir dos 30 wt. %, está de acordo com a literatura (Khan et al., 2021; Nukala et al., 2022). Além disso, ao comparar estudos sobre materiais compósitos reforçados com madeira, nota-se que os compósitos com matriz de resina epóxi (Khan et al., 2021; presente estudo) apresentam valores de dureza significativamente superiores aos dos compósitos com matriz de polipropileno (Nukala et al., 2022).

Para enriquecimento dos resultados, foram feitas imagens SEM das indentações de microdureza de *Vickers* da matriz de controle e do material compósito com 40 wt. % de partículas de madeira de 0,300 mm, ilustradas na Figura 50.

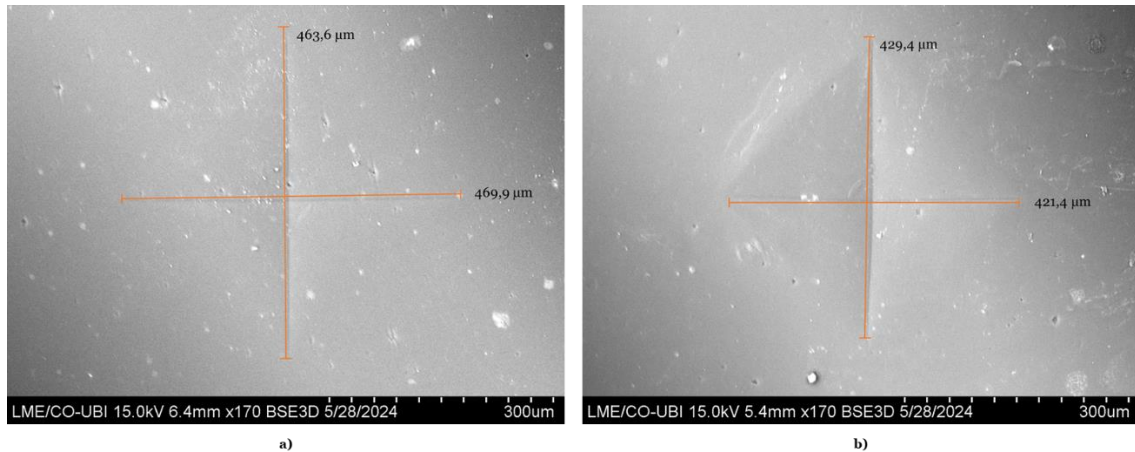


Figura 50 – Imagens SEM das indentações de microdureza de *Vickers* da matriz de controle (a) e do material compósito com 40 wt. % de partículas de madeira de 0,300 mm (b), e respectivas distâncias das diagonais.

### 6.3. Ensaios de Flexão em Três Pontos da Sanduíche

A fim de avaliar o comportamento estático à flexão do painel sanduíche composto por madeira e linho, foram realizados testes de flexão em três pontos. Os danos típicos nos ensaios estão representados na Figura 51, onde é visível que ocorreu uma fatura por flexão inferior, com a propagação da fissura ao longo do núcleo.



Figura 51 – Danos típicos verificados nos ensaios de flexão em três pontos da sanduíche.

A Figura 52 a) apresenta a curva típica de tensão de flexão-deslocamento do revestimento (face) isolado, enquanto a Figura 52 b) ilustra as curvas típicas de tensão de flexão da face-deslocamento (a laranja) e de tensão de corte do núcleo-deslocamento (a azul), do painel sanduíche.

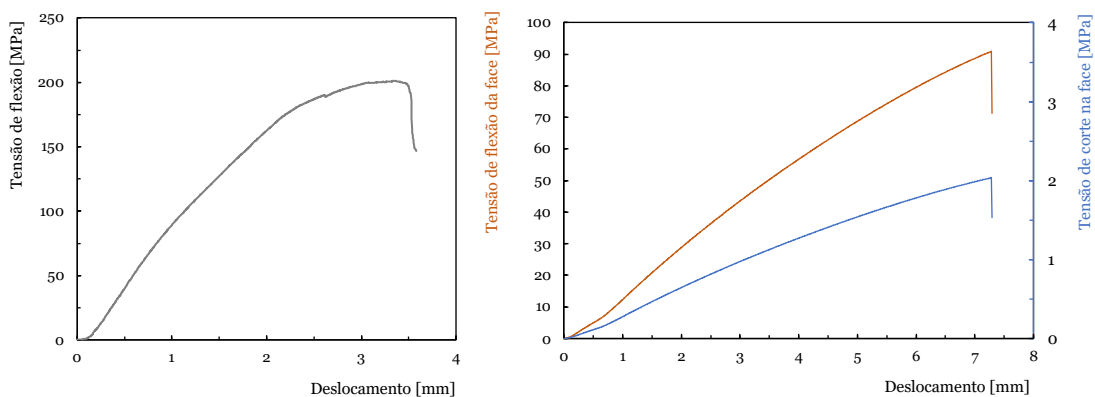


Figura 52 – Curvas típicas: a) Tensão versus deslocamento da face isolada; b) Tensão de flexão da face versus deslocamento e tensão de corte do núcleo versus deslocamento da sanduíche.

Analisando a Figura 51 a), que diz respeito ao comportamento do revestimento de forma isolada, podemos constatar que a curva apresenta um aumento linear da tensão de flexão com o deslocamento (região elástica) até atingir aproximadamente 100 MPa. De seguida, há uma transição para um comportamento não linear até a tensão máxima ser atingida ( $193,58 \pm 14,83$  MPa), momento em que ocorre a falha do material de revestimento.

Nas curvas típicas do painel sanduíche completo, podemos observar que ambas, tensão de flexão da face e tensão de corte do núcleo, apresentam um comportamento praticamente linear até a tensão máxima ser atingida ( $92,79 \pm 4,32$  MPa). Após esse pico, tanto a tensão de flexão da face quanto a tensão de corte do núcleo sofrem uma queda abrupta, indicando o momento de falha dos compósitos sanduíche. Esse comportamento é documentado na literatura, em estudos que utilizam núcleos de madeira (Benzidane et al., 2022).

Desta forma, pode-se inferir que o revestimento com fibras de linho aumenta a resistência à flexão da sanduíche. O módulo de rigidez do revestimento ( $8,82 \pm 0,65$  GPa) é maior que o do núcleo de partículas de madeira escolhido ( $6,09 \pm 0,62$  GPa), resultando na melhoria da tensão de flexão. Este aumento na resistência está em conformidade com a bibliografia (Zhang et al., 2018).

## 6.4. Ensaios de Compressão da Sanduíche

### 6.4.1. Compressão Lateral

Este ensaio, aplicado ao painel sanduíche, teve como objetivo determinar a capacidade do mesmo em resistir a uma força de compressão na posição lateral/vertical, bem como analisar os danos decorrentes dessa aplicação. Durante e após os ensaios, os danos

sofridos pelo painel sanduíche foram minuciosamente observados e documentados, sendo alguns deles ilustrados na Figura 53.

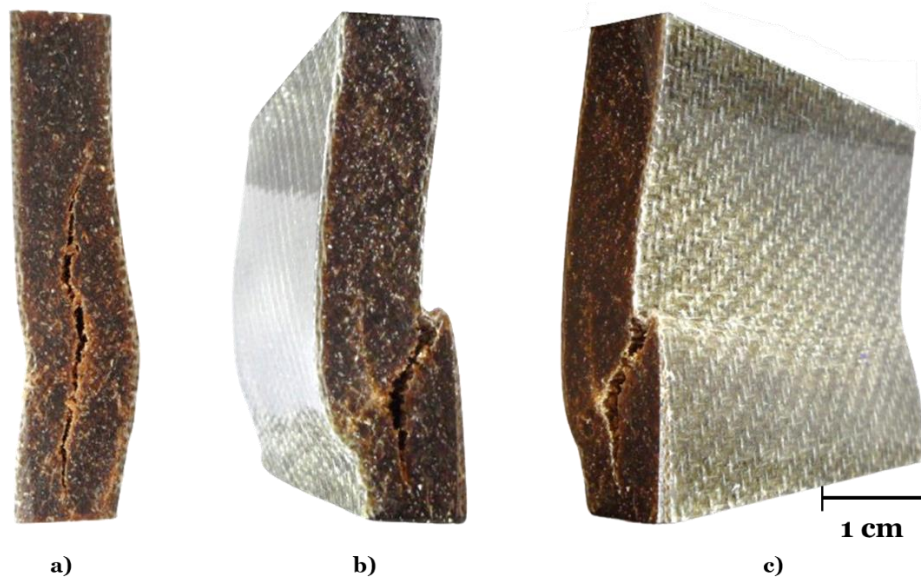


Figura 53 – Diferentes danos no teste de compressão lateral: a) ruptura por compressão ao corte do núcleo; b) “Shear crimping” na pele e falha por compressão do núcleo; c) esmagamento da pele e falha do núcleo.

Como é possível observar, a resistência à compressão nesta posição é determinada pela pele (fibras de linho com resina epóxi) e não pelo núcleo (partículas de madeira com matriz epóxi), uma vez que a primeira oferece uma maior resistência à aplicação forças de compressão sucessivamente crescente.

Na Figura 54, são apresentadas as curvas que ilustram o comportamento do painel sanduíche durante os ensaios, mostrando a deformação em função do aumento da tensão.

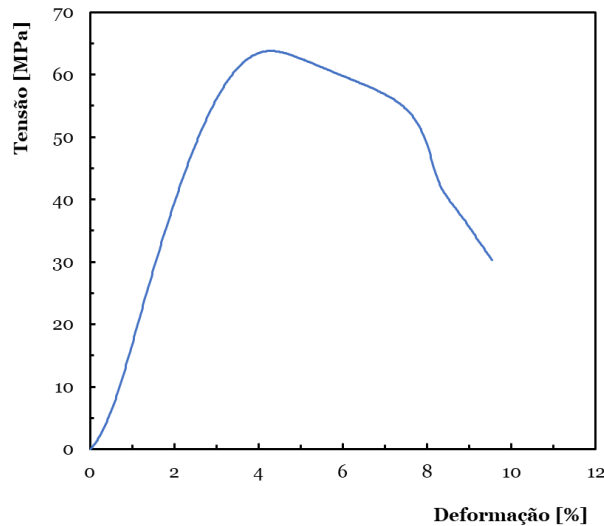


Figura 54 – Curva representativa do painel sanduíche nos ensaios de compressão lateral: Tensão vs Deformação.

Como se pode observar, inicialmente, a tensão aplicada é proporcional à deformação (assim como a força ao deslocamento), o que indica que o painel responde elasticamente à carga aplicada. Após a região linear, as curvas atingem um pico, indicando que o painel sanduíche atingiu o seu limite de resistência à compressão. É importante salientar que o valor médio de resistência à compressão lateral do painel sanduíche é de  $61,39 \pm 2,75$  MPa, correspondente a uma deformação de  $4,31 \pm 0,04$  %.

Os danos típicos e o perfil da curva observados estão em concordância com um estudo que utilizou o mesmo revestimento, porém com um núcleo diferente, feito de cortiça. No entanto, o painel sanduíche com núcleo de madeira desenvolvido neste trabalho apresenta uma resistência à compressão lateral significativamente superior, sendo aproximadamente quatro vezes maior do que a do painel com núcleo de cortiça (Sivalingam et al., 2022).

#### **6.4.2. Compressão Horizontal**

Em semelhança ao ensaio anterior, os ensaios de compressão horizontal visaram avaliar a capacidade do painel sanduíche de resistir a forças de compressão, desta vez na posição horizontal, e analisar os danos decorrentes dessa aplicação. Na Figura 55, observa-se o mesmo provete antes do ensaio, sem danos, visto ao microscópio, e após o ensaio, com danos, observado tanto ao microscópio quanto a olho nu.

