

Da Geração ao Reaproveitamento: Uma Estratégia de Economia Circular Aplicada à Produção de Turbinas Eólicas

Versão Final Após Defesa

Ana Rita Pires Caramelo

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia e Gestão Industrial
(2^o ciclo de estudos)

Orientadora: Prof.^a Doutora Tânia Felgueiras de Miranda Lima
Coorientador: Mestre Paulo Sérgio Pina dos Santos

maio de 2024

Declaração de Integridade

Eu, Ana Rita Pires Caramelo, que abaixo assino, estudante com o número de inscrição M11516 de Engenharia e Gestão Industrial da Faculdade de Engenharia, 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 referenciação de frases, extratos, imagens e outras formas de trabalho intelectual, e assumindo assim na íntegra as responsabilidades da autoria.

Universidade da Beira Interior, Covilhã 02/05/2024

Ana Rita Pires Caramelo

Agradecimentos

À medida que esta etapa da minha formação acadêmica se conclui, é com profundo respeito e sincera gratidão que reconheço aqueles cujo apoio foi indispensável na realização desta dissertação.

Em primeiro lugar, expresso a minha mais sincera gratidão à Professora Doutora Tânia Lima, cuja paciência, conhecimento e rigor acadêmico não apenas guiaram este estudo, mas também moldaram a minha formação como estudante.

Ao Professor Paulo Santos, que forneceu as ferramentas e o ambiente propício para que a minha pesquisa florescesse. Os debates e discussões enriqueceram não apenas o meu trabalho, mas também o meu crescimento intelectual. Um agradecimento especial ao Professor Martim Aguiar, ao Sr. João Correia e ao Sr. Nuno dos Santos.

À minha família, especialmente aos meus pais, que me apoiaram incondicionalmente desde o início desta caminhada, transmitindo-me amor, compreensão e a tranquilidade de um ambiente familiar cheio de apoio e alento. São a base sobre a qual construí os meus sonhos e ambições.

Pela paciência nos momentos de maior tensão, pela sabedoria partilhada e pelas inúmeras horas de conversas que serviram tanto para desabafar como para me inspirar, os meus mais sinceros agradecimentos ao meu amigo Joelito.

Aos meus amigos, obrigada por estarem ao meu lado não só nos momentos de celebração, mas também durante os desafios. Cada sorriso partilhado, cada palavra de incentivo e cada momento de descontração contribuíram para o meu bem-estar e para a conclusão deste trabalho. Foram companheiros incríveis neste percurso acadêmico e na vida, dando-me força para continuar.

Cada um de vocês desempenhou um papel vital nesta fase da minha vida e, por isso, o meu sincero obrigada.

“A Covilhã é a canção que sabemos de cor, e iremos cantar toda a vida.”

Resumo

A energia eólica é uma fonte de energia renovável e sustentável que tem vindo a ganhar cada vez mais importância nas últimas décadas. As turbinas eólicas são equipamentos complexos que requerem uma grande quantidade de materiais e energia para serem produzidas. No entanto, tanto no seu processo produtivo como no final da sua vida útil, as turbinas eólicas podem representar um impacto significativo no ambiente, se os seus resíduos não forem geridos adequadamente.

A economia circular é um modelo de produção e consumo que visa reduzir o desperdício e a poluição, promovendo o reaproveitamento de recursos. O objetivo geral desta dissertação consistiu em definir e ensaiar uma metodologia de reciclagem dos resíduos resultantes da produção de pás de rotor, que pudesse ser escalável para ambiente industrial e que permitisse tornar o setor da energia eólica mais sustentável.

Foram produzidas biqueiras, para serem aplicadas pela indústria do calçado em calçado de proteção, utilizando resíduos constituídos por fibra de vidro de diferentes gramagens e partículas com diferentes tamanhos, geometria e composição variada, provenientes da maquinaria mecânica das pás de rotor na fase de acabamento, sendo as mesmas compostas por fibra de vidro e resina epóxi. Pretende-se com esta solução propor uma forma viável de valorizar estes resíduos, e contribuir para a redução do impacto ambiental desta indústria.

Inicialmente, os resíduos foram separados por tamanho e granulometria. Em seguida, a resina epóxi foi preparada de acordo com as instruções do fabricante. Os resíduos foram adicionados à matriz epóxi na percentagem ideal determinada por testes. Posteriormente, a matriz epóxi com os resíduos foi adicionada aos tecidos de fibra de vidro, de diferentes tipos. Os laminados foram produzidos através do método de moldação manual, com a aplicação de pressão e calor. Os mesmos foram testados para determinar as suas propriedades mecânicas e de proteção. As biqueiras foram produzidas através do mesmo método, utilizando o melhor laminado selecionado. Este processo permitiu produzir biqueiras com propriedades mecânicas e de proteção adequadas para serem utilizadas em calçado de proteção.

A adição de 1 wt. % de partículas melhorou as propriedades mecânicas das matrizes, com uma melhoria de 5,5% na tensão à flexão e 8,0% na rigidez. A caracterização dos

laminados revelou que, nos ensaios de flexão em três pontos, os laminados aditivados apresentaram as melhores propriedades, com uma melhoria de 18,6% na tensão, 7,5% na rigidez e 10,0% na deformação, em comparação com o laminado de controlo. Em termos de propriedades, a biqueira de controlo teve uma energia absorvida de $86,51 \pm 1,23$ J enquanto a biqueira aditivada teve uma energia absorvida de $88,82 \pm 0,68$ J. A força máxima na biqueira de controlo foi $10,05 \pm 1,70$ kN e na biqueira aditivada foi $10,79 \pm 1,04$ kN. Através do teste de compressão, concluiu-se que a biqueira de fibra de vidro aditivada apresentou maior resistência à compressão do que a biqueira de fibra de vidro de controlo, com uma diminuição da deformação de 23,1%.

Com base no trabalho desenvolvido, conclui-se que as biqueiras fabricadas em laboratório estão aptas para serem aplicadas em calçado de proteção, pois segundo a norma europeia EN ISO 20346:2022, as mesmas garantiram proteção contra impactos de baixa velocidade a um nível de energia de, pelo menos, 100 J e contra a compressão quando ensaiadas a uma carga de compressão de, pelo menos, 10 kN.

Palavras-chave

Reciclagem;Turbinas Eólicas;Pás de Rotor de Aerogeradores;Resíduos;Plásticos
Reforçados com Fibra de Vidro

Abstract

Wind energy is a renewable and sustainable energy source that has become increasingly important in recent decades. Wind turbines are complex pieces of equipment that require a large amount of materials and energy to produce. However, both in their production process and at the end of their useful life, wind turbines can have a significant impact on the environment if their waste is not managed properly.

The circular economy is a model of production and consumption that aims to reduce waste and pollution by promoting the reuse of resources. The general aim of this dissertation was to define and test a methodology for recycling the waste resulting from the production of rotor blades, which could be scaled up to an industrial environment and which would make the wind energy sector more sustainable.

Toe caps were produced, to be used by the footwear industry in protective footwear, using waste consisting of glass fibre of different weights and particles of different sizes, geometry and composition, from the mechanical machining of rotor blades in the finishing phase, composed of glass fibre and epoxy resin. The aim of this solution is to propose a viable way of valorising this waste and helping to reduce the environmental impact of this industry.

Initially, the waste was separated by size and granulometry. The epoxy resin was then prepared according to the manufacturer's instructions. The waste was added to the epoxy matrix at the optimum percentage determined by tests. Subsequently, the epoxy matrix with the waste was added to glass fibre fabrics of different types. The laminates were produced using the manual moulding method, applying pressure and heat. They were tested to determine their mechanical and protective properties. The toe caps were produced by the same method, using the best laminate selected. This process produced toecaps with mechanical and protective properties suitable for use in protective footwear.

The addition of 1 wt. % of particles improved the mechanical properties of the matrices, with a 5.5% improvement in bending stress and an 8.0% improvement in stiffness. Characterisation of the laminates revealed that in the three-point bending tests, the additive laminates showed the best properties, with an 18.6% improvement in tension, 7.5% in stiffness and 10.0% in deformation compared to the control laminate. In terms of properties, the control toe cap had an absorbed energy of 86.51 ± 1.23 J while the

additive toe cap had an absorbed energy of 88.82 ± 0.68 J. The maximum force in the control toe cap was 10.05 ± 1.70 kN and in the additive toe cap it was 10.79 ± 1.04 kN. The compression test showed that the additive fibreglass toe cap had greater resistance to compression than the control fibreglass toe cap, with a reduction in deformation of 23.1%.

Based on the work carried out, it can be concluded that the toecaps manufactured in the laboratory are suitable for use in protective footwear, as according to the European standard EN ISO 20346:2022, they guarantee protection against low-velocity impacts at an energy level of at least 100 J and against compression when tested at a compression load of at least 10 kN.

Keywords

Recycling; Wind Turbines; Rotor Blades of Wind Generators; Waste; Glass Fiber Reinforced Plastics

Índice

Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tabelas	xvii
Lista de Acrónimos	xix
Introdução	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Motivações	5
1.3. Objetivos	5
1.4. Metodologia	6
1.5. Estrutura	7
Materiais Compósitos.....	9
2.1. Definição	9
2.2. Tipos de Compósitos.....	19
2.3. Fibra de Vidro	24
2.3.1. Classificação da Fibra de Vidro	30
2.3.2. Aplicações de compósitos de PRFV	35
2.4. Técnicas de Reciclagem	36
2.4.1. Reciclagem Mecânica	38
2.4.2. Reciclagem Térmica.....	40
2.4.3. Reciclagem Química	41
Resíduos Industriais e Economia Circular	43
3.1. Os Materiais Compósitos e a Indústria Eólica	43
3.2. Economia Circular	46
Setor Eólico e Setor do Calçado	55
4.1.1. Caracterização do Setor Eólico	55
4.1.2. Problemática dos Resíduos no Setor Eólico.....	57
4.2. Setor do Calçado	58
4.2.1. Caracterização do Setor do Calçado	58
4.2.2. Setor do Calçado em Portugal.....	59
4.2.4. Calçado de Segurança	62
Caso Prático	65
5.1. Materiais e Procedimento Experimental.....	65
5.2. Equipamentos	73
5.3. Obtenção do molde da biqueira em 3D	76
5.4. Obtenção do 1º molde da biqueira.....	81
5.5. Obtenção do molde da biqueira	84

5.6. Produção das biqueiras	87
5.7. Ensaios das biqueiras produzidas	88
5.7.1. Teste de Impacto.....	88
5.7.2. Teste de Compressão	90
Análise e Discussão dos Resultados.....	91
6.1. Ensaios de Flexão em 3 Pontos	91
6.1.1. Ensaios F3P nas Matrizes	91
6.1.2. Ensaios F3P dos Laminados.....	94
6.1.3. Ensaios de resistência ao cisalhamento interlaminar	96
6.2. Ensaios de Impacto de Baixa Velocidade.....	98
6.3. Ensaios de Compressão.....	103
Conclusões	107
7.1. Conclusões	107
7.2. Limitações	108
7.3. Propostas Futuras.....	108
Bibliografia	111

Lista de Figuras

Figura 1 - Constituição de um material compósito (Adaptado de Callister, 2018)	10
Figura 2 – Vantagens e Desvantagens da Fase Dispersa (Adaptado de Mukherjee, Jain and Banerjee, 2023).....	17
Figura 3 - Classificação dos materiais compósitos (Adaptado de Callister, 2018).....	20
Figura 4 - Empilhamento em compósitos laminados: (a) Unidirecional; (b) Cruzado; (c) Camada em Ângulo; e (d) Multidirecional (Adaptado de Callister, 2018).....	23
Figura 5 - Metodologia de preparação e caracterização dos compósitos de matriz de PRFV e a sua aplicação (Adaptado de Sathishkumar, Satheeshkumar and Naveen, 2014).....	26
Figura 6 - Classificação da Fibra de Vidro e Propriedades Mecânicas (Adaptado de Sathishkumar, Satheeshkumar and Naveen, 2014)	31
Figura 7 - Tipos de fibras de vidro: (a) fibras contínuas de fios longos, (b) fibras tecidas e aleatórias, (c) fibras cortadas E (d) fibras cortadas (Rajak, Wagh and Linul, 2021)...	32
Figura 8 - As principais aplicações da fibra de vidro: automóvel, energias alternativas, aeroespacial, transportes, construção, desporto e outras (Adaptado de Khalid <i>et al.</i> , 2022).....	36
Figura 9 - Representação de cenários de fim de vida de compósitos reforçados com fibra de vidro (Adaptado de Jani <i>et al.</i> , 2022)	38
Figura 10 - Esquematização de um processo típico de reciclagem mecânica (Adaptado de De Fazio <i>et al.</i> , 2023).....	40
Figura 11 - Esquematização de um processo típico de pirólise de materiais compósitos termoendurecíveis (Adaptado de De Fazio <i>et al.</i> , 2023)	40
Figura 12 - Esquematização de um processo típico de reciclagem em leito fluidizado (Adaptado de De Fazio <i>et al.</i> , 2023)	41
Figura 13 - Esquematização de um processo típico de reciclagem química (Adaptado de De Fazio <i>et al.</i> , 2023).....	42
Figura 14 - O ciclo de vida de uma turbina eólica (Adaptado de WindEurope, 2020) ..	45
Figura 15 - A hierarquia dos resíduos para uma gestão sustentável dos resíduos da hélice da turbina eólica (Adaptado de WindEurope, 2020)	48
Figura 16 - Principais fases do modelo de Economia Circular (Adaptado de Karavida and Nõmmik, 2015)	51
Figura 17 - Exemplo de Diagrama de Borboleta da EC (Adaptado de Silva, 2019).....	52
Figura 18 - Análise Granulométrica por Peneiração a Seco: Equipamento; Partículas peneiradas com tamanho 2,36 mm.	65

Figura 19 - Partículas fornecido pela Enercon GmbH, após separação por peneiração a seco.....	66
Figura 20 - Gráfico de distribuição granulométrica dos resíduos industriais de fibra de vidro e resina epóxi.	67
Figura 21 – (a) Visão geral da geometria das partículas e uma comparação em termos de tamanho; (b) Dimensão das partículas.	67
Figura 22 - Ensaio de flexão em três pontos: (a) Geometria dos provetes; (b) Vista esquemática da montagem do ensaio. Todas as dimensões em mm.	70
Figura 23 – (a) Laminado no interior do saco, em vácuo; (b) E sujeito a pressão, na prensa hidráulica.....	72
Figura 24 - Teste de resistência ao cisalhamento interlaminar.	73
Figura 25 - a) Equipamento de teste universal da marca <i>Shimadzu</i> , modelo AGS-X; b) Aparatos para ensaio de flexão em 3 pontos estático.	74
Figura 26 - Fotografia com a imagem da biqueira a partir da qual se desenvolveu todo o trabalho.	77
Figura 27 - STL da biqueira com ruído.	77
Figura 28 - Vista de Cima da biqueira.	78
Figura 29 - Vista de Frente da biqueira.	78
Figura 30 - Vista Lateral da biqueira.	78
Figura 31 - <i>Loft</i> da biqueira.....	79
Figura 32 - Vista de Cima com espessura variável visível da biqueira.	79
Figura 33 - Biqueira com espessura variável visível da biqueira.	79
Figura 34 - Macho e Fêmea da biqueira.....	80
Figura 35 - <i>Render</i> do Macho e da Fêmea da biqueira.	80
Figura 36 - Captura da Perspetiva Isométrica da biqueira.	80
Figura 37 - <i>Render</i> da biqueira.	81
Figura 38 - Maquinação do molde.	81
Figura 39 - Molde do Macho e da Fêmea da Biqueira em MDF hidrófugo.	82
Figura 40 - Preparação das diferentes fibras de vidro utilizadas como reforço: a) Principais dimensões das duas partes (dimensões em mm); b) Representação do empilhamento alternado no caso do laminado e das cinco camadas aplicadas no reforço da biqueira.....	83
Figura 41 - Preparação da fibra de vidro (esquerda) e Molde no estágio de cura (direita).	83
Figura 42 - Estado do molde após desenformação da biqueira.....	84
Figura 43 - Representação do molde da biqueira impresso na impressora 3D.....	85
Figura 44 - Impressora <i>Artillery Sidewinder X1</i>	85

Figura 45 - Processo de produção do molde da biqueira na impressora 3D.....	86
Figura 46 - Molde da biqueira após impressão.	86
Figura 47 - Molde no estágio de cura.....	87
Figura 48 - Processo de corte.	87
Figura 49 - Versão final da biqueira, comparando com a biqueira original.....	88
Figura 50 - Máquina de impacto IMATEK-IM10.	89
Figura 51 - Penetrador de ponta esférica.	89
Figura 52 - Gabarito de apoio às biqueiras no teste de impacto.	90
Figura 53 - Equipamento de teste universal da marca <i>Shimadzu</i> , modelo AG-IC, com uma célula de carga de 50 kN.	90
Figura 54 - Curvas representativas de tensão-deformação de flexão. Comparação entre a matriz de controlo e as diversas matrizes aditivadas.	92
Figura 55 - Relação entre o tamanho da partícula e a resistência à flexão das matrizes.	93
Figura 56 - Gráfico tensão, rigidez e deformação das matrizes.....	94
Figura 57 - Imagens SEM para a matriz epóxi com: (a) 1 wt.%; (b) 2 wt.%.	94
Figura 58 - Gráfico das Curvas Representativas dos laminados.	95
Figura 59 - Gráfico tensão, rigidez e deformação dos laminados.....	96
Figura 60 – Gráfico das Curvas Representativas dos laminados, após o teste de resistência ao cisalhamento interlaminar.....	97
Figura 61 - Gráfico de comparação da tensão entre os laminados de controlo e aditivados, após o teste de resistência ao cisalhamento interlaminar.	98
Figura 62 - Curvas características após impacto: (a) Gráfico Energia vs Tempo; (b) Gráfico Força vs Deslocamento; (c) Gráfico Força vs Tempo.	100
Figura 63 - Biqueira de controlo após o teste de impacto.	102
Figura 64 - Biqueira aditivada após o teste de impacto.	102
Figura 65 - Gráfico Força vs Deslocamento após o teste de compressão.	103
Figura 66 - Diferentes estágios da biqueira durante o teste de compressão.....	104
Figura 67 - Danos ocorridos na biqueira após teste de compressão: a) Delaminações e quebra das fibras na seção da biqueira; b) Delaminações na parte interior da biqueira; c) Quebra da fibra e da matriz na parte exterior; d) Deformação da pastilha de teste. ...	105

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Comparativo entre os compósitos termoendurecíveis e os termoplásticos (Adaptado de Tri-Dung Ngo, 2020)	13
Tabela 2 - Composição química, características e principais aplicações das fibras de vidro (Adaptado de Rajak, Wagh and Linul, 2021)	33
Tabela 3 - Principais propriedades físicas, mecânicas, elétricas, térmicas e óticas das fibras de vidro (Adaptado de Rajak, Wagh and Linul, 2021)	34
Tabela 4 - Principais propriedades mecânicas e físicas da resina epóxi (Santos <i>et al.</i> , 2020).	68
Tabela 5 - Tipologia dos Tecidos de Fibra de Vidro (Adaptado de Enercon Gmbh).	71
Tabela 6 - Propriedades mecânicas das matrizes após o ensaio.	92
Tabela 7 - Propriedades mecânicas dos laminados após os ensaios de flexão.	95
Tabela 8 – Resultados após o teste de resistência ao cisalhamento interlaminar.	97
Tabela 9 - Propriedades das biqueiras de controlo e aditivada no teste de impacto. ...	101
Tabela 10 - Espessura de delaminação no teste de impacto.....	101
Tabela 11 - Modelo de Plasticina Cilíndrico no teste de impacto.	102
Tabela 12 - Espessura de delaminação no teste de compressão.....	105
Tabela 13 - Modelo de Plasticina Cilíndrico no teste de compressão.....	105

Lista de Acrónimos

AEEE	Associação Espanhola de Energia Eólica
APICCAPS	Associação Portuguesa dos Industriais de Calçado, Componentes, Artigos de Pele e seus Sucedâneos
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CCC	<i>Carbon-Carbon Composite</i>
CE	<i>Conformité Européene</i>
CEE	Comunidade Económica Europeia
CMC	<i>Ceramic Matrix Composite</i>
CTE	<i>Coefficient of Thermal Expansion</i>
EC	Economia Circular
EDX	Espectrometria de Energia Dispersiva
EPI	Equipamento de Proteção Individual
FC	Fibra de Carbono
FV	Fibra de Vidro
GEE	Gases de Efeito de Estufa
ILSS	<i>Interlaminar Shear Strength</i>
INE	Instituto Nacional de Estatística
IRENA	Agência Internacional para as Energias Renováveis
J	<i>Joule</i>
kN	<i>KiloNewton</i>
MA	Manufatura Aditiva
MMC	<i>Metal Matrix Composite</i>
MW	<i>MegaWatts</i>
OMC	Organização Mundial do Comércio
ONU	Organização das Nações Unidas
PEE	Pacto Ecológico Europeu
PETG	Politereftalato de Etileno Glicol
PMC	<i>Polymer Matrix Composite</i>
PRF	Poliméricos Reforçados com Fibra
PRFV	Poliméricos Reforçados com Fibra de Vidro
RPM	Rotações por Minuto
SEM	Microscopia Eletrónica de Varrimento
STL	<i>Stereolithography</i>
Tg	Temperatura de transição vítrea

UE	União Europeia
UV	Ultravioleta
WWEA	Associação Mundial de Energia Eólica

Capítulo 1

Introdução

Neste primeiro capítulo apresenta-se a contextualização deste trabalho, as motivações para a sua realização, os objetivos definidos, a metodologia utilizada, e ainda, a estrutura da presente dissertação.

1.1. Contextualização

No campo da ciência e da tecnologia, o progresso ocorre todos os dias com avanços e limitações. A tendência atual é apostar em fontes renováveis de energia, o que significa que há um esforço para encontrar alternativas mais sustentáveis e menos prejudiciais ao meio ambiente (Reddy *et al.*, 2021).

Os materiais compósitos são materiais que são constituídos pela combinação de dois ou mais materiais diferentes, cada um com as suas próprias propriedades distintas, para criar um novo material com características únicas (Reddy *et al.*, 2021). Estes materiais consistem tipicamente num material de reforço, como fibras ou partículas, que está embutido num material matricial, como um polímero ou um metal (Reddy *et al.*, 2021). O material de reforço é tipicamente mais forte e mais rígido do que o material da matriz, o que proporciona apoio e estabilidade (Reddy *et al.*, 2021).

Atualmente, os materiais compósitos estão a substituir cada vez mais os materiais tradicionais numa grande variedade de áreas, desde artigos domésticos a componentes para naves espaciais ou centrais nucleares. A sustentabilidade está a tornar-se um argumento cada vez mais pertinente no processo de seleção dos materiais (Fazio *et al.*, 2023). Os compósitos reforçados com fibras são materiais fortes, leves e duráveis que estão a ser cada vez mais adotados nos transportes, na construção, nas energias renováveis e em muitos outros mercados (Krauklis *et al.*, 2021). A sustentabilidade na sua fase de utilização é frequentemente um fator-chave para a seleção de materiais compósitos em relação aos materiais tradicionais. As construções compósitas oferecem longos tempos de serviço combinados com baixos requisitos de manutenção e os compósitos leves resultam num menor consumo de energia ao longo da vida de um produto (Shehab *et al.*, 2022).

A deposição em aterro, especialmente de materiais compósitos, representa uma elevada perda de materiais de elevado valor e de energia utilizada na sua produção, bem como a perda de oportunidades de reutilização dos compósitos noutros investimentos (Chatziparaskeva *et al.*, 2022). Por conseguinte, é imperativo que a indústria e os decisores políticos colaborem para desenvolver soluções sustentáveis de fim de vida para os materiais compósitos. Isto não só minimizará a degradação ambiental associada à deposição em aterro, como também capitalizará o valor inerente a estes materiais. Ao criar vias para a reutilização e reciclagem de materiais compósitos, pode-se conservar os recursos, reduzir a pegada de carbono associada à produção de novos materiais compósitos e promover uma economia circular que dê prioridade à eficiência dos recursos em detrimento da descartabilidade (Chatziparaskeva *et al.*, 2022). Além disso, com as inovações tecnológicas e o apoio infraestrutural adequados, a reciclagem de materiais compósitos pode abrir novos mercados e oportunidades de emprego, reforçando ainda mais a lógica económica subjacente a estes esforços (Chatziparaskeva *et al.*, 2022).

Embora os materiais compósitos ofereçam grandes oportunidades na engenharia, a sua integração na economia circular continua a ser um desafio. Tal deve-se às características e propriedades específicas dos materiais compósitos, bem como à disponibilidade limitada de tecnologias sustentáveis de gestão de resíduos de materiais em fim de vida (Fazio *et al.*, 2023). Existem várias limitações quando se opta por lidar com materiais compósitos de uma forma circular, no que respeita às limitadas aplicações conhecidas e à falta de inovação.

Devido à crescente atração por energia limpa e acessível, espera-se que estas tecnologias de produção de energia aumentem a sua quota no cabaz energético nos próximos anos (Fazio *et al.*, 2023). A utilização de energias renováveis aumentará em qualquer caso, uma vez que a utilização contínua de combustíveis fósseis é limitada. Se a utilização de materiais compósitos continuar da forma atual, até 2030, os seres humanos terão um problema considerável relativamente à sua eliminação, pois haverá demasiados resíduos e não existem muitos locais que possam tratar da reciclagem de compósitos (Fazio *et al.*, 2023). À medida que se torna mais difícil encontrar locais para despejar os resíduos, pode tornar-se dispendioso. E o simples facto de os deitar fora prejudica o ambiente, uma vez que não se decompõem facilmente (Fazio *et al.*, 2023).

No setor industrial é gerada uma quantidade significativa de resíduos de materiais compósitos durante o processo de fabrico e no fim de vida dos produtos. Os resíduos de

materiais compósitos são compostos por diferentes materiais, incluindo plásticos, metais, vidro e outros tipos de materiais que são utilizados em várias aplicações industriais (Yongxiang Yang *et al.*, 2012).

Uma das principais causas dos resíduos de materiais compósitos é a utilização ineficiente dos materiais durante o processo de fabrico. Em alguns casos, as matérias-primas são utilizadas em excesso e uma quantidade significativa de material é descartada como resíduo (Yongxiang Yang *et al.*, 2012). Este facto não só gera preocupações ambientais, como também resulta em perdas financeiras para as empresas. Outro fator que contribui para os resíduos de materiais compósitos é o fim da vida útil dos produtos. Muitos produtos industriais têm um tempo de vida limitado e, quando atingem o fim da sua vida útil, são frequentemente descartados como resíduos. Estes resíduos podem incluir uma quantidade significativa de materiais compósitos que são difíceis de reciclar (Yongxiang Yang *et al.*, 2012).

Os resíduos de materiais compósitos podem ser perigosos para o ambiente e para a saúde humana. Por exemplo, alguns materiais compósitos contêm substâncias químicas tóxicas, como o chumbo e o mercúrio, que podem constituir uma ameaça para o ambiente se não forem eliminados corretamente (Khalid *et al.*, 2022). Além disso, os resíduos de materiais compósitos podem criar riscos físicos, tais como arestas vivas e saliências que podem causar ferimentos nos indivíduos que manuseiam os resíduos (Khalid *et al.*, 2022).

A gestão dos resíduos de materiais compósitos é um desafio significativo para o setor industrial. As empresas têm de cumprir vários regulamentos e diretrizes relacionadas com a gestão e eliminação de resíduos. Isto inclui a rotulagem, o armazenamento e o transporte corretos dos resíduos para garantir o seu manuseamento e eliminação seguros (Khalid *et al.*, 2022).

A reciclagem é uma solução para reduzir a quantidade de resíduos de materiais compósitos gerados pela indústria. No entanto, a reciclagem de materiais compósitos pode ser um desafio devido aos diferentes tipos de materiais utilizados na sua composição. Os esforços de reciclagem requerem frequentemente equipamento e técnicas especializadas para separar e processar eficazmente os materiais (Rani *et al.*, 2021). Outra solução para reduzir os resíduos de materiais compósitos é conceber produtos tendo em consideração o seu fim de vida. Ao conceber produtos que são mais

fáceis de reciclar e eliminar, as empresas podem reduzir a quantidade de resíduos gerados durante a vida útil do produto (Rani *et al.*, 2021).

Até à data, suspeita-se que várias toneladas de materiais compósitos nunca chegam ao canal de reciclagem adequado devido à falta de políticas adequadas de gestão de resíduos e de legislação ambiental (Chatziparaskeva *et al.*, 2022). Neste contexto, o ciclo de vida do material compósito pode ser resumido num processo linear que começa na matéria-prima e termina com os desperdícios resultantes do processo de fabrico e materiais compósitos em fim de vida depositos em aterros, uma vez que é o método mais barato de eliminação (Chatziparaskeva *et al.*, 2022). Assim, com o objetivo de melhorar a sustentabilidade ambiental, é necessário um quadro legal mais rigoroso e restritivo, no que diz respeito aos materiais em fim de ciclo de vida e à deposição em aterro de materiais compósitos. Uma nova regulamentação legal deveria ser aplicada não só aos materiais em fim de ciclo de vida, mas também obrigar a uma utilização mais inteligente e eficiente dos mesmos desde o início, priorizando a utilização de materiais reciclados na produção, sempre que tal seja viável. Em vez de se criarem mais resíduos, devia tirar-se o máximo partido do que já existe. Esta abordagem não é apenas de bom senso, mas sim um passo responsável em direção a um futuro sustentável. A ideia deveria ser trabalhar no sentido de uma economia circular com o objetivo de utilizar materiais reciclados produzidos com energias renováveis, reduzindo ao mesmo tempo a produção de resíduos e de agentes químicos tóxicos (Chatziparaskeva *et al.*, 2022).

Para além das preocupações ambientais, os resíduos de materiais compósitos também podem ter impactes económicos. O custo da eliminação de resíduos pode ser significativo para as empresas, e a eliminação incorreta pode resultar em multas e responsabilidades legais (Yongxiang Yang *et al.*, 2012). Ao implementar práticas sustentáveis de gestão de resíduos, as empresas podem reduzir estes custos e melhorar os seus resultados (Yongxiang Yang *et al.*, 2012). No entanto, estes resíduos também podem ser um recurso valioso para as empresas. Alguns materiais, como os metais, podem ser reciclados e utilizados em novos produtos. Além disso, os resíduos podem ser utilizados em processos de recuperação de energia, como a incineração ou a gaseificação, para gerar eletricidade e calor. As campanhas de educação e sensibilização também podem ajudar a reduzir os resíduos de materiais compósitos gerados pela indústria (Lunetto *et al.*, 2023). Ao educar os trabalhadores, os clientes e as partes interessadas sobre a importância da redução dos resíduos e das práticas corretas de eliminação, as empresas podem criar uma cultura de sustentabilidade e promover práticas responsáveis de gestão de resíduos (Lunetto *et al.*, 2023).

Em conclusão, os resíduos de materiais compósitos gerados pela indústria constituem um desafio significativo que exige uma abordagem multifacetada. A reciclagem, a conceção de produtos, a regulamentação governamental, as práticas sustentáveis de gestão de resíduos e as campanhas de educação e sensibilização são estratégias que podem ser utilizadas para reduzir os resíduos e promover a sustentabilidade no setor industrial. Ao implementar estas estratégias, as empresas podem reduzir o seu impacto ambiental, melhorar os seus resultados e criar um futuro mais sustentável.

Em suma, esta dissertação pretende dar seguimento à investigação em curso sobre a reciclagem de pás de rotor de aerogeradores eólicos, ajudando a reduzir a quantidade de resíduos gerados pela indústria eólica, conservando os recursos naturais, reduzindo as emissões de gases de efeito estufa, gerando benefícios económicos e promovendo a sustentabilidade.

1.2. Motivações

A motivação impulsiona as pessoas para que atuem com a finalidade de atingirem os seus objetivos, e por isso quando a temática desperta o nosso interesse, acaba-se por trabalhar com mais apreço. O tema desta dissertação é um problema que tem impacto ambiental a nível mundial, tornando-se assim, num grande desafio solucioná-lo.

1.3. Objetivos

O objetivo geral da presente dissertação é definir e ensaiar uma metodologia de reciclagem dos resíduos resultantes do processo de produção de pás de rotor, que possa ser escalável para ambiente industrial e que permita tornar o setor da energia eólica mais sustentável.

Para alcançar o objetivo principal, foram estabelecidos vários objetivos específicos:

- Realização de uma revisão bibliográfica sobre as temáticas em estudo;
- Definição do protocolo experimental;
- Ensaio experimentais do método da reciclagem;
- Caracterização mecânica dos produtos reciclados;
- Análise e discussão de resultados.

1.4. Metodologia

A escolha do método científico a utilizar é uma tarefa e um trabalho sistemático na procura de respostas para as questões propostas, por parte da observação organizada de factos e deduções lógicas para a comprovação científica dos resultados e formulação de teorias (Pereira *et al.*, 2018).

A Investigação Científica é suportada pelas observações e pelas teorias abordando dois níveis, o nível empírico e o nível teórico (Pereira *et al.*, 2018). É importante destacar que nem todos os conhecimentos originam ciência, pois só o conhecimento científico é que cumpre um conjunto de normas e técnicas, denominado por método científico (Pereira *et al.*, 2018). Este caracteriza-se por ser organizado, preciso e sistemático, já que o conhecimento científico se fundamenta em testes científicos e estudos (Pereira *et al.*, 2018).

O método científico é um conjunto padronizado de técnicas vocacionado para a construção de conhecimento científico, como interpretar resultados e generalizá-los. O método científico pode ser indutivo ou dedutivo (Pereira *et al.*, 2018). Associa-se o método dedutivo à investigação quantitativa e o método indutivo à investigação qualitativa (Pereira *et al.*, 2018). A investigação qualitativa é baseada em técnicas de recolha de dados descritivas, bem como da sua análise rigorosa (Pereira *et al.*, 2018). A investigação quantitativa é fundamentada em técnicas de recolha, apresentação e análise de dados que permitiram a sua quantificação e o seu tratamento através de métodos estatísticos (Pereira *et al.*, 2018).

Deste modo, esta dissertação, baseou-se num tipo de investigação dedutiva, contribuindo para a criação de um método de reciclagem de pás de rotor de aerogeradores eólicos que possa ser utilizado à escala industrial.

No desenvolvimento da mesma foi realizada uma revisão bibliográfica, com o objetivo de adquirir uma maior compreensão da perspetiva global acerca das propostas já existentes, limitações e questões acerca da temática não solucionadas. Assim, recorreu-se a vários motores de busca, como a *Web of Science*, o *Scopus* e a *ScienceDirect* do qual foram obtidos artigos. Por fim, para a normalização das referências bibliográficas procedeu-se à utilização do software *Mendeley Desktop* com aplicação do estilo de referênciação *Harvard Referencing Style*.

1.5. Estrutura

A presente dissertação encontra-se estruturada em seis capítulos:

No primeiro capítulo é apresentada a contextualização do trabalho desenvolvido, a motivação para a sua realização, o esclarecimento dos objetivos pretendidos com este trabalho, de maneira a dar a conhecer a temática estudada, a metodologia aplicada e a estrutura desta dissertação.

É apresentado no segundo capítulo os principais conceitos sobre os materiais compósitos, assim como, as técnicas de reciclagem e, ainda, a problemática da reciclagem.

No terceiro capítulo apresentam-se as temáticas dos resíduos industriais e da economia circular na indústria eólica.

No quarto capítulo é apresentada a caracterização do setor eólico bem como do setor do calçado, dando-se enfoque nas principais características, desafios e impactos na sociedade e no ambiente.

O caso prático é apresentado no quinto capítulo, começando pela apresentação do procedimento experimental adotado. De seguida são apresentados os métodos e equipamentos utilizados e por fim os tipos de ensaios usados.

No sexto capítulo são comparados e discutidos os resultados obtidos através da aplicação dos vários métodos.

Por último, no sétimo capítulo, são apresentadas as conclusões sobre o estudo realizado, as limitações à sua realização e as propostas de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Materiais Compósitos

O presente capítulo apresenta uma breve abordagem aos materiais compósitos, começando pelas suas principais definições e conceitos e terminando com a apresentação das técnicas de reciclagem.

2.1. Definição

As tecnologias modernas necessitam frequentemente de combinações invulgares de qualidades que as ligas metálicas comuns, os materiais polímeros e as cerâmicas nem sempre podem proporcionar. Isto é especialmente evidente em domínios como os transportes, o setor náutico e as aeronaves (Rajak, Wagh and Linul, 2021). Os engenheiros estão constantemente à procura de materiais estruturais com qualidades específicas. Estes materiais devem ser de baixa densidade e, ao mesmo tempo, rígidos e resistentes à abrasão, ao impacto e à corrosão (Rajak, Wagh and Linul, 2021).

A utilização de materiais compósitos tem sido fundamental para o avanço das propriedades dos materiais. O progresso neste domínio facilitou a diversificação das combinações e gamas destas propriedades (Chawla, 2016). Por outras palavras, o material compósito refere-se a qualquer substância que consiste em múltiplas fases e contém aspetos significativos de cada fase constituinte, levando a uma combinação notável de propriedades. Segundo o princípio da ação combinada, é possível integrar dois ou mais materiais diferentes de uma forma estratégica para obter propriedades superiores (Callister, 2018).

