



Reciclagem Mecânica de Resíduos Poliméricos Industriais: Um Caminho para a Sustentabilidade num Contexto de Economia Circular

Laura Sofia Santos Sardinha

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

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

outubro de 2025

Declaração de Integridade

Eu, Laura Sofia Santos Sardinha, que abaixo assino, estudante com o número de inscrição M13321 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 03 /10 /2025

Dedicatória

Às duas Mulheres que serão sempre um exemplo a seguir:

À Avó Mercês, o exemplo presente e constante de força, trabalho, resiliência e serviço.

À Avó Maria, o exemplo de amor, de fé e de carinho, do qual sinto falta todos os dias.

Agradecimentos

Ao longo do meu percurso, com todos os momentos bons e menos bons, tornei-me consciente que, *“na nossa existência, mais do que uma pessoa fitou-nos com um olhar puro, gratuitamente. [...] Pessoas que desempenharam o seu papel além da medida exigida pelo dever. E eles fizeram surgir em nós a gratidão”* (Papa Francisco). Por isso, quero agradecer:

Àquela que foi casa nos últimos 5 anos e que me formou não apenas academicamente, mas como pessoa, consciente que o mundo é mais do que aquilo que temos diante de nós: à Universidade da Beira Interior. Aos docentes e colaboradores que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a minha formação académica, especialmente ao Departamento de Eletromecânica pela disponibilidade dos laboratórios e equipamentos para que fosse possível alcançar o objetivo proposto nesta dissertação.

À empresa WD Retail – Soluções para Ponto de Venda, Lda., que forneceu os resíduos e materiais das faces, incentivando positivamente a realização do caso prático da presente dissertação. Em especial, à minha (para sempre) Carolina Barata pelo apoio incondicional e prontidão para ajudar em tudo o que fosse necessário.

Ao Engenheiro Carlos Coelho, do Instituto Politécnico de Abrantes, pela diligência e disponibilidade demonstrada na realização dos ensaios de impacto de baixa velocidade.

De modo particular, aos meus orientadores que, na sua simplicidade, me mostraram que, independentemente do rumo, há sempre caminho a seguir. À Professora Doutora Tânia Miranda Lima, pelo excelente acompanhamento, incentivo, profissionalismo, pela exigência e pela partilha de conhecimentos, sem os quais esta dissertação não teria sido possível. Agradeço o apoio nos momentos de dúvida e de incerteza, nunca deixando de acreditar (e de me lembrar) que sou capaz de mais, se assim o quiser e, sem dúvida, por ser uma referência.

Ao Professor Paulo Santos, por me dar a conhecer o imenso mundo dos materiais e por partilhar comigo o seu gosto pelos materiais compósitos e tudo o que os envolve. Além disso, agradeço pela presença constante em todos os momentos e, particularmente, pela orientação em todas as etapas do laboratório, incentivando-me sempre a ir mais além do que está à vista e a nunca desistir do que pretendemos alcançar.

Com carinho, à Dra. Filomena Simões, o acompanhamento nestes últimos dois anos, sem o qual o meu percurso não teria sido o mesmo. Agradeço as palavras certas em cada momento, mesmo que duras, mas acima de tudo amigas, que, sem dúvida, contribuíram para aquilo que sou hoje.

Aos meus pais, Maria José e Raul Jorge, por serem os verdadeiros impulsionadores do meu caminho. Eles que deram tudo para que eu pudesse chegar até aqui, sem nunca duvidarem que um dia eu iria chegar mais longe. Espero, um dia, conseguir deixá-los orgulhosos e retribuir tudo aquilo que fizeram por mim. Além deles, não posso deixar de agradecer o incentivo e o apoio incondicional daquele que foi o meu primeiro melhor amigo e companheiro de sempre, o meu irmão António.

Ao João Pedro, pelo apoio incansável, pela presença em todas as horas, pelo carinho e pela paciência nos momentos mais difíceis, mas sobretudo, por acreditar sempre em mim, aconteça o que acontecer. Agradeço, também, à Raquel, ao João Manuel e à Catarina por serem, sobretudo, casa, “fora de casa”.

Aos meus padrinhos, Anabela e António Manuel, aos meus primos, João e Marta, e a toda a minha família pelo incentivo e força ao longo deste percurso.

À maior e melhor surpresa do Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial: à Ângela, a verdadeira companheira de curso que se fez presente em todos os momentos e em todas as horas. A que me ensinou a ser mais, a fazer mais e sobretudo, a ser melhor. Grata pela tua amizade.

Às minhas companheiras e amigas de sempre, Diana, Bárbara, Catarina, Joana e àquela que é como se fosse de sempre, Ana Martins, o meu mais sincero muito obrigada. Mesmo longe, sinto que estiveram sempre perto.

A todos os que de uma forma ou de outra fizeram parte do meu percurso, estou-vos para sempre grata.

Resumo

O acelerado e elevado consumo da sociedade atual, caracterizado pela excessiva utilização de recursos e de materiais, impulsionou a integração e procura de estratégias mais sustentáveis, que permitam a transformação dos atuais modelos de economia linear em “sistemas-fechados” que respondam positivamente às exigências dos modelos de economia circular, atualmente contemplados nas estratégias e políticas europeias e nacionais que visam garantir uma correta e eficiente reciclagem, reutilização e utilização sustentável dos resíduos industriais gerados, nomeadamente dos resíduos poliméricos industriais que, podem ser incorporados como reforço de materiais compósitos.

Contribuindo para esta mudança de paradigma, a presente dissertação tem como principal objetivo o desenvolvimento de um material compósito, através da seleção, processamento e aplicação de resíduos poliméricos industriais, tendo sido produzidos e testados mecanicamente dois painéis sanduíche de núcleos de matriz de poliéster e de epóxi verde, reforçados com 30 wt. % de partículas de PETG de tamanhos [0,300;0,600]mm que revelaram valores de tensão de flexão, de rigidez e de deformação ligeiramente similares, salientando-se a superior tensão de flexão para o material de matriz de epóxi verde ($39,68 \pm 1,91$ MPa) e o superior valor de rigidez do material de matriz de poliéster ($4,38 \pm 0,22$ GPa).

A sua incorporação como núcleo dos painéis sanduíche finais, juntamente com as faces de HIPS, permitiu obter para o painel sanduíche de núcleo de matriz de poliéster os valores de tensão de flexão e de rigidez de $25,19 \pm 2,00$ MPa e $10,51 \pm 1,08$ Gpa, respetivamente, sendo estes inferiores em comparação com os valores do painel sanduíche de matriz de epóxi verde ($29,84 \pm 1,10$ MPa e $14,31 \pm 1,31$ GPa para a tensão de flexão e rigidez, respetivamente).

Adicionalmente, após os ensaios de impacto de baixa velocidade, o painel sanduíche de matriz de poliéster evidenciou menor capacidade de restituição de energia em comparação com o painel sanduíche de matriz de epóxi verde, demonstrando, no entanto, superior resistência ao impacto.

Numa fase subsequente, o painel sanduíche de matriz de epóxi verde evidenciou um custo de produção 38,62% superior ao custo do painel sanduíche de matriz de poliéster, justificando, para ambos os materiais, as respetivas aplicações e valorização dos mesmos.

Por conseguinte, em concordância com a hierarquia de resíduos, os painéis sanduíche produzidos configuram uma possível solução mais sustentável que garanta uma adequada reciclagem e reaproveitamento dos resíduos gerados, através da incorporação da sua produção no atual fluxo produtivo de transformação de produtos poliméricos, contribuindo para a criação de sistemas de Economia Circular, na medida em que os resíduos utilizados seriam depositados em aterros caso não fossem utilizados como ponto de partida de novos produtos.

Palavras-chave

Sustentabilidade; Economia Circular; Gestão de Resíduos; Resíduos Poliméricos Industriais; Compósitos; Painéis Sanduíche; Matriz de Poliéster; Matriz de Epóxi Verde.

Abstract

The accelerated and high consumption in today's society, characterised by excessive use of resources and materials, has driven the integration and search for more sustainable strategies that enable the transformation of current linear economy models into "closed systems" that respond positively to the requirements of circular economy models, currently include in European an national strategies and policies aimed at ensuring the correct and efficient recycling, reuse and sustainable use of industrial waste, particularly industrial polymer waste, which can be incorporated as reinforcement of composite materials.

Contributing to this paradigm shift, the main objective of this dissertation is to develop a composite material through the selection, processing and application of industrial polymer waste. Two sandwich panels with polyester and green epoxy matrix cores, reinforced with 30 wt.% PETG particles of sizes [0.300; 0.600]mm, which revealed slightly similar values of flexural strength, stiffness and deformation, with the green epoxy matrix material having a higher flexural strength (39.68 ± 1.91 MPa) and the polyester matrix material having a higher stiffness value (4.38 ± 0.22 GPa).

Their incorporation as the core of the final sandwich panels, together with the HIPS faces, allowed the polyester matrix core sandwich panel to obtain flexural strength and stiffness values of 25.19 ± 2.00 Mpa and 10.51 ± 1.08 GPa, respectively, which are lower than the values for the green epoxy matrix sandwich panel (29.84 ± 1.10 MPa e 14.31 ± 1.31 Gpa for flexural strength and stiffness, respectively).

Additionally, after low-speed impact tests, the polyester matrix sandwich panel showed lower energy recovery capacity compared to the green epoxy matrix sandwich panel, demonstrating, however, higher impact resistance.

In a subsequent phase, the green epoxy matrix sandwich panel showed a production cost 38.62% higher than the cost of the polyester matrix sandwich panel, justifying, for both materials, their respective applications and value.

Therefore, in accordance with the waste hierarchy, the sandwich panels produced represent a potentially more sustainable solution, by incorporating their production into the current production flow of polymer product transformation, contributing to the

creation of Circular Economy systems, insofar as the waste used would be deposited in landfills if it were not used as a starting point for new products.

Keywords

Sustainability; Circular Economy; Waste Management; Industrial Polymeric Waste; Composites; Sandwich Panels; Polyester Matrix; Green Epoxy Matrix.

Índice

Capítulo 1.....	1
Introdução.....	1
1.1 Contextualização do Trabalho Desenvolvido	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Metodologia.....	3
1.4 Estrutura da Dissertação	4
Capítulo 2	7
Sustentabilidade.....	7
2.1 Definição e Conceitos Associados.....	7
2.1.1 Pilares da Sustentabilidade	8
2.1.2 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável	10
2.1.3 Pacto Ecológico Europeu	14
2.2 Economia Circular.....	18
2.2.1 Princípios da Economia Circular.....	21
2.2.2 Desafios e Perspetivas Atuais	23
Capítulo 3	27
Produção e Gestão de Resíduos.....	27
3.1 Gestão de Resíduos.....	27
3.2 Classificação de Resíduos	30
3.3 Política de Gestão de Resíduos na União Europeia e em Portugal	33
Capítulo 4	45
Reciclagem de Resíduos Industriais.....	45
4.1 Resíduos Poliméricos Industriais.....	45
4.2 Importância da Reciclagem de Resíduos Poliméricos na Economia Circular	52
4.3 Técnicas de Reciclagem	54
4.3.1 Reciclagem Mecânica	57
4.3.2 Reciclagem Química	59

4.4	Desafios da Reciclagem de Resíduos Poliméricos.....	60
Capítulo 5.....		65
Materiais Compósitos.....		65
5.1	Definição e Constituição dos Materiais Compósitos.....	65
5.2	Classificação dos Materiais Compósitos.....	68
5.2.1	Classificação em Função da Matriz	68
5.2.2	Classificação em Função do Reforço	74
5.3	Tipos de Processos de Fabrico.....	84
5.4	Aplicações de Materiais Compósitos.....	90
Capítulo 6		95
Materiais e Métodos		95
6.1	Separação e Análise Granulométrica dos Resíduos Poliméricos Industriais..	95
6.1.1	Resíduos de PETG	96
6.1.2	Resíduos Mistos de PETG/PVC/PMMA.....	99
6.2	Matrizes de Controlo: Poliéster e Epóxi Verde	104
6.2.1	Provetes das Matrizes de Controlo	108
6.3	Núcleo do Painel Sanduíche.....	109
6.3.1	Procedimento Experimental: Ensaios Mecânicos.....	112
6.3.2	Procedimento Experimental: Provetes.....	115
6.4	Faces do Painel Sanduíche	116
6.4.1	Procedimento Experimental: Ensaios Mecânicos.....	116
6.4.2	Procedimento Experimental: Provetes.....	119
6.5	Painel Sanduíche	119
6.5.1	Procedimento Experimental: Ensaios Mecânicos.....	120
6.5.2	Procedimento Experimental: Provetes.....	126
Capítulo 7.....		129
Apresentação e Discussão de Resultados		129
7.1	Ensaios de Flexão em Três Pontos do Núcleo	129
7.2	Ensaios de Tração das Faces de HIPS.....	139

7.3	Ensaio de Flexão em Três Pontos do Painel Sanduíche	141
7.4	Ensaio de Impacto de Baixa Velocidade da Sanduíche	146
7.5	Custos de Produção	156
7.5.1	Perspetiva de Aplicações	158
7.5.2	Projeção Industrial e Análise do Ciclo de Vida.....	159
Capítulo 8		165
Conclusões.....		165
8.1	Considerações finais	165
8.2	Limitações	167
8.3	Sugestões para Trabalhos Futuros	168
Bibliografia		171
Anexo I.....		197
Resultados do Ensaio de Flexão em Três Pontos do Núcleo.....		197
Anexo II		201
Resultados do Ensaio de Impacto de Baixa Velocidade do Painel Sanduíche		201

Lista de Figuras

Figura 1 - Três Dimensões da Sustentabilidade (Adaptado de Huang and Akbari, 2024)	9
Figura 2 - Os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (DGE, 2015)	10
Figura 3 - Disponibilidade dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) para Portugal (INE, 2024).....	13
Figura 4 - Focos de Atuação do Pacto Ecológico Europeu (Adaptado de BCSD Portugal, 2024)	16
Figura 5 - Dez pilares do Pacto Ecológico Europeu (Adaptado de BCSD Portugal, 2024)	16
Figura 6 – Fluxo Cíclico do Modelo de Economia Circular (Adaptado de Parlamento Europeu, 2024a).....	19
Figura 7 - Princípios da Economia Circular (Marquina et al., 2022; Bushuyev et al., 2023)	22
Figura 8 - Hierarquia dos Resíduos (Adaptado de APA, 2021b)	28
Figura 9 - Informações para a adequada Classificação de Resíduos (Adaptado de APA, 2020)	32
Figura 10 - Principais Características inerentes à visão do PERNU 2030 (Adaptado de Presidência do Conselho de Ministros, 2023).....	35
Figura 11 - Percentagem de resíduos gerados na UE, em 2022, por atividade económica (Adaptado de Eurostat, 2024).....	37
Figura 12- Percentagem de Resíduos Setoriais gerados em Portugal, por ramo de atividade (Adaptado de INE - Instituto Nacional de Estatística, 2023a)	39
Figura 13 - Venda de resíduos e/ou materiais reciclados, por atividade económica, em 2023 (Adaptado de INE - Instituto Nacional de Estatística, 2023a).....	41
Figura 14 - Tratamento de resíduos por tipo de valorização e eliminação na UE, em 2022 (Adaptado de Eurostat, 2024).....	43
Figura 15 - Classificação dos Polímeros (Adaptado de Zanchin and Leone, 2021).....	46
Figura 16 - Relação entre a recuperação, reciclagem e reutilização com as diferentes fases da cadeia de valor (Adaptado de Fayshal, 2024)	53
Figura 17 - Hierarquia Geral para a Reciclagem de Polímeros (Adaptado de Schwarz et al., 2021)	55
Figura 18 - Etapas da Reciclagem Mecânica de Resíduos Poliméricos (Adaptado de Kijo-Kleczkowska and Gnatowski, 2022; Chen and Hu, 2024).....	57

Figura 19 - Processos de Reciclagem Química (Adaptado de Shamsuyeva and Endres, 2021; Kijo-Kleczkowska and Gnatowski, 2022; Theofanidis et al., 2025).....	60
Figura 20 - Constituintes dos Materiais Compósitos (Adaptado de Callister and Rethwisch, 2018; Hsissou et al., 2021).....	66
Figura 21 - Representação das diferentes geometrias das partículas da fase dispersa que podem influenciar as propriedades dos materiais compósitos (Adaptado de Callister and Rethwisch, 2018).....	67
Figura 22 - Vantagens dos Materiais Compósitos (Adaptado de Khan et al., 2024)	67
Figura 23 - Classificação dos materiais compósitos em função da matriz (Adaptado de Sumithra et al., 2023).....	69
Figura 24 - Estruturas moleculares de matrizes termoplásticas e termoendurecíveis (Adaptado de Huang et al., 2021).....	71
Figura 25 - Classificação dos materiais compósitos em função do reforço (Adaptado de Callister and Rethwisch, 2018; Sumithra et al., 2023)	75
Figura 26 - Materiais compósitos reforçados com partículas: a) Partículas de grande dimensão; b) Dispersão (Adaptado de Egbo, 2021).....	76
Figura 27 - Orientação das fibras: a) contínuas e alinhadas; b) descontínuas e alinhadas; c) descontínuas e orientadas aleatoriamente (Callister and Rethwisch, 2018)	79
Figura 28 - Tipos de Compósitos Laminados: a) Unidirecional; b) Camadas Cruzadas; c) Camadas Angulares; d) Multidirecionais (Callister and Rethwisch, 2018)	82
Figura 29 - Representação gráfica de um Painel Sanduíche (Adaptado de Callister and Rethwisch, 2018).....	83
Figura 30 – Principais Processos de Fabricos de Materiais Compósitos (Adaptado de Middleton, 2016; Callister and Rethwisch, 2018; McIlhagger, Archer and McIlhagger, 2020; Al-Furjan et al., 2022; Sumithra et al., 2023; Khan et al., 2024; Xu et al., 2025)	84
Figura 31 - Tendência de Evolução dos Processos de Fabrico de Materiais Compósitos (Adaptado de Soni et al., 2024).....	88
Figura 32 - Principais aplicações dos materiais compósitos (Adaptado de Karim et al., 2023; De et al., 2024; Witten and Mathes, 2024).....	91
Figura 33 - Aplicações dos materiais compósitos termoendurecíveis e termoplásticos (Adaptado de Witten and Mathes, 2024).....	92
Figura 34 - Procedimento de Separação dos Resíduos de PETG: a) Aspeto dos resíduos de PETG; b) Amostra de PETG testada (300g); c) Peneiração do PETG; d) Resíduos de PETG separados por tamanhos (mm).....	96
Figura 35 - Gráfico de Distribuição Granulométrica dos resíduos poliméricos industriais de PETG.....	98

Figura 36 - Imagens SEM das partículas de PETG: a) Dimensão das partículas da amostra de [1,18; 2,36[mm; b) Dimensão das partículas da amostra de [0,300; 0,600[mm	99
Figura 37 - Processo de Humidificação dos Resíduos mistos de PETG/PVC/PMMA: a) Aspetto inicial dos resíduos; b) Humidificação dos resíduos com água; c) Separação dos Resíduos da água; d) Secagem dos resíduos (estufa 40°C)	101
Figura 38 - Procedimento de Separação dos Resíduos mistos de PETG/PVC/PMMA: a) Aspetto da mistura parcialmente seca; b) Amostra de PETG/PVC/PMMA testada (300g); c) Peneiração do PETG/PVC/PMMA; d) Resíduos de PETG/PVC/PMMA separados por tamanhos (mm)	102
Figura 39 - Gráfico de Distribuição Granulométrica dos resíduos poliméricos industriais de PETG/PVC/PMMA	103
Figura 40 - Imagens SEM das partículas de PETG/PVC/PMMA: a) Dimensão das partículas da amostra de [1,18; 2,36[mm; b) Dimensão das partículas da amostra de [0,300; 0,600[mm	104
Figura 41 - Etapas do Fabrico das Matrizes de Controlo (Autoria Própria)	106
Figura 42 - Matrizes de Controlo: a) Poliéster; b) Epóxi Verde	108
Figura 43 - Processo de Corte dos Provetes: a) Equipamento Struers Accutom 2; b) Corte da matriz; c) Corte dos Provetes	109
Figura 44 - Processo de fabrico dos materiais compósitos (Autoria Própria)	110
Figura 45 - Exemplo de materiais compósitos de matriz poliéster, reforçados com partículas de PETG e de PETG/PVC/PMMA	111
Figura 46 - Exemplo de materiais compósitos de matriz epóxi verde, reforçados com partículas de PETG e de PETG/PVC/PMMA	112
Figura 47 - Ilustração do Equipamento Utilizado no Ensaio de Flexão em três pontos dos materiais compósitos para a constituição do núcleo (Autoria própria baseado na Norma BS EN ISO 178:2019)	113
Figura 48 - Curva Típica de tensão de flexão, σ_f , em função da deformação, ϵ_f (Adaptado de BSI, 2019)	113
Figura 49 - Ilustração do equipamento utilizado no ensaio mecânico de tração (Autoria própria baseado na ASTM D638-14)	117
Figura 50 - Curvas tensão-deformação: a) curvas típicas dos ensaios de tração; b) curva típica de um polímero plástico (Adaptado de ASTM, 2014; Callister and Rethwisch, 2020)	118
Figura 51 - Representação das dimensões dos provetes de HIPS (Adaptado de ASTM, 2014)	119
Figura 52 - Processo de Fabrico dos Painéis Sanduíche (Autoria Própria)	120

Figura 53 - Aparência do Painel Sanduíche: núcleo e faces de HIPS (Autoria Própria)	120
Figura 54 - Ilustração do Equipamento Utilizado no Ensaio de Flexão em três pontos dos painéis sanduíche (Adaptado de ASTM, 2006).....	121
Figura 55 - Ilustração da Máquina de Impacto (Autoria Própria)	123
Figura 56 - Curvas Típicas obtidas dos ensaios de impacto: a) gráfico força-tempo, energia-tempo, deflexão-tempo; b) gráfico força-deflexão (Adaptado de Shah et al., 2019).....	124
Figura 57 - Corte dos Provetes dos Painéis Sanduíches (Autoria própria)	126
Figura 58 - Curvas Representativas de tensão-deformação de flexão dos materiais compósitos reforçados com partículas de PETG de [0,300; 0,600[mm: a) Matriz Poliéster; b) Matriz Epóxi Verde	130
Figura 59 - Curvas Representativas de tensão-deformação de flexão dos materiais compósitos reforçados com partículas de PETG/PVC/PMMA de [0,300; 0,600[mm: a) Matriz Poliéster; b) Matriz Epóxi Verde	132
Figura 60 - Comparação entre as percentagens em peso de partículas de reforço e a tensão de flexão máxima: a) Matriz Poliéster; b) Matriz Epóxi Verde	133
Figura 61 - Comparação entre as percentagens em peso de partículas de reforço e a rigidez: a) Matriz Poliéster; b) Matriz Epóxi Verde	134
Figura 62 - Comparação entre as percentagens em peso de partículas de reforço e a deformação: a) Matriz Poliéster; b) Matriz Epóxi Verde	134
Figura 63 - Imagem SEM do material compósito de matriz poliéster reforçado com 20 wt. % de partículas de PETG de tamanhos [1,18; 2,36[mm	136
Figura 64 - Curvas tensão-deslocamento dos provetes de HIPS	139
Figura 65 - Curva representativa tensão-deslocamento do HIPS.....	140
Figura 66 - Identificação dos primeiros danos e da zona de fratura do provete de HIPS	141
Figura 67 - Curvas de tensão-deformação dos Painéis Sanduíche: a) Núcleo de Matriz Poliéster; b) Núcleo de Matriz Epóxi Verde	142
Figura 68 - Comparação entre os valores de rigidez dos núcleos e dos painéis sanduíche finais	143
Figura 69 - Modos de Falha dos Painéis Sanduíche (Ensaio de Flexão em Três Pontos): a) Núcleo de Matriz Poliéster; b) Núcleo de Matriz Epóxi Verde	146
Figura 70 - Curvas Representativas Energia vs. Tempo: a) Núcleo de Matriz Poliéster; b) Núcleo de Matriz Epóxi Verde.....	147

Figura 71 - Comparação entre as sanduíches de núcleos de Matriz Poliéster e de Matriz Epóxi Verde para a energia de impacto de 2J: a) Curva Representativa Força-Tempo; b) Curva Representativa Força-Deslocamento.....	148
Figura 72 - Identificação dos Picos de Força registados para a energia de impacto de 2J	149
Figura 73 - Identificação dos danos ocorridos nas sanduíches para a energia de impacto de 2J: a) Núcleo de Matriz Poliéster; b) Núcleo de Matriz Epóxi Verde.....	150
Figura 74 - Identificação dos deslocamentos máximos registados para a energia de impacto de 2J	150
Figura 75 - Comparação entre a Energia restituída e a Energia de Impacto	153
Figura 76 - Comparação entre o IBS e a Energia de Impacto	154
Figura 77 – Danos ocorridas nas faces exteriores dos painéis sanduíche para a energia de impacto de 3J: a) Núcleo de Matriz Poliéster; b) Núcleo de Matriz Epóxi Verde.....	155
Figura 78 - Identificação dos danos internos ocorridos nas sanduíches para a energia de impacto de 3J: a) Núcleo de Matriz Poliéster; b) Núcleo de Matriz Epóxi Verde.....	156
Figura 79 - Fluxo Produtivo com incorporação da produção dos Painéis Sanduíche...	160
Figura 80 - Curvas representativas de tensão-deformação dos materiais compósitos de matriz poliéster.....	197
Figura 81 - Curvas representativas de tensão-deformação dos materiais compósitos de matriz epóxi verde	198
Figura 82 - Comparações entre as percentagens em peso de partículas com as propriedades de flexão (tensão de flexão, rigidez e deformação) dos materiais compósitos de matriz poliéster.....	199
Figura 83 - Comparações entre as percentagens em peso de partículas com as propriedades de flexão (tensão de flexão, rigidez e deformação) dos materiais compósitos de matriz epóxi verde	200
Figura 84 – Curvas representativas Energia vs. Tempo das várias energias de impacto em estudo	201
Figura 85 - Curvas representativas Força vs. Tempo das várias energias de impacto em estudo	201
Figura 86 – Curvas representativas Força vs. Deslocamento das várias energias de impacto em estudo	202
Figura 87 - Gráfico Tempo de Contacto vs. Energia	202
Figura 88 - Gráfico Força máxima vs. Energia	203
Figura 89 – Gráfico Deslocamento máximo vs. Energia.....	203
Figura 90 - Gráfico Energia Restituída vs. Energia	204

Lista de Tabelas

Tabela 1- Os 5 Princípios dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (Rede para o Desenvolvimento, 2020)	11
Tabela 2 - Motivações Europeias da transição para uma Economia Circular (Parlamento Europeu, 2024a).....	21
Tabela 3 - Apresentação de casos de estudo no âmbito da Economia Circular	24
Tabela 4 - Divisão e Descrição dos diferentes tipos de resíduos (Adaptado de APA, 2021e e APA, 2021f).....	30
Tabela 5 - Planos no âmbito dos Resíduos em Portugal (Adaptado de APA, 2021b)	34
Tabela 6 - Medidas Específicas do PERNU 2030 para a Prevenção e Gestão de Resíduos Não Urbanos (Adaptado de Presidência do Conselho de Ministros, 2023).....	36
Tabela 7 – Identificação, Descrição e Propriedades dos Plásticos (Adaptado de Sociedade Ponto Verde, 2020; Fayshal, 2024)	47
Tabela 8 - Propriedades Mecânicas e Físicas dos polímeros PVC, PETG, HIPS e PMMA	51
Tabela 9 - Propriedades das matrizes termoendurecíveis: resina epóxi e resina de poliéster	72
Tabela 10 - Processos de Fabrico de Materiais Compósitos (Middleton, 2016; Callister and Rethwisch, 2018; McIlhagger, Archer and McIlhagger, 2020; Al-Furjan et al., 2022; Sumithra et al., 2023; Yadav and Schledjewski, 2023; Carosella et al., 2024; Khan et al., 2024; Xu et al., 2025).....	85
Tabela 11 – Quantidades de resíduos de PETG (por tamanhos) e respetivas percentagens relativas e acumuladas	97
Tabela 12 - Quantidades de resíduos de PETG/PVC/PMMA (por tamanhos) e respetivas percentagens relativas e acumuladas	103
Tabela 13 - Propriedades das Matrizes de Resina de Poliéster Grouht e SR GreenEpoxy , segundo as fichas técnicas dos produtos (Sicomín - Epoxy Systems, 2016; Grouht - Soluções Químicas, Lda., 2019).....	105
Tabela 14 - Dimensões dos provetes dos materiais compósitos, segundo a Norma BS EN ISO 178:2019	115
Tabela 15 - Dimensões dos provetes dos Painéis Sanduíche segundo a Norma ASTM C393/C393M-06	127
Tabela 16 - Designações atribuídas aos materiais compósitos produzidos.....	129
Tabela 17 - Resultados Médios dos Ensaios de Flexão em Três Pontos dos Materiais Compósitos Fabricados	137

Tabela 18 - Resultados do Ensaio de Flexão em Três Pontos dos Painéis Sanduíche ..	144
Tabela 19 - Valores Médios do Ensaio de Impacto de Baixa Velocidade	151
Tabela 20 - Custos de Produção dos Painéis Sanduíche (valores com IVA à taxa legal em vigor).....	157
Tabela 21 - Identificação dos desafios, dos impactes e das oportunidades da produção dos painéis sanduíche.....	162

Lista de Acrónimos

3 P's	<i>People, Planet and Profit</i>
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
ACV	Análise do Ciclo de Vida
AFP	<i>Automated Fiber Placement</i>
APA	Agência Portuguesa do Ambiente
ATL	<i>Automated Tape Laying</i>
CCDR	Comissões de Coordenação e Desenvolvimento Regional
CMC	Compósitos de Matriz Cerâmica
CMM	Compósitos de Matriz Metálica
CMP	Compósitos de Matriz Polimérica
DQR	Diretiva Quadro de Resíduos
EPI's	Equipamentos de Proteção Individual
EPS	Poliestireno Expandido
GEE	Gases Efeito de Estufa
GPa	Giga Pascal
HIPS	<i>High-Impact Polystyrene</i>
HRR	<i>Hardness Rockwell R</i>
HSD	<i>Hardness shore D</i>
IBS	<i>Impact Bending Stiffness</i>
INE	Instituto Nacional de Estatística
IRC	Imposto sobre o Rendimento de Pessoas Coletivas
LER	Lista Europeia de Resíduos
LRT	Limite de Resistência à Tração
MO	Mão de obra
MP	Matéria-prima
MPa	Mega Pascal
ODM	Objetivos de Desenvolvimento do Milénio
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis
ONU	Organização das Nações Unidas
OP	Objetivos Operacionais
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade

PEE	Pacto Ecológico Europeu
PEEK	Poliéter-eter-cetona
PEI	Polieterimida
PERH	Plano Estratégico dos Resíduos Hospitalares
PERNU	Plano Estratégico para os Resíduos Não Urbanos
PERSU	Plano Estratégico para os Resíduos Urbanos
PESGRI	Plano Estratégico de Gestão dos Resíduos Industriais
PET	Politereftalato de etileno
PETG	Polietileno tereftalato glicol
PIB	Produto Interno Bruto
PMMA	Polimetilmetacrilato
PNAPRI	Plano Nacional de Prevenção de Resíduos Industriais
PNGR	Plano Nacional de Gestão de Resíduos
POPs	Poluentes Orgânicos Persistentes
PP	Polipropileno
PPS	Polissulfeto de fenileno
PS	Poliestireno
PVC	Policloreto de Vinilo
RGGR	Regime Geral de Gestão de Resíduos
RPM	Rotações Por Minuto
RTM	<i>Resin Transfer Molding</i>
SEM	<i>Scanning Electron Microscopy</i>
Tg	Temperatura de Transição Vítreá
Tm	Temperatura de Fusão
UE	União Europeia
VAB	Valor Acrescentado Bruto
VARTM	<i>Vacuum Assisted Resin Transfer Molding</i>
Wt. %	<i>Percentage by weight</i>

Capítulo 1

Introdução

O foco deste capítulo, consiste em apresentar a contextualização do trabalho desenvolvido, bem como os seus objetivos, a metodologia utilizada e exposição da estrutura da presente Dissertação.

1.1 Contextualização do Trabalho Desenvolvido

O elevado e acelerado consumo da sociedade atual resultante da utilização excessiva de recursos e materiais, resultou numa crescente preocupação com a saúde ambiental e pública, levando a que as organizações pertencentes à indústria transformadora, procurassem cada vez mais integrar na sua atividade estratégias mais sustentáveis (Khalid *et al.*, 2022; Rodrigo-Bravo *et al.*, 2024).

Interligando os três pilares fundamentais da sustentabilidade, económico, ambiental e social, as organizações são vistas como essenciais potenciadoras de mudança, no que diz respeito à adoção de estratégias sustentáveis (Aswain *et al.*, 2024), que substituam os modelos de economia linear que, de certa forma, deixaram de se adequar às capacidades atuais do planeta (Rodrigo-Bravo *et al.*, 2024), uma vez que são baseados num modelo “*take-make-dispose*”, isto é, extrair os materiais, transformá-los e descartá-los em forma de resíduos (Cooney *et al.*, 2023).

De facto, os impactes ambientais e sociais resultantes das atividades da indústria transformadora, bem como a perda do valor no final da vida útil do produto, resultaram na criação de determinadas políticas orientadas para a promoção de padrões de produção e de consumo mais sustentáveis, partindo da adoção de um modelo de “sistema fechado” que proporcione uma utilização consistente e consciente dos recursos, promovendo uma economia sustentável, que tenha como foco a reutilização e valorização dos resíduos industriais (Elia, Gnoni and Tornese, 2024; Rodrigo-Bravo *et al.*, 2024).

Este “sistema-fechado”, denomina-se de Economia Circular que, sendo um conceito inovador, permite a valorização dos produtos e materiais, a redução da utilização excessiva de recursos e a minimização da produção de resíduos (Nguyen *et al.*, 2024), através de uma abordagem circular que garanta a maximização da utilização dos produtos, durante o

máximo tempo possível, utilizando diferentes estratégias para o reaproveitamento de materiais, recursos e resíduos (Barbhuiya, Das and Adak, 2024).

Desta forma, a integração dos princípios da Economia Circular nas atividades da indústria transformadora é fundamentalmente reconhecida como um possível meio para alcançar a sustentabilidade e eficiência de recursos, sendo, portanto, contemplada no objetivo número 12 dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), que prevê uma produção e consumo sustentáveis e, até 2030, reduzir consideravelmente a produção de resíduos, adotando técnicas de prevenção, como reciclagem, redução e reutilização (BCSD Portugal, 2022b).