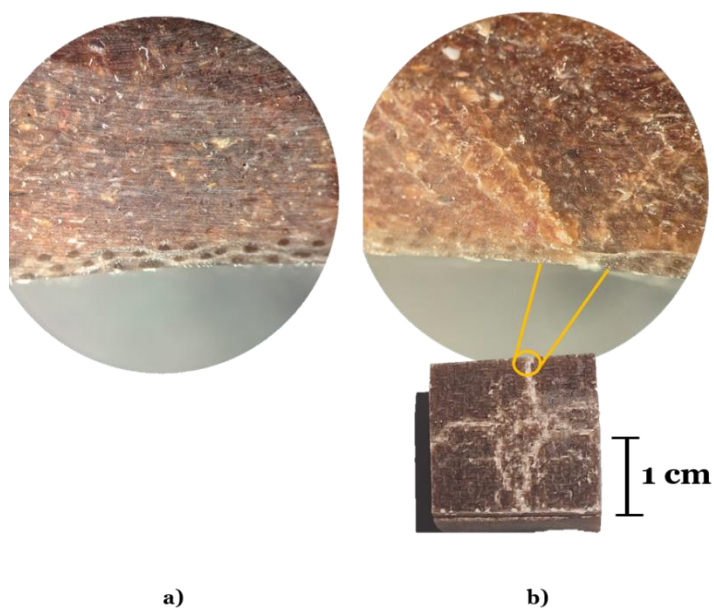


Figura 55 – Provede representativo nos ensaios de compressão horizontal: a) Antes do ensaio, visto ao microscópio; b) Após o ensaio, visto a olho nu e ao microscópio.

A curva representativa apresentada na Figura 56 mostra o comportamento do painel sanduíche durante os ensaios, mostrando a deformação em função do aumento da tensão.

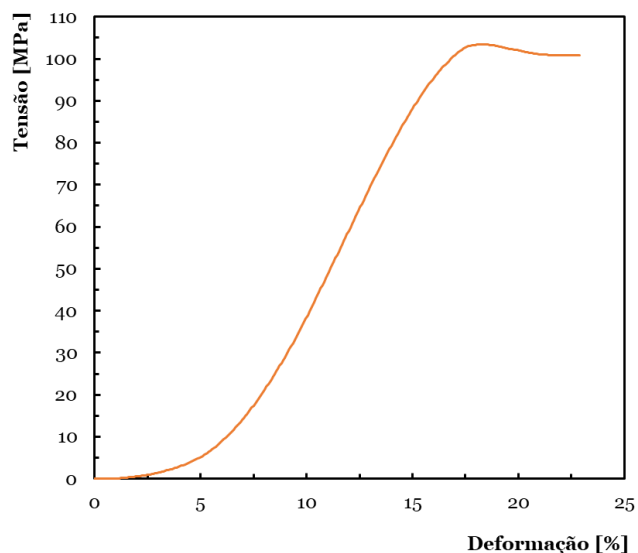


Figura 56 – Curva representativa do painel sanduíche nos ensaios de compressão horizontal: Tensão vs Deformação.

O gráfico apresenta uma fase inicial onde a tensão aumenta lentamente com a deformação até cerca de 5 %. Esta fase inicial, caracterizada por uma baixa inclinação, indica que o painel sanduíche se está a ajustar à compressão. Após essa fase de

acomodação, a curva exibe uma inclinação acentuada, onde a tensão aumenta linearmente com a deformação. Este comportamento continua até alcançar um pico, que representa a capacidade máxima de compressão horizontal do painel. A partir deste ponto, a curva demonstra uma diminuição na tensão à medida que a deformação aumenta, indicando que o painel começou a falhar ou a sofrer uma deformação irreversível.

Em termos de valores, o valor médio de resistência à compressão horizontal do painel sanduíche é de  $96,66 \pm 4,42$  MPa, correspondente a uma deformação de  $18,36 \pm 5,71$  %.

## 6.5. Ensaios de Fluência e Relaxação do Núcleo e da Sanduíche

Para analisar o comportamento viscoelástico tanto do núcleo quanto do painel sanduíche, foram conduzidos ensaios de fluência e relaxação. Para assegurar que todos os testes viscoelásticos ocorressem dentro do regime elástico, foi inicialmente realizado um ensaio de fluência no núcleo, aplicando uma tensão de flexão constante de 42 MPa. Tal como previsto, essa tensão foi excessiva e ultrapassou o regime elástico do material, que culminou em danos permanentes e cuja curva típica obtida (Yin et al., 2023) se encontra ilustrada na Figura 57.

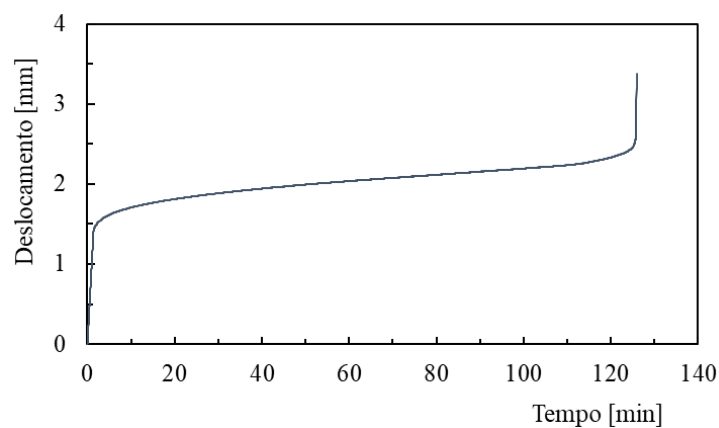


Figura 57 – Curva de fluência do núcleo da sanduíche para uma tensão de flexão de 42 MPa.

Como se pode observar, o material falhou, permitindo limitar as tensões a utilizar posteriormente, tanto nos ensaios do núcleo como da sanduíche, descritas anteriormente na **seção 5.2.4 e 5.3.4**. Além disso, conforme ilustrado na Figura 57, a curva obtida está de acordo com a literatura, que indica que quando um polímero é submetido a uma carga constante, ele inicialmente deforma-se elasticamente e, em seguida, deforma-se

lentamente ao longo do tempo até que a cedência ou rutura provoquem a falha. Na curva, podemos identificar a fase primária, ou seja, fase inicial do processo de carga, na qual a taxa de fluência diminui com o tempo. Em seguida, o material entra na fase secundária, na qual a taxa de deformação é estável e constante ao longo do tempo, seguida da terceira zona, na qual ocorre um aumento rápido da taxa de deformação até a falha do equipamento, que ocorre aproximadamente 125 minutos após o início do ensaio (Misra et al., 2011).

Primeiramente, para analisar os resultados dos ensaios de relaxação realizados no controlo (matriz epóxi), no núcleo e na estrutura sanduíche, as curvas ilustradas na Figura 58 exibem as respostas em termos de relaxação de tensões dos três materiais. Além disso, é apresentado um gráfico comparativo entre os três materiais, no qual são mostradas curvas para uma tensão de flexão de 21 MPa.

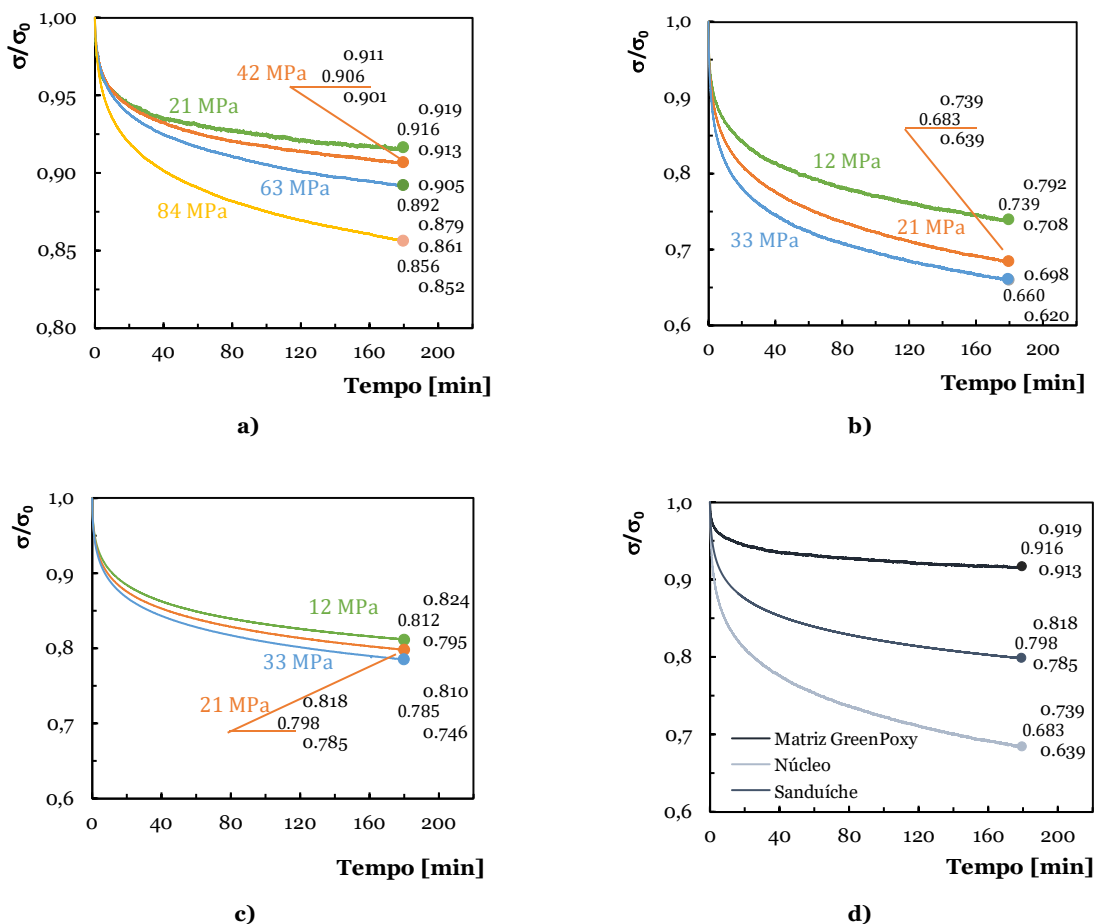


Figura 58 – Curvas de relaxação de tensões: a) Matriz epóxi; b) Núcleo da sanduíche; c) Sanduíche; d) Diferentes materiais para uma tensão de flexão de 21 MPa

As Figuras 58 a), b) e c) representam a tensão média de flexão em função do tempo. Para cada condição analisada, os pontos finais na curva representam os valores médios com respectivos máximos e mínimos.

Em todos os materiais estudados, verifica-se que a tensão decresce com o tempo, de um valor de tensão inicial ( $\sigma_0$ ) para um valor estável final esperado ( $\sigma_\infty$ ). Esta tendência é mais evidente à medida que a tensão de flexão a que a experiência é realizada aumenta. O valor estável final não é visível nas curvas apresentadas, uma vez que este estudo é centrado em ensaios de curto prazo, que mostram ser um método fácil, rápido e fiável para prever o comportamento dos materiais a longo prazo (Reis et al., 2020).

Analisando detalhadamente cada condição do controlo, observa-se que, para uma deformação correspondente a 21 MPa, a tensão diminui continuamente até atingir valores 8,4% inferiores ao valor inicial. Esta percentagem de redução aumenta progressivamente para deformações correspondentes a 42 MPa, 63 MPa e 84 MPa, resultando em queda de 9,4%, 10,8% e 14,4%, respetivamente.

Em relação ao núcleo da sanduíche, para deformações de 12 MPa, 21 MPa e 33 MPa, observa-se uma redução contínua na tensão, atingindo valores 26,1%, 31,7% e 34,0% inferiores aos iniciais. Finalmente, na estrutura da sanduíche, para deformações de 12 MPa, 21 MPa e 33 MPa, a tensão diminui continuamente até atingir valores 18,8%, 20,2% e 21,5% inferiores aos valores iniciais.

Em semelhança ao que é relatado na literatura, que existe uma fase inicial da curva, na qual o valor da tensão diminui de forma mais evidente em relação ao restante período de tempo (Reis et al., 2020).