Os compósitos são materiais multifásicos criados artificialmente, por oposição a substâncias que ocorrem naturalmente. São constituídos por fases quimicamente diferentes e separadas de forma distinta (Callister, 2018). O principal objetivo da maioria dos materiais compósitos é aumentar as propriedades mecânicas, incluindo a tenacidade, a rigidez e a resistência, especialmente em ambientes hostis e a temperaturas elevadas (Altenbach, Altenbach and Kissing, 2018).

Uma vez que é difícil obter materiais puros que possam satisfazer todos os requisitos para a mais vasta gama de aplicações, a utilização de materiais compósitos tem várias vantagens. Os materiais compósitos são normalmente escolhidos em detrimento dos

materiais tradicionais devido à sua baixa densidade, distribuição controlada do peso, elevada relação resistência/densidade, resistência direcional e rigidez, bem como à sua capacidade de produzir peças de grandes dimensões, como asas de aviões e embarcações navais, e peças com geometrias complexas, bem como à sua resistência à corrosão, às intempéries e a uma variedade de acabamentos de superfície (Clyne and Hull, 2019).

Em geral, um compósito é constituído por três componentes: a matriz como fase contínua, os reforços como fase descontínua ou dispersa, incluindo fibras e partículas, e a região de interfase fina, também conhecida como interface como apresentado na figura 1 (Callister, 2018).

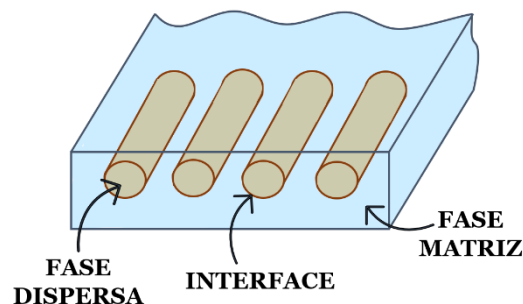


Figura 1 - Constituição de um material compósito (Adaptado de Callister, 2018)

Os metais, os polímeros ou as cerâmicas são normalmente utilizados como fases da matriz em compósitos de fibras (Altenbach, Altenbach and Kissing, 2018). Os materiais poliméricos e os metais são normalmente utilizados como materiais matriciais, uma vez que a ductilidade é desejada. No entanto, nos compósitos em que é utilizada uma matriz à base de cerâmica, é incorporado um elemento de reforço para aumentar a resistência à fratura (Altenbach, Altenbach and Kissing, 2018). No caso de os compósitos serem reforçados com fibras, a matriz tem várias finalidades. Inicialmente, a mesma atua como agente de ligação, mantendo as fibras unidas e transmitindo a tensão aplicada externamente às fibras. Para além disso, o material da matriz tem de apresentar ductilidade. Além disso, o módulo de elasticidade das fibras tem de ser substancialmente superior ao da matriz (Altenbach, Altenbach and Kissing, 2018).

O segundo papel da fase matriz é proteger as fibras individuais contra danos superficiais causados pela abrasão mecânica ou pelas interações químicas com o ambiente externo (Callister, 2018). Este contacto tem o potencial de introduzir defeitos na superfície que podem resultar em fissuras, conduzindo, em última análise, à rutura, mesmo sob tensão mínima.

Finalmente, a matriz separa as fibras e, em virtude da sua relativa suavidade e plasticidade, impede a propagação de fissuras frágeis de fibra para fibra, o que poderia resultar numa falha catastrófica, ou seja, a fase matriz serve de barreira à propagação de fissuras. Mesmo que algumas fibras individuais falhem, a fratura total do compósito não ocorrerá até que um grande número de fibras adjacentes falhe e forme um aglomerado de tamanho crítico (Clyne and Hull, 2019).

Uma vez que o objetivo é minimizar a extração de fibras, é fundamental que as forças de ligação adesiva entre a matriz e a fibra sejam fortes. A resistência da ligação é um fator crítico a considerar ao escolher uma combinação de matriz e fibra (Mukherjee, Jain and Banerjee, 2023). A melhoria desta ligação tem um impacto considerável na resistência global do compósito, visto que a mesma é crucial para a maximização da transmissão efetiva de tensões de uma matriz que possui propriedades mecânicas inferiores para uma com melhores propriedades (Mukherjee, Jain and Banerjee, 2023).

O estudo dos materiais sempre foi fundamental para a expansão significativa da sociedade e para o avanço tecnológico numa variedade de domínios. Além disso, devido ao enorme crescimento das indústrias transformadoras e às necessidades crescentes da sociedade, são necessários materiais mais qualificados que possam ser utilizados para produzir bens não convencionais (Kangishwar *et al.*, 2023). De facto, as limitações dos materiais tradicionais foram descobertas como consequência da procura crescente e do aumento da otimização das técnicas industriais, culminando no desenvolvimento de materiais avançados. Nos últimos anos, os Compósitos de Matriz Polimérica (PMC – *Polymer Matrix Composite*) têm vindo a substituir os materiais tradicionais devido às suas vantagens em relação aos materiais convencionais. Os PMCs tornaram-se os materiais compósitos de crescimento mais rápido e mais utilizados devido às suas características intrínsecas e à sua vasta gama de aplicações (Kangishwar *et al.*, 2023).

As características dos PMCs dependem da matriz e dos reforços. Como resultado, vários aspetos devem ser considerados no desenvolvimento de PMCs. Estes incluem não só os tipos de matriz e de reforço, mas também as suas proporções relativas. Para adaptar os PMCs às condições em que serão utilizados, cada uma destas variáveis deve ser gerida cuidadosamente (Kangishwar *et al.*, 2023). Os PMCs podem ser criados a partir de muitos materiais com uma vasta gama de reforços fibrosos. Estes compósitos são conhecidos pela sua capacidade mecânica para suportar cargas e por muitas outras características, incluindo o equilíbrio térmico, a condutividade elétrica, a estabilidade química e a conveniência da conceção e da produção económica em massa. Além disso,

os PMCs, em comparação com os compósitos de matriz metálica têm grande rigidez e resistência mecânica, e são fáceis de produzir, devido às temperaturas de processamento relativamente baixas, abaixo de 600°C, formando a base de uma vasta gama de aplicações em várias indústrias em todo o mundo (Kangishwar *et al.*, 2023).

Existem várias matrizes poliméricas diferentes que podem ser utilizadas em materiais compósitos. Entre os compósitos de matriz polimérica, os compósitos de matriz termoendurecível são mais predominantes do que os compósitos de matriz termoplástica. Embora os termoendurecíveis e os termoplásticos pareçam semelhantes, têm propriedades e aplicações muito diferentes. A compreensão das diferenças de desempenho pode ajudar a tomar melhores decisões de aprovisionamento (Periasamy *et al.*, 2023). Estas decisões de aprovisionamento referem-se ao processo de seleção e aquisição do tipo mais adequado de matriz polimérica para utilização em materiais compósitos. O mesmo enfatiza a importância de uma tomada de decisão informada ao selecionar materiais, de modo a alcançar o desempenho e os resultados desejados para o produto compósito. Ao compreender as diferenças entre os compósitos termoendurecíveis e termoplásticos, é possível tomar decisões sobre a aquisição mais informadas, garantindo que o material selecionado é o ideal para a utilização pretendida (Periasamy *et al.*, 2023).

Os termoendurecíveis são materiais que sofrem uma reação química ou cura e normalmente transformam-se de um líquido para um sólido. Na sua forma não curada, o material tem pequenas moléculas não ligadas, conhecidas como monómeros. A adição de um segundo material como agente de cura, a presença de calor ou outras influências ativadoras iniciará a reação de cura (Ngo, 2020). Durante esta reação, as moléculas estabelecem ligações cruzadas e formam cadeias moleculares significativamente mais longas e uma rede de ligações cruzadas, provocando a solidificação do material. A reação química que ocorre durante o processo de cura é irreversível. Subsequentemente, a exposição a elevadas temperaturas após a solidificação quebra as ligações cruzadas do material, causando a sua degradação. Isto deve-se ao facto de estes materiais se degradarem tipicamente a uma temperatura abaixo da qual seriam capazes de fundir (Ngo, 2020).

Já os termoplásticos são plásticos passíveis de fusão. Os materiais termoplásticos são processados com calor. Quando é adicionado calor suficiente para elevar a temperatura do plástico acima do seu ponto de fusão, o plástico derrete e amolece o suficiente para ser processado. Quando a fonte de calor é removida e a temperatura do plástico desce

abaixo do seu ponto de fusão, o plástico volta a solidificar-se num sólido semelhante ao vidro (Valente, Rossitti and Sambucci, 2023). Este processo pode ser repetido, com o plástico a derreter e a solidificar à medida que a temperatura sobe acima e desce abaixo da temperatura de fusão, respetivamente. No entanto, o material pode estar cada vez mais sujeito a deterioração no seu estado fundido, pelo que existe um limite prático para o número de vezes que este reprocessamento pode ser efetuado antes de as propriedades do material começarem a sofrer (Valente, Rossitti and Sambucci, 2023).

Em termos gerais, os termoendurecíveis existem há muito tempo e tendem a ter um lugar bem estabelecido no mercado, porque têm frequentemente custos de matéria-prima mais baixos e proporcionam frequentemente uma fácil molhagem da fibra de reforço e uma fácil moldagem às geometrias da peça final (Barreira-Pinto *et al.*, 2023). Por outras palavras, os termoendurecíveis são geralmente mais simples de processar do que os termoplásticos. Os termoendurecíveis geralmente exigem menos etapas e menos energia para serem processados em produtos finais. No entanto, os termoplásticos são normalmente mais duráveis e menos propensos a quebrar do que os termoendurecíveis. Podem ter uma melhor resistência química, não necessitam de refrigeração como acontece frequentemente com os termoendurecidos não curados e podem ser mais facilmente reciclados e reparados (Barreira-Pinto *et al.*, 2023). Na Tabela 1 apresenta-se uma comparação entre os compósitos termoendurecíveis e os termoplásticos.

Tabela 1 – Comparativo entre os compósitos termoendurecíveis e os termoplásticos (Adaptado de Tri-Dung Ngo, 2020)

	Termoendurecível	Termoplástico
Processamento	Contêm monómeros que se ligam entre si durante o processo de cura, formando uma ligação química irreversível. O processo de reticulação elimina o risco de o produto voltar a derreter quando é aplicado calor, tornando os termoendurecíveis ideais para aplicações de elevado calor.	Os termoplásticos amolecem quando aquecidos e tornam-se mais fluidos à medida que é aplicado calor adicional. Esta característica permite que os termoplásticos sejam remodelados e reciclados sem afetar negativamente as propriedades físicas do material.

Características e Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> - Melhoram significativamente as propriedades mecânicas do material, proporcionando maior resistência química, resistência ao calor e integridade estrutural. Os termoendurecíveis são frequentemente utilizados em produtos selados devido à sua resistência à deformação; - Não podem ser remodelados; - Mais resistente a altas temperaturas do que os termoplásticos; - <i>Design</i> altamente flexível; - Custos de matéria-prima mais baixos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Oferecem normalmente uma elevada resistência e facilidade de dobragem. Dependendo dos polímeros, os termoplásticos podem ser utilizados em aplicações de baixa tensão, como sacos de plástico, ou em peças mecânicas de alta tensão; - Altamente recicláveis; - Podem derreter se forem aquecidos, podendo ser remodelados; - Resistência a impactos elevados; - Resistente a produtos químicos; - Geralmente, mais caros do que os termoendurecíveis.
------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

As matrizes termoendurecíveis, como as resinas epóxi ou de poliéster, são normalmente utilizadas em combinação com as fibras de reforço, como as fibras de vidro, por várias razões:

- Propriedades mecânicas superiores: as resinas termoendurecíveis oferecem excelentes propriedades mecânicas, incluindo elevada rigidez, resistência e estabilidade dimensional. Ao combinar estas resinas com fibras de reforço, o compósito resultante pode beneficiar da elevada resistência e rigidez das fibras, o que melhora o desempenho mecânico global do material (Clyne and Hull, 2019).
- Resistência química: as resinas termoendurecíveis têm uma boa resistência a uma grande variedade de produtos químicos, incluindo ácidos, bases, solventes e substâncias corrosivas. Esta resistência química é importante em aplicações onde o compósito pode ser exposto a ambientes agressivos, como no processamento químico ou em aplicações na indústria naval (Mukherjee, Jain and Banerjee, 2023).
- Estabilidade térmica: as matrizes termoendurecíveis apresentam uma excelente estabilidade térmica e podem suportar temperaturas elevadas sem degradação significativa. Isto torna-as adequadas para aplicações que requerem resistência ao calor e a ciclos térmicos, tais como componentes aeroespaciais e peças automóveis expostas a temperaturas elevadas (Chawla, 2016).
- Processo de cura: as resinas termoendurecíveis passam por um processo de cura, no qual a resina passa de um estado líquido ou semilíquido para um estado sólido

através de ligações cruzadas. Este processo de cura confere ao compósito uma maior resistência e durabilidade. Também permite um controlo preciso do tempo e da temperatura de cura da resina, permitindo aos fabricantes otimizar o processo de fabrico (Clyne and Hull, 2019).

- Propriedades adesivas: as resinas termoendurecíveis têm ótimas propriedades adesivas, o que lhes permite ligarem-se eficazmente às fibras de reforço. Isto assegura uma interface forte entre a matriz e as fibras, permitindo uma transferência eficiente de tensão e capacidade de suporte de carga dentro da estrutura composta (Mukherjee, Jain and Banerjee, 2023).
- Flexibilidade de projeto: os materiais compósitos com matrizes termoendurecíveis oferecem flexibilidade na conceção devido à sua moldabilidade e capacidade de serem moldados em formas complexas. Podem ser facilmente moldados nas formas desejadas, permitindo a produção de componentes complexos com geometrias variáveis (Chawla, 2016).

As resinas epoxídicas estão disponíveis numa vasta gama de composições químicas. Para iniciar o processo de cura destas resinas, é adicionado um agente de endurecimento adequado, como aminas alifáticas aromáticas ou determinadas poliamidas (Neto and Pardini, 2016). O preço destas resinas é aproximadamente quatro vezes superior ao das resinas de poliéster e duas vezes superior ao das resinas vinílicas (Santos, 2021). As resinas epóxi oferecem várias vantagens importantes, incluindo uma elevada resistência mecânica, excelente resistência à abrasão e aos produtos químicos, forte adesão às fibras, processo de cura não volátil, estabilidade dimensional excepcional devido à baixa retração, baixa absorção de água e uma gama de temperaturas de trabalho tipicamente entre 100°C e 220°C. Apresentam uma processabilidade favorável, embora não tão elevada como a das resinas de poliéster, devido a viscosidades iniciais mais elevadas e a tempos de cura mais longos. Além disso, as formulações de base podem apresentar alguma fragilidade, mas esta limitação pode ser facilmente ultrapassada através da incorporação de aditivos de elevada tenacidade (Neto and Pardini, 2016). Estes aditivos destinam-se a melhorar as propriedades mecânicas da resina epóxi curada, particularmente a resistência à tração e a resistência ao impacto (Neto and Pardini, 2016).

Os materiais que constituem a fase dispersa (reforço ou de enchimento) são materiais sólidos, de composição e estrutura diferentes da do material constituinte da matriz (Callister, 2018). Estes materiais são adicionados às matrizes para modificar as suas propriedades.

Uma fase dispersa inerte (enchimento) refere-se a uma fase que não participa ativamente em quaisquer reações químicas ou interações com o material da matriz, ou seja, é quimicamente inativa. O objetivo da incorporação de uma fase dispersa inerte é, normalmente, modificar as propriedades físicas ou mecânicas do compósito. A fase inerte dispersa melhora principalmente as propriedades como a rigidez, a resistência ao impacto, a condutividade térmica e a estabilidade dimensional do compósito. Ao distribuir eficazmente as partículas inertes na matriz, o mecanismo de transferência de carga é melhorado, resultando num maior desempenho mecânico. Além disso, as fases dispersas inertes podem atuar como barreiras para evitar a propagação de fissuras, aumentar a resistência ao desgaste ou melhorar a resistência ao ataque químico (Mukherjee, Jain and Banerjee, 2023).

Por outro lado, uma fase dispersa ativa (reforço), refere-se a uma fase ou material que participa ativamente em reações químicas ou interações com o material da matriz. A fase dispersa ativa sofre transformações químicas, alterações nas propriedades quando exposta a condições ou estímulos ambientais específicos. O objetivo da incorporação de uma fase dispersa ativa é, normalmente, introduzir funcionalidades adicionais ou desencadear respostas específicas no compósito. As fases dispersas ativas podem incluir materiais como nanopartículas contendo substâncias reativas ou aditivos quimicamente ativos. Os componentes ativos podem reagir com o material da matriz ou com estímulos externos, como a temperatura, o pH, a luz ou a humidade, para induzir alterações nas propriedades ou no comportamento do compósito (Mukherjee, Jain and Banerjee, 2023).

É de notar que a seleção de uma fase dispersa inerte ou ativa depende das propriedades desejadas e das funcionalidades necessárias para uma aplicação específica. A escolha entre fases dispersas inertes e ativas num sistema compósito depende da finalidade pretendida, dos requisitos de desempenho visados e da compatibilidade entre a fase dispersa e o material da matriz. Apresenta-se na figura 2, as vantagens e desvantagens da fase dispersa ativa e inerte (Mukherjee, Jain and Banerjee, 2023).

A adição de enchimento a um material de matriz pode ter um impacto no módulo de flexão e de tração do material compósito. Em relação ao módulo de flexão, há um aumento da rigidez, ou seja, a adição de um material de enchimento rígido a um material de matriz pode aumentar a rigidez global e a rigidez do compósito. A fase dispersa atua como reforço, resistindo eficazmente à deformação por flexão e resultando num módulo de flexão mais elevado (Mukherjee, Jain and Banerjee, 2023).

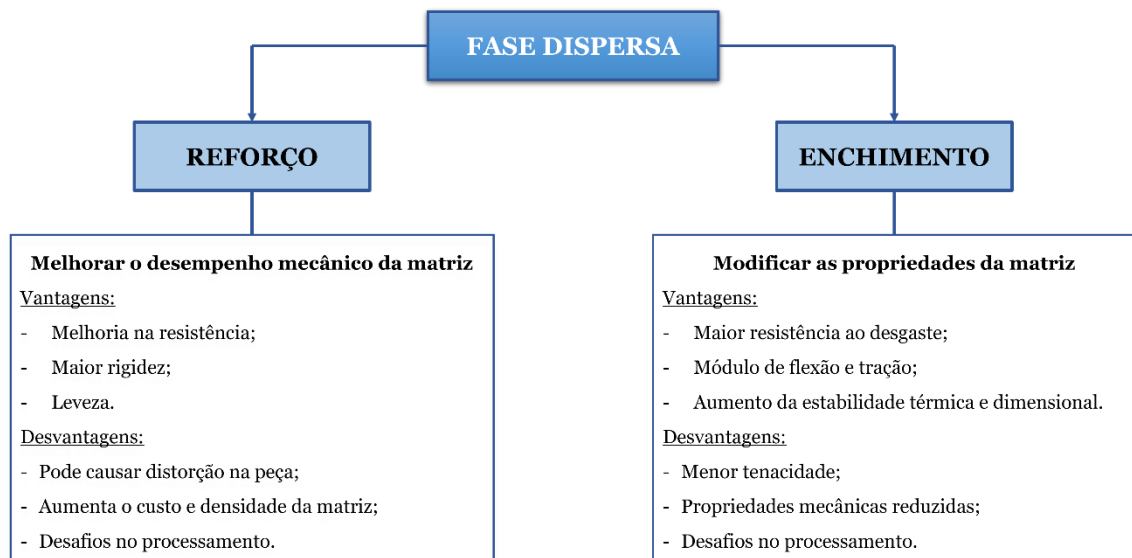


Figura 2 – Vantagens e Desvantagens da Fase Dispersa (Adaptado de Mukherjee, Jain and Banerjee, 2023)

Já o módulo de tração, reflete a resistência de um material ao alongamento sob tensão de tração. Semelhante ao módulo de flexão, a adição de uma fase dispersa pode reforçar o material da matriz e aumentar a sua resistência ao alongamento sob tensão de tração. Este efeito de reforço leva a um aumento do módulo de tração (Mukherjee, Jain and Banerjee, 2023).

Nos Compósitos com Matriz Metálica (MMC – *Metal Matrix Composite*), a matriz é um metal dúctil. Estes compósitos oferecem várias vantagens em relação aos seus materiais de base e podem suportar temperaturas de serviço mais elevadas. O reforço aumenta a resistência e a rigidez específica, melhorando também a resistência à fluência, a condutividade térmica, a resistência à abrasão e a estabilidade dimensional (Zweben, 2015). As vantagens notáveis dos MMC incluem a sua elevada resistência e rigidez, excelente resistência à fadiga, bem como elevada tenacidade ao desgaste e à erosão (Callister, 2018). No entanto, é importante notar que os MMC são geralmente mais dispendiosos em comparação com os PMC, o que limita a sua utilização generalizada.

Normalmente, o fabrico de compósitos com matriz metálica abrange duas etapas principais: a consolidação, que envolve a introdução do reforço nas matrizes, seguida de operações de moldagem para atingir a forma desejada. Estes processos asseguram a integração correta do reforço na matriz metálica, resultando nas propriedades desejadas do compósito (Altenbach, Altenbach and Kissing, 2018).

A maioria dos fabricantes de automóveis já colocou no mercado componentes de motores executados de uma matriz de liga de alumínio reforçada com fibras de carbono (FC) e

alumina. Este MMC é leve, robusto e termicamente estável. Os compósitos avançados com uma matriz metálica de liga de alumínio são utilizados em aplicações estruturais de aeronaves (Altenbach, Altenbach and Kissing, 2018).

A altas temperaturas, os materiais cerâmicos são extremamente resistentes à oxidação e à degradação. Se não fosse a sua tendência para a fratura frágil, vários destes materiais seriam perfeitos candidatos para a utilização em aplicações de elevada temperatura e sob condições de *stress* intenso, particularmente para componentes de motores de turbina a gás para veículos e aviões (Clyne and Hull, 2019).

A criação de uma nova geração de Compósitos com uma Matriz Cerâmica (CMC – *Ceramic Matrix Composite*), consiste em fibras cerâmicas ou partículas embebidas numa matriz constituída por outro material cerâmico, aumentou consideravelmente a resistência à fratura da cerâmica, revolucionando as potenciais aplicações da cerâmica, expandindo a sua utilização em indústrias como a aeroespacial, automóvel e energética (Zweben, 2015). A resistência à fratura dos materiais compósitos com uma matriz cerâmica é mais elevada. Fundamentalmente, são as interações entre as fissuras em desenvolvimento e as partículas da fase dispersa que conduzem a esta alteração das características de fratura. A fase matriz tipicamente inicia as fissuras e as partículas impedem ou atrasam a sua propagação (Callister, 2018).

Os CMCs têm um melhor comportamento de fluência a elevadas temperaturas e são mais resistentes a choques térmicos, isto é, falhas resultantes de mudanças repentinas de temperatura. A estampagem a quente, a estampagem isostática a quente e a sinterização em fase líquida podem ser utilizadas para criar compósitos de matriz cerâmica (Altenbach, Altenbach and Kissing, 2018).

Um dos materiais da engenharia mais avançados e promissores é o Compósito Carbono-Carbono (CCC – *Carbon-Carbon Composite*), que consiste em fibras de carbono ou de cerâmica incorporadas em matrizes de carbono. O subconjunto mais importante dos compósitos de matriz de carbono são os compósitos carbono-carbono, que têm reforços de fibra de carbono. A resistência e a rigidez dos primeiros materiais eram baixas, mas estas propriedades têm vindo a aumentar ao longo dos anos. Uma das limitações mais significativas dos compósitos carbono-carbono é a oxidação, que começa num limiar de temperatura de aproximadamente 370°C para materiais não protegidos. A adição de inibidores de oxidação na matriz e nos revestimentos cerâmicos aumenta substancialmente o limiar. Em atmosferas inertes, os compósitos carbono-carbono

mantêm as suas propriedades até temperaturas tão altas quanto 1380°C (Kangishwar *et al.*, 2023).

Os CCCs têm coeficientes de expansão térmica baixos e condutividades térmicas relativamente boas. Estas qualidades, quando combinadas com resistências elevadas, resultam numa vulnerabilidade comparativamente baixa ao choque térmico. O seu principal problema é o facto de oxidarem quando expostos a elevadas temperaturas. Os compósitos de carbono-carbono são utilizados em motores de foguetões, automóveis de alto desempenho e materiais de fricção em aviões (Callister, 2018).

Os procedimentos de processamento extremamente sofisticados utilizados para fabricar estes materiais compósitos são a principal razão para o seu elevado custo. As técnicas preparatórias são semelhantes às utilizadas para os compósitos que contêm uma matriz polimérica e fibra de carbono, na medida em que as fibras de carbono contínuas são fabricadas no desenho 2D ou 3D adequado. As fibras são então impregnadas com uma resina polimérica líquida, normalmente a resina fenólica (Clyne and Hull, 2019). A peça de trabalho é então moldada com a forma final pretendida e a resina é deixada a curar. A matriz de resina é agora "pirolisada", ou transformada em carbono por aquecimento num ambiente inerte. Durante a pirólise, os componentes moleculares oxigénio, hidrogénio e azoto são removidos, formando cadeias de moléculas de carbono (Clyne and Hull, 2019). Os tratamentos térmicos subsequentes a temperaturas mais elevadas densificam a matriz de carbono, melhorando a sua resistência. O compósito final é constituído pelas fibras de carbono originais que permaneceram basicamente inalteradas e estão envolvidas nesta matriz de carbono pirolisado (Altenbach, Altenbach and Kissing, 2018).

2.2. Tipos de Compósitos

Como já foi referido, os materiais compósitos são constituídos pela fase matriz e pela fase de dispersão. As propriedades dos compósitos são influenciadas pelas propriedades das fases componentes, as suas quantidades relativas e a forma da fase dispersa. O formato, tamanho, orientação e distribuição das partículas, são referidos neste contexto como a geometria da fase de dispersão (Hsissou *et al.*, 2021).

Na figura 3 apresenta-se um método básico para classificar os materiais compósitos em quatro categorias: reforçados com partículas, reforçados com fibras, estruturais e nanocompósitos. Os compósitos reforçados com partículas têm uma fase de dispersão equiaxial, onde os diâmetros das partículas são sensivelmente os mesmos em qualquer

direção. A fase dispersa nos compósitos reforçados com fibras tem a geometria de uma fibra. No caso dos compósitos estruturais, estes são materiais multicamadas com baixas densidades e com forte estabilidade estrutural (Callister, 2018).

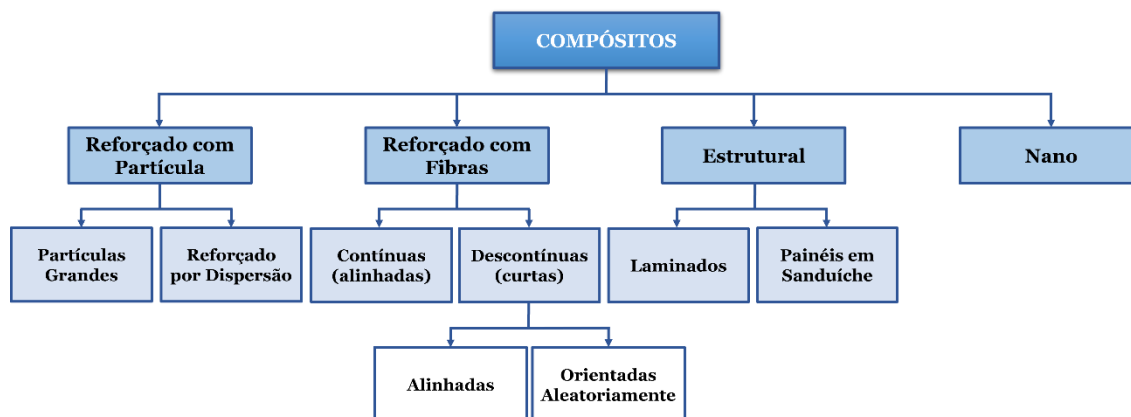


Figura 3 - Classificação dos materiais compósitos (Adaptado de Callister, 2018)

Os compósitos reforçados com partículas dividem-se em compósitos com partículas grandes e compósitos reforçados por dispersão. A diferença deve-se ao processo de reforço da resistência (Santos, 2021). O termo "grande" significa que os contactos partículas-matrizes devem ser abordados utilizando a mecânica do contínuo. Nos compósitos reforçados com partículas, a mecânica do contínuo ajuda a descrever a forma como as partículas interagem com o material circundante quando as partículas são maiores em comparação com o tamanho total do material (Santos, 2021). A fase com as partículas é mais inflexível e com maior durabilidade do que a fase matriz na maioria destes compósitos (Chawla, 2016). A velocidade da matriz perto das partículas tende a ser limitada por estas partículas de reforço. Basicamente, a fase matriz transporta uma porção da tensão aplicada para as partículas carregadas. O grau de reforço é determinado por uma forte ligação na interação matriz-partícula (Y. Yang *et al.*, 2012). As partículas dos compósitos reforçados por dispersão são habitualmente de menor dimensão, com tamanhos que variam entre 0,01 μm e 0,1 μm . Os contactos partícula-matriz que contribuem para uma maior resistência acontecem a nível atómico ou molecular. Uma grande fração da carga aplicada é suportada pela matriz, enquanto as partículas minúsculas distribuídas limitam o movimento das discordâncias (Clyne and Hull, 2019).

O betão é um composto típico de partículas grandes constituído por cimento (a matriz), areia e gravilha (as partículas). As partículas podem ter uma imensa diversidade de formas, mas devem ter um tamanho sensivelmente igual em todas as direções (equiaxial) (Callister, 2018). As partículas devem ser pequenas e estar uniformemente dispersas pela matriz para que o reforço seja eficaz. Além do mais, o comportamento é afetado pela

percentagem de volume das duas fases, pois o aumento da concentração de partículas melhora as características mecânicas (Santos, 2021).

Em geral, os compósitos reforçados por dispersão consistem na uniformidade das partículas em todo o material, em todas as direções, para proporcionar qualidades homogêneas ao material. As ligas de origem metálicas e os metais podem ser reforçados e endurecidos através da dispersão uniforme de percentagens volumétricas variáveis de partículas minúsculas de uma substância inerte e altamente dura (Chawla, 2016).

Os compósitos mais relevantes em termos de tecnologia são os que a fase dispersa assume a configuração de uma fibra. A elevada rigidez e resistência em relação ao peso são frequentemente o alvo de concepção dos compósitos reforçados com fibras (Hsissou *et al.*, 2021). A resistência específica e o módulo específico, que correspondem aos rácios entre a resistência à tração e o peso específico e entre o módulo de elasticidade e o peso específico, respetivamente, são utilizados para representar estas qualidades. Os compósitos reforçados com fibras com resistências e módulos específicos extraordinariamente elevados são criados através da combinação de fibras e de uma matriz de massa específica baixa (Altenbach, Altenbach and Kissing, 2018). Os compósitos reforçados com fibras são identificados com base no comprimento das fibras. As fibras curtas nos compósitos são demasiado curtas para gerar um ganho significativo de resistência (Clyne and Hull, 2019).

As reações mecânicas dos compósitos com fibras contínuas e alinhadas são afetadas por uma série de elementos, abrangendo os desempenhos de tensão-deformação das fases de matriz e fibra, as porções volumétricas das fases e a direção em que a tensão é aplicada (Campbell, 2010). Para além disto, as características de um compósito cujas fibras estão alinhadas são extremamente anisotrópicas, resultando num reforço e resistência máximos ao longo da tendência de alinhamento. Na direção transversal, o reforço das fibras é quase inexistente, pois a fratura geralmente acontece em níveis relativamente modestos de tensão de tração. A resistência do compósito situa-se entre estes dois extremos para várias orientações de tensão (Balasubramanian, 2013).

Embora as fibras descontínuas tenham uma eficácia de reforço inferior à das fibras contínuas, os compósitos que contêm fibras descontínuas alinhadas estão a tornar-se mais populares do ponto de vista económico. As fibras de vidro cortadas são as mais frequentemente empregadas, mas também são utilizadas fibras descontínuas de carbono e aramida. Estes compósitos com fibras mais curtas podem ser fabricados com limites de

módulo de elasticidade e de resistência à tração respectivamente de 90% e 50% dos seus equivalentes de fibras contínuas (Rajak *et al.*, 2019).

As fibras orientadas aleatoriamente são as mais versáteis no processamento porque o material pode ser sujeito a uma série de técnicas de produção sem risco de danificar as fibras em comprimento. As fibras curtas são frequentemente utilizadas quando a orientação das fibras é imprevisível (Callister, 2018).

A consideração da orientação e do comprimento das fibras para um determinado compósito será determinada pelo grau e tipo de tensão aplicada, bem como pelos custos de fabrico (Chawla, 2016). Os compósitos com fibras curtas (tanto alinhadas como orientadas aleatoriamente) têm velocidades de produção rápidas e podem ser geradas geometrias complicadas que não são possíveis com reforço de fibras contínuas (Clyne and Hull, 2019). Além disso, os custos de produção são claramente mais baixos do que os das fibras contínuas e alinhadas.

Um compósito estrutural é um compósito de várias camadas com uma massa específica baixa que é utilizado em aplicações que necessitam de integridade estrutural, resistência à tração, à torção e rigidez (Ngo, 2020). As qualidades destes compósitos são determinadas não só pelas propriedades dos materiais componentes, mas também pelo desenho geométrico das diferentes partes estruturais (Mukherjee, Jain and Banerjee, 2023). Os compósitos estruturais mais populares são os compósitos laminados e os painéis em sanduíche.

Um compósito laminado é constituído por folhas ou painéis bidimensionais ligados. Tal como acontece com as fibras contínuas reforçadas e alinhadas, cada camada tem uma direção favorecida de elevada resistência (Altenbach, Altenbach and Kissing, 2018). As qualidades do laminado são determinadas por vários elementos, incluindo a forma como a direção de elevada resistência varia de camada para camada (Clyne and Hull, 2019). Nesta perspetiva, os compósitos laminados são classificados em quatro tipos: unidirecionais, de camadas cruzadas, de camadas angulares e multidirecionais, conforme ilustrado na figura 4.

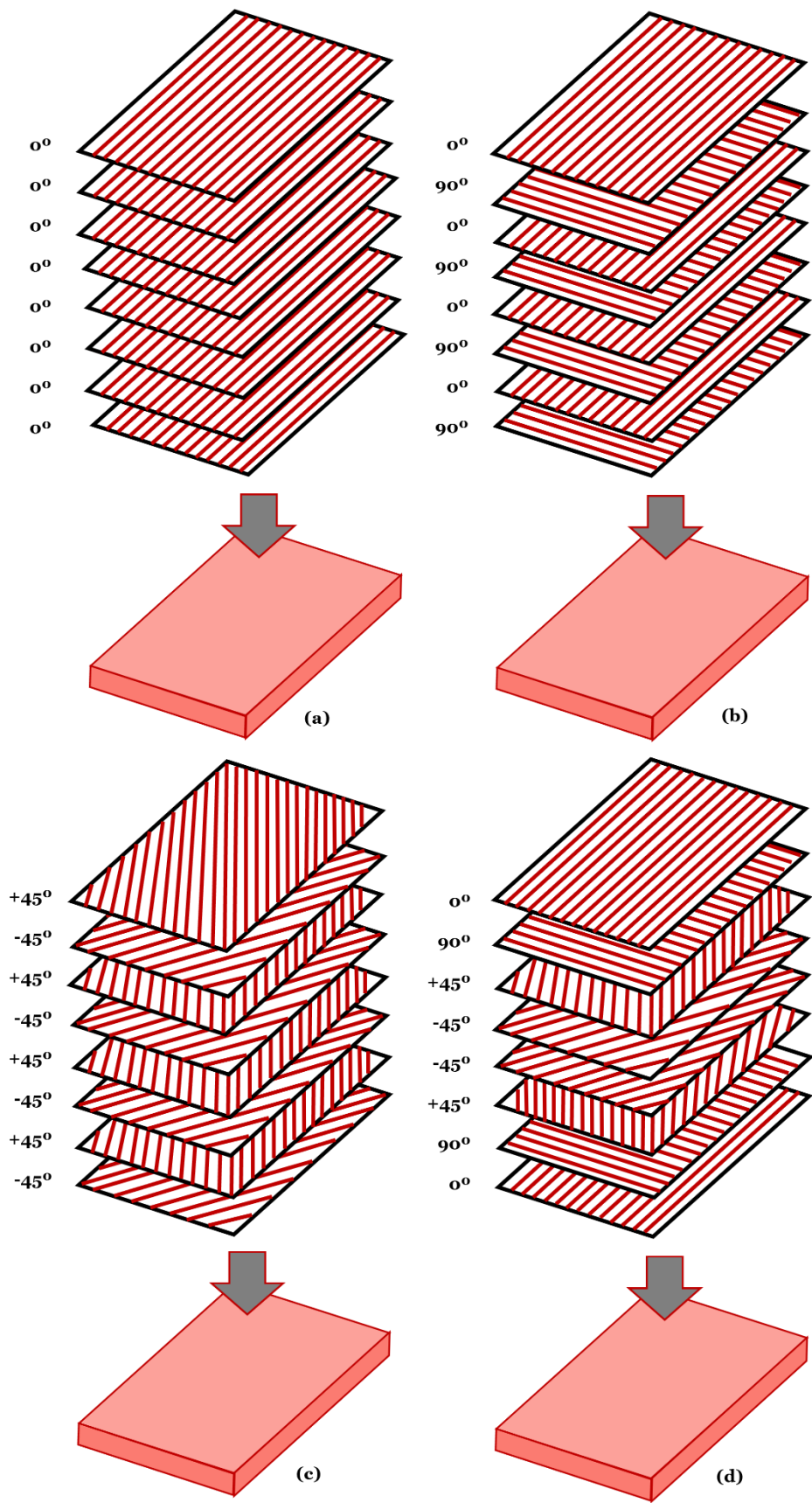


Figura 4 - Empilhamento em compósitos laminados: (a) Unidirecional; (b) Cruzado; (c) Camada em Ângulo; e (d) Multidirecional (Adaptado de Callister, 2018)

Os painéis sanduíche são um tipo de compósito estrutural que se destina a painéis leves com excelente resistência (Campbell, 2010). Um painel sanduíche é constituído por duas lâminas ou faces exteriores separadas que são unidas com adesivo a um núcleo mais espesso. Os painéis exteriores são muitas vezes construídos com um material moderadamente rígido e robusto, como ligas de alumínio e aço inoxidável, polímeros reforçados com fibras e contraplacado, e suportam as tensões de flexão aplicadas ao painel (Khalid *et al.*, 2022). Quando um painel em sanduíche é dobrado, uma das faces sofre forças de compressão enquanto as outras faces sofrem tensões de tração. Quando um material é sujeito a tensões de tração, sofre um alongamento ao longo da direção da força aplicada. Esta tensão é responsável pela deformação de um material e quando o painel é dobrado, as camadas exteriores sofrem tensões de tração num dos lados. Isto significa que as camadas exteriores estão a ser puxadas desse lado devido às forças aplicadas. O núcleo do painel sanduíche, por outro lado, sofre forças de compressão à medida que resiste à flexão do painel (Callister, 2018). Os painéis sanduíche são utilizados numa vasta gama de setores, incluindo aeroespacial, construção, automóvel e marítimo (Callister, 2018).