Na verdade, por meio da seleção e processamento de resíduos poliméricos, através das principais técnicas de reciclagem (mecânica, química e térmica), é possível atingir uma redução de resíduos num momento pós-produção, promovendo a sua utilização e valorização dos materiais reciclados, impedindo que lhes sejam aplicadas as tradicionais técnicas de tratamento de resíduos, que não são de todo sustentáveis, provocando graves consequências no meio ambiente, como é o caso da incineração e aterro (Khalid *et al.*, 2022; Traxler, Laske and Fischer, 2024).

Seguindo esta linha de pensamento, a reciclagem é descrita e considerada ativamente como uma metodologia sustentável, permitindo a reutilização de resíduos (industriais ou não), sendo eficaz, essencialmente, em materiais poliméricos e compósitos poliméricos, a partir da aplicação de diferentes técnicas de reciclagem que permitam a sua reintegração em composições de novos produtos (Khalid *et al.*, 2022).

Tendo em consideração a importância desta temática, é esperado que a presente dissertação seja um contributo de inovação para o reaproveitamento de resíduos poliméricos industriais, como um caminho para a sustentabilidade, através da criação e desenvolvimento de um material compósito de baixo custo, que incorpore na sua composição resíduos poliméricos industriais.

Ademais, espera-se que o material obtido, possa servir como uma alternativa sustentável, não só para o tratamento de resíduos, mas também para a sua integração num processo produtivo, respondendo satisfatoriamente às necessidades da reciclagem mecânica de resíduos poliméricos industriais, considerando a sua valorização, já que estes materiais, quando manuseados inadequadamente, demonstram ter graves impactos ambientais aquando do seu deficiente descarte.

1.2 Objetivos

A presente dissertação tem como objetivo geral o desenvolvimento de um material compósito, através da seleção, processamento e aplicação de resíduos poliméricos industriais, sendo, por este motivo, definidos os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolvimento de uma revisão bibliográfica no âmbito da sustentabilidade, aliada à reciclagem mecânica de resíduos industriais, num contexto de economia circular, de modo a espelhar o estado da arte.
- Seleção e classificação adequadas dos resíduos poliméricos industriais, para o fabrico do novo material.
- Fabrico e maximização das propriedades mecânicas dos materiais compósitos para constituição do núcleo dos painéis sanduíches.
- Fabrico dos painéis sanduíches, juntamente com a sua caracterização mecânica, através de ensaios estáticos e de impacto de baixa velocidade.
- Desenvolvimento de um estudo sobre a viabilidade, valorização e inserção na produção do material compósito obtido, como substituto de outros materiais.

1.3 Metodologia

Em qualquer tipo de investigação, como é o caso desta dissertação, é necessário aplicar uma metodologia de investigação, que permita a sua realização e obtenção de resultados satisfatórios e credíveis (MacDonald and Headlam, 2010).

Posto isto, considera-se que esta dissertação segue uma metodologia mista, isto é, inclui tanto uma abordagem qualitativa como quantitativa, uma vez que, numa primeira instância, na recolha de informação e perceção do estado da arte, segue uma metodologia qualitativa, baseando-se essencialmente em estudos já realizados na temática da Economia Circular, bem como na compreensão das razões e das motivações subjacentes à sua aplicação em contexto organizacional e na reciclagem de materiais poliméricos (MacDonald and Headlam, 2010).

As características da metodologia qualitativa que se devem verificar ao longo da sua aplicação, são as seguintes (MacDonald and Headlam, 2010):

- O objetivo deve ser uma completa descrição do que se pretende observar, através de palavras, imagens e objetos de estudo;
- Baseia-se numa contextualização, interpretação e perceção de perspetivas relativas a um determinado tema já estudado, utilizando pesquisa e análise documental.

Além disso, tomando como referência as ideias, hipóteses e características da temática desta dissertação, numa segunda parte, serão utilizados métodos quantitativos que permitam classificar e caracterizar o material desenvolvido. Desta forma, também é incluída uma metodologia quantitativa, já que é pretendido quantificar e analisar os resultados conseguidos, a partir da amostra obtida (MacDonald and Headlam, 2010).

As características da metodologia quantitativa que se devem verificar aquando da sua aplicação, são as seguintes (MacDonald and Headlam, 2010):

- Utilização de dados numéricos, ou seja, quantitativos, a fim de explicar os fenómenos observados, partindo da recolha desses mesmos dados, seja através de testes ou recolha de dados;
- O objetivo baseia-se, essencialmente, na mensuração e análise da temática em estudo.

De modo, a se conseguir realizar a presente dissertação satisfatoriamente, para a análise metodológica qualitativa, serão consultadas as seguintes bases de dados científicas: *Scopus*, *Science Direct* e *IEEE*. Ademais, para a análise metodológica quantitativa do material obtido, serão utilizados ensaios estáticos e de impacto de baixa velocidade.

1.4 Estrutura da Dissertação

Considerando a relevância do tema em estudo, a presente dissertação é constituída por oito capítulos, sendo que, neste primeiro capítulo é apresentada a contextualização do trabalho desenvolvido, abordando a pertinência da temática em estudo, bem como os objetivos que se pretenderam atingir. Além disto, é definida a metodologia utilizada e a estrutura da presente dissertação.

Com efeito, de modo a existir coerência entre a problemática abordada e o desenvolvimento do caso prático, o segundo capítulo destina-se à exposição da definição e conceitos associados à sustentabilidade, com principal foco nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e no Pacto Ecológico Europeu, considerando os princípios inerentes à Economia Circular, contemplando os desafios e perspetivas a si associados.

Adicionalmente, no terceiro capítulo é exposta a caracterização da gestão de resíduos e classificação dos mesmos, tendo em consideração as atuais Políticas Europeias e Nacionais de Gestão de Resíduos, sustentando a premência do desenvolvimento de novas estratégias de fim de vida dos materiais.

Posteriormente, o quarto capítulo destina-se à caracterização e classificação dos resíduos poliméricos industriais, focando-se, essencialmente na relevância da sua reciclagem para a Economia Circular, sendo caracterizados os diferentes tipos de reciclagem e respetivos desafios.

De modo, a concluir a sustentação teórica da presente dissertação, no quinto capítulo são apresentadas a definição, a constituição e classificação dos materiais compósitos, bem como os principais processos de fabrico utilizados na sua produção, salientando e justificando as atuais aplicações industriais destes materiais.

Dando início ao caso prático da presente dissertação, com base nos conceitos teóricos expostos nos capítulos anteriores, no sexto capítulo apresenta-se a descrição e apresentação dos materiais e métodos utilizados, para que fosse possível atingir o objetivo proposto no primeiro capítulo, sendo descritos os métodos de fabricação e os ensaios mecânicos utilizados com vista à caracterização mecânica dos materiais desenvolvidos.

O sétimo capítulo destina-se, essencialmente, à apresentação e discussão dos resultados obtidos com a aplicação dos ensaios mecânicos descritos no capítulo anterior, considerando todas as partes constituintes do material desenvolvido, bem como os seus custos de produção, o planeamento industrial e, posteriormente, a Análise do Ciclo de Vida dos produtos.

Por último, no oitavo capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho desenvolvido, descrevendo as limitações encontradas ao longo do desenvolvimento do mesmo, bem como a apresentação de sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Sustentabilidade

Atualmente, a Sustentabilidade é considerada como um dos maiores potenciadores no que diz respeito à tomada de decisões, sendo, portanto, um dos princípios orientadores para a construção de um mundo e futuro mais sustentável (Kristoffersen, Schultz and Kamari, 2024).

Por conseguinte, neste capítulo serão abordados as definições e os conceitos associados à Sustentabilidade, realçando fortes referências como os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e o Pacto Ecológico Europeu, partindo dos Pilares fundamentais da Sustentabilidade. Numa segunda parte, serão abordados os conceitos e os princípios inerentes à Economia Circular, mencionando diferentes abordagens dos desafios e perspectivas atuais desta temática.

2.1 Definição e Conceitos Associados

Ao longo dos anos, a necessidade de desenvolvimento e adoção de sistemas e modelos mais sustentáveis tem-se revelado uma preocupação dos diferentes tipos de indústrias, uma vez que as atividades socioeconómicas levadas a cabo pelo ser humano, têm desencadeado um leque de consequências ambientais negativas, como alterações climáticas, o aumento da poluição e perda da biodiversidade, decorrentes da utilização e extração excessiva de recursos naturais e crescimento do consumo descontrolado por parte da sociedade (Ndhlovu and Dube, 2024).

Além disto, através do reconhecimento da finitude dos recursos e dos crescentes desafios globais enfrentados pelas organizações, acerca da garantia da viabilidade das atividades a longo-prazo, verificou-se a imprescindibilidade da existência de um equilíbrio entre o crescimento económico, a gestão ambiental e a igualdade social (Islam, 2025).

Neste sentido, surgiu o conceito de sustentabilidade, referido pela primeira vez em 1987, numa definição promovida pelo Relatório *Brundtland* da Comissão Mundial para o Ambiente e o Desenvolvimento das Nações Unidas, tendo sido esta definida como a forma de conseguir satisfazer as necessidades da geração atual sem, em momento algum, comprometer ou colocar em causa a capacidade de as gerações futuras satisfazerem as suas

próprias necessidades, sendo, atualmente uma temática extremamente presente nas organizações e motivações de investigação (Aryee, 2024; European Union, 2024).

Consequentemente, existem diversas estratégias já estudadas e postas em prática no âmbito da sustentabilidade como, por exemplo, a implementação de sistemas de produção sustentável na indústria transformadora, sendo descrito como uma forma eficaz de unir o desenvolvimento sustentável com as atividades de transformação que permitem obter os produtos finais. Este tipo de produção pode ser definida como uma forma de fabricação que permite minimizar os impactos ambientais negativos decorrentes da transformação dos materiais, para obtenção de produtos, implementando novas tecnologias e métodos de fabrico mais sustentáveis, não descurando os meios económicos e sociais envolvidos (Jiang and Qu, 2020).

Desta forma, é de extrema importância que sejam desenvolvidos estudos que permitam a compreensão do âmbito da sustentabilidade, as estratégias e problemas a si associados e de que modo esta pode ser incorporada e adotada pelas organizações em todos os seus níveis de atuação (Jiang and Qu, 2020).

2.1.1 Pilares da Sustentabilidade

A definição e compreensão do conceito de desenvolvimento sustentável está fortemente ligada a três princípios de conceção, conhecidos como orientadores para a tomada de decisões sustentáveis (D. Yang *et al.*, 2023).

Na verdade, estes princípios descrevem a existência de um equilíbrio entre as necessidades económicas, ambientais e sociais, considerando o seu impacto na saúde pública e no ambiente. Assim sendo, são descritos na literatura como os 3 P's, englobando as pessoas, o planeta e o lucro (do inglês, *people, planet and profit*) e deram origem aos três pilares fundamentais da sustentabilidade: económico, ambiental e social (D. Yang *et al.*, 2023).

A interligação dos três pilares da sustentabilidade é ativamente denominada de “*Triple Bottle Line*”, uma vez que todos os pilares se relacionam e complementam entre si. De facto, para que seja possível alcançar a sustentabilidade ambiental não é possível, de forma alguma, não incluir a dimensão social, uma vez que o desenvolvimento sustentável depende fortemente das ações do ser humano. Por outro lado, a relevância económica da utilização de recursos por parte das organizações, representa uma constante discussão, quando se pretende integrar nas suas atividades comportamentos mais sustentáveis (Aryee, 2024).

Seguindo esta linha de pensamento, a Figura 1 procura representar a relação existente entre a dimensão económica, ambiental e social (Huang and Akbari, 2024).

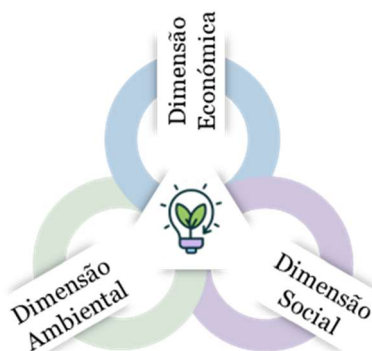


Figura 1 - Três Dimensões da Sustentabilidade (Adaptado de Huang and Akbari, 2024)

No âmbito da Sustentabilidade, cada uma das três dimensões representadas na Figura 1, desempenha um papel fundamental no que diz respeito ao avanço em termos de desenvolvimento sustentável. Em primeiro lugar, é possível descrever os fatores ambientais como parte integrante da motivação das organizações em utilizar de forma consciente e sustentada os recursos, permitindo que os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) destinados à qualidade ambiental sejam atingidos (Islam, 2025). Ademais, o fator ambiental não só engloba a utilização dos recursos por parte das organizações, mas também todo o ambiente natural que a envolve, contemplando a biodiversidade (Aryee, 2024).

Partindo do mesmo princípio, a dimensão social engloba as atividades do ser humano e todo o capital social que uma organização detém. É de realçar que, para que seja atingido uma equidade social conforme previsto nos ODS, as atividades realizadas pela sociedade devem ser justas e realizadas de forma a conferir bem-estar e prosperidade para a comunidade em geral (Aryee, 2024; Islam, 2025).

No entanto, associados aos ODS, existem diversos fatores que têm influência na sua consecução, como a esperança média de vida (associada aos sistemas de saúde), a densidade populacional e força de trabalho existente (igualdade de oportunidades, salários mais justos e condições de trabalho dignas) (Islam, 2025).

Finalmente, a dimensão económica está relacionada com as vantagens e benefícios económicos decorrentes das atividades das organizações, da mesma forma que inclui a comunidade, região e as nações onde as organizações desempenham a sua atividade, estando contemplada, de igual modo nos ODS, sendo um dos fatores mais importantes para a consecução dos mesmos (Aryee, 2024; Islam, 2025).

2.1.2 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

Emergindo da preocupação ambiental, económica e social, o desenvolvimento sustentável tem sido alvo de atenção a nível internacional, nomeadamente pela ONU que, em 2015 lançou a Agenda 2030, com o objetivo de motivar os países (já desenvolvidos ou em desenvolvimento) (Huang and Akbari, 2024) para a adoção de práticas que promovam a prosperidade, equidade e sustentabilidade ambiental, com vista a atingir as metas propostas pelos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (Jia *et al.*, 2024; Islam, 2025).

Contudo, antes dos ODS, entre 2000 e 2015 foram definidos os Objetivos de Desenvolvimento do Milénio (ODM) que, através de 8 metas, contribuíram para determinados avanços na melhoria das condições de vida das pessoas, já que se destinavam, essencialmente, à luta contra a pobreza (Rede para o Desenvolvimento, 2020). Não obstante, estes progressos não abrangeram grande parte das pessoas, nem das restantes dimensões do desenvolvimento sustentável, não tendo sido atingidos os benefícios esperados (DGE, 2015; Rede para o Desenvolvimento, 2020).

Em função disto a Agenda 2030 tem como principal objetivo definir prioridades e metas, para as áreas que têm principal influência na qualidade de vida dos habitantes de todos os países, até 2030, através dos 17 ODS que, na sua definição, contemplam uma parceria global em adotar estratégias que proporcionem melhores condições de saúde e educação e, em simultâneo, combater as alterações climáticas e preservar os ecossistemas (BCSD Portugal, 2022c). Na Figura 2, encontram-se apresentados os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável definidos pela ONU (BCSD Portugal, 2022c).



Figura 2 - Os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (DGE, 2015)

Na verdade, os ODS são cada vez mais importantes, devido à grave crise climática que se agrava ano após ano, pelos fenômenos naturais extremos que ocorrem com mais frequência. Além disso, tem-se verificado uma extinção de espécies em massa, resultando numa crise de biodiversidade, agravada pelo elevado consumo de plástico que contamina os oceanos e águas para consumo. Da mesma forma, ainda existem muitas pessoas no mundo que vivem em situações de pobreza extrema e fome, revelando-se desnutridas e sem acesso a condições dignas de vida, sendo alvo de trabalho forçado e trabalho infantil (BCSD Portugal, 2022c).

Desta forma e, tendo como principal motivador o lema “Não deixar ninguém para trás”, os ODS, estruturam-se a partir de 5 princípios: Pessoas, Prosperidade, Planeta, Paz e Parcerias. Na Tabela 1 apresenta-se a definição e os objetivos atribuídos a cada um dos 5 princípios (Rede para o Desenvolvimento, 2020).

Tabela 1- Os 5 Princípios dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (Rede para o Desenvolvimento, 2020)

Princípios	Definição	Objetivos
Pessoas	Garantir o respeito pelos direitos humanos, através da erradicação da pobreza e da fome de todas as formas, com vista a garantir a dignidade e igualdade.	ODS 1 ao 6
Prosperidade	Garantir vidas prósperas e plenas em harmonia com a natureza, erradicando o trabalho forçado, tráfico humano e trabalho infantil em todas as suas formas.	ODS 7 ao 10
Planeta	Proteger os recursos naturais e o clima do planeta para as gerações futuras, adotando medidas urgentes no âmbito das alterações climáticas, consumo e produção mais sustentáveis.	ODS 11 ao 15
Paz	Promover sociedades pacíficas, justas e inclusivas, livres do medo e da violência, partindo da compreensão intercultural, tolerância e respeito mútuo.	ODS 16
Parcerias	Implementar a Agenda 2030 através de uma parceria global sólida, tomando consciência que o Desenvolvimento é uma responsabilidade de todos.	ODS 17

Considerando a importância de cada um dos ODS, é relevante realçar que, direcionados especificamente para a indústria estão estabelecidos dois ODS (BCSD Portugal, 2022c):

- **ODS 9 – Indústria, Inovação e Infraestruturas:** este ODS, destina-se essencialmente à construção de infraestruturas resilientes, promoção da industrialização mais inclusiva e sustentável, incentivando à inovação por parte das indústrias. Através das metas estabelecidas, pretende-se que sejam desenvolvidas estruturas mais confiáveis, sustentáveis e resilientes, procurando atualizá-las e modernizá-las, de modo a suportarem o desenvolvimento económico e bem-estar do ser humano, preocupando-se em adotar tecnologias renováveis (BCSD Portugal, 2022a, p. 9).
- **ODS 12 – Produção e Consumo Sustentáveis:** partindo da adoção de padrões de consumo e de produção mais sustentáveis, pretende-se garantir uma redução do desperdício global de alimentos, quer seja na produção e nas ações do consumidor, com o intuito de alcançar uma gestão ambientalmente saudável e, conseqüente redução da quantidade de resíduos industriais gerada, mediante ações de prevenção, redução, reciclagem e reutilização (BCSD Portugal, 2022b, p. 12).

Como estado-membro das Nações Unidas, Portugal desempenha um papel ativo em implementar nas suas atividades a Agenda 2030, reforçando o seu compromisso através de um documento denominado de “Relatório Nacional sobre a Implementação da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável”, cujo objetivo principal é definir e aprovar as medidas que são tomadas para atingir as metas dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (BCSD Portugal, 2022c).

Neste sentido, Portugal decidiu focar a sua atenção em seis objetivos específicos, os quais determinou que eram mais importantes e prioritários para o país, sendo estes o ODS 4 (Educação de qualidade), ODS 5 (Igualdade de género), ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestruturas), ODS 10 (Reduzir as desigualdades), ODS 13 (Ação climática) e ODS 14 (Proteger a vida marinha), conseguindo registar o 16º lugar no *ranking* de países mais sustentáveis do mundo, que compreende 166 países distintos. Além disso, é o país que regista melhor desempenho no ODS 1, relativo à erradicação da pobreza (BCSD Portugal, 2022c).

Segundo o Instituto Nacional de Estatística (INE), no ano de 2023, Portugal registou uma evolução positiva no desempenho da maioria dos indicadores (com valor igual ou superior a 80% nos indicadores), podendo-se destacar o ODS 10 (Reduzir as desigualdades), ODS 6 (Águas potáveis e saneamento) e ODS 7 (Energias renováveis e acessíveis). Contudo, nos ODS 2 (Erradicar a fome), ODS 5 (Igualdade de género), ODS 12 (Produção e consumo sustentáveis), ODS 14 (Proteger a vida marinha), ODS 15 (Proteger a vida terrestre) e ODS

16 (Paz, justiça e instituições eficazes), não foi registada uma evolução positiva, pelo contrário, grande parte destes indicadores mantém-se estagnados ou com menos de 50% de indicadores em evolução positiva, pelo que é necessário implementar melhorias e realizar ações que contrariem esta situação (INE, 2023b).

Repare-se que, quatro dos indicadores que não revelaram evolução positiva no seu desempenho, são também aqueles que representam menor disponibilidade de indicadores em Portugal, como é o caso do ODS 2 e ODS 5, ambos com disponibilidade de 57%, ODS 12, cuja disponibilidade é de 54% e ODS 14 que regista a disponibilidade mais baixa, num valor de 50%. Não obstante, o relatório de informação à comunicação social por parte do INE relativo aos Indicadores dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável em Portugal, revela que o ODS 15, mesmo com pouco progresso, é o que representa maior disponibilidade no país, com cerca de 93% (INE, 2024). Na Figura 3 é possível observar a disponibilidade de cada um dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável para Portugal (INE, 2023b).



Figura 3 - Disponibilidade dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) para Portugal (INE, 2024)

No que diz respeito aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável relativos à indústria (ODS 9 e 12), segundo o INE, em Portugal é possível verificar as seguintes situações:

- **ODS 9 – Indústria, Inovação e Infraestruturas:** com 6 indicadores que registam evolução no sentido favorável e 5 de evolução no sentido contrário ao desejável, verifica-se que a importância relativa no Produto Interno Bruto (PIB) da

indústria transformadora registou um decréscimo de 12,2% para 11,3%, da mesma forma que a quantidade de pessoas empregadas em 2023 neste setor eram cerca de 16,5%, menos 1,1% face a 2015. Além disto, o peso das microempresas no valor acrescentado da indústria transformadora era de 7,3% do Valor Acrescentado Bruto (VAB) em 2022, sofrendo um decréscimo em comparação com o ano 2015 que registava 8,1% do VAB (INE, 2024).

- **ODS 12 – Produção e Consumo Sustentáveis:** com 2 indicadores que registam evolução no sentido favorável, 3 de evolução no sentido contrário ao desejável e 2 sem qualquer avaliação, verifica-se que a percentagem de resíduos perigosos gerados em 2022 (5,7%) registou um decréscimo de cerca de 55% em comparação com 2015 (10,3%). Contrariamente, a pegada material *per capita* aumentou de 16,2 toneladas para 18,2 toneladas entre os anos de 2015 e 2021. Finalmente, o consumo interno de materiais também aumentou cerca de 0,5% face a 2015, em que registava um valor de 161,9 milhões de toneladas, registando em 2022 um valor de 162,7 milhões de toneladas (INE, 2024).

2.1.3 Pacto Ecológico Europeu

Associada à estratégia da Comissão Europeia para implementar a Agenda 2030 dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, no dia 11 de dezembro de 2019, a União Europeia (UE) apresentou o Pacto Ecológico Europeu (PEE) (BCSD Portugal, 2024), cujo principal objetivo consiste em renovar e transformar os países pertencentes à UE numa sociedade justa e próspera, ambicionando uma economia mais competitiva (Hyldmo, Rye and Vela-Almeida, 2024; Mansuy *et al.*, 2024).

Na verdade, este pacto surgiu da crescente preocupação com as alterações climáticas, juntamente com a preocupação em criar economias de baixo carbono, mediante iniciativas que promovam a sustentabilidade e inovação tecnológica (Smol, 2022; Hyldmo, Rye and Vela-Almeida, 2024). Desta forma, o PEE, através de propostas legislativas, programas e políticas ambientais, económicas e sociais, visa motivar os países a realizarem alterações e a implementarem medidas no âmbito da justiça, equidade, comunicação política, bem como centrar o seu foco na descarbonização e melhoria da governação ambiental (Hyldmo, Rye and Vela-Almeida, 2024).

Apesar de maioritariamente conhecido como PEE, este tipo de estratégia surgiu nos Estados Unidos da América pela primeira vez em 1930, como resultado da Grande Depressão vivida nessa época, que exigiu novos regulamentos e programas governamentais que permitissem melhorar a economia nacional. Consequentemente, devido à necessidade de existir uma

transformação ecológica, anos mais tarde (em 2000), surgiram os termos “*green deal*”, “*green new deal*” e “*global green new deal*”, como parte integrante de vários programas ambientais de diferentes organizações a nível mundial (Smol, 2022).

Seguindo a mesma linha estratégica, a União Europeia desenvolveu o PEE, não só para responder a questões ambientais, mas também para permitir a atuação em diversas áreas económicas e sociais (Smol, 2022), através de três princípios fundamentais: existência de zero emissões líquidas de gases efeito de estufa (GEE) até 2050, proporcionar um crescimento económico independente da utilização de recursos e, garantir, nestas ações, que nenhuma pessoa ou região é descurada (European Commission, 2019).

Neste sentido, todas as propostas presentes no PEE são baseadas nestes princípios, sendo acompanhadas por soluções que têm como objetivo traçar um caminho para uma transição justa, enquanto transforma a sociedade em termos de equidade, desenvolvido com recurso a tecnologias verdes e aplicável a diversos setores de atividade. Ademais, é esperado que a sua prioridade seja, essencialmente, as pessoas, regiões e indústrias que enfrentam maiores desafios (BCSD Portugal, 2024).

Por conseguinte, o PEE estabelece medidas em diferentes focos de atuação, desde em ser o primeiro continente a registar um impacto neutro no clima até 2050, registar uma utilização energética eficiente e limpa, proteger os ecossistemas e respetiva biodiversidade, impulsionar um sistema alimentar mais saudável e proporcionar a circulação de transportes seguros, eficientes e *eco-friendly* (BCSD Portugal, 2024).

Além disto, a nível industrial, é pretendido que seja adotada uma estratégia mais competitiva, ecológica e digital, através da disseminação de mudanças transformadoras em termos de investigação. Evidentemente que, neste “acordo verde”, é necessário realizar investimentos sustentáveis para garantir o seu cumprimento, como a criação de uma iniciativa política de financiamento pela Comissão Europeia, com vista a desenvolver soluções sustentáveis, inclusivas e que funcionem de forma apelativa para as diferentes regiões, tradições e respetivas culturas (BCSD Portugal, 2024). Na Figura 4 encontram-se representados os diferentes focos de atuação do PEE que permitem incorporar as medidas referidas anteriormente (BCSD Portugal, 2024).

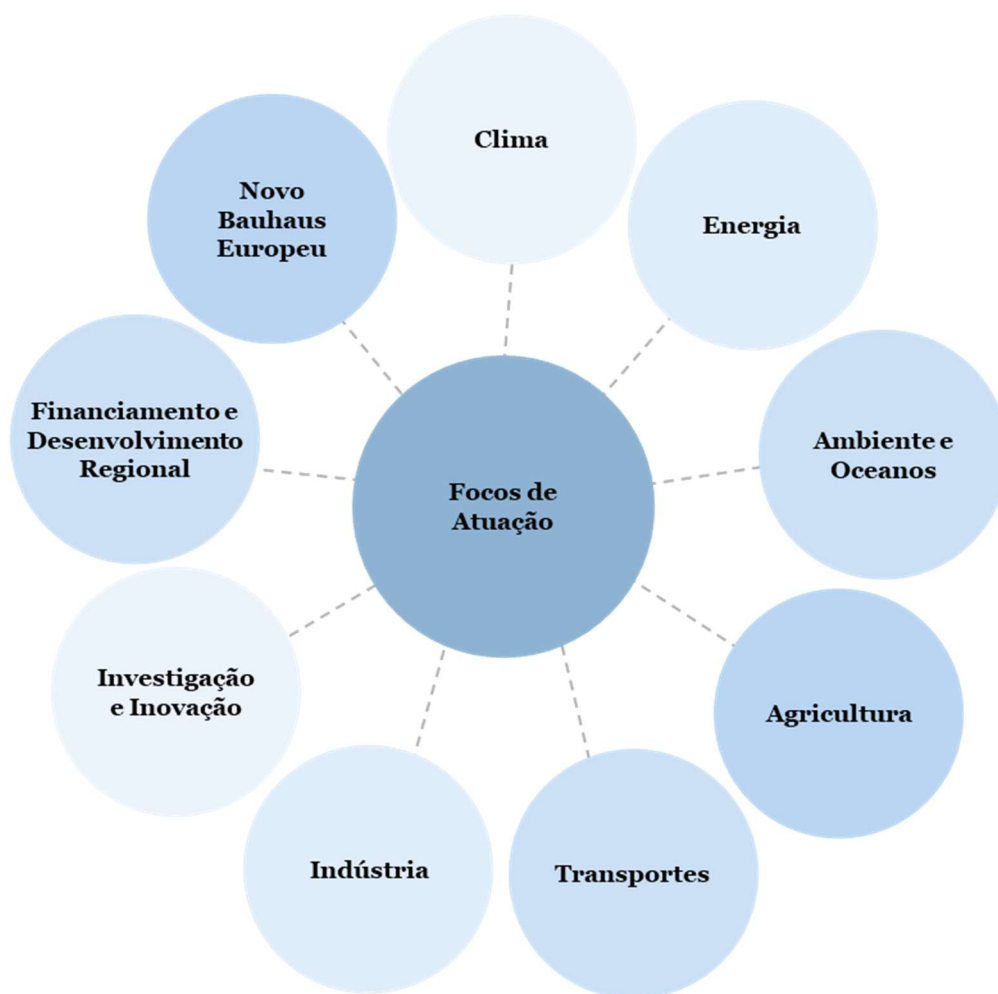


Figura 4 - Focos de Atuação do Pacto Ecológico Europeu (Adaptado de BCSD Portugal, 2024)

Mediante os nove focos de atuação, a integração do PEE, é realizada com recurso a dez pilares fundamentais que devem servir como linhas de orientação para a sua aplicação e conseguir atingir a neutralidade carbónica até 2050, com redução de GEE entre 50% a 55% até 2030, bem como garantir uma economia moderna, baseada numa gestão e utilização eficiente dos recursos. Na Figura 5 estão apresentados os dez pilares que suportam o Pacto Ecológico Europeu (BCSD Portugal, 2024).



Figura 5 - Dez pilares do Pacto Ecológico Europeu (Adaptado de BCSD Portugal, 2024)

De facto, cada um dos pilares apresentados na Figura 5, destina-se a uma área de atuação específica, fornecendo as metas que se pretendem atingir. Realçando o Pilar 3 que se destina à indústria, o PEE prevê que se possa apresentar uma nova estratégia industrial europeia, através da adoção de sistemas mais sustentáveis e planos de ação de economia circular, direcionadas essencialmente para setores mais críticos e intensivos, como é o caso da indústria têxtil, produção de produtos plásticos e eletrónicos, bem como para o setor da construção civil (BCSD Portugal, 2024). Deste modo, é proposto que estes setores utilizem novas políticas de fabricação e produção mais sustentáveis e amigas do ambiente, fazendo uso de materiais recicláveis e reutilizáveis, de modo a ser possível realizar uma transição para as emissões zero (BCSD Portugal, 2024).

Ademais, o PEE tem como principal foco apresentar novos planos que garantam uma nova legislação para as baterias e reformar a legislação relativa à gestão e utilização de resíduos (BCSD Portugal, 2024).

No âmbito do Pilar 3 do PEE, em Portugal foi desenvolvido um Plano de Ação para a Economia Circular, alinhado com a Agenda 2030 das Nações Unidas e outras políticas europeias relativas a esta estratégia, declarando três níveis distintos de ação, nacional, setorial e regional, incorporando instrumentos, apoios e mecanismos políticos específicos para este efeito (BCSD Portugal, 2024). Da mesma forma, fazem parte deste plano, sete iniciativas (BCSD Portugal, 2024):

- Conferir responsabilidade ao produtor na fase de desenho, reparação e reutilização dos produtos;
- Motivar a incorporação de um mercado circular;
- Instruir as organizações para a adoção de estratégias de Economia Circular;
- Incentivar uma produção e consumos mais sustentáveis, de modo a não existir desperdício;
- Garantir uma gestão eficiente e reutilização dos resíduos;
- Recuperar recursos como água e respetivos nutrientes;
- Promover investigação e inovação, visando a Economia Circular;

Apesar de demonstrar ser promissor e com intenções de proporcionar uma transição justa, de modo que não sejam verificados nem causados danos e, desta forma, “não deixar ninguém para trás”, estes compromissos do Pacto Ecológico Europeu, carecem de alguma interpretação e reflexão, podendo revelar alguns entraves na sua implementação e consequente transição (Hyldmo, Rye and Vela-Almeida, 2024).

Em primeiro lugar, há que realçar que, mesmo que o PEE garanta a existência de resultados mais justos e inclusivos na transição para economias de baixo carbono, a sua implementação, em determinadas situações, está diretamente relacionada com a extração em massa de materiais e recursos (como por exemplo, o lítio, cobre e outros metais raros) para que sejam alcançados os objetivos propostos. Deste modo, esta ação irá provocar danos em países politicamente marginalizados, fora do território da União Europeia, com consequentes impactes a nível ambiental, social e económico, desvirtuando assim um dos parâmetros que o presente “acordo verde” engloba (Hyldmo, Rye and Vela-Almeida, 2024).

Posteriormente, é necessário considerar de que forma a transição para uma economia descarbonizada, não afete nem cause danos sociais e ecológicos a nenhum país, mesmo que este não faça parte do leque de países pertencentes à União Europeia, tal como é referido em políticas do Pacto Ecológico Europeu (Hyldmo, Rye and Vela-Almeida, 2024).

Neste sentido, mediante aplicação de estratégias de reutilização e reciclagem de resíduos, como previsto no PEE, é urgente reconhecer os danos subjacentes à extração de matérias-primas, para satisfazer estas políticas que têm como principal objetivo tornar a produção e as cadeias de consumo mais ecológicas e sustentáveis. Assim, cada país deve garantir que, a implementação do Pacto Ecológico Europeu, vai ao encontro dos princípios base que lhe estão associados e, garantir que, de facto a sua implementação não causará dano, não deixará ninguém para trás e assim permitir uma transição justa e inclusiva, como parte do caminho para atingir níveis de atividade mais sustentáveis (Hyldmo, Rye and Vela-Almeida, 2024).

2.2 Economia Circular

O modelo linear de produção baseado em extrair os materiais, transformá-los e descartá-los no final da sua vida útil, deixou de se adequar ao elevado consumo da sociedade atual, bem como à crescente necessidade de corresponder às expectativas dos consumidores, além de representar poucas formas de reutilizar os produtos quando se tornam obsoletos (Ramírez-Rodríguez, Ormazabal and Jaca, 2024; Wulf *et al.*, 2024).

Consequentemente, a excessiva extração de recursos transformou-se numa situação insustentável, provocando diversos impactes ambientais adversos nos ecossistemas e na própria biodiversidade, do mesmo modo que se tornou evidente o esgotamento de recursos, escassez de água e graves alterações climáticas (Ramírez-Rodríguez, Ormazabal and Jaca, 2024).

Neste sentido, os sistemas industriais como fortes potenciadores de riqueza e crescimento económico (Ramírez-Rodríguez, Ormazabal and Jaca, 2024), identificaram a necessidade de incorporar nas suas atividades um novo modelo de “sistema-fechado” que, através da redução, reutilização, reciclagem e recuperação de materiais, permitisse superar o modelo linear utilizado até então e que, de certo modo, permita atingir um desenvolvimento sustentável, não só a nível ambiental, mas que garanta um crescimento económico (Maeder and Fröhling, 2024; Ramírez-Rodríguez, Ormazabal and Jaca, 2024).