Comparando o comportamento dos três materiais (controlo, núcleo e sanduíche) nas mesmas condições, deformação correspondente de 21 MPa, observa-se que a redução da tensão desde o ponto inicial até ao fim das 3 horas foi significativamente maior para o núcleo (31,7%), seguida da sanduíche (20,2%) e, por fim, o controlo (8,4%).

A Figura 59 demonstra a variação da tensão de flexão dos três materiais para cada de condição testada, onde podemos observar que esta aumenta para valores de tensão inicial crescentes, seguindo uma linha de tendência linear, no caso do núcleo e da sanduíche. No caso da matriz de controlo, esse aumento segue uma linha de tendência exponencial.

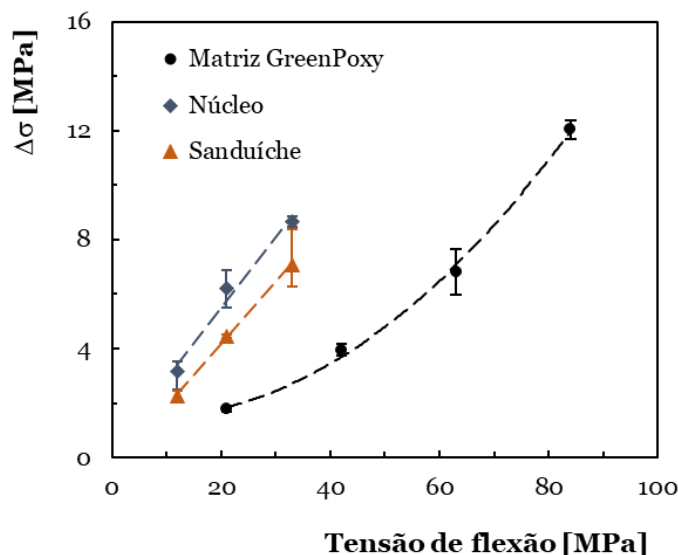


Figura 59 – Variação da tensão de flexão para os três materiais.

A capacidade de modelar a resposta mecânica de um material é crucial para prever o seu comportamento estrutural a longo prazo. No que diz respeito à relaxação de tensões, a literatura apresenta diversos modelos para esse fim, sendo que a função Kohlrausch-Williams-Watts (KWW) tem demonstrado ser mais adequada para modelar os processos de relaxação (Reis et al., 2019, 2020). De acordo com este modelo, a função de relaxação  $\phi$  em função do tempo é dada por:

$$\phi = \frac{\sigma(t)}{\sigma_0} = e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^\beta} \quad (9)$$

onde  $\sigma(t)$  e  $\sigma_0$  são a tensão no tempo  $t$  e em  $t=0$ ,  $\beta$  é um expoente de potência fracionada (fator não exponencial) e  $\tau$  o tempo de relaxação KWW.

A Figura 60 a) apresenta a comparação entre os resultados experimentais e teóricos, de acordo com o modelo KWW, na matriz para a tensão de 21 MPa (condição de ensaio comum aos três materiais). Para prever o efeito da tensão de flexão na relaxação de tensões, a Figura 60 b) apresenta os parâmetros do modelo KWW em função da tensão de flexão. De forma a validar o modelo, considerou-se a tensão de flexão intermédia de 73,5 MPa para calcular os parâmetros  $\beta$  e  $\tau$ , correspondente às marcas sem preenchimento na Figura 60 b). Por fim, a Figura 60 c) compara a curva estimada pelo modelo KWW com a curva média obtida experimentalmente.

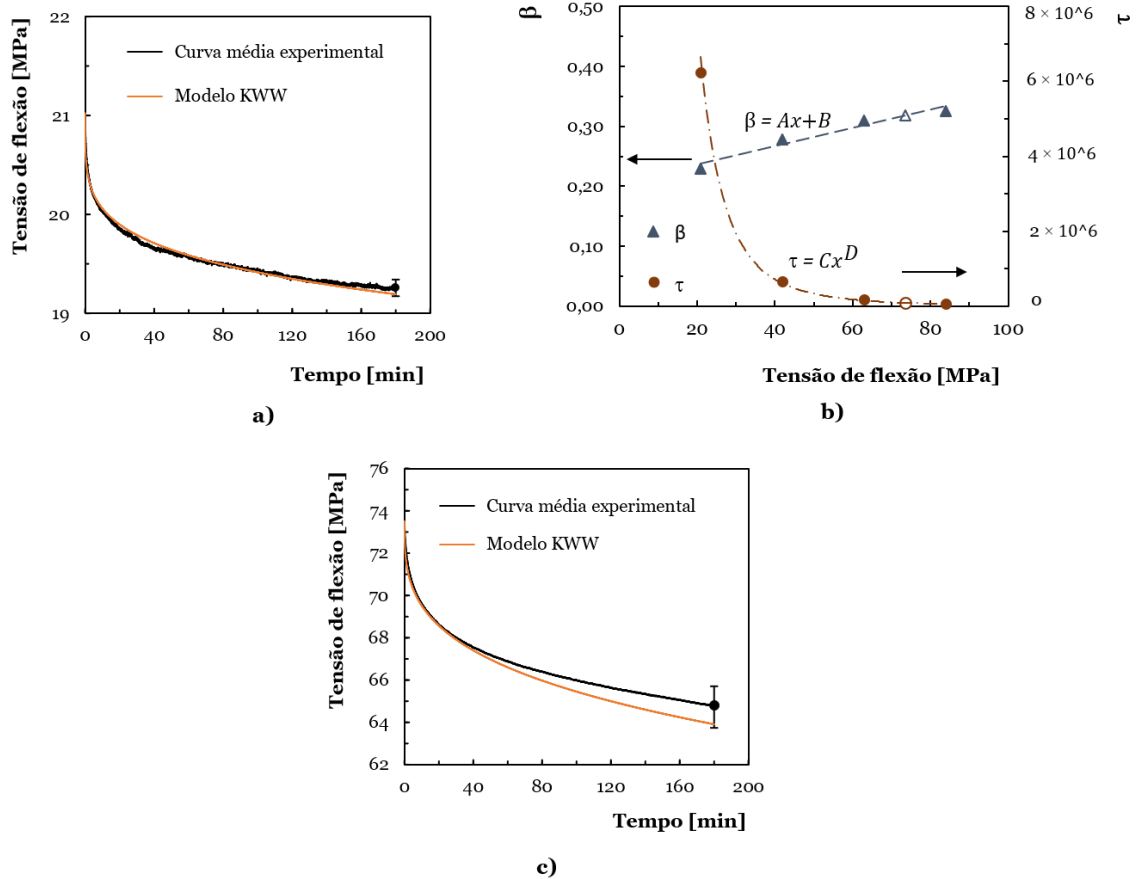


Figura 60 – Comparação entre curva média experimental e a construída pelo modelo KWW para a matriz: a) Tensão de flexão de 21 MPa; b) Parâmetros KWW versus tensão de flexão; c) Tensão de flexão de 73,5 MPa.

A Figura 60c) compara os dados teóricos com o resultado experimental, e a banda ao final das três horas a dispersão dos resultados experimentais. De salientar que o erro entre os dois resultados passadas três horas é de 1,4%.

A mesma análise foi realizada com os dados obtidos nos ensaios ao painel sanduíche (Figura 61). No entanto, o valor intermédio utilizado para validar o modelo foi de 27 MPa.

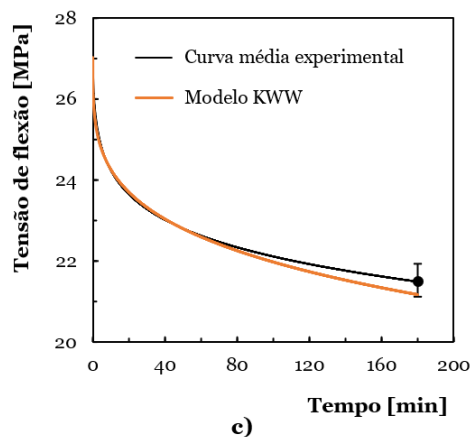
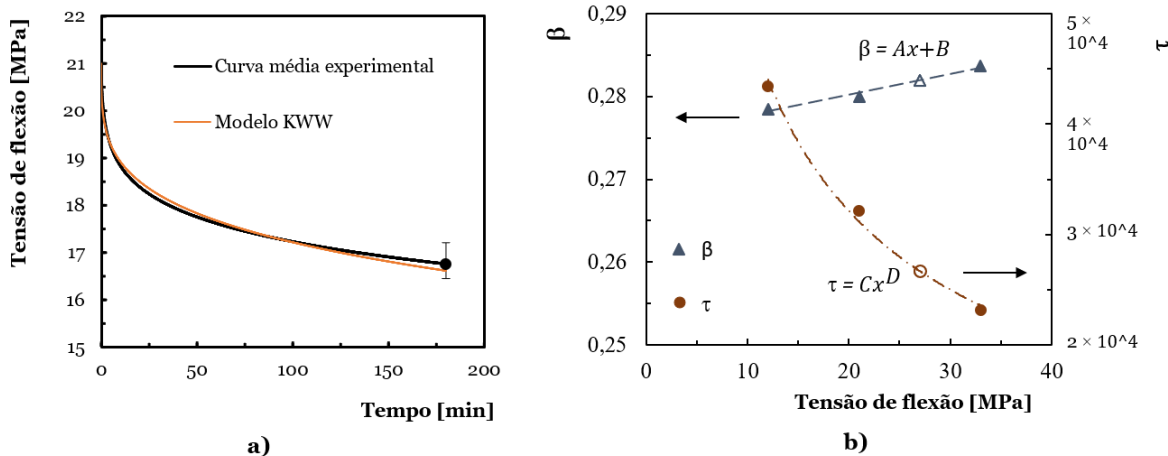


Figura 61 – Comparação entre curva média experimental e a construída pelo modelo KWW para a sanduíche: a) Tensão de flexão de 21 MPa; b) Parâmetros KWW versus tensão de flexão; c) Tensão de flexão de 27 MPa.

Repetindo a análise dos resultados já efetuada anteriormente, o erro entre os valores teóricos do modelo KWW e o valor experimental passadas três horas de testes para a sanduíche é de 1,5%.

A capacidade desses modelos de prever o comportamento estrutural a longo prazo em relação à relaxação de tensões também foi avaliada. Para esse fim, a qualidade do ajuste é apresentada na Figura 62, considerando uma tensão de flexão na face de 27 MPa e um tempo de teste de 200 horas (aproximadamente 66,7 vezes maior que o utilizado nos testes de curto prazo).

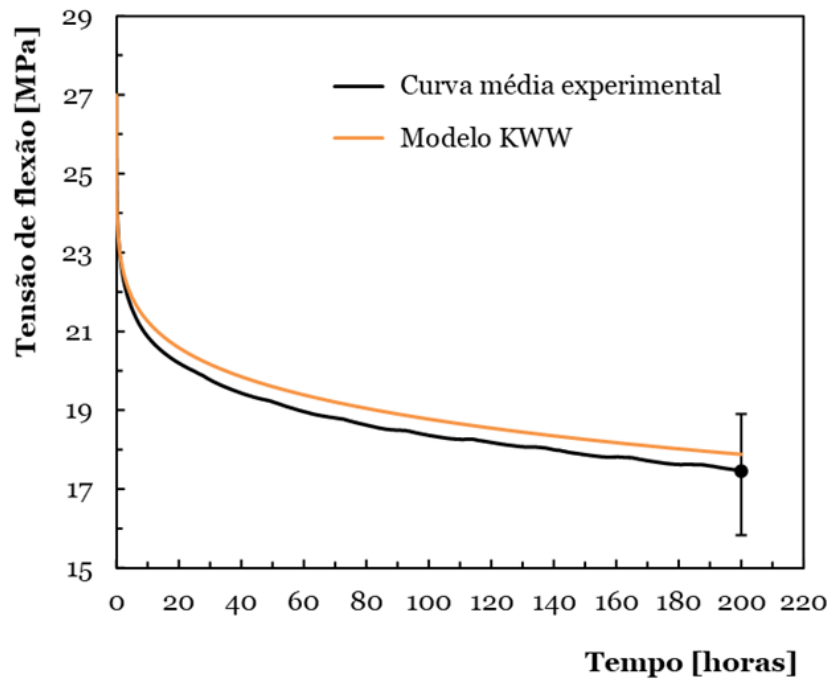


Figura 62 – Validação do modelo para 100 horas e para a sanduiche a uma tensão de flexão de 27 MPa.