E por fim, a criação de uma nova classe de materiais compósitos, os nanocompósitos está a causar uma revolução no mundo dos materiais. Os nanocompósitos são constituídos por nanopartículas incorporadas num material de matriz (Ngo, 2020). Podem ser construídos para terem capacidades mecânicas, magnéticas, elétricas, térmicas, óticas, biológicas e de transporte superiores às dos materiais carregados tradicionais (Chawla, 2016). Além do mais, estas características podem ser personalizadas para fins específicos e por estas razões, os nanocompósitos estão a ser cada vez mais utilizados numa vasta gama de tecnologias atuais (Altenbach, Altenbach and Kissing, 2018).

2.3. Fibra de Vidro

Os materiais compósitos produzem uma combinação de propriedades de dois ou mais materiais que não podem ser alcançadas pela fibra ou pela matriz quando atuam isoladamente. Os compósitos reforçados com fibras foram utilizados com sucesso durante muitas décadas em várias aplicações de engenharia (Almeida *et al.*, 2015). Os compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro (PRFV) foram os mais utilizados no fabrico de materiais compósitos. A matriz incluía resinas orgânicas, de poliéster, termoestáveis, de viniléster, fenólicas e epóxi (Sathishkumar, Satheeshkumar and Naveen, 2014). O comportamento mecânico de um compósito reforçado com fibras depende basicamente da resistência e do módulo da fibra, da estabilidade química, da resistência da matriz e da ligação da interface entre a fibra e a matriz para permitir a

transferência de tensões (Wang *et al.*, 2019). As composições adequadas e a orientação das fibras permitiram obter as propriedades desejadas e as características funcionais dos compósitos de PRFV, que eram iguais às do aço, tinham uma rigidez superior à do alumínio e a densidade relativa era um quarto da do aço (Rajak *et al.*, 2019).

As propriedades dos compósitos dependem das fibras colocadas ou laminadas na matriz durante a preparação dos compósitos. O elevado custo dos polímeros foi um fator limitativo da sua utilização em aplicações comerciais. Por este motivo, a utilização de cargas melhorou as propriedades dos compósitos e, em última análise, reduziu o custo da preparação e do produto (Wang *et al.*, 2019). Os materiais compósitos têm uma vasta gama de aplicações industriais e os materiais compósitos laminados reforçados com fibra de vidro são utilizados na indústria naval e nas indústrias de tubagens devido à boa resistência ambiental, melhor tolerância aos danos causados por cargas de impacto, elevada resistência específica e rigidez (Rajak, Wagh and Linul, 2021).

Os materiais compósitos poliméricos foram principalmente utilizados na indústria aeronáutica, como na fuselagem e nas portas do trem de aterragem, devido ao seu peso reduzido, ao aumento da resistência à fadiga dos elementos de fixação e ao número de componentes (Almeida *et al.*, 2015). A figura 5 descreve a metodologia de preparação e caracterização dos compósitos de matriz de PRFV e a sua aplicação.

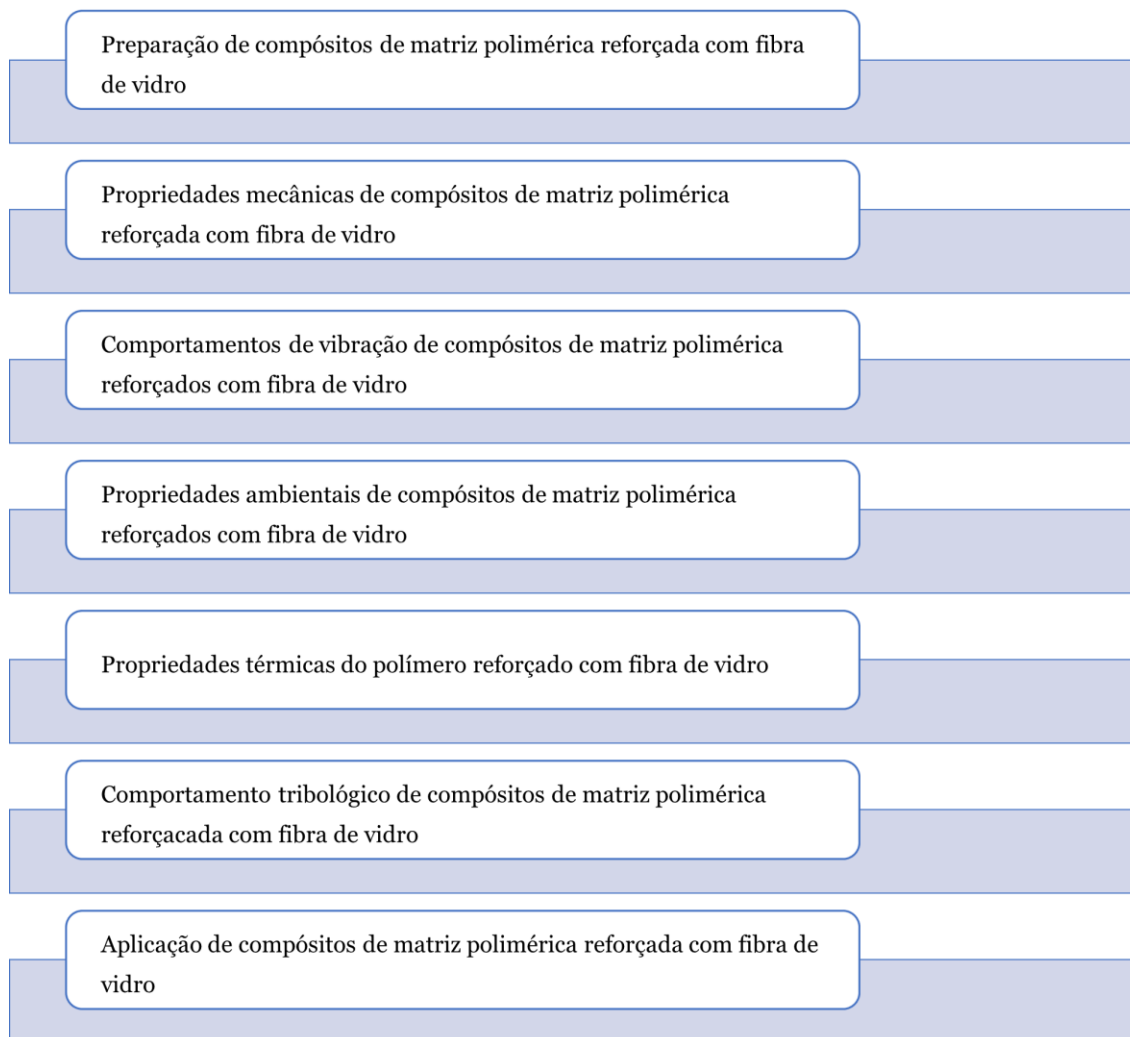


Figura 5 - Metodologia de preparação e caracterização dos compósitos de matriz de PRFV e a sua aplicação (Adaptado de Sathishkumar, Satheeshkumar and Naveen, 2014)

A preparação de compósitos de matriz polimérica reforçada com fibra de vidro envolve várias etapas, incluindo a seleção do material, o reforço da fibra, o fabrico de compósitos e o acabamento e pós-processamento (Alberto, 2013):

- Seleção do material, que envolve a matriz e o reforço. A seleção depende dos requisitos específicos da aplicação, incluindo resistência mecânica e química.
- Reforço da fibra, que engloba a preparação da fibra de vidro, pois para determinadas aplicações pode ser necessário cortar a fibra de vidro em formas específicas. O reforço da fibra também inclui o tratamento da fibra, através do qual a mesma pode ser submetida a um tratamento de superfície ou a uma aplicação de colagem para melhorar a adesão à matriz polimérica.
- Fabrico de compósitos, que abrange os pré-impregnados, que são criados através da impregnação do reforço da fibra com a matriz da resina polimérica e são normalmente fornecidos em rolos. Estes rolos são colocados em camadas numa orientação específica para formar a estrutura desejada. Isto pode ser efetuado

manualmente ou com a ajuda de um equipamento automatizado. O laminado é então colocado num molde e sujeito a calor e pressão num processo de moldagem por compressão. A pressão assegura a consolidação das fibras e a ligação correta com a matriz da resina. As condições de temperatura e pressão são específicas do sistema da resina que está a ser utilizado. O compósito é curado através do aquecimento a uma temperatura específica durante um período de tempo específico. Isto permite que a matriz da resina cure e endureça completamente, resultando numa estrutura de compósito rígida.

- Acabamento e pós-processamento, que compreende o recorte, pois após a cura do compósito, o material em excesso é maquinado para obter a forma e as dimensões pretendidas. A superfície do compósito pode ser submetida a tratamentos adicionais, como o polimento, para obter o acabamento e a suavidade desejados. Dependendo da aplicação, podem ser efetuados outros passos de processamento, como a pintura e o revestimento.

Os compósitos de matriz polimérica reforçada com fibra de vidro possuem várias propriedades mecânicas que os tornam desejáveis para várias aplicações. As propriedades mecânicas dos compósitos de PRFV são influenciadas por fatores como a fração volumétrica da fibra, a orientação da fibra, o material da matriz e o processo de fabrico do compósito (Rajak *et al.*, 2019). As principais propriedades mecânicas dos compósitos de PRFV são a resistência à tração e à flexão, resistência à compressão, resistência ao impacto e à fadiga e o Módulo de Young (Jani *et al.*, 2022). É importante notar que as propriedades mecânicas dos compósitos de PRFV podem variar consoante a formulação específica do compósito, o teor das fibras, a orientação das fibras e o processo de fabrico (S. P. Jani *et al.*, 2022). Estas propriedades podem ser otimizadas selecionando cuidadosamente o material da matriz, o tipo de fibra e as técnicas de fabrico para cumprir os requisitos da aplicação pretendida (Rajak *et al.*, 2019).

Os compósitos de matriz polimérica reforçada com fibra de vidro apresentam um comportamento de vibração único que os torna adequados para aplicações em que o controlo da vibração e o amortecimento são importantes (Tang and Yan, 2020). O comportamento vibratório dos compósitos de PRFV é influenciado por vários fatores, incluindo a orientação das fibras, as propriedades da matriz, a fração volumétrica das fibras e a geometria do compósito (Tang and Yan, 2020). Os aspetos chave do comportamento vibratório dos compósitos de PRFV abrangem (Kalusuraman *et al.*, 2023):

- Frequências Naturais, que são as frequências a que o compósito vibra livremente sem qualquer excitação externa. As frequências naturais dependem da geometria do compósito e das propriedades do material. A orientação das fibras e a sequência de colocação do laminado influenciam significativamente as frequências naturais.
- Capacidade de amortecimento, onde os compósitos de PRFV podem dissipar eficazmente a energia vibracional. O comportamento do amortecimento dos compósitos de PRFV é influenciado pela matriz polimérica e pela ligação interfacial entre as fibras e a matriz. A natureza viscoelástica da matriz polimérica contribui para a fricção interna que ajuda a amortecer as vibrações.
- Modos de vibração onde se descrevem a forma e a distribuição dos padrões de deslocamento e deformação durante a vibração. Os modos de vibração são influenciados pela geometria do compósito e orientação das fibras.
- Rigidez dinâmica, que depende das propriedades do material do compósito e da orientação das fibras. A rigidez dinâmica pode ser determinada experimentalmente através da análise mecânica dinâmica ou da análise de elementos finitos.

Os compósitos de matriz polimérica reforçada com fibra de vidro apresentam várias propriedades ambientais que os tornam vantajosos para várias aplicações, tais como (Bazli *et al.*, 2021):

- Resistência à humidade, pois os compósitos de PRFV têm uma resistência inerente à humidade devido à natureza hidrofóbica da matriz polimérica, como o epóxi e o poliéster. Esta resistência à absorção de humidade ajuda a evitar alterações dimensionais, degradação e perda de propriedades mecânicas ao longo do tempo, tornando os compósitos de PRFV adequados para aplicações em ambientes húmidos.
- Resistência química, visto que os compósitos de PRFV apresentam uma boa resistência a uma vasta gama de produtos químicos, incluindo ácidos, solventes e combustíveis. A matriz polimérica atua como uma barreira, protegendo as fibras de vidro do ataque químico. Esta propriedade permite que os compósitos PRFV sejam utilizados em fábricas de processamento químico, instalações de tratamento de águas residuais e outros ambientes onde a exposição a substâncias corrosivas é comum.
- Resistência à radiação ultravioleta (UV), já que os compósitos de PRFV podem ser formulados com matrizes de polímeros que oferecem uma excelente resistência à radiação UV. Esta propriedade evita a degradação e o

desvanecimento da cor causados pela exposição prolongada à luz solar. Os compósitos de PRFV são, assim, adequados para aplicações no exterior, como componentes de construção, marítimos e automóveis, que exigem uma durabilidade a longo prazo em ambientes ricos em UV.

- Resistência à corrosão, devido aos compósitos de PRFV serem inerentemente resistentes à corrosão, ao contrário dos metais que podem corroer quando expostos à humidade ou a ambientes agressivos. As fibras de vidro proporcionam uma barreira contra agentes corrosivos, enquanto a matriz polimérica acrescenta uma camada adicional de proteção.

Os compósitos de matriz polimérica reforçada com fibra de vidro possuem várias propriedades térmicas que os tornam adequados para uma vasta gama de aplicações. Estas propriedades incluem a condutividade térmica, o coeficiente de expansão térmica, a temperatura de transição vítrea e a resistência ao calor (Birleanu *et al.*, 2023). As quais são apresentadas de seguida:

- Condutividade térmica, visto que os compósitos de PRFV têm normalmente uma baixa condutividade térmica em comparação aos metais. As fibras de vidro, sendo más condutoras de calor, atuam como uma barreira térmica, reduzindo a transferência de calor através do material. Esta propriedade torna os compósitos de PRFV adequados para aplicações que requerem isolamento térmico, tais como componentes de construção e barreiras térmicas em processos industriais (Birleanu *et al.*, 2023).
- *Coefficient of Thermal Expansion* (CTE), o coeficiente de expansão térmica caracteriza a forma como um material se expande com as mudanças de temperatura. Os compósitos de PRFV apresentam um CTE relativamente baixo em comparação aos metais, resultando em menos alterações dimensionais devido a flutuações de temperatura. O CTE dos compósitos de PRFV é influenciado pelo teor de fibras, pela orientação das fibras e pelo material da matriz (Birleanu *et al.*, 2023).
- Temperatura de transição vítrea (Tg), é a temperatura à qual a matriz polimérica transita de um estado rígido para um estado mais flexível. Os compósitos de PRFV têm uma Tg definida, que é influenciada pela matriz polimérica específica utilizada. A Tg afeta as propriedades mecânicas e a estabilidade térmica do compósito (Neto *et al.*, 2021).
- Resistência ao calor, devido aos compósitos de PRFV apresentarem uma boa resistência ao calor, permite-lhes suportar temperaturas elevadas sem degradação significativa. A resistência ao calor dos compósitos de PRFV é

determinada pela matriz polimérica utilizada. Alguns materiais de matriz, como as resinas epóxi ou fenólicas, oferecem uma elevada resistência ao calor e podem suportar temperaturas entre 150°C e 200°C ou superiores (Neto *et al.*, 2021).

O comportamento tribológico dos compósitos de matriz polimérica reforçada com fibra de vidro refere-se à sua interação e desempenho sob condições de fricção e desgaste, tais como o baixo coeficiente de fricção e a resistência ao desgaste (Manjunath *et al.*, 2020), conforme se explica de seguida:

- Baixo coeficiente de fricção, visto que os compósitos de PRFV apresentam geralmente um baixo coeficiente de atrito, o que significa que têm uma tendência reduzida para as superfícies deslizantes gerarem resistência ao atrito durante o contacto. O baixo coeficiente de fricção pode ser atribuído ao efeito lubrificante da matriz polimérica e à presença de fibras de vidro, que atuam como lubrificantes sólidos. Esta propriedade é vantajosa para aplicações em que a minimização do atrito e das perdas de energia é fundamental (Maiti *et al.*, 2022).
- Resistência ao desgaste, pois os compósitos de PRFV demonstram uma boa resistência ao desgaste, que se refere à sua capacidade de suportar a degradação da superfície ou à perda de material em condições de abrasão. A resistência ao desgaste dos compósitos de PRFV é influenciada pela dureza, força e tenacidade das fibras de vidro, bem como pelas propriedades de desgaste da matriz polimérica (Maiti *et al.*, 2022).

Os compósitos de matriz polimérica reforçada com fibra de vidro encontram uma vasta gama de aplicações em vários setores, devido à sua combinação única de propriedades (Rajak *et al.*, 2019). Algumas aplicações comuns dos compósitos PRFV incluem a construção e infraestruturas, a indústria aeroespacial e aeronáutica, o setor automóvel e a energia eólica (Rajak *et al.*, 2019).

2.3.1. Classificação da Fibra de Vidro

Atualmente, as fibras de vidro são identificadas como os materiais de fabrico mais versáteis. Dependendo das matérias-primas utilizadas e das suas proporções para fabricar fibras de vidro, existem vários tipos de fibras de vidro predominantemente utilizados em compósitos de PRFV (Sathishkumar, Satheeshkumar and Naveen, 2014). A classificação principal das FVs e as propriedades físicas são apresentadas na figura 6.

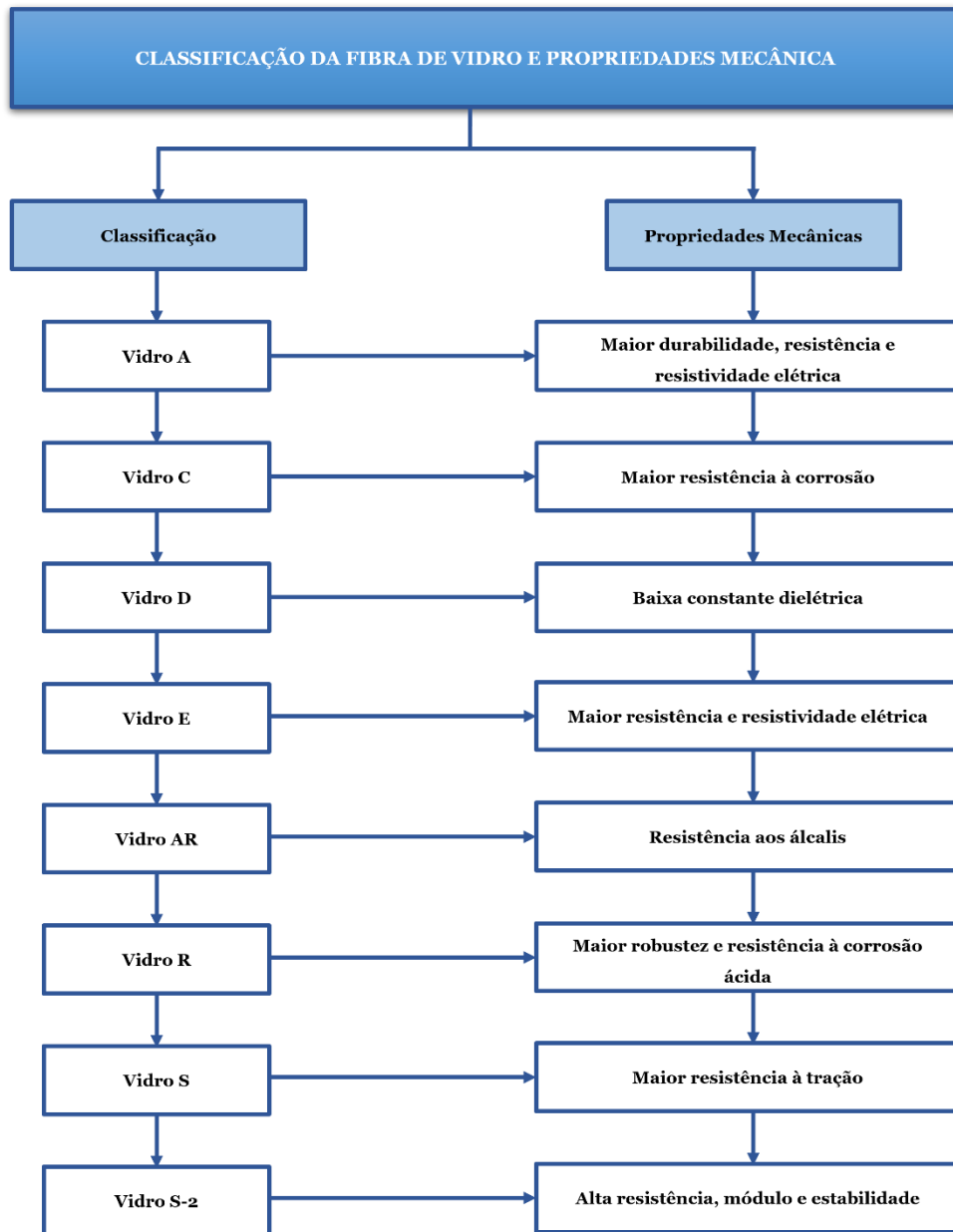


Figura 6 - Classificação da Fibra de Vidro e Propriedades Mecânicas (Adaptado de Sathishkumar, Satheeshkumar and Naveen, 2014)

Para múltiplos fins, os compósitos de PRFV são amplamente utilizados em muitas tecnologias de produção. Originalmente, os primeiros egípcios formavam recipientes com fibras de vidro extraídas de vidro modificado pelo calor (Rajak *et al.*, 2019). As fibras de vidro contínuas foram inicialmente fabricadas nos anos 30 para objetos elétricos de elevada temperatura (Sathishkumar, Satheeshkumar and Naveen, 2014). Atualmente, as fibras de vidro são utilizadas no fabrico de compósitos estruturais, na eletrónica, em placas de circuitos impressos, na indústria naval, em cascos de barcos, na indústria aeroespacial, em aplicações automóveis, como por exemplo nos pneus de borracha e peças leves, e numa vasta gama de produtos para fins especiais (Rajak *et al.*, 2019). A baixa condutividade térmica, a elevada resistência, o bom isolante elétrico, a

elasticidade, a incombustibilidade, a rigidez e a proteção contra agressões químicas são as características únicas proporcionadas pelas fibras de vidro. Podem apresentar-se sob a forma de mantas (Rani *et al.*, 2021).

Cada variedade de fibra de vidro tem propriedades diferentes e é utilizada para diferentes fins na formação de compósitos de fibra de vidro. Uma das desvantagens das fibras de vidro é o seu módulo moderadamente baixo em relação ao das fibras de carbono (Rajak *et al.*, 2019). A figura 7 apresentam-se as várias formas de estruturas de fibras de vidro, cada tipo destacando as suas propriedades únicas.

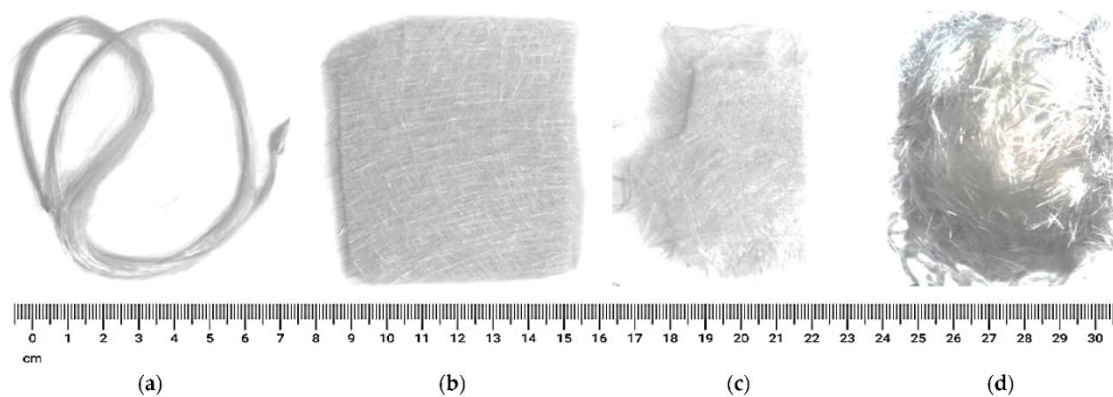


Figura 7 - Tipos de fibras de vidro: (a) fibras contínuas de fios longos, (b) fibras tecidas e aleatórias, (c) fibras cortadas E (d) fibras cortadas (Rajak, Wagh and Linul, 2021)

O módulo de Young, a resistência à tração e a estabilidade química são as características inerentes às fibras de vidro e estão diretamente associadas às próprias fibras. (Wang *et al.*, 2019). Características como o fator de dissipação, a constante dielétrica, a durabilidade dielétrica, a expansão térmica e a resistividade de volume/superfície são medidas e classificadas com base no seu desempenho num tipo específico de vidro, que por acaso é o vidro mais utilizado em várias amostras. Outras propriedades, como o índice de refração e a densidade, são medidas tanto em amostras a granel como em fibras (Wang *et al.*, 2019). Na Tabela 2 apresenta-se a composição química, as características especiais e as principais aplicações, enquanto na Tabela 3 destacam-se as principais propriedades de várias FVs.

Tabela 2 - Composição química, características e principais aplicações das fibras de vidro (Adaptado de Rajak, Wagh and Linul, 2021)

Categoria da Fibra	Composição	Características	Aplicações
Vidro A	Vidro alcalino-cálcico com pouco ou sem óxido de boro	- Maior durabilidade e resistividade elétrica; - Não muito resistente aos álcalis	- Quando a resistência aos álcalis não é um requisito; - Equipamento de processamento
Vidro C	Vidro alcalino-cálcico com elevado teor de óxido de boro	- Resistente ao ataque químico e à maioria dos ácidos que dissolvem o vidro eletrônico;	- Quando é necessária uma maior resistência química à corrosão induzida por ácidos: fibras descontínuas de vidro e isolamento
Vidro D	Vidro borossilicatado	- Baixa constante dielétrica	- Quando se prefere uma constante dielétrica baixa
Vidro E	Vidro de alumino-borosilicato com menos de 1 wt.% de óxidos de metais alcalinos	- Não resistente a iões de cloreto; - Elevada resistividade elétrica; - Boas propriedades de resistência/rigidez; - Boa resistência ao calor; - O custo mais baixo;	- Principalmente para compósitos PRFV nos setores dos transportes, da construção e da aeronáutica; - Originalmente para aplicações elétricas (proteção de cabos, bainhas e tubos) e térmicas (vedação de tubagens, portas de fornos)
Vidro AR		Resistente a ambientes alcalinos;	- Quando é necessária uma resistência aos álcalis; - Substrato de cimento e betão;
Vidro R	Vidro de alumino-silicato sem teor de MgO e CaO;	- Boas propriedades mecânicas; - Resistência à corrosão ácida; - Maior resistência	- Indústria automóvel; - Docas e marinas; - Aplicações com elevadas exigências mecânicas;
Vidro S	Vidro de alumino-silicato sem CaO mas com elevado teor de MgO;	- Maior resistência à tração; - Maior resistência à tração entre todos os tipos de fibras; - Maior resistência ao calor; - Elevado módulo	- Indústria aeroespacial (componentes para aviões militares); - Carcaças de mísseis; - Quando é necessária uma elevada resistência à tração

Tabela 3 - Principais propriedades físicas, mecânicas, elétricas, térmicas e óticas das fibras de vidro (Adaptado de Rajak, Wagh and Linul, 2021)

Propriedades		Tipo de Fibra de Vidro							
		A	C	D	E	AR	R	S	S-2
Física	Densidade (g/cm ³)	2,44	2,52-2,56	2,11-2,14	2,54-2,60	2,70	2,54	2,48-2,49	2,46
	Resistência à Tração (MPa)	3310	3310	2415	3450	3241	4135	4585	4890
Mecânica	Alongamento na Rutura (%)	4,8	4,8	4,6	4,8	4,4	4,8	5,4	5,7
	Módulo de Young (GPa)	68,9	68,9	51,7	72,4	73,1	85,5	85,5-46,9	46,9
	Coeficiente de Poisson	0,183	0,276	-	0,200	-	-	0,22	0,230
	Módulo de Cisalhamento (GPa)	29,1	27,0	-	30,0	-	-	35,0	35,0
	Resistividade Elétrica (Ω -cm)	10 ⁸	-	-	4,02*10 ¹²	-	2,03*10 ¹²	9,05*10 ¹⁰	9,05*10 ¹⁰
Elétrica	Constante Dielétrica	6,2	6,9	3,8	5,9-6,4	8,1	6,4	5,1-5,34	5,3
	Fator de Dissipação	-	0,0085	-	0,0025	-	-	0,0034	-
	Rigidez Dielétrica (kV/mm)	-	-	-	10,3	-	-	13,0	-
Térmica	CTE, linear (μ m/m-°C)	9,0	6,3	2,5	5,0	6,5	3,3	5,2-5,6	1,6
	Capacidade Térmica Específica (J/g-°C)	0,796	0,787	0,733	0,810	-	0,732	0,737	0,737
	Ponto de Amolecimento (°C)	727,0	750	771	840,6	773	952	-	1056
	Condutividade Térmica (W/m-K)	-	1,1	-	1,3	-	-	-	1,45
	Coeficiente de Dilatação Térmica (* 10 ⁻⁷)	73	63	25	54	65	33	-	16
	Ponto de Fusão (°C)	-	-	-	≥1725	-	-	≥1725	-
	Ponto de Recozimento (°C)	-	588	521	657	-	-	-	816
	Ponto de Deformação (°C)	-	522	477	615	-	736	-	766
Ótica	Índice de Refração	1,538	1,533	1,465	1,558	1,562	1,546	1,525	1,521

2.3.2. Aplicações de compósitos de PRFV

As limitações dos materiais metálicos convencionais, como por exemplo o aço e o alumínio levaram a um grande aumento da utilização de compósitos de polímeros reforçados com fibras (PRF) em várias aplicações de engenharia. As aplicações comuns dos compósitos PRF estão a diversificar-se continuamente devido às suas atrativas propriedades materiais (Yongxiang Yang *et al.*, 2012). As aplicações do PRF podem ser agrupadas da seguinte forma:

- Aeroespacial: satélites, centros espaciais, veículos de lançamento, portos espaciais, braço manipulador remoto, portas de compartimento de carga útil, suportes e nervuras de antena e antena de alto ganho (Rajak *et al.*, 2019).
- Aeronaves: pavimentos e painéis de aviões, veios de transmissão, elevadores, lemes, portas de trens de aterragem e rolamentos (Rajak, Wagh and Linul, 2021).
- Construção Naval: construção *offshore* (tubagens de água do mar, escadas e passadiços, tubagens de água de incêndio, grelhas, paredes corta-fogo e anti explosão, cabos e cordas e navios de armazenamento), válvulas e filtros, ventiladores e sopradores, palhetas de hélices, caixas de engrenagens e cascos de condensadores (Rajak, Wagh and Linul, 2021).
- Automóvel: painéis de carroçaria e portas, blocos de motor, veios de transmissão, travões de corrida para automóveis, placas de embraiagem, depósitos de combustível com filamentos, bielas, para-choques, quadros, guias de válvulas e tampas de balancins (Rajak *et al.*, 2019).
- Construção Civil: execução de novas estruturas avançadas (coberturas, elementos de placa e de casca, elementos lineares, tubos e reservatórios e estruturas dobradas) e reabilitação de estruturas metálicas e de betão existentes, tais como edifícios, pontes, condutas e construção em alvenaria (Rajak *et al.*, 2019).
- Indústria Desportiva: hastes de tacos de golfe, raquetes de ténis, quadros de bicicletas e canas de pesca (Rajak, Wagh and Linul, 2021).
- Eletricidade e Eletrónica: isoladores de linhas elétricas, elementos de tração de fibras óticas e postes de iluminação (Rajak, Wagh and Linul, 2021).
- Indústrias Químicas: garrafas em *rack* para serviço de incêndio, recipientes compostos para substâncias, escalada de montanhas, dutos e pilhas e tanques de armazenamento subterrâneo (Rajak, Wagh and Linul, 2021).
- Aplicações Médicas: engenharia de tecidos (vasos sanguíneos, osso, tecidos orais e pele), tratamento de feridas e compósitos à base de resina dentária (Rajak *et al.*, 2019).
- Estruturas Rodoviárias: barreira acústica, tabuleiro de ponte, vigas, longarinas, vergalhões, painel de pilar, barra de cavilha, placa e poste de sinalização, sistema

de drenagem e sistema de guarda-corpo (Rajak, Wagh and Linul, 2021).

- Energias Renováveis: pás de turbinas eólicas (Jensen, 2019).

Na figura 8 apresenta-se a aplicação mundial das fibras de vidro em vários setores. As fibras de vidro são muito procuradas devido à sua excelente resistência à tração, baixo custo e fácil disponibilidade. O mercado global atual tem dado muita importância às fibras de vidro, uma vez que são utilizadas em várias aplicações, como a estrutura e a divisão arquitetónica. Em determinadas áreas do mundo, a procura de estruturas privadas aumentou devido ao crescimento das comunidades. Nos próximos anos, as fibras sintéticas de vidro serão utilizadas para o fabrico de mobiliário e acessórios, tubos, tanques de alojamento de líquidos e painéis de parede para este setor (Khalid *et al.*, 2022).

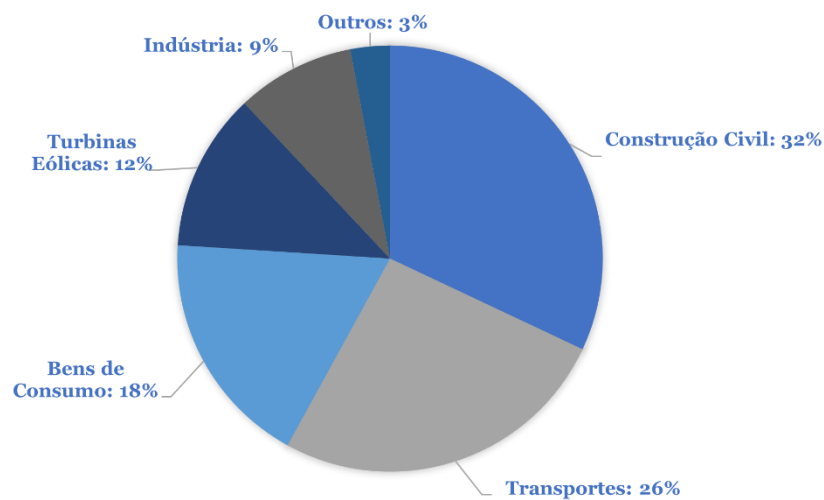


Figura 8 - As principais aplicações da fibra de vidro: automóvel, energias alternativas, aeroespacial, transportes, construção, desporto e outras (Adaptado de Khalid *et al.*, 2022)

2.4. Técnicas de Reciclagem

Tem havido uma preocupação considerável com o ambiente devido à utilização contínua de recursos finitos e à necessidade de abordar a gestão de resíduos, o que conduziu a uma maior preocupação com a reciclagem de materiais. A deposição em aterro tem sido, em muitos casos, um método económico de eliminação de resíduos baseados em compósitos poliméricos, uma vez que os polímeros são geralmente mais difíceis de reciclar e o processo de reciclagem é também dispendioso. Normalmente, a produção de compósitos de carbono produz até 40% de material de refugo, que podem acabar em aterros ou então incinerados (Yongxiang Yang *et al.*, 2012).

Desta forma, para proteger o ambiente, para além da utilização de meios económicos,

como os impostos, foram introduzidas regras para incentivar a reciclagem. A gestão de resíduos ganhou uma enorme importância na União Europeia (UE) e, para a reduzir, a prevenção de resíduos deve começar na fase de concepção. Este objetivo pode ser alcançado através da implementação de várias estratégias, incluindo a promoção da reutilização de produtos, a adoção de práticas de reciclagem de materiais, a utilização de técnicas de incineração de resíduos e a redução da utilização de aterros (Sommer, Stockschläder and Walther, 2020).