De facto, o “sistema-fechado” apresentado, denomina-se de Economia Circular, sendo mundialmente reconhecido como um modelo económico industrial viável (Oo *et al.*, 2024), tendo como principal objetivo minimizar o desperdício, através da utilização eficiente e eficaz de recursos (Jeng *et al.*, 2024).

O termo de Economia Circular surgiu pela primeira vez em 1960, tendo sido definido como uma economia que visa promover a existência de um fluxo cíclico entre a extração, transformação, distribuição, utilização e consequente valorização dos recursos, como forma de alcançar um estado de equilíbrio entre o desenvolvimento ambiental e o crescimento económico (Sampedro-Beneyto *et al.*, 2024). Na Figura 6 encontra-se representado um esquema ilustrativo do fluxo cíclico do modelo de Economia Circular (Parlamento Europeu, 2024a).

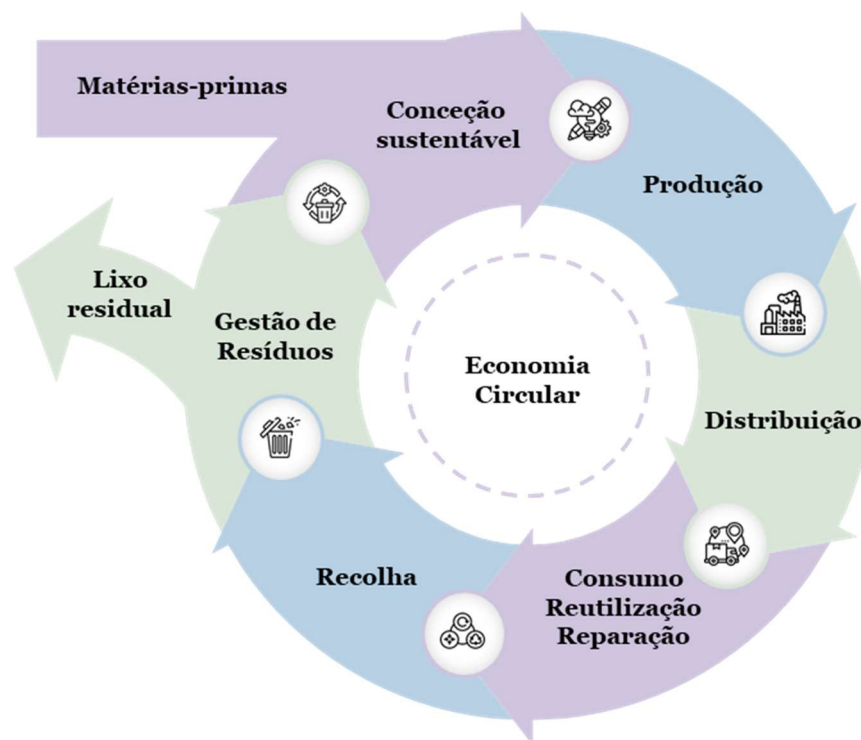


Figura 6 – Fluxo Cíclico do Modelo de Economia Circular (Adaptado de Parlamento Europeu, 2024a)

A implementação de modelos de Economia Circular pode ser efetuada em três níveis distintos (Marquina *et al.*, 2022; Timilsina and Nguyen, 2024):

- **Nível micro:** relacionado com os produtos, empresas e consumidores;
- **Nível meso:** construção de parques eco-industriais¹;
- **Nível macro:** direcionado para cidades, regiões e nações.

Na verdade, os benefícios decorrentes da implementação de uma Economia Circular podem ser diversos, desde benefícios a nível económico, no que diz respeito à redução de custos e aumento da rentabilidade, a nível ambiental, uma vez que as organizações verificam uma diminuição dos impactes ambientais resultantes das suas atividades. Além disso, a nível social é possível realçar que, uma organização que adota o modelo de Economia Circular, verifica uma melhoria da sua imagem e reputação junto dos clientes (Chripim, Mattsson and Ulvenblad, 2024).

Seguindo esta abordagem, as Nações Unidas incorporaram nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável a criação de modelos de Economia Circular como meio para alcançar a sustentabilidade. Da mesma forma, a União Europeia definiu um plano de ação para a Economia Circular, com vista a cumprir a Agenda 2030 e tornar a Europa um lugar mais limpo, sustentável e competitivo (Sampedro-Beneyto *et al.*, 2024).

Na verdade, o plano de ação para a Economia Circular encontra-se articulado com o PEE, realçando a urgência de as indústrias adotarem estratégias produtivas que mantenham o valor dos produtos, dos materiais e dos recursos e que minimizem a geração de resíduos (Sampedro-Beneyto *et al.*, 2024).

Por conseguinte, a União Europeia realça três motivações para a adoção de estratégias de economia circular descritas na Tabela 2 (Parlamento Europeu, 2024a).

¹ Os parques eco-industriais têm como principal objetivo reunir, numa única área, organizações que tenham possibilidade de trocar produtos, resíduos, energia e subprodutos entre si, de forma a constituir um sistema de troca de recursos, com vista a aumentar os ganhos económicos, mediante uma utilização mais eficiente de recursos e consequente minimização dos impactes ambientais (Genc and Kurt, 2024).

Tabela 2 - Motivações Europeias da transição para uma Economia Circular (Parlamento Europeu, 2024a)

Motivação	Definição
Proteger o ambiente	A proteção do ambiente passa pela adoção de práticas de reutilização e reciclagem de produtos, com vista a controlar a utilização excessiva de recursos naturais, de modo a limitar a perda da biodiversidade e redução das emissões de GEE.
Redução da dependência de matérias-primas	Tendo em consideração a procura descontrolada de matérias-primas, a sua reciclagem é uma forma de mitigar os riscos relacionados com a oferta de produtos, como é o caso da inconsistência de preços, disponibilidade e dependência dos materiais.
Criação de empregos	A adoção de estratégias de Economia Circular como modelo de transição, pode proporcionar o aumento da competitividade, além de incentivar à inovação e criação de novos postos de trabalho. O redesenho dos produtos é uma forma de inovar os modelos produtivos no âmbito da Economia Circular e, desta forma permitir a oferta de produtos inovadores e perduráveis, melhorando a qualidade de vida e fomentando a poupança por parte dos consumidores.

2.2.1 Princípios da Economia Circular

Na generalidade, o modelo de Economia Circular baseia-se em três princípios fundamentais descritos como a eliminação do desperdício e poluição, reutilização de produtos e materiais e regeneração da natureza (Marquina *et al.*, 2022). Na verdade, estes três pilares deram origem a outros princípios da Economia Circular descritos pela filosofia dos 3R's (Reduzir, Reutilizar e Reciclar) (Timilsina and Nguyen, 2024).

Não obstante, com a evolução dos sistemas produtivos no âmbito da Economia Circular, foi possível integrar mais princípios como recuperar, reparar, reformar, remanufaturar, reaproveitar, repensar e recusar (Bushuyev *et al.*, 2023; Karaeva *et al.*, 2023). Na Figura 7 encontram-se representados os princípios base de um modelo de Economia Circular, que permitem a redução da utilização excessiva de matérias-primas e geração de resíduos. (Bushuyev *et al.*, 2023; Muñoz, Hosseini and Crawford, 2024).

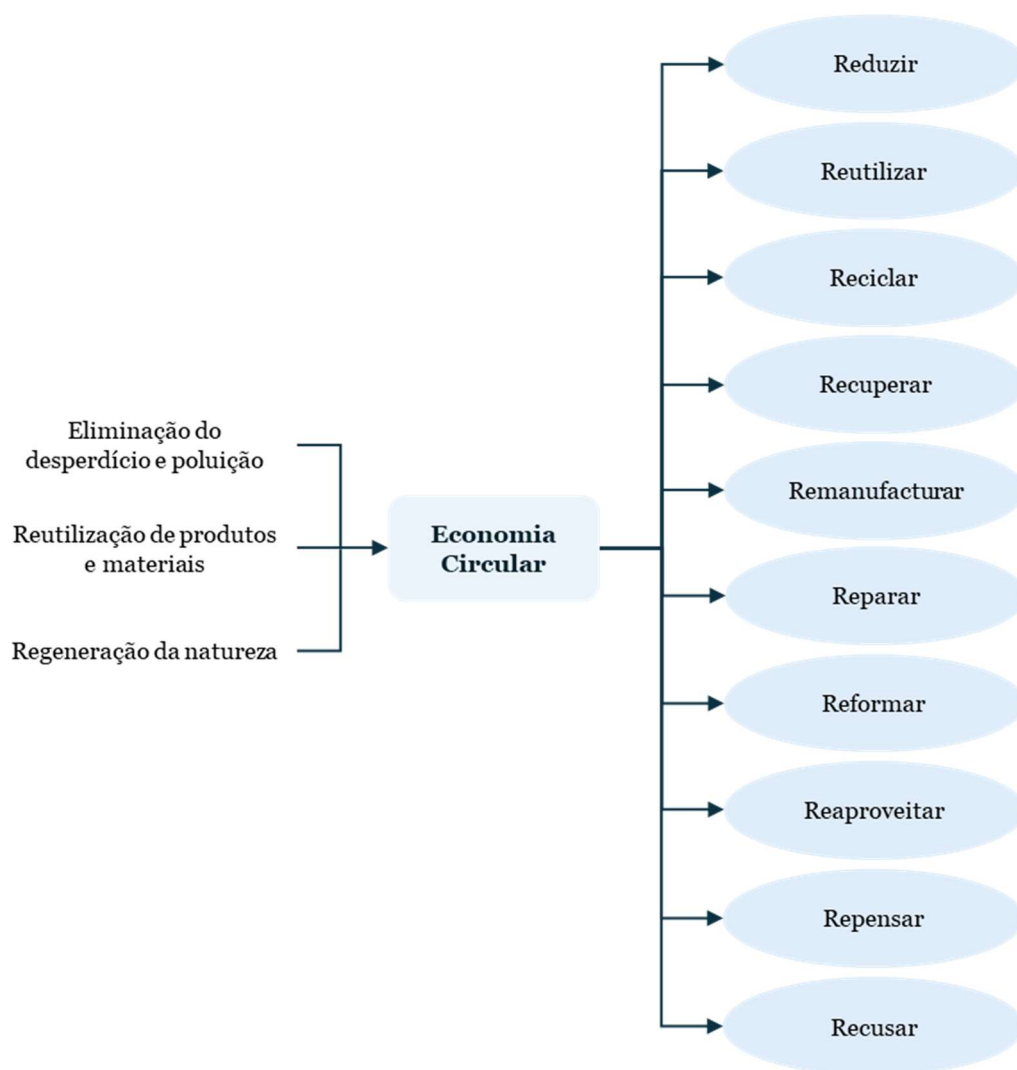


Figura 7 - Princípios da Economia Circular (Marquina *et al.*, 2022; Bushuyev *et al.*, 2023)

Considerando os princípios apresentados na Figura 7, a reciclagem assume um papel predominante nos modelos de Economia Circular, sendo considerado como o mais utilizado. Ademais, a reutilização dos materiais e produtos, bem como a redução da utilização de recursos e matérias-primas são fortes aliados na implementação deste tipo de “sistemas-fechados” (Marquina *et al.*, 2022).

Neste sentido, a reparação e manutenção de produtos defeituosos com vista a alargar a sua vida útil, agregada à reforma de produtos que ainda se encontram em condições de utilização, deu origem a uma diferente perspetiva dos produtos quando estes chegam ao final da sua vida útil. Além disso, a remanufatura de produtos defeituosos para serem utilizados como partes de outros produtos e o reaproveitamento dos materiais para outros fins distintos, tornou a Economia Circular um modelo mais acessível e alcançável em determinadas indústrias (Karaeva *et al.*, 2023).

2.2.2 Desafios e Perspetivas Atuais

A Economia Circular, apesar de promissora, apresenta alguns desafios na sua implementação (Martin *et al.*, 2024). De facto, o principal desafio reside na capacidade de conseguir equilibrar as perspetivas ambientais e sociais com as prioridades económicas de cada país (Jeng *et al.*, 2024).

Na verdade, a integração de modelos de Economia Circular nas atividades industriais carece da existência de mudanças substanciais a vários níveis, apresentando, desta forma, alguns desafios e resistência em diferentes áreas, quer em termos governamentais e económicos, bem como a nível da conceção e tecnologia dos produtos. Adicionalmente, a falta de conhecimento e competências, aliada à dificuldade de enquadramento deste modelo, dificulta a sua adoção por parte das organizações (Martin *et al.*, 2024; Rasheed *et al.*, 2024).

A nível governamental, a principal barreira reside no facto de ainda não existir, em muitos países, um sistema que permita realizar uma medição e monitorização dos indicadores de desempenho associados à Economia Circular, do mesmo modo que ainda existe uma falta de legislação clara em relação a alguns resíduos industriais e não industriais (Martin *et al.*, 2024).

De forma análoga, é possível realçar as barreiras económicas. Na verdade, os incentivos dados às organizações não satisfazem a adoção de uma Economia Circular, dificultando assim a sua implementação, já que, numa fase inicial, são necessários investimentos avultados que permitam realizar novos designs, repensar técnicas de fabricação e adoção de materiais reciclados ou que facilitem a reciclagem dos mesmos (Martin *et al.*, 2024).

Por conseguinte, a falta de tecnologias eficazes e eficientes associadas à reciclagem, reaproveitamento e reutilização de determinados materiais e produtos é considerada, de igual modo, uma barreira à implementação da Economia Circular, dificultando, assim, a fluidez da cadeia de abastecimento no que diz respeito à obtenção deste tipo de materiais e que sejam, efetivamente, de qualidade (Martin *et al.*, 2024).

Além disso, nenhum modelo de Economia Circular é sustentado somente pela aplicação de técnicas inovadoras de reciclagem e reutilização de materiais, uma vez que é necessário existir um forte comprometimento da gestão com este tipo de estratégias e iniciativas, da mesma forma que devem garantir que possuem infraestruturas e capacidade para sustentar este tipo de modelos (Martin *et al.*, 2024).

Contudo, apesar das barreiras apresentadas, foram realizados estudos que demonstram a viabilidade e possibilidade de adotar modelos de Economia Circular que sejam sustentáveis e permitam a reutilização e reciclagem de determinados materiais, como substitutos de materiais convencionalmente utilizados. Com efeito, a Tabela 3, apresenta cinco exemplos de casos de estudos realizados por diferentes autores num contexto de Economia Circular.

Tabela 3 - Apresentação de casos de estudo no âmbito da Economia Circular

Caso de Estudo	Caracterização	Autor
<p>Conceção de produtos eletrónicos para a Economia Circular, utilizando Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) reciclado.</p>	<p>Este caso de estudo sugere e estuda a viabilidade de utilizar ABS 100% reciclado (rABS) como substituto de ABS virgem em caixas de produtos eletrónicos, como é o caso de telefones fixos sem fios. Os ensaios permitiram caracterizar o material e demonstraram que as propriedades entre o material reciclado e virgem são semelhantes, constituindo um custo inferior à utilização do ABS virgem, podendo, desta forma, ser um excelente substituto, desde que o design permita a constituição de uma caixa mais rígida, com maior espessura e capacidade de coloração, para se tornar esteticamente apreciável.</p>	<p>(Ford and Fisher, 2019)</p>
<p>Avaliação ambiental e económica da reciclagem de resíduos de plástico e de pavimentos betuminosos recuperados na construção de novos pavimentos.</p>	<p>Considerando as regiões que apresentam dificuldades em relação à escassez de recursos minerais (como Hong Kong), este estudo visa estudar a viabilidade técnica, ambiental e económica da utilização de betume modificado com Politereftalato de etileno (PET) que contenha partes de pavimento betuminoso recuperado na sua manutenção e reabilitação, tendo em vista o seu ciclo de vida.</p> <p>Desta forma, o estudo demonstra que a incorporação de PET e partes de pavimento recuperado, pode reduzir as emissões de GEE até 29% e os custos do ciclo de vida até 26,2%, apresentando, desta forma, benefícios na sua utilização, com vista a reaproveitar os materiais em estudo.</p>	<p>(Yao <i>et al.</i>, 2022)</p>
<p>Utilização de material à base de algas para a produção de sacos bioplásticos reutilizáveis.</p>	<p>Devido aos impactes ambientais provocados pelo uso de sacos de plástico à base de recursos finitos como o petróleo, este estudo visa investigar a possibilidade de utilizar algas marinhas na produção de sacos bioplásticos, reutilizáveis e biodegradáveis.</p> <p>Através dos ensaios experimentais, foi possível perceber que, em comparação com outros materiais utilizados na produção de sacos, as propriedades mecânicas dos sacos produzidos a partir de algas marinhas revelaram elevado potencial como substituto dos materiais usualmente utilizados, sendo registado em alguns casos, resistência à tração muito superior.</p>	<p>(Kadell and Callychurn, 2023)</p>

<p>Reutilização de mantas porosas híbridas (do inglês, <i>hybrid nonwoven breather</i>), feitas de fibras de juta², em aplicações de compósitos laminados.</p>	<p>Com o intuito de reduzir a utilização de <i>hybrid nonwoven breather</i> convencionais feitos de polímeros sintéticos, como <i>nylon</i> ou poliéster, devido à elevada quantidade de resíduos gerados durante o processo de fabrico de materiais compósitos, neste estudo foram desenvolvidos <i>hybrid nonwoven breather</i> feitos de fibras de juta.</p> <p>Os resultados experimentais mostram que os <i>hybrid nonwoven breather</i> desenvolvidos, representam uma alternativa viável como substitutos de materiais sintéticos em aplicações semiestruturais, uma vez que as propriedades térmicas, mecânicas e de amortecimento revelaram ser superiores e até melhoradas.</p>	<p>(Tong <i>et al.</i>, 2023)</p>
<p>Análise comparativa de desempenho e eficiência de compósitos de fibra de carbono reciclada e virgem impressos em 3D.</p>	<p>Este caso de estudo teve como principal objetivo comparar dois espécimes produzidos com poliamida-12, reforçado com fibras de carbono. Um incorporava fibras de carbono virgem e outro, fibras de carbono recicladas.</p> <p>Os ensaios experimentais demonstraram que o material compósito de poliamida-12 reforçada com fibras de carbono recicladas é mais eficiente, em comparação com o que é reforçado com fibras de carbono virgens. Ademais, os reforçados com fibras de carbono recicladas apresentaram maior resistência à tração, além de terem menor impacto ambiental. Desta forma, este tipo de substituição, associada à evolução das técnicas de reciclagem dos materiais compósitos, pode ser utilizada nas indústrias automóvel e aeroespacial.</p>	<p>(Ateeq, Akbar and Shafique, 2024)</p>

Apesar de já existirem diversos avanços no âmbito da reutilização e reciclagem de polímeros num contexto de Economia Circular, ainda é uma temática que se encontra em desenvolvimento, não existindo casos de estudo concretos e objetivos, que demonstrem a eficácia da sua aplicação a nível industrial. Desta forma, é necessário existir um empenho reforçado da sociedade e das indústrias no desenvolvimento de alternativas inovadoras que contribuam para a redução da geração de resíduos poliméricos, através da conceção de novos materiais, que sejam, portanto, recicláveis e sustentáveis e que, incluam, de igual forma, os impactos no final da vida útil dos produtos (Yan *et al.*, 2023).

² A juta é uma fibra longa, cultivada em zonas tropicais e tem sido discutida a sua utilização em materiais compósitos, devido às suas propriedades mecânicas, térmicas e de absorção. Usualmente, é utilizada no fabrico de coberturas e cordas (Kumar, Kumar and Kumar, 2022).

Capítulo 3

Produção e Gestão de Resíduos

Devido à produção desenfreada de produtos, associada ao crescente consumo da sociedade atual, verificou-se a necessidade de desenvolver estratégias eficazes que permitissem uma gestão sustentável dos resíduos gerados (Nafiu *et al.*, 2025).

Desta forma, neste capítulo, serão abordadas a caracterização da gestão de resíduos, bem como a classificação de resíduos, focando, essencialmente na Política de Gestão de Resíduos da UE e de Portugal, como fonte potenciadora para o desenvolvimento de novas estratégias, no que diz respeito ao fim de vida dos materiais.

3.1 Gestão de Resíduos

Os rápidos avanços tecnológicos e consequentes alterações no estilo de vida da população a nível mundial, resultaram num aumento da produção e do consumo, impactando, de igual forma, a geração desenfreada de resíduos, cujo aumento verificado nas últimas décadas, contribuiu para o crescimento da atual crise ambiental (Islam *et al.*, 2024).

De facto, por resíduos, entendem-se todas as substâncias sólidas, líquidas ou gasosas que, tendo sido desperdiçadas, já não têm qualquer utilidade, valor económico, prático ou ambiental, sendo descritos pela alínea aa) do artigo 3º do Decreto-Lei n.º 24/2024, de 26 de março, como “quaisquer substâncias ou objetos de que o detentor se desfaz ou tem intenção ou a obrigação de se desfazer” (Islam *et al.*, 2024; Presidência do Conselho de Ministros, 2024).

Neste sentido, é de extrema importância que existam políticas eficazes e eficientes de gestão de resíduos que, permitam, contrariar, ou pelo menos diminuir, a sua contribuição para o desequilíbrio dos ecossistemas, bem como a poluição do ambiente e o esgotamento de recursos (Islam *et al.*, 2024).

Além dos impactes ambientais, a produção de resíduos, gera, de igual forma, consequências negativas na saúde pública, não só pela própria geração dos resíduos, mas também pelo desperdício de recursos associado, evidenciando a urgência de os recolher, tratar e eliminar de forma adequada, mediante a integração de atividades que os controlem, desde a sua

origem, até ao seu destino final, incluindo assim, a sua recolha, transporte e consequente tratamento (APA, 2021d, 2021e).

Desta forma, a gestão de resíduos, focando-se na prevenção e aproveitamento dos resíduos como recursos, procura assegurar a gestão sustentável dos mesmos, garantindo a sua utilização eficiente, tendo como princípio uma hierarquia, presente na Figura 8, cujo principal objetivo reside na promoção da prevenção, preparação para a reutilização dos resíduos, seguida da reciclagem, outros tipos de valorização e, finalmente, a sua eliminação (APA, 2021e).

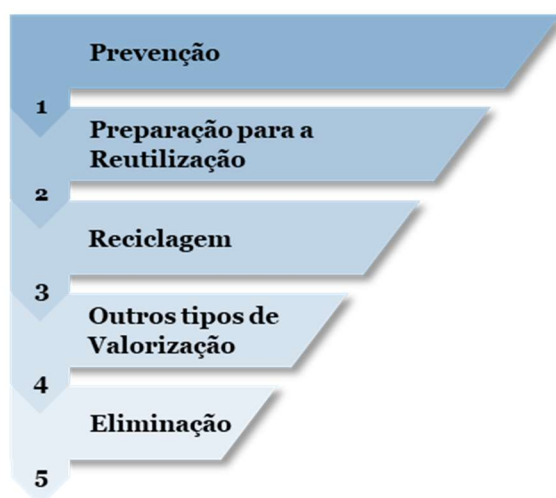


Figura 8 - Hierarquia dos Resíduos (Adaptado de APA, 2021b)

Considerando as operações privilegiadas da hierarquia dos resíduos pelo Regime Geral de Gestão de Resíduos (RGGR), a prevenção de resíduos, permite, essencialmente, melhorar a eficiência dos recursos, com o intuito de minimizar os impactes ambientais decorrentes da geração de resíduos. Na verdade, as políticas e medidas no âmbito da prevenção, concretizam-se pela crescente preocupação em evitar a produção de resíduos e, quando produzidos, estes possam ser encaminhados para operações de gestão adequadas (APA, 2021c; Presidência do Conselho de Ministros, 2023).

Desta forma, este conjunto de práticas e medidas que, visando o prolongamento do tempo de vida útil dos produtos mediante a sua reutilização e doação, permite reduzir o volume de resíduos gerados, contribuindo, deste modo, para a dissociação do crescimento económico dos impactes ambientais resultantes da geração de resíduos (APA, 2021c).

Analogamente, a preparação para a reutilização, consiste em operações de valorização de controlo, limpeza ou reparação dos resíduos, tornando-os aptos para serem reutilizados,

sem lhes ser aplicado qualquer outro tipo de pré-processamento (Presidência do Conselho de Ministros, 2023).

Ademais, a gestão de resíduos não só permite proteger, preservar e melhorar a qualidade do ambiente e da saúde humana, como promove os principais e importantes princípios da Economia Circular, de modo que, a dependência de recursos importados, frequentemente verificada, seja reduzida, garantindo a existência de novas oportunidades económicas e aumentar a competitividade a longo prazo (APA, 2021d).

No entanto, as atividades levadas a cabo pelo produtor inicial dos resíduos, baseiam-se noutra princípio analogamente essencial, uma vez que, deve existir responsabilidade pela gestão dos resíduos gerados, tendo em consideração os custos associados. Além disso, por lei, esta responsabilidade pode abranger, igualmente, o produtor do produto que deu origem a esses mesmos resíduos, bem como as atividades de distribuição do mesmo³ (APA, 2021d).

Na mesma linha estratégica, a separação dos resíduos produzidos, bem como a prevenção da sua geração, são também responsabilidade de todas as pessoas e entidades, com o intuito de permitir a recolha seccionada dos resíduos, para que, desta forma, possam ser valorizados (APA, 2021d).

De facto, a Agência Portuguesa do Ambiente (APA), atua em Portugal, como a Autoridade Nacional de Resíduos, tendo como principais funções acompanhar e assegurar a consecução da estratégia nacional destinada aos resíduos. Além disso, a APA permite assegurar, de igual forma, a recolha e o tratamento da informação, tendo competências para licenciar e acompanhar atividades de gestão de resíduos, bem como emitir normas técnicas (APA, 2021e).

Além disso, a APA, juntamente com as Comissões de Coordenação e Desenvolvimento Regional (CCDR), é responsável por averiguar o cumprimento dos requisitos legais presentes na legislação de resíduos, ou seja, o RGGR, previsto no Decreto-Lei n.º 102-D/2020 de 10 de dezembro, atualmente em vigor (APA, 2021d), definindo as obrigações para os produtores de resíduos e as disposições para o controlo dos resíduos, desde que estes são gerados até ao seu destino final (APA, 2021a).

³ Quando considerados os resíduos urbanos, este princípio não se verifica, sendo a responsabilidade dos municípios (APA, 2021d).

Na verdade, as atividades que decorrem desde a geração dos resíduos até ao destino final, como a recolha, transporte e o respetivo tratamento, encontram-se regulamentadas tanto para os resíduos urbanos como não urbanos (APA, 2021e), sendo que, a sua classificação encontra-se contemplada na Lista Europeia de Resíduos (LER) (APA, 2021a).

3.2 Classificação de Resíduos

A separação e classificação dos resíduos na sua origem, é crucial para a definição do destino final de cada resíduo, com o intuito de reduzir os impactos no ambiente e na saúde humana (APA, 2020), podendo estes ser classificados como urbanos ou não urbanos. Posteriormente, os resíduos não urbanos (ou resíduos setoriais) podem ser ainda classificados como resíduos de construção, agrícolas, hospitalares, industriais, poluentes orgânicos persistentes, lamas, entre outros (Presidência do Conselho de Ministros, 2023). Na Tabela 4 apresenta-se a divisão e respetiva descrição dos principais tipos de resíduos (APA, 2021f, 2021g).

Tabela 4 - Divisão e Descrição dos diferentes tipos de resíduos (Adaptado de APA, 2021e e APA, 2021f)

Tipos de Resíduos		Descrição
Resíduos Urbanos		São considerados resíduos urbanos, resíduos compostos por vários tipos de materiais e produtos em fim de vida, de recolha seletiva e indiferenciada das habitações (ou de outras origens, mas semelhantes aos resíduos das habitações em natureza e composição), como papel e cartão, metais, plásticos, embalagens, vidro, biorresíduos, madeira, têxteis, resíduos de equipamentos eletrónicos e elétricos, resíduos de pilhas e acumuladores, e até mobiliário e colchões.
Resíduos Não Urbanos		São considerados resíduos não urbanos aqueles que, não correspondendo à classificação de resíduos urbanos, derivam de atividades económicas, podendo ser também descritos como resíduos setoriais.
Resíduos Não Urbanos	Resíduos de Construção	Resíduos com origem em atividades de construção, reconstrução, demolição, ampliação, conservação e derrocada de edifícios/construções.
	Resíduos Agrícolas	Resíduos resultantes de atividades de exploração agrícola e/ou pecuária ou similares.

	Resíduos Hospitalares	Resíduos provenientes de atividades de prestação de cuidados de saúde a seres humanos ou animais, englobando a investigação e ensino, bem como atividades que incluam processos invasivos, como <i>piercings</i> , tatuagens, acupuntura e tanatopraxia.
	Resíduos Industriais	Resíduos com origem em atividades industriais, de produção e distribuição de gás, eletricidade e água.

De modo que a classificação de resíduos seja eficaz e coerente, esta deve ser efetuada com recurso à Lista Europeia de Resíduos (LER), divulgada mediante a Decisão 2014/955/UE, da Comissão que, substituindo a Decisão 2000/532/CE, da Comissão, referida no artigo 7º da Diretiva Quadro de Resíduos (DQR), Diretiva 2008/98/CE, consiste numa lista padronizada de resíduos que, considerando a sua origem e composição, é aplicável a todos os resíduos que estejam enquadrados no âmbito de aplicação do RGGR. Além disso, esta Decisão é obrigatória e diretamente aplicável por todos os Estados Membros da UE, desde 1 de junho de 2015 (European Union, 2014a; APA, 2020).

Considerando que a presença de uma substância na LER, não implica que esta seja considerada um resíduo em todas as ocasiões, uma vez que só assume a natureza de resíduo, apenas quando o seu detentor se desfaz, ou tem intenção ou obrigação de se desfazer dessa mesma substância, tal como mencionado na descrição de resíduo pela alínea aa) do artigo 3º do Decreto-Lei n.º 24/2024, de 26 de março, os resíduos podem ser agrupados de acordo com a sua área específica de atividade, da qual são provenientes, constituindo os 20 capítulos da LER (APA, 2020; Presidência do Conselho de Ministros, 2024).

Independentemente da atividade geradora de resíduos, seja industrial, urbana, agrícola, hospitalar ou outros processos, cada capítulo divide-se em um ou mais subcapítulos, estando estes identificados por 4 dígitos, sendo os 2 primeiros indicadores do capítulo ao qual pertencem (APA, 2020).

Além disso, cada subcapítulo contém uma descrição detalhada dos resíduos que o constituem, atribuindo-lhes uma entrada, sendo assim, identificados por códigos de 6 dígitos. Para este último caso, os primeiros referem-se ao capítulo, os segundos ao subcapítulo e os dois últimos a um resíduo específico, como por exemplo, o código 12 01 05 que diz respeito a aparas de matérias plásticas, que pertence ao subcapítulo 12 01 que, por sua vez, pertence ao capítulo 12 (European Union, 2014a; APA, 2020).

Neste sentido, de modo a cumprir o n.º 4 do artigo 7.º do RGGR, os produtores e/ou detentores de resíduos detêm a responsabilidade da realização da classificação dos resíduos que produzem, conforme estabelecido na LER, com o intuito de permitir uma classificação coerente e correta dos resíduos, além de que, devem proceder à sua separação na origem, antes de efetuarem a respetiva classificação e, sempre que possível optar pela valorização dos mesmos. Contudo, as misturas de resíduos urbanos com origem em habitações particulares, não estão incluídas na obrigatoriedade de separação e seleção na origem (APA, 2020).

Ademais, os produtores podem verificar a necessidade de classificar os resíduos provenientes das suas atividades em diferentes capítulos, uma vez que, dependendo do processo que os origina, a sua classificação será distinta (APA, 2020).

No entanto, considerando que nem todas as misturas de resíduos são uniformes, a LER, inclui ainda na sua composição, algumas entradas para misturas de resíduos em que a sua separação não é viável. Não obstante, só são aplicáveis a misturas resultantes de processos, não podendo ser utilizadas para classificar resíduos produzidos em separado e misturados posteriormente com outros resíduos, além de que, a mistura de resíduos em diferentes recipientes é uma prática não autorizada pelo RGGR (APA, 2020).

Durante o processo de classificação de resíduos, segundo a LER, deve ser conhecida a informação necessária sobre o resíduo em questão, podendo esta ser obtida a partir das questões que se encontram apresentadas na Figura 9 (APA, 2020).

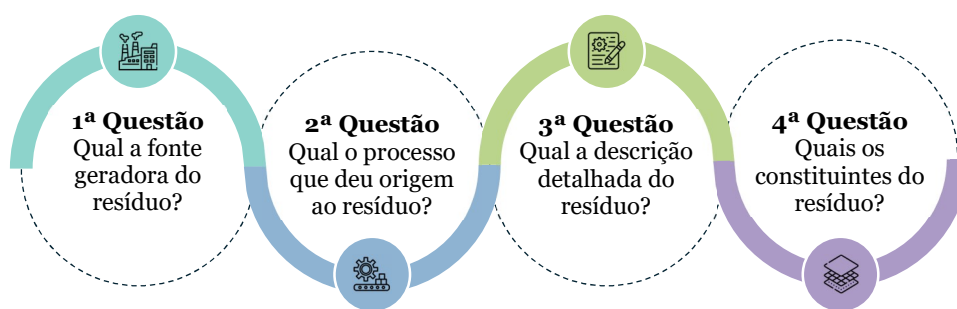


Figura 9 - Informações para a adequada Classificação de Resíduos (Adaptado de APA, 2020)

Não obstante, a classificação dos resíduos, abrange ainda a análise da perigosidade dos resíduos, sendo que, um resíduo é considerado perigoso se apresentar, pelo menos, uma das características de perigosidade listadas no Anexo III do Regulamento (UE) n.º 1357/2014 da Comissão, de 18 de dezembro de 2014, substituto do Anexo III da Diretiva 2008/98/CE do Parlamento Europeu e do Conselho (European Union, 2014b; APA, 2020).

Neste sentido, os resíduos podem assumir três tipologias distintas na lista LER, correspondendo a entradas absolutas de resíduos perigosos, entradas absolutas de resíduos não perigosos e entradas espelho, que dizem respeito aos resíduos que, dependendo da perigosidade, podem ser classificados como perigosos ou não perigosos (APA, 2020).

3.3 Política de Gestão de Resíduos na União Europeia e em Portugal

Parte da estratégia da UE para adoção de práticas de Economia Circular, engloba a redução da geração de resíduos, através de políticas e medidas que incluem a atualização da legislação existente neste âmbito, a conceção de produtos mais ecológicos, bem como as suas embalagens, o direito à reparação e, evidentemente, a gestão sustentável de resíduos (Parlamento Europeu, 2024b).