Pela análise dos resultados, o erro entre os valores experimental e teórico ao fim de 100 horas é de apenas 2,2 % e ao fim de 200 horas é de 2,4%. Além disso, os valores previstos ao fim de 200 h de ensaio estão dentro das bandas de dispersão, que representa os respectivos valores máximo e mínimo obtidos nos ensaios experimentais. Conclui-se deste modo que o modelo prevê com bastante exatidão a resposta à relaxação de tensões do material, podendo ser aplicado com boa exatidão.

A Tabela 25 apresenta todos os parâmetros do modelo KWW para todas as condições testadas nos três materiais analisados. Além disso, são fornecidos os valores experimentais e previstos pelo modelo para a tensão de flexão após 3 horas, juntamente com os respectivos erros.

Tabela 25 - Parâmetros e precisão do modelo KWW para a relaxação de tensões: matriz epóxi, núcleo e sanduíche.

Materiais	Tensão de flexão inicial [MPa]	$\beta$	$\tau$	Tensão de flexão após 3 horas [MPa]		
				Valor experimental	Valor do modelo KWW	Erro [%]
Matriz epóxi	21	0,229	$6,23 \times 10^6$	19,258	19,193	0,338
	42	0,278	$6,57 \times 10^5$	38,093	37,929	0,432
	63	0,310	$1,69 \times 10^5$	56,199	55,909	0,517
	73.5	0,318	$8,77 \times 10^4$	64,790	63,911	1,356
	84	0,325	$4,82 \times 10^4$	71,900	71,399	0,697
Núcleo	12	0,279	$1,21 \times 10^4$	8,882	8,833	0,559
	21	0,299	$4,23 \times 10^3$	14,356	14,233	0,860
	27	0,282	$4,22 \times 10^3$	17,409	17,937	3,025
	33	0,274	$3,93 \times 10^3$	21,79971434	21,50258214	1,363
Sanduíche	12	0,278	$4,34 \times 10^4$	9,757	9,675	0,833
	21	0,280	$3,22 \times 10^4$	16,759	16,617	0,848
	27	0,282	$2,32 \times 10^4$	21,490	21,171	1,487
	33	0,284	$2,67 \times 10^4$	25,898	25,641	0,995

Considerando todos os materiais e condições, a partir da Tabela 25 é possível observar que o erro máximo é inferior a 3,1%, o que confirma a boa exatidão do modelo.

Por fim, a Tabela 26 apresenta os coeficientes e constante da equação  $\beta = Ax + B$ , bem como o coeficiente e expoente da equação  $\tau = Cx^D$ . Para ambas as equações, são fornecidos ainda os coeficientes de correlação.

Tabela 26 - Valores das equações que se ajustam ao modelo KWW.

Materiais	$\beta$			$\tau$		
	A	B	R	C	D	R
Matriz epóxi	$1,53 \times 10^{-3}$	0,205	0,975	$2,46 \times 10^{11}$	3,455	0,998
Núcleo	$-3,30 \times 10^{-4}$	0,291	0,268	$1,84 \times 10^5$	1,146	0,925
Sanduíche	$2,52 \times 10^{-4}$	0,275	0,987	$2,04 \times 10^5$	0,617	0,996

R = Coeficiente de correlação

Procedendo à análise dos resultados dos ensaios de fluência, que foram conduzidos tanto na amostra de controlo (matriz epóxi) quanto no núcleo e na estrutura sanduíche, as curvas apresentadas na Figura 63 demonstram as respostas dos três materiais em termos de fluência de tensões dos três materiais. Adicionalmente, no canto inferior direito da figura, é incluído um gráfico comparativo que exhibe as curvas de fluência dos três materiais para uma tensão de flexão de 21 MPa.

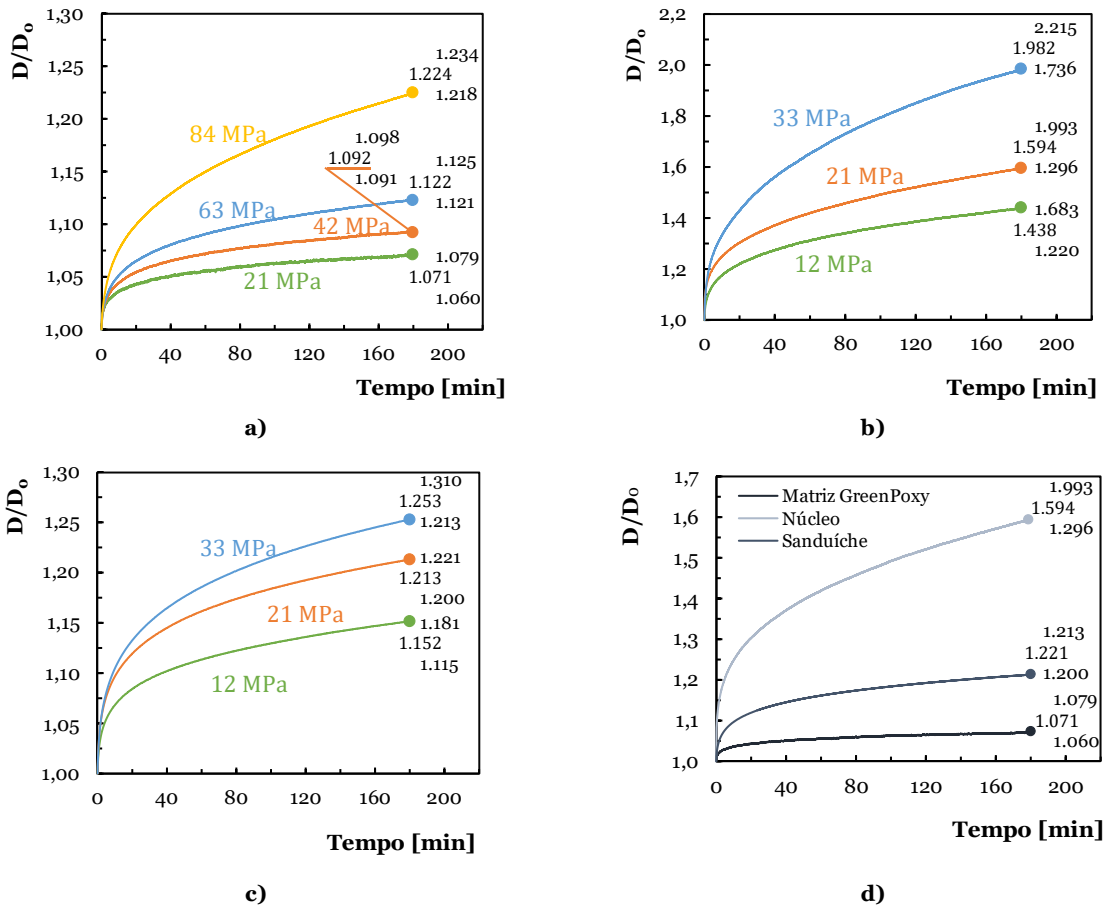


Figura 63 – Curvas de fluência: a) Matriz epóxi; b) Núcleo da sanduíche; c) Sanduíche; d) Diferentes materiais para uma tensão de flexão de 21 MPa.

As Figuras 63 a), b) e c) representam o deslocamento em qualquer momento do ensaio dividido pelo seu valor inicial ( $D_0$ ). Para cada condição analisada, os pontos finais na curva representam os valores médios com respectivos máximos e mínimos.

As curvas observadas mostram três etapas distintas: deslocamento instantâneo, fase de fluência primária e fase de fluência secundária. A terceira fase só se manifesta sob tensões mais elevadas ou em períodos mais prolongados, dependendo dos níveis de tensão aplicados. A fase de fluência primária apresenta uma taxa de deslocamento que

diminui progressivamente, enquanto a fase secundária é marcada por uma taxa de deflexão que se mantém praticamente constante.

Em todos os casos, o deslocamento por fluência aumenta com o tempo e com a tensão de flexão aplicada. Analisando a primeira condição ensaiada na matriz de controlo (21 MPa), observa-se um aumento de 7,09% em relação ao valor inicial de deslocamento. A percentagem de aumento torna-se progressivamente maior para tensões de flexão de 42 MPa, 63 MPa e 84 MPa, resultando em aumentos de 9,24%, 12,28% e 22,43%, respetivamente.

No que diz respeito ao núcleo da sanduíche, para tensões de 12 MPa, 21 MPa e 33 MPa, observa-se um aumento progressivo no deslocamento, com quedas de 43,79%, 59,40% e 98,15% em relação aos valores iniciais. No painel sanduíche, para as mesmas tensões de 12 MPa, 21 MPa e 33 MPa, a tensão também aumenta de forma contínua, alcançando acréscimos de 15,16%, 21,30% e 25,29% em comparação com os valores iniciais.

O facto de o aumento percentual ser significativamente maior para tensões mais altas é característico de compósitos poliméricos sujeitos a fluência de curto prazo, onde o ensaio ainda termina na região de fluência secundária, com uma taxa de deformação estável (Reis et al., 2020; Wang et al., 2015)

Comparando o comportamento dos três materiais (controlo, núcleo e sanduíche) na condição de tensão de 21 MPa, observa-se que o aumento do deslocamento desde o ponto inicial até ao fim das 3 horas foi significativamente maior para o núcleo (59,40%), seguida da sanduiche (21,30%) e, por fim, a matriz epóxi (7,09%).

A Figura 64 ilustra como a variação do deslocamento dos três materiais varia em relação ao deslocamento no minuto inicial. Observa-se que, para o núcleo e o painel sanduíche, a variação aumenta com valores iniciais de deslocamento mais altos, seguindo uma tendência linear. Em contraste, para a matriz epóxi, o aumento segue uma tendência exponencial.

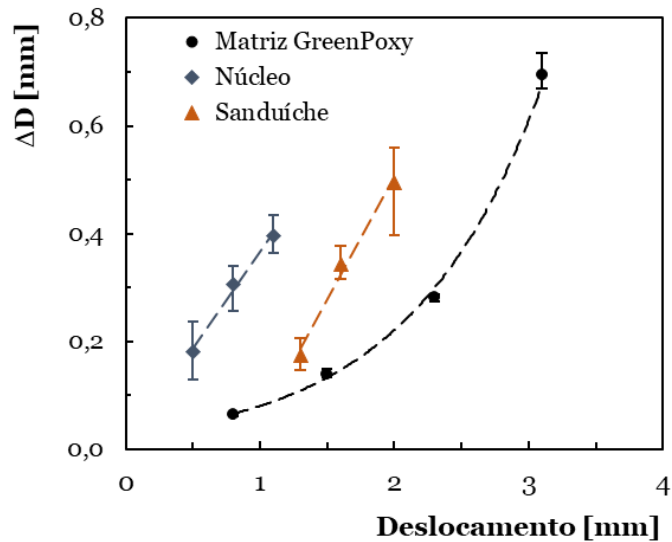


Figura 64 – Variação do deslocamento para os três materiais.

No contexto da fluência, diversos modelos têm sido empregados para descrever o comportamento viscoelástico de compósitos poliméricos reforçados com fibras. Entre esses, o modelo de lei de potência de *Findley* destaca-se como um dos mais amplamente adotados, sendo inclusive recomendado pelo Manual de Projeto de Plásticos Estruturais da *American Society of Civil Engineers* para a análise e o dimensionamento da resistência a longo prazo. No entanto, a literatura também apresenta estudos que aplicam a lei de potência de *Findley* a dados de fluência de curto prazo (Almeida et al., 2018; Reis et al., 2020; Santos et al., 2020).