Em comparação com os termoplásticos que podem ser fundidos e reformados repetidamente, os compósitos termoendurecíveis apresentam uma estrutura reticulada distinta que impede a sua fácil reformulação (Paulsen and Enevoldsen, 2021). Vários polímeros termoendurecíveis, como o poliuretano, podem ser facilmente convertidos no seu monómero inicial. Por outro lado, as resinas termoendurecíveis disponíveis no mercado, como o poliéster e a resina epóxi, são difíceis de despolimerizar nos seus monómeros iniciais (Rahimizadeh *et al.*, 2019).

Atualmente, pode presumir-se que a recuperação total das fibras, conhecida como uma abordagem de reciclagem estrutural direta, beneficiará o setor dos compósitos. As fibras recicladas a partir desta abordagem têm um valor de mercado adicional devido ao baixo consumo de recursos naturais, energia e mão de obra, juntamente com uma qualidade de fibra quase virgem (Eligüzel and Özceylan, 2022). No que diz respeito à repartição das tecnologias de reciclagem da investigação e da indústria, a solvólise (24%), a pirólise (31%) e a trituração mecânica (18%) têm uma maior aceitação. Foram investigados e estabelecidos numerosos métodos. Estes incluem abordagens de reciclagem mecânicas, térmicas e químicas, uma vez que a escolha dos métodos depende do tipo de material a reciclar e da aplicação em que é reutilizado (Cousins *et al.*, 2019). Além disso, é difícil determinar um método de reciclagem padrão entre os vários métodos.

Foram comunicados e promovidos diferentes processos de reciclagem para compósitos termoendurecíveis, como se ilustra na figura 9. Até à data, foram referidos basicamente três processos de classificação: reciclagem mecânica, química e térmica. A reciclagem mecânica consiste em processos de trituração mecânica para reduzir os resíduos a reciclados. A reciclagem térmica envolve processos térmicos para decompor os resíduos em material e energia e a reciclagem química envolve a dissolução da matriz das fibras num meio reativo (H. K. Jani *et al.*, 2022).

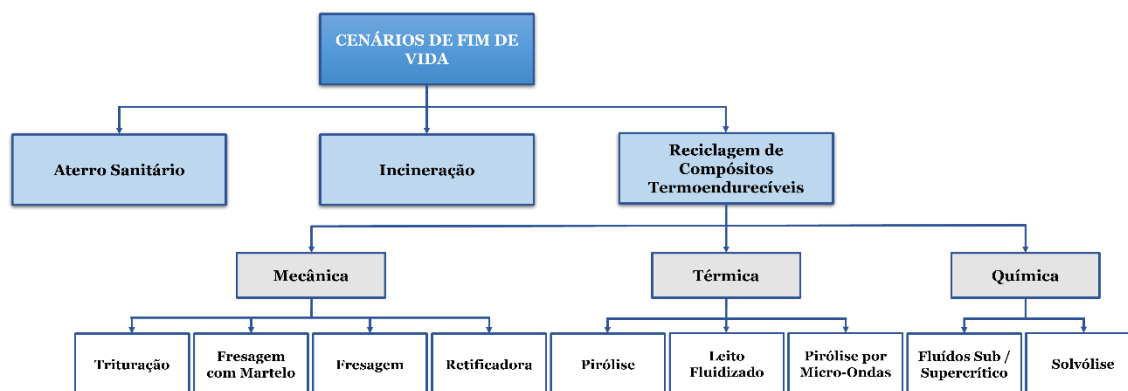


Figura 9 - Representação de cenários de fim de vida de compósitos reforçados com fibra de vidro (Adaptado de Jani *et al.*, 2022)

2.4.1. Reciclagem Mecânica

A reciclagem mecânica é o método mais promissor para reciclar materiais compósitos, uma vez que não são necessárias temperaturas elevadas e agentes químicos para a despolimerização da matriz termoendurecida (Rani *et al.*, 2021). O processo mecânico não envolve alterações térmicas e químicas das fibras. O método mecânico é normalmente utilizado para indicar categorias de processos mais amplas, como a trituração, a fresagem com martelo, a fresagem e a retificadora, que, em alguns casos, podem ser combinadas para obter materiais reciclados com as dimensões desejadas (Fazio *et al.*, 2023). Cada processo leva à fragmentação do compósito em pequenos pedaços, que podem ser ainda mais reduzidos às dimensões de pó (Fazio *et al.*, 2023).

O processo de trituração consiste em um ou mais pares de eixos contra rotativos equipados com lâminas, onde vários dentes são capazes de engatar o material compósito residual e forçá-lo através das lâminas sobrepostas (Arif *et al.*, 2022). Normalmente, os rotores de trituração movem-se a uma velocidade de rotação baixa para produzir os reciclados com tamanhos entre 50 mm e 100 mm e melhorar a eficiência do processo, evitando o ressalto do material nas lâminas e criando, ao mesmo tempo, um estado de tensão complexo caracterizado por cisalhamento, flexão e torção (Arif *et al.*, 2022). Além disso, a moagem a alta velocidade é utilizada para os resíduos compósitos homogêneos, que podem produzir o pó com partículas de 50 μm a 10 mm (Arif *et al.*, 2022).

O processo de reciclagem por fresagem com martelo, juntamente com a trituração, são técnicas predominantes para a reciclagem mecânica de materiais compósitos (Fazio *et al.*, 2023). Em comparação com a máquina de trituração, onde o material reciclado é triturado em pequenos flocos, a máquina de fresagem por martelo consiste numa câmara fechada onde um veio rígido está normalmente equipado com inserções de corte de alta velocidade que atuam como martelos no material reciclado (Rathore and Panwar, 2023).

À semelhança do processo de trituração, a fresagem a martelo caracteriza-se por uma baixa velocidade de rotação para evitar o ressalto do material a processar e melhorar a eficiência do processo. Os resíduos de PRFV são introduzidos manualmente na câmara e são triturados até que as suas dimensões sejam suficientemente pequenas para passar através de uma placa de peneiração localizada no fundo da câmara. No final do método de fresagem, é possível obter um material recuperado que consiste num pó rico em resina e em materiais reciclados ricos em fibras finas (Rathore and Panwar, 2023).

Por conseguinte, no final de cada método de reciclagem mecânica e do processo de crivagem subsequente, é possível obter diferentes dimensões destes materiais reciclados (Arif *et al.*, 2022). Em pormenor, a seleção por dimensão é geralmente realizada utilizando um cilindro de peneiração rotativo ou uma coluna de agitação de peneiração de secção assistida por fluxo de ar que permite a separação das fibras finas e do pó (Arif *et al.*, 2022). Assim, no final do processo de peneiração, é possível distinguir os materiais recuperados com diferentes dimensões, como os pós ricos em resina e o material reciclado rico em fibras (Arif *et al.*, 2022).

O processo de reciclagem mecânica apresenta numerosas vantagens em termos de escalabilidade industrial, sustentabilidade económica do processo e sustentabilidade ambiental (Fazio *et al.*, 2023). A reciclagem mecânica não utiliza quaisquer tipos de substâncias químicas e não produz qualquer tipo de poluição ambiental (Arif *et al.*, 2022).

Por outro lado, este método de reciclagem caracteriza-se por algumas desvantagens. Em primeiro lugar, não permite a preservação da dimensão das fibras recicladas, conduzindo a materiais compósitos reciclados reforçados com fibras curtas. Para além disso, durante a reciclagem mecânica, a resina que une as fibras pode não ser totalmente removida da superfície das fibras. As fibras recuperadas podem reter alguns componentes residuais da matriz, o que pode dificultar a adesão entre as fibras e a matriz no compósito reciclado (Fazio *et al.*, 2023).

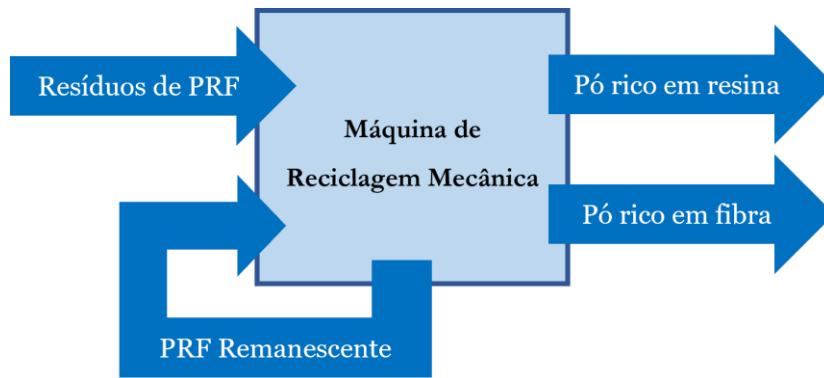


Figura 10 - Esquematização de um processo típico de reciclagem mecânica (Adaptado de De Fazio *et al.*, 2023)

2.4.2. Reciclagem Térmica

A reciclagem térmica é um método de reciclagem que envolve a utilização de calor para decompor os materiais compósitos e convertê-los em energia. Em vez de reutilizar diretamente os materiais, a reciclagem térmica centra-se no aproveitamento do conteúdo energético dos compósitos. Este tipo de reciclagem inclui a pirólise, a pirólise por micro-ondas e os processos de reciclagem em leito fluidizado (Rani *et al.*, 2021). A pirólise permite a recuperação das fibras de compósitos de polímeros termoendurecíveis ou termoplásticos (Arif *et al.*, 2022). Nesta técnica, o aquecimento dos polímeros e das fibras é efetuado a uma temperatura significativamente mais elevada, acima dos 450°C (Arif *et al.*, 2022). O processo de pirólise em PRFV tem o potencial de recuperar tanto as fibras como as matrizes poliméricas. A vantagem da pirólise é que o óleo recuperado do processo pode ser potencialmente utilizado para sustentar a reação, pelo que não é necessária energia externa (Arif *et al.*, 2022).

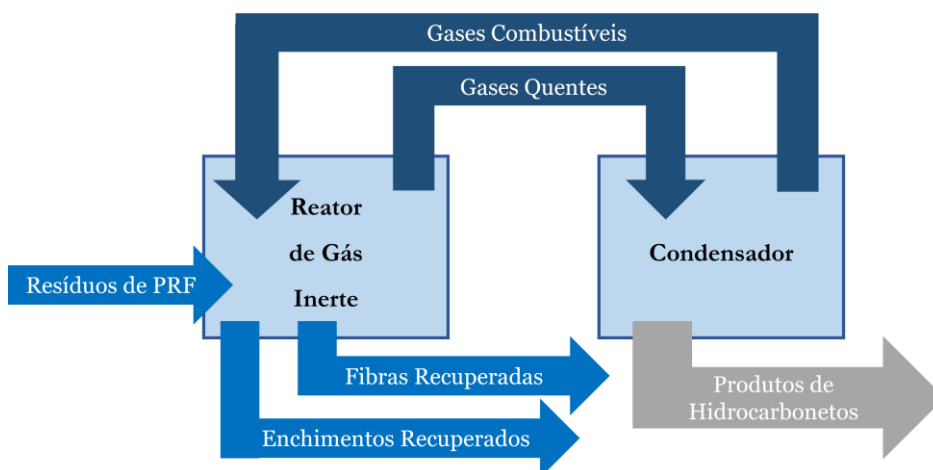


Figura 11 - Esquematização de um processo típico de pirólise de materiais compósitos termoendurecíveis (Adaptado de De Fazio *et al.*, 2023)

Outra categoria é o leito fluidizado, que é um processo oxidativo térmico que funciona a

uma temperatura elevada entre 400°C e 650°C e que utiliza o ar como gás de fluidização para decompor a matriz compósita através do fluxo de calor do ar a alta temperatura. Uma temperatura inadequada pode causar carbonização na superfície da fibra, bem como reduzir a sua espessura (Fazio *et al.*, 2023).

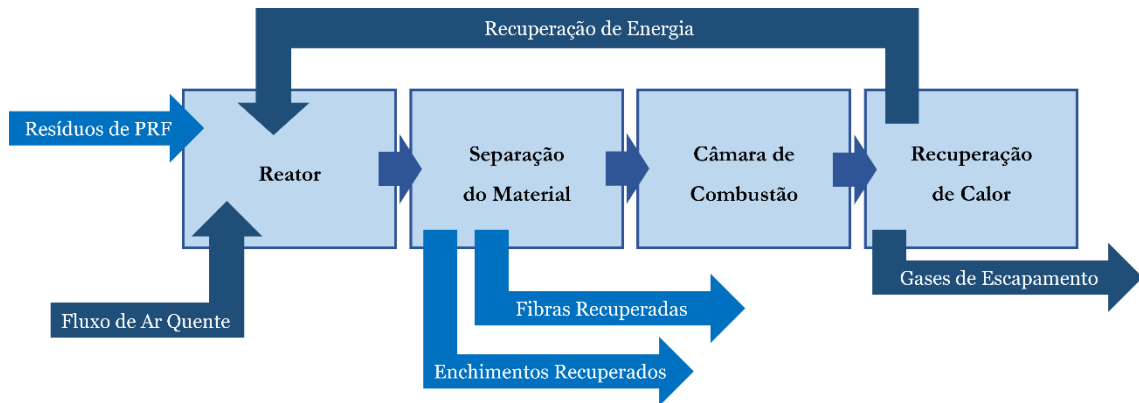


Figura 12 - Esquemática de um processo típico de reciclagem em leito fluidizado (Adaptado de De Fazio *et al.*, 2023)

A pirólise por micro-ondas melhora o processo de aquecimento através da utilização de radiação de micro-ondas para aquecer rapidamente os materiais, resultando em reações de pirólise mais rápidas e eficientes (Arif *et al.*, 2022). Este processo requer baixo consumo de energia e menor tempo de processamento em comparação com outros métodos de reciclagem térmica (Arif *et al.*, 2022).

2.4.3. Reciclagem Química

No processo de reciclagem química, o composto sólido é dissolvido em diferentes produtos líquidos utilizando solventes e depois utilizado como matéria-prima para diferentes aplicações (Rathore and Panwar, 2023). Os resíduos sólidos são primeiro triturados mecanicamente para aumentar a área de superfície do material, de modo que o processo de difusão possa ser mais elevado. O processo de reciclagem química consiste geralmente na degradação dos materiais de matriz polimérica dos compósitos em soluções químicas básicas que podem ser diretamente utilizadas como combustíveis para o fabrico de polímeros e materiais compósitos (Rathore and Panwar, 2023). O processo químico dissolve normalmente a parte orgânica dos compósitos, pelo que a parte restante será constituída pelos materiais de reforço e pelas partículas de enchimento (Rathore and Panwar, 2023).

A tecnologia de reciclagem química inclui normalmente fluídos sub/supercríticos e a solvólise. Entre estas técnicas, os fluídos sub/supercríticos são utilizados para recuperar

FVs, uma vez que estes fluídos acima do ponto crítico possuem viscosidade semelhante à do gás, densidade semelhante à do líquido, difusividade e poder de dissolução. Muitos fluídos sub/supercríticos podem ser misturados com álcalis, incluindo acetona e propanol, para recuperar fibras (Arif *et al.*, 2022).

A solvólise é uma abordagem de reciclagem química que utiliza vários solventes, incluindo água, etanol, acetona ou propanol, para isolar as fibras das matrizes poliméricas. As condições ambientais específicas, tais como a alta temperatura e pressão destes solventes ajudam a degradar as matrizes poliméricas (Arif *et al.*, 2022). Esta abordagem tem a capacidade de recuperar fibras e plásticos após o tratamento químico de compósitos de PRF. Recentemente, alguns estudos relataram a técnica de despolimerização que recupera com sucesso os monómeros, bem como outros produtos de degradação das matrizes poliméricas. A reutilização dos solventes torna a solvólise uma abordagem de ciclo fechado que garante sustentabilidade (Arif *et al.*, 2022).

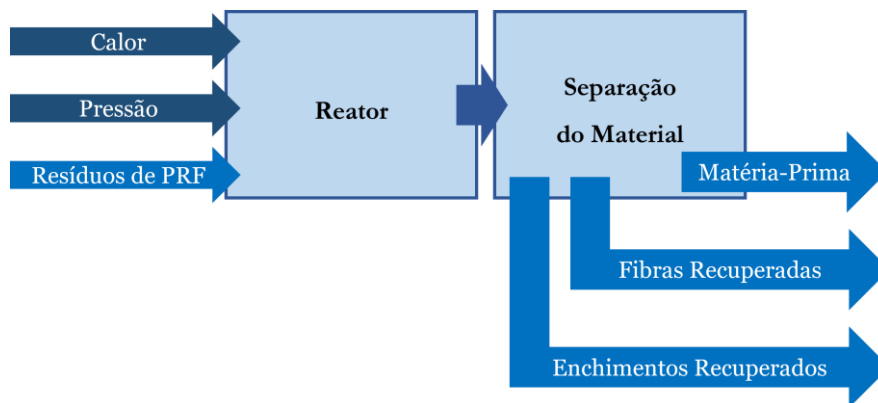


Figura 13 - Esquematização de um processo típico de reciclagem química (Adaptado de De Fazio *et al.*, 2023)

Capítulo 3

Resíduos Industriais e Economia Circular

A ascensão da energia eólica como um dos principais intervenientes no setor da energia renovável traz consigo uma multiplicidade de considerações ambientais e industriais. No centro destas preocupações está a questão dos resíduos industriais, sendo os polímeros utilizados nas pás das turbinas eólicas particularmente significativos. Este capítulo explora as temáticas dos resíduos industriais e da economia circular na indústria eólica.

3.1. Os Materiais Compósitos e a Indústria Eólica

À medida que a indústria eólica continua a crescer para fornecer energia renovável em todo o mundo, ao mesmo tempo promove-se uma economia circular que permita reduzir os impactes ambientais ao longo do ciclo de vida dos produtos (WindEurope, 2020).

Atualmente, cerca de 85% a 90% da massa total das turbinas eólicas pode ser reciclada. A maioria dos componentes de uma turbina eólica, como a fundação, a torre e os componentes da nacela têm práticas de reciclagem estabelecidas. No entanto, as pás de rotor das turbinas eólicas são mais difíceis de reciclar devido aos materiais compósitos utilizados na sua produção. Embora existam várias tecnologias para reciclar as hélices e um número crescente de empresas que oferece serviços de reciclagem de materiais compósitos, estas soluções ainda não estão amplamente difundidas (WindEurope, 2020).

As pás de rotor das turbinas eólicas são constituídas por materiais compósitos que aumentam o desempenho da turbina, permitindo operar com hélices mais leves e mais longas com uma forma aerodinâmica otimizada. Atualmente, são utilizados 2,5 milhões de toneladas de materiais compósitos no setor da energia eólica em todo o mundo (WindEurope, 2023b).

De acordo com a WindEurope (2023b), a agência europeia para a energia eólica, cerca de 14.000 pás de rotor poderão ser descartadas em todo o continente nos próximos cinco anos, o que representará entre 40.000 a 60.000 toneladas de resíduos. A reciclagem destas pás de 1ª geração é uma prioridade máxima para a indústria eólica. Para tal, são necessárias soluções logísticas e tecnológicas para a desmontagem, a recolha, o transporte, a gestão dos resíduos e a sua reintegração na cadeia de valor.

A reciclagem de materiais compósitos não é apenas um desafio para a indústria eólica, mas sim um desafio intersetorial. Os resíduos das pás de rotor representarão apenas 10% do total estimado de resíduos de materiais compósitos até 2025. Os volumes relativamente baixos de resíduos das pás tornam difícil a criação de uma atividade de reciclagem baseada apenas neste fluxo de resíduos (WindEurope, 2023b).

A Europa precisa de investir em mais investigação e inovação para diversificar e aumentar a escala das tecnologias de reciclagem de compósitos, desenvolver novos materiais de elevado desempenho com maior circularidade, e conceber metodologias para melhorar a circularidade e a capacidade de reciclagem das hélices (Juntikka *et al.*, 2018).

No futuro, um número crescente de turbinas eólicas começará a ser desativado, tendo em conta que o tempo de vida normal de uma turbina eólica é de aproximadamente 20-25 anos. Sendo que atualmente algumas turbinas eólicas já atingem até 35 anos através da extensão do seu tempo de vida, visto que existem cada vez mais oportunidades de repotenciação, ou seja, de substituição de modelos antigos por modelos mais recentes e mais eficientes, que permitem aumentar a produção da eletricidade dos parques eólicos (Juntikka *et al.*, 2018).

A indústria eólica está empenhada em promover uma economia mais circular e em determinar formas de a apoiar. É necessário um processo sustentável para tratar as turbinas eólicas no final da sua vida útil, a fim de maximizar os benefícios ambientais da energia eólica numa abordagem de ciclo de vida, como representado na figura 14 (WindEurope, 2020).

Para tal, a indústria eólica está ativamente à procura de indústrias e setores que possam utilizar os materiais e equipamentos desativados dos parques eólicos. A indústria eólica quer trabalhar com estes setores para desenvolver capacidades em matéria de circularidade das pás de rotor das turbinas eólicas, nomeadamente através do desenvolvimento de novos materiais e conceções estruturais mais facilmente recicláveis (WindEurope, 2020).

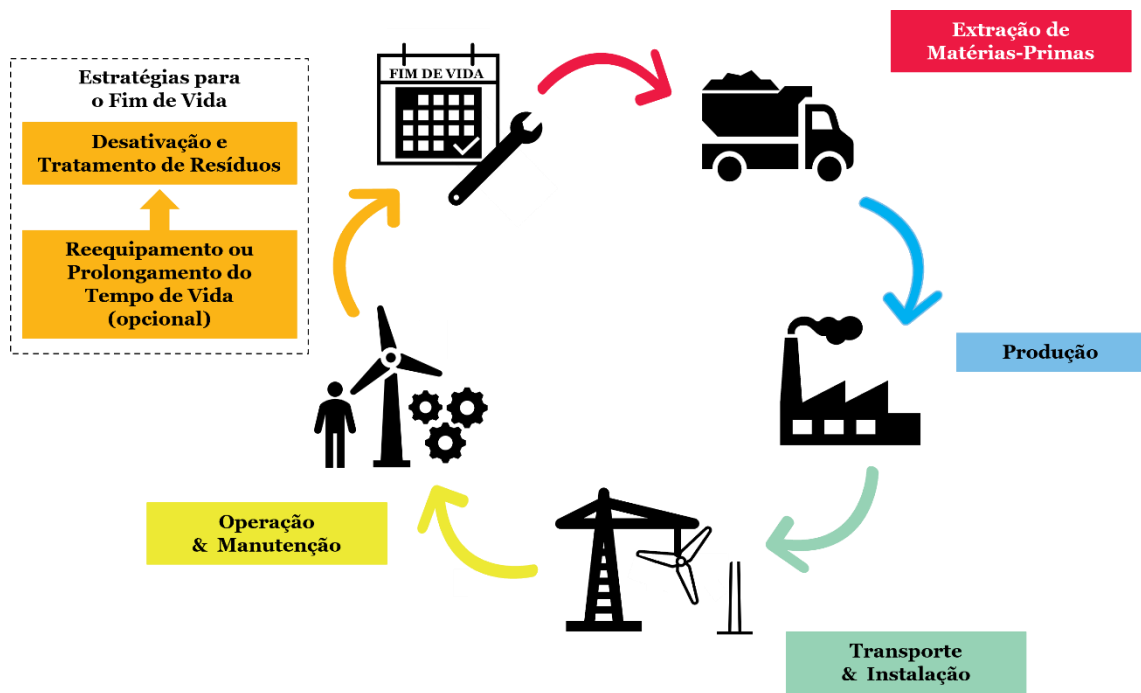


Figura 14 - O ciclo de vida de uma turbina eólica (Adaptado de WindEurope, 2020)

Como mencionado anteriormente, a maioria dos componentes de uma turbina eólica têm práticas de reciclagem estabelecidas, por exemplo, o aço das torres é 100% reciclável. Podendo ser reutilizado novamente sem qualquer perda de qualidade (WindEurope, 2020).

O tratamento das fundações durante o desmantelamento difere de país para país. Em alguns países, as fundações têm de ser removidas. O betão das fundações removidas pode ser reciclado em agregados para materiais de construção ou para a construção de estradas. Noutros países, as fundações podem ser, parcial ou totalmente, deixadas *in situ* quando a sua remoção possa conduzir a maiores impactes ambientais ou se o proprietário do terreno assim o tiver especificado (Majewski *et al.*, 2022).

Os desafios dos materiais das pás de rotor incluem a otimização da rigidez, a vida à fadiga, os métodos de previsão de danos e a produção de estruturas de pás leves. A seleção de materiais é determinada pelo preço, pela capacidade de processamento, pela integridade do material, por localizações geográficas com condições ambientais mais hostis e pela procura de pás de rotor mais longas. Os processos de produção e de seleção de materiais estão a evoluir rapidamente, de modo a considerar também a sustentabilidade global dos materiais escolhidos, incluindo os seus impactes na reciclabilidade e o alinhamento com futuros métodos de reciclagem, satisfazendo simultaneamente os critérios de custo e desempenho (Majewski *et al.*, 2022).

Para além da melhoria da eficiência na recolha de resíduos e da combinação dos volumes de resíduos, os elevados custos de investimento e os requisitos energéticos parecem ser uma limitação comum a uma maior implementação e expansão das novas tecnologias de reciclagem de materiais compósitos. Estão em curso vários projetos para melhorar a eficiência energética, reduzindo o tempo de processamento necessário para a mesma quantidade de materiais e aumentando a produção de materiais dos processos (Rathore and Panwar, 2023).

Isto traduzir-se-ia em custos mais baixos e permitiria uma utilização mais aceitável da energia, sem anular os benefícios da reciclagem de materiais. No entanto, para tornar as tecnologias de reciclagem mais eficientes e sustentáveis, o desenvolvimento dessas tecnologias deve ser associado ao desenvolvimento de materiais (Rathore and Panwar, 2023).

As inovações nos materiais devem esforçar-se por ter efeitos positivos na produção, manutenção, vida útil e pegada ambiental das pás de rotor. As plataformas tecnológicas europeias indicam que a investigação de materiais para as pás é uma área de investigação importante e consideram a contabilização da sustentabilidade e da reciclagem como uma questão estratégica (Rathore and Panwar, 2023).

3.2. Economia Circular

Atualmente, a economia circular é considerada um modelo económico fundamental para muitos países europeus. Foi introduzida como um plano de ação económica pela Comissão Europeia em 2015 e rapidamente se tornou numa iniciativa líder. No entanto, o próprio conceito teve a sua origem em 1966. Este modelo ajuda a enfrentar o desafio do desenvolvimento sustentável, a alcançar a eficiência na utilização dos recursos, a estimular a competitividade global da Europa, especialmente através de uma estratégia de eco inovação proporcional e a geração de novos empregos. Um dos domínios em que são criados novos postos de trabalho é a reutilização e a reciclagem de materiais (Korniejenko *et al.*, 2021).

O conceito de Economia Circular baseia-se em novas abordagens de fabrico e utilização dos bens. Na economia tradicional, designada por linear, são geralmente implementadas as etapas de desenvolvimento, consumo e eliminação de materiais/produtos. Em contrapartida, a economia circular é um sistema económico regenerativo que visa maximizar a utilidade e o valor dos recursos ao longo do seu ciclo de vida, minimizar os

resíduos e o impacto ambiental e promover o crescimento sustentável (Juntikka *et al.*, 2018).

No centro deste modelo estão os princípios dos 3Rs - Reduzir, Reutilizar, Reciclar - que estão integrados em todas as fases do ciclo de vida de um produto, desde a sua conceção e produção até à sua utilização e eliminação. A transformação do modelo linear em abordagens circulares ajuda a alcançar a sustentabilidade global e a minimizar a pressão sobre os recursos naturais. Ajuda também a criar um crescimento verde, especialmente através de atividades complementares, incluindo a eco inovação e a eficiência dos recursos (Juntikka *et al.*, 2018).

É necessária a transição para uma Economia Circular, que promova a eliminação dos resíduos e a utilização contínua e segura dos recursos naturais. A eficiência dos materiais é um elemento-chave da Economia Circular para enfrentar os desafios da redução dos impactos no ambiente e da escassez de recursos. A melhoria da circularidade dos materiais é um conceito básico para a economia circular. A reintrodução do fluxo de materiais deve incluir os seus efeitos económicos, ambientais e sociais (Karavida and Nõmmik, 2015).

O elemento importante neste caso é também a reconcepção dos materiais ao longo do ciclo de vida do produto. Os produtos devem ser concebidos através da construção de um processo de ciclo fechado e da diminuição da utilização de recursos. Ao mesmo tempo, deve ser promovida a utilização persistente dos recursos através da reciclagem e reutilização em vez da deposição em aterro (Karavida and Nõmmik, 2015).

Essencialmente, o alinhamento da energia eólica com a Economia Circular não só amplifica os seus benefícios ambientais, como também promove a criação de emprego e oportunidades de negócio nos setores da reciclagem e da reutilização. Trata-se de uma visão colaborativa para um futuro sustentável, que procura tornar o planeta mais verde (Karavida and Nõmmik, 2015).

Embora a reciclagem não seja a ação com maior prioridade no mundo da economia circular, há um ponto em que uma pá de rotor chega ao fim da sua vida útil e a reciclagem torna-se inevitável. Além disso, as políticas legislativas, a crescente consciência ambiental e a ameaça de escassez de matérias-primas são fatores que continuam a coagir a sociedade a reciclar. Existem alguns regulamentos que estão altamente relacionados com a reciclagem de compósitos poliméricos (Juntikka *et al.*, 2018):

- A Diretiva 2008/98/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de novembro de 2008, relativa aos resíduos (Diretiva-Quadro "Resíduos");
- A Decisão n.º 1386/2013/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 20 de novembro de 2013, relativa a um programa geral de ação da União para 2020 em matéria de ambiente “Viver bem, dentro dos limites do nosso planeta”;
- A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas (ONU);
- A Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões (COM/2015/0614). Fechar o ciclo – Plano de ação da UE para a economia circular;
- A Diretiva 2000/53/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 18 de setembro de 2000, relativa aos veículos em fim de vida;
- O Pacto Ecológico Europeu (PEE).

A Diretiva 2008/98/CE estabelece os conceitos e as definições básicas relacionadas com a gestão de resíduos, tais como as definições de resíduos, reciclagem e recuperação. A abordagem da União Europeia à gestão de resíduos baseia-se na "hierarquia dos resíduos", representada na figura 15, que estabelece a ordem de prioridades na definição da política de resíduos e na gestão dos resíduos a nível operacional (WindEurope, 2020).

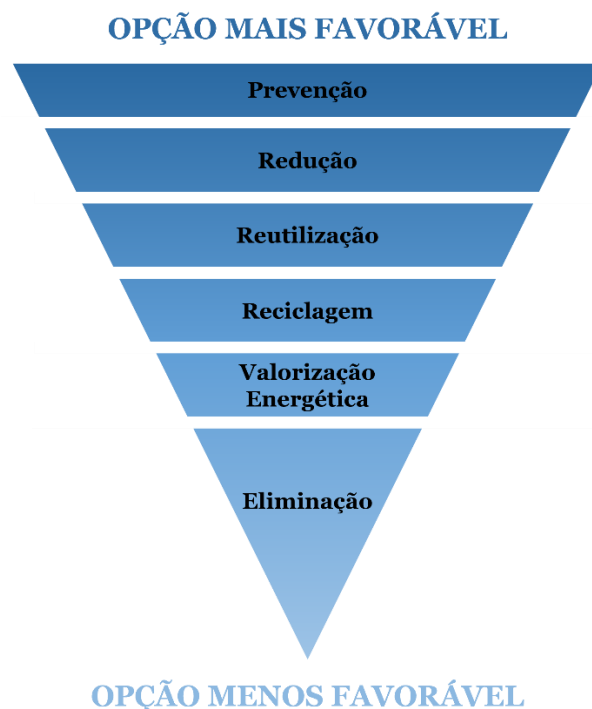


Figura 15 - A hierarquia dos resíduos para uma gestão sustentável dos resíduos da hélice da turbina eólica (Adaptado de WindEurope, 2020)

A Hierarquia dos Resíduos é um quadro estruturado que delinea as opções de gestão de resíduos com base na sua favorabilidade ambiental. Dá prioridade à prevenção, reduzindo a produção de resíduos como a sua principal ação. A seguir vem a redução, que enfatiza a minimização do volume de resíduos ou da sua natureza perigosa. De seguida, a reutilização, que é o ato de empregar itens para os seus fins originais ou novos fins várias vezes. Se um artigo não puder ser reutilizado, a reciclagem para um novo produto torna-se a escolha preferida, reduzindo a pressão sobre as matérias-primas e diminuindo o volume encaminhado para os aterros. Só quando as opções anteriores são insustentáveis é que se deve recorrer à valorização energética, aproveitando os resíduos para gerar energia. A hierarquia termina com a eliminação, que deve ser a opção menos favorecida, resultando frequentemente na deposição em aterro ou na incineração sem extração de energia (WindEurope, 2020).

Em consonância com isto, a Decisão n.º 1386/2013/UE estabelece os seguintes objetivos prioritários para a política de resíduos na EU (Juntikka *et al.*, 2018):

- Reduzir a quantidade de resíduos produzidos;
- Maximizar a reciclagem e a reutilização;
- Limitar a incineração a materiais não recicláveis;
- Eliminar progressivamente a deposição em aterro de resíduos não recicláveis e não recuperáveis;
- Assegurar a plena aplicação dos objetivos da política de resíduos em todos os Estados-Membros.

A Agenda 2030, lançada em 2015 pela ONU com o título "Transformar o nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável", apresenta 17 objetivos com 169 metas que abrangem uma vasta gama de questões relacionadas com o desenvolvimento sustentável. Um dos objetivos envolve os padrões de consumo e produção sustentáveis, em que a meta é reduzir substancialmente a produção de resíduos através da prevenção, redução, reciclagem e reutilização (Juntikka *et al.*, 2018).

A COM/2015/0614 refere-se à comunicação oficial da Comissão Europeia intitulada "Fechar o ciclo - Um plano de ação da UE para a economia circular". Apresentada em dezembro de 2015, esta comunicação foi um passo essencial nos esforços da União Europeia para promover uma economia sustentável, de baixo carbono, eficiente em termos de recursos e competitiva (Juntikka *et al.*, 2018).

A Diretiva 2000/53/CE relativa aos veículos em fim de vida, estabelece os seguintes requisitos (Juntikka *et al.*, 2018):

- Todos os automóveis produzidos devem ser reciclados até, pelo menos, 95% do seu valor;
- O cumprimento da lei é da responsabilidade dos fabricantes de automóveis;
- Os automóveis que o fabricante coloca no mercado na Suécia devem ser recebidos gratuitamente num sistema de receção a nível nacional.

É de notar que o governo sueco, em junho de 2020, alargou a sua "Delegação para a Economia Circular" com representantes da indústria de embalagens alimentares, automóvel e de reciclagem de plásticos. De acordo com a comunicação da delegação, a tónica para 2020 era colocada na rastreabilidade dos materiais e num esquema de responsabilidade mais forte na gestão de resíduos para os produtores. A delegação está também a centrar-se claramente no poder de compra do setor público, uma vez que este setor pode claramente liderar o caminho para uma economia circular. É de esperar que as futuras recomendações incluam também os materiais compósitos reforçados com fibras e não apenas os plásticos. É provável que a responsabilidade do produtor na gestão dos resíduos, tal como exigido na indústria automóvel, seja também aplicada a outras indústrias (WindEurope, 2020).

O Pacto Ecológico Europeu (PEE) é a nova estratégia de crescimento da UE, que "tem por objetivo transformar a UE numa sociedade justa e próspera com [...] uma economia competitiva" (Fetting, 2020, p.5). É também uma parte crucial do plano da UE para alcançar os objetivos da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Além disso, promete proteger os cidadãos dos danos e impactes ambientais e ser justo e inclusivo. O bem-estar deve ser colocado no centro da política económica (Fetting, 2020).

A Comissão Europeia apresentou o PEE às instituições da UE e ao público em 11 de dezembro de 2019. Após um debate parlamentar em janeiro de 2020, o Parlamento Europeu decidiu apoiar o PEE. O mesmo também apelou a objetivos intermédios mais elevados, mais concretamente no que diz respeito às emissões de carbono (Fetting, 2020).

Os principais objetivos do PEE são ter uma UE neutra em termos de carbono até 2050 e a dissociação entre o crescimento económico e a utilização dos recursos. A Diretiva "Carbono Zero" não é uma Lei em si, mas uma estratégia política geral que define as ambições e os objetivos em diferentes setores políticos. Para a sua aplicação, os regulamentos e normas existentes serão revistos ao longo dos próximos anos e serão

elaboradas e aplicadas novas leis e diretivas. O PEE é constituído por oito domínios fundamentais (Fetting, 2020):

- Aumentar a ambição climática da UE para 2030 e 2050;
- Fornecer energia limpa, segura e a preços acessíveis;
- Mobilizar a indústria para uma economia limpa e circular;
- Construir e renovar de forma eficiente em termos energéticos e de recursos;
- Ambição de poluição zero para um ambiente sem substâncias tóxicas;
- Preservar e restaurar os ecossistemas e a biodiversidade;
- Um sistema alimentar justo, saudável e respeitador do ambiente;
- Acelerar a transição para uma mobilidade sustentável e inteligente.

As diferentes fases da economia circular são apresentadas na figura 16. Nomeadamente, tudo começa com as matérias-primas, segue-se a conceção, depois a produção e o refabrico e, por fim, a distribuição. Uma vez distribuídos aos utilizadores, os produtos são consumidos, utilizados, reutilizados ou reparados. Depois são recolhidos e novamente reciclados em matérias-primas. As fases estão interligadas, uma vez que os materiais podem participar no esquema de uma forma em cascata (Karavida and Nõmmik, 2015).