Com efeito, as políticas de gestão de resíduos da UE, tal como referido anteriormente, têm como principal objetivo a redução dos impactes na saúde pública e no ambiente, resultantes dos resíduos produzidos, melhorando a eficiência da utilização de recursos e, nas situações em que a geração de resíduos é inexorável, o foco será promovê-los de tal forma que, possam ser utilizados como um recurso, de modo que seja possível atingir níveis de reciclagem e eliminação de resíduos mais sustentáveis (Eurostat, 2024).

De forma análoga, Portugal, como estado-membro da União Europeia, possui uma política nacional de resíduos que, sendo constituída por orientações, objetivos, ações e metas, pretende atingir os objetivos propostos para a prevenção da geração de resíduos e garantia de que estes são reaproveitados como recurso, permitindo que os recursos naturais sejam utilizados eficientemente (APA, 2021b).

Neste sentido, dependendo do tipo de resíduos, Portugal, possui orientações fundamentais, fornecidas pelo Plano Nacional de Gestão de Resíduos (PNGR), Plano Estratégico para os Resíduos Urbanos (PERSU), Plano Estratégico para os Resíduos Não Urbanos (PERNU) e Estratégia para os Biorresíduos, que se encontram descritos na Tabela 5 (APA, 2021b).

Tabela 5 - Planos no âmbito dos Resíduos em Portugal (Adaptado de APA, 2021b)

Plano	Descrição
PNGR	Aprovado pela Resolução do Conselho de Ministros n.º 31/2023, o PNGR 2030, como instrumento de planeamento da política de resíduos, foca a sua atenção na promoção da prevenção da geração de resíduos, com o intuito de proteger, preservar e melhorar a qualidade do ambiente e da saúde humana, além de que, aposta numa mudança de paradigma, no que diz respeito à gestão dos resíduos em Portugal. Além disso, visa assegurar que, os resíduos que não possam ser evitados, sejam geridos, mediante a utilização eficiente dos recursos naturais e princípios da Economia Circular.
PERSU	Dirigindo a sua atenção para a prevenção da geração de resíduos e recolha seletiva, o PERSU 2030 foi aprovado pela Resolução do Conselho de Ministros n.º 30/2023 e visa fornecer linhas de orientação para a implementação de ações que permitam que Portugal esteja em sintonia com as políticas comunitárias, de modo a contribuir positivamente para a prevenção, reciclagem e valorização dos resíduos urbanos. Ademais, considera ainda outras dimensões, como os resíduos têxteis, os resíduos perigosos e os biorresíduos, promovendo o seu reaproveitamento e valorização.
PERNU	O PERNU 2030, aprovado pela Resolução do Conselho de Ministros n.º 127/2023, constitui um instrumento de referência, no que diz respeito à política de resíduos não urbanos, estabelecendo a visão, os objetivos e as metas globais e específicas, além da estratégia que suporta a implementação das medidas do quadro de resíduos não urbanos, até 2030.
Estratégia dos Biorresíduos	Incluindo medidas que permitem orientar a recolha e o tratamento de biorresíduos, a Estratégia dos Biorresíduos, tem como objetivos garantir uma recolha seletiva de biorresíduos, bem como a utilização da capacidade instalada de compostagem e de digestão anaeróbica, enquanto promove a utilização dos compostos resultantes da valorização dos biorresíduos. Além disso, visa promover a aquisição e instalação de equipamentos que tornem possível a recuperação do biogás proveniente dos processos de digestão anaeróbica. Partindo destes objetivos, a Estratégia dos Biorresíduos contribui para o alinhamento de Portugal com as metas europeias de reciclagem e com o Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050.

Uma vez que os resíduos industriais são classificados como resíduos não urbanos, é essencial referir que, o PERNU 2030, visa contribuir para a consecução dos ODS, nomeadamente para o ODS12 e ODS13, que dizem respeito à produção e consumo sustentáveis e ação climática, respetivamente, substituindo os planos setoriais anteriores, como o Plano Estratégico de Gestão dos Resíduos Industriais (PESGRI), o Plano Nacional de Prevenção de Resíduos Industriais (PNAPRI) e o Plano Estratégico dos Resíduos Hospitalares (PERH) (Presidência do Conselho de Ministros, 2023).

Consequentemente, o PERNU 2030, reflete a promoção da necessidade de serem criados modelos de produção, de serviços e de consumo inovadores e mais eficientes, bem como a melhoria do design dos produtos e a sua modularidade, com o intuito de reduzir a utilização de substâncias perigosas e promover o aumento do tempo de vida útil dos produtos, além da sua reutilização e reparação (Presidência do Conselho de Ministros, 2023).

Dado que o PERNU 2030, deve estar alinhado com o PNGR, a sua visão é subjacente ao que é proposto pelo PNGR, sendo, por isso, “promover a prevenção e gestão de resíduos integrados no ciclo de vida dos produtos, centradas numa economia tendencialmente circular e que garantam uma maior eficiência na utilização dos recursos naturais (Presidência do Conselho de Ministros, 2023, p. 51). Neste sentido, a Figura 10 evidencia, além da visão do PERNU 2030, as características fundamentais e inerentes a esta mesma visão (Presidência do Conselho de Ministros, 2023).

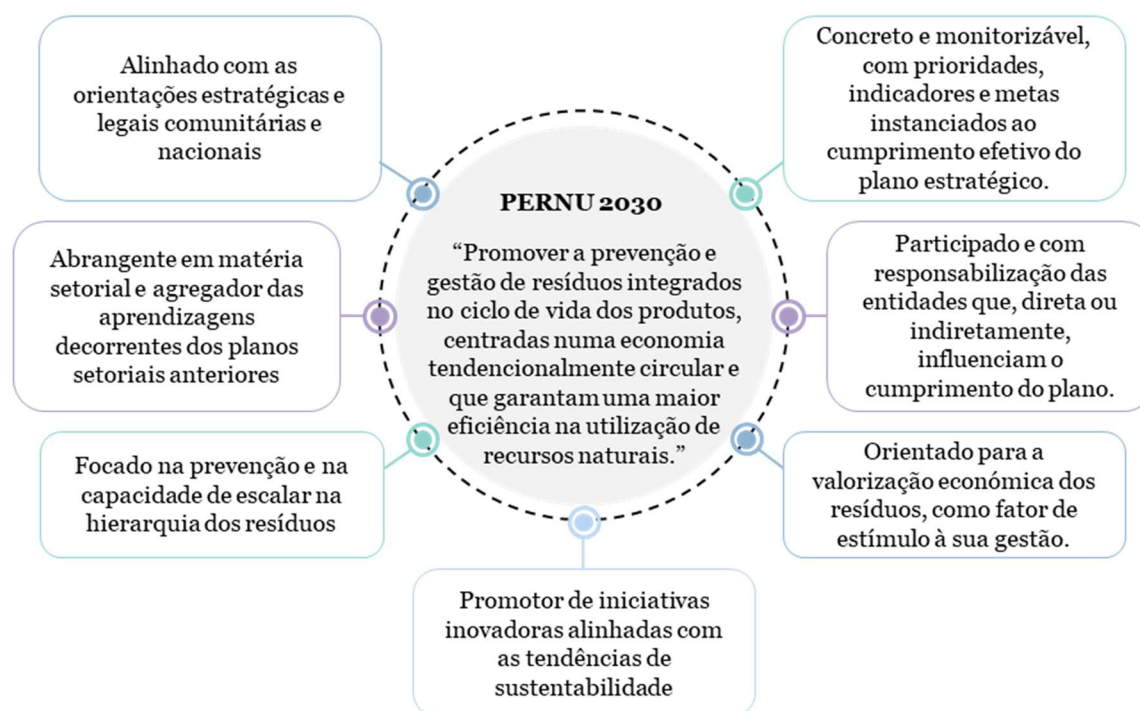


Figura 10 - Principais Características inerentes à visão do PERNU 2030 (Adaptado de Presidência do Conselho de Ministros, 2023)

De modo que a visão do PERNU 2030 possa ser concretizada, foram definidos quatro objetivos operacionais (OP), que, mediante a sua consecução, contribuem para a redução da produção de resíduos não urbanos, sendo estes (Presidência do Conselho de Ministros, 2023):

- OP1: Prevenção da produção de resíduos ao nível da quantidade e da perigosidade;
- OP2: Redução dos impactes ambientais resultantes da gestão de resíduos;

- OP3: Sensibilização, formação e disseminação, a nível académico e organizacional, em matéria de prevenção e gestão de resíduos;
- OP4: Aumento da capacidade de investimento e despesa em I&D+I orientados para a prevenção e gestão de resíduos.

Com o intuito de enfrentar o desafio de conciliar a abrangência transversal e setorial, o PERNU 2030, fornece objetivos operacionais, medidas e ações transversais, além de enfatizar um conjunto de medidas específicas, apresentadas na Tabela 6, orientadas para os diferentes setores de atividade (indústria, agricultura, construção e hospitalar), ao nível da prevenção e da gestão dos resíduos não urbanos (Presidência do Conselho de Ministros, 2023).

Tabela 6 - Medidas Específicas do PERNU 2030 para a Prevenção e Gestão de Resíduos Não Urbanos (Adaptado de Presidência do Conselho de Ministros, 2023)

Medidas ao nível da Prevenção dos Resíduos Não Urbanos		
M1	M2	M3
Clarificação do conceito de prevenção e criação de mecanismos para uma efetiva aplicação, avaliação e monitorização.	Aumento do envolvimento dos agentes dos diferentes setores para com os objetivos de prevenção, incluindo ao nível da formação, reconhecimento e partilha de boas práticas.	Adequação e potenciamento do uso de instrumentos económicos e financeiros em projetos dirigidos para a prevenção, garantindo a sua eficiência, eficácia e escalabilidade.
Medidas ao nível da Gestão dos Resíduos Não Urbanos		
M4	M5	M6
Consolidação da harmonização do licenciamento e garantia da correta exploração dos estabelecimentos de gestão de resíduos não urbanos.	Promoção da hierarquia de resíduos.	Potenciamento de uma correta gestão de resíduos perigosos.
M7	M8	M9
Aumento do envolvimento dos agentes dos diferentes setores para com os objetivos de prevenção, incluindo ao nível da formação, reconhecimento e partilha de boas práticas, de conhecimento e de infraestruturas.	Aumento do investimento em projetos de I&D+I orientados para a gestão de resíduos não urbanos, de modo a garantir a sua eficiência, eficácia e escalabilidade.	Contribuição para a implementação nacional de estratégias temáticas.

No âmbito do Plano Nacional de Resíduos Industriais, foram recolhidos junto de empresas, fatores de bloqueio e de incentivo, no que diz respeito à implementação de práticas de prevenção, nos diferentes setores, verificando-se que, os principais fatores condicionantes ou de bloqueio, dividem-se em acesso à informação existente, desafios de gestão e a própria estratégia empresarial (Presidência do Conselho de Ministros, 2023).

Por outro lado, com o intuito de auxiliar a integração de práticas de prevenção de resíduos e combater os fatores condicionantes, realçam-se a existência de incentivos técnicos, económico-financeiros, bem como sociais e políticos (Presidência do Conselho de Ministros, 2023):

Desta forma, como resultado da divulgação e implementação das políticas europeias e nacionais de gestão de resíduos, os dados divulgados relativos ao ano de 2022, revelaram que, em média, cada europeu gerou cerca de 5 toneladas de resíduos, resultando num total de 2,2 mil milhões de toneladas de resíduos em todo o território da União Europeia (Parlamento Europeu, 2024b).

Considerando, as principais atividades económicas responsáveis pela geração de resíduos (setor da construção, indústria mineira e pedreiras, serviços de água e resíduos, indústria transformadora, agregados familiares e setor energético), na Figura 11 estão apresentadas as percentagens de resíduos gerados na UE, no ano de 2022 (Eurostat, 2024).

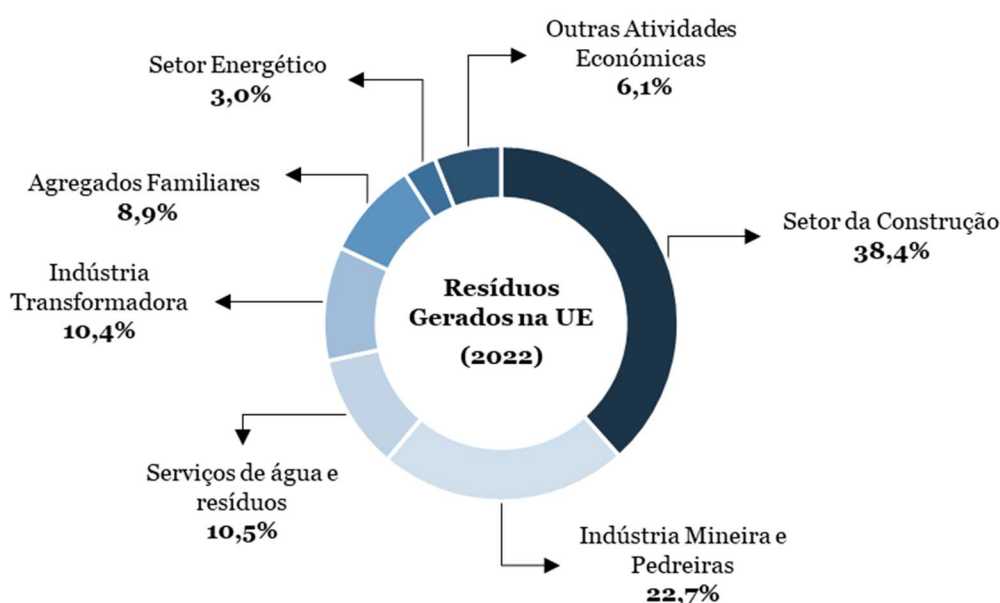


Figura 11 - Percentagem de resíduos gerados na UE, em 2022, por atividade económica (Adaptado de Eurostat, 2024)

Analisando as percentagens de resíduos gerados em território europeu por atividade económica, é possível evidenciar que, o setor da construção representa maior responsabilidade na quantidade de resíduos gerados, seguido da indústria mineira e pedreiras. Já em 3º e 4º lugar, respetivamente, apresentam-se os serviços de água e resíduos, bem como a indústria transformadora que foi responsável pela geração de 10,4% da totalidade dos resíduos, não sendo este valor linear em todos os países, uma vez que nem todos apresentam o mesmo nível de atividade, principalmente em relação à indústria transformadora, além de que, os níveis de preocupação ambiental também diferem (Eurostat, 2024).

Face à quantidade de resíduos produzidos em todo território, a UE procura, ativamente, tratar os seus resíduos, através de estratégias que permitam, essencialmente a sua recuperação, podendo estes ser reciclados e recolocados para outros fins ou incinerados, de forma que a energia produzida durante este processo, possa ser utilizada e convertida (Parlamento Europeu, 2024b).

Deste modo, incluindo os resíduos gerados e excluindo aqueles que a UE exporta, foram tratadas quase 2 mil milhões de toneladas de resíduos. De facto, em 2022, os resíduos recuperados evidenciavam cerca de 61,4% da totalidade de resíduos produzidos, verificando-se um aumento de cerca de 40,6% da quantidade de resíduos recuperados, em comparação com o ano de 2004 em que apenas tinham sido tratadas 870 milhões de toneladas (Parlamento Europeu, 2024b).

Comparativamente, segundo os dados divulgados pelo INE, em 2023, em Portugal, foram geradas cerca de 20,44 milhões de toneladas de resíduos, das quais 5,34 milhões correspondiam a resíduos urbanos e 15,1 milhões de toneladas a resíduos não urbanos gerados pelo tecido empresarial nacional (INE, 2023a).

No que diz respeito aos resíduos urbanos, verificou-se que o volume de resíduos gerados correspondia a 504,6 kg por habitante, sendo que 24,5% era resultado de processos de recolha seletiva, como ecopontos, porta-a-porta, circuitos especiais, ecocentros, entre outros e, os restantes 75,5% resultavam de uma recolha indiferenciada (INE, 2023a). De facto, partindo dos valores relativos a 2023, tem-se verificado um aumento gradual da percentagem de resíduos urbanos recolhidos em processos de recolha seletiva, evidenciando um aumento de 3,2 pontos percentuais, desde 2019 (INE, 2023a).

Em relação aos resíduos setoriais (ou resíduos não urbanos) gerados pelo tecido empresarial, verificou-se que, dependendo do tipo de atividade económica desempenhada e respetivas necessidades de utilização de recursos, a percentagem de resíduos gerados demonstrou ser distinta, tal como se apresenta na Figura 12 (INE, 2023a).

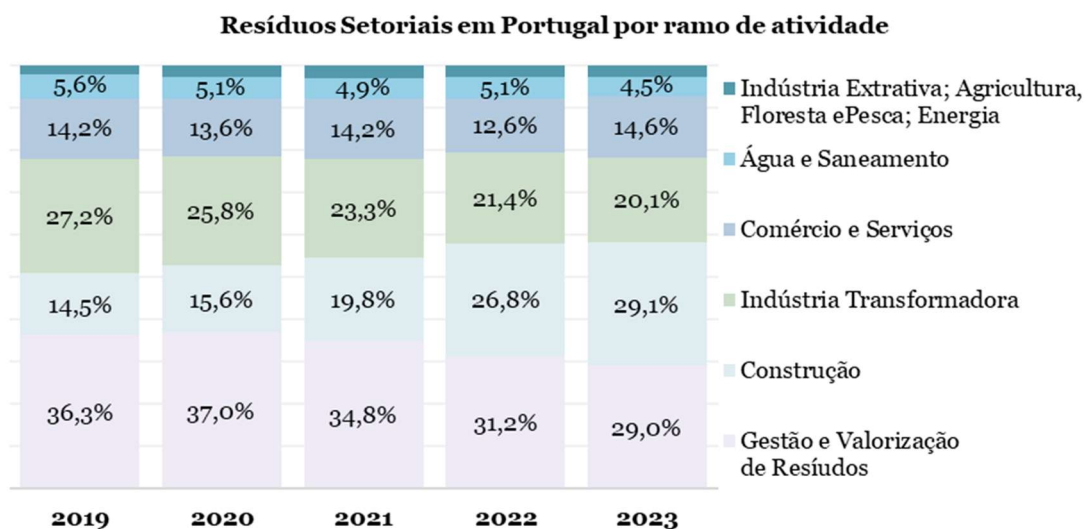


Figura 12- Percentagem de Resíduos Setoriais gerados em Portugal, por ramo de atividade (Adaptado de INE - Instituto Nacional de Estatística, 2023a)

Observando as percentagens de resíduos setoriais gerados por ramo de atividade, é importante realçar que, em Portugal, a indústria transformadora, ocupa um lugar de destaque na quantidade de resíduos gerados, evidenciando ser o terceiro maior grupo gerador de resíduos setoriais, com uma percentagem de 20,1% da totalidade de resíduos não urbanos gerados, depois do setor da construção e da própria atividade de gestão e valorização de resíduos (INE, 2023a).

No entanto, a percentagem de resíduos setoriais gerados pela indústria transformadora, apresentou um decréscimo gradual, desde 2019 (redução de 7,1 pontos percentuais). De facto, face a 2022, em 2023 a percentagem de resíduos setoriais gerados por este setor diminuiu 1,3 pontos percentuais, associados ao decréscimo de 3,1% da produção industrial no mesmo ano, onde a indústria transformadora registou uma evolução negativa de 3,6%, face a 2022 (INE, 2023a).

Neste sentido, é de igual forma importante realçar que, as atividades correspondentes à capacitação, tratamento e distribuição de água, saneamento, gestão de resíduos e despoluição, aumentaram cerca de 1,7% face a 2022, evidenciando um contributo positivo, mesmo que reduzido, para a gestão de resíduos em Portugal (INE, 2023a).

Além disso, as atividades económicas responsáveis pela geração de resíduos e respetivos resíduos gerados, contribuem, ativamente para o aumento das emissões de GEE. Prova disso, é o facto de, a seguir ao setor da energia, maior responsável pela emissão de GEE, os processos industriais e o uso de produtos, bem como os próprios resíduos, representaram, em 2023, 10,8% e 11% dessas emissões, respetivamente, sendo estes valores superiores face a 2022 (INE, 2023a).

Contudo, o empenho nacional na adoção de práticas de gestão de resíduos, mediante investimentos, gastos e despesas com a adoção de políticas nacionais de gestão de resíduos, é evidente aquando observação do aumento de 11,3% da despesa das Administrações Públicas aplicada no domínio da gestão de resíduos, compreendendo, em 2023, 43,5% da despesa deste setor, mesmo que, a despesa em atividades de proteção ambiental tenha diminuído cerca de 6,9% (INE, 2023a).

Já os investimentos das empresas neste âmbito, aumentaram 4,5% face a 2022, na maioria resultantes de investimentos noutros domínios do ambiente (82,6%), mas com relevância no aumento de 45,3% na gestão de resíduos, associado ao aumento de 17,3% de gastos no mesmo âmbito, sendo a atividade industrial a principal fração neste domínio (47,6% do total de gastos, em 2023). Ademais, grande parte da totalidade dos rendimentos nas empresas, resultou, essencialmente, do domínio da gestão de resíduos, numa percentagem de 99,7% (INE, 2023a).

Em relação a outras atividades de proteção do ambiente, como atividades ou projetos que contribuem para a Economia Circular, a sensibilização ambiental, a conservação da natureza e a biodiversidade, a percentagem de despesas corresponde a 27,1% do valor total do setor, resultando, efetivamente, num aumento de 2,3 pontos percentuais da proporção de empresas industriais com atividades de gestão e proteção do ambiente, fixando-se em 18,1%, no ano de 2023 (INE, 2023a).

De facto, desde 2022, em Portugal, as empresas demonstraram uma preocupação tendencialmente positiva em promover a sustentabilidade ambiental dos seus ciclos produtivos, bem como incluir na sua laboração, ações e atividades orientadas para a prevenção, redução e eliminação da poluição ou de qualquer outro processo que leve à degradação do ambiente, sendo que, as empresas com 1000 ou mais trabalhadores e 500 a 999 trabalhadores, são as que evidenciam maior responsabilidade ambiental, com 100% e 96,6% das empresas a adotarem medidas de proteção ambiental, respetivamente. Não obstante, nas empresas posicionadas nos escalões de menor dimensão, a adoção de medidas

de proteção ambiental ainda é reduzida, com valores de 57,1% (50 a 99 trabalhadores) e 11,8% (menos de 49 trabalhadores) (INE, 2023a).

Quando observada a percentagem de empresas que decidiu, efetivamente, adotar medidas de proteção ambiental, a indústria de borracha e matérias plásticas, demonstra ter melhorado a sua conduta ambiental, aumentando a proporção da indústria com atividades de gestão e proteção do ambiente em 11,2 pontos percentuais, situando-se, em 2023, com 41%, como a segunda maior indústria neste âmbito (INE, 2023a).

Neste sentido, a maior preocupação desta indústria, residiu em investir em medidas de proteção da qualidade do ar e do clima, seguida da gestão dos resíduos gerados. Contrariamente, no que diz respeito a gastos, o domínio da gestão de resíduos representou mais gastos na indústria de borracha e matérias plásticas (INE, 2023a).

Partindo da observação dos rendimentos gerados pelas empresas, é possível retirar que, a maioria dos rendimentos, decorreu da venda de resíduos e/ou materiais reciclados, tornando cada vez mais relevante a adoção de práticas de gestão de resíduos, associadas a estratégias de Economia Circular (INE, 2023a). Na Figura 13 estão apresentadas a percentagem de vendas de resíduos e/ou materiais reciclados das empresas com atividades de gestão e proteção do ambiente, por atividade económica, relativamente ao ano de 2023 (INE, 2023a).

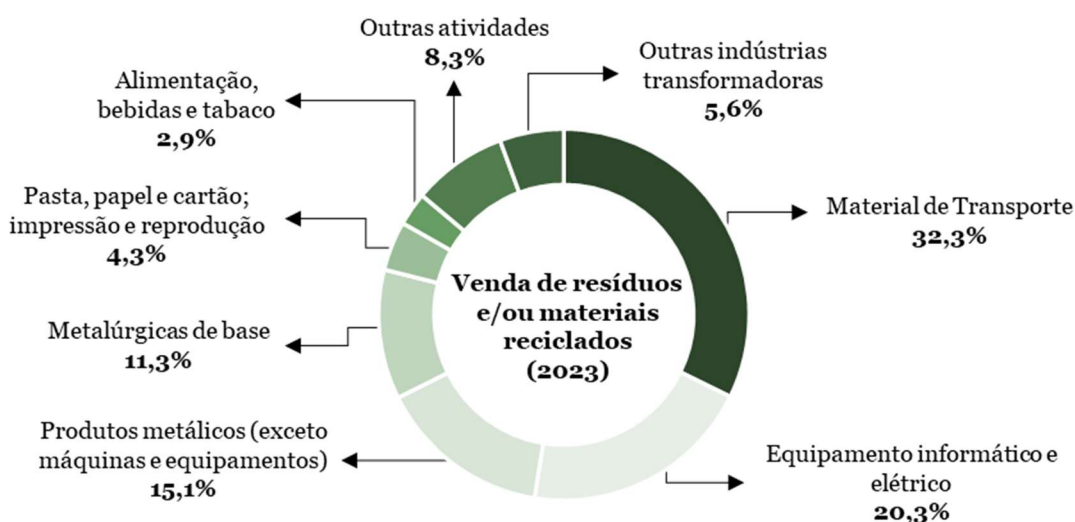


Figura 13 - Venda de resíduos e/ou materiais reciclados, por atividade económica, em 2023 (Adaptado de INE - Instituto Nacional de Estatística, 2023a)

Na verdade, em 2023, as indústrias de material de transporte, indústrias de equipamento informático e elétrico, as indústrias de produtos metálicos, exceto máquinas e

equipamentos, bem como as indústrias de metalúrgicas de base, demonstraram ser as principais responsáveis pela venda de resíduos e/ou materiais reciclados, justificando, desta forma, a necessidade e pertinência de serem produzidos materiais reciclados ou compostos por resíduos, noutras indústrias, como é o caso da indústria da borracha e matérias plásticas, que não evidencia sequer, qualquer parcela significativa neste âmbito (INE, 2023a).

Desta forma, alinhado com a estratégia da UE em matéria de tratamento de resíduos setoriais, em Portugal, em 2023, foram tratados e remetidos para operações de valorização cerca de 13,7 milhões de toneladas de resíduos não urbanos, evidenciando 90,8% da totalidade de resíduos gerados. De facto, nos últimos cinco anos, Portugal demonstrou uma preocupação acrescida com o destino final dos resíduos setoriais gerados em território nacional, revelando uma proporção substancial de resíduos encaminhados para valorização, registando um valor médio de 87,5% (INE, 2023a).

Após um aumento significativo da quantidade de resíduos remetidos para atividades de eliminação em 2021, nos últimos três anos, o número de resíduos encaminhados para este tipo de destino, diminuiu ligeiramente, registando em 2023, 1,4 milhões de toneladas de resíduos, enquanto a quantidade global de resíduos aumentou cerca de 1,4 milhões de toneladas em comparação com 2021. Deste modo, é importante realçar que, o aumento da quantidade de resíduos gerados, enquanto ocorreu uma diminuição das atividades de eliminação, indica que houve, claramente, uma preferência em tratar os resíduos mediante ações de valorização (INE, 2023a).

No âmbito da valorização e eliminação de resíduos, como formas de tratamento dos mesmos, na UE, as operações de valorização mais utilizadas no ano de 2022, foram a reciclagem (40,8% da totalidade dos resíduos), a utilização dos resíduos como enchimento (14,2% da totalidade dos resíduos) e a valorização energética (6,4% da totalidade dos resíduos). Contudo, são notáveis as diferenças entre os diferentes países em matéria de atividades de tratamento de resíduos, tal como consta na Figura 14 (Eurostat, 2024).

Tratamento de resíduos por tipo de valorização e eliminação, 2022
(% do tratamento total)

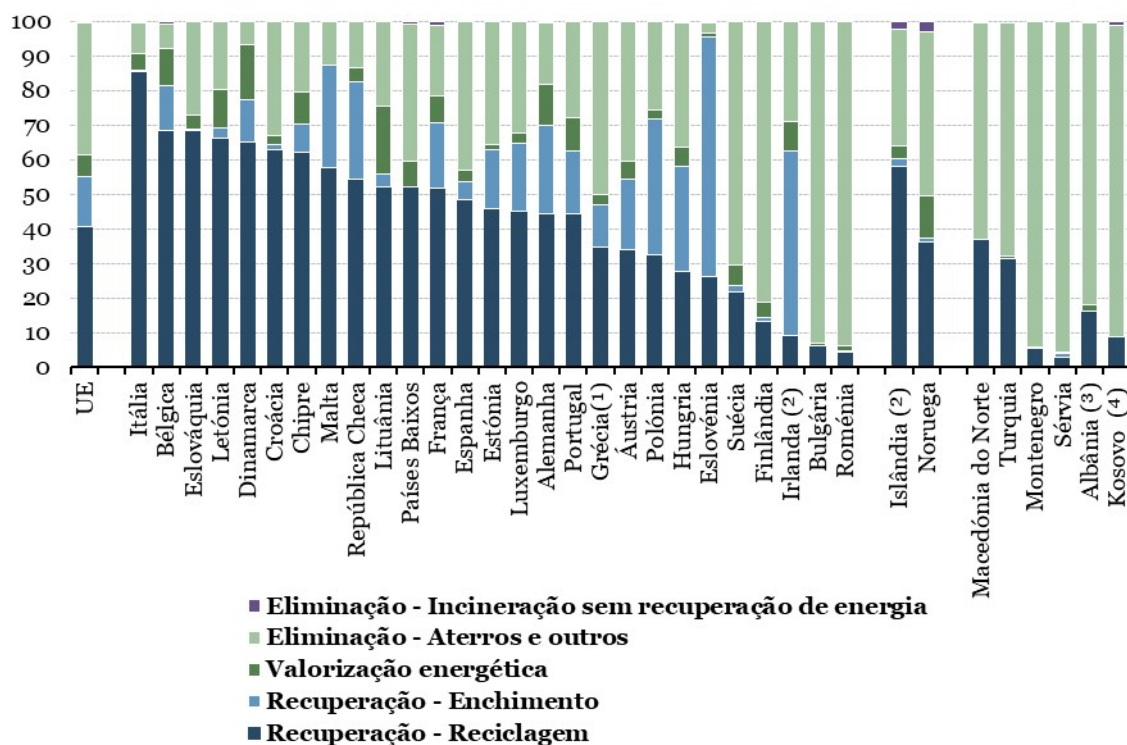


Figura 14 - Tratamento de resíduos por tipo de valorização e eliminação na UE, em 2022 (Adaptado de Eurostat, 2024)

De facto, comparando Portugal com os restantes países da UE, é evidente a preferência por encaminhar os resíduos para tratamentos que permitam a sua recuperação, mediante estratégias de reciclagem, seguido da utilização dos resíduos como enchimento, permitindo que, neste sentido, assuma a 18ª posição em matéria de reciclagem (Eurostat, 2024).

No entanto, em 2022, as práticas de eliminação de resíduos em aterros, ainda representavam uma parcela significativa para o país, em comparação com outros países da UE, como por exemplo, a Itália e a Bélgica, onde a maioria dos resíduos são reciclados e apenas uma pequena percentagem é eliminada em aterros (Eurostat, 2024). Não obstante, há outros países como a Roménia, a Bulgária e a Finlândia, onde a deposição em aterros é predominante, com pouca recuperação dos resíduos (Eurostat, 2024).

Deste modo, considerando as alternativas para o tratamento de resíduos, é evidente que, em 2022, a UE deu preferência, de forma geral à recuperação de resíduos, maioritariamente através da reciclagem e reutilização dos mesmos, tornando a eliminação uma opção menos favorável. Contudo, é importante realçar que, a reciclagem e reutilização de determinados materiais, como por exemplo os plásticos, ainda apresenta lacunas significativas aquando

da implementação de soluções mais sustentáveis em grande escala, tornando a eliminação em aterros ou por incineração mais acessíveis, mesmo que não sejam sustentáveis (Fayshal, 2024).

Capítulo 4

Reciclagem de Resíduos Industriais

A inadequada eliminação de resíduos industriais, origina diversos impactes ambientais, sendo impreterível a adoção de técnicas de gestão de resíduos industriais, principalmente resíduos poliméricos, decorrentes da produção de produtos plásticos (Fayshal, 2024; Salman *et al.*, 2025).

Com efeito, neste capítulo serão abordadas a caracterização e a classificação de resíduos industriais, focando, essencialmente no PVC, PETG, HIPS e no polimetilmetacrilato (PMMA), a importância da reciclagem destes resíduos para a Economia Circular, bem como os frequentes tipos de reciclagem que podem ser aplicados, reciclagem mecânica e química, abordando os respetivos desafios.

4.1 Resíduos Poliméricos Industriais

Os resíduos industriais, gerados por operações de fabrico ou atividades industriais, distinguem-se dos resíduos sólidos urbanos, uma vez que, em alguns casos, possuem resíduos tóxicos a si associados, não convencionais e em grandes quantidades. Desta forma, a sua incorreta eliminação, resulta num aumento da poluição, colocando em causa a saúde pública e humana (Salman *et al.*, 2025).

Na verdade, os resíduos industriais podem assumir várias formas, dependendo do processo que os origina, sendo exemplos desses resíduos, a sucata metálica, as aparas de madeira, as cinzas volantes e os excedentes de plástico (Salman *et al.*, 2025).

A elevada quantidade de resíduos industriais gerados, nomeadamente os excedentes de plástico, decorre do aumento insustentável da produção e consumo de materiais plásticos, impulsionado, essencialmente, pela transição global para a utilização de embalagens e recipientes de utilização única, difundindo-se, rapidamente para as restantes indústrias e tornando-se indispensável em diversas aplicações, quer seja no vestuário e no calçado, em soluções para pontos de venda ou artigos eletrónicos e, até mesmo, na indústria dos transportes (Fayshal, 2024; Mehta *et al.*, 2025).

Considerando que os plásticos são polímeros sintéticos constituídos por moléculas orgânicas maleáveis que demonstram capacidade para adquirir qualquer forma e tamanho

na produção de objetos sólidos, a sua utilização deve-se, essencialmente, às suas propriedades físico-químicas que o transformam num excelente substituto dos materiais convencionalmente utilizados, como a madeira, o vidro, a cerâmica e o metal (Fayshal, 2024; Mehta *et al.*, 2025). De facto, a acessibilidade, a leveza, a boa estabilidade, o baixo custo, o isolamento elétrico, a resistência à corrosão, a flexibilidade de conceção e a versatilidade, são exemplos de características que contribuem para o aumento da sua utilização nos vários domínios (Mehta *et al.*, 2025).

Neste sentido, os polímeros podem ser classificados como termoplásticos, termoendurecíveis e elastómeros, tendo em consideração a sua resposta física ao aumento da temperatura (Zanchin and Leone, 2021). Na Figura 15 apresenta-se a classificação dos polímeros, bem como a respetiva descrição.