A formulação matemática da lei de potência de *Findley* é expressa por (Reis et al., 2019, 2020):

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + At^n \quad (10)$$

onde  $\varepsilon(t)$  é o deslocamento por fluência no tempo  $t$ ,  $\varepsilon_0$  é o deslocamento elástico instantâneo ou independente do tempo,  $A$  é a amplitude de fluência (dependente do tempo) e  $n$  é uma constante independente da tensão e geralmente inferior a um (Almeida et al., 2018).

Além do modelo *Findley*, com base em estudos encontrados na literatura, foi novamente utilizado o modelo KWW, para obter uma melhor precisão entre os valores experimentais e teóricos (Gomes et al., 2024; Janeiro-Arocas et al., 2016; Reis et al., 2020). A função KWW é dada por:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 e^{\left(\frac{-t}{\tau}\right)^\beta} \quad (11)$$

onde  $\varepsilon$  é o deslocamento,  $t$  é o tempo,  $\varepsilon_0$  é o deslocamento inicial quando uma tensão constante é aplicada, o parâmetro  $\beta$  corresponde ao fator de distribuição relacionado com a amplitude da distribuição dos tempos de fluência, e  $\tau$  diz respeito ao tempo médio de fluência.

A Figura 65 apresenta as análises de ambos os modelos na matriz epóxi, onde a comparação dos resultados experimentais e teóricos para a tensão de 21 MPa, condição de ensaio comum aos três materiais, é mostrada na Figura 65 a). A Figura 65 b) e c) apresentam os parâmetros do modelo KWW e *Findley*, respetivamente, em relação à tensão de flexão da face, a fim de prever o efeito da tensão no comportamento de fluência.

Para validar o modelo, considerou-se a tensão de flexão intermédia de 73,5 MPa para calcular os parâmetros de ambos os modelos, correspondente às marcas sem preenchimento nas Figuras 65 b) e c). Por fim, a Figura 65 d) compara a curva estimada pelo modelo KWW e pelo modelo *Findley* com a curva média obtida experimentalmente.

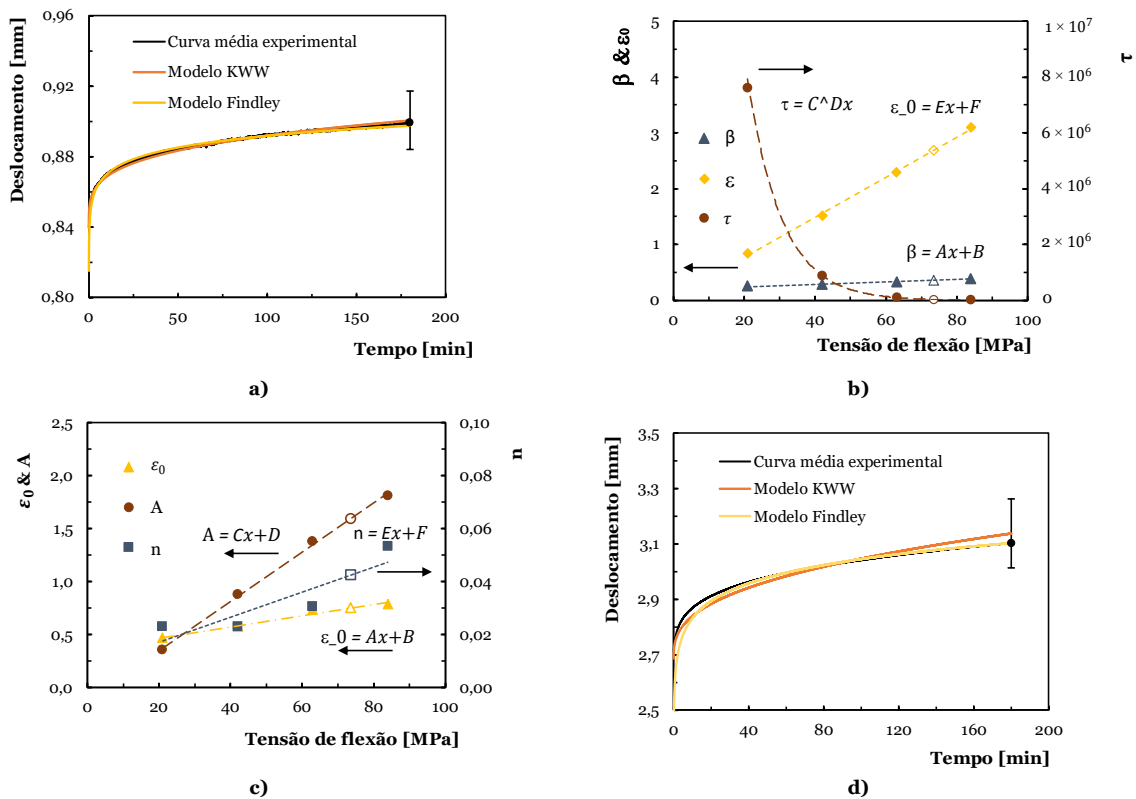


Figura 65 – Comparação entre a curva média experimental e a prevista pelo modelo KWW e pelo modelo de Findley para a matriz: a) Tensão de flexão de 21 MPa; b) Parâmetros do modelo KWW versus tensão de flexão; c) Parâmetros do modelo de Findley versus tensão de flexão; d) Tensão de flexão de 73,5 MPa.

É possível observar que ambos os modelos estimam o efeito da tensão de flexão no comportamento de fluência com grande precisão. Após três horas de ensaio, o erro máximo obtido com o modelo KWW é de 0,02%, sobrestimando a resposta à fluência, e de 0,007% para o modelo de Findley.

A análise foi repetida utilizando os dados obtidos nos ensaios do painel sanduíche (Figura 66). Contudo, a tensão de flexão intermédia usada para validar o modelo foi de 27 MPa.

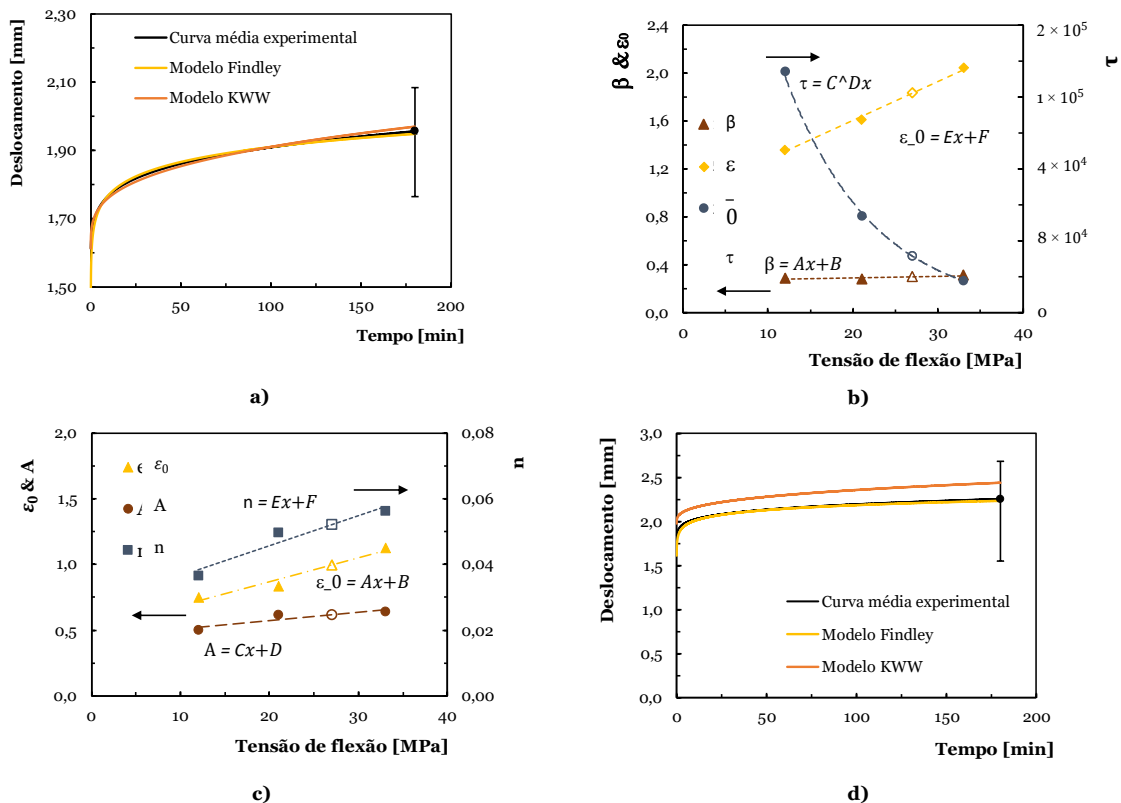


Figura 66 – Comparação entre a curva média experimental e a prevista pelo modelo KWW e pelo modelo de Findley para a sanduíche: a) Tensão de flexão de 21 MPa; b) Parâmetros do modelo KWW versus tensão de flexão; c) Parâmetros do modelo de Findley versus tensão de flexão; d) Tensão de flexão de 27 MPa.

Neste caso, observa-se de forma clara que o modelo KWW proporciona uma estimativa mais precisa do efeito da tensão de flexão na face do painel em relação ao comportamento de fluência, quando comparado ao modelo de Findley. A curva gerada pelo modelo KWW demonstra uma maior similaridade com a curva experimental média, refletindo, assim, uma maior capacidade de replicar o comportamento real dos materiais sob tensão prolongada. Após três horas de ensaio, o erro máximo obtido com o modelo KWW é de 0,200%, sobrestimando a resposta à fluência, e de 0,977% para o modelo de Findley.

De igual forma ao que foi realizado para a relaxação de tensões, a aptidão desses modelos para prever o comportamento a longo prazo da estrutura sanduíche em relação à fluência

foi avaliada. Para isso, a qualidade do ajuste foi analisada e é apresentada na Figura 67, considerando uma tensão de flexão de 27 MPa e um período de teste de 200 horas.

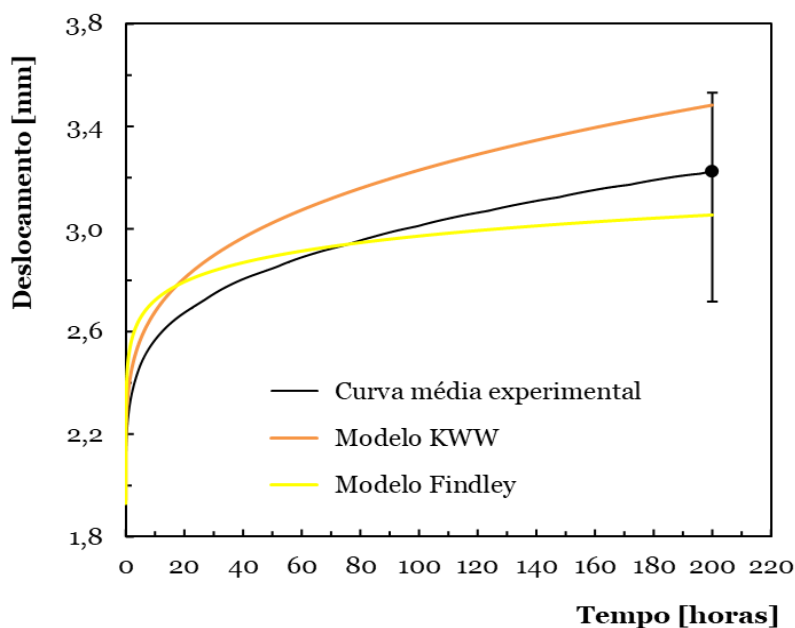


Figura 67 – Validação dos modelos para 100 h e para a sanduiche a uma tensão de flexão de 27 MPa.