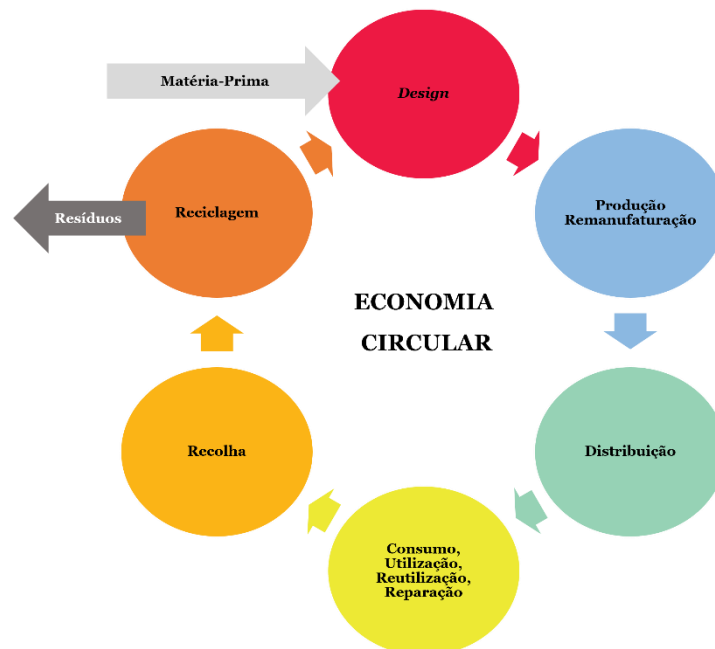


Figura 16 - Principais fases do modelo de Economia Circular (Adaptado de Karavida and Nõmmik, 2015)

De acordo com os princípios da Economia Circular, existem quatro formas de aumentar a produtividade do material: o poder do círculo interno, o poder de circular mais tempo,

o poder da utilização em cascata e o poder dos círculos puros (Karavida and Nõmmik, 2015):

- O poder do círculo interno consiste na minimização das quantidades de materiais utilizados na Economia Circular, em comparação com os da Economia Linear, ou seja, quanto menos materiais, menor o processo de reutilização e, consequentemente, menos custos e externalidades;
- O poder de circular durante mais tempo tem a ver com o aumento dos ciclos, em que os ciclos se referem à reutilização, reparação ou refabricação, para evitar os custos adicionais de fabricar um produto totalmente novo;
- O poder da utilização em cascata refere-se às várias utilizações possíveis de um material ao longo da cadeia de valor, antes de ser devolvido à natureza;
- O poder das entradas puras refere-se à utilização de materiais limpos e não tóxicos para facilitar o processo de recolha e redistribuição e garantir a durabilidade do material.

Os principais princípios em que se baseia o modelo da Economia Circular são ilustrados na figura 17. No lado esquerdo da ilustração são apresentados os nutrientes biológicos, enquanto no lado direito são apresentados os nutrientes técnicos (Silva, 2019).

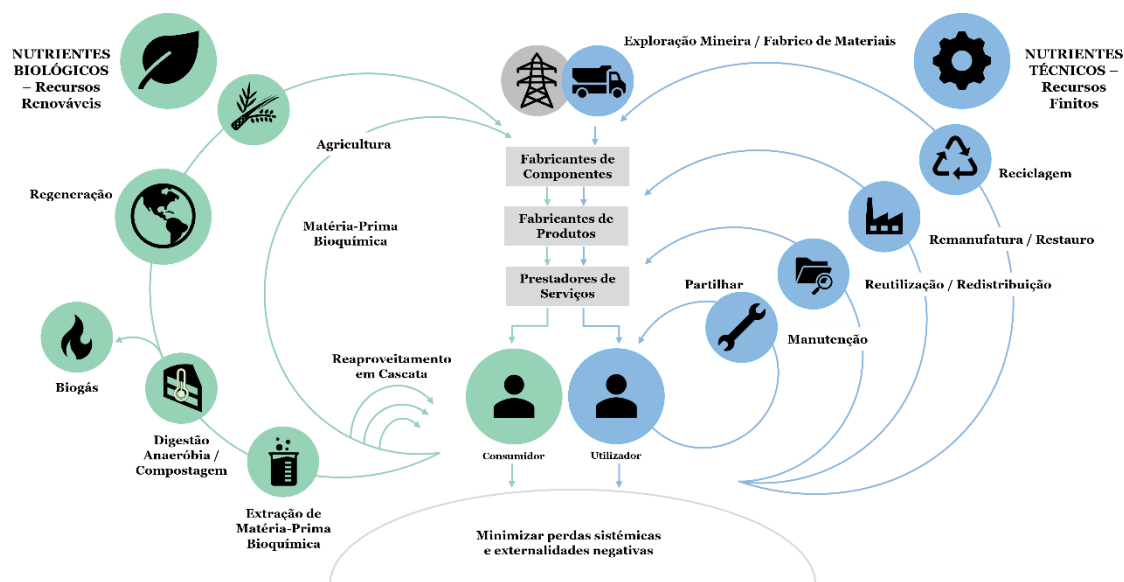


Figura 17 - Exemplo de Diagrama de Borboleta da EC (Adaptado de Silva, 2019)

No que diz respeito aos nutrientes técnicos, a reciclagem é a tecnologia menos preferível, seguindo-se a renovação e a refabricação, depois a reutilização do produto e para concluir com a solução ótima, a manutenção (Silva, 2019). Em relação aos nutrientes biológicos, os diferentes processos incluem a extração bioquímica, que pode produzir biomassa e

energia, a digestão anaeróbica, que pode produzir biogás para ser utilizado na produção de energia, e a compostagem, em que o material é eliminado de forma segura na natureza (Silva, 2019).

De acordo com a Fundação Ellen MacArthur, existem dois tipos de reciclagem de materiais: a reciclagem ascendente e a reciclagem descendente. A reciclagem descendente refere-se ao processo de transformação de materiais em novos materiais, que têm menos qualidade e não têm a mesma funcionalidade. A reciclagem ascendente é o processo de transformação de materiais em novos materiais com melhor qualidade e maior funcionalidade (Silva, 2019).

No centro da ilustração, é apresentado o método de reciclagem descendente, em que os materiais são transformados em energia ou depositados em aterros. Nas laterais, é ilustrado o método de reciclagem ascendente, que mostra os materiais a serem restaurados na biosfera ou utilizados infinitamente pelos utilizadores. No entanto, o processo de *up-cycling* tem levantado muitas controvérsias, porque é difícil fazer um produto de melhor qualidade a partir de materiais reutilizados (Silva, 2019).

Capítulo 4

Setor Eólico e Setor do Calçado

O setor da energia eólica e o setor do calçado podem parecer, à primeira vista, setores completamente distintos, cada um com objetivos e desafios únicos. No entanto, revelam pontos de interseção e oportunidades de sinergias. Ambos são fundamentais para o desenvolvimento económico e enfrentam uma pressão crescente para se tornarem mais sustentáveis e ambientalmente responsáveis. Este capítulo tem como objetivo fazer uma caracterização genérica de ambos os setores, delineando as suas principais características, desafios e impactos na sociedade e no ambiente.

4.1. Setor Eólico

O setor eólico é um exemplo da capacidade da humanidade de aproveitar as forças da natureza para a produção de energia sustentável. À medida que as comunidades globais reconhecem cada vez mais a necessidade urgente de deixarem de utilizar os combustíveis fósseis, a energia eólica surgiu como uma alternativa renovável líder. Com os avanços tecnológicos a permitir baixar os custos e a melhorar a eficiência, juntamente com o apoio político e a crescente consciência ambiental, o setor eólico não só está preparado para crescer, como também está a desempenhar um papel fundamental na jornada global em direção a um futuro mais verde e sustentável (Diez-Cañamero and Mendoza, 2023).

4.1.1. Caracterização do Setor Eólico

A energia eólica é a energia obtida através da força do vento, por meio de uma turbina eólica, que transforma a energia cinética das correntes de ar em energia elétrica. O processo de extração é realizado principalmente graças ao rotor, que transforma a energia cinética em energia mecânica e ao gerador, que transforma essa energia mecânica em energia elétrica. É uma energia renovável, eficiente, madura e segura, fundamental para a transição energética e a descarbonização da economia (Son and Ma, 2017).

Para aproveitar a energia cinética do vento e convertê-la em energia elétrica, é necessário, como já mencionado, utilizar uma turbina eólica. A melhor utilização possível das turbinas, que têm normalmente entre 80 e 120 metros de altura depende da força do vento. Por isso, os parques eólicos, que reúnem um grande número de aerogeradores e

permitem obter esta energia em grandes quantidades, devem estar situados em locais onde a presença do vento é predominante (Iberdrola, 2023b).

Os aerogeradores devem ser orientados na direção do vento, o que acontece graças a um cata-vento situado no topo de cada turbina. A partir daí, a força das correntes de ar vai pôr em funcionamento as três partes principais da turbina eólica (WindEurope, 2023a):

- O rotor: composto por três pás e pelo cubo que as une, a sua função é captar a força do vento e convertê-la em energia mecânica de rotação;
- A caixa de velocidades: ligada ao motor por um veio e a sua função é aumentar a velocidade de rotação de 30 rotações por minuto (rpm) para 1500 rpm;
- O gerador: que é responsável pela conversão da energia mecânica de rotação em energia elétrica.

Todos os aerogeradores de um parque eólico estão ligados entre si por cabos subterrâneos que transportam a energia elétrica até uma subestação de transformação. A partir daí, é transportada para casas, fábricas ou escolas, entre outros locais, através das redes de distribuição de diferentes empresas elétricas. A energia eólica oferece inúmeras vantagens, tanto para as empresas, que nela investem, como para a sociedade, ao contribuir para minimizar o impacto das alterações climáticas (Iberdrola, 2023b):

- **Limpa:** como não necessita de qualquer processo de combustão, é uma energia com baixos níveis de emissão de gases com efeito de estufa (GEE), os principais responsáveis pelo aquecimento global.
- **Inesgotável:** o vento é um recurso ilimitado, tal como a sua utilização, desde que existam correntes de ar suficientes.
- **Barato:** tanto o custo por kW produzido como a sua manutenção são bastante baixos. Nas zonas onde o vento sopra mais forte, o benefício é ainda maior.
- **Baixo impacto:** os parques eólicos são instalados após um rigoroso processo de estudo e planeamento. Além disso, são procuradas zonas despovoadas para evitar efeitos negativos para os seus habitantes.
- **Cria empregos verdes:** de acordo com a Agência Internacional para as Energias Renováveis (IRENA), a energia eólica dá atualmente emprego a mais de 1,2 milhões de pessoas e o número de empregos verdes continua a aumentar.

O setor da energia eólica está a registar um enorme crescimento devido à necessidade global de um fornecimento de energia limpa. De acordo com dados da Associação Mundial de Energia Eólica (WWEA), em 2021 foi possível atingir uma capacidade eólica

instalada de 840 Gigawatts em todo o mundo, o suficiente para abastecer mais de 7% da procura global de energia (Iberdrola, 2023a).

Só em Espanha, segundo dados da Associação Espanhola de Energia Eólica (AEE), existem 1.300 parques eólicos com cerca de 22 000 aerogeradores instalados. E Espanha ocupa o quinto lugar no mundo em termos de capacidade instalada, atrás da China, Estados Unidos, Alemanha e Índia, e à frente do Reino Unido, Brasil e França (Iberdrola, 2023a).

Portugal continua a ser uma nação europeia líder em termos de produção de energia eólica, embora o seu ritmo de expansão da capacidade eólica instalada tenha abrandado. Em 2022, Portugal ocupou o 17.º lugar na UE em termos de novas instalações de capacidade, de acordo com os dados recentes divulgados pela Wind Europe (Prado, 2023).

Os últimos resultados da Wind Europe mostram que Portugal acrescentou apenas 28 megawatts (MW) à sua capacidade de energia eólica em 2022. Esta adição elevou o total de energia eólica operacional para 5.696 MW, o que contribuiu para 26% da produção de eletricidade do país nesse ano (Prado, 2023).

4.1.2. Problemática dos Resíduos no Setor Eólico

Embora o setor eólico seja amplamente reconhecido como amigo do ambiente e sustentável, não está isento de desafios relacionados com os resíduos. Um dos problemas mais significativos é a eliminação das pás de rotor das turbinas eólicas, que são normalmente construídas em materiais compósitos difíceis de reciclar. Consequentemente, muitas das pás usadas acabam em aterros, o que não é sustentável do ponto de vista ambiental. Estão a ser desenvolvidos esforços para desenvolver soluções de reciclagem e reutilização das pás, mas este continua a ser um desafio substancial (Cabezudo, 2022).

Outra questão é a utilização de elementos de terras raras nos ímanes de algumas turbinas eólicas. A extração e o processamento destes elementos têm impactes ambientais notáveis e, atualmente, as opções de reciclagem disponíveis para estes materiais são limitadas. Além disso, as turbinas eólicas contêm componentes eletrónicos que acabam por se transformar em resíduos eletrónicos no final da sua vida útil. É crucial eliminar e reciclar corretamente estes componentes para minimizar os impactes ambientais (Diez-Cañamero and Mendoza, 2023).

Além disso, as turbinas eólicas utilizam óleos lubrificantes e fluídos hidráulicos que têm de ser substituídos periodicamente. A eliminação correta destes fluídos é necessária para evitar a contaminação do solo e da água. A construção de parques eólicos também gera resíduos, como betão, aço e outros detritos de construção. A gestão adequada e a reciclagem destes materiais são essenciais para minimizar os impactes ambientais (Lichtenegger *et al.*, 2020).

Por último, no final da sua vida operacional, as turbinas eólicas têm de ser desativadas, o que implica o desmantelamento e a eliminação dos seus vários componentes. A gestão adequada e a reciclagem destes materiais são essenciais para minimizar os impactes ambientais (Diez-Cañamero and Mendoza, 2023).

Estão em curso esforços de investigação e desenvolvimento para resolver estes problemas de resíduos no setor eólico. Por exemplo, há esforços para desenvolver óleos lubrificantes e fluídos hidráulicos mais amigos do ambiente, bem como para melhorar a reciclabilidade dos componentes eletrónicos. A definição de práticas adequadas de gestão de resíduos durante a construção e desativação de parques eólicos são também essenciais para minimizar os impactes ambientais (Cabezudo, 2022).

4.2. Setor do Calçado

O setor do calçado, que engloba uma vasta gama de produtos, desde ténis casuais a sapatos formais e vestuário desportivo especializado, representa uma interseção dinâmica de moda, funcionalidade e tecnologia. Historicamente enraizada no artesanato, esta indústria evoluiu tremendamente, com os avanços tecnológicos a abrirem caminho a materiais inovadores, práticas sustentáveis e estratégias de retalho digital. À medida que as exigências dos consumidores evoluem para uma produção ética e materiais ecológicos, o setor do calçado não só satisfaz as necessidades estéticas e de conforto, como também reflete tendências e valores sociais mais amplos. Servindo de barómetro do estilo e da cultura, continua a trilhar o caminho da inovação, mantendo-se fiel às tradições (Rocha *et al.*, 2020).

4.2.1. Caracterização do Setor do Calçado

O setor do calçado, por vezes designado por indústria do calçado, engloba a totalidade dos processos envolvidos na conceção, produção e venda de sapatos. Este setor é composto por complexas inter-relações entre a moda, o fabrico e a opinião popular. Existem muitas empresas no setor do calçado e as empresas dominam este setor de

forma esmagadora em relação aos pequenos designers. Embora este setor esteja intimamente relacionado com a indústria da moda, as suas preocupações nem sempre são as mesmas e as suas estratégias divergem frequentemente (Barnett, 2023).

Quando se pensa no setor do calçado, pensa-se frequentemente em grandes empresas que fabricam ténis e uma grande variedade de outros sapatos. O calçado também pode ser fabricado por pequenos *designers*, embora estes não sejam tão comuns. O calçado é considerado uma necessidade na maior parte do mundo, o que coloca exigências únicas no setor (Macroconsulting, 2022).

Um aspeto importante do setor do calçado é o fabrico. Muitos problemas no setor do calçado surgiram devido a preocupações sobre a forma como os sapatos são fabricados. Os materiais utilizados para fabricar sapatos não são muitas vezes amigos do ambiente e muitas empresas de calçado foram acusadas de utilizar práticas laborais injustas em determinados países. Estas alegações não são invulgares em qualquer setor com um grande número de produtos de má qualidade (Barnett, 2023).

Ao longo da sua história, este setor tem enfrentado uma infinidade de desafios, mas a sua resiliência duradoura inspira confiança na sua capacidade de superar os obstáculos futuros. Ainda a recuperar das consequências da pandemia originada pela COVID-19, a indústria do calçado enfrenta um clima macroeconómico incerto, influenciado pelos efeitos da invasão da Ucrânia, pelas pressões inflacionistas e pelo aumento dos custos da energia e das matérias-primas (Barnett, 2023).

Os dados do Instituto Nacional de Estatística (INE) sublinham ainda a capacidade de recuperação das empresas portuguesas de calçado. Estas empresas não só souberam ultrapassar as adversidades, como atingiram exportações no valor de 505.241.194 euros no primeiro trimestre de 2022 (Macroconsulting, 2022).

4.2.2. Setor do Calçado em Portugal

Ao longo dos anos, a notável transformação e a resiliência do setor do calçado em Portugal face às crises tornaram-no um caso de estudo convincente. Inicialmente negligenciado, este setor tornou-se um farol de prosperidade e de importância global para Portugal (Rocha *et al.*, 2020).

Desde os acontecimentos transformadores que se seguiram à revolução de 25 de abril de 1974 em Portugal até à sua integração na Comunidade Económica Europeia (CEE) em

1986, as empresas de calçado tiveram de se adaptar continuamente para se manterem competitivas, tanto a nível nacional como internacional. A introdução do Euro em 1999 eliminou a capacidade de Portugal desvalorizar estrategicamente a sua moeda para obter vantagens competitivas (Rocha *et al.*, 2020).

Esta mudança levou as empresas portuguesas a aperfeiçoar as suas eficiências de produção. Além disso, a entrada da China na Organização Mundial do Comércio (OMC), em 2001, e a inclusão de 10 países na UE, em 2004, estimularam uma intensa concorrência global no ramo do calçado (Rocha *et al.*, 2020).

No entanto, o setor do calçado em Portugal tem navegado admiravelmente nesta rivalidade global acrescida. As exportações subiram de 3,1 milhões de euros em 1975 para uns substanciais 1,5 mil milhões de euros em 2020, enquanto a mão de obra aumentou de cerca de 15.000 indivíduos para 41.864. Além disso, o setor, que outrora se apoiava fortemente na mão de obra barata e em produtos de baixo preço, evoluiu tecnologicamente, emergindo como uma das empresas líderes mundiais (Barnett, 2023).

O setor do calçado tem um enorme significado para a dinâmica comercial de Portugal. Apesar da tendência histórica de Portugal como importador líquido, começou a registar excedentes consistentes da balança comercial a partir de 2012, uma série apenas interrompida pela pandemia da COVID-19, com défices comerciais registados em 2020 e 2021. Mantendo historicamente um saldo positivo, o setor do calçado desempenha um papel fundamental no reforço dos excedentes durante os períodos de prosperidade e na atenuação dos défices em tempos difíceis (Barnett, 2023).

A sua importância não se limita apenas à economia portuguesa. As empresas portuguesas também têm uma presença notável a nível mundial. De facto, Portugal é o único país da UE com uma balança comercial positiva no que diz respeito ao calçado e produtos afins. Além disso, o setor é um gerador crucial de emprego e de valor para o país. Contribui para 6,3% do emprego e 3,4% do valor acrescentado, como referido pela Associação Portuguesa dos Industriais de Calçado, Componentes, Artigos de Pele e seus Sucedâneos (APICCAPS, 2022).

4.2.3. Equipamento de Proteção Individual (EPI)

O Equipamento de Proteção Individual (EPI) refere-se a vestuário de proteção para os olhos, cabeça, ouvidos, mãos, sistema respiratório, corpo e pés. É utilizado para proteger os indivíduos contra os riscos de lesões e infeções, minimizando a exposição a perigos

químicos, biológicos e físicos. O EPI serve como linha final de defesa quando os controles administrativos e de engenharia são insuficientes para reduzir ou eliminar os riscos (European Commission, 2023).

O Regulamento (UE) 2016/425 do Parlamento Europeu e do Conselho, 9 de março, estabeleceu as condições e os requisitos para a comercialização de equipamentos de proteção individual na UE. Os principais objetivos são assegurar um elevado nível de proteção para os utilizadores e garantir a livre circulação de EPIs na UE (Parlamento Europeu e do Conselho da União Europeia, 2016).

Este regulamento harmoniza os termos para a comercialização dos EPIs, substituindo a anterior Diretiva 89/686/CEE. O seu âmbito abrange a conceção, o fabrico e a comercialização de equipamentos de proteção individual na UE. O mesmo estabelece os requisitos essenciais de saúde e segurança que os EPIs devem cumprir e o objetivo é garantir o mais elevado nível de proteção contra os riscos a que o EPI se destina (Parlamento Europeu e do Conselho da União Europeia, 2016).

Segundo o regulamento, o EPI é categorizado em três classes com base no risco (Parlamento Europeu e do Conselho da União Europeia, 2016):

- Categoria I: Riscos mínimos;
- Categoria II: Riscos diferentes dos enumerados nas categorias I e III;
- Categoria III: Riscos graves que podem causar danos irreversíveis ou morte.

Antes de serem colocados no mercado, os EPIs devem ser submetidos a um processo de avaliação da sua conformidade com os requisitos estipulados. A complexidade deste processo varia consoante a categoria do mesmo (Parlamento Europeu e do Conselho da União Europeia, 2016).

Os fabricantes têm de assegurar que o EPI cumpre os requisitos essenciais, efetuar avaliações de conformidade, manter a documentação técnica e utilizar a marcação CE (*Conformité Européenne*). Os importadores e distribuidores devem verificar a presença da marcação CE, garantir que o EPI é acompanhado pelas informações necessárias e manter um registo do equipamento não conforme e das recolhas (Parlamento Europeu e do Conselho da União Europeia, 2016).

Os EPIs que cumprem os requisitos terão aposta a marcação CE, assinalando a sua conformidade com o regulamento. Os Estados-Membros têm a tarefa de garantir que os

EPIs disponíveis no mercado cumprem o regulamento, podendo adotar medidas adequadas contra os produtos não conformes (Parlamento Europeu e do Conselho da União Europeia, 2016).

Para garantir que os produtos podem ser rastreados até ao fabricante, o regulamento exige a indicação do nome, nome comercial registado ou marca comercial e o endereço postal do fabricante no EPI ou na sua embalagem (Parlamento Europeu e do Conselho da União Europeia, 2016).

4.2.4. Calçado de Segurança

O calçado de segurança faz parte do equipamento de proteção individual destinado a proporcionar um certo nível de segurança aos pés contra os riscos decorrentes do exercício de qualquer atividade laboral (Grand Protection Int, 2022).

O calçado de segurança convencional pronto a usar é utilizado em muitos setores industriais, e em diferentes ambientes operacionais para garantir a segurança dos trabalhadores. O mercado do calçado de segurança vale atualmente mais de 5 mil milhões de dólares e continua a registar uma taxa de crescimento anual composta de 7,5%. Apesar de ser um mercado em crescimento, o calçado de segurança debate-se com dois problemas principais (Janson, Newman and Dhokia, 2019).

O primeiro problema é a falta de avanços técnicos e científicos significativos ou de digitalização desde a sua criação. O calçado de segurança típico é geralmente composto por uma sola intermédia reforçada, uma sola exterior antiderrapante, uma palmilha e uma biqueira de proteção com uma parte superior em tecido ou couro. Historicamente, foi acrescentado um forro de biqueira de aço às botas militares no final da Segunda Guerra Mundial (Janson, Newman and Dhokia, 2019).

O calçado de segurança moderno tem um aspeto mais semelhante ao de uma sapatilha, mas a conceção básica da biqueira mantém-se. Além disso, a gama de calçado para o crescente mercado feminino continua a ser escassa. A segunda questão é um problema generalizado e pouco documentado no que diz respeito ao conforto, à adaptação e ao estilo. Até à data, há uma escassez de provas neste domínio, sendo a maioria delas anedóticas (Janson, Newman and Dhokia, 2019).

O equipamento de proteção individual, incluindo a proteção dos pés e das pernas, deve ser utilizado sempre que os riscos não possam ser eliminados, evitados ou

suficientemente limitados por meios técnicos de proteção coletiva ou por procedimentos administrativos no âmbito da organização (Janson, Newman and Dhokia, 2019).

De acordo com a definição, o calçado de segurança, de proteção e de trabalho incorpora características de proteção para proteger o utilizador de lesões que possam resultar de acidentes. A diferença entre os vários tipos de calçado está relacionada com a presença de uma biqueira e com as suas propriedades de proteção avaliadas em testes laboratoriais. Cada categoria tem características específicas destinadas a utilizações específicas (Grand Protection Int, 2022).

Calçado de Segurança (Classe S)

A norma mais comumente aplicada ao calçado de segurança na UE é a EN ISO 20345. O calçado de segurança está equipado com biqueiras concebidas para garantir a proteção contra o impacto quando testado a um nível de energia de, pelo menos, 200 J e contra a compressão quando testado a uma carga de compressão de, pelo menos, 15 kN (Hrynyk, 2022).

Calçado de Proteção (Classe P)

A norma europeia aplicada ao calçado de proteção é a EN ISO 20346:2022. O calçado de segurança de proteção está equipado com biqueiras concebidas para garantir a proteção contra o impacto quando ensaiado a um nível de energia de, pelo menos, 100 J e contra a compressão quando ensaiado a uma carga de compressão de, pelo menos, 10 kN (Hrynyk, 2022).

Calçado de Trabalho (Classe O)

A norma europeia para o calçado de trabalho é a EN ISO 20347. O calçado de trabalho não inclui biqueiras concebidas para proteção contra a força de impacto e a carga de compressão. Estes tipos de calçado são concebidos para locais de trabalho e atividades em que não foram identificados riscos, como o impacto e a compressão, para os pés e dedos dos pés durante as avaliações de risco (Hrynyk, 2022).

É crucial escolher a categoria correta de calçado com base nos riscos e requisitos específicos de um determinado ambiente de trabalho.

Com o caso experimental, pretende-se aproveitar materiais residuais provenientes da indústria da energia eólica para servirem de componente a integrar na produção de calçado de segurança.

Capítulo 5

Caso Prático

Neste capítulo, serão detalhados os materiais aplicados, os equipamentos utilizados e o procedimento experimental adotado para a execução do caso prático.

5.1. Materiais e Procedimento Experimental

Com vista a atingir o principal objetivo desta dissertação, foi realizada uma visita à Enercon GmbH, uma empresa líder no setor da energia eólica em Portugal, localizada em Viana do Castelo. A mesma teve a amabilidade de fornecer diversos resíduos constituídos por fibra de vidro de diferentes gramagens e partículas com diferentes tamanhos, geometria e composição variada, provenientes da maquinaria mecânica das pás na fase de acabamento, sendo as mesmas compostas por fibra de vidro e resina epóxi.

O presente estudo tem como objetivo produzir biqueiras de proteção para calçado em fibra de vidro reaproveitando resíduos industriais, mantendo ao mesmo tempo as propriedades de resistência e durabilidade associadas à fibra de vidro convencional. A transformação de resíduos de fibra de vidro em biqueiras funcionais não apenas impulsiona a sustentabilidade, mas também promove a consciencialização sobre a importância da reutilização de materiais na indústria do calçado.

Utilizando as partículas fornecidas pela empresa, procedeu-se a uma análise granulométrica por peneiração a seco, conforme exibido na figura 18. Este método é utilizado para categorizar o material granular pela distribuição do tamanho das partículas determinada por uma dimensão máxima das partículas.



Figura 18 - Análise Granulométrica por Peneiração a Seco: Equipamento; Partículas peneiradas com tamanho 2,36 mm.

Primeiramente assegurou-se que a amostra estava seca. De seguida, determinou-se a gama de tamanhos de partículas da amostra e selecionaram-se os crivos adequados. Dispuseram-se as peneiras de cima para baixo, com a abertura maior em cima e a mais pequena em baixo, seguindo a seguinte ordem 2,36 mm, 1,18 mm, 850 μm , 600 μm , 300 μm , 150 μm , 75 μm e <75 μm . Um recipiente foi colocado no fundo para recolher as partículas mais finas e posteriormente colocou-se uma quantidade de amostra no crivo superior. Determinou-se que o ciclo de agitação das peneiras deveria ocorrer durante 15 minutos, com um intervalo de tempo de 10 segundos, garantindo assim que o tempo era suficiente para que todas as partículas tivessem a hipótese de passar pelas aberturas dos crivos até serem retidas pelo seu tamanho no respetivo crivo. Na figura 19 observa-se um dos tamanhos de partículas, no caso <75 μm .



Figura 19 - Partículas fornecido pela Enercon GmbH, após separação por peneiração a seco.

Após a separação por tamanho, pesou-se a quantidade de material retido em cada peneira separadamente. Determinou-se a percentagem do peso total da amostra, a fração que cada peneira apresentava e construiu-se um gráfico com a distribuição do tamanho das partículas. O gráfico de distribuição granulométrica, representado na figura 20, é frequentemente usado para representar estes dados, onde o tamanho da partícula é indicado no eixo x e a percentagem acumulada no eixo y. Este gráfico mostra a distribuição do tamanho das partículas e a natureza granulométrica do material.

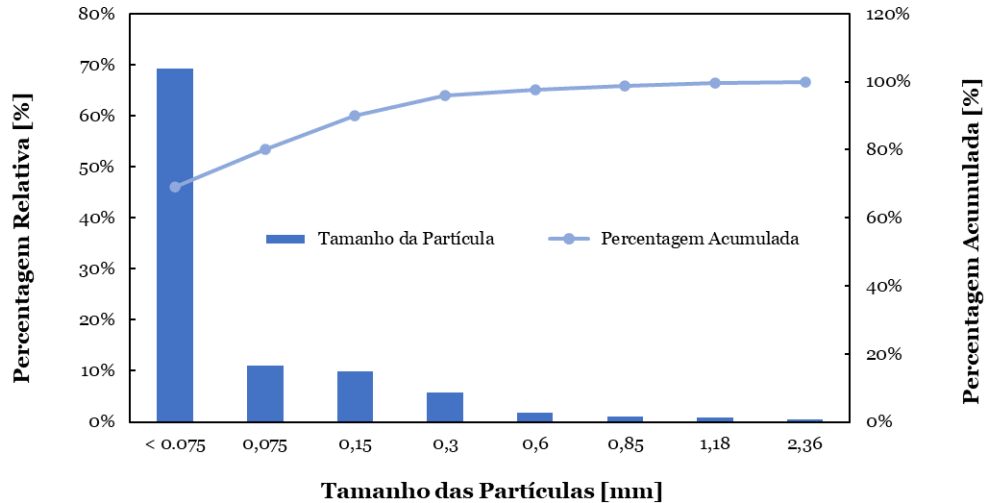


Figura 20 - Gráfico de distribuição granulométrica dos resíduos industriais de fibra de vidro e resina epóxi.

De forma a obter-se uma visualização aprimorada e uma caracterização detalhada das partículas, recorreu-se à microscopia eletrónica de varrimento (SEM), utilizando o modelo S-3400N da *Hitachi*. É de destacar que as amostras foram revestidas com ouro, sendo esta, uma medida necessária devido à baixa condutividade das partículas em estudo. Este processo de revestimento foi realizado com o equipamento Q150R ES da *Quorum*. Por exemplo, selecionadas as partículas com tamanho <75 μm , a figura 21 fornece uma visão geral do tipo de partículas em estudo.

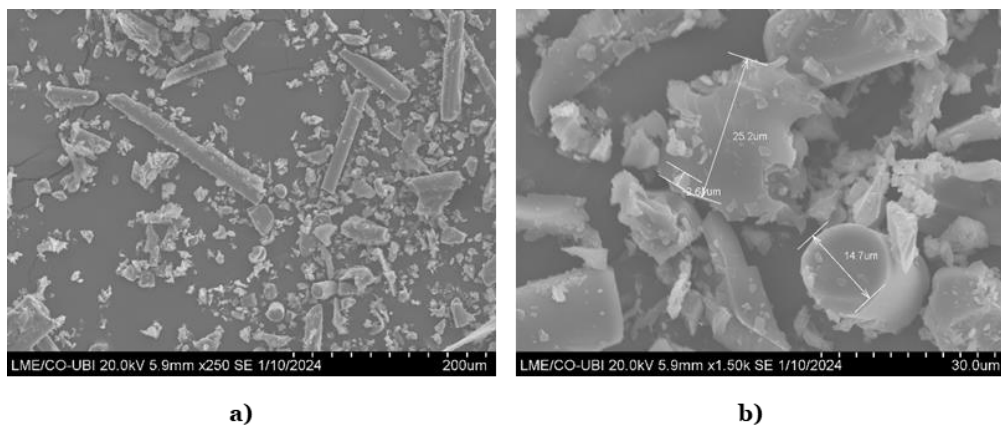


Figura 21 – (a) Visão geral da geometria das partículas e uma comparação em termos de tamanho; (b) Dimensão das partículas.

Na figura 21 a), observa-se que estas apresentam uma dispersão geométrica e de tamanho muito variada, comprovada pela figura 21 b), onde é possível observar dimensões que vão dos 2,6 μm aos 25,2 μm .

Em termos de processo de fabrico e após pesagem, inicialmente foram produzidas sete matrizes: uma de controlo para comparação das propriedades mecânicas, tendo sido fabricada manualmente com resina epóxi SR 8100 combinada com o endurecedor SD 8824, ambos fornecidos pela empresa Sicomin. Na tabela 4 são apresentadas as principais propriedades mecânicas e físicas da matriz.

Tabela 4 - Principais propriedades mecânicas e físicas da resina epóxi (Santos *et al.*, 2020).

Propriedades		Resina SR 8100 / Endurecedor SD 8824
Cor		Líquido amarelo-claro
Viscosidade (@ 25 °C)	[mPa·s]	285 ± 60
Densidade a 20 °C	[g/cm ³]	-
Módulo de elasticidade	[N/mm ²]	2970
Resistência máxima	[N/mm ²]	108
Alongamento à carga máxima	[%]	4.9
Alongamento na rutura	[%]	11.8
Resistência ao ensaio de impacto Charpy	[kJ/m ²]	52
Transição vítrea / DCC	[°C]	63
Absorção de água 48 h/70 °C	[%]	1.2

As restantes, três matrizes foram fabricadas com tamanhos de partículas diferentes, <0,075 mm, 0,075 mm e 0,150 mm, todas com a mesma percentagem em peso, ou seja 1 % e outras três matrizes com tamanhos de partículas diferentes, <0,075 mm, 0,075 mm e 0,150 mm, todas com a mesma percentagem em peso, neste caso 2 %. A percentagem em peso refere-se à quantidade de peso de um componente em relação ao peso total da mistura.

Nesta fase inicial do trabalho prático, foram selecionadas as partículas com dimensões menores, devido à quantidade disponível, como é possível observar no gráfico da figura 20 e como referenciado na literatura, partículas de dimensão menor, quando adicionadas à resina epóxi, são preferíveis para melhorar as suas propriedades mecânicas, do que partículas de dimensão maior (Megahed *et al.*, 2021).

De acordo com as diretrizes estabelecidas e para as amostras com 1 % em peso de partículas, para cada 100 gramas de resina foram misturadas 1,22 gramas de partículas. A dispersão na resina foi efetuada utilizando, simultaneamente, um misturador de alta velocidade de 1000 rpm e sonicação, utilizando um banho de ultrassons com uma frequência de 40 kHz, durante 3 horas à temperatura ambiente. Após 3 horas de agitação sob um banho ultrassónico, adicionou-se 22% do peso da resina de endurecedor, ou seja,

22 gramas (Sicomin, 2019). Tendo em linha de conta que, variáveis como o tempo de agitação, velocidade de agitação, o uso ou não de sonicação, influenciam diretamente as propriedades mecânicas finais do compósito, foi aplicado um método anteriormente utilizado em outros estudos e que se mostrou promissor (Santos, Maceiras and Reis, 2021).

Este procedimento prosseguiu com mais 10 minutos, a uma velocidade de rotação de apenas 200 rpm, para misturar o endurecedor no sistema. A baixa velocidade de rotação teve como objetivo minimizar a formação de bolhas de ar e promover apenas uma mistura homogênea do endurecedor no sistema. Após a obtenção de uma mistura com aparência uniforme, a mesma foi submetida a um processo de degaseificação numa panela de vácuo por 10 minutos a uma pressão negativa de $0,9 \pm 0,1$ bar. Por fim, a mistura foi vertida num molde de cartão com dimensões de $200 \times 120 \times 3$ mm³, previamente fabricado e protegido por um plástico técnico para o efeito. Por fim, todas as matrizes produzidas foram curadas à temperatura ambiente durante 24 horas e submetidas a uma pós-cura numa estufa a 40°C durante 24 horas (Sicomin, 2019).

Após a cura das matrizes, procedeu-se ao corte das mesmas utilizando a máquina de corte *Struers Accutom 2*. Foi utilizado um disco diamantado com refrigeração a água para prevenir o aquecimento do compósito, considerando a velocidade de corte. As dimensões destes provetes foram estabelecidas de acordo com a norma BS EN ISO 178:2019, que descreve um procedimento para avaliar as propriedades de flexão de um material termoendurecido (BSI, 2003).