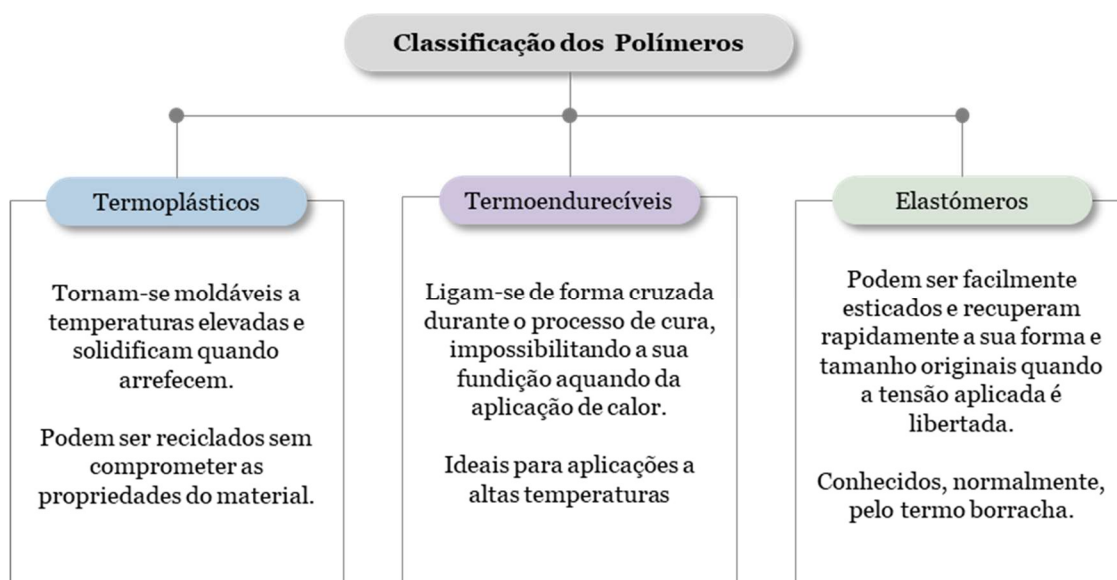









Figura 15 - Classificação dos Polímeros (Adaptado de Zanchin and Leone, 2021)

A nível industrial e comercial, o politereftalato de etileno (PET), o polietileno (PE), o polietileno de baixa densidade (PEBD), o polietileno de alta densidade (PEAD), o polipropileno (PP), o poliestireno (PS) e o policloreto de vinilo (PVC) são os termoplásticos mais utilizados (Fayshal, 2024; Mehta *et al.*, 2025), possuindo, deste modo, símbolos de identificação (Sociedade Ponto Verde, 2020). Desta forma, na Tabela 7, apresentam-se os símbolos de identificação, as descrições e as respetivas aplicações, bem como as principais propriedades dos plásticos mencionados.

Tabela 7 – Identificação, Descrição e Propriedades dos Plásticos (Adaptado de Sociedade Ponto Verde, 2020; Fayshal, 2024)

Designação do Plástico	Símbolo de Identificação	Caracterização	Propriedades
PET		Devido à sua utilização generalizada em embalagens, armazenamento de alimentos, garrafas de água e refrigerantes, produtos de higiene, equipamentos de proteção individual e aparelhos médicos, o PET é um dos resíduos plásticos mais encontrados na recolha de resíduos sólidos urbanos.	<ul style="list-style-type: none"> • Transparente; • Impermeável; • Leve; • Rígido; • Elevada ductilidade.
PEAD		Visto que possui uma densidade superior, o PEAD torna-se um polímero bastante versátil e com inúmeras aplicações, como na produção de embalagens de alimentos passíveis de reutilização, contentores para produtos de consumo diário, embalagens de detergentes, produtos de higiene, óleos para automóveis, utensílios domésticos, tampas de recipientes, entre outros.	<ul style="list-style-type: none"> • Inquebrável; • Leve; • Impermeável; • Elevada resistência química.
PVC		Comparativamente com os restantes polímeros, os setores da construção e hospitalar, privilegiam a utilização de materiais de PVC, devido às suas propriedades, podendo ser encontrado em perfis de janelas e portas, canos e tubos. Contudo, tem sido substituído em algumas aplicações, como em produtos de higiene e embalagens, pelo PET.	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada dureza; • Resistência ao oxigénio e à água.
PEBD		O PEBD é frequentemente utilizado na produção de sacos de plástico de utilização única, películas aderentes para conservação de alimentos, bolsas de soro medicinal e sacos do lixo, devido às suas propriedades e baixa densidade.	<ul style="list-style-type: none"> • Transparente; • Leve; • Impermeável; • Elevada flexibilidade.
PP		O PP, devido às suas propriedades distintas em comparação com os restantes polímeros, é frequentemente utilizado em produtos que necessitem de evidenciar maior resistência e conservação, como embalagens de detergentes, tubos para água quente, fios e cabelagens, caixas para conservação de bebidas e fibras de tapetes.	<ul style="list-style-type: none"> • Inquebrável; • Conserva o aroma; • Transparente; • Aspeto brilhante; • Resistente a mudanças de temperatura.

<p>PS</p>	 <p>PS</p>	<p>Considerando as suas propriedades de isolamento, combinadas com a sua leveza, o PS, é comumente utilizado na produção de embalagens, podendo estes ser de várias formas. O PS, apresenta também algumas variações, podendo ser encontrado sob a forma de poliestireno expandido, EPS (esferovite) e HIPS, sendo este último reforçado com polibutadieno. Assim, é utilizado na produção de copos de iogurte, gelados e doces, cestos de supermercados, tampas, pratos, aparelhos eletrónicos, aparelhos de barbear descartáveis e brinquedos</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Impermeável; • Difícil de quebrar; • Leve; • Aspeto brilhante.
<p>Outros</p>	 <p>Outros</p>	<p>Constituindo outros tipos de plásticos com diferentes propriedades, podem ser considerados aqueles que são utilizados em distintas opções de design, como as embalagens de toalhetes húmidos e de alimentos embalados em vácuo, os pacotes de alimentos, as bisnagas de pasta de dentes, entre outros.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Flexíveis; • Leves; • Resistentes à abrasão; • Permitem diferentes opções de design.

De facto, a magnitude da utilização destes materiais, é verificada pela produção de cerca de 413,8 milhões de toneladas de plásticos, apenas em 2023, a nível mundial, tendo a UE contribuído em 12,3% deste valor (Plastics Europe, 2024). Além disso, verificou-se que o PP, o PEBD, o PVC e o PEAD, bem como outros termoplásticos e termoendurecíveis, correspondiam a grande parte dos resíduos poliméricos gerados nesse ano, registando um peso de 19%, 14%, 12,8%, 12,2%, 7,1% e 8,6%, respetivamente (Plastics Europe, 2024).

Considerando as quantidades de outros termoplásticos (10,9%) e termoendurecíveis (7,6%) que foram gerados pela UE em 2023, pode-se afirmar que, além dos plásticos mais comuns, é possível encontrar de igual forma, quantidades significativas de resíduos de outros plásticos, provenientes de aplicações industriais (Plastics Europe, 2024).

Desta forma, no âmbito da presente dissertação, importa realçar o polietileno tereftalato glicol (PETG) (Da Rocha *et al.*, 2024), o poliestireno de alto impacto (do inglês, *High-Impact Polystyrene* (HIPS)) (Giakoumakis *et al.*, 2024) e o polimetilmetacrilato (PMMA), mais conhecido como acrílico (Kim *et al.*, 2024).

Na verdade, o PETG é considerado um copolímero amorfo que contém grupos de ciclohexanodimetanol na sua composição, melhorando as propriedades do seu polímero de

origem, o PET. Partindo disto, é importante realçar que, o PETG possui maior flexibilidade e uma temperatura de transição vítrea que permite que este seja menos frágil, em comparação com o PET. Assim, a utilização deste polímero sobressai aquando da produção de filamentos para o fabrico aditivo, como é o caso da impressão 3D, em dispositivos médicos e proteções faciais, com potencial para ser aplicado em aplicações espaciais e em ambientes nucleares (Da Rocha *et al.*, 2024).

De facto, as aplicações do PETG devem-se, essencialmente, às suas propriedades físicas e químicas, uma vez que este apresenta grande versatilidade, já que tem um aspeto transparente e demonstra ser resistente ao calor e a diferentes produtos químicos, bem como elevada flexibilidade, miscibilidade, elevada resistência à tração e alta densidade (C. Yan *et al.*, 2024; Da Rocha *et al.*, 2024).

Com efeito, prevê-se que a taxa composta de crescimento anual do PETG, em termos de mercado global, aumente cerca de 3,3% até 2033, em comparação com 2023, cujo aumento do consumo e produção deste material, tem como principal consequência a geração de resíduos pós-processamento e pós-consumo, justificando-se a premência do desenvolvimento de estratégias que permitam a sua reciclagem e reutilização (Techawinyutham *et al.*, 2021; Kaitwade, 2023).

Além disso, o PETG demonstra ser uma escolha apelativa, no que diz respeito ao seu uso como enchimento de outros materiais, uma vez que tolera o aumento da temperatura, comparativamente com outros polímeros, cujo as propriedades não permitem que possam entrar em contacto com outros materiais a elevadas temperaturas aquando da sua reutilização como reforço de novos produtos (C. Yan *et al.*, 2024).

No mesmo âmbito, existe ainda o HIPS que, sendo um material bifásico constituído por uma matriz de poliestireno livre e por partículas de borracha, ou seja, polibutadieno, rodeadas de PS enxertado covalentemente, este polímero pode ser considerado uma versão reforçada do PS, representando cerca de 30 a 40% da produção mundial de PS (Giakoumakis *et al.*, 2024).

Na realidade, são as pequenas partículas de polibutadieno que conferem uma melhoria nas propriedades mecânicas e químicas do polímero, verificando-se assim uma maior resistência ao impacto, alongamento na rutura superior, elevada resistência à fratura, elevada permeabilidade aos gases e contaminantes, bem como comportamentos distintos

na presença de calor, luz e radiação, em comparação com o PS (El Bhilat *et al.*, 2021; Giakoumakis *et al.*, 2024).

Contudo, o reprocessamento do HIPS para fins de reciclagem, demonstra ser um processo pouco viável, devido às reações de degradação que ocorrem, decorrentes da presença da fase elastómera, conduzindo a uma perda constante das propriedades macroscópicas do polímero. Desta forma, na maioria dos casos, mesmo após tentativa de reciclagem e reprocessamento, este material acaba por voltar aos aterros, onde não possui qualquer utilidade, além de representar uma opção de eliminação pouco adequada (El Bhilat *et al.*, 2021; Velásquez *et al.*, 2024).

Neste sentido, considerando que os materiais à base de poliestireno, representam cerca de 7% da produção global de plásticos, importa realçar que, grande parte dos resíduos de HIPS, cujo destino final são os aterros, provém da geração de resíduos elétricos e eletrônicos que, em 2022, registou o valor de 59 milhões de toneladas recolhidas, sendo que, 42% correspondiam a resíduos cujo material principal era o HIPS, sendo o seu tratamento e reciclagem prioritários, independentemente do setor de origem (Giakoumakis *et al.*, 2024).

Além do PETG e do HIPS, o PMMA, comumente denominado de acrílico, é um polímero termoplástico que representa um elevado volume no mercado global em aplicações diversas, como fibras óticas, ecrãs, itens de decoração, proteções, entre outros, devido à sua transparência, brilho, elevada resistência a ambientes severos e dureza da superfície (Gkaliou *et al.*, 2023; Kim *et al.*, 2024).

Com efeito, devido à procura global do PMMA pelas diversas indústrias, prevê-se que, de 2023 até 2028, a taxa composta de crescimento anual seja de 5,54%, evidenciando um aumento da sua produção, comercialização e utilização (Vidakis *et al.*, 2025).

No entanto, a elevada produção e comercialização deste material, resulta numa quantidade elevada de resíduos de PMMA que, não sendo geridos adequadamente, são queimados ou depositados em aterros, justificando-se a urgente necessidade de adotar estratégias que permitam reciclar e reaproveitar estes resíduos, esperando-se que, até 2033, a taxa composta de crescimento anual da sua reciclagem seja de 6,73%, considerando a possibilidade de incluir as indústrias de recolha e processamento de resíduos de PMMA, de modo a contornar esta situação (Kim *et al.*, 2024; Vidakis *et al.*, 2025).

Neste sentido, ao longo dos últimos anos, tem sido estudada a possibilidade de aplicar técnicas de reciclagem termoquímica ao PMMA, como a pirólise, demonstrando ser uma hipótese economicamente viável. Contudo, além dos elevados gastos de energia durante o processo, esta técnica revela a necessidade de existirem etapas de purificação posteriores que garantam a viabilidade do material, sendo estas bastante dispendiosas, além de que, nem sempre o material atinge pureza suficiente para aplicação em fins gerais (Gkaliou *et al.*, 2023).

Considerando os materiais que serão utilizados na presente dissertação, na Tabela 8 apresentam-se os valores padrão de diferentes propriedades mecânicas e físicas dos polímeros PVC, PETG, HIPS e PMMA, tendo sido reunidos mediante pesquisa e leitura de diversos artigos e estudos neste âmbito.

Tabela 8 - Propriedades Mecânicas e Físicas dos polímeros PVC, PETG, HIPS e PMMA

	Unidade	PVC	PETG	HIPS	PMMA
Densidade	ρ [g/cm ³]	1,30 – 1,150	1,23 – 1,70	1,00 – 1,136	0,928 – 1,20
Dureza	---	90,9 – 92,5 (HSA) ⁴	104 – 121 (HRR) ⁵	74,45 – 74,83 (HSD) ⁶	2,50 – 3,00 (Escala de <i>Mohs</i>) ⁷
Resistência à Tração	σ [MPa]	31,90 – 90,0	12,28 – 101	4,00 – 42,0	5,39 – 72,4
Modulo de Young	E [GPa]	2,00 – 7,00	0,70 – 2,00	0,90 – 2,10	0,079 – 4,614
Alongamento na rutura	ε [%]	32,9 – 80,0	3,20 - 620	2,50 – 44,0	1,54 – 13,0
Temperatura de transição vítrea	Tg [°C]	53,9 – 87,0	69,8 – 85,0	95,0 – 100	85,0 - 130
Temperatura de fusão	Tm [°C]	160 – 212	160 – 420	180 – 260	160 - 240
Condutividade Térmica	λ [W/m-K]	0,15 – 0,21	0,162 – 7,74	0,10 – 0,172	0,12 – 0,18

(Fontes: Wirawan, Zainudin and Sapuan, 2009; Ali, Karim and Buang, 2015; Ettah *et al.*, 2016; Yu *et al.*, 2016; Krolkowski and Piszczek, 2017; Callister and Rethwisch, 2018; Hirayama and Saron, 2018; Bhandari, Lopez-Anido and Gardner, 2019; Durgashyam *et al.*, 2019; Guessasma, Belhabib and Nouri, 2019; Latko-Duralek, Dydek and Boczkowska, 2019; Sirjani, Cragg and Dymond, 2019; Srinivasan *et al.*, 2020, p. 333; Kumar *et al.*, 2021; Mahesh, Joladarashi and Kulkarni, 2021; Olofinnade, Chandra and Chakraborty, 2021; Pekdemir *et al.*, 2021; Sousa, Pinho and Piedade, 2021; Alinejad *et al.*, 2022; Demewoz and Yeh, 2022; Sánchez-Calderón *et al.*, 2022; Xu *et al.*, 2022; Jia *et al.*, 2023; Poojitha *et al.*, 2023; Velej, Trembly and Al-Majali, 2023; Zhang and Sun, 2023; Zheng *et al.*, 2023; Bragin, Popov and Eremin, 2024; Ishaq *et al.*, 2024; Kechagias *et al.*, 2024; Kucukesmen and Sarac, 2024; Prajapati *et al.*, 2024; Qian *et al.*, 2024; Syduzzaman *et al.*, 2024; Thuong *et al.*, 2024; Yan *et al.*, 2024; Kundu *et al.*, 2025; Salehi *et al.*, 2025; Vidakis *et al.*, 2025.)

⁴ Para o PVC foi considerada a escala de dureza HSA, ou seja, *Hardness shore A* (Qian *et al.*, 2024).

⁵ Para o PETG foi considerada a escala de dureza HRR, cuja designação é *Hardness Rockwell R* (C. Yan *et al.*, 2024).

⁶ Para o HIPS foi considerada a escala de dureza HSD, ou seja, *Hardness shore D* (Thuong *et al.*, 2024).

⁷ Para o PMMA foi considerada a escala de dureza de *Mohs* (Zheng *et al.*, 2023).

Todavia, é necessário considerar que, a durabilidade e a resistência à degradação dos plásticos e dos seus resíduos, como o PETG, o HIPS e o PMMA, contribuem para que estes sejam insolúveis na natureza e, por conseguinte, representem um elevado risco ambiental, quer seja pelas emissões de GEE ou pelos impactes negativos nos ecossistemas. Neste sentido, é importante reforçar a urgente necessidade de uma gestão adequada dos resíduos plásticos, que inverta e elimine a sua deposição em aterros ou descarte nos oceanos (Mondal and Kulkarni, 2022; Fayshal, 2024; Kim *et al.*, 2024).

4.2 Importância da Reciclagem de Resíduos Poliméricos na Economia Circular

A reciclagem e a reutilização dos plásticos e respetivos resíduos, como princípios fundamentais da utilização sustentável dos recursos, têm como principal objetivo, permitir que exista uma conversão da economia linear frequentemente utilizada na produção de produtos plásticos, numa economia circular, cujo princípios residem em eliminar e inovar a circulação de plásticos, contribuindo, assim, para um futuro mais sustentável (Kunlere and Shah, 2023; Mehta *et al.*, 2025).

Na verdade, uma das principais características da Economia Circular, traduz-se na eliminação dos produtos plásticos que não são necessários, mediante incorporação de uma constante inovação e consciência para a reutilização e reciclagem destes materiais, colocando-os em circulação durante o maior tempo possível, de modo a minimizar a sua eliminação e deposição em aterros (Mehta *et al.*, 2025).

Com efeito, os resíduos poliméricos passam a ser encarados como um recurso no desenvolvimento e fabrico de novos produtos em sistemas fechados de produção e consumo, mediante pré-processamento e reciclagem, onde todas as partes da cadeia de valor devem ser repensadas (Johansen *et al.*, 2022; Fayshal, 2024).

De facto, uma vez que a transição para a Economia Circular não passa apenas por modificar o sistema de tratamento de resíduos, é necessário considerar a combinação dos resíduos com as diferentes fases da cadeia de valor, de modo a abranger a conceção, a produção, a utilização, a reciclagem e a eliminação, evidenciando-se a necessidade social de desenvolver e potencializar conhecimentos que apoiem esta transição (Johansen *et al.*, 2022; Fayshal, 2024).

Contudo, os conhecimentos necessários para uma transição eficaz, não se baseiam apenas na fase de “fim de vida” dos plásticos, abrangendo de igual forma outras fases da cadeia de

valor, como a concepção, onde o foco será o desenvolvimento de produtos mais sustentáveis e que integrem na sua composição resíduos plásticos (Johansen *et al.*, 2022). Na Figura 16, apresenta-se uma representação das fases que compõem a cadeia de valor, incluindo a inserção dos resíduos plásticos na mesma (Fayshal, 2024).

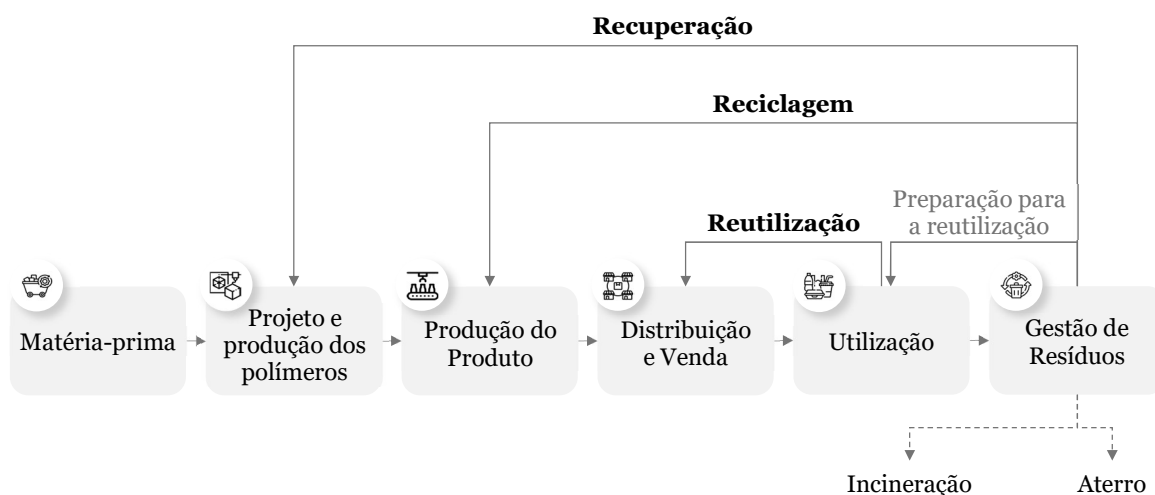


Figura 16 - Relação entre a recuperação, reciclagem e reutilização com as diferentes fases da cadeia de valor (Adaptado de Fayshal, 2024)

Promovendo a eficiência dos recursos, a gestão eficaz dos resíduos e, conseqüentemente, a divulgação de práticas sustentáveis de gestão ambiental, a reciclagem apresenta diversos benefícios neste âmbito, como por exemplo, a redução das emissões de GEE decorrentes de processos de fabricação mais sustentáveis, mediante conservação da energia (Kunlere and Shah, 2023).

Ademais, permitindo a transformação de resíduos recicláveis em novos materiais, como é o caso dos plásticos, a reciclagem contribui ativamente para a atenuação da dependência de matérias-primas e recursos virgens, diminuindo, desta forma, a necessidade de extração e transformação destes recursos, evitando a utilização intensiva de energia e processos prejudiciais na extração e preparação das matérias-primas (Kunlere and Shah, 2023).

Por outro lado, a reciclagem dos resíduos poliméricos industriais incrementa novas opções no fim de vida dos produtos, evitando que estes sejam depositados em aterros ou incinerados, minimizando assim a poluição decorrente da liberação de emissões nocivas e contaminantes, provenientes destes processos (Kunlere and Shah, 2023).

Neste sentido, vários países, em cooperação com as diversas indústrias, têm ponderado e optado pela adoção de práticas mais sustentáveis em matéria de resíduos plásticos,

implementando nos seus sistemas produtivos, modelos de Economia Circular, com o intuito de maximizar a reutilização e a reciclagem dos plásticos (Johansen *et al.*, 2022).

4.3 Técnicas de Reciclagem

Considerando que, das 400 milhões de toneladas de resíduos plásticos geradas em 2022, apenas 9% foi submetida a processos de reciclagem, e que a produção de plásticos a nível mundial tem aumentado a um ritmo incontrolável, é impreterível que os resíduos poliméricos sejam transformados em matéria circular, mediante aplicação de técnicas de reciclagem (Schwarz *et al.*, 2021; Fayshal, 2024).

No entanto, a reciclagem completa dos resíduos poliméricos, demonstra ser um processo complexo e composto por diversas fases que, dependendo do tipo de reciclagem a ser aplicada, apresentam maior ou menor complexidade. Não obstante, é possível considerar que, independentemente da técnica de reciclagem, as fases iniciais de eliminação, recolha e triagem dos resíduos poliméricos são transversais a todas as abordagens (Nafiu *et al.*, 2025).

De facto, após serem eliminados, os resíduos de produtos plásticos são submetidos a um processo de recolha que, sendo feito de forma automatizada ou manual, permite recolhê-los para passarem para a fase seguinte, a triagem. Contudo, o processo de recolha de resíduos poliméricos, evidencia alguns impactes negativos, dependendo do método utilizado. Isto é, se for realizado de forma automatizada, requer uso de equipamentos específicos que, consumindo muita energia, representam um fator de risco para o ambiente. Se realizado de forma manual, requer a existência de elevada mão de obra e pode colocar em causa a sustentabilidade social, associada à exploração da mão de obra, visto ser um trabalho invasivo, nocivo e realizado nas lixeiras e sucatas (Nafiu *et al.*, 2025).

Neste sentido e, mesmo que o processo automatizado de recolha apresente os impactes ambientais mencionados, os países desenvolvidos têm apostado fortemente neste tipo de recolha de resíduos poliméricos e, se possível, realizado na fonte, independentemente da origem, ou seja, quer seja industrial ou pós-consumo, realçando, principalmente, estas ações a nível industrial (Fayshal, 2024; Nafiu *et al.*, 2025).

Posteriormente, os resíduos poliméricos recolhidos são submetidos a um processo de triagem, sendo este considerado como a primeira fase mais importante na reciclagem dos plásticos, uma vez que, a garantia de que os polímeros são selecionados de forma adequada para uma reciclagem eficaz, depende do sucesso e eficácia desta etapa (Nafiu *et al.*, 2025).

Na verdade, a reciclagem dos resíduos poliméricos pode ser dividida em duas abordagens distintas: “reciclagem em circuito fechado” e “reciclagem em circuito aberto”, considerando que, na “reciclagem em circuito fechado”, as propriedades do plástico reciclado não são consideravelmente alteradas, podendo este ser posteriormente utilizado em aplicações semelhantes às do material virgem (Shamsuyeva and Endres, 2021).

Por outro lado, na “reciclagem em circuito aberto”, as propriedades do plástico reciclado sofrem alterações mais significativas, não sendo viável este ser utilizado nas mesmas aplicações do material virgem, verificando-se, portanto, a possibilidade de ser aplicado no fabrico de novos produtos, como materiais compósitos ou reciclagem de plásticos em fibras (Shamsuyeva and Endres, 2021).

A aplicação e adequação de cada abordagem são avaliadas individualmente, considerando as propriedades do polímero em questão, bem como o grau de contaminação do resíduo plástico, existindo uma hierarquia geral destinada à reciclagem de plásticos, contemplando aspetos como a otimização do processo e o grau em que o polímero permanece intacto (Schwarz *et al.*, 2021; Shamsuyeva and Endres, 2021). Na Figura 17 apresenta-se a hierarquia geral para a reciclagem dos resíduos poliméricos, incluindo os aspetos mencionados.

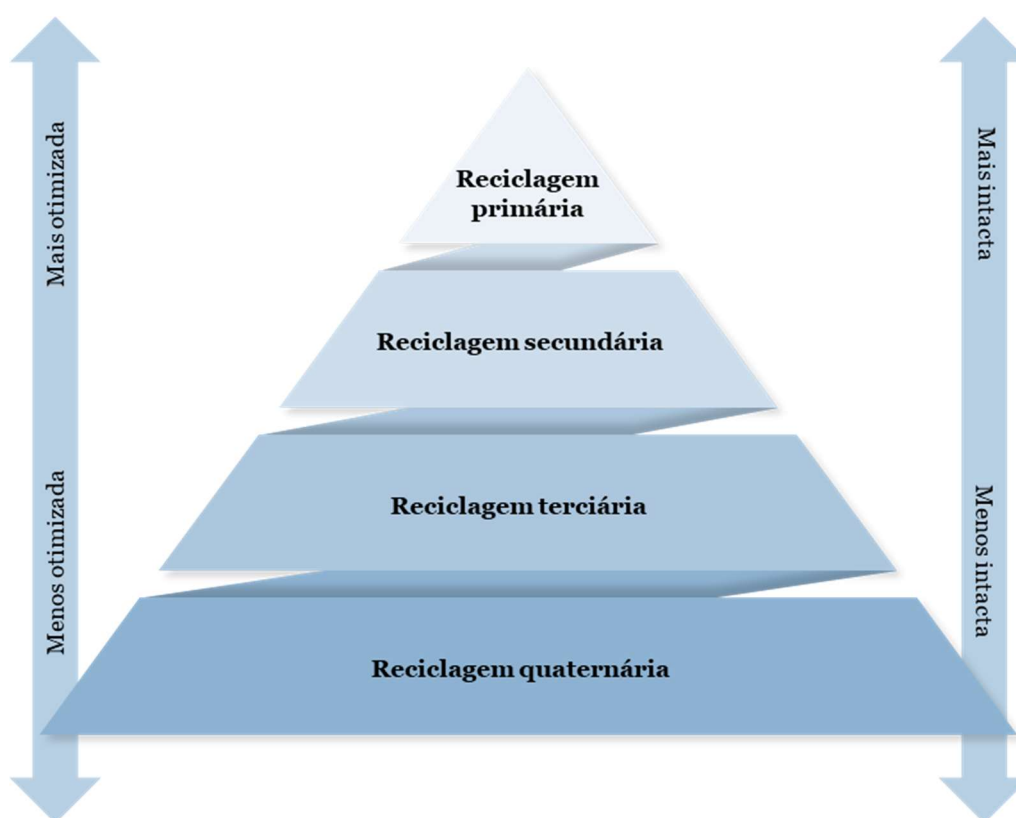


Figura 17 - Hierarquia Geral para a Reciclagem de Polímeros (Adaptado de Schwarz *et al.*, 2021)

Considerando as quatro categorias da hierarquia geral para a reciclagem de polímeros, a reciclagem primária ou “reciclagem em circuito fechado” é considerada a abordagem que representa maior nível de otimização e na qual o polímero se mantém intacto, visto que pode ser reciclado com vista a formar produtos que evidenciem as mesmas propriedades do material virgem, verificando-se a sua presença no mesmo “ciclo” (Schwarz *et al.*, 2021). Assim, sendo destinada a polímeros de pré e pós-consumo, como os materiais excedentes durante o fabrico de produtos de plásticos e sucata, os resíduos de plástico são triturados, aquecidos e extrudidos para que seja possível a produção de granulados de plástico reciclado, cujas características são comparáveis às do polímero virgem (Schwarz *et al.*, 2021; Fayshal, 2024; Nafiu *et al.*, 2025).

Em contrapartida, a reciclagem quaternária é aquela em que o material se mantém menos intacto, contribuindo para que esta evidencie um grau de otimização inferior, uma vez que, na maioria das vezes, esta técnica de reciclagem consiste na incineração do material plástico com recuperação de energia sob a forma de calor e eletricidade, sendo este totalmente destruído (Schwarz *et al.*, 2021).

Seguindo a mesma linha estratégica, a reciclagem secundária ou reciclagem em circuito aberto é, atualmente, a mais utilizada, dado que, após ser reciclado, a qualidade do material é inferior à do material virgem, mas com possibilidade de ser aplicado no fabrico de outros produtos, mesmo que sejam de menor valor, mantendo-se num “ciclo aberto” (Schwarz *et al.*, 2021).

Além disso, existe ainda outra possibilidade de reciclagem, sendo esta a reciclagem terciária que, incluindo a reciclagem do plástico, permite transformá-lo em matéria-prima, realizando a sua transição de polímero para monómero. Desta forma, apesar do polímero não ser mantido intacto, permite que os seus materiais mais valiosos (matéria-prima e monómeros) sejam recuperados (Schwarz *et al.*, 2021).

Partindo da hierarquia geral para a reciclagem de polímeros, é possível referir que os resíduos plásticos podem ser reciclados de duas formas distintas, isto é, sem alterar a sua estrutura química, como é o caso da reciclagem primária e secundária (ou mecânica), ou alterando a estrutura química dos plásticos, como é o caso da reciclagem química que inclui as reciclagens terciária e quaternária (Kijo-Kleczkowska and Gnatowski, 2022).

4.3.1 Reciclagem Mecânica

No que diz respeito a técnicas que contribuam ativamente para uma economia ambientalmente sustentável, a reciclagem mecânica de produtos plásticos é predominantemente o método mais utilizado, evidenciando vantagens significativas em termos de Economia Circular, como a conservação dos recursos finitos e a redução das emissões de GEE (Chen and Hu, 2024; Fayshal, 2024).

Neste sentido, a reciclagem mecânica (ou secundária) consiste no processo pelo qual os resíduos plásticos são recuperados, a fim de serem reutilizados no fabrico de novos produtos, mediante meios mecânicos, podendo ser aplicada a diversos tipos de polímeros, considerando que, quanto maior for o grau de contaminação e a complexidade dos resíduos, maior será a dificuldade de processamento, além de que a reciclagem mecânica será menos eficiente (Kijo-Kleczkowska and Gnatowski, 2022).

Com efeito, a reciclagem mecânica predomina como a principal estratégia de tratamento de resíduos plásticos, evidenciando cerca de 90% dos resíduos produzidos, devido à sua simplicidade, quando comparada com os restantes métodos. Na Figura 18 apresenta-se a sequência de etapas geralmente utilizada na reciclagem mecânica de polímeros (Kijo-Kleczkowska and Gnatowski, 2022; Chen and Hu, 2024).

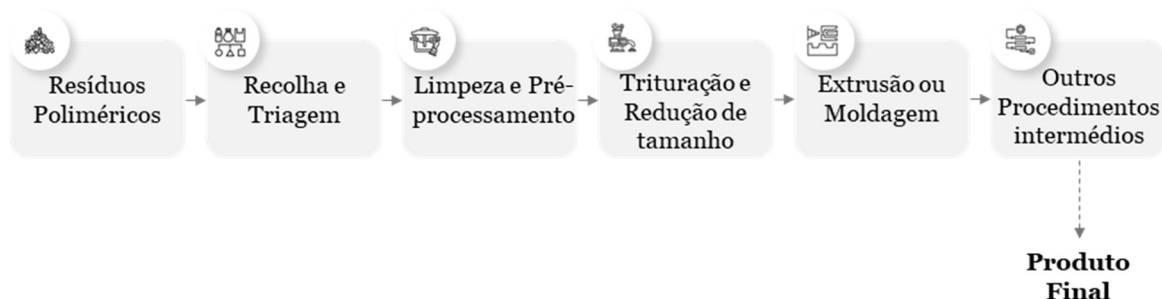


Figura 18 - Etapas da Reciclagem Mecânica de Resíduos Poliméricos (Adaptado de Kijo-Kleczkowska and Gnatowski, 2022; Chen and Hu, 2024)

De forma geral, o processo de reciclagem mecânica inicia-se com a Recolha e Triagem dos resíduos poliméricos, provenientes de empresas, habitações e instalações industriais, a partir das quais são separados conforme a forma que possuem, a densidade do polímero, o tamanho das partículas, a cor e a composição química (Chen and Hu, 2024).

Após a separação com base nas suas propriedades, os polímeros seguem para um processo de Limpeza e Pré-processamento, com o principal objetivo de eliminar todos os contaminantes que estejam presentes nos resíduos poliméricos, tais como sujidade, restos

de etiquetas e adesivos, bem como resíduos de outros materiais. Deste modo, é possível que a qualidade do material reciclado seja garantida, antes de ser submetido aos processos seguintes (Chen and Hu, 2024).

Posteriormente, os resíduos poliméricos limpos, são submetidos a processos de trituração mecânica e redução de tamanho, com vista a obter granulados que facilitem a preparação do material para a extrusão, moldagem ou outros processos. Além disso, a trituração permite que a área de superfície para a fusão dos resíduos poliméricos seja aumentada (Chen and Hu, 2024).