É possível observar que ambos os modelos apresentam uma boa precisão na previsão da resposta à fluência após 200 h, pois os resultados teóricos obtidos encontram-se dentro da banda de dispersão dos ensaios experimentais. Os erros obtidos são da ordem dos 6,7% com o modelo de KWW e 1,3% com o modelo de Findley ao fim de 100 horas e 7,4% com o modelo de KWW e 5,6% com o modelo de Findley ao fim de 200 horas. De referir que enquanto o modelo KWW sobrestima os resultados experimentais, o modelo de Findley subestima-os. Assim, o modelo de Findley é mais conservador e parece apresentar melhor exatidão em relação aos resultados experimentais para vidas mais longas.

Na Tabela 27, encontram-se os parâmetros do modelo KWW para todas as condições testadas nos três materiais estudados. Além disso, são apresentados os valores experimentais e os valores previstos pelo modelo para a tensão de flexão após 3 horas, acompanhados dos respectivos erros.

Tabela 27 – Parâmetros e precisão do modelo KWW para a fluência de tensões: matriz epóxi, núcleo e sanduíche.

Materiais	Tensão de flexão inicial [MPa]	$\epsilon_0$	$\beta$	$\tau$	Tensão de flexão após 3 horas [MPa]		
					Valor experimental	Valor do modelo KWW	Erro [%]
Matriz epóxi	21	0,840	0,249	$7,62 \times 10^6$	0,899	0,901	0,161
	42	1,512	0,289	$8,85 \times 10^5$	1,652	1,658	0,398
	63	2,284	0,327	$1,14 \times 10^5$	2,565	2,579	0,539
	73,5	2,687	0,356	$3,35 \times 10^4$	3,104	3,138	1,096
	84	3,095	0,386	$1,03 \times 10^4$	3,790	3,817	0,710
Núcleo	12	0,506	0,303	$4,66 \times 10^3$	0,728	0,734	0,954
	21	0,822	0,261	$3,31 \times 10^3$	1,310	1,311	0,064
	27	0,988	0,304	$1,17 \times 10^3$	1,610	1,741	7,577
	33	1,167	0,327	$5,16 \times 10^2$	2,313	3,372	2,483
Sanduíche	12	1,359	0,291	$1,34 \times 10^5$	1,565	1,572	0,449
	21	1,612	0,282	$5,38 \times 10^4$	1,956	1,970	0,694
	27	1,833	0,302	$3,15 \times 10^4$	2,258	2,263	0,200
	33	2,040	0,314	$1,81 \times 10^4$	2,555	2,580	0,958

Uma tabela semelhante (Tabela 28) foi elaborada para o modelo da lei de *Findley*, na qual estão listados os parâmetros, os valores experimentais, os valores previstos pelo modelo para a tensão de flexão após 3 horas, e os respectivos erros.

Tabela 28 - Parâmetros e precisão do modelo da lei de Findley para a fluência de tensões: matriz epóxi, núcleo e sanduíche.

Materiais	Tensão de flexão inicial [MPa]	$\epsilon_0$	A	n	Tensão de flexão após 3 horas [MPa]		
					Valor experimental	Valor do modelo KWW	Erro [%]
Matriz epóxi	21	0,467	0,349	0,023	0,899	0,897	0,163
	42	0,569	0,873	0,023	1,652	1,649	0,148
	63	0,731	1,374	0,031	2,565	2,557	0,316
	73,5	0,747	1,591	0,042	3,104	3,103	0,007
	84	0,780	1,812	0,053	3,790	3,752	1,004
Núcleo	12	0,223	0,187	0,094	0,728	0,720	0,999
	21	0,380	0,270	0,094	1,310	1,291	1,416
	27	0,400	0,267	0,134	1,610	1,651	2,550
	33	0,444	0,280	0,162	2,313	2,283	1,281
Sanduíche	12	0,752	0,503	0,037	1,565	1,559	0,408
	21	0,837	0,618	0,050	1,956	1,948	0,391
	27	0,997	0,617	0,052	2,258	2,236	0,977
	33	1,128	0,638	0,056	2,555	2,542	0,541

Analisando as tabelas, observamos que, na maioria das condições testadas, a diferença entre os valores experimentais e os previstos pelos dois modelos é pequena, com erros variando entre 0,1% e 2,5%. Uma exceção, no modelo KWW, alcançou um erro de aproximadamente 7,5%.

A Tabela 29, referente ao modelo KWW, apresenta os coeficientes e constantes das equações  $\beta = Ax + B$  e  $\epsilon_0 = Ex + F$ , bem como o coeficiente e expoente da equação  $\tau = Cx^D$ . Para ambas as equações, são fornecidos ainda os coeficientes de correlação.

Tabela 29 - Valores das equações que se ajustam ao modelo KWW.

Materiais	$\varepsilon_0$			$\beta$			$\tau$		
	A	B	R	C	D	R	E	F	R
<b>Matriz epóxi</b>	0,0359	0,048	0,999	0,00218	0,196	0,990	$7,06 \times 10^7$	0,104	0,999
<b>Núcleo</b>	0,0313	0,142	0,998	0,00136	0,267	0,432	$2,13 \times 10^4$	0,108	0,956
<b>Sanduíche</b>	0,0326	0,998	0,985	0,00117	0,270	0,753	$4,12 \times 10^5$	0,095	0,999

R = Coeficiente de correlação

Por fim, uma tabela semelhante (Tabela 30) foi elaborada para o modelo da lei de *Findley*, onde são apresentados os coeficientes e as constantes das seguintes equações e os respectivos coeficientes de correlação:  $\varepsilon_0 = Ax+B$ ;  $A = Cx+D$ ;  $n = Ex+F$ .

Tabela 30 - Valores das equações que se ajustam ao modelo Findley.

Materiais	$\varepsilon_0$			A			n		
	A	B	R	C	D	R	E	F	R
<b>Matriz epóxi</b>	0,0053	0,361	0,982	0,0233	-0,121	0,999	$4,71 \times 10^{-4}$	0,008	0,888
<b>Núcleo</b>	0,0102	0,124	0,948	0,0043	0,152	0,876	$3,39 \times 10^{-3}$	0,042	0,904
<b>Sanduíche</b>	0,0183	0,504	0,975	0,0062	0,451	0,889	$9,17 \times 10^{-4}$	0,027	0,963

R = Coeficiente de correlação

## 6.6. Custos de produção

Além da análise mecânica do painel sanduíche desenvolvido neste caso prático, é fundamental considerar os custos envolvidos na sua produção para determinar a viabilidade e adequação da sua aplicação.

Importa destacar que a composição da sanduíche (pele e núcleo), detalhada na seção 5.3.1, inclui apenas quatro componentes principais – resina, endurecedor, madeira e linho –, sendo que um deles, a madeira em formato de serradura, foi obtido gratuitamente para a sua reutilização.

O maior custo na “receita” está associado à resina e ao endurecedor – SR Greenpoxy 56 + SD Surf Clear. Além de ser uma matriz epóxi, que já é mais cara do que outras matrizes poliméricas, esta resina possui a particularidade de ser mais “verde”, o que contribui significativamente para o aumento do custo do produto final. Em termos de percentagem, a resina e o endurecedor representam cerca de 99,52 % do preço final.

Além dos materiais constituintes foram ainda considerados os valores de energias gastos na produção da sanduíche, mais concretamente na estufa. Deste modo, a Tabela 31 apresenta os custos da sanduíche extrapolados para o metro quadrado, considerando espessuras de 3 e 9 mm.

Tabela 31 – Custos de produção da sanduíche por m<sup>2</sup>.

<b>Custo por m<sup>2</sup></b>	<i> Materiais</i>	9 mm	252,61€ *
		3 mm	84,20 € *
	Materiais + energia	9 mm	257,77 € *
		3 mm	85,92 € *

*\*valores com IVA*

Apesar dos valores consideravelmente elevados, importa referir que é um produto ecológico na sua totalidade e que as suas características e propriedades podem justificar o preço em determinadas aplicações.

# Capítulo 7

## Considerações Finais

Neste capítulo, são apresentadas as considerações finais do estudo realizado, descrevendo as conclusões relevantes da parte laboratorial e as limitações encontradas no caminho. Adicionalmente, é realizada uma reflexão sobre as possíveis perspectivas de trabalho e investigações futuras.

### 7.1. Conclusões

Retrocedendo aos objetivos definidos inicialmente e após análise dos resultados obtidos no caso prático, podem ser retiradas algumas conclusões quanto à viabilidade de reutilizar resíduos de madeira no desenvolvimento de um material compósito em formato de painel sanduíche, utilizando uma matriz epóxi reforçada com os referidos resíduos e linho nas camadas externas.

Este caso prático distinguiu-se pela tentativa de incorporar componentes ecológicos em toda a composição do material desenvolvido. Nesse sentido, a matriz polimérica utilizada foi a SR GreenPoxy 56, que, além de ser ambientalmente mais sustentável que outras opções totalmente sintéticas, proporcionou uma melhoria significativa das propriedades do material. Os reforços, do núcleo e do revestimento (madeira e linho), são materiais também sustentáveis e cuja sinergia já foi anteriormente comprovada na melhoria das propriedades mecânicas dos materiais onde são incorporados.

A quantidade de partículas de madeira incorporadas no núcleo foi estabelecida em 40% wt., com uma dimensão maior ou igual a 0,300 mm. Essa seleção foi meticulosamente realizada após a avaliação das propriedades de flexão e dureza de diversas percentagens e dimensões, tendo em vista dois fatores importantes: a maximização da utilização de resíduos de madeira e a manutenção de boas propriedades mecânicas. Além disso, a abordagem criteriosa na melhoria e definição do processo de fabricação do núcleo e do painel sanduíche foi essencial para aprimorar o desempenho dos materiais e otimizar a interação da matriz com os reforços.

Através dos ensaios de flexão em três pontos realizados no painel sanduíche, conclui-se que o revestimento com fibras de linho contribui para o aumento da resistência à flexão do material, uma vez que possui um módulo de rigidez superior ao do núcleo.

Relativamente aos ensaios de compressão, o painel sanduíche desenvolvido apresenta uma resistência à compressão lateral média de aproximadamente 61 MPa, suportando uma força de compressão de cerca de 32 kN até a rutura. Adicionalmente, o material demonstra uma resistência à compressão na posição horizontal de cerca de 97 MPa, suportando uma força de aproximadamente 42 kN.

Nos testes de relaxamento de tensão, constatou-se uma diminuição da tensão ao longo do tempo nos três materiais avaliados (controlo, núcleo e sanduíche), com uma tendência crescente com valores de deslocamento superior. A equação de KWW foi utilizada para ajustar os dados experimentais e demonstrou ser um método de previsão eficaz e com boa precisão, tanto em previsões de curto prazo quanto de longo prazo. Em contraste, nos ensaios de fluência, observou-se um aumento no deslocamento ao longo do tempo, sendo que, comparando os dois métodos de estimativa utilizados, os resultados experimentais foram ajustados com maior precisão pelo modelo KWW do que com o modelo de *Findley*. Contudo, embora o modelo KWW seja mais adequado para previsões de curto prazo, observou-se uma tendência contrária nas previsões de longo prazo.

Por fim, a análise dos custos dos materiais incorporados e energia necessária para a fabricação do painel sanduíche indica que, embora o material tenha um custo relativamente elevado, ele destaca-se pelo facto de todos os componentes terem uma vertente ecológica. Em determinadas aplicações, esse custo pode ser justificável pelas características e propriedades mecânicas favoráveis.

## **7.2. Limitações**

A primeira limitação observada residiu na fabricação do núcleo do compósito sanduíche, onde inicialmente surgiram dificuldades em melhorar a molhabilidade das partículas de madeira na matriz epóxi. Uma vez otimizado o processo, realizaram-se inúmeros testes até se obter a percentagem ideal de partículas de madeira no núcleo, um procedimento habitual em trabalhos de laboratório, mas que tende a provocar atrasos consideráveis.