A norma determina que o *span*, referido como a distância entre apoios (L), deve respeitar $L = (16 \pm 1) \times t$, com t a representar a espessura média do respetivo material (BSI, 2003).

Para normalizar o valor médio da espessura dos corpos de prova, foi considerada uma espessura constante com um valor de $2,76 \pm 0,5$ mm. Deste modo, a distância entre apoios considerada foi de 50 mm.

Os ensaios estáticos de flexão de três pontos foram realizados à temperatura ambiente, utilizando corpos de prova de $80 \times 10 \times 2,76$ mm³, cortados das amostras produzidas, conforme exibido na figura 22. Para cada condição, pelo menos cinco amostras foram testadas, com uma taxa de deslocamento de 2 mm/min.

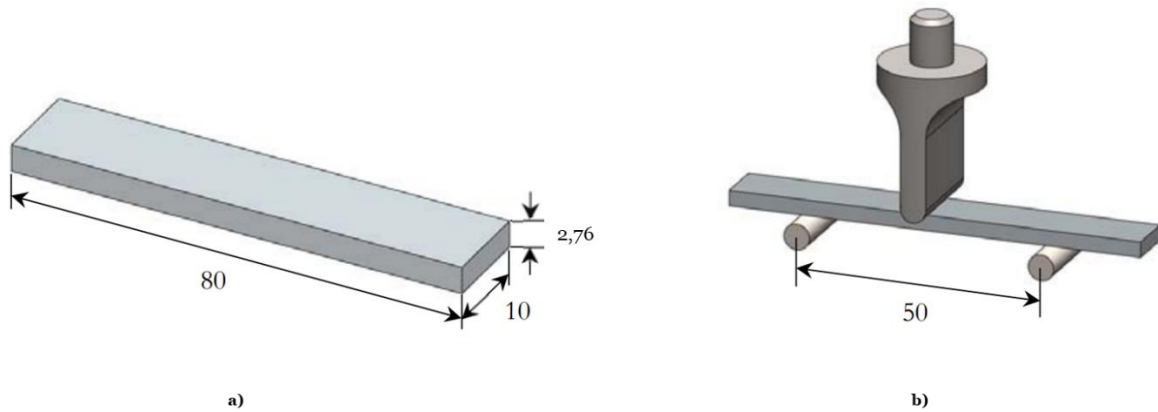


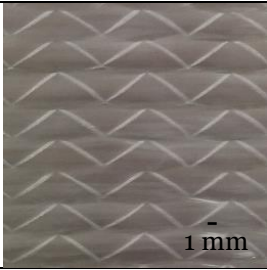
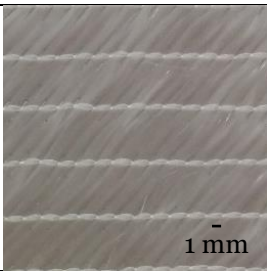
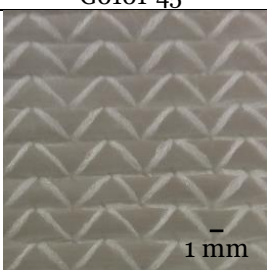
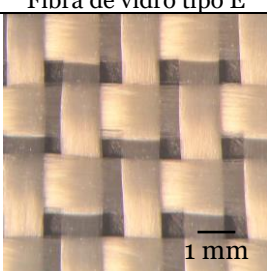
Figura 22 - Ensaio de flexão em três pontos: (a) Geometria dos provetes; (b) Vista esquemática da montagem do ensaio. Todas as dimensões em mm.

O processo de produção dos laminados começou pela seleção das fibras de vidro, fornecidas pela Enercon GmbH e uma fibra de vidro tipo E, utilizada no fabrico das biqueiras. As propriedades associadas a estes materiais podem ser consultadas na tabela 5. A escolha da fibra influencia diretamente as propriedades mecânicas do compósito final de acordo com as exigências específicas da aplicação, otimizando o desempenho do compósito para atender aos requisitos mecânicos desejados.

No fabrico dos laminados em fibra de vidro, foi aplicado o método de moldação manual, sendo o laminado de controlo o primeiro a ser produzido. A resina epóxi SR 8100 foi misturada com o endurecedor SD 8824, seguindo proporções exatas e descritas anteriormente. Esta etapa é crucial, pois a proporção e a homogeneidade influenciam diretamente na qualidade e propriedades do laminado final.

Preparado o laminado, sobre o desmoldante aplicou-se uma camada de resina epóxi. Em seguida, posicionou-se a primeira camada de fibra de vidro do tipo E. A fibra foi então impregnada com mais resina, controlando sempre a quantidade de resina entre camadas, $15 \pm 5,0$ ml. Esta sequência — aplicação da resina, colocação da fibra, impregnação — foi repetida 4 vezes (uma camada de fibra tipo E, duas camadas de fibra de maior densidade e uma camada de fibra tipo E) até se alcançar a espessura desejada para o laminado. Foi estabelecida esta sequência de forma a reproduzir o laminado de uma biqueira de proteção tida como referência. Um dos desafios durante este processo foi garantir a eliminação de bolhas de ar e uma perfeita consolidação entre as camadas de fibra e de resina. Uma tira de tecido de feltro foi colocada ao redor do laminado para criar um canal de circulação de ar, ajudando na absorção do excesso de matriz durante a aplicação de vácuo, como exemplificado na figura 23 a).

Tabela 5 - Tipologia dos Tecidos de Fibra de Vidro (Adaptado de Enercon GmbH).

Tipo de Fibra	Propriedades	Unidades	Valores
HMR 1188			
	Peso Densidade Resistência a tração Modulo a tração Alongamento Coeficiente de Poisson Espessura Fio/cm (Teia - Trama) Malha	[g/m ²] [g/cm ³] [MPa] [GPa] [%] - [mm]	1188 0,90 Unidirecional
G0101			
	Peso Densidade Resistência a tração Modulo a tração Alongamento Coeficiente de Poisson Espessura Fio/cm (Teia - Trama) Malha	[g/m ²] [g/cm ³] [MPa] [GPa] [%] - [mm]	1188 2.54 a 2.60 3450 a 3790 72.4 4.8 0.2 0.9 Biaxial
G0101-45°			
	Peso Densidade Resistência a tração Modulo a tração Alongamento Coeficiente de Poisson Espessura Fio/cm (Teia - Trama) Malha	[g/m ²] [g/cm ³] [MPa] [GPa] [%] - [mm]	1114 2.54 a 2.60 3450 a 3790 72.4 4.8 0.2 0.84 Triaxial
Fibra de vidro tipo E			
	Peso Densidade Resistência a tração Modulo a tração Alongamento Coeficiente de Poisson Espessura Fio/cm (Teia - Trama) Malha	[g/m ²] [g/cm ³] [MPa] [GPa] [%] - [mm]	1,95 2,54 2500 74 4,8 0,3 0,17 8 - 6 Tafetá

Depois de colocada a última camada de desmoldante, o conjunto foi acondicionado num saco termosselado e submetido a vácuo durante 24 horas à temperatura ambiente. Durante este período, o laminado foi submetido a uma pressão aproximada de 2,5 kN numa prensa hidráulica, por forma a uniformizar a espessura e a distribuição da matriz, como ilustrado na figura 23 b). De seguida, foi colocado por mais 24 horas numa estufa a 40°C.

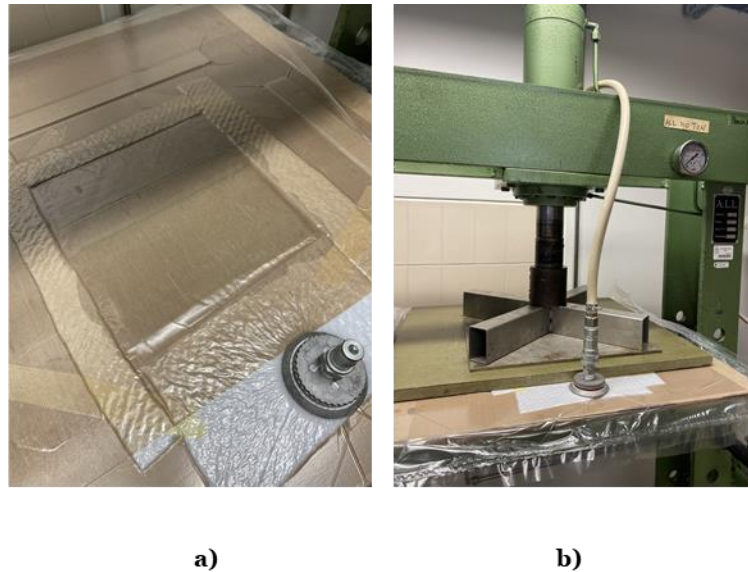


Figura 23 – (a) Laminado no interior do saco, em vácuo; (b) E sujeito a pressão, na prensa hidráulica.

Posteriormente, foram produzidos os laminados aditivados, ou seja, à solução de resina com o endurecedor foi adicionada uma quantidade de partículas de tamanho $<0,075$ mm. A sequência — aplicação da resina, colocação da fibra, impregnação — foi novamente repetida quatro vezes. Em seguida, os laminados foram cortados e testados utilizando o mesmo equipamento empregue nas matrizes.

As amostras utilizadas neste estudo foram cortadas das placas previamente produzidas com dimensões $60 \times 10 \times 2,1$ mm. Quanto aos ensaios de flexão em três pontos, foram realizados à temperatura ambiente, com uma taxa de deslocamento de 2 mm/min e, para cada condição, pelo menos cinco amostras foram testadas de acordo com a norma europeia EN ISO 178:2019. A distância entre apoios utilizado para todas as configurações foi 35 mm.

Relativamente aos ensaios da resistência ao cisalhamento interlaminar (ILSS), o método de cisalhamento de feixe curto é o mais simples e o mais amplamente aplicado. Os ensaios de cisalhamento interlaminar foram realizados de acordo com a norma ASTM D2344/D2344M-22, com uma velocidade de 1 mm/min. Neste estudo, pelo menos cinco amostras de compósitos com formato retangular e tamanho padrão foram consideradas válidas, ou seja, comprimento de 12 mm, largura (w) e altura (h) de aproximadamente 4 mm e 2 mm, respetivamente, e distância entre os suportes nos corpos de prova de 10 mm, tudo em função da altura (h) do laminado. A figura 24 mostra a vista esquemática dos ensaios e as respetivas dimensões das amostras utilizadas nos ensaios experimentais. Neste método, o provete é colocado entre dois suportes e é aplicada uma carga no centro

por um terceiro ponto, fazendo com que as camadas deslizem umas em relação às outras, até ocorrer a falha.

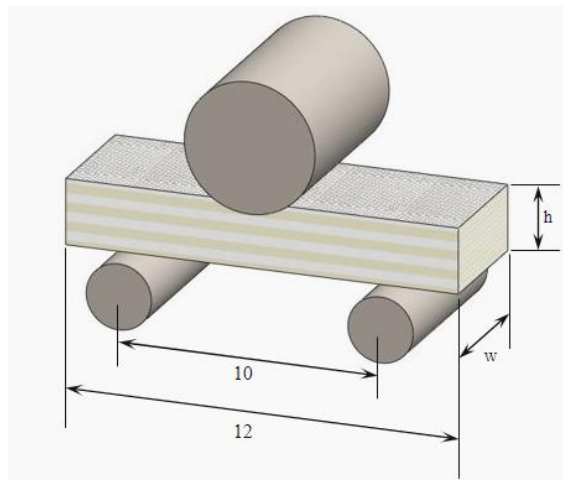


Figura 24 - Teste de resistência ao cisalhamento interlaminar.

O modo de falha que foi procurado foi uma falha de cisalhamento entre as camadas do laminado. A carga máxima na qual a falha ocorre foi registrada e, usando as dimensões do provete, a resistência ao cisalhamento interlaminar foi calculada.

A resistência ao cisalhamento interlaminar é uma propriedade mecânica crítica dos materiais compósitos, que mede a resistência do material às forças de cisalhamento interlaminares. É um parâmetro importante que caracteriza a resistência de ligação entre camadas adjacentes de fibras e a matriz polimérica num laminado compósito. Se o valor for baixo, pode indicar uma ligação deficiente entre camadas ou outros problemas com o processo de fabricação do compósito. É de notar que a resistência ao cisalhamento interlaminar é um parâmetro crítico para o caso prático, já que as biqueiras irão ser sujeitas a cargas elevadas, existindo preocupações quanto ao potencial de delaminação em condições de serviço.

Após otimização das configurações que proporcionam os melhores resultados estáticos, como o tamanho da partícula (<0,075 mm), a quantidade de partículas em peso (1%) e o tipo de fibra (G0101), procedeu-se à produção das biqueiras.

5.2. Equipamentos

Seguindo as recomendações da norma europeia EN ISO 178:2019, os ensaios estáticos de flexão em três pontos foram realizados à temperatura ambiente e com um comprimento entre apoios de 50 mm para as matrizes e 35 mm para os laminados, como

mencionado anteriormente. Foi utilizada uma máquina de ensaios universal *Autograph* AGS-X, da *Shimadzu*, equipada com uma célula de carga de 10 kN e os dados foram registados utilizando o *software Trapezium X*, versão 1.4.0, conforme ilustrado na figura 25.

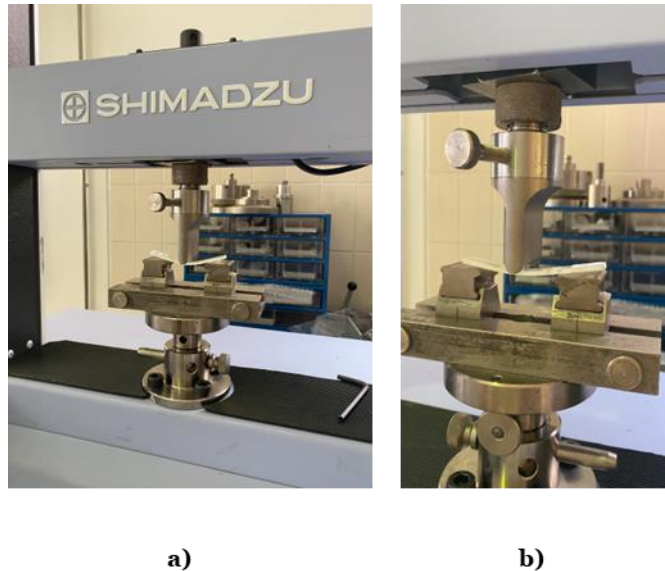


Figura 25 - a) Equipamento de teste universal da marca *Shimadzu*, modelo AGS-X; b) Aparatos para ensaio de flexão em 3 pontos estático.

A tensão de flexão foi obtida a partir da tensão nominal na secção central entre apoios, pela equação 1:

$$\sigma = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (1)$$

em que P é a carga, L a distância entre apoios, b a largura e h a espessura da amostra. O módulo de rigidez foi determinado a partir da relação da teoria de vigas de flexão elástica linear, de acordo com a equação 2:

$$E = \frac{\Delta P \cdot L^3}{48 \cdot \Delta u \cdot I} \quad (2)$$

em que I , ΔP e Δu são, respetivamente, 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. Finalmente, a deformação de flexão foi calculada de acordo com a equação 3:

$$\varepsilon_f = \frac{6 \cdot S \cdot h}{L^2} \quad (3)$$

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

Os ensaios de cisalhamento interlaminar foram efetuados de acordo com a norma ISO 20346:2022, utilizando o mesmo equipamento (*Shimadzu Autograph AGS-X*) com uma velocidade de cruzamento de 1 mm/min. O valor da resistência ao cisalhamento interlaminar foi obtido pela equação 4:

$$\tau_s = \frac{3 P_C}{4 w \cdot h} \quad (4)$$

em que P_C é a carga máxima e w e h são, respetivamente, a largura e a espessura da viga. Para cada condição, foram ensaiadas cinco amostras à temperatura ambiente, utilizando o mesmo equipamento dos ensaios estáticos.

No que diz respeito à caracterização mecânica das biqueiras, os ensaios de impacto de baixa velocidade foram realizados com uma máquina de impacto IMATEK, modelo IM10. O seu funcionamento baseia-se essencialmente na queda livre de um peso e está equipado com um sistema de aquisição de dados derivado de uma célula de carga piezoelétrica, capaz de recolher até 32000 pontos, estrategicamente posicionada na raiz do pêndulo.

Essencialmente, o equipamento é composto por uma torre com duas colunas-guia, ao longo das quais se desloca, com o auxílio de rolamentos, um carrinho que suporta o pêndulo. O mesmo pode ser elevado a uma altura específica e depois lançado verticalmente com atrito mínimo ao longo das colunas de guia. A massa total do conjunto pode ser ajustada através da adição de pesos ao carrinho, atingindo um máximo de 30 kg. Além disso, a máquina está equipada com um mecanismo de prevenção de impacto secundário.

A gravidade fornece toda a energia de impacto e a sua magnitude é controlada através da regulação da altura de queda, com um limite máximo de 2,5 metros. A velocidade no início do contacto é medida através de um sensor eletrónico, enquanto a força é determinada por uma célula de carga.

Integrando a curva de carga duas vezes ao longo do tempo, obtém-se a variação da deformação com a carga aplicada através da equação 5:

$$F(t) = m \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (5)$$

onde $F(t)$ é a força lida pela célula de carga, m é a massa do impactor e d^2x / dt^2 é a aceleração. Com base nesta equação, a velocidade pode ser calculada através da equação 6:

$$V(t) = -\frac{1}{m} \int F(t)dt + C_0 \quad (6)$$

onde $V(t)$ é a velocidade da célula de carga e C_0 é a constante de integração e V_0 é a velocidade inicial, isto é, as condições iniciais de fronteira, onde $C_0 = V_0$, para $t = 0$. Através da equação 6 pode-se finalmente calcular a deflexão, utilizando a equação 7:

$$X(t) = \left(-\frac{1}{m} \iint F(t)dt dt \right) + V_0 t \quad (7)$$

onde $X(t)$ é a deflexão em função do tempo. Estas equações são executadas automaticamente pelo *software Impact Version 1.3*, que armazena igualmente dados como a aceleração, o deslocamento, a energia, a força, o tempo e a velocidade (Santos, 2010).

Nos ensaios de compressão das biqueiras, foi seguida também a norma ISO 20346:2022. Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente, numa máquina de ensaios universal *Shimadzu*, modelo *Autograph AG-IC*, com uma célula de carga de 50 kN. O método de ensaio consiste na compressão do corpo de prova até uma carga de $10 \pm 0,1$ kN para biqueiras a serem utilizadas na classe de calçados de proteção, movimentando uma placa superior a uma velocidade de 5 ± 2 mm/min.

5.3. Obtenção do molde da biqueira em 3D

O *Artec Space Spider* é um *scanner* 3D de alta resolução baseado na tecnologia de luz azul. É ideal para captar pequenos objetos ou detalhes complexos de grandes objetos industriais em alta resolução, com precisão constante e cores brilhantes. A capacidade do *scanner* para representar geometrias complexas, arestas vivas e nervuras finas distinguem a sua tecnologia. É um *scanner* 3D industrial ideal para a captura de alta resolução de objetos como peças de moldagem, seguida da exportação do modelo 3D final para o *software* CAD (ARTEC 3D, 2023).

O *Artec Studio* foi o *software* utilizado para a digitalização em 3D e processamento dos dados da biqueira. Foi desenvolvido pela *Artec Group*, uma empresa conhecida pela sua gama de *scanners* 3D portáteis de nível profissional. Possui visão humana com cores,

facilitando a deteção de texturas, além de contar com ultrassons e infravermelhos que proporcionam uma resolução de 0,1 mm (100 μ m).

Antes da utilização do *software* foi retirada a biqueira do material compósito de uma bota de segurança, onde em primeiro lugar se identificou a área onde a biqueira estava localizada e de seguida removeu-se qualquer revestimento externo com cuidado, utilizando um x-ato. Por fim, localizaram-se os fixadores que prendem a biqueira à bota e desapertaram-se os mesmos, tomando cuidado para não danificar a biqueira. A mesma foi extraída na perfeição conforme se pode observar na figura 26.



Figura 26 - Fotografia com a imagem da biqueira a partir da qual se desenvolveu todo o trabalho.

Foram realizadas várias capturas e após este processo procedeu-se com os alinhamentos das mesmas. Inicialmente, exportou-se um STL (*Stereolithography*), como representado na figura 27 e de seguida passou-se para o Autodesk Fusion 360, sendo este uma ferramenta de CAD 3D, CAM e CAE baseada numa nuvem de pontos para *design* e engenharia de produtos.

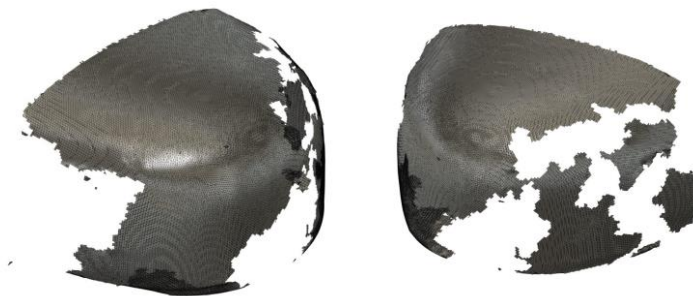


Figura 27 - STL da biqueira com ruído.

Após a importação do ficheiro, desenhou-se sobre a forma. Inicialmente desenhou-se a Vista de Cima, a qual se apresenta na figura 28.

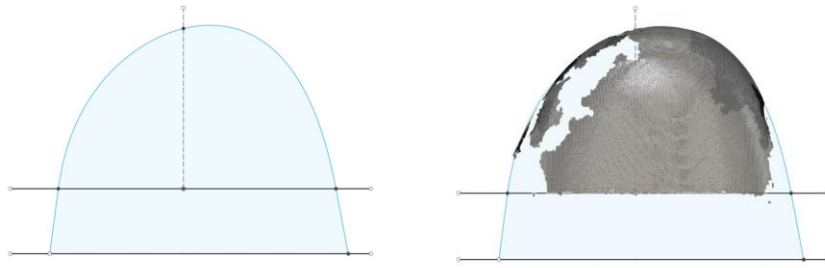


Figura 28 - Vista de Cima da biqueira.

De seguida, desenhou-se a Vista de Frente, conforme ilustrado na figura 29.

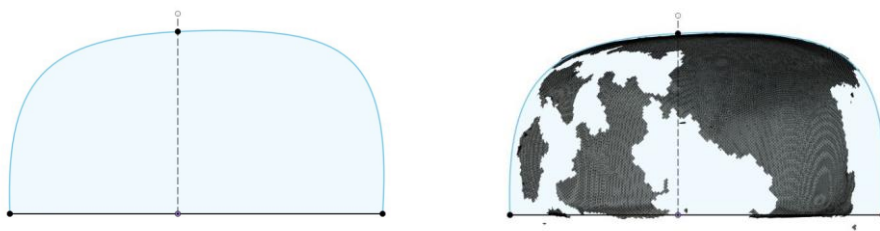


Figura 29 - Vista de Frente da biqueira.

E por fim, desenhou-se a Vista Lateral, como é possível observar na figura 30.

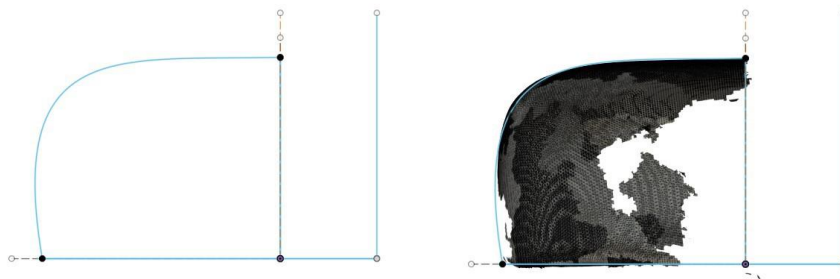


Figura 30 - Vista Lateral da biqueira.

Após o desenho das vistas, apresenta-se na figura 31 o resultado da utilização da ferramenta *Loft*, que permite criar uma forma de transição de dois ou mais desenhos planares. Foi utilizada a Vista de Cima, a Vista de Frente e a Vista Lateral que serviram de *rail* (guia) para se proceder ao *Loft*.

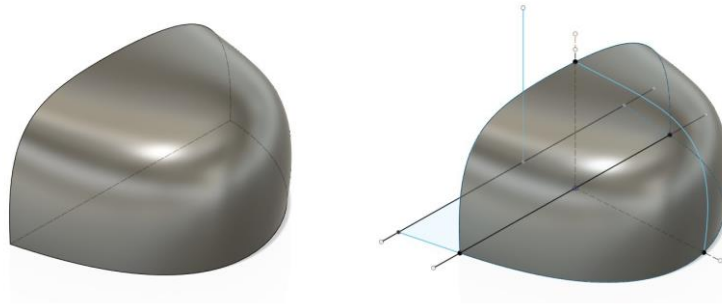


Figura 31 - *Loft* da biqueira.

De seguida, conforme ilustrado na figura 32, elaborou-se um *Shell*, no qual se removeu material da parte interior criando uma cavidade oca com paredes de uma espessura específica de 2 mm. Seguidamente, deslocou-se o *Shell*, de forma a permitir a ponta da biqueira mais grossa (6 mm).

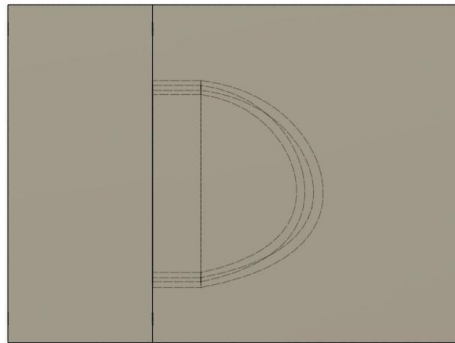


Figura 32 - Vista de Cima com espessura variável visível da biqueira.

O resultado pode ser observado com mais detalhe na figura 33.



Figura 33 - Biqueira com espessura variável visível da biqueira.

Após a construção do objeto, foi necessário fabricar o molde. Desenhou-se um paralelepípedo e dentro do mesmo procedeu-se à utilização da ferramenta *Boundary Fill*, que permite preencher os objetos com volumes usando os limites selecionados. De

seguida, desenharam-se 4 furos que serviram para alinhar e apertar o macho e a fêmea. Nas figuras 34, 35, 36 e 37 apresentam-se os pormenores do molde final da biqueira.



Figura 34 - Macho e Fêmea da biqueira.



Figura 35 - *Render* do Macho e da Fêmea da biqueira.

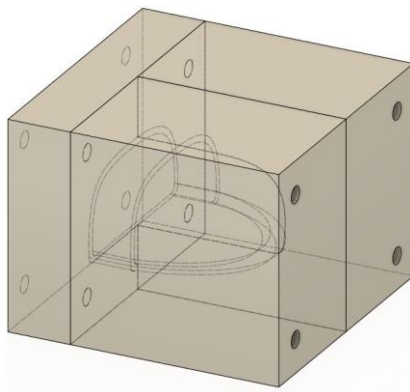


Figura 36 - Captura da Perspetiva Isométrica da biqueira.

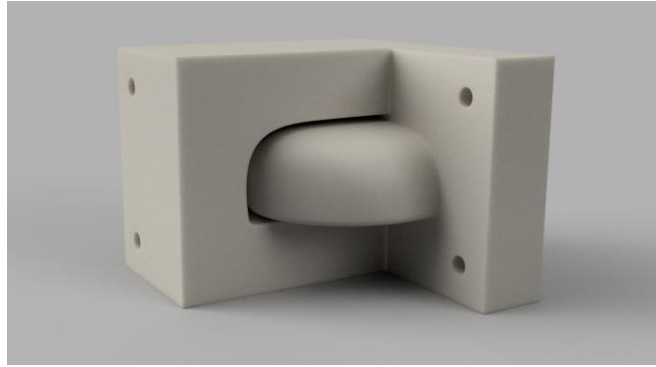


Figura 37 - *Render* da biqueira.

5.4. Obtenção do 1º molde da biqueira

Na fabricação do primeiro molde da biqueira foram utilizadas placas de fibra de média densidade (MDF) hidrófugo. Este material passou por um processo cuidadoso de forma a assegurar a precisão e qualidade do produto final. Inicialmente, um cubo com as dimensões $150 \times 150 \times 100 \text{ mm}^3$ de MDF hidrófugo, foi previamente preparado e seco. Posteriormente foi fixado na mesa de um *router* de três eixos de comando numérico computadorizado (CNC), da marca *Pronum*. A programação CNC foi realizada por meio de um *software* específico, detalhando trajetórias de corte, velocidades e profundidades conforme o projeto do molde.



Figura 38 - Maquinação do molde.

O processo de maquinação iniciou-se com a remoção de material em excesso por meio de uma fresa apropriada, esculpindo a forma básica do molde. Posteriormente, as ferramentas de corte mais finas entraram em ação para uma maquinação mais detalhada, reproduzindo com precisão as características do molde. De seguida, foi

realizado um acabamento superficial para suavizar as superfícies, de modo a assegurar uma textura uniforme e isenta de imperfeições.

Finalmente, foi realizada uma inspeção minuciosa para assegurar que o molde cumpria os padrões de qualidade estipulados. É importante salientar que os detalhes do procedimento podiam variar conforme o tipo de máquina CNC, o *design* do molde e as características do MDF hidrófugo utilizado.

Após a maquinação do molde, procedeu-se à produção da biqueira. Aplicou-se o desmoldante *Release Agent Mikon W-64+* fornecido pela *Munch Chemie International*, a fim de garantir uma extração eficiente do molde e facilitar o processo de produção da biqueira, como apresentado na figura 39. Este procedimento contribuiu não apenas para tornar a remoção do molde mais eficiente, mas também para auxiliar na preservação dos detalhes e na integridade da biqueira durante o processo de produção.



Figura 39 - Molde do Macho e da Fêmea da Biqueira em MDF hidrófugo.

Após a cuidadosa preparação do molde, a produção da biqueira avançou para a fase de preparação do material. Nesta etapa, preparou-se a fibra de vidro de acordo com as especificações do produto. Com o molde devidamente limpo, aplicou-se uma camada de fibra de vidro tipo E ($1,95 \text{ g/m}^2$), duas camadas de fibra de vidro G0101 (1188 g/m^2) e uma camada de fibra de vidro tipo E, de modo a replicar o modelo original, juntamente com as quantidades de resina pré-determinadas para preencher todas as cavidades e detalhes do molde tridimensional, como ilustrado na figura 40.

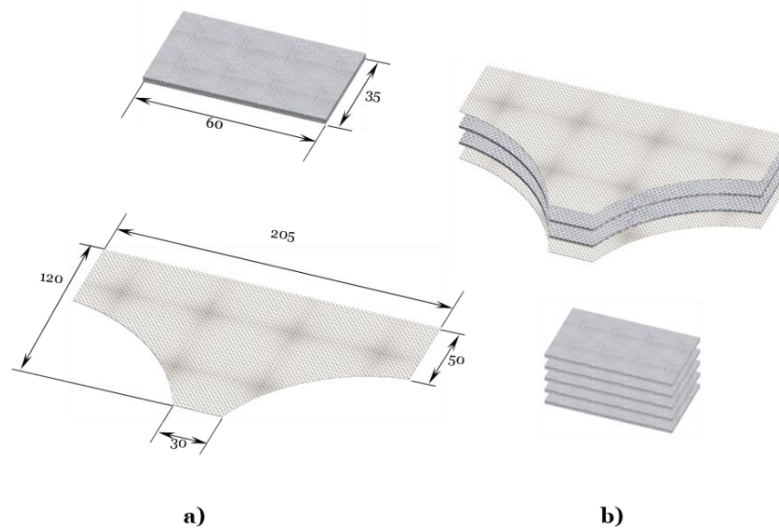


Figura 40 - Preparação das diferentes fibras de vidro utilizadas como reforço: a) Principais dimensões das duas partes (dimensões em mm); b) Representação do empilhamento alternado no caso do laminado e das cinco camadas aplicadas no reforço da biqueira.

Posteriormente, o material passou por um estágio de cura, permitindo que a fibra de vidro adquirisse a sua forma final e as propriedades físicas desejadas, como representado na figura 41.

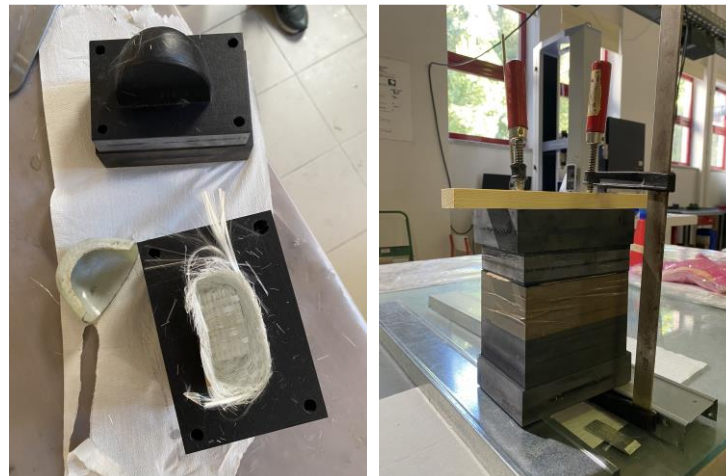


Figura 41 - Preparação da fibra de vidro (esquerda) e Molde no estágio de cura (direita).

No entanto, verificou-se que o molde não desenformava adequadamente após o processo de cura da resina, resultando frequentemente numa aderência significativa entre o material e as superfícies do molde, como ilustrado na figura 42. Esta aderência tornava a remoção subsequente da biqueira uma tarefa desafiadora, comprometendo a integridade do molde.

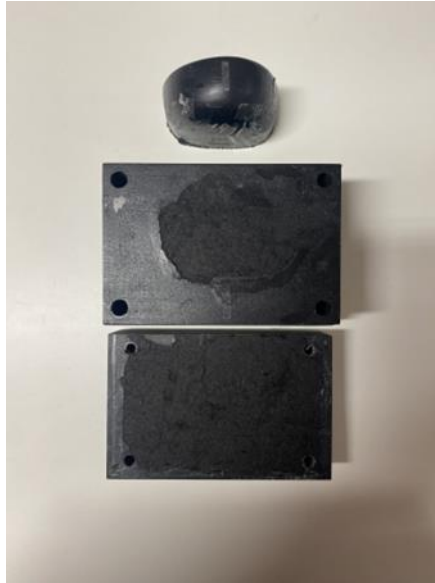


Figura 42 - Estado do molde após desenformação da biqueira.

Apesar da eficácia do desmoldante na fase inicial, a incapacidade de desenformar adequadamente apresentou-se como um desafio substancial. Isto levou à identificação de um problema fundamental associado ao processo de cura, que frequentemente resultava numa união muito forte entre a fibra de vidro e as superfícies do molde. Posteriormente, a biqueira foi desenformada com auxílio de ferramentas.

5.5. Obtenção do molde da biqueira

Para criar o molde para a fabricação das biqueiras, recorreu-se ao processo de manufatura aditiva (MA) ou impressão 3D, dado a sua versatilidade, disponibilidade de diferentes materiais utilizados como matéria-prima e facilidade de acesso a esta tecnologia. O processo envolveu várias etapas, começando com o desenho e terminando com a impressão final. A primeira fase foi a criação do modelo utilizando um *software* de desenho assistido por computador (CAD) do molde da biqueira, onde foram tidas em consideração as dimensões, as folgas e especificações precisas. O desenho teve em consideração as propriedades do material e as limitações do processo de impressão 3D.

Neste caso, o molde da biqueira foi dividido em cinco partes para um melhor desenvolvimento da produção das biqueiras, como representado na figura 43. As partes a azul, vermelho e laranja foram impressas em politereftalato de etileno glicol (PETG). As restantes partes, verde e amarelo, foram impressas em poliuretano termoplástico (TPU) com uma dureza *shore* de 95A.



Figura 43 - Representação do molde da biqueira impresso na impressora 3D.

Uma vez concluído o modelo CAD, este foi convertido num ficheiro STL, basicamente decompondo o modelo 3D num formato que a impressora 3D possa interpretar.

Antes da impressão, o ficheiro STL foi processado por um *software* de corte. Este *software* divide o modelo 3D em camadas finas e horizontais e gera um caminho para o bocal da impressora 3D puder seguir. Também permite calcular a quantidade de material necessário para cada camada e a forma como as camadas serão unidas.

A impressora 3D foi então preparada para a impressão. Isto incluiu o carregamento do material de impressão, a calibração da mesa de impressão e a garantia de que todas as peças móveis estavam a funcionar corretamente. A impressora utilizada para a produção do molde foi a *Artillery Sidewinder X1*, como ilustrado na figura 44.



Figura 44 - Impressora *Artillery Sidewinder X1*.

A impressora começou a imprimir as várias partes do molde da biqueira camada a camada. O *nozzle* utilizado foi de 0,6 mm, que extrudiu o material de impressão, que é normalmente aquecido até um estado semilíquido. O polímero solidificou rapidamente à medida que foi sendo depositado, formando uma camada sólida. O processo foi repetido, camada a camada, até que todas as partes do molde da biqueira estivessem formadas, como apresentado na figura 45.