De facto, as três primeiras fases mencionadas, são comuns à maioria dos resíduos plásticos submetidos a reciclagem mecânica. No entanto, após serem triturados, nem todos os resíduos poliméricos são reciclados mediante processos de extrusão, podendo ser utilizados processos de moldagem por injeção ou serem utilizados como enchimento de novos produtos (Chen and Hu, 2024).

No caso da extrusão, o plástico fundido é forçado a passar por uma matriz, de modo a criar uma forma contínua, como *pellets* ou folhas de plástico. Em contrapartida, se se tratar de moldagem por injeção, o plástico é injetado em moldes, para que seja possível obter produtos com formas pré-estabelecidas (Chen and Hu, 2024).

Visto que alguns procedimentos característicos da reciclagem mecânica podem danificar e provocar quebras nos materiais de plástico reciclado, dependendo do polímero em questão, é possível incorporar plastificantes, cargas, aditivos e extensores de cadeia, além de ser possível modificar os parâmetros do processo, de modo a contrariar a degradação dos produtos poliméricos (Fayshal, 2024).

Contudo, esta modificação, aumenta os custos do processo que, à partida seriam relativamente baixos, embora permita uma melhoria da qualidade do material de saída, associada às restantes características da reciclagem mecânica, como os baixos requisitos técnicos e a possibilidade de o processamento ser descentralizado (Fayshal, 2024).

Além disto, na reciclagem mecânica, a qualidade do fluxo de entrada é bastante valorizada, uma vez que a qualidade do material de saída, dependerá da qualidade do material de entrada. Deste modo, esta técnica demonstra possuir uma elevada maturidade industrial, mesmo que apenas compreenda reciclagem múltipla limitada (Fayshal, 2024).

4.3.2 Reciclagem Química

A reciclagem química, também denominada de reciclagem de matérias-primas, consiste na despolimerização de um determinado polímero sob condições controladas, bem como tratamento dos constituintes químicos resultantes, com vista a serem utilizados como matéria-prima para o fabrico de novos materiais (Shamsuyeva and Endres, 2021).

Contemplando as fases iniciais da reciclagem mecânica (excluindo a extrusão) a reciclagem química permite recuperar o valor dos polímeros que, devido ao esgotamento do seu potencial económico, tornaram a sua reciclagem mecânica um processo muito pouco viável (Nafiu *et al.*, 2025).

Deste modo, aquando da aplicação desta técnica de reciclagem, a qualidade do produto final após processo, é comparável à dos materiais poliméricos virgens, tornando possível a sua aplicação em materiais que obriguem a elevados requisitos de aprovação (Shamsuyeva and Endres, 2021).

No entanto, o seu contributo como método de reciclagem eficaz num contexto de Economia Circular ainda se encontra aquém do expectável, uma vez que os processos envolvidos resultam em impactes ambientais negativos, resultantes da utilização de produtos químicos tóxicos que se podem infiltrar nos novos materiais plásticos, da absorção de substâncias tóxicas pelos resíduos poliméricos, bem como a geração de novos produtos químicos tóxicos durante o processo de reciclagem (Shamsuyeva and Endres, 2021; Nafiu *et al.*, 2025).

Geralmente, a reciclagem química é maioritariamente utilizada no processamento de resíduos poliméricos de PET, PE e PP de pós-consumo, reconhecendo a aplicação de dois métodos principais: a Termólise e a Solvólise (Shamsuyeva and Endres, 2021). Além disso, constituem métodos de reciclagem química via Termólise, a Pirólise, a Despolimerização, a Gaseificação e o *Cracking* tal como consta na Figura 19 (Kijo-Kleczkowska and Gnatowski, 2022; Theofanidis *et al.*, 2025).

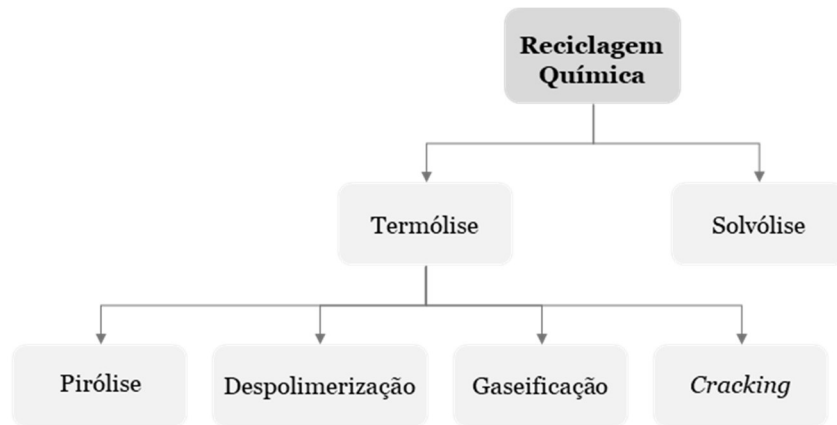


Figura 19 - Processos de Reciclagem Química (Adaptado de Shamsuyeva and Endres, 2021; Kijo-Kleczkowska and Gnatowski, 2022; Theofanidis *et al.*, 2025)

Considerando os dois processos fundamentais da reciclagem química, a Termólise consiste em provocar reações de decomposição no plástico, mediante utilização de diferentes métodos de tratamento térmico, resultando em misturas de hidrocarbonetos de diferentes composições que poderão ser utilizados como matéria-prima da indústria química, após o seu fracionamento (Shamsuyeva and Endres, 2021). Já a Solvólise, embora agindo com o mesmo objetivo da Termólise, isto é, provocar a decomposição dos resíduos poliméricos, realiza-o de forma distinta, mediante reações com solventes que, em contacto com o polímero provocam a sua quebra ou despolimerização, dividindo-o nos seus monómeros iniciais (Chen and Hu, 2024; Theofanidis *et al.*, 2025).

Neste sentido, em comparação com a reciclagem mecânica, a reciclagem química carece de requisitos técnicos elevados, considerando que o processamento descentralizado é limitado, dado os desafios técnicos e a baixa rentabilidade do processo (Fayshal, 2024).

Contudo, a exigência do fluxo de entrada, neste tipo de reciclagem, é média-baixa, embora produza materiais de saída cuja qualidade seja bastante elevada, permitindo assim a realização de reciclagem múltipla (Fayshal, 2024). Não obstante, devido ao custo excessivamente elevado da reciclagem química, demonstra ainda ser uma técnica pouco madura a nível industrial, dependendo do processo a ser aplicado, já que, em parte envolvem processos prejudiciais para a saúde e para o ambiente (Fayshal, 2024; Nafiu *et al.*, 2025).

4.4 Desafios da Reciclagem de Resíduos Poliméricos

Apesar de os processos de reciclagem de resíduos poliméricos contribuírem positivamente para a Economia Circular, nomeadamente a reciclagem primária e secundária, há vários

desafios que são encontrados aquando da aplicação destas técnicas (Fayshal, 2024; Nafiu *et al.*, 2025).

Na verdade, mesmo que o propósito da “reciclagem em circuito fechado” e da “reciclagem em circuito aberto” seja garantir que os resíduos são tratados de forma adequada e que a sua reutilização é assegurada (Shamsuyeva and Endres, 2021), os tratamentos térmicos que ocorrem ao longo da aplicação destas técnicas, pode ser um fator prejudicial para os resíduos poliméricos, colocando em causa a sua qualidade e propriedades, uma vez que as estruturas dos polímeros podem, efetivamente, deteriorar-se devido ao calor aos quais são submetidos (Fayshal, 2024).

Neste sentido, tal como referido, podem ser adicionados aditivos químicos ou compatibilizadores aos resíduos poliméricos, de modo a contrariar a sua deterioração e formação de ramificações indesejáveis (Fayshal, 2024). No entanto, a adição de aditivos e compatibilizadores, além de resultar em custos adicionais, pode resultar em graves impactes ambientais, dado que, estes elementos são, geralmente, tóxicos e não se encontram quimicamente ligados aos diferentes produtos poliméricos, podendo facilmente ser libertados para o ambiente em todas as fases do ciclo de vida dos novos produtos reciclados (Fayshal, 2024; Nafiu *et al.*, 2025).

Além disso, se os processos de reciclagem de resíduos poliméricos não forem geridos de forma adequada, podem contribuir para o aparecimento de substâncias químicas perigosas e indesejáveis. Na prática, esta probabilidade reside no facto de, ao longos dos processos de reciclagem, ser inevitável a geração de novos resíduos e perdas que, se geridos de forma desapropriada, são libertados no ambiente em forma de novos resíduos poliméricos com maior grau de toxicidade (Nafiu *et al.*, 2025).

De facto, a ideologia de que, ao reciclar resíduos poliméricos, são gerados novos resíduos, potencialmente mais perigosos, reforça a ideia de que, cada uma das reciclagens demonstra a existência de inconvenientes e, apenas podem ser utilizadas até um certo ponto, associado à perda de desempenho que alguns materiais demonstram quando submetidos várias vezes a ciclos de reciclagem primária e secundária, principalmente se as condições de fabrico não forem adequadamente controladas (Nafiu *et al.*, 2025).

Por conseguinte, nem todos os materiais demonstram aptidão para serem submetidos a vários ciclos de reciclagem, uma vez que se decompõem facilmente na presença de altas temperaturas, como é o caso do PVC, dificultando a reciclagem mecânica deste tipo de

resíduos poliméricos, além de que, a reciclagem mecânica demonstra ser ineficiente aquando do processamento de resíduos poliméricos que se encontrem fortemente contaminados, tornando-se dependente das técnicas de seleção utilizadas, comprometendo a fluidez do processo (Chen and Hu, 2024).

Com efeito, estes resíduos que, por se encontrarem demasiado contaminados não podem ser submetidos a processos de reciclagem mecânica, são depositados em aterros ou incinerados, enfatizando, desta forma, a reduzida taxa global de reciclagem de plásticos, a grave poluição ambiental, os potenciais riscos para a saúde humana e a segurança dos ecossistemas (Chen and Hu, 2024; Fayshal, 2024).

Além dos desafios mencionados, é importante realçar a importância dos requisitos de qualidade técnica estabelecidos para os polímeros reciclados. Ou seja, a composição heterogénea característica dos plásticos reciclados, associada à degradação do produto durante a sua vida útil, contribuem para a não satisfação da qualidade técnica das alternativas virgens, resultando apenas numa substituição parcial do material virgem, dependendo da aplicação (Theofanidis *et al.*, 2025).

Efetivamente, em algumas aplicações, não é necessária a existência de elevada qualidade técnica, sendo a reciclagem mecânica uma excelente alternativa que permite substituir na totalidade os materiais virgens (Theofanidis *et al.*, 2025). Contudo, é necessário considerar, além dos requisitos técnicos, os requisitos legais, mediante as diferentes aplicações dos produtos poliméricos reciclados, dado que, algumas aplicações revelam requisitos legais mais rigorosos, como é o caso do controlo da segurança alimentar aquando da utilização de embalagens para produtos alimentares, enquanto que em aplicações, como a construção civil, o setor do mobiliário, entre outros, os requisitos legais são mínimos (Theofanidis *et al.*, 2025).

Embora existam desafios e impactes negativos decorrentes das práticas de reciclagem conhecidas, o desenvolvimento e o investimento em técnicas de reciclagem inovadoras assumem um lugar de destaque no aumento das taxas de reciclagem e melhoria do desempenho ambiental, comparativamente com as atuais tecnologias de tratamento de resíduos, como a deposição em aterros e a incineração (García-Gutiérrez *et al.*, 2025).

Desta forma, mediante o empoderamento da reciclagem mecânica, é expectável que, futuramente, esta técnica seja capaz de lidar e tratar fluxos de resíduos poliméricos mais

complexos, com vista a contribuir para a Economia Circular, atingindo uma maior maturidade industrial (García-Gutiérrez *et al.*, 2025).

Capítulo 5

Materiais Compósitos

Constituindo, atualmente, uma mudança de paradigma, o fabrico e a utilização de materiais compósitos, tem sido alvo de atenção por parte de várias indústrias e dos diversos domínios da ciência dos materiais, com vista a obter materiais distintos, cujas propriedades são consideradas como superiores (Bagheri *et al.*, 2024; Yan and Xu, 2025).

Neste sentido, no presente capítulo serão apresentadas a definição e a constituição dos materiais compósitos, juntamente com a respetiva classificação, considerando os tipos de processos de fabrico que podem ser aplicados, de modo a contemplar as suas aplicações industriais.

5.1 Definição e Constituição dos Materiais Compósitos

O aumento da exigência das aplicações industriais e, conseqüentemente das especificidades necessárias em determinados produtos, impulsionou a procura de materiais cujas combinações de propriedades não podem ser satisfeitas pelos materiais comumente utilizados, surgindo assim, em meio industrial, os materiais compósitos (Callister and Rethwisch, 2018).

Deste modo, com vista a maximizar as vantagens e as propriedades dos materiais, enquanto os seus inconvenientes são minimizados, os materiais compósitos definem-se na combinação de dois ou mais materiais de propriedades distintas, com o intuito de obter um material multifásico, cujas propriedades são superiores às dos seus constituintes em separado, mediante seleção criteriosa desses materiais (Callister and Rethwisch, 2018; Asfaw *et al.*, 2024; Mazurowski, O'Hara and Duarte, 2024).

De facto, partindo do princípio de ação combinada na qual reside a formulação dos materiais compósitos, estes são considerados materiais fabricados mediante aplicação de várias tecnologias, não sendo a sua combinação encontrada na natureza, à exceção dos compósitos naturais, como, por exemplo, a madeira e os ossos, que se enquadram na definição (Callister and Rethwisch, 2018).

Neste sentido, os materiais compósitos são constituídos por uma fase contínua e outra dispersa, quimicamente diferentes e separadas por uma interface, denominando-se de

matriz e reforço, respetivamente (Callister and Rethwisch, 2018). Por conseguinte, a matriz é definida como a fase contínua que envolve a fase dispersa (reforço), sendo esta responsável por suportar a estrutura do material compósito, considerando que o reforço é, na prática, o maior responsável por conferir ao compósito, as propriedades pretendidas (Hsissou *et al.*, 2021; Naik *et al.*, 2023).

Desta forma, a matriz e o reforço devem ser insolúveis entre si, com o intuito de possibilitar que seja estabelecida uma relação sólida entre as mesmas, favorecendo as propriedades mecânicas e físicas do material compósito, juntamente com a qualidade da sua interface (Naik *et al.*, 2023). Partindo disto, na Figura 20 apresentam-se os diferentes constituintes de um material compósito, bem como a interface matriz-reforço.

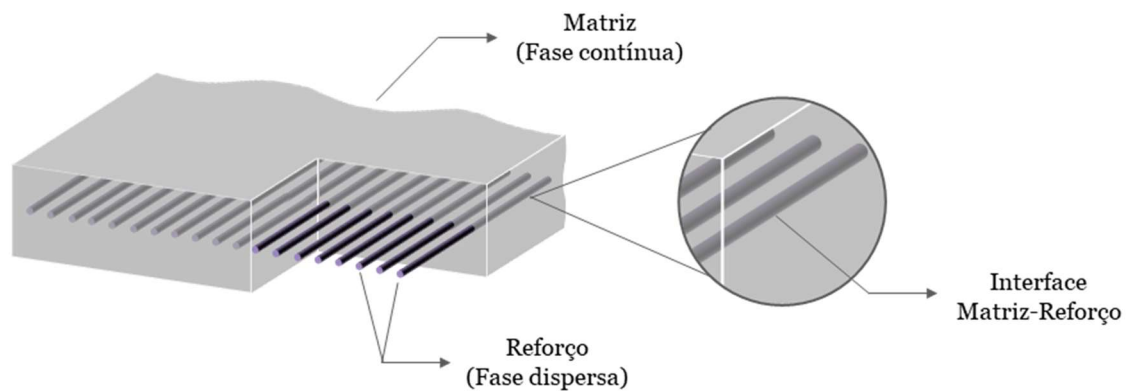


Figura 20 - Constituintes dos Materiais Compósitos (Adaptado de Callister and Rethwisch, 2018; Hsissou *et al.*, 2021)

Consequentemente, os materiais compósitos constituem-se por materiais heterogêneos e anisotrópicos, uma vez que, as propriedades físicas e químicas do material dependem ativamente da natureza da matriz e do reforço, bem como da forma e a proporção de cada constituinte, podendo definir-se que, as propriedades dos materiais compósitos dependem essencialmente de três fatores (Hsissou *et al.*, 2021):

- A natureza da matriz e do reforço e as suas propriedades;
- A geometria do reforço e a sua distribuição;
- A natureza da interface matriz-reforço.

Considerando a natureza destes fatores e a influência das propriedades das fases constituintes, bem como a geometria, a distribuição e a orientação das partículas que constituem a fase dispersa, na Figura 21 apresenta-se uma representação das diferentes geometrias das partículas da fase dispersa que, podem efetivamente, influenciar as propriedades dos materiais compósitos, atentando a concentração, o tamanho, a forma, a distribuição e a orientação das mesmas (Callister and Rethwisch, 2018).

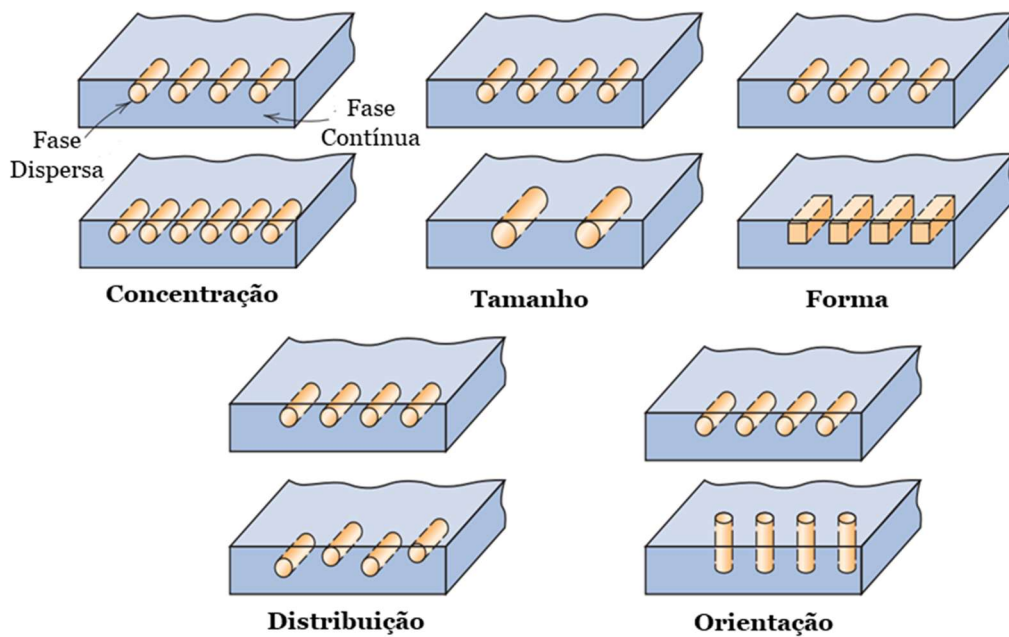


Figura 21 - Representação das diferentes geometrias das partículas da fase dispersa que podem influenciar as propriedades dos materiais compósitos (Adaptado de Callister and Rethwisch, 2018)

Na verdade, manipulando de forma adequada a concentração, o tamanho, a forma, a distribuição e a orientação dos constituintes, mais propriamente as partículas da fase dispersa, é expectável a obtenção de um material compósito, cujas vantagens e propriedades ocupam um lugar de destaque, quando comparados com os restantes materiais, permitindo maior margem de design e adaptação a diferentes ambientes e aplicações (Bhong *et al.*, 2023). Na Figura 22 estão reunidas as possíveis vantagens verificadas num material compósito de qualidade.

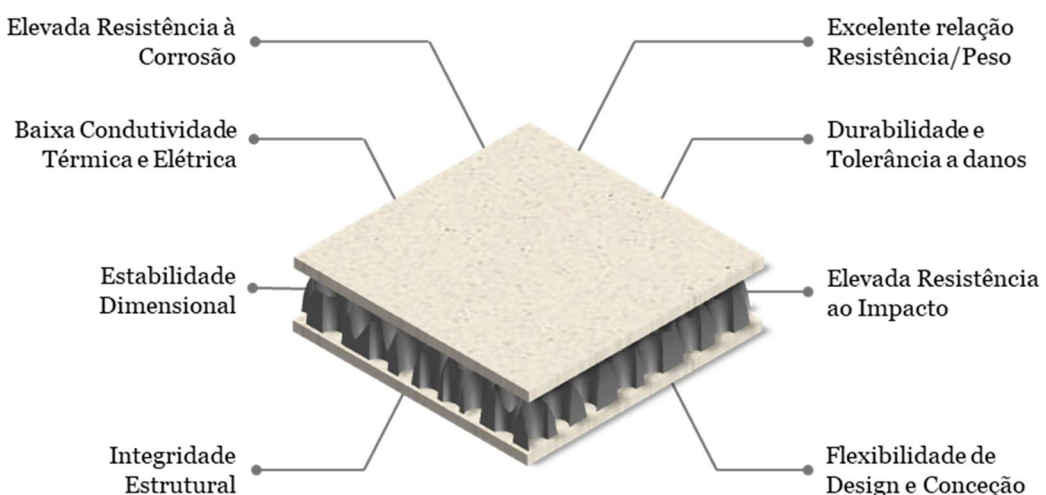


Figura 22 - Vantagens dos Materiais Compósitos (Adaptado de Khan *et al.*, 2024)

De facto, dentre as múltiplas vantagens inerentes aos materiais compósitos, estes tornam-se atraentes devido à sua excelente relação resistência/peso, visto que são materiais que evidenciam elevada durabilidade e tolerância a danos, mesmo sendo materiais relativamente leves, cuja estabilidade dimensional e integridade estrutural⁸, permitem garantir elevado desempenho a longo prazo nas suas aplicações (Khan *et al.*, 2024).

Neste sentido, selecionando a combinação adequada de material de reforço e de matriz, é possível conceber materiais compósitos que satisfaçam, perfeitamente, determinadas necessidades em aplicações diversas, além de que podem ser considerados, em casos específicos, materiais sustentáveis (Khan *et al.*, 2024). Isto é, sendo materiais concebidos pela aplicação de várias tecnologias, pela combinação de dois materiais distintos, podem desempenhar um papel predominante na segurança ambiental, visto que, como material de reforço podem ser incluídos partículas de resíduos, constituindo diversas vantagens no fabrico, conceção e desempenho, bem como uma ligação entre a produção e a reciclagem (Callister and Rethwisch, 2018; Khan *et al.*, 2024).

5.2 Classificação dos Materiais Compósitos

Com base na ideologia de que o desenvolvimento de materiais compósitos reside no princípio de ação combinada, uma vez que estes são compósitos multifásicos que, combinando diferentes tipos de materiais, permitem a criação de excelentes oportunidades de inovação e projeção de novos produtos nas diversas indústrias, os materiais compósitos podem ser classificados em função da matriz ou em função do reforço, constituindo, desta forma, materiais distintos, destinados a diferentes aplicações (Callister and Rethwisch, 2018; Egbo, 2021; Sumithra *et al.*, 2023).

5.2.1 Classificação em Função da Matriz

Nos materiais compósitos, a matriz assume um papel fundamental na proteção e ligação do material de reforço, visto que tem como principal função manter as fibras/partículas unidas e protegidas, atuando como principal meio pelo qual uma tensão aplicada no material é distribuída uniformemente pelo material de reforço, sendo que a matriz apenas sustenta uma fração diminuta da tensão aplicada (Callister and Rethwisch, 2018).

⁸ Em materiais cuja matriz é orgânica, a estabilidade dimensional pode ser comprometida devido à absorção de humidade e flutuações de temperatura. No entanto, este entrave pode ser minimizado, mediante alterações no projeto de design e conceção, bem como na escolha dos materiais utilizados (Khan *et al.*, 2024).

Deste modo, mantendo o material de reforço protegido e evitando que ocorram danos decorrentes de abrasão ou reações químicas, a matriz previne a propagação de fissuras ao longo da fase dispersa, atuando como um elemento fundamental na prevenção de falhas do material compósito. Isto é, mesmo que apenas uma pequena fração de fibras apresente defeitos, a fratura do material compósito como um todo não ocorrerá até que um número considerável de fibras/partículas tenha falhado, devido à excelente resistência de ligação matriz-reforço que é requerida neste tipo de materiais (Callister and Rethwisch, 2018).

Além disso, considerando as inúmeras combinações de materiais que podem ser efetuadas aquando da projeção de um material compósito, a resistência de ligação é um fator predominante na escolha da matriz (Callister and Rethwisch, 2018).

Neste sentido, os compósitos podem ser classificados em função da matriz utilizada, dividindo-se em Compósitos de Matriz Metálica (CMM), Compósitos de Matriz Cerâmica (CMC) e Compósitos de Matriz Polimérica (CMP), sendo que, as matrizes mais utilizadas no fabrico de compósitos são as matrizes poliméricas que, por sua vez, podem ser termoplásticas ou termoendurecíveis (Egbo, 2021; Sumithra *et al.*, 2023). Na Figura 23 apresenta-se a classificação dos materiais compósitos em função da matriz.

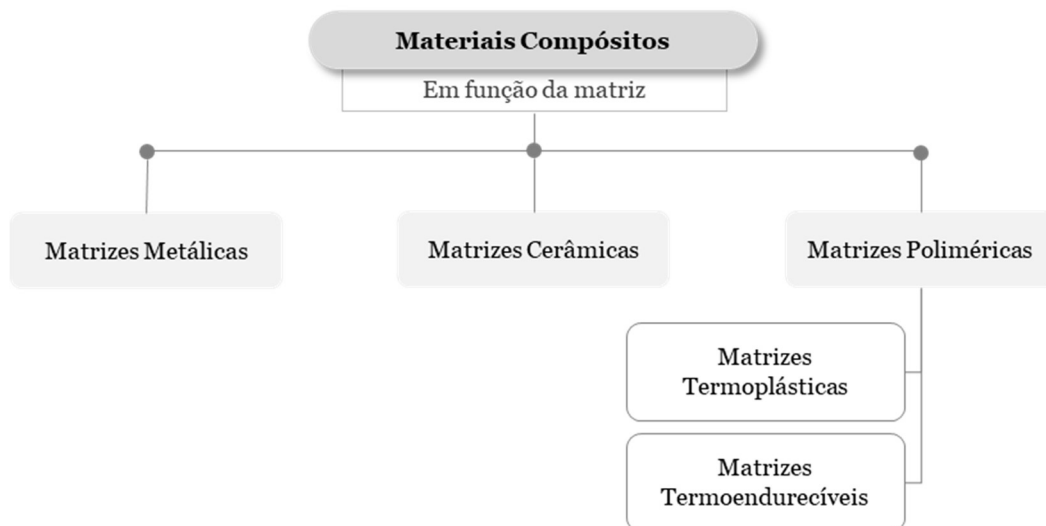


Figura 23 - Classificação dos materiais compósitos em função da matriz (Adaptado de Sumithra *et al.*, 2023)

Considerando a ampla utilização de CMM na indústria automóvel e aeronáutica, estes consistem em materiais compósitos, onde o elemento principal é uma matriz metálica, reforçada com partículas, fibras ou cristais, sendo o alumínio, o magnésio, o titânio e outras superligas, os metais mais utilizados como constituintes da fase contínua (Parveez *et al.*, 2022; Yan and Xu, 2025). O desempenho a altas temperaturas dos CMM, em comparação com os CMP, proporciona propriedades mecânicas melhoradas, maior resistência ao

desgaste, maior resistência à degradação por fluídos orgânicos, bem como elevada condutividade térmica, associada à excelente estabilidade térmica (Callister and Rethwisch, 2018; Sumithra *et al.*, 2023; Yan and Xu, 2025) .

Por outro lado, existem os CMC que, sendo menos utilizados na indústria automóvel e aeronáutica, devido à sua fragilidade em comparação com os CMM e os CMP, são constituídos por uma matriz cerâmica, como o carboneto de silício, a alumina e até a argila, podendo ser reforçados com fibras cerâmicas (Egbo, 2021; Sumithra *et al.*, 2023; Yan and Xu, 2025).

Todavia, mesmo exibindo predisposição para a fratura, os CMC tornam-se apelativos pelo seu desempenho excecional a altas temperaturas, além de demonstrarem ser resistentes à oxidação e deterioração, evidenciando que, a incorporação de fibras cerâmicas como fase dispersa, permite melhorar significativamente a tenacidade de fratura inerente aos materiais cerâmicos (Callister and Rethwisch, 2018; Yan and Xu, 2025).

Contudo, os CMP são os mais utilizados nos diversos domínios da ciência dos materiais, devido às propriedades únicas dos polímeros, além de que, dependendo da aplicação e do material compósito que se pretende obter, estes podem incorporar na sua constituição outros materiais poliméricos como reforço, seja em forma de fibras ou de partículas de enchimento (Bagheri *et al.*, 2024; Khan *et al.*, 2024).

Além disso, a sua ampla utilização deve-se ao facto de que estes materiais compósitos apresentam vantagens mais significativas, quando comparados com os CMM, os CMC e os materiais convencionalmente utilizados, seja pela sua expansão térmica reduzida, o desempenho notável à fadiga, a elevada resistência à tração, à flexão e à rutura, bem como a capacidade de responder positivamente a requisitos de estabilidade dimensional mais rigorosos. Ademais, são considerados mais leves do que os restantes materiais compósitos, dando sentido à excelente relação resistência/peso que estes apresentam (Khan *et al.*, 2024).

Com efeito, os CMP apresentam maior facilidade de fabrico, tornando-se apelativos em aplicações de grande escala, demonstrando bom desempenho e excelentes propriedades à temperatura ambiente. Na verdade, em grande parte, é a matriz que determina qual a temperatura máxima de serviço do material compósito, visto que esta, sendo polimérica, funde ou degrada-se mais rapidamente do que a fase dispersa (Callister and Rethwisch, 2018).

Por conseguinte, as matrizes poliméricas utilizadas para o fabrico dos CMP, dividem-se em termoplásticas e termoendurecíveis, podendo estas influenciar fortemente determinadas propriedades do material obtido, como a tração na direção transversal, a resistência ao corte, a resistência à compressão, ao calor e ao ambiente a que este é exposto (Callister and Rethwisch, 2018; Mahesh, Joladarashi and Kulkarni, 2021a).

No que diz respeito às matrizes termoplásticas, estas apresentam uma estrutura em forma de cadeias lineares, permitindo que sejam transformadas mediante processos de moldagem, injeção, extrusão ou termoformação, após serem aquecidas, dando forma ao produto final após o seu arrefecimento, levando a que este mantenha a sua forma (Hsissou *et al.*, 2021).

No entanto, as operações realizadas em matrizes termoplásticas são reversíveis, permitindo que estas possam ser reutilizadas e moldadas novamente, mediante aplicação de novos processos de transformação, realçando, desta forma, a sua reciclabilidade, embora a sua utilização esteja limitada pelo seu ponto de fusão, além de que as suas propriedades mecânicas, de um modo geral, demonstram ser inferiores às das matrizes termoendurecíveis (Hsissou *et al.*, 2021; Huang *et al.*, 2021).

Na verdade, isto deve-se ao facto de a estrutura molecular de uma matriz termoendurecível ser mais estável por conter ligações cruzadas, permitindo que estas possam ser trabalhadas a temperaturas mais elevadas (Huang *et al.*, 2021). Na Figura 24 apresentam-se as representações gráficas das estruturas moleculares características de matrizes termoplásticas e de matrizes termoendurecíveis, respetivamente.

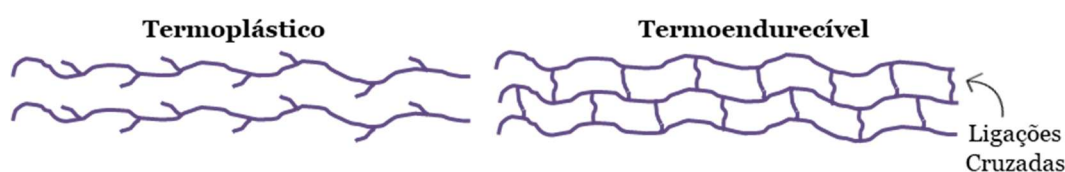


Figura 24 - Estruturas moleculares de matrizes termoplásticas e termoendurecíveis (Adaptado de Huang *et al.*, 2021)

Além disso, as matrizes termoendurecíveis, contrariamente às matrizes termoplásticas, encontram-se no estado líquido à temperatura ambiente, solidificando apenas quando submetidas a temperaturas mais elevadas, num processo de cura, no qual é necessário aplicar um aditivo, denominado endurecedor (Hsissou *et al.*, 2021).

A cura destas matrizes consiste num processo de modificação química, no qual as moléculas criam ligações fortes entre si (ligações cruzadas), tornando o processo irreversível e, por

consequente, transformando as matrizes termoendurecíveis em materiais menos sustentáveis, pois não podem ser reutilizadas nem moldadas novamente (Hsissou *et al.*, 2021; Huang *et al.*, 2021; Schenk *et al.*, 2022).

Contudo, a sua irreversibilidade, mesmo constituindo um entrave significativo no final da vida útil dos produtos, é, ao mesmo tempo, uma das suas maiores vantagens, uma vez que permite que as matrizes termoendurecíveis sejam insolúveis na maioria dos solventes e infusíveis, mais rígidas e com maior fluência, reforçando a sua adequação na moldagem e fabrico de diversas peças (Hsissou *et al.*, 2021; Schenk *et al.*, 2022).

Deste modo, as matrizes termoendurecíveis comumente utilizadas em aplicações industriais, por serem menos dispendiosas, são o poliéster e o vinil éster, além das resinas epoxídicas que apresentam um custo mais elevado (Callister and Rethwisch, 2018). Por outro lado, no que diz respeito às matrizes termoplásticas, as mais aplicadas são a poliéter-eter-cetona (PEEK), o polissulfeto de fenileno (PPS), a polieterimida (PEI) e o poliuterano, visto serem potenciais substitutos dos polímeros termoendurecíveis em determinadas aplicações (Mahesh, Joladarashi and Kulkarni, 2021a; Sumithra *et al.*, 2023).

No âmbito da presente dissertação, importa realçar e comparar, as matrizes termoendurecíveis mais utilizadas a nível industrial na preparação e fabrico de compósitos: a resina epóxi e a resina de poliéster. Neste sentido, na Tabela 9 apresentam-se algumas das propriedades de ambas as matrizes poliméricas.