Além disso, foram identificadas algumas limitações no que concerne aos equipamentos, visto que, nos testes de compressão, a capacidade máxima de força dos equipamentos disponíveis no laboratório revelou-se insuficiente para a realização dos ensaios da forma desejada. Consequentemente, embora tenham sido encontradas alternativas, o tempo útil destinado ao desenvolvimento deste trabalho foi significativamente afetado.

### **7.3. Perspetivas Futuras**

Como continuidade deste trabalho, seria relevante estudar a longo prazo integridade e propriedades do material desenvolvido quando aplicado em ambientes hostis, como por exemplo, ambientes húmidos, salinos, ácidos, bases. Além disso, poderia ser realizado um estudo o comportamento da sanduiche quando sujeita a impacto, nomeadamente a impacto de baixa velocidade e propriedades pós impacto de modo a alargar a sua aplicabilidade noutras áreas.

Adicionalmente, seria ainda pertinente estudar a incorporação, juntamente com as partículas de madeira, de outros resíduos industriais, como por exemplo, cortiça, caroço de azeitona para aplicação no núcleo.

Os resultados experimentais poderiam ser complementados por estudos de simulação numérica, o que proporcionaria resultados mais rápidos e económicos. O desenvolvimento de ferramentas numéricas também seria valioso, permitindo prever o efeito da combinação de diferentes fibras sintéticas nas faces da sanduiche para aplicações em diversas indústrias.

Outra abordagem interessante seria comparar outros materiais fabricados pela empresa fornecedora dos resíduos de madeira com o material desenvolvido em laboratório, analisando aspetos mecânicos, económicos e de utilidade.

Por fim, numa etapa subsequente, seria ainda crucial investigar a escalabilidade do uso do material desenvolvido no contexto industrial, com o objetivo de reutilizar os resíduos de madeira gerados pela própria empresa. Isso incluiria um estudo mais aprofundado sobre a viabilidade económica do material e a identificação das aplicações em que o custo é justificável.



## Referências

- Addcomposites. (2022). *What are the Terminology, Types, and Formats of Reinforcement Fiber?* Available from: <https://www.addcomposites.com/post/reinforcement-fibers-terminology-types-and-formats> [Accessed: 25 March 2024]
- Advanced Architectural Products. (2023). *What is Service Temperature and Why It Matters?* Available from: <https://greengirt.com/what-is-service-temperature-and-why-it-matters/> [Accessed: 21 March 2024]
- Almeida, J. H. S., Ornaghi, H. L., Lorandi, N. P., Bregolin, B. P., & Amico, S. C. (2018). Creep and interfacial behavior of carbon fiber reinforced epoxy filament wound laminates. *Polymer Composites*, 39, E2199–E2206. <https://doi.org/10.1002/pc.24537>
- Altenbach, H., Altenbach, J., & Kissing, W. (2018). Classification of Composite Materials. In *Mechanics of Composite Structural Elements* (p. 16). Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-8935-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-981-10-8935-0_1)
- APA. (2020). *Guia de Classificação de Resíduos*. [https://apambiente.pt/sites/default/files/2021-06/Guia de Classificação\\_versão 2.0\\_20200107.pdf](https://apambiente.pt/sites/default/files/2021-06/Guia%20de%20Classifica%C3%A7%C3%A3o_vers%C3%A3o%202.0_20200107.pdf)
- APA. (2021a). *Desafios*. Available from: <https://apambiente.pt/desafios#clima> [Accessed: 29 January 2024]
- APA. (2021b). *Produção e Gestão de Resíduos*. Available from: <https://apambiente.pt/index.php/residuos/producao-e-gestao-de-residuos> [Accessed: 1 February 2024]
- APA. (2021c). *Resíduos*. Available from: <https://apambiente.pt/index.php/residuos> [Accessed: 5 December 2023]
- APA. (2021d). *Resíduos Não Urbanos*. Available from: <https://apambiente.pt/index.php/residuos/residuos-nao-urbanos-o> [Accessed: 31 January 2024].
- APA. (2021e). *Resíduos Perigosos*. Available from: <https://apambiente.pt/residuos/residuos-perigosos> [Accessed: 31 January 2024]

- APA. (2021f). *Resíduos Urbanos*. Available from: <https://apambiente.pt/index.php/residuos/residuos-urbanos> [Accessed: 31 January 2024]
- APA. (2022). *Plano Estratégico para Resíduos Não Urbanos - PERNU 2030: Relatório Ambiental Preliminar*. Instituto do Ambiente e Desenvolvimento.
- APA. (2023). *Resíduos perigosos - Relatório do Estado do Ambiente*. Available from: <https://rea.apambiente.pt/content/residuos-perigosos?language=pt-pt> [Accessed: 30 January 2024]
- Askeland, D. R., & Wright, W. J. (2016). The Science and Engineering of Materials. In *Engineered Wood Products for Construction* (7th ed., pp. 180–200).
- ASTM. (2005). *Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores: C 365/C 365M - 05*. <https://doi.org/10.1520/C0365>
- ASTM. (2007). *Standard Test Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich: C 364/C 364M - 07* (Issue April, pp. 1–8).
- ASTM. (2017). *Standard Test Methods for Tensile, Compressive, and Flexural Creep and Creep- Rupture of Plastics: D2990 - 17* (Vol. 08). <https://doi.org/10.1520/D2990-17>
- ASTM. (2020a). *Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure: C393/C393M - 20*. <https://doi.org/10.1520/C0393>
- ASTM. (2020b). *Standard Test Methods for Stress Relaxation for Materials and Structures: E328 - 20*. <https://doi.org/10.1520/E0328-20.2>
- Ayana, K. D., Ha, C. S., & Ali, A. Y. (2024). Comprehensive overview of wood polymer composite: Formulation and technology, properties, interphase modification, and characterization. *Sustainable Materials and Technologies*, 40(June), e00983. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e00983>
- BCSD Portugal. (n.d.). *Pacto Ecológico Europeu*. Available from: <https://bcdportugal.org/pacto-ecologico-europeu/> [Accessed: 29 January 2024]
- BCSD Portugal. (2021). *O que é a sustentabilidade?* Available from: <https://bcdportugal.org/sustentabilidade/> [Accessed: 15 January 2024]

- Benzidane, M. A., Benzidane, R., Hamamousse, K., Adjal, Y., Sereir, Z., & Poilâne, C. (2022). Valorization of date palm wastes as sandwich panels using short rachis fibers in skin and petiole “wood” as core. *Industrial Crops and Products*, 177(August 2021). <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114436>
- Bernatas, R., Dagreou, S., Despax-Ferreres, A., & Barasinski, A. (2021). Recycling of fiber reinforced composites with a focus on thermoplastic composites. *Cleaner Engineering and Technology*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100272>
- Bhattacharjee, A. (2012). Social Science Research: Principles, Methods, and Practices. *Textbooks Collection*. [https://digitalcommons.usf.edu/oa\\_textbooks/3](https://digitalcommons.usf.edu/oa_textbooks/3)
- Bismarck, A., Mishra, S., & Thomas, L. (2005). Plant Fibers as Reinforcement for Green Composites. In *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites* (1st ed., pp. 52–128). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203508206-10>
- Borges, C., Furtado, G., & Oliveira, J. (2015). Metodologias de investigação comuns nas ciências sociais: Possíveis contributos para o conhecimento de sujeitos em planeamento arquitetónico e urbanístico. *A Obra Nasce: Revista de Arquitetura e Urbanismo Da Universidade Fernando Pessoa*, 9, 9–26. <https://bdigital.ufp.pt/handle/10284/7773>
- Bouafif, H., Koubaa, A., Perré, P., & Cloutier, A. (2013). Creep behaviour of HDPE/wood particle composites. *International Journal of Microstructure and Materials Properties*, 8(3), 225–238. <https://doi.org/10.1504/IJMMP.2013.055385>
- Bourguignon, D. (2016). Closing the loop New circular economy package. *European Parliamentary Research Service, January*, 9.
- BSI. (2003). *Plastics-Determination of flexural properties, EN ISO 178:2003* (Vol. 3, p. 28). <https://doi.org/10.1177/1528083717736102>
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). Materials Science and Engineering - An Introduction. In *Wiley* (10th ed.).
- Chauhah, S. S., Maurya, N. K., & Dwivedi, S. P. (2021). Effect of particle size and weight percent of different wood dust on the tensile strength of glass fiber Epoxy/Saw dust composite using RSM. *Materials Today: Proceedings*, 47, 3936–3942. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.03.635>
- Chauhan, V., Kärki, T., & Varis, J. (2022). Review of natural fiber-reinforced engineering

plastic composites, their applications in the transportation sector and processing techniques. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 35(8), 1169–1209. <https://doi.org/10.1177/0892705719889095>

Chawla, K. K. (2019). *Composite Materials: Science and Engineering*. In *Springer* (4th ed.).

Di, J., Zuo, H., & Li, Y. (2023). Flexural performance of glulam strengthened with flax-fiber reinforced polymer composites. *Wood Material Science and Engineering*, 18(3), 1014–1023. <https://doi.org/10.1080/17480272.2022.2101940>

Dinesh, S., Kumaran, P., Mohanamurugan, S., Vijay, R., Singaravelu, D. L., Vinod, A., Sanjay, M. R., Siengchin, S., & Bhat, K. S. (2020). Influence of wood dust fillers on the mechanical, thermal, water absorption and biodegradation characteristics of jute fiber epoxy composites. *Journal of Polymer Research*, 27(1). <https://doi.org/10.1007/s10965-019-1975-2>

Elfaleh, I., Abbassi, F., Habibi, M., Ahmad, F., Guedri, M., Nasri, M., & Garnier, C. (2023). A comprehensive review of natural fibers and their composites: An eco-friendly alternative to conventional materials. *Results in Engineering*, 19, 31. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101271>

Ellen MacArthur Foundation. (2015). *Towards a Circular Economy: Business Rationale for an Accelerated Transition*.

Ellen MacArthur Foundation. (2022). *The Biological Cycle of the Butterfly Diagram*. Available from: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/articles/the-biological-cycle-of-the-butterfly-diagram> [Accessed: 29 January 2024]

European Commission. (2020). *Circular economy action plan*. Available from: [https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan\\_en](https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en) [Accessed: 29 January 2024]

Eurostat. (2023). *Material flow accounts statistics - material footprints*. Available from: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Material\\_flow\\_accounts\\_statistics\\_-\\_material\\_footprints#EU.27s\\_material\\_footprint\\_by\\_material\\_category\\_over\\_time](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Material_flow_accounts_statistics_-_material_footprints#EU.27s_material_footprint_by_material_category_over_time) [Accessed: 29 January 2024]

Fazita, M. R. N., Jayaraman, K., Bhattacharyya, D., Haafiz, M. K. M., Saurabh, C. K.,

- Hussin, M. H., & Khalil, H. P. S. A. (2016). Green composites made of bamboo fabric and poly (lactic) acid for packaging applications-a review. *Materials*, 9(6), 29. <https://doi.org/10.3390/ma9060435>
- Freeman, R. E. (2015). *Strategic management: A stakeholder approach*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139192675>
- Georgiopoulos, P., Kontou, E., & Christopoulos, A. (2015). Short-term creep behavior of a biodegradable polymer reinforced with wood-fibers. *Composites Part B: Engineering*, 80, 134–144. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2015.05.046>
- Global Compact Network Portugal. (2015). *Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável*. <https://globalcompact.pt/index.php/pt/agenda-2030>
- Gomes, A. S., Fiadeiro, P. T., Vieira, A. C., & Vieira, J. C. (2024). Viability Study of Serra da Estrela Dog Wool to Produce Green Composites. *Polymers 2024*, Vol. 16, Page 718, 16(5), 718. <https://doi.org/10.3390/POLYM16050718>
- Guo, G., Finkenstadt, V. L., & Nimmagadda, Y. (2019). Mechanical properties and water absorption behavior of injection-molded wood fiber/carbon fiber high-density polyethylene hybrid composites. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2(4), 690–700. <https://doi.org/10.1007/s42114-019-00116-5>
- Hull, D., & Clyne, T. . (2019). *An Introduction to Composite Materials* (3th ed.). Cambridge Solid State Science Series.
- INE. (2023). *Estatística do Ambiente - 2022*. Available from: [https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine\\_publicacoes&PUBLICACOESpub\\_boui=439545493&PUBLICACOESmodo=2](https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_publicacoes&PUBLICACOESpub_boui=439545493&PUBLICACOESmodo=2) [Accessed: 29 January 2024]
- Ismail, S. O., Akpan, E., & Dhakal, H. N. (2022). Review on natural plant fibres and their hybrid composites for structural applications: Recent trends and future perspectives. *Composites Part C: Open Access*, 9, 33. <https://doi.org/10.1016/J.JCOMC.2022.100322>
- Jain, N. K., & Gupta, M. K. (2018). Hybrid teak/sal wood flour reinforced composites: Mechanical, thermal and water absorption properties. *Materials Research Express*, 5(12), 16. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aae24d>