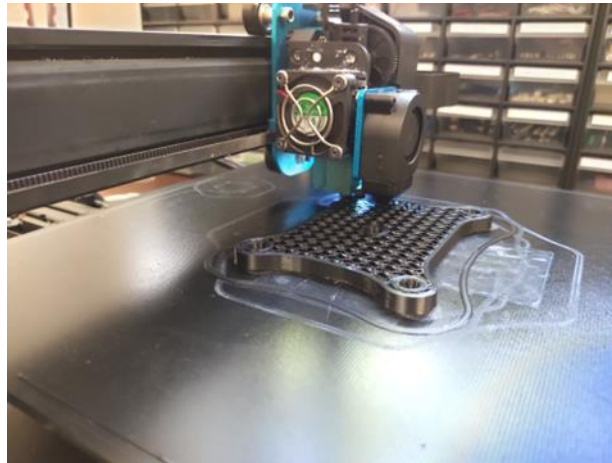


Figura 45 - Processo de produção do molde da biqueira na impressora 3D.

Após a impressão, o molde necessitou de um pós-processamento. Isto incluiu a limpeza do material de suporte utilizado durante a impressão, o alisamento das superfícies e processo de cura. Apresenta-se o molde final na figura 46.



Figura 46 - Molde da biqueira após impressão.

O último passo consistiu em verificar se o molde da biqueira impressa apresentava defeitos e se cumpria as especificações exigidas. Este processo permitiu uma elevada personalização e precisão no fabrico do molde, tornando a impressão 3D uma escolha muito procurada para a criação de protótipos e mesmo para a produção em várias indústrias.

5.6. Produção das biqueiras

Após a fabricação do molde procedeu-se à produção das biqueiras. O processo foi exatamente o mesmo, já explicado no subcapítulo 5.4. Aplicou-se o desmoldante e posteriormente aplicou-se uma camada de fibra de vidro tipo E, duas camadas de fibra de vidro G0101 e uma camada de fibra de vidro tipo E, juntamente com as quantidades de resina para preencher todas as cavidades e detalhes do molde tridimensional. Posteriormente, o material passou por um estágio de cura, como representado na figura 47.

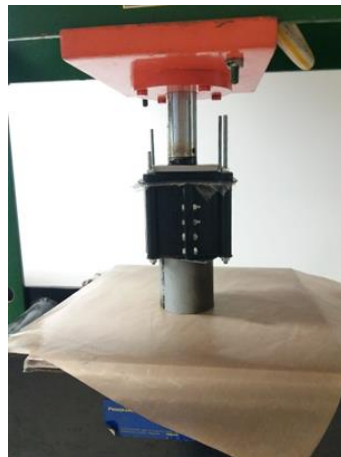


Figura 47 - Molde no estágio de cura.

De seguida, realizou-se o processo de desmoldagem que correu na perfeição, não tendo ocorrido qualquer problema com o molde. No processo de acabamento, o excesso de material foi cortado inicialmente com uma serra de corte de disco diamantado. Em seguida, a base da biqueira foi cortada com uma broca craniana de 51 mm de diâmetro, conforme ilustrado na figura 48. Por fim, as rebarbas foram aparadas novamente com a mesma serra de corte de disco diamantado.



Figura 48 - Processo de corte.

Posteriormente, limaram-se as arestas rugosas. Conforme ilustrado na figura 49, as biqueiras fabricadas em laboratório (direita), são em tudo semelhantes à biqueira tida como referência (esquerda).



Figura 49 - Versão final da biqueira, comparando com a biqueira original.

No total, doze biqueiras foram produzidas. Deste modo, seis biqueiras foram submetidas ao teste de impacto de baixa velocidade e outras seis ao teste de compressão. Isto implicou que, para cada tipo de teste, foram testadas três amostras de controlo juntamente com três amostras aditivadas.

5.7. Ensaios das biqueiras produzidas

Após a produção das biqueiras, procedeu-se à realização dos testes de impacto e compressão. Estes testes foram cruciais para garantir que as biqueiras atendessem aos padrões de segurança e qualidade necessários, assegurando assim a proteção adequada nas aplicações específicas para as quais foram projetadas.

5.7.1. Teste de Impacto

Os ensaios de impacto foram efetuados com uma máquina de impacto de queda livre IMATEK-IM10, conforme apresentado na figura 50. Este equipamento possui uma estrutura em torre com duas colunas de guia e um carrinho que suporta e transporta o penetrador ao longo destas colunas sobre rolamentos. Além disso, inclui uma secção inferior estacionária, normalmente alojada numa câmara com temperatura controlada, onde a amostra de ensaio é fixada num dispositivo especializado. O penetrador pode ser elevado a uma altura específica e depois libertado para cair verticalmente com fricção mínima ao longo das colunas de guia. A máquina permite a utilização de vários tipos de penetradores, oferecendo flexibilidade na alteração da forma e tamanho das pontas dos penetradores. A massa total da instalação é ajustável através da adição de pesos.



Figura 50 - Máquina de impacto IMATEK-IM10.

A energia do impacto provém unicamente da força da gravidade, sendo controlada pela altura de queda, que pode ser ajustada até um máximo de 1,80 metros. Neste caso, a massa de queda (*drop mass*) foi 5,650 kg e a massa do percussor (*striker mass*) foi 0,4353 kg, permitindo uma energia de impacto máxima de 100 J a uma velocidade de 5,95 m/s. A máquina está também equipada com um dispositivo que impede um segundo impacto e com o *software Impact Version 1.3* para o seu funcionamento. A câmara, onde se encontra a pinça do provete, tem dimensões nominais de 200×200 mm². Para os ensaios de impacto, foi utilizado um penetrador de ponta esférica com um diâmetro de 25 mm, como representado na figura 51.



Figura 51 - Penetrador de ponta esférica.

Dada a forma semicircular das biqueiras, foi necessário conceber um dispositivo que impedisse o seu deslocamento transversal durante o ensaio de acordo com a norma EN ISO 20346:2022, como ilustrado na figura 52.

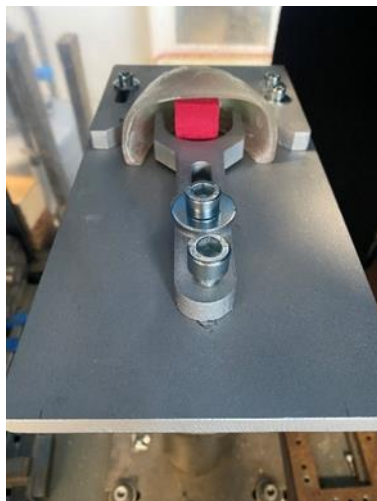


Figura 52 - Gabarito de apoio às biqueiras no teste de impacto.

5.7.2. Teste de Compressão

O principal objetivo deste teste é avaliar a capacidade da fibra de vidro em suportar cargas de compressão progressivamente crescentes, garantindo assim a segurança, durabilidade e integridade estrutural das biqueiras. Durante o ensaio, a biqueira foi submetida a uma força crescente numa máquina de teste até ao ponto de falha. Na figura 53 encontra-se o equipamento utilizado, bem como o gabarito devidamente montado.

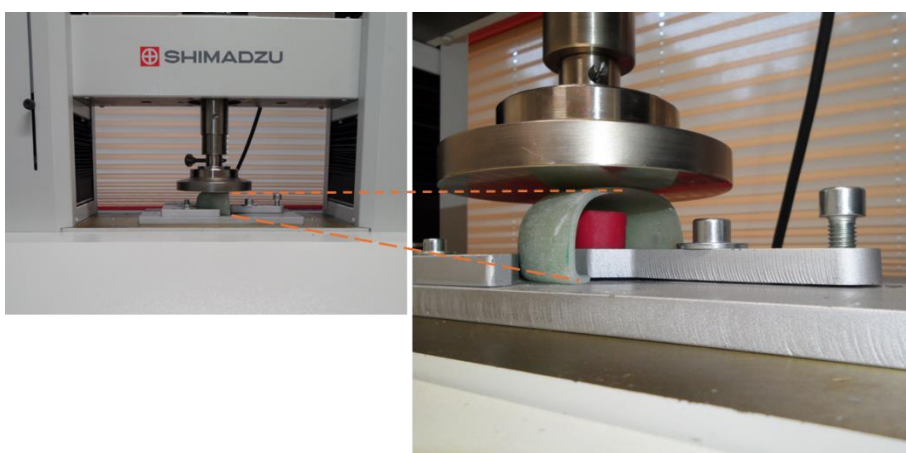


Figura 53 - Equipamento de teste universal da marca *Shimadzu*, modelo AG-IC, com uma célula de carga de 50 kN.

Capítulo 6

Análise e Discussão dos Resultados

Neste capítulo, apresentam-se as características mecânicas dos materiais estudados, matrizes e laminados aditivados com partículas provenientes da produção de pás de aerogeradores, com enfoque nos resultados obtidos nos ensaios de impacto de baixa velocidade e compressão das biqueiras produzidas em laboratório.

6.1. Ensaios de Flexão em 3 Pontos

O teste de flexão em três pontos (F3P) consiste em avaliar o desempenho de polímeros quando sujeitos a flexão, com opções que vão desde a observação morfológica até à determinação das forças associadas à deformação dos elementos ensaiados. O principal objetivo deste ensaio é analisar a capacidade de resposta do material à deformação por flexão e, ao mesmo tempo, aferir a sua suscetibilidade à falha por rutura (Instituto Pedro Nunes, 2023). Aplicando esta caracterização mecânica, pretende-se numa primeira fase selecionar o tamanho de partícula que maximize as propriedades estáticas à flexão, seguido do estudo da percentagem ideal quando adicionada à matriz.

6.1.1. Ensaios F3P nas Matrizes

A figura 54 compara as curvas típicas de tensão-deformação com uma percentagem em peso de 1 % (1 wt. %) para os diferentes tamanhos de partículas com a matriz de controlo.

A partir do gráfico retratado na figura 54, pode-se observar que independentemente do tamanho das partículas, todas as curvas evidenciam um aumento linear da tensão de flexão com a deformação, seguido de um comportamento não linear em que o valor máximo da tensão de flexão é atingida. Para todas as condições analisadas, a tensão de flexão diminui a partir do valor máximo até ocorrer o seu colapso.

Para 1 wt. % de partículas e um tamanho de partículas de $<0,075$ mm, foi obtida uma melhoria de 5,5% na resistência à flexão quando comparado com o valor obtido para a matriz de controlo (104,7 MPa) e o obtido para 1.0 wt. % (110,4 MPa). Subsequentemente, para os outros tamanhos de partículas, a resistência à flexão diminuiu para 90,2 MPa para um tamanho igual a 0,075 e 101,7 MPa para um tamanho igual a 0,150 mm, ou seja, uma redução de 13,9 % e 2,8 % respetivamente.

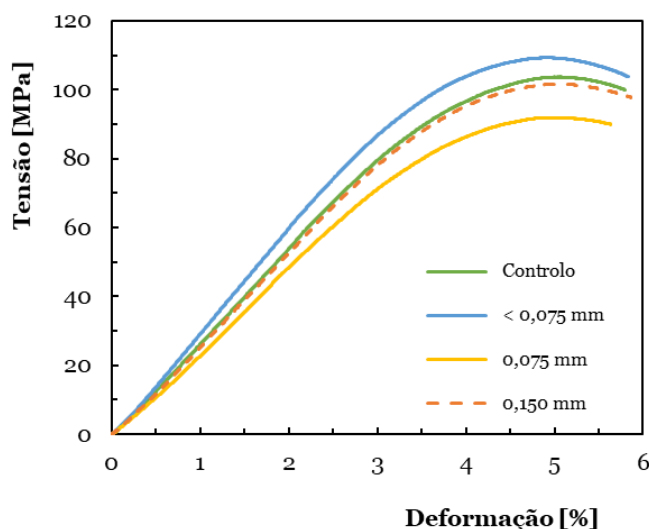


Figura 54 - Curvas representativas de tensão-deformação de flexão. Comparação entre a matriz de controlo e as diversas matrizes aditivadas.

Em termos de rigidez à flexão, para um tamanho de partículas <0,075 mm, foi obtida uma melhoria de 8,0% com a introdução de 1 wt. %, ou seja, o valor passou de 2,8 GPa da matriz de controlo para 3,1 GPa. Para os restantes tamanhos em estudo, verificou-se uma diminuição de 12,6% para um tamanho igual a 0,075 mm e 1,7% para um tamanho igual a 0,150 mm. No que diz respeito à deformação, esta diminuiu 1,6%, para partículas com tamanho <0,075 mm, em relação ao valor de controlo.

Os valores médios e o respetivo desvio padrão obtidos em laboratório, encontram-se reunidos na tabela 6, para as duas percentagens em peso inicialmente estudadas.

Tabela 6 - Propriedades mecânicas das matrizes após o ensaio.

		Tensão [MPa]	Rigidez [GPa]	Deformação [%]
wt%= 1%	Controlo	104,72 ± 3,44	2,83 ± 0,17	5,04 ± 0,08
	< 0,075 mm	110,44 ± 3,29	3,06 ± 0,01	4,96 ± 0,09
	0,075 mm	90,16 ± 5,67	2,47 ± 0,19	5,01 ± 0,06
	0,150 mm	101,78 ± 4,97	2,78 ± 0,13	4,92 ± 0,14
wt%= 2%	< 0,075 mm	99,34 ± 4,01	2,86 ± 0,15	5,36 ± 0,96
	0,075 mm	94,69 ± 4,71	2,61 ± 0,12	5,92 ± 1,07
	0,150 mm	99,02 ± 6,44	2,64 ± 0,13	5,23 ± 1,93

No gráfico da figura 55 apresenta-se de forma resumida como a resistência à flexão das matrizes produzidas mudou com os diferentes tamanhos de partículas e percentagens em peso. A matriz de controlo forneceu um valor de referência, permitindo a comparação com outras dimensões de partículas. Os pontos representam o valor medio dos ensaios

considerados válidos e as bandas os valores máximo e mínimo obtido para cada grupo de ensaios.

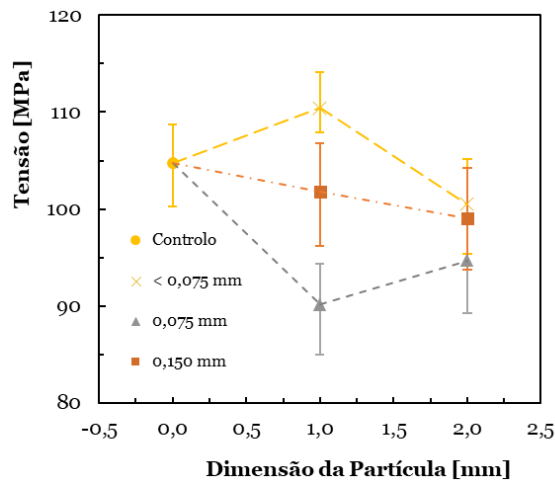


Figura 55 - Relação entre o tamanho da partícula e a resistência à flexão das matrizes.

Através da análise da tabela 6 e da figura 55, é notório que para o tamanho de partículas <0,075 mm, se verificou uma melhoria para 1 wt. % seguido de uma perda de propriedades para 2 wt. %. Para os restantes tamanhos de partículas em estudo e independentemente da concentração, os resultados obtidos diminuiram em comparação com os valores da matriz de controlo. De acordo com os resultados obtidos, o tamanho ideal de partícula para obter a maior resistência à flexão era <0,075 mm, com uma concentração de 1 wt. %.

Para partículas com tamanho <0,075 mm, outras percentagens em peso foram estudadas para determinar qual a ideal, de modo a otimizar a matriz epóxi. A partir da observação do gráfico da figura 56, constatou-se o efeito do aumento da percentagem de peso nas propriedades de flexão. É notório que a percentagem de peso ótima é 1 wt. %, visto que é com esta que a amostra atingiu a sua resistência máxima à flexão.

A rutura permaneceu relativamente constante nas diferentes composições, ou seja, a capacidade da amostra para se deformar sob uma carga de flexão não se alterou significativamente com a variação das percentagens em peso. A rigidez também permaneceu bastante consistente, indicando que a rigidez da amostra à flexão não é significativamente afetada por alterações na composição do material.

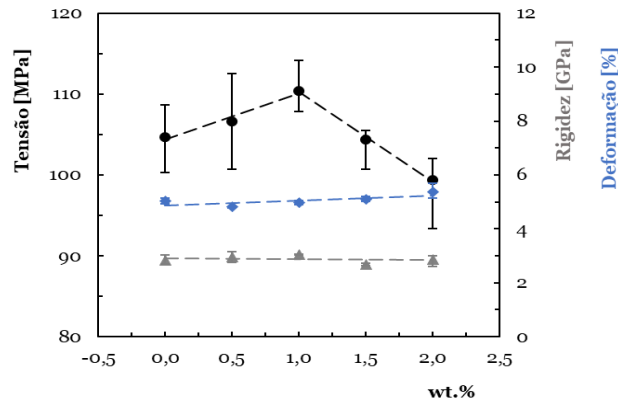


Figura 56 - Gráfico tensão, rigidez e deformação das matrizes.

As imagens SEM apresentadas na figura 57 referem-se às superfícies de fratura das amostras testadas com a matriz epóxi aditivada com 1 wt. % e 2 wt. % de partículas de tamanho <0,075 mm. Uma dispersão homogênea é evidente para 1 wt. %, figura 57 a), enquanto para 2 wt. %, as aglomerações/agregações entre partículas formam pequenos conjuntos com maior dimensão, figura 57 b).

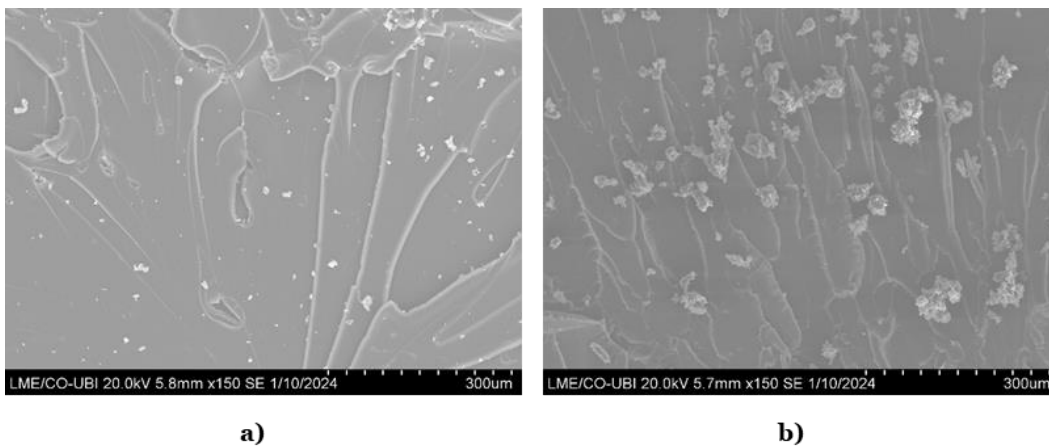


Figura 57 - Imagens SEM para a matriz epóxi com: (a) 1 wt.%; (b) 2 wt.%.

6.1.2. Ensaios F3P dos Laminados

Após a otimização da matriz, o estudo e caracterização dos laminados são essenciais para a seleção da gramagem da fibra de vidro mais adequada à aplicação pretendida. A gramagem da fibra de vidro é um fator importante para determinar as propriedades mecânicas dos laminados, e deve ser selecionada de forma a garantir que os laminados atendam aos requisitos da aplicação.

Os ensaios estáticos de flexão foram realizados para se obter o efeito dos diferentes tecidos aplicados e o efeito da adição de 1 wt. % de partículas de tamanho <0,075 mm na

matriz nas propriedades de flexão. Na figura 58 apresentam-se as curvas representativas tensão-deformação de flexão obtidas para cada condição.

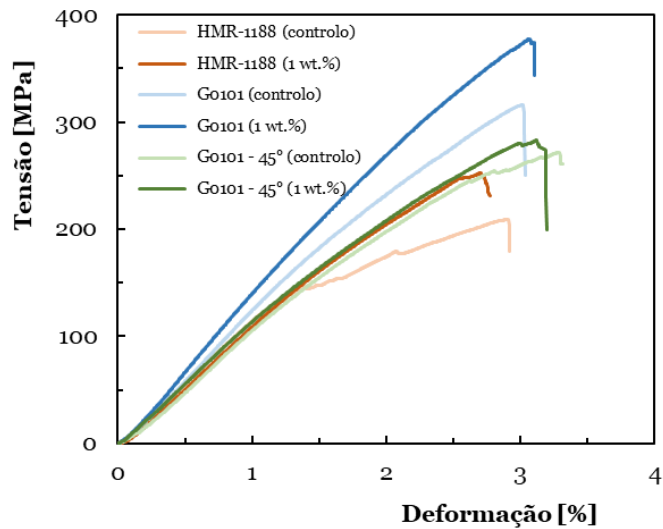


Figura 58 - Gráfico das Curvas Representativas dos laminados.

A partir do gráfico representado na figura 58, pode inferir-se que todas as curvas exibem um comportamento linear inicial onde a resistência à flexão aumenta proporcionalmente com a deformação. Segue-se um pico, ou seja, a resistência máxima e depois um declínio, onde se dá a rutura do laminado.

Embora em pequena quantidade, a adição de partículas à matriz aumenta a resistência à flexão de todos os laminados em comparação com os repetidos laminados de controle, como se pode observar pelas posições relativas das curvas. Todos os laminados foram testados e os resultados obtidos encontram-se resumidos na tabela 7.

Tabela 7 - Propriedades mecânicas dos laminados após os ensaios de flexão.

	Tensão [MPa]	Rigidez [GPa]	Deformação [%]
HMR-1188 (controle)	269,81 ± 12,74	11,01 ± 1,02	2,66 ± 0,11
HMR-1188 (1 wt.%)	269,97 ± 16,59	12,22 ± 0,42	2,76 ± 0,19
Go101 (controle)	308,13 ± 6,48	13,26 ± 0,62	2,85 ± 0,20
Go101 (1 wt.%)	365,38 ± 10,49	14,26 ± 0,39	3,17 ± 0,12
G1101 (controle)	295,51 ± 15,71	12,15 ± 0,49	3,16 ± 0,08
G1101 (1 wt.%)	282,30 ± 10,47	12,04 ± 0,81	3,05 ± 0,19

Pela análise da figura 58 e da tabela 7, pode-se concluir que o laminado "Go101 (1 wt.%)\" apresentou propriedades significativamente mais elevada do que o "Go101 (controle)". Uma melhoria de 18,6% foi verificada na tensão de flexão, também a rigidez à flexão teve

uma melhoria de 7,5% e a deformação à flexão 10,0%. Estes resultados mostraram que as partículas têm um impacto benéfico na resistência à flexão do laminado G0101.

Outros laminados, apresentaram melhorias, embora menos expressivas do que o analisado anteriormente, como representado na figura 59. Pode-se dizer que o laminado “G0101 (1 wt.%)” apresentou excelentes resultados na resistência à flexão em comparação aos restantes laminados. A rigidez e a deformação, no entanto, não apresentaram alterações significativas nas diferentes composições, pois estas propriedades não são tão sensíveis às alterações na percentagem em peso nestes laminados.

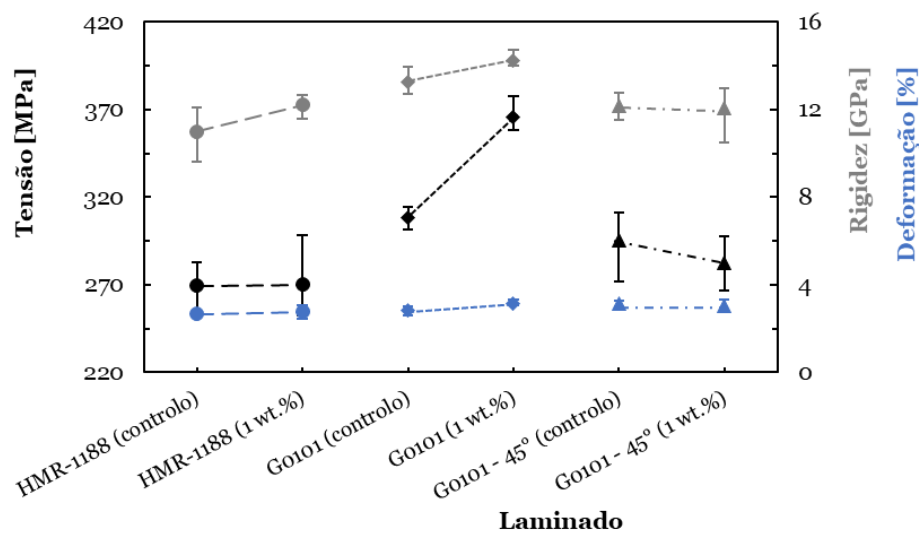


Figura 59 - Gráfico tensão, rigidez e deformação dos laminados.

6.1.3. Ensaio de resistência ao cisalhamento interlaminar

A resistência ao cisalhamento interlaminar é uma medida da resistência ao cisalhamento de um laminado, especificamente entre as suas camadas individuais. Este é um parâmetro crítico porque dá uma indicação do quão bem as camadas de um compósito se ligam entre si. Uma ligação fraca entre camadas pode tornar o compósito suscetível a delaminação, que é um modo de falha em que as camadas do compósito se separam umas das outras (ZwickRoell, 2023).

Em muitos casos, a baixa resistência ao cisalhamento interlaminar dos compósitos poliméricos pode ser explicada pela utilização de fibras sem tratamento superficial ou com tratamentos inadequados para a matriz utilizada (Monjon *et al.*, 2022). Portanto, para avaliar a resistência ao cisalhamento interlaminar dos laminados produzidos com os diferentes tecidos de fibra de vidro, bem como os benefícios obtidos com a introdução das partículas neste estudo, utilizou-se o ensaio de cisalhamento de feixe curto para este

fim. Apresentam-se na figura 60 as curvas carga-deslocamento obtidas para todas as configurações estudadas.

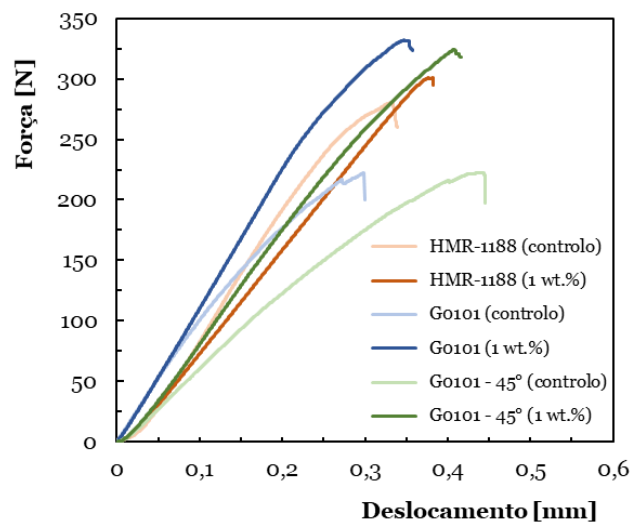


Figura 60 – Gráfico das Curvas Representativas dos laminados, após o teste de resistência ao cisalhamento interlaminar.

Todas as curvas obtidas nos ensaios de cisalhamento de viga curta apresentaram um aumento quase linear da carga com o deslocamento, após o qual surgiu uma região de pequena diminuição da carga (pequenas delaminações) em vez de uma queda abrupta. O declive das curvas indica a rigidez do material, e sendo o declive da curva “G0101 (1 wt.%)” o mais acentuado, isto indicou que este era o material mais rígido. À medida que o deslocamento se aproxima de 0,5 mm, a força parece aproximar-se de cerca de 300 N. A curva não apresenta quaisquer quedas ou picos súbitos, o que significa que não existem falhas súbitas ou pontos de cedência que sejam atingidos dentro do intervalo de deslocamento apresentado.

Os dados obtidos durante o teste de resistência ao cisalhamento interlaminar foram analisados e os resultados encontram-se expostos na tabela 8.

Tabela 8 – Resultados após o teste de resistência ao cisalhamento interlaminar.

	Tensão [MPa]
HMR-1188 (controle)	28,57
HMR-1188 (1 wt.%)	30,71
G0101 (controle)	22,92
G0101 (1 wt.%)	31,83
G1101 (controle)	25,63
G1101 (1 wt.%)	30,56

A resistência ao cisalhamento interlaminar de todos os laminados aditivados foi significativamente maior do que a do laminado de controlo, independentemente do tecido de fibra de vidro utilizado. Melhorias de 7,5%, 39,9% e 19,2% foram obtidas para os laminados de HMR-1188, G0101 - 45°C e G1101, respetivamente.

Observando o gráfico da figura 61, pode-se concluir que a adição de 1 wt. % tem um efeito positivo na resistência ao cisalhamento interlaminar de todos os laminados, com um aumento notável para o G0101. Isto indica que a arquitetura deste laminado aditivado é menos propícia à delaminação, em comparação com os outros em estudo.

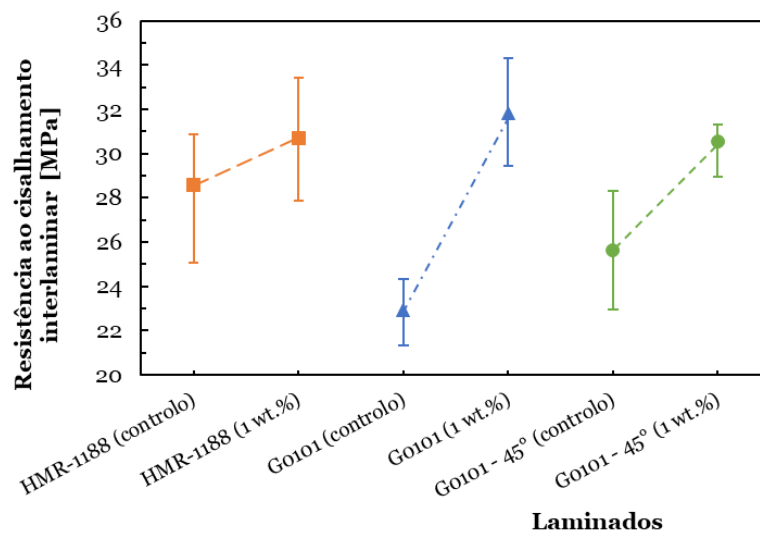


Figura 61 - Gráfico de comparação da tensão entre os laminados de controlo e aditivados, após o teste de resistência ao cisalhamento interlaminar.

6.2. Ensaios de Impacto de Baixa Velocidade

Definida a arquitetura do compósito para o fabrico das biqueiras, com base nas propriedades estáticas de flexão das matrizes e dos laminados, procedeu-se em laboratório ao fabrico das mesmas, para posterior caracterização ao impacto de baixa velocidade e à compressão.

Após a realização do teste de impacto nas biqueiras, foi possível avaliar a eficácia e a resistência dos componentes sob condições extremas. Este teste foi crucial para determinar se as biqueiras conseguiam suportar impactos súbitos sem sofrer danos significativos ou falhas estruturais, protegendo a integridade física do utilizador.

Durante o teste, as biqueiras foram submetidas a uma energia de impacto controlada, neste caso de 100 J, conseguindo simular situações reais de uso onde possam ocorrer choques físicos.

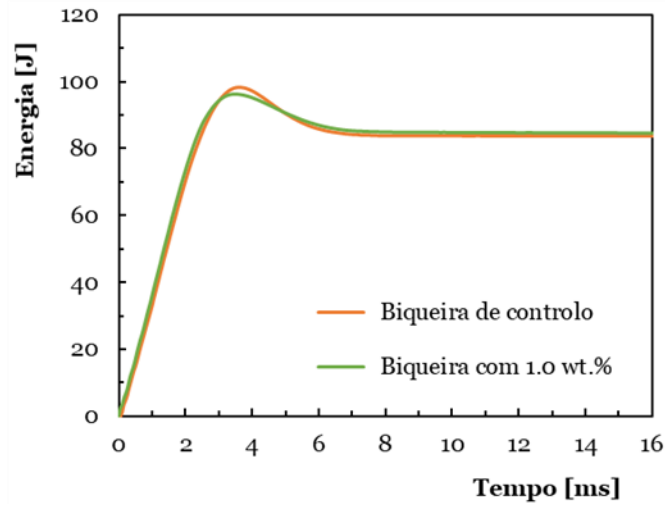
Na figura 62, apresentam-se as curvas características resultantes dos testes de impacto, a curva tempo-energia de impacto, a curva força-deslocamento e a curva força-tempo. Através da figura 62 a) pode-se observar que a energia cinética inicial do pêndulo é, primeiro, completamente absorvida pela biqueira e, na segunda fase do ensaio, uma parte da energia absorvida regressa ao pêndulo devido à resistência elástica da biqueira. Por conseguinte, a absorção da energia final é inferior à energia de impacto inicial. A curva força-deslocamento da biqueira foi sujeita a uma energia de 100 J e está representada na figura 62 b). Esta curva pode ser dividida em três regiões para uma melhor compreensão dos eventos mecânicos ocorridos durante o ensaio.

A parte inicial da curva diz respeito à região de deformação elástica na biqueira devido à carga aplicada. Neste ponto pode ocorrer o início da delaminação e da fissuração da matriz. Uma parte intermédia, em que, no início, uma queda brusca da força corresponde à fissuração da matriz devido ao impacto do penetrador e, durante esta secção, pode ocorrer a formação de delaminação. Podem ocorrer dois eventos distintos: a resposta elástica da biqueira e a sua recuperação, ou inicia-se a penetração da biqueira e a sua rigidez começa a diminuir. Finalmente, na fase final e se a penetração ocorrer, ocorrem danos catastróficos e penetração completa. Neste estudo, esta terceira fase não se verificou, pois, a energia aplicada foi baixa e a penetração não ocorreu.

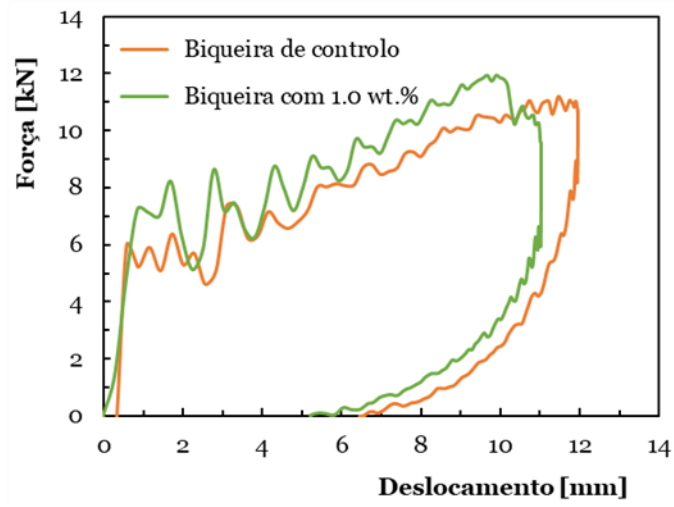
O gráfico força-tempo, ilustrado na figura 62 c) mostra que a biqueira de fibra de vidro aditivada com 1,0 wt. % é mais resistente ao impacto do que a biqueira de controlo, concluindo assim que a biqueira aditivada é mais resistente à deformação plástica e à rutura.

Em termos de propriedades, a força máxima verificada nos impactos de 100 J para as biqueiras de controlo foi de 10,05 kN, enquanto para as biqueiras aditivadas registou-se um valor de 10,79 kN. A introdução de 1 wt. % de partículas promoveu um aumento de 7,36%.

a)



b)



c)

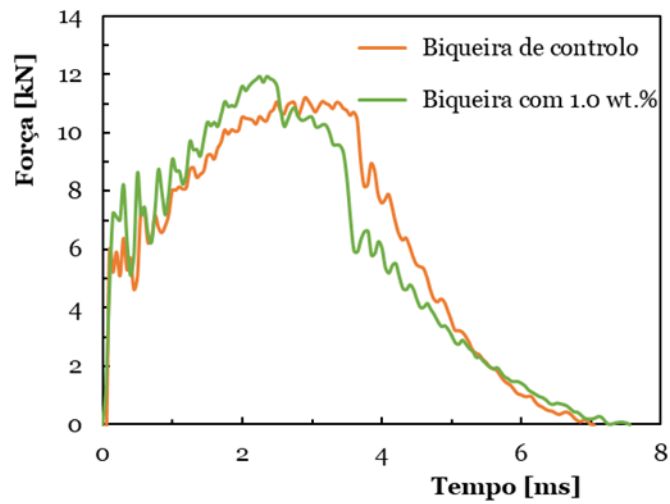


Figura 62 - Curvas características após impacto: (a) Gráfico Energia vs Tempo; (b) Gráfico Força vs Deslocamento; (c) Gráfico Força vs Tempo.

Tabela 9 - Propriedades das biqueiras de controlo e aditivada no teste de impacto.

Teste de Impacto [100 J]	Controlo	1 wt.%
Força Máxima [kN]	10,05 ± 1,70	10,79 ± 1,04
Energia Elástica [%]	13,37 ± 1,39	11,18 ± 0,68
Energia Absorvida [%]	86,51 ± 1,23	88,82 ± 0,68
Deslocamento Máximo [mm]	13,60 ± 3,07	13,09 ± 1,40
Tempo de Contacto [ms]	8,25 ± 2,0	9,08 ± 1,34

Ao nível da energia absorvida, nas biqueiras de controlo está foi de 86,51% e para as biqueiras aditivadas o valor aumentou em cerca de 2,7%, para 88,82%. Por consequência este aumento promovei uma diminuição nos danos ocorridos no compósito. O contrário ocorreu para a energia elástica, ou seja, a introdução de partículas numa quantidade de 1 wt.% promoveu uma diminuição de 19,5%, de 13,37%, nas biqueiras de controlo para 11,18% nas biqueiras aditivadas.

Ao nível do deslocamento máximo ocorrido nos compósitos durante o impacto, verifica-se uma diminuição de 3,9%, de um valor de 13,60 mm das biqueiras de controlo para um valor de 13,09 mm para as biqueiras aditivadas. Também neste caso, o maior deslocamento verificado na biqueira de controlo denota maiores danos.