Tabela 9 - Propriedades das matrizes termoendurecíveis: resina epóxi e resina de poliéster

		Densidade	Resistência à Tração	Módulo de <i>Young</i>	Condutividade Térmica	Coefficiente de Expansão Térmica	Temperatura de Fusão
	Unidade	ρ [g/cm ³]	σ [MPa]	E [GPa]	λ [W/m-K]	α [10 ⁻⁶ °C ⁻¹]	T _m [°C]
Termoendurecíveis	Epóxi	1,10 – 1,60	27,6 – 130	2,41 – 6,00	≈0,19	81,0 – 117	≈200
	Poliéster	1,04 – 1,50	34,5 – 103,5	2,00 – 4,50	≈0,17	100 – 180	≈200

(Fontes: Amran *et al.*, 2018; Callister and Rethwisch, 2018; Huang *et al.*, 2021; Mahesh, Joladarashi and Kulkarni, 2021; Sujon, Islam and Nadimpalli, 2021; Khallouqi, Halimi and El Rhazouani, 2024)

Apesar de ser mais cara que o poliéster, a popularidade da resina epóxi no fabrico de materiais compósitos deve-se, essencialmente, às suas propriedades e qualidades que, de certa forma, permitem garantir a sua adequação na produção de diversos produtos em várias indústrias (Callister and Rethwisch, 2018; Sumithra *et al.*, 2023).

Na prática e como é possível prever pela observação da Tabela 9, as resinas epoxídicas apresentam propriedades ligeiramente semelhantes à resina de poliéster, demonstrando, contudo, distinção em alguns aspetos, nomeadamente na sua resistência à tração superior, permitindo a sua aplicação em elementos que carecem de propriedades mecânicas e térmicas mais elevadas. Além disto, a resina epóxi apresenta resistência a agentes químicos, além de uma reduzida capacidade de absorção da humidade (Hsissou *et al.*, 2021; Verma, Rhee and Alfantazi, 2025).

Por sua vez a sua excelente capacidade de aderência às fibras e materiais de reforço, associada às suas outras propriedades, transformam esta resina numa opção viável para aplicações que exigem alta resistência e durabilidade, como revestimentos industriais e peças estruturais. Em contrapartida, a resina de poliéster torna-se uma opção mais adequada para aplicações que requerem facilidade de aplicação e que, de certa forma, sejam de baixo custo, sendo ideal para a produção de peças em série (Hasan, 2020; Khallouqi, Halimi and El Rhazouani, 2024; Verma, Rhee and Alfantazi, 2025).

No entanto, apesar da sua flexibilidade, estabilidade dimensional e excelentes acabamentos superficiais, a resina epóxi apresenta preocupações no que diz respeito à sua fraca tenacidade, limitada resistência ao impacto e fragilidade inerente, restringindo, desta forma, algumas das suas aplicações. Neste sentido, de modo a reforçar este material, tem sido amplamente estudada a possibilidade de incorporar diversos materiais, como partículas de plásticos, fibras (Sumithra *et al.*, 2023), metais (Verma, Rhee and Alfantazi, 2025), entre outros, com o intuito de fabricar materiais compósitos que aumentem a sua dureza, resistência ao desgaste e resistência ao impacto (Huo *et al.*, 2025).

Em contrapartida, no que diz respeito ao fabrico de materiais de baixo custo, o poliéster é o material mais utilizado a nível industrial, permitindo o desenvolvimento de produtos versáteis, pouco dispendiosos e de processamento rápido, em comparação com as restantes resinas termoendurecíveis, mais especificamente a resina epóxi (Ouarhim *et al.*, 2019; Hasan, 2020). Por conseguinte, o poliéster demonstra elevada resistência à corrosão, cura rápida aquando da sua aplicação como matriz de materiais compósitos, acabamento

apetivo, elevada resistência à absorção de água e facilidade de manuseamento (Hasan, 2020; Khallouqi, Halimi and El Rhazouani, 2024).

Contudo, além das propriedades mecânicas ligeiramente inferiores às da resina epóxi, o poliéster apresenta um baixo módulo de elasticidade, juntamente com um alongamento na rutura reduzido, cerca de 1% a 2%, cujo valores são inferiores aos da resina epóxi que apresenta valores entre os 3,5% e os 4,5% (Amran *et al.*, 2018).

Não obstante, o poliéster é abundantemente utilizado no fabrico de materiais compósitos como material de matriz, uma vez que, além de constituir um excelente material para o fabrico de compósitos estruturais e sanduíche, as suas propriedades são melhoradas com a adição de materiais de reforço, como partículas ou fibras (Amran *et al.*, 2018).

5.2.2 Classificação em Função do Reforço

O reforço, constituindo a fase dispersa, é, por definição, o esqueleto do material compósito, geralmente de natureza filamentosa (fibras ou partículas) que, fornecendo maior resistência mecânica e rigidez, permite o fabrico de um material com propriedades superiores (Hasan, 2020; Hsissou *et al.*, 2021).

Neste sentido, é possível afirmar que as propriedades finais do material compósito são definidas pela quantidade e tipologia do reforço que, apresentando maior rigidez em comparação com a matriz, constitui um elemento fundamental aquando da composição da interface matriz-reforço, uma vez que desempenha um papel significativo na caracterização das propriedades mecânicas dos materiais compósitos (Hasan, 2020; Asfaw *et al.*, 2024).

Desta forma, os materiais compósitos podem ser classificados em função do reforço, dividindo-se em compósitos reforçados com partículas, compósitos reforçados com fibras, compósitos estruturais e, numa outra vertente, nanocompósitos. Por sua vez, se a fase dispersa for constituída por partículas, estas podem ser partículas de grande dimensão ou de dispersão, se constituída por fibras, estas dividem-se em fibras contínuas e descontínuas. Já os compósitos estruturais classificam-se como laminados ou painéis sanduíche (Callister and Rethwisch, 2018).

Na Figura 25 apresenta-se uma representação esquemática da classificação dos materiais compósitos em função do reforço.

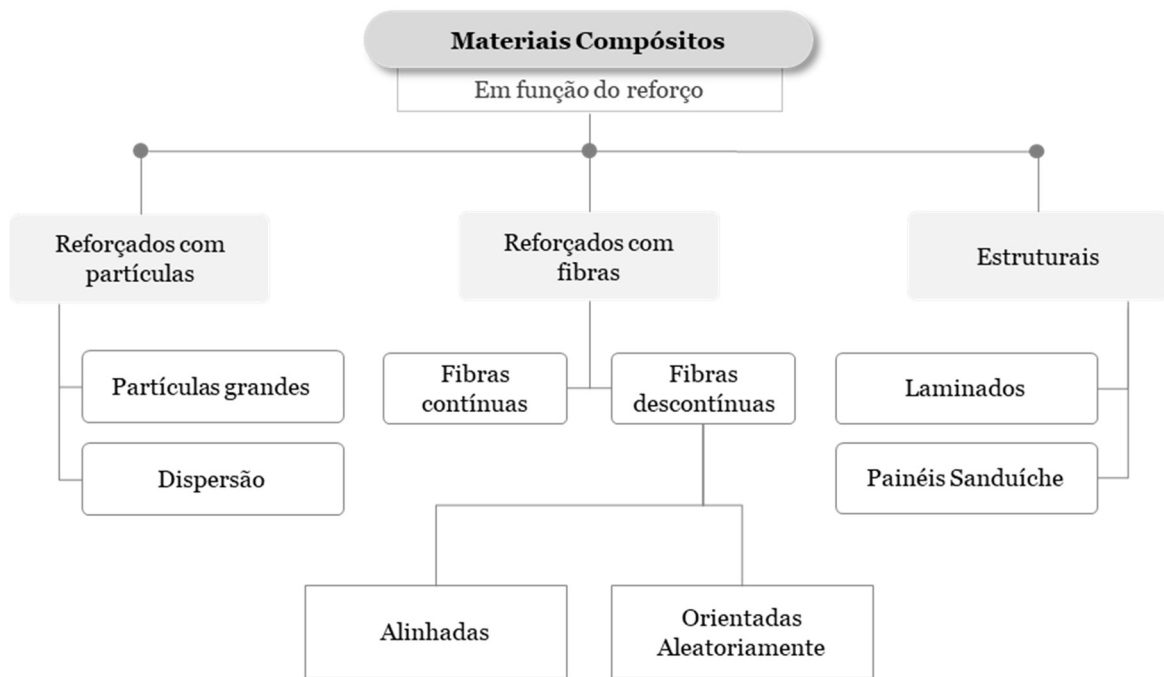


Figura 25 - Classificação dos materiais compósitos em função do reforço (Adaptado de Callister and Rethwisch, 2018; Sumithra *et al.*, 2023)

No que diz respeito aos materiais compósitos reforçados com partículas, estes assumem um papel predominante no fortalecimento das matrizes, mediante adição de partículas curtas distribuídas aleatoriamente na fase contínua, mantendo a dimensão em todas as direções⁹, podendo, desta forma, ser categorizadas como partículas grandes ou partículas consideravelmente mais pequenas, as quais se denominam partículas de dispersão (Callister and Rethwisch, 2018; Bhong *et al.*, 2023).

Na realidade, as partículas grandes e de dispersão, distinguem-se não só pelo tamanho, mas também pela função que assumem na matriz e, de que forma, atuam como mecanismo de fortalecimento. Isto é, as partículas grandes são consideradas as principais portadoras de carga, suportando uma fração considerável da tensão que é transferida pela matriz, além de restringirem o movimento da fase contínua na vizinhança de cada partícula (Callister and Rethwisch, 2018; Egbo, 2021).

Em contrapartida, nos compósitos reforçados por partículas em dispersão, estas assumem tamanhos nanométricos (entre 10 e 100 nm), cujas interações entre as partículas e a matriz são analisadas ao nível atómico ou molecular, visto que, neste caso em específico, é a matriz que suporta a carga aplicada e as partículas apenas restringem a deformação plástica,

⁹ Nos compósitos reforçados por partículas é possível afirmar que a fase dispersa é equiaxial, precisamente pelo facto de as partículas manterem a sua dimensão em todas as direções (Callister and Rethwisch, 2018).

melhorando a dureza, a resistência ao escoamento e à tração destes materiais compósitos (Callister and Rethwisch, 2018).

Neste sentido, na Figura 26 apresentam-se as representações gráficas dos materiais compósitos reforçados com partículas, evidenciando os tamanhos distintos das partículas nos dois tipos de reforço (Egbo, 2021).

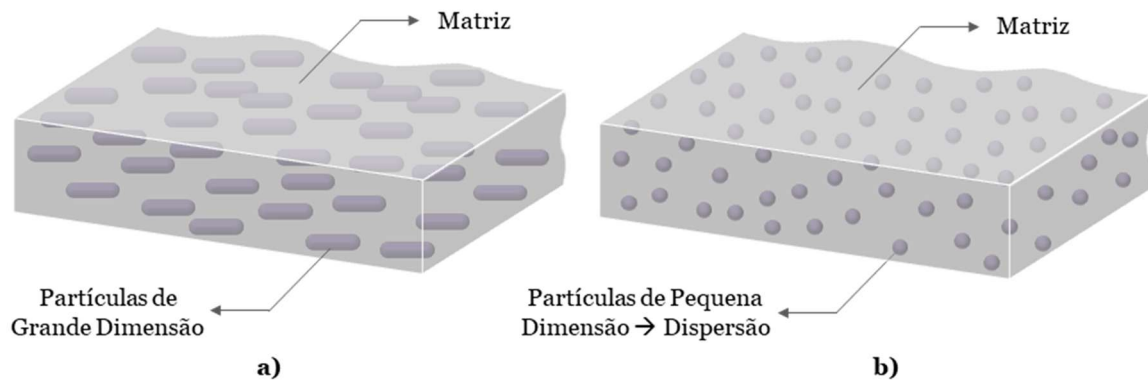


Figura 26 - Materiais compósitos reforçados com partículas: a) Partículas de grande dimensão; b) Dispersão (Adaptado de Egbo, 2021)

Considerando o tamanho ideal das partículas, aquando da sua utilização como material de reforço, é importante evidenciar que quanto menor a sua dimensão, associada à maioríssima uniformidade das partículas na matriz, melhores serão as propriedades obtidas, uma vez que a fração de volume das fases constituintes, interfere diretamente no comportamento do material final (Callister and Rethwisch, 2018).

Deste modo, para este tipo de materiais é estabelecido um princípio, denominado de “regra das misturas”, a partir do qual é possível determinar uma propriedade mecânica do material compósito, partindo do limite teórico inferior e superior estimados para essa propriedade. Esta estimativa é calculada fazendo uso das propriedades mecânicas individuais e nas frações volumétricas das fases constituintes (Egbo, 2021).

Por conseguinte, é possível prever o módulo de elasticidade de um material compósito de duas fases, em função das frações volumétricas das fases constituintes, no qual E , representa o módulo de elasticidade e V a fração volumétrica, cujos subscritos c , m e p , representam a fase composta, a matriz e as partículas, respetivamente. Neste sentido, as Equações 1 e 2, apresentam o limite superior, $E_c(u)$, e inferior, $E_c(l)$, respetivamente, para determinação do módulo de elasticidade do material compósito em estudo (Callister and Rethwisch, 2018).

$$E_c(u) = E_m V_m + E_p V_p \quad [1]$$

$$E_c(l) = \frac{E_m V_p}{V_m E_p + V_p E_m} \quad [2]$$

Após o cálculo dos limites superior e inferior é expectável que os dados experimentais se situem entre as duas curvas, sendo possível afirmar que a propriedade do material compósito a determinar, é dada pela média ponderada das propriedades dos seus constituintes, com base nas frações volumétricas (Callister and Rethwisch, 2018; Egbo, 2021).

Por outro lado, os materiais compósitos podem ser reforçados com fibras, sendo este o método mais aplicado na fabricação deste tipo de materiais, uma vez que permite obter uma combinação única de características de resistência, rigidez e leveza, sendo as fibras de vidro, de aramida e de carbono as mais utilizadas (Hasan, 2020; Egbo, 2021; Khan *et al.*, 2024).

Na realidade, as exímias propriedades destes materiais, devem-se ao pequeno diâmetro que as fibras apresentam, sendo este inversamente proporcional à resistência, ou seja, quanto menor for o diâmetro, maior será a resistência verificada. No entanto, por vezes, quanto menor for o diâmetro das fibras, maior será o custo do material compósito, bem como a sua flexibilidade de fabrico (Hasan, 2020).

Visto que, nestes materiais, a tensão é transferida pela matriz através das fibras, tanto na interface como ao longo do comprimento da fibra, o grau da carga aplicada dependerá de dois fatores (Asfaw *et al.*, 2024):

- Comprimento da fibra;
- Orientação das fibras e a sua direção em relação umas às outras.

Considerando a orientação e a direção das fibras, se estas não estiverem orientadas e direcionadas, consoante a linha de tensão aplicada, a falha ocorrerá facilmente. Desta forma, justifica-se que os compósitos cujas fibras são unidirecionais, transmitam melhor as tensões externas (Asfaw *et al.*, 2024).

Partindo disto, comparando os dois tipos de reforços dos materiais compósitos, partículas ou fibras, é importante salientar que, as partículas tendem a apresentar uma forma esférica, enquanto as fibras apresentam uma geometria irregular, cuja relação comprimento-

diâmetro é superior em relação com a fase dispersa em forma de partículas (Bhong *et al.*, 2023).

De facto, a relação comprimento-diâmetro da fibra é, na verdade, um dos principais fatores de determinação da resistência e rigidez do material compósito, sendo necessário a existência de um comprimento mínimo para que ocorra um reforço efetivo dos materiais, dado que, quando é aplicada uma carga, a ligação fibra-matriz cessa, precisamente nas extremidades da fibra, originando um padrão de deformação da matriz, além de não ocorrer qualquer transmissão de carga nesse ponto (Callister and Rethwisch, 2018; Egbo, 2021).

O comprimento mínimo exigido para o fortalecimento e reforço do material compósito é denominado de comprimento crítico (l_c), encontrando-se veementemente relacionado com a resistência à tração final do material (σ_f^*), tal como é apresentado pela Equação 3, onde d e τ_c , representam, respetivamente, o diâmetro da fibra e a resistência ao corte da matriz ou resistência da ligação fibra-matriz, dependendo da que apresentar um valor menor (Callister and Rethwisch, 2018; Egbo, 2021).

$$l_c = \frac{\sigma_f^* \times d}{2 \times \tau_c} \quad [3]$$

Com efeito, considerando a influência do comprimento das fibras, quando estas apresentam um comprimento natural bastante superior ao comprimento crítico, denominam-se de fibras contínuas e, em caso de apresentarem um comprimento inferior, denominam-se de fibras descontínuas ou fibras curtas, sendo que, neste último caso, se o comprimento for excessivamente inferior, a matriz deforma-se em torno da fibra, não existindo transferência de tensão e haja pouco reforço, por parte da fibra (Callister and Rethwisch, 2018).

Relativamente à orientação das fibras no material compósito estas podem encontrar-se dispostas segundo um alinhamento paralelo com o eixo longitudinal, assumindo uma única direção ou um alinhamento totalmente aleatório. Na verdade, estas duas posições verificam-se aquando da observação da disposição de fibras contínuas e descontínuas, sendo que, as fibras contínuas dispõem-se, naturalmente, alinhadas, enquanto as fibras descontínuas podem estar alinhadas ou dispostas aleatoriamente, ou parcialmente orientadas (Callister and Rethwisch, 2018).

Neste sentido, na Figura 27 apresentam-se as três possíveis orientações que as fibras podem assumir: contínuas e alinhadas, descontínuas e alinhadas, bem como descontínuas e orientadas aleatoriamente (Callister and Rethwisch, 2018).

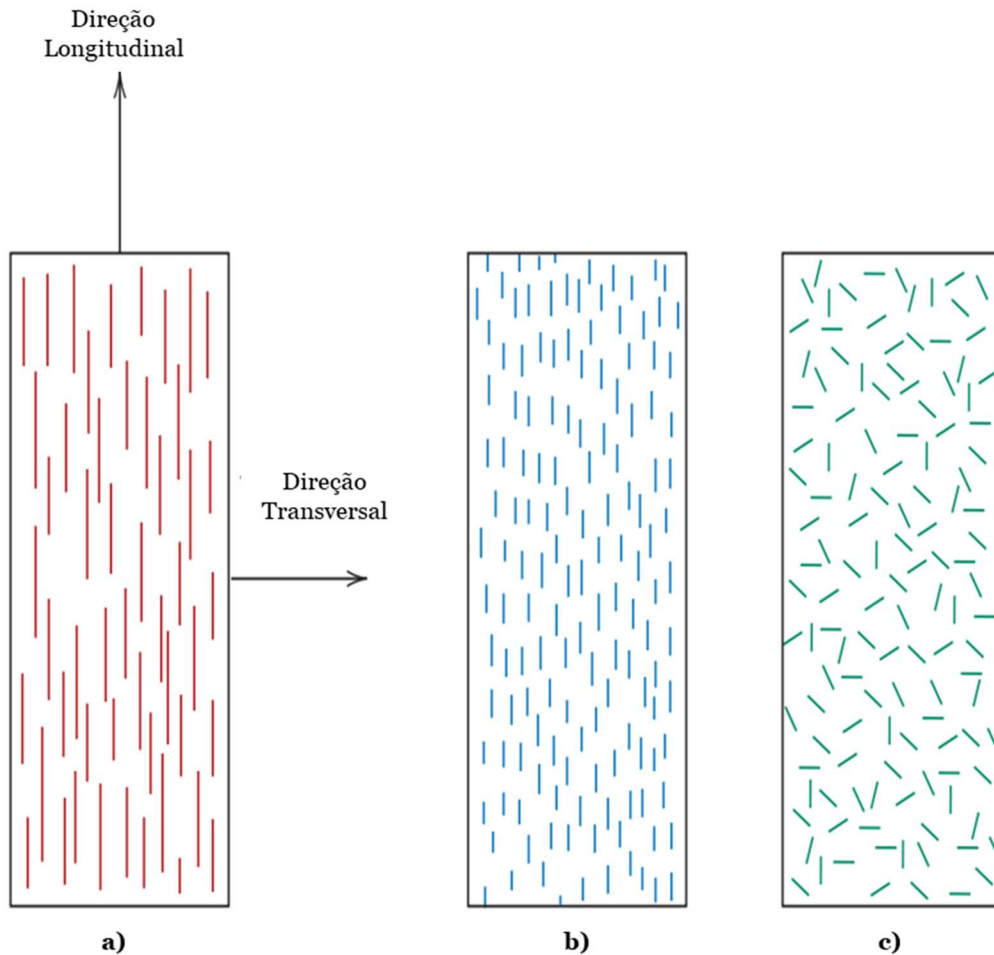


Figura 27 - Orientação das fibras: a) contínuas e alinhadas; b) descontínuas e alinhadas; c) descontínuas e orientadas aleatoriamente (Callister and Rethwisch, 2018)

Tendo em conta a orientação das fibras, é possível afirmar que as respostas mecânicas dos materiais compósitos reforçados com fibras estão diretamente relacionadas com diversos fatores, sendo pertinente realçar (Callister and Rethwisch, 2018):

- Os comportamentos de tensão-deformação das fases da fibra e da matriz;
- As frações de volume das fases constituintes;
- A direção em que a tensão é aplicada.

Deste modo, o módulo de elasticidade destes materiais é expresso em função da direção que as fibras assumem, além de ser necessário considerar que, tanto as fibras como a matriz apresentam comportamentos elásticos. À semelhança do que ocorre com os compósitos reforçados com partículas, as Equações 4 e 5, respetivamente, apresentam a forma de

cálculo do módulo de elasticidade para um material compósito cujo reforço está alinhado na direção longitudinal e na direção transversal, onde E representa o módulo de elasticidade, V a fração volumétrica e os subscritos m e f , representam a matriz e as fibras, respetivamente (Callister and Rethwisch, 2018).

$$E_{cl} = E_m V_m + E_f V_f \quad [4]$$

$$E_{cl} = \frac{E_m V_f}{V_m E_f + V_f E_m} \quad [5]$$

No que diz respeito à orientação do reforço em materiais compósitos reforçados com fibras, torna-se pertinente realçar que, os compósitos de fibras alinhadas, apresentam propriedades contrastantes, comparativamente com os compósitos cujas fibras se encontram orientadas aleatoriamente (Bhong *et al.*, 2023; Asfaw *et al.*, 2024).

De facto, quando as fibras estão alinhadas longitudinalmente, os materiais compósitos apresentam baixa resistência à compressão e alta resistência à tração, ao passo que os compósitos cujas fibras se encontram alinhadas transversalmente apresentam baixa resistência à tração (Asfaw *et al.*, 2024).

Por outro lado, nos materiais compósitos reforçados com fibras orientadas aleatoriamente, a determinação e a previsão das propriedades mecânicas tornam-se tarefas difíceis, devendo-se, essencialmente à complexidade da distribuição das fibras na matriz e da carga aplicada na interface fibra-matriz (Asfaw *et al.*, 2024).

Desta forma, justifica-se a necessidade de considerar a orientação e o comportamento dos elementos nos compósitos reforçados com fibras, uma vez que o controlo da orientação e da dispersão dos seus constituintes, permite melhorar, significativamente, as propriedades mecânicas dos materiais compósitos (Asfaw *et al.*, 2024).

No entanto, para aplicações em que é necessária uma maior integridade estrutural, a melhor opção de materiais compósitos são os compósitos estruturais, dado que apresentam uma baixa densidade e, por norma, são constituídos por múltiplas camadas (Callister and Rethwisch, 2018).

Neste sentido, os compósitos estruturais são definidos como um grupo de compósitos, concebidos e mantidos juntos, por ação de um adesivo homogéneo, cujas propriedades

mecânicas e estruturais são definidas pela composição e geometria das partes constituintes (Egbo, 2021; Bhong *et al.*, 2023). Os compósitos estruturais mais comuns, são os laminados e os painéis sanduíche, distinguindo-se não só pelo modo de concepção, mas também pela geometria que lhes é inerente (Bhong *et al.*, 2023).

Os compósitos laminados consistem num conjunto de folhas ou painéis bidimensionais¹⁰, comumente denominados de lâminas ou camadas, cujas direções são preferenciais de alta resistência. Isto é, tal como acontece nos compósitos reforçados com fibras, um laminado é composto por uma estrutura multicamada, em que cada camada assume uma direção, influenciando as propriedades do material (Callister and Rethwisch, 2018).

Desta forma, os materiais compósitos laminados, podem ser classificados tendo em consideração a orientação dos painéis individuais, podendo dividir-se em (Callister and Rethwisch, 2018):

- Unidirecionais: todas as lâminas apresentam a mesma orientação;
- Camadas Cruzadas: as lâminas de orientações de alta resistência (0° e 90°) são dispostas de forma alternada;
- Camadas Angulares: as lâminas, de camadas sucessivas entre $+\theta$ e $-\theta$, são dispostas de forma alternada.
- Multidirecionais: as lâminas apresentam várias orientações de alta resistência.

Geralmente, nos compósitos laminados, as camadas são dispostas de forma que a orientação das fibras seja simétrica em relação ao plano médio do laminado, com o intuito de evitar a torção ou a flexão do plano e dos painéis (Callister and Rethwisch, 2018). Na Figura 28 apresenta-se a representação gráfica dos tipos de compósitos laminados descritos anteriormente (Callister and Rethwisch, 2018).

¹⁰ Os painéis que constituem os compósitos laminados, dizem-se bidimensionais, visto que a sua geometria é caracterizada pela existência de uma área superficial muito superior, em comparação com a pequena espessura dos painéis individuais (Egbo, 2021).

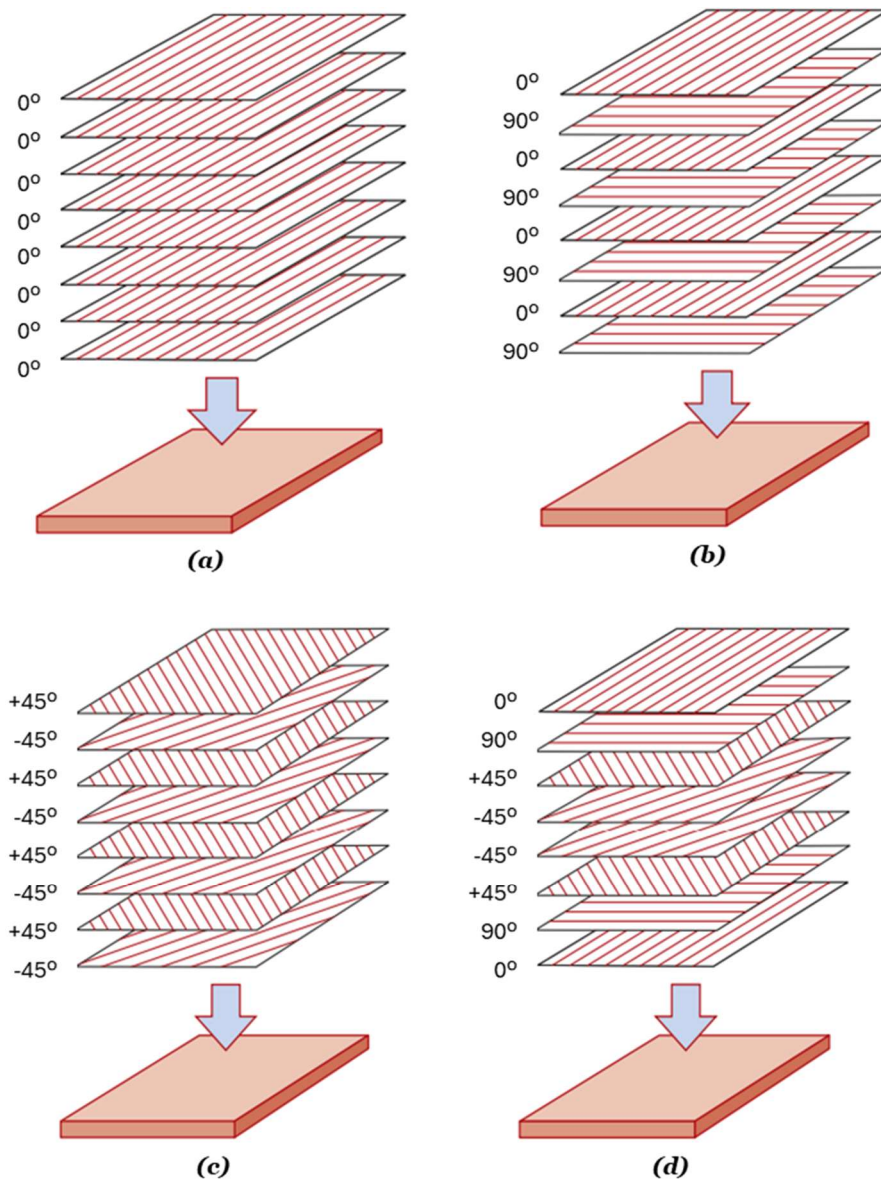


Figura 28 - Tipos de Compósitos Laminados: a) Unidirecional; b) Camadas Cruzadas; c) Camadas Angulares; d) Multidirecionais (Callister and Rethwisch, 2018)

Contrariamente aos compósitos laminados, os painéis sanduíche são constituídos por uma superfície exterior de alta resistência e rigidez, enquanto o núcleo é caracterizado por ser relativamente mais macio e espesso (Callister and Rethwisch, 2018; Egbo, 2021). Na verdade, um painel sanduíche é constituído por duas folhas exteriores que, sendo de um material rígido e forte, suportam as cargas de flexão aplicadas no material compósito (Callister and Rethwisch, 2018).

Neste sentido, as faces exteriores, podendo ser constituídas por diversos materiais, como ligas de alumínio, aço e polímeros reforçados com fibras, são “coladas” ao núcleo, adesivamente, através de uma pequena lâmina. Em contrapartida, o núcleo, sendo de um

material mais leve e com um módulo de elasticidade mais baixo, desempenha diversas funções a nível estrutural (Callister and Rethwisch, 2018).

De facto, é o núcleo que permite garantir um suporte contínuo às faces exteriores, mantendo-as unidas, sendo que, é essencial que estas se mantenham fortemente ligadas ao núcleo, de modo a garantir a integridade estrutural. Ademais, tendo resistência ao corte suficiente para suportar tensões de corte transversais, é, analogamente, espesso o suficiente para fornecer uma elevada rigidez ao corte e evitar que o painel se dobre (Callister and Rethwisch, 2018).

Deste modo, a rigidez do painel sanduíche depende, essencialmente, das propriedades e qualidades do material do núcleo, bem como da sua espessura. Assim, os materiais mais utilizados na fabricação do núcleo são as espumas poliméricas rígidas (termoendurecíveis e termoplásticos), a madeira e os “favos de mel”, que consistem em folhas finas que, quando interligadas formam células com configurações hexagonais (Callister and Rethwisch, 2018).

Além disso, quando projetados adequadamente, os painéis sanduíche são capazes de suportar tensões de compressão, tração e corte, consideráveis, sendo um material compósito ideal em aplicações económicas, dado os materiais do núcleo serem sensivelmente mais baratos que os materiais utilizados na constituição das faces exteriores (Callister and Rethwisch, 2018; Egbo, 2021).

Com o intuito de caracterizar os painéis sanduíche, a Figura 29 apresenta uma representação gráfica destes materiais, bem como a sua constituição.

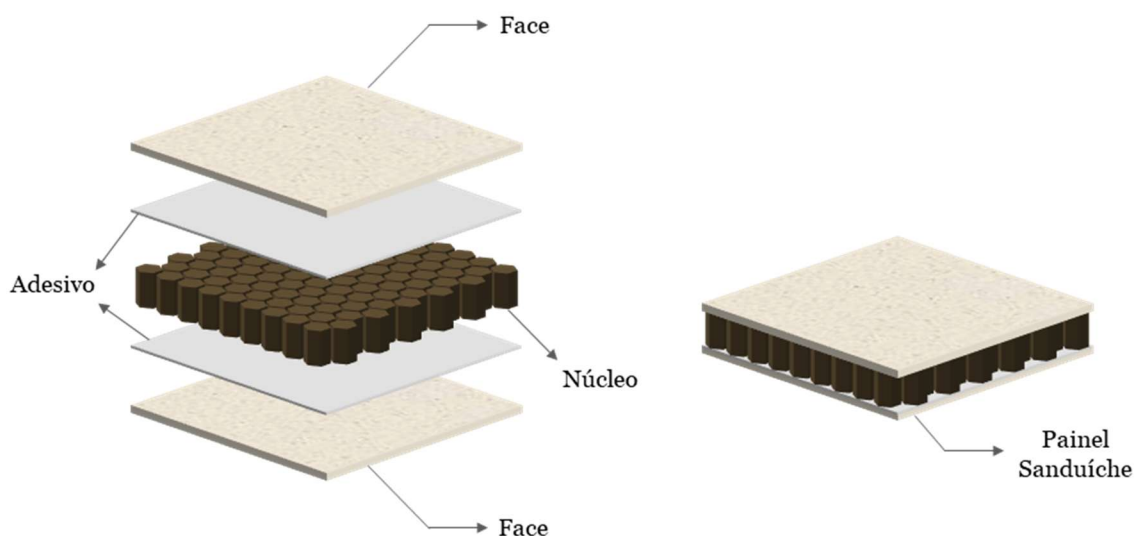


Figura 29 - Representação gráfica de um Painel Sanduíche (Adaptado de Callister and Rethwisch, 2018)

5.3 Tipos de Processos de Fabrico

Geralmente, as técnicas de fabrico são reconhecidas como o conjunto de operações utilizadas para dar forma, cortar ou moldar materiais e objetos. Contudo, os materiais compósitos, considerando a sua versatilidade, expandiram significativamente as possibilidades de processos de fabrico (Khan *et al.*, 2024).

Neste sentido, os materiais compósitos podem ser fabricados mediante aplicação de diversos processos que, variando entre processos manuais e completamente automatizados, apresentam diversas vantagens e desafios, não sendo adequado mencionar que existam métodos superiores a outros, uma vez que, cada método é aplicado consoante a peça a ser fabricada, dependendo, efetivamente, dos materiais (matriz e reforço) que a constituem, o desempenho previsto e a consequente aplicação (Middleton, 2016; Sumithra *et al.*, 2023). Na Figura 30, apresentam-se os diferentes processos de fabrico, distribuídos de acordo com a complexidade da tecnologia utilizada, da menos complexa para a mais complexa.