- Janeiro-Arocas, J., Tarrío-Saavedra, J., López-Beceiro, J., Naya, S., López-Canosa, A., Heredia-García, N., & Artiaga, R. (2016). Creep analysis of silicone for podiatry applications. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, *63*, 456–469. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2016.07.014>
- Khan, M. U., Abas, M., Noor, S., Salah, B., Saleem, W., & Khan, R. (2021). Experimental and statistical analysis of saw mill wood waste composite properties for practical applications. *Polymers*, *13*(22), 1–19. <https://doi.org/10.3390/polym13224038>
- Khan, M. Z. R., Srivastava, S. K., & Gupta, M. K. (2020). A state-of-the-art review on particulate wood polymer composites: Processing, properties and applications. *Polymer Testing*, *89*, 13. <https://doi.org/10.1016/j.polymeresting.2020.106721>
- Kumar, N., Grewal, J. S., Kumar, S., Kumar, N., & Kashyap, K. (2021). Mechanical and thermal properties of NaOH treated sisal natural fiber reinforced polymer composites: Barium sulphate used as filler. *Materials Today: Proceedings*, *45*, 5575–5578. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.310>
- Li, Y., Cheng, L., & Zhou, J. (2018). Curing multidirectional carbon fiber reinforced polymer composites with indirect microwave heating. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *97*(1–4), 1137–1147. <https://doi.org/10.1007/S00170-018-1974-1/METRICS>
- Liu, M., Silva, D. A. S., Fernando, D., Meyer, A. S., Madsen, B., Daniel, G., & Thygesen, A. (2016). Controlled retting of hemp fibres: Effect of hydrothermal pre-treatment and enzymatic retting on the mechanical properties of unidirectional hemp/epoxy composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *88*, 253–262. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.06.003>
- Lunetto, V., Galati, M., Settineri, L., & Iuliano, L. (2023). Sustainability in the manufacturing of composite materials: A literature review and directions for future research. *Journal of Manufacturing Processes*, *85*, 858–874. <https://doi.org/10.1016/J.JMAPRO.2022.12.020>
- Mendes, C. P., Fleming, R., Goncalves, A. M. B., da Silva, M. J., Prativiera, R., & Cena, C. (2021). Mechanical and microstructural characterization of epoxy/sawdust (*Pinus elliottii*) composites. *Polymers and Polymer Composites*, *29*(8), 1135–1142. <https://doi.org/10.1177/0967391120956504>
- Ministério dos Negócios Estrangeiros. (2017). *Relatório nacional sobre a*

*implementação da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, por ocasião da Apresentação Nacional Voluntária no Fórum Político de Alto Nível das Nações Unidas.*

- Misra, M., Ahankari, S. S., Mohanty, A. K., & Nga, A. D. (2011). Creep and fatigue of natural fibre composites. In *Interface Engineering of Natural Fibre Composites for Maximum Performance* (pp. 289–340). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857092281.2.289>
- Moigne, R. Le. (2021). *Waste watchers*. The Ellen MacArthur Foundation. <https://ellenmacarthurfoundation.org/articles/waste-watchers>
- Nele, L., Caggiano, A., & Teti, R. (2016). Autoclave Cycle Optimization for High Performance Composite Parts Manufacturing. *Procedia CIRP*, 57, 241–246. <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2016.11.042>
- Ngo, T. (2020). Introduction to composite materials. In M. Gong (Ed.), *Composite and Nanocomposite Materials - From Knowledge to Industrial Applications*. IntechOpen. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100410-4.00001-6>
- Nukala, S. G., Kong, I., Kakarla, A. B., Tshai, K. Y., & Kong, W. (2022). Preparation and Characterisation of Wood Polymer Composites Using Sustainable Raw Materials. *Polymers*, 14(15). <https://doi.org/10.3390/polym14153183>
- Oliveira, E. R., & Ferreira, P. (2014). *Métodos de Investigação: Da Interrogação à Descoberta Científica*. Editorial. Porto.
- Park, B. D., & Balatinecz, J. J. (1998). Short term flexural creep behavior of wood-fiber/polypropylene composites. *Polymer Composites*, 19(4), 377–382. <https://doi.org/10.1002/pc.10111>
- Parlamento Europeu. (2023). *Economia circular: definição, importância e benefícios*. Available from [https://www.europarl.europa.eu/news/pt/headlines/economy/20151201STO05603/economia-circular-definicao-importancia-e-beneficios?&at\\_campaign=20234-Economy&at\\_medium=Google\\_Ads&at\\_platform=Search&at\\_creation=RSA&at\\_goal=TR\\_G&at\\_audience=ue economia circular](https://www.europarl.europa.eu/news/pt/headlines/economy/20151201STO05603/economia-circular-definicao-importancia-e-beneficios?&at_campaign=20234-Economy&at_medium=Google_Ads&at_platform=Search&at_creation=RSA&at_goal=TR_G&at_audience=ue%20economia%20circular) [Accessed: 19 January 2024]
- Presidência do Conselho de Ministros. (2023a). Decreto-Lei nº 11/2023 de 10 de fevereiro. In *Diário da República 1ª Série*. Available from:

<https://files.dre.pt/1s/2023/02/03000/0000300192.pdf> [Accessed: 16 May 2024]

Presidência do Conselho de Ministros. (2023b). Resolução do Conselho de Ministros n.º 127/2023: Plano estratégico para os resíduos não urbanos. In *Diário da República 1ª Série*.

Presidência do Conselho de Ministros. (2023c). Resolução do Conselho de Ministros n.º 31/2023: Plano Nacional de Gestão de Resíduos 2030. In *Diário da República 1ª Série*.

PT Sustentável. (2023). *2023 Voluntary national reviews - Portugal*.  
<https://doi.org/10.18356/9789210010795c013>

Radoor, S., Karayil, J., Rangappa, S. M., Siengchin, S., & Parameswaranpillai, J. (2020). A review on the extraction of pineapple, sisal and abaca fibers and their use as reinforcement in polymer matrix. *Express Polymer Letters*, *14*(4), 309–335.  
<https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2020.27>

Reis, P. N. B., Silva, M. P., Santos, P., Parente, J. M., & Bezazi, A. (2019). 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*(April), 112375.  
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112375>

Renner, J. S., Mensah, R. A., Jiang, L., Xu, Q., Das, O., & Berto, F. (2021). Fire behavior of wood-based composite materials. *Polymers*, *13*(24), 33.  
<https://doi.org/10.3390/polym13244352>

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*(2019), 370–377. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.04.042>

Sharma, A. K., Bhandari, R., Aherwar, A., & Rimašauskiene, R. (2020). Matrix materials used in composites: A comprehensive study. *Materials Today: Proceedings*, *21*, 1559–1562. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2019.11.086>

Sharma, A. K., Bhandari, R., Sharma, C., Dhakad, S. K., & Pinca-Bretotean, C. (2022). Polymer matrix composites: A state of art review. *Materials Today: Proceedings*,

57, 2330–2333. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.12.592>

Sharma, S. D., Sowntharya, L., & Kar, K. K. (2016). Composite materials: Processing, applications, characterizations. In *Composite Materials* (p. 36). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49514-8>

Sicomini. (2016). *SR GreenPoxi 56: Système epoxy translucide* (pp. 1–7). [www.sicomini.com](http://www.sicomini.com)

Siva, R., Mobithis, M., Ravichandran, R., Valarmathi, T. N., Jeya Jeevahan, J., & Sangeetha, M. (2021). Characterization of mechanical, chemical properties and microstructure of untreated and treated *Cissus Quadrangularis* fiber. *Materials Today: Proceedings*, 47, 4479–4483. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.320>

Siva, R., Valarmathi, T. N., Palanikumar, K., & Samrot, A. V. (2020). Study on a Novel natural cellulosic fiber from *Kigelia africana* fruit: Characterization and analysis. *Carbohydrate Polymers*, 244(May), 116494. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116494>

Sivalingam, P., Vijayan, K., Mouleeswaran, S., Vellingiri, V., & Mayilswamy, S. (2022). On the tensile and compressive behavior of a sandwich panel made of flax fiber and agglomerated cork. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 236(1), 180–189. <https://doi.org/10.1177/14644207211043227>

Sumithra, G., Reddy, R. N., Dheeraj, G. K., Ojha, S., Jayachandra, G., & Raghavendra, G. (2023). Review on composite classification, manufacturing, and applications. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2023.04.637>

Tuğluca, M. S., Özdoğru, E., İlcan, H., Özçelikci, E., Ulugöl, H., & Şahmaran, M. (2023). Characterization of chemically treated waste wood fiber and its potential application in cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, 137(2022), 13. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.104938>

United Nations. (2015). *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável*. UNRIC. Available from: <https://unric.org/pt/objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel/> [Accessed: 9 January 2024]

United Nations. (2019a). *Objetivo 12: Produção e Consumo Sustentáveis*. UNRIC.

Available from: <https://unric.org/pt/objetivo-9-industria-inovacao-e-infraestruturas-2/> [Accessed: 9 January 2024]

United Nations. (2019b). *Objetivo 9: Indústria, inovação e infraestruturas*. UNRIC. Available from: <https://unric.org/pt/objetivo-9-industria-inovacao-e-infraestruturas-2/> [Accessed: 9 January 2024]

Vignesh, V., Balaji, A. N., & Karthikeyan, M. K. V. (2017). Effect of wood sawdust filler on the mechanical properties of Indian mallow fiber yarn mat reinforced with polyester composites. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 22(7), 610–621. <https://doi.org/10.1080/1023666X.2017.1356481>

Wang, W. H., Huang, H. B., Du, H. H., & Wang, H. (2015). Effects of fiber size on short-term creep behavior of wood fiber/HDPE composites. *Polymer Engineering & Science*, 55(3), 693–700. <https://doi.org/10.1002/PEN.23935>

Wazeer, A., Das, A., Abeykoon, C., Sinha, A., & Karmakar, A. (2023). Composites for electric vehicles and automotive sector: A review. *Green Energy and Intelligent Transportation*, 2(1), 23. <https://doi.org/10.1016/j.geits.2022.100043>

Xu, K., Du, G., & Wang, S. (2022). Wood Plastic Composites: Their Properties and Applications. In M. Gong (Ed.), *Engineered Wood Products for Construction*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.98918>

Yin, W., Zhao, Z., Lin, H., & Ma, P. (2023). Advances in Creep Behaviors of Textile Composites. *Applied Composite Materials*, 30(6), 1949–1978. <https://doi.org/10.1007/S10443-023-10154-4>

Zhang, J., Wang, H., Ou, R., & Wang, Q. (2018). The properties of flax fiber reinforced wood flour/high density polyethylene composites. *Journal of Forestry Research*, 29(2), 533–540. <https://doi.org/10.1007/s11676-017-0461-0>

Zor, M., Tankut, N., Kiziltas, A., Gardner, D. J., & Yazici, H. (2016). Feasibility of using foamed styrene maleic anhydride (SMA) co-polymer in wood based composites. *Drvena Industrija*, 67(4), 399–407. <https://doi.org/10.5552/drind.2016.1624>