Por fim, o tempo de contacto, para uma energia de 100 J, um ensaio das biqueiras de controlo demorou cerca de 8,25 ms, enquanto um ensaio das biqueiras aditivadas demorou 9,08 ms. Estes valores podem ser observados na tabela 9.

Na tabela 10 mostra-se que ambas as amostras não apresentavam delaminação significativa antes do impacto, mas ambas exibiram delaminação após o impacto, tendo a biqueira aditivada uma espessura de delaminação marginalmente menor, o que indica uma resistência ligeiramente melhor aos danos relacionados com o impacto.

Tabela 10 - Espessura de delaminação no teste de impacto.

Espessura de Delaminação [mm]	Controlo	1 wt.%
Antes do Teste de Impacto		2,5 ± 0,2
Após o Teste de Impacto de 100 J	3,26 ± 0,05	2,92 ± 0,09

Os resultados apresentados na tabela 11 indicam que ambas as amostras sofreram uma diminuição da altura devido ao impacto aplicado durante o ensaio, com a biqueira aditivada a apresentar uma deformação ligeiramente menor. Isto pode indicar que a mesma é mais resistente ao impacto e tem melhores propriedades de absorção de energia.

Tabela 11 - Modelo de Plasticina Cilíndrico no teste de impacto.

Modelo de Plasticina Cilíndrico [mm]	Controlo		1 wt.%	
	Antes do Teste	Depois do Teste	Antes do Teste	Depois do Teste
Altura	35 ± 2	26,63 ± 2	35 ± 2	28,73 ± 2

Com base nos dados recolhidos, é possível fazer ajustes no processo de fabricação ou na composição do material, visando melhorar o desempenho das biqueiras em situações de impacto.

De seguida, na figura 63, apresenta-se o aspeto da biqueira de controlo após o teste de impacto.



Figura 63 - Biqueira de controlo após o teste de impacto.

Na figura 64, apresenta-se o aspeto da biqueira aditivada após o teste de impacto.



Figura 64 - Biqueira aditivada após o teste de impacto.

Em ambos os casos, são identificáveis delaminações, quebra de fibras e quebra de matrizes.

6.3. Ensaio de Compressão

Este ensaio aplicado às biqueiras foi fundamental para garantir a segurança em calçado de proteção. O mesmo teve como objetivo determinar se a biqueira era capaz de resistir a uma força específica sem se danificar e sem colocar em risco a segurança do utilizador.

Na figura 65, encontram-se representadas as curvas característica da biqueira de controlo em comparação com a biqueira aditivada com 1 wt.%. Tomando como referência uma força de 10 kN, a deformação da biqueira de controlo foi de 2,8 mm, enquanto que para a biqueira aditivada foi de 2,3 mm, ou seja, houve uma diminuição de 23,1%. Conclui-se assim que a biqueira de fibra de vidro aditivada apresenta maior resistência à compressão do que a biqueira de fibra de vidro de controlo.

Os resultados do teste indicam que a biqueira aditivada oferece uma melhor proteção aos pés dos utilizadores do que a biqueira de controlo, pois a biqueira aditivada é mais resistente à compressão, o que significa que é mais provável que suporte cargas de objetos pesados sem se danificar.

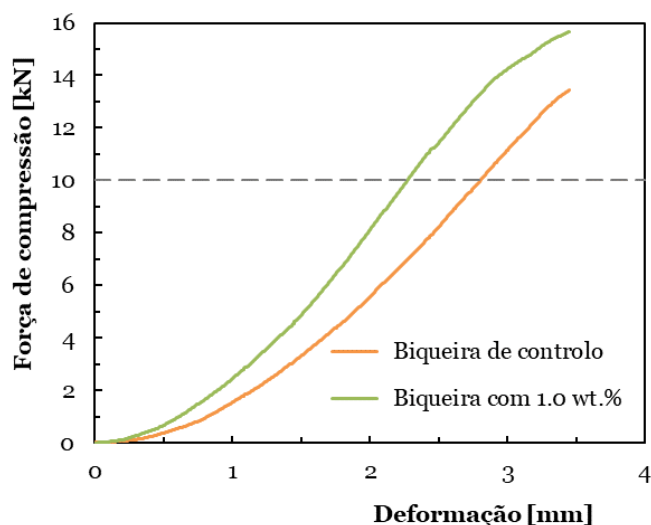


Figura 65 - Gráfico Força vs Deslocamento após o teste de compressão.

Para uma melhor compreensão da resistência das biqueiras, foi realizado um estudo da sua resposta a forças de compressão mais elevadas. Na figura 66, conseguem-se identificar as diferentes fases pela qual a biqueira, no caso aditivada com 1 wt. % com partículas <0,075 mm, passou durante o teste de compressão. No ponto A, a biqueira é submetida a uma força de compressão. A mesma começa por se deformar elasticamente devido às ligações químicas entre as moléculas do material da biqueira serem fortes o suficiente para resistir à deformação.

No ponto B, a biqueira começa a sofrer danos. As ligações químicas entre as moléculas do material da biqueira começam a romper-se, causando uma deformação permanente que não é revertida. Neste ponto a força de compressão aplicada é aproximadamente superior a 15 kN.

No ponto C, a biqueira é submetida a uma força de compressão crítica. A mesma sofre uma deformação plástica repentina e rompe, visto que as ligações químicas entre as moléculas do material da biqueira rompem completamente. No ponto D, a biqueira está completamente deformada e na fase final, ponto E, a biqueira apresenta grandes danos estruturais, tais como delaminações e quebras das fibras.

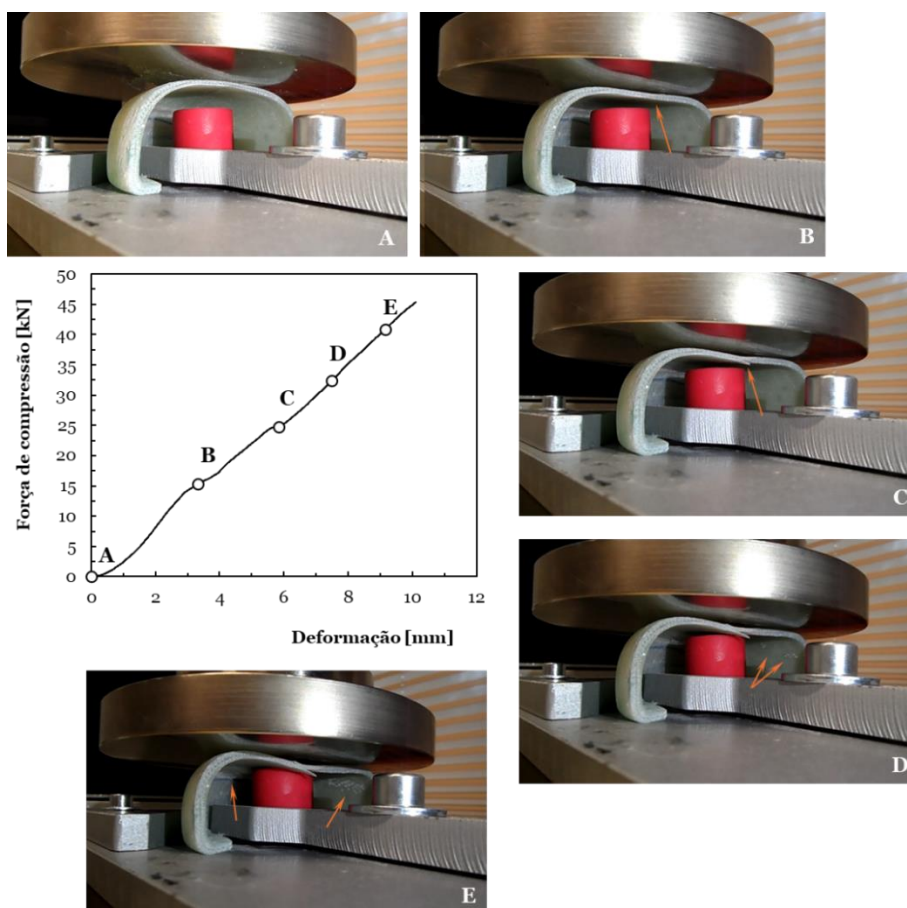


Figura 66 - Diferentes estágios da biqueira durante o teste de compressão.

Através dos dados apresentados na tabela 12, pode-se concluir que a espessura da delaminação aumentou após o teste de compressão em ambas as biqueiras. No entanto, a biqueira aditivada apresentou um aumento menor na espessura da delaminação do que a biqueira de controlo. Isto indica que as partículas utilizadas na biqueira aditivada

melhoram a adesão entre as camadas de fibra de vidro, ou seja, tornam a biqueira mais resistente à delaminação, sendo importante para a proteção dos pés dos utilizadores.

Tabela 12 - Espessura de delaminação no teste de compressão.

Espe ssura de Delaminação [mm]	Controlo	1 wt.%
Antes do Teste de Compressão	2,5 ± 0,2	
Após o Teste de Compressão	3,25 ± 0,29	3,03 ± 0,02

De acordo com os dados apresentados na tabela 13, pode-se afirmar que a biqueira C3 é a mais resistente à compressão, pois a mesma apresentou uma maior força de rutura e uma maior resistência à compressão do que as outras biqueiras. A biqueira C3 é também a mais resistente à deformação, visto que a mesma tem um diâmetro maior do que as restantes.

Também se pode concluir que a biqueira C1 é a menos resistente à compressão e à deformação, devido ao seu diâmetro ser menor em comparação às outras biqueiras. Um diâmetro menor diminui a área da superfície da biqueira, o que diminui a força necessária para deformar a biqueira.

Tabela 13 - Modelo de Plasticina Cilíndrico no teste de compressão.

Modelo de Plasticina Cilíndrico [mm]	Diâmetro [mm]	Altura [mm]
Antes do Teste de Compressão	25 ± 2	25 ± 2
Após o Teste de Compressão	C1	27,50 ± 2
	C2	28,50 ± 2
	C3	29,70 ± 2
	1%_1	29,08 ± 2
	1%_2	28,91 ± 2
	1%_3	26,12 ± 2

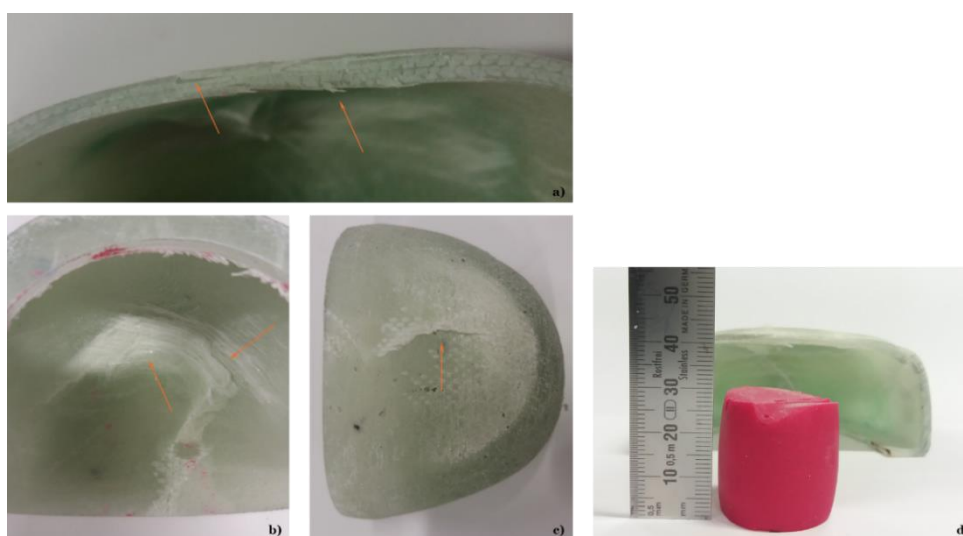


Figura 67 - Danos ocorridos na biqueira após teste de compressão: a) Delaminações e quebra das fibras na seção da biqueira; b) Delaminações na parte interior da biqueira; c) Quebra da fibra e da matriz na parte exterior; d) Deformação da pastilha de teste.

Capítulo 7

Conclusões

Neste capítulo apresentam-se as principais conclusões do estudo, identificando as limitações à sua execução e sugerem-se trabalhos futuros que poderão ser desenvolvidos de modo a aprofundar o estudo realizado e explorar esta temática tão atual e pertinente.

7.1. Conclusões

Ao rever os objetivos inicialmente definidos, juntamente com a análise e discussão dos resultados do caso prático realizado, podem-se inferir algumas conclusões sobre a viabilidade da produção de biqueiras em fibra de vidro.

Este estudo, destacou-se pela análise das propriedades mecânicas de compósitos reforçados com fibras, onde o tamanho da partícula foi criteriosamente mantido abaixo de 0,075 mm, garantindo assim, que partículas de dimensão menor melhoram as propriedades da resina epóxi e como consequência melhoram as propriedades dos compósitos. A quantidade de partículas incorporadas foi estabelecida para 1% em peso na resina, mostrando-se suficiente para alterar significativamente as propriedades dos laminados sem comprometer a sua processabilidade, aplicando-se o processo de moldação manual. Especificamente, utilizou-se o tipo de fibra G0101, conhecido pela sua compatibilidade com a resina epóxi e por contribuir para a melhoria da resistência à flexão dos laminados. A escolha meticulosa destes parâmetros foi crucial para otimizar o desempenho do material e entender as sinergias entre a matriz e o reforço da fibra.

Através dos ensaios de impacto de baixa velocidade, constatou-se que as biqueiras são capazes de suportar impactos até 100 J sem sofrerem danos significativos, estando aptas para uso em calçado de proteção.

No que diz respeito, aos ensaios de compressão, as biqueiras suportaram uma força de compressão de pelo menos 10 kN sem se romperem. Além disso, as mesmas deformaram-se de forma controlada, sem apresentarem deformação residual após remoção da carga, qualificando-as para calçado de proteção.

A problemática dos resíduos resultante do fabrico das pás de aerogeradores eólicos é uma questão complexa, pois estes materiais são compostos por uma mistura de fibras de vidro, resinas e outros materiais. No entanto, o objetivo inicial deste projeto era abordar

esta problemática sob uma perspectiva de Economia Circular, visando a minimização dos resíduos e a valorização dos recursos. Para atingir este objetivo, fabricaram-se as biqueiras em fibra de vidro permitindo reaproveitar um material valioso, evitando a sua deposição em aterro. Além disso, esta solução contribui para a redução da dependência de recursos naturais, contribuindo para a sustentabilidade ambiental de dois setores de atividade, o setor da energia eólica e o do calçado.

7.2. Limitações

O principal desafio deste estudo foi a fabricação do molde no qual se iam produzir as biqueiras. O material inicialmente utilizado, não aderiu bem ao desmoldante, dificultando a remoção das biqueiras do molde após o processo de cura. Isto exigiu um maior esforço manual na desmoldagem, o que aumentou o risco de danos às biqueiras, bem como do próprio molde. Embora se tenha ultrapassado esta questão com a manufatura aditiva dos moldes, o tempo útil para o desenvolvimento deste trabalho foi afetado significativamente.

7.3. Propostas Futuras

Como proposta de estudos futuros, seria interessante avaliar o desempenho de outros tipos de fibra, tais como a fibra de carbono, fibras de aramida ou intercalar a disposição com diferentes tipos de fibras, podendo-se assim alcançar o objetivo de produção de biqueiras para calçado de segurança.

Uma outra proposta seria aumentar o número de camadas e/ou orientação dos tecidos de fibra de vidro na biqueira, reforçando a mesma, tornando-a mais resistente. Para melhorar as propriedades da biqueira, também se poderia utilizar uma percentagem maior de partículas. Estas partículas poderiam ser tratadas fisicamente ou quimicamente para melhorar ainda mais as suas propriedades.

De forma a produzir um material ainda mais sustentável, poder-se-ia substituir as fibras sintéticas (vidro) por fibras naturais (linho, sisal) e a resina epóxi (100% sintética) por resina epóxi com uma parte orgânica na sua composição.

Para valorizar a biqueira, testar a aplicação de outros tamanhos de partículas no fabrico. Isto poderia melhorar as propriedades mecânicas da biqueira, tornando-a mais resistente e durável.

De forma a generalizar a aplicação da biqueira para vários ambientes, estudar o efeito da degradação quando submetida, por exemplo, a ambientes salinos, ácidos, básicos, em contacto com combustíveis e a diferentes temperaturas. Desta forma poderiam ser utilizadas noutras indústrias, por exemplo, a cosmética, a alimentar, a química e a petrolífera.

A par com a caracterização mecânica efetuada em laboratório, efetuar estudos de modelação computacional por forma a ajudar a dar respostas em aberto, tais como, substituição do tipo de fibras, otimizar o *layout* do laminado, prever o efeito da hibridização das fibras e otimização do tipo de quantidade partículas utilizadas como reforço da matriz.

Bibliografia

Alberto, M. (2013) 'Introduction of Fibre-Reinforced Polymers – Polymers and Composites: Concepts, Properties and Processes', *Fiber Reinforced Polymers - The Technology Applied for Concrete Repair*. InTech, p. 13. doi: 10.5772/54629.

Almeida, J. H. S., Angrizani, Clarissa C., Botelho, Edson C., Amico, Sandro C. (2015) 'Effect of fiber orientation on the shear behavior of glass fiber/epoxy composites', *Materials & Design (1980-2015)*, 65, pp. 789–795. doi: 10.1016/j.matdes.2014.10.003.

Altenbach, H., Altenbach, J. and Kissing, W. (2018) 'Classification of Composite Materials', *Mechanics of Composite Structural Elements*, pp. 3–18. doi: 10.1007/978-981-10-8935-0_1.

Arif, Z. U., Khalid, M. Y., Ahmed, W., Arshad, H., Ullah, S. (2022) 'Recycling of the glass/carbon fibre reinforced polymer composites: A step towards the circular economy', *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 61(7), pp. 761–788. doi: 10.1080/25740881.2021.2015781.

ARTEC 3D (2023) *Artec Studio 18. The power is in the software*. Disponível em: <https://www.artec3d.com/3d-software/artec-studio> [Acedido a: 10 de dezembro de 2023].

Balasubramanian, M. (2013) *Composite Materials and Processing*. CRC Press. Disponível em: <https://books.google.pt/books?id=6rDMBQAAQBAJ>.

Barnett, T. (2023) *What is the Shoe Industry?* Disponível em: <https://www.wise-geek.com/what-is-the-shoe-industry.htm> [Acedido a: 18 de setembro de 2023].

Barreira-Pinto, R., Carneiro, R., Miranda, M., Guedes, R. M. (2023) 'Polymer-Matrix Composites: Characterising the Impact of Environmental Factors on Their Lifetime', *Materials*, 16(11), p. 3913. doi: 10.3390/ma16113913.

Bazli, M., Zhao, X. L., Jafari, A., Ashrafi, H., Raman, RK S., Bai, Y., Khezzadeh, H. (2021) 'Durability of glass-fibre-reinforced polymer composites under seawater and sea-sand concrete coupled with harsh outdoor environments', *Advances in Structural Engineering*, 24(6), pp. 1090–1109. doi: 10.1177/1369433220947897.

Birleanu, C., Pustan, M., Cioaza, M., Bere, P., Contiu, G., Dudescu, M. C., Filip, D. (2023) 'Tribo-Mechanical Investigation of Glass Fiber Reinforced Polymer Composites under Dry Conditions', *Polymers*, 15(12), p. 2733. doi: 10.3390/polym15122733.

BSI (2003) 'Plastics—Determination of flexural properties, EN ISO 178: 2003', 3, p. 28. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/1528083717736102>.

Cabezudo, T. R. (2022) 'Gestão de resíduos no setor eólico', pp. 1–5. Disponível em: <https://www.mapfreglobalrisks.com/pt-br/gerencia-riscos-seguros/estudos/gestao-de-residuos-no-setor-eolico/>.

Callister (2018) *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 10th edn, *Materials Science and Engineering - An Introduction*. 10th edn. Wiley. Disponível em: <https://books.google.pt/books?id=cgHevgEACAAJ>.

Campbell, F. C. (2010) *Structural Composite Materials*. ASM International. Disponível em: <https://books.google.pt/books?id=D3Wta8e07toC>.

Chatziparaskeva, G., Papamichael, I., Voukkali, I., Loizia, P., Sourkouni, G., Argirusis, C., Zorpas, A. A. (2022) 'End-of-Life of Composite Materials in the Framework of the Circular Economy', *Microplastics*, 1(3), pp. 377–392. doi: 10.3390/microplastics1030028.

Chawla, K. K. (2016) *Composite Materials: Science and Engineering*. Springer New York. doi: 10.1021/cen-v082n035.p034.

Clyne, T. W. and Hull, D. (2019) *An Introduction to Composite Materials*. Editado por: Cambridge University Press. Disponível em: <https://books.google.pt/books?id=4oKWDwAAQBAJ>.

Cousins, D. S., Suzuki, Y., Murray, R. E., Samaniuk, J. R., Stebner, A. P. (2019) 'Recycling glass fiber thermoplastic composites from wind turbine blades', *Journal of Cleaner Production*, 209, pp. 1252–1263. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.10.286.

Diez-Cañamero, B., Mendoza, J. M. F. (2023) 'Circular economy performance and carbon footprint of wind turbine blade waste management alternatives', *Waste Management*, 164(2022), pp. 94–105. doi: 10.1016/j.wasman.2023.03.041.

Eligüzel, İ. M., Özceylan, E. (2022) 'A bibliometric, social network and clustering analysis for a comprehensive review on end-of-life wind turbines', *Journal of Cleaner Production*, 380, p. 135004. doi: 10.1016/j.jclepro.2022.135004.

European Commission (2023) *Personal protective equipment (PPE)*. Disponível em: https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/mechanical-engineering/personal-protective-equipment-ppe_en [Acedido a: 18 de setembro de 2023].

Fazio, D., Boccarusso, L., Formisano, A., Viscusi, A., Durante, M. (2023) 'A Review on the Recycling Technologies of Fibre-Reinforced Plastic (FRP) Materials Used in Industrial Fields', *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(4), p. 851. doi: 10.3390/jmse11040851.

Fetting, C. (2020) 'The European Green Deal', *European Commission*, 53(9), p. 24. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52019DC0640&from=EN>.

Grand Protection Int, SL. (2022) *Types Of Safety Footwear: The Ultimate Guide*. Disponível em: <https://gpi.shoes/types-of-safety-footwear-the-ultimate-guide/> [Acedido a: 18 de setembro de 2023].

Hrynyk, R. (2022) *Protective footwear – requirements selection and ergonomics*. Disponível em: <https://oshwiki.osha.europa.eu/en/themes/protective-footwear-requirements-selection-and-ergonomics> [Acedido a: 18 de setembro de 2023].

Hsissou, R., Seghiri, R., Benzekri, Z., Hilali, M., Rafik, M., Elharfi, A. (2021) 'Polymer composite materials: A comprehensive review', *Composite Structures*, 262, p. 113640. doi: 10.1016/j.compstruct.2021.113640.

Iberdrola (2023a) *Recycling of wind blades | Recycling wind blades: a new challenge for wind energy*. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/reciclagem-pas-eolicas> [Acedido a: 18 de setembro de 2023].

Iberdrola (2023b) *Wind Power | What is wind energy, how does it turn into electricity, and what are its advantages?* Disponível em: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/energia-eolica> [Acedido a: 18 de setembro de 2023].

Instituto Pedro Nunes (2023) *Ensaio de dobragem - método por 3 pontos (materiais metálicos)*. Disponível em: <https://www.ipn.pt/laboratorio/LEDMAT/ensaio/63> [Acedido a: 10 de dezembro de 2023].

Jani, H. K., Singh Kachhwaha, S., Nagababu, G., Das, A. (2022) 'A brief review on recycling and reuse of wind turbine blade materials', *Materials Today: Proceedings*, 62, pp. 7124–7130. doi: 10.1016/j.matpr.2022.02.049.

Jani, S. P., Jose, A. S., Rajaganapathy, C., Khan, M. A. (2022) 'A polymer resin matrix modified by coconut filler and its effect on structural behavior of glass fiber-reinforced polymer composites', *Iranian Polymer Journal*, 31(7), pp. 857–867. doi: 10.1007/s13726-022-01042-y.

Janson, D., Newman, S. T., Dhokia, V. (2019) 'Next Generation Safety Footwear',

Procedia Manufacturing, 38, pp. 1668–1677. doi: 10.1016/j.promfg.2020.01.117.

Jensen, J. P. (2019) ‘Evaluating the environmental impacts of recycling wind turbines’, *Wind Energy*, 22(2), pp. 316–326. doi: 10.1002/we.2287.

Juntikka, M., Tränkle, T., Mattsson, C., Sott, R. (2018) ‘Circular economy and the management of end-of-life wind turbine blades’, pp. 1–20.

Kalusuraman, G., Kumaran, S. T., Balamurugan, K., Sivashanmugam, N., Sivaprakasam, P., Kurniawan, R., Ezhilmaran, V. (2023) ‘Vibration Studies on Fiber Reinforced Composites – a Review’, *Journal of Natural Fibers*, 20(1), pp. 1–10. doi: 10.1080/15440478.2022.2157361.

Kangishwar, S., Radhika, N., Sheik, A. A., Chavali, A., Hariharan, S. (2023) ‘A comprehensive review on polymer matrix composites: material selection, fabrication, and application’, *Polymer Bulletin*, 80(1), pp. 47–87. doi: 10.1007/s00289-022-04087-4.

Karavida, S., Nõmmik, R. (2015) ‘Waste Management of End-of-Service Wind Turbines’, p. 63.

Khalid, M. Y., Arif, Z. U., Ahmed, W., Arshad, H. (2022) ‘Recent trends in recycling and reusing techniques of different plastic polymers and their composite materials’, *Sustainable Materials and Technologies*, 31. doi: 10.1016/j.susmat.2021.e00382.

Korniejenko, K., Kozub, B., Bąk, A., Balamurugan, P., Uthayakumar, M., Furtos, G. (2021) ‘Tackling the Circular Economy Challenges—Composites Recycling: Used Tyres, Wind Turbine Blades, and Solar Panels’, *Journal of Composites Science*, 5(9), p. 243. doi: 10.3390/jcs5090243.

Krauklis, A. E., Karl, C. W., Gagani, A. I., Jørgensen, J. K. (2021) ‘Composite Material Recycling Technology—State-of-the-Art and Sustainable Development for the 2020s’,

Journal of Composites Science, 5(1), p. 28. doi: 10.3390/jcs5010028.

Lichtenegger, G., Rentizelas, A. A., Trivyza, N., Siegl, S. (2020) 'Offshore and onshore wind turbine blade waste material forecast at a regional level in Europe until 2050', *Waste Management*, 106, pp. 120–131. doi: 10.1016/j.wasman.2020.03.018.

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, pp. 858–874. doi: 10.1016/j.jmapro.2022.12.020.

Macroconsulting (2022) *Footwear Industry: Industry Analysis 2022 (MacroReports)*. Disponível em: <https://macroconsulting.pt/industria-do-calcado-analise-do-setor-2022-macroreports/> [Acedido em: 18 de setembro de 2023].

Maiti, S., Islam, M. R., Uddin, M. A., Afroj, S., Eichhorn, S. J., Karim, N. (2022) 'Sustainable Fiber-Reinforced Composites: A Review', *Advanced Sustainable Systems*, 6(11), p. 2200258. doi: 10.1002/adsu.202200258.

Majewski, P., Florin, N., Jit, J., Stewart, R. A. (2022) 'End-of-life policy considerations for wind turbine blades', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 164. doi: 10.1016/j.rser.2022.112538.

Manjunath, C. B., Srinivasa, C. V., Basavaraju, B., Manjunatha, G. B., Ashok, R. B. (2020) 'A Review on Tribological Behaviour of Natural Fiber Reinforced Polymer Composites', *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 925(1). doi: 10.1088/1757-899X/925/1/012011.

Megahed, M., Fathy, A., Morsy, D., Shehata, F. (2021) 'Mechanical Performance of glass/epoxy composites enhanced by micro- and nanosized aluminum particles', *Journal of Industrial Textiles*, 51(1), pp. 68–92. doi: 10.1177/1528083719874479.

Monjon, A., Santos, P., Valvez, S., Reis, P. N. B. (2022) 'Hybridization Effects on Bending and Interlaminar Shear Strength of Composite Laminates', *Materials*, 15(4), p. 1302. doi: 10.3390/ma15041302.

Mukherjee, G. S., Jain, A., Banerjee, M. (2023) 'Engineering Matrix Materials for Composites: Their Variety, Scope and Applications', *Fine Chemical Engineering*, pp. 13–45. doi: 10.37256/fce.4120232128.

Neto, F. L., Pardini, L. C. (2016) *Compósitos estruturais - ciência e tecnologia*. Editora Blucher. Disponível em: <https://books.google.pt/books?id=DS1dDwAAQBAJ>.

Neto, J. S. S., Queiroz, H. F. M., Aguiar, R. A. A., Banea, M. D. (2021) 'A Review on the Thermal Characterisation of Natural and Hybrid Fiber Composites', *Polymers*, 13(24), p. 4425. doi: 10.3390/polym13244425.

Ngo, T. D. (2020) *Composite and Nanocomposite Materials: From Knowledge to Industrial Applications*, *Composite and Nanocomposite Materials - From Knowledge to Industrial Applications*. IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.91285.

Parlamento Europeu e do Conselho da União Europeia (2016) 'Regulamento (UE) 2016/425', *Jornal Oficial da União Europeia*, 93, pp. 51–98. Disponível em: [http://www.act.gov.pt/\(pt-PT\)/CentroInformacao/DirectivasEuropeias/Documents/Regulamento UE 2016 425 do Parlamento Europeu que revoga a Diretiva 89 686 CEE.pdf](http://www.act.gov.pt/(pt-PT)/CentroInformacao/DirectivasEuropeias/Documents/Regulamento UE 2016 425 do Parlamento Europeu que revoga a Diretiva 89 686 CEE.pdf).

Paulsen, E. B., Enevoldsen, P. (2021) 'A Multidisciplinary Review of Recycling Methods for End-of-Life Wind Turbine Blades', *Energies*, 14(14), p. 4247. doi: 10.3390/en14144247.

Pereira, A., Shitsuka, D., Parreira, F., Shitsuka, R. (2018) *Método Qualitativo, Quantitativo ou Quali-Quantitativo, Metodologia da Pesquisa Científica*. Disponível em: https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/15824/Lic_Computacao_Metodologia-Pesquisa-Cientifica.pdf?sequence=1. [Acedido a: 28 de março de 2020].

Periasamy, K., Kandare, E., Das, R., Darouie, M., Khatibi, A. A. (2023) 'Interfacial Engineering Methods in Thermoplastic Composites: An Overview', *Polymers*, 15(2), p. 415. doi: 10.3390/polym15020415.

Prado, M. (2023) *Portugal foi um dos países europeus que instalaram menos eólicas no ano passado*. Disponível em: https://expresso.pt/economia/economia_energia/2023-02-28-Portugal-foi-um-dos-paises-europeus-que-instalaram-menos-eolicas-no-ano-passado-obc099a6.

Rahimizadeh, A., Kalman, J., Fayazbakhsh, K., Lessard, L. (2019) 'Recycling of fiberglass wind turbine blades into reinforced filaments for use in Additive Manufacturing', *Composites Part B: Engineering*, 175. doi: 10.1016/j.compositesb.2019.107101.

Rajak, D., Pagar, D., Menezes, P., Linul, E. (2019) 'Fiber-Reinforced Polymer Composites: Manufacturing, Properties, and Applications', *Polymers*, 11(10). doi: 10.3390/polym11101667.

Rajak, D. K., Wagh, P. H., Linul, E. (2021) 'Manufacturing Technologies of Carbon/Glass Fiber-Reinforced Polymer Composites and Their Properties: A Review', *Polymers*, 13(21). doi: 10.3390/polym13213721.

Rani, M., Choudhary, P., Krishnan, V., Zafar, S. (2021) 'A review on recycling and reuse methods for carbon fiber/glass fiber composites waste from wind turbine blades', *Composites Part B: Engineering*, 215. doi: 10.1016/j.compositesb.2021.108768.

Rathore, N., Panwar, N. L. (2023) 'Environmental impact and waste recycling technologies for modern wind turbines: An overview', *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 41(4), pp. 744–759. doi: 10.1177/0734242X221135527.

Reddy, S. S. P., Suresh, R., M.B., H., Shivakumar, B.P. (2021) 'Use of composite materials and hybrid composites in wind turbine blades', *Materials Today: Proceedings*,

46, pp. 2827–2830. doi: 10.1016/j.matpr.2021.02.745.

Rocha, R., Galvão, A. R., Marques, C. S., Mascarenhas, C., Braga, V. (2020) ‘Cooperation Networks and Embeddedness—The Case of the Portuguese Footwear Sector’, *Sustainability*, 12(22), p. 9612. doi: 10.3390/su12229612.

Santos, G. A. (2021) *Tecnologias Mecânicas: Materiais, Processos e Manufatura Avançada - Materiais, Processos e Manufatura Avançada*. Saraiva Educação S.A. Disponível em: <https://books.google.pt/books?id=9jwIEAAAQBAJ>.

Santos, P., Maceiras, A., Valvez, S., Reis, P.N.B. (2020) ‘Mechanical characterization of different epoxy resins enhanced with carbon nanofibers’, *Frattura ed Integrità Strutturale*, 15(55), pp. 198–212. doi: 10.3221/IGF-ESIS.55.15.

Santos, P., Maceiras, A., Reis, P. N. B. (2021) ‘Influence of manufacturing parameters on the mechanical properties of nano-reinforced CFRP by carbon nanofibers’, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1126(1), p. 012012. doi: 10.1088/1757-899X/1126/1/012012.

Santos, P. S. P. dos (2010) Resistência ao Impacto de Compósitos Híbridos.

Sathishkumar, T., Satheeskumar, S., Naveen, J. (2014) ‘Glass fiber-reinforced polymer composites – a review’, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33(13), pp. 1258–1275. doi: 10.1177/0731684414530790.

Shehab, E., Meirbekov, A., Amantayeva, A., Tokbolat, S. (2022) ‘Cost Modelling for Recycling Fiber-Reinforced Composites: State-of-the-Art and Future Research’, *Polymers*, 15(1), p. 150. doi: 10.3390/polym15010150.

Sicomín (2019) ‘SR 8100 / SD 882X Infusion System’, 33(0), pp. 1–9. Disponível em: www.sicomín.com.

Silva, S. V. da (2019) *Ellen MacArthur Foundation e o “Diagrama Borboleta”*, *Blog Cinética Circular*. Disponível em: <https://cinecircular.wordpress.com/2019/10/30/ellen-macarthur-foundation-e-o-diagrama-borboleta/> [Acedido a: 5 de setembro de 2023].

Sommer, V., Stockschröder, J., Walther, G. (2020) ‘Estimation of glass and carbon fiber reinforced plastic waste from end-of-life rotor blades of wind power plants within the European Union’, *Waste Management*, 115, pp. 83–94. doi: 10.1016/j.wasman.2020.06.043.

Son, J.-Y., Ma, K. (2017) ‘Wind Energy Systems’, *Proceedings of the IEEE*, 105(11), pp. 2116–2131. doi: 10.1109/JPROC.2017.2695485.

Tang, X., Yan, X. (2020) ‘A review on the damping properties of fiber reinforced polymer composites’, *Journal of Industrial Textiles*, 49(6), pp. 693–721. doi: 10.1177/1528083718795914.

Tri-Dung Ngo (2020) ‘Introduction to Composite Materials’, in Tri-Dung Ngo (ed.) *Composite and Nanocomposite Materials*. IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.91285.

Valente, M., Rossitti, I., Sambucci, M. (2023) ‘Different Production Processes for Thermoplastic Composite Materials: Sustainability versus Mechanical Properties and Processes Parameter’, *Polymers*, 15(1), p. 242. doi: 10.3390/polym15010242.

Wang, W. C., Zhou, B., Xu, S.H., Yang, Z.M., Zhang, Q.Y. (2019) ‘Recent advances in soft optical glass fiber and fiber lasers’, *Progress in Materials Science*, 101, pp. 90–171. doi: 10.1016/j.pmatsci.2018.11.003.

WindEurope (2020) ‘Accelerating Wind Turbine Blade Circularity’, *Thematic reports*, pp. 11–13.

WindEurope (2023a) *Wind Energy Basics*. Disponível em: <https://windeurope.org/about-wind/wind-basics/> [Acedido a: 18 de setembro de 2023].

WindEurope (2023b) *Wind energy today* | *WindEurope*. Disponível em: <https://windeurope.org/about-wind/wind-energy-today/> [Acedido a: 5 de setembro de 2023].

Yang, Y., Boom, R., Irion, B., van Heerden, D.-J., Kuiper, P., Wit, H. (2012) 'Recycling of composite materials', *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 51, pp. 53–68. doi: 10.1016/j.cep.2011.09.007.

Zweben, C. (2015) *Mechanical Engineers' Handbook, Volume 1: Materials and Engineering Mechanics*. Wiley. Disponível em: https://books.google.pt/books?id=%5C_cN9BgAAQBAJ.

ZwickRoell (2023) *Resistência ao cisalhamento interlaminar (ILSF) / Interlaminar shear strength (ILSS) conforme ASTM D2344*. Disponível em: <https://www.zwickroell.com/pt/setores-da-industria/compositos/resistencia-interlaminar-ao-cisalhamento-ilss/> [Acedido a: 10 de dezembro de 2023].