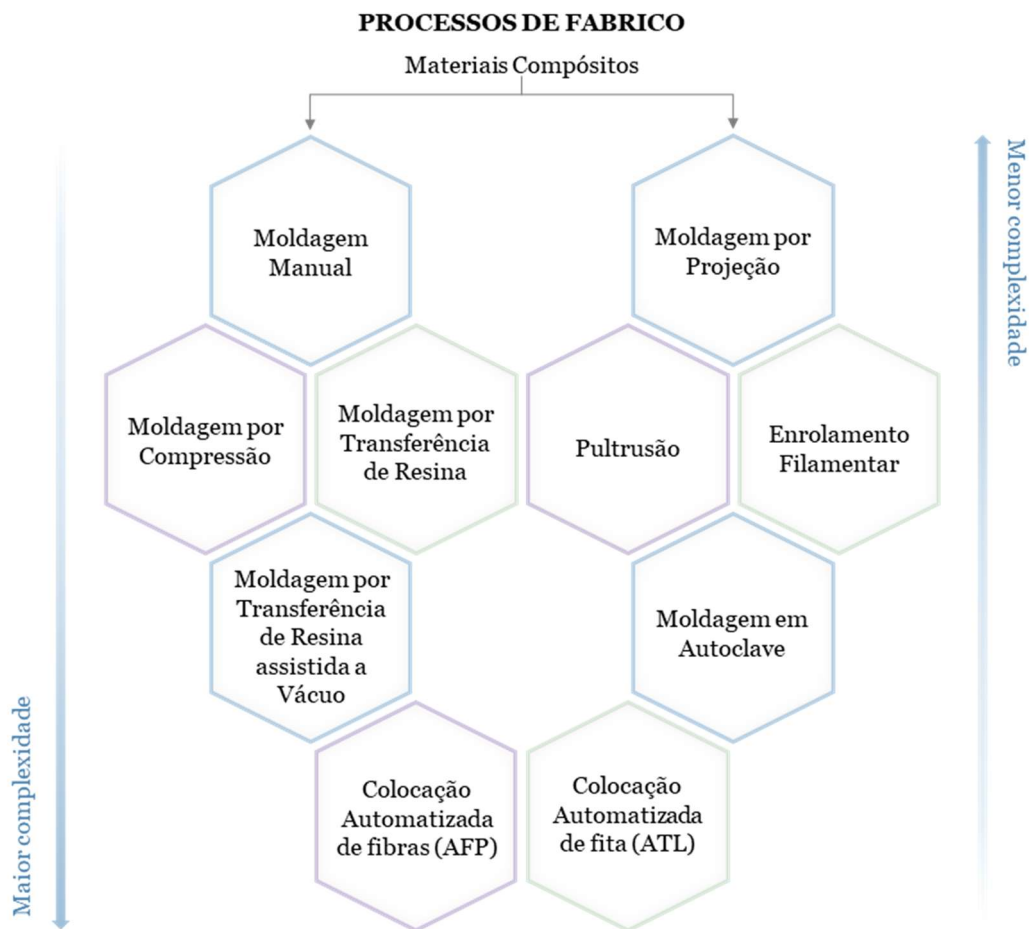


Figura 30 – Principais Processos de Fabricos de Materiais Compósitos (Adaptado de Middleton, 2016; Callister and Rethwisch, 2018; McIlhagger, Archer and McIlhagger, 2020; Al-Furjan *et al.*, 2022; Sumithra *et al.*, 2023; Khan *et al.*, 2024; Xu *et al.*, 2025)

Além disso, a seleção do processo de fabricação que melhor se adequa ao material compósito, deve considerar as instalações e os equipamentos disponíveis, bem como o custo associado a cada método. Na verdade, além das diferenças substanciais de cada técnica de fabricação, estas diferem entre si, pelo custo e rapidez de processamento, sendo que nem sempre os mais rápidos são necessariamente os que apresentam custos mais baixos. Isto é, alguns métodos mais rápidos apresentam custos de produção mais elevados, ao passo que outros que são demorados, têm custos mais baixos (Al-Furjan *et al.*, 2022).

Ademais, nem todos os métodos se adequam a todos os tipos de materiais compósitos, visto que estes podem necessitar de adquirir determinadas formas e diferentes combinações das fases constituintes (Al-Furjan *et al.*, 2022). Deste modo, na Tabela 10, apresentam-se os processos de fabricação mais utilizados na produção de materiais compósitos, juntamente com a respetiva caracterização.

Tabela 10 - Processos de Fabrico de Materiais Compósitos (Middleton, 2016; Callister and Rethwisch, 2018; McIlhagger, Archer and McIlhagger, 2020; Al-Furjan *et al.*, 2022; Sumithra *et al.*, 2023; Yadav and Schledjewski, 2023; Carosella *et al.*, 2024; Khan *et al.*, 2024; Xu *et al.*, 2025)

Designação	Caracterização
<p>Moldagem Manual (“Hand Lay-Up”)</p>	<p>Sendo a técnica mais antiga, básica e de menor custo na fabricação de compósitos de matriz termoendurecível, a moldagem manual, consiste na aplicação manual de camadas de reforço num molde, enquanto uma matriz¹¹ é impregnada manualmente nas camadas, mediante utilização de um rolo ou escova que permita a sua distribuição uniforme pelo molde.</p> <p>Após serem curadas à temperatura ambiente, a extração das peças é igualmente realizada de forma manual, sendo necessário, em primeiro lugar, a colocação de uma película de proteção que, para além de impedir que as camadas de matriz adiram ao tecido de respiração, absorva qualquer excesso de matriz, distribuindo uniformemente a pressão aplicada sobre a camada.</p>
<p>Moldagem por Projeção (“Spray Lay-Up”)</p>	<p>A moldagem por projeção, assemelhando-se, em parte, à moldagem manual, consiste na projeção, sob a forma de “<i>spray</i>”, de uma combinação de matriz termoendurecível e um segmento de fibra num molde, mediante ação de uma pistola de ar comprimido que é alimentada por um rolo de fibras e uma mistura de resina e endurecedor.</p> <p>Resultando numa elevada deposição de fibras no molde, este processo permite a produção de peças de grandes dimensões, com propriedades mecânicas limitadas, embora possua um tempo de ciclo longo.</p>

¹¹ Como a matriz é aplicada manualmente, neste tipo de moldagem, são preferíveis as resinas de menor viscosidade, para uma melhor aderência às fibras (Middleton, 2016).

<p>Moldagem por Transferência de Resina – RTM</p>	<p>Na moldagem por transferência de resina (do inglês, <i>Resin Transfer Molding</i>, RTM), os materiais de reforço são inseridos na cavidade de um molde fechado que, posteriormente é preenchido, mediante injeção de uma matriz termoendurecível sob pressão que, fluindo através da cavidade do molde, permite impregnar o material de reforço. O ritmo de processo do RTM é consideravelmente rápido, quando comparado com os restantes processos de moldagem, além de permitir um maior controlo do teor de matriz, bem como da espessura e da geometria da peça que se pretende obter, sendo ideal para o fabrico de materiais de volumes médios que requerem elevadas relações de resistência/peso.</p> <p>Visto que o fluxo de matriz pode ser lento, é possível verificar-se a existência de diversos pontos de injeção ao longo do molde, tendo sido observado que, em algumas aplicações, eram originados vazios de ar nas linhas de soldadura, devido à colisão dos diferentes fluxos de matriz. Desta forma, o processo depende essencialmente do gradiente de pressão da ferramenta, da viscosidade da matriz e do tipo, da natureza e da permeabilidade do material de reforço.</p>
<p>Moldagem por Transferência de Resina assistida a Vácuo - VARTM</p>	<p>À semelhança do RTM, a moldagem por transferência de resina assistida a vácuo (VARTM), consiste na colocação de fibras na cavidade de um molde, com a particularidade de, antes de ser injetada a matriz para impregnação das fibras, é utilizado um sistema de vácuo, de modo a remover todo o ar existente no molde para, posteriormente, inserir a matriz na cavidade do molde. Desta forma, este método permite a produção de materiais compósitos de grandes dimensões e de elevada precisão, sendo estas removidas do molde, após a sua cura.</p>
<p>Enrolamento Filamentar</p>	<p>O enrolamento filamentar é o processo de produção de materiais compósitos preferível, quando o objetivo é fabricar elementos compósitos cilíndricos ou tubulares. Deste modo, esta técnica consiste em incorporar fibras contínuas num determinado padrão, num mandril rotativo e, em seguida, utiliza-se matriz para saturar as fibras. No entanto, o processo comumente utilizado, por uma questão de praticidade, consiste em imergir as fibras, primeiramente, num banho de matriz para posteriormente serem enroladas no mandril no padrão pretendido.</p> <p>Após serem aplicadas as camadas pretendidas, a cura é efetuada num forno próprio ou à temperatura ambiente, sendo retirado o mandril após este processo.</p> <p>Por conseguinte, podem ser obtidos diversos padrões de elevada relação resistência/peso e propriedades mecânicas atraentes, sendo a tensão de enrolamento um dos principais parâmetros como influência na eficácia do processo.</p>
<p>Moldagem por Compressão</p>	<p>Considerando que a moldagem por compressão constitui a técnica mais utilizada no fabrico em massa de materiais compósitos, esta consiste na colocação de uma carga de material (<i>pré-prepreg</i>) na cavidade de um molde pré-aquecido, sendo este posteriormente fechado por ação de uma prensa hidráulica, obrigando o material a fluir pela cavidade, de modo a dar forma ao item que se pretende obter. A peça é retirada do molde após estar totalmente curada, favorecendo assim o fabrico de peças compostas, de grandes dimensões, de um modo simples, rápido e preciso.</p> <p>Além disso, nesta técnica, o tamanho e a espessura do componente influenciam diretamente o tempo de ciclo, sendo que este é distinto para cada peça produzida.</p>

<p>Pultrusão</p>	<p>A pultrusão é o método de fabrico geralmente utilizado na produção de componentes compósitos de comprimentos contínuos e secção transversal constante, como vigas e tubos, visto ser uma técnica automatizada, económica e altamente adaptável. Neste processo, combinados de fibras contínuas, inicialmente dispostas em bobinas, são impregnadas com uma matriz, preferencialmente, termoendurecível, sendo posteriormente puxadas através de uma ferramenta denominada matriz que lhes confere a forma desejada, além de estabelecer a relação conveniente entre a matriz e a fibra. Após passar pela matriz, o material é transferido para um molde de cura previamente aquecido, de modo a obter a sua forma final e iniciar a cura da fase contínua do material compósito.</p> <p>O mecanismo que realiza a pultrusão, contém um dispositivo de tração que puxa o material através da matriz que, desta forma, determina a velocidade da produção, contribuindo para o fabrico de peças de elevado desempenho e de maior comprimento, em comparação com os restantes processos.</p>
<p>Moldagem em Autoclave</p>	<p>A moldagem em autoclave é considerada o processo mais dispendioso de materiais compósitos, devido ao elevado custo da própria autoclave, bem como ao custo dos pré-impregnados utilizados. Contudo, esta técnica origina peças de propriedades mecânicas superiores e melhoradas, mediante utilização simultânea de três fatores de extrema importância: vácuo, pressão e temperatura.</p> <p>Este tipo de moldagem é aplicado, essencialmente, na produção de baixo volume de fibra de reforço, sendo utilizado, normalmente, um tipo de reforço denominado de “<i>prepreg</i>”, que é aplicado nas camadas individuais. O “<i>prepreg</i>” é composto por inúmeras fibras que já se encontram pré-impregnadas com resina. Em primeiro lugar, o pré-impregnado é disposto em camadas de forma manual ou automatizada, até que se atinja a forma e a espessura desejáveis, sendo posteriormente colocadas no interior de um saco de vácuo que, submetido a ciclos de pressão e vácuo, permitem a remoção do ar presente entre as camadas. Após estes ciclos controlados, no interior da autoclave, dá-se um aumento da temperatura, de modo a reduzir a viscosidade da resina e, assim, curar o material compósito, além de produzir uma peça com elevado teor de fibras e reduzida presença de defeitos (vazios).</p>
<p>Colocação Automatizada de Fibras (AFP) e Colocação Automatizada de Fita (ATL)</p>	<p>A colocação automatizada de fibras (<i>Automated Fiber Placement, AFP</i>) e a colocação automatizada de fita (<i>Automated Tape Laying, ATL</i>), surgiram como duas tecnologias avançadas, utilizadas no fabrico de materiais compósitos de elevado desempenho, cujos princípios de funcionamento são semelhantes.</p> <p>No que diz respeito ao processo de AFP, este consiste na colocação automática de fibras pré-impregnadas na superfície de um molde, posteriormente submetido a um aumento de temperatura que, aumentando a viscosidade do <i>prepreg</i>, permite uma melhoria na adesão ao molde. De facto, durante o processo, o <i>prepreg</i> é transportado para a extremidade da máquina mediante ação de um sistema de controlo de tensão, permitindo em simultâneo, o movimento de colocação das fitas sobre o molde.</p> <p>Analogamente, o processo de ATL, consiste na colocação multidirecional de uma fita contínua em diferentes camadas, até que seja obtida a espessura pretendida. Na verdade, o sistema ATL, distribuindo o comprimento de material, possui um rolo de silicone que aplica uma força de compressão na fita, evitando a rutura da mesma e garantindo a precisão do alinhamento das camadas.</p>

Considerando o crescente avanço da tecnologia e as exigências do mercado atual, o fabrico de materiais compósitos, mediante aplicação de técnicas convencionais, deixou de se tornar um método globalmente viável, tornando-se imperativo o reconhecimento de sistemas de processamento que englobem determinados aspetos fundamentais, como a eficiência dos processos, a produtividade e a sustentabilidade dos mesmos (Soni *et al.*, 2024).

Aliada à ideologia da criação de processos mais limpos, ecológicos e eficazes, encontra-se a descoberta de diferentes técnicas que operem através da utilização de ferramentas, materiais e condições de processamento melhores e, de certa forma, permitam a automatização dos sistemas de fabrico de materiais compósitos (Soni *et al.*, 2024).

Na Figura 31 apresenta-se a tendência de evolução da utilização das técnicas de fabrico de materiais compósitos, registada nas últimas cinco décadas, evidenciando um claro aumento da utilização de processos automatizados, ao passo que os processos convencionais deixaram, gradualmente, de ser aplicados em grande escala (Soni *et al.*, 2024).

Tendência de Evolução dos Processos de Fabrico de Materiais Compósitos

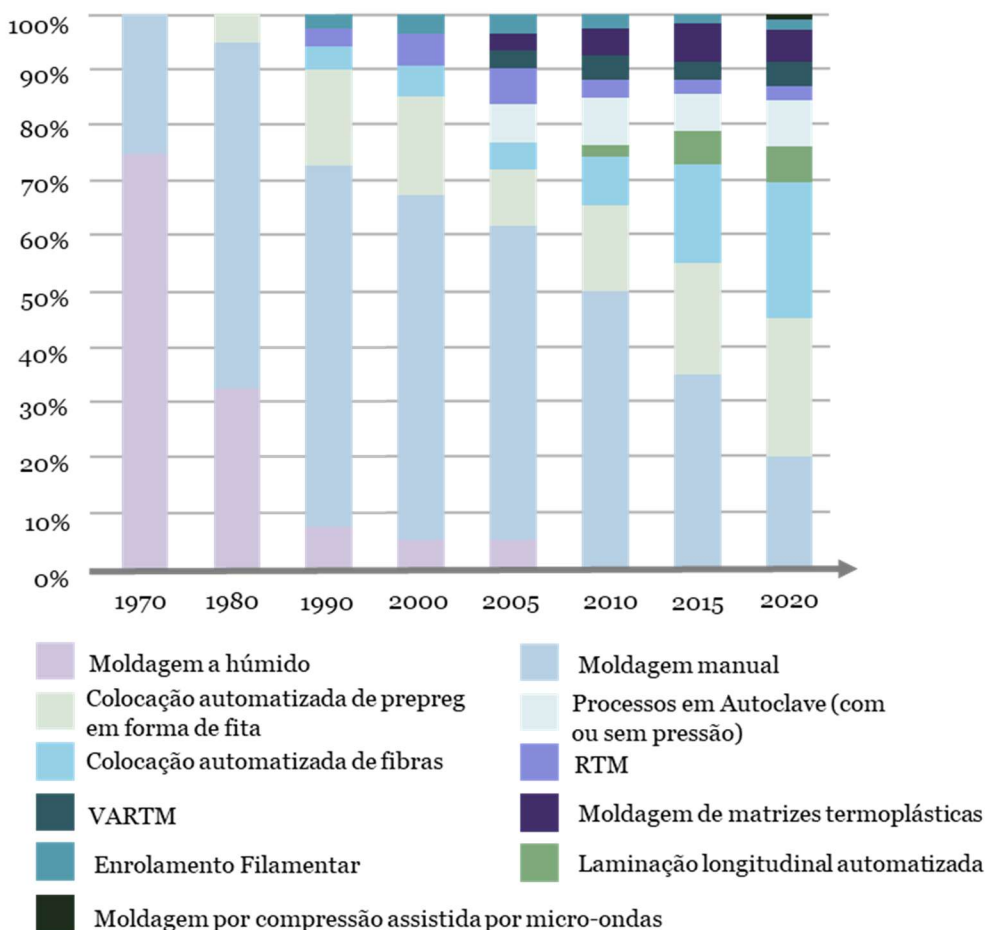


Figura 31 - Tendência de Evolução dos Processos de Fabrico de Materiais Compósitos (Adaptado de Soni *et al.*, 2024)

Partindo da observação da Figura 31, é possível afirmar que, outrora, as técnicas mais utilizadas para o fabrico de materiais compósitos resumiam-se apenas à moldagem a húmido e moldagem manual, as quais foram perdendo aplicabilidade com o avançar dos anos até que, em 2010, já não se verificavam registos significativos da utilização de moldagem a húmido (Soni *et al.*, 2024).

No entanto, apesar de ser substituída por outros processos, pelo facto de ser pouco eficiente e produtiva, a moldagem manual, continua a ser ativamente aplicada na produção de baixo volume de materiais compósitos, cujas formas são mais complexas e requerem maior precisão (Soni *et al.*, 2024). De facto, é evidente a crescente tendência da substituição dos processos manuais, através da utilização de processos de colocação automatizada, seja de fibras ou camadas, evidenciando um aumento relevante, desde 1980, momento em que se verificou o início da utilização da colocação automatizada de *prepreg* em forma de fita, destacando-se novos métodos automatizados, nos anos seguintes, como o enrolamento filamentar, a colocação automatizada de fibras e o RTM (Soni *et al.*, 2024), pelo facto de os processos automatizados demonstrarem inúmeras vantagens face aos métodos manuais tradicionais, permitindo o aumento da eficiência, da precisão e da repetibilidade no fabrico de materiais compósitos (Carosella *et al.*, 2024).

Adicionalmente, nos últimos anos, verificou-se a existência de uma evidente preferência na utilização de processos de moldagem que envolvam matrizes termoplásticas, com surgimento de um processo de fabrico na última década, a moldagem por compressão assistida por micro-ondas. Na verdade, esta técnica permite fabricar compósitos de base termoplástica e termoendurecível, permitindo uma economia significativa de esforço de processamento e redução da utilização de energia de produção, sendo comprovado o seu êxito no desenvolvimento de materiais compósitos à base de polímeros (Soni *et al.*, 2024).

Além da produtividade e eficiência, no que diz respeito a processos mais sustentáveis, torna-se perceptível que, as técnicas de moldagem fechada evidenciam ser preferíveis às técnicas de moldagem aberta, como a moldagem por projeção, por exemplo, dado que estas durante o processamento dos materiais compósitos, libertam gases tóxicos, além de não demonstrarem adequabilidade aquando da produção em massa de materiais compósitos (Soni *et al.*, 2024).

Neste sentido, quando o foco é direcionado para a produção em massa de materiais compósitos, é essencial uma escolha adequada das técnicas a utilizar, sendo necessário considerar a forma, o tamanho, as características de processamento das matérias-primas, a

velocidade de produção, o custo de fabrico e a aplicabilidade do material. Por exemplo, a moldagem por compressão é preferível em peças de pequena e média dimensão, enquanto a moldagem por autoclave, a moldagem aberta e a pultrusão, são preferíveis para componentes de maiores dimensões. Por sua vez, o enrolamento filamentar é mais adequado para o fabrico de peças cilíndricas e a pultrusão para componentes de secção transversal longa e uniforme, realçando ainda que o RTM é mais adequado quando se pretendem obter acabamentos de superfície claros e esteticamente superiores (Soni *et al.*, 2024).

Por conseguinte, a pertinência de uma escolha adequada do processo de fabrico a utilizar, tem como principal finalidade a obtenção de peças sem defeitos, com propriedades mecânicas superiores, cuja colocação dos elementos de reforço é realizada de forma correta e que considerem a minimização do desperdício de material ao longo do processo produtivo (Soni *et al.*, 2024).

5.4 Aplicações de Materiais Compósitos

As sólidas e reconhecidas qualidades físicas e mecânicas dos materiais compósitos, resultaram na sua extensiva aplicação nas mais diversas indústrias. De facto, nas últimas décadas, verificou-se a existência de um aumento drástico na aplicação de materiais compósitos reforçados com fibras (Karim *et al.*, 2023).

De acordo com um relatório elaborado pela Associação Alemã de Plásticos/Compósitos reforçados com fibras e, divulgado pela Associação Europeia da Indústria de Compósitos, em 2023, o mercado global de materiais compósitos totalizou cerca de 13 milhões de toneladas, registando um aumento de, aproximadamente, 5%, em comparação com o ano anterior (Witten and Mathes, 2024).

Em contrapartida, apesar do seu papel ativo na produção destes materiais, o mercado europeu de materiais compósitos representou em 2023, apenas 20% do mercado global, evidenciando uma diminuição de cerca de 8% em comparação com 2022, tendo sido registadas cerca de 2.559 mil toneladas de materiais compósitos, das quais, 1.300 mil toneladas correspondiam a materiais compósitos termoplásticos reforçados com fibras curtas, enquanto 843 mil toneladas diziam respeito a materiais termoendurecíveis reforçados com fibras longas (Witten and Mathes, 2024).

No entanto, a produção de materiais compósitos na UE, não pode, de modo algum, ser considerada uniformemente distribuída, uma vez que depende ativamente das diferentes

regiões, da variabilidade de materiais que podem ser processados, dos processos de produção disponíveis e, principalmente, das aplicações a que se destinam (Witten and Mathes, 2024).

Na realidade, a maioria dos materiais compósitos destinam-se a aplicações no setor dos transportes, como elementos e equipamentos da indústria automóvel, aeronáutica e marítima, representando 49,8% da totalidade das aplicações. Por outro lado, a restante produção é dividida por outro tipo de aplicações, como a indústria elétrica e eletrónica (21,2%), o setor da construção (18,5%), equipamentos desportivos e de laser (9,4%) e, por outras aplicações (1%), por exemplo, indústria eólica, do óleo e do gás, equipamentos da indústria química, equipamentos médicos, entre outros (Karim *et al.*, 2023; De *et al.*, 2024; Witten and Mathes, 2024). Na Figura 32 apresentam-se as principais aplicações dos materiais compósitos e respetivas percentagens.

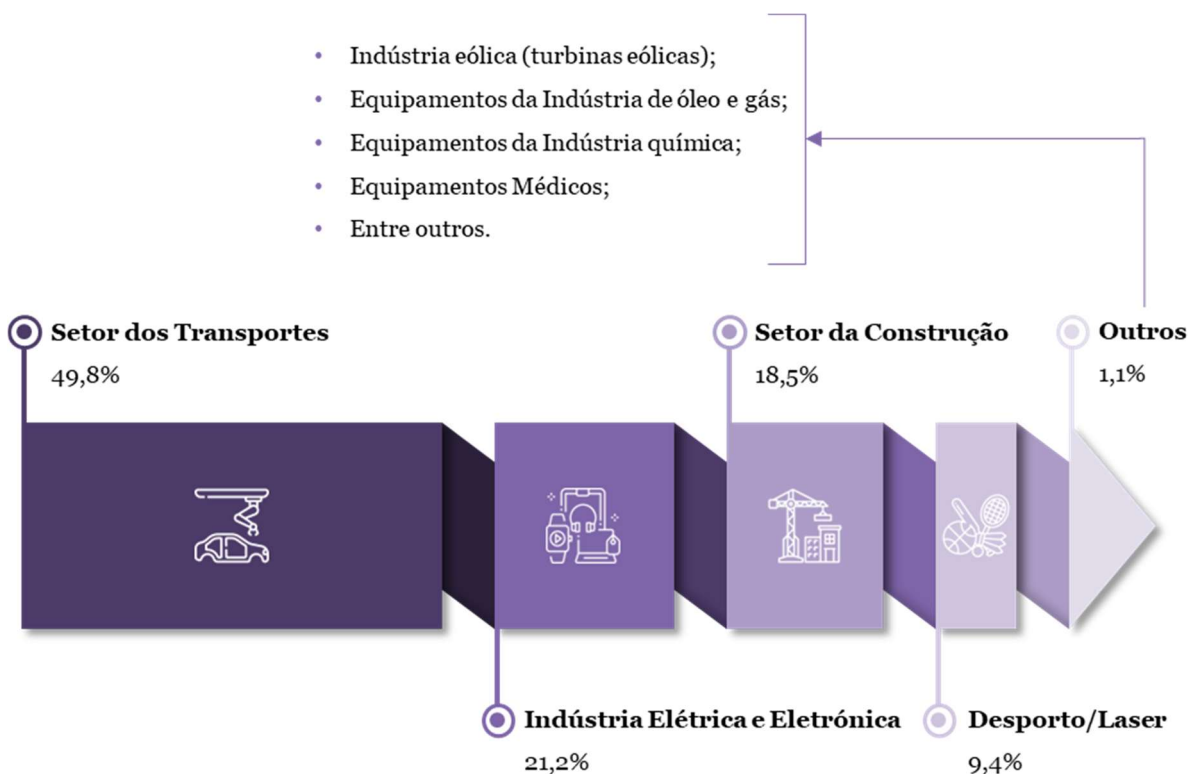


Figura 32 - Principais aplicações dos materiais compósitos (Adaptado de Karim *et al.*, 2023; De *et al.*, 2024; Witten and Mathes, 2024)

Os materiais compósitos produzidos e comercializados pela UE, dividem-se essencialmente em compósitos termoendurecíveis e compósitos termoplásticos, apresentando diferentes volumes de produção e, conseqüentemente, aplicações distintas (Witten and Mathes, 2024).

Na verdade, a produção total de compósitos termoendurecíveis registou, em 2023, cerca de 1.073 mil toneladas, revelando uma ligeira diminuição de 5,7%, em comparação com o ano anterior, representando, desta forma, 43% do mercado total de materiais compósitos da UE. Em contrapartida, sendo que a produção deste tipo de compósitos tem vindo a diminuir gradualmente ao longo dos anos, os compósitos termoplásticos assumem a maioria da produção destes materiais, evidenciando um volume de 1.423 mil toneladas, em 2023, representando 57% dos compósitos produzidos. Contudo, apesar da utilização de materiais compósitos termoendurecíveis revelar uma tendência de diminuição nos últimos anos, os materiais compósitos termoplásticos evidenciaram uma queda superior, de cerca de 10,3%, em comparação com o ano de 2022 (Witten and Mathes, 2024).

Além disso, os setores de aplicação destes materiais são distintos entre si, ou seja, enquanto os materiais compósitos termoendurecíveis se destinam, preferencialmente, ao setor da construção (36,3%), os materiais compósitos termoplásticos são maioritariamente utilizados no setor dos transportes (65,6%), ao passo que o setor da construção apresenta uma percentagem significativamente menor (5,2%) (Witten and Mathes, 2024). Na Figura 33 apresentam-se os setores de aplicação e respetivas percentagens dos materiais compósitos termoendurecíveis e termoplásticos.

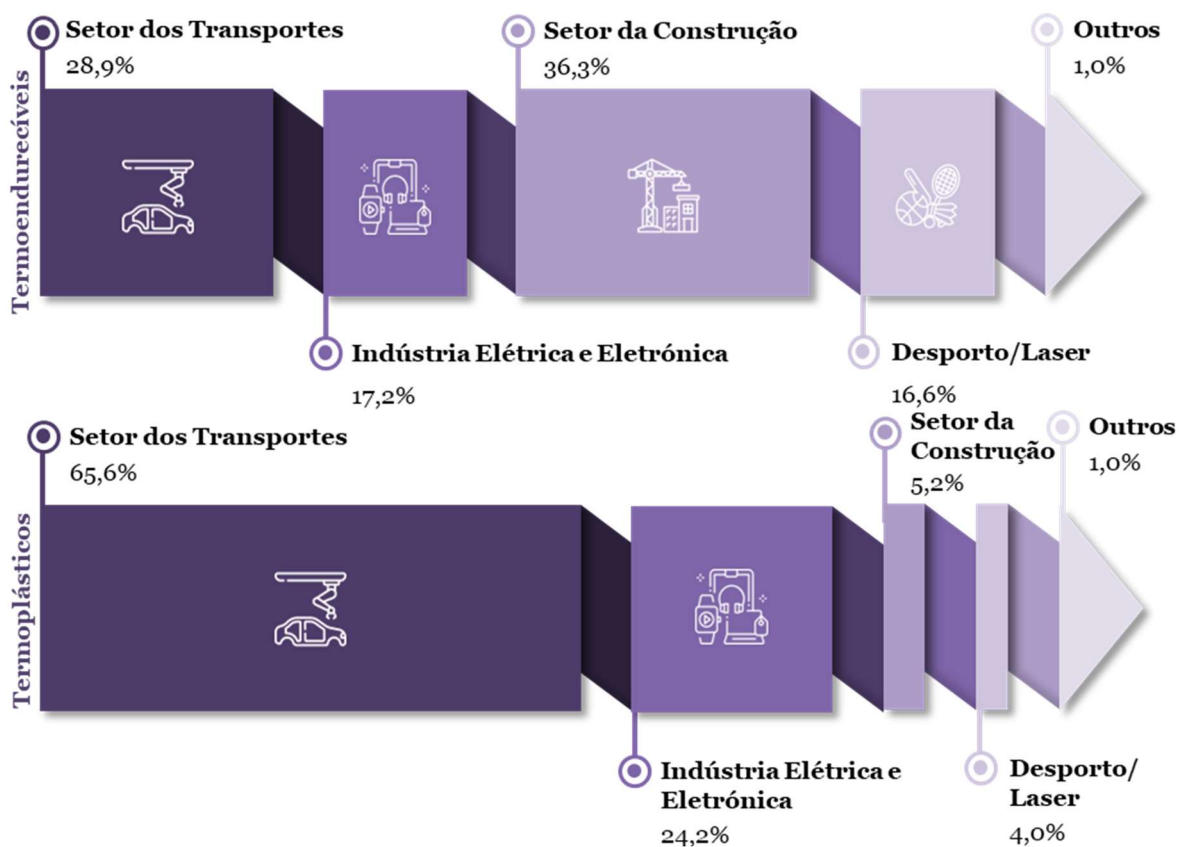


Figura 33 - Aplicações dos materiais compósitos termoendurecíveis e termoplásticos (Adaptado de Witten and Mathes, 2024)

Não obstante, apesar da abrangente aplicabilidade dos materiais compósitos, em termos de análise regional, atualmente, apenas são considerados os materiais compósitos termoendurecíveis, uma vez que não existe discriminação regional dos materiais compósitos termoplásticos (Witten and Mathes, 2024).

Desta forma, a Península Ibérica (Espanha e Portugal), ocupa o terceiro lugar no mercado europeu de materiais compósitos, evidenciando um valor de 152 kilotoneladas, cuja representação é de 14,2%. De facto, as diferenças de volume de mercado de cada país, devem-se essencialmente, à diferença de focos de aplicação nas diferentes regiões, da mesma forma que os países encaram a evolução macroeconómica de maneiras distintas e, evidentemente, em situações diversas (Witten and Mathes, 2024).

Neste sentido, associada à evolução macroeconómica, ao esgotamento de recursos, às legislações governamentais e às características dos compósitos termoendurecíveis e termoplásticos, os países, têm-se revelado cada mais sensíveis aos efeitos nocivos dos compósitos tradicionais, sendo urgente a adoção e a implementação do conceito de produção sustentável no fabrico destes materiais. Como resultado, entre 2016 e 2024, o mercado global de compósitos sustentáveis, registou uma taxa composta de crescimento anual de 11,8% (Soni *et al.*, 2024).

Deste modo, nos últimos anos, tem sido amplamente estudada a possibilidade de produção de compósitos poliméricos mais sustentáveis, que respondam satisfatoriamente às necessidades das aplicações nos diversos domínios da engenharia, evidenciando-se assim, a crescente utilização de resíduos plásticos como materiais de reforço, bem como fibras naturais, com o intuito de melhorar o desempenho mecânico destes materiais, enquanto é dada a devida preocupação à reciclagem dos produtos poliméricos residuais (Soni *et al.*, 2024).

Capítulo 6

Materiais e Métodos

Considerando os conceitos teóricos expostos, neste capítulo será apresentada a descrição pormenorizada dos materiais e métodos do caso prático desenvolvido, abrangendo a separação e análise granulométrica dos resíduos poliméricos industriais utilizados, bem como a análise das matrizes de controlo. Posteriormente, serão descritas a fabricação do núcleo do painel sanduíche e das faces, bem como a produção do próprio painel sanduíche, contemplando os ensaios mecânicos utilizados para a definição das propriedades dos materiais.

6.1 Separação e Análise Granulométrica dos Resíduos Poliméricos Industriais

Atendendo à urgente necessidade do desenvolvimento de alternativas sustentáveis no que diz respeito ao tratamento, valorização e posterior integração de resíduos poliméricos industriais nos processos produtivos, de forma a contribuir para a adoção de sistemas de Economia Circular e evitar que estes sejam inadequadamente descartados no final da sua vida útil, o principal objetivo do presente caso prático, consiste no desenvolvimento de um material compósito, em formato de painel sanduíche, de baixo custo, que integre na sua composição resíduos poliméricos industriais.

Neste sentido, os resíduos poliméricos industriais utilizados consistem em duas misturas distintas: uma que contém apenas PETG na sua composição e, uma segunda, cuja composição é caracterizada pela mistura de PETG, PVC e PMMA, provenientes dos processos produtivos realizados por uma empresa local que forneceu os resíduos.

A empresa em questão, denomina-se de WD Retail – Soluções para Ponto de Venda, Lda., cuja atuação se encontra direcionada para o design do produto e soluções de *merchandising*, de modo a oferecer soluções personalizadas para pontos de venda, tendo como principal missão “a criação de soluções diferenciadas e atrativas que fortaleçam a experiência de compra dos consumidores e potenciem as vendas dos clientes, bem como, retorno no investimento para todos os *stakeholders*” (WD Retail, 2020).

Alinhados com a política e valores da empresa, os produtos desenvolvidos, mediante aplicação de processos de maquinaria, resultam na geração de uma grande quantidade de

diversos resíduos poliméricos, seja em forma de placas ou em formato granulométrico, justificando a urgente necessidade de lhes atribuir um fim de vida mais sustentável, de modo que estes possam ser reaproveitados e reinseridos nos seus processos produtivos.

Face à realidade produtiva da empresa que se encontra em permanente mudança, devido às necessidades produtivas existentes no momento, foram recolhidas, separadas e analisadas granulometricamente as duas amostras de resíduos poliméricos industriais.

6.1.1 Resíduos de PETG

Os resíduos industriais de PETG, provenientes dos processos de maquinação realizados na empresa, são depositados em contentores, sem existência de qualquer separação na origem, verificando-se a necessidade de estes serem sujeitos a uma separação e análise granulométrica, por diferentes tamanhos, correspondentes aos diferentes crivos utilizados no processo de peneiração, adequadamente selecionados de acordo com o tipo de partículas em questão. Na Figura 34 apresenta-se o procedimento de separação dos resíduos de PETG realizado em laboratório, fazendo uso dos equipamentos disponíveis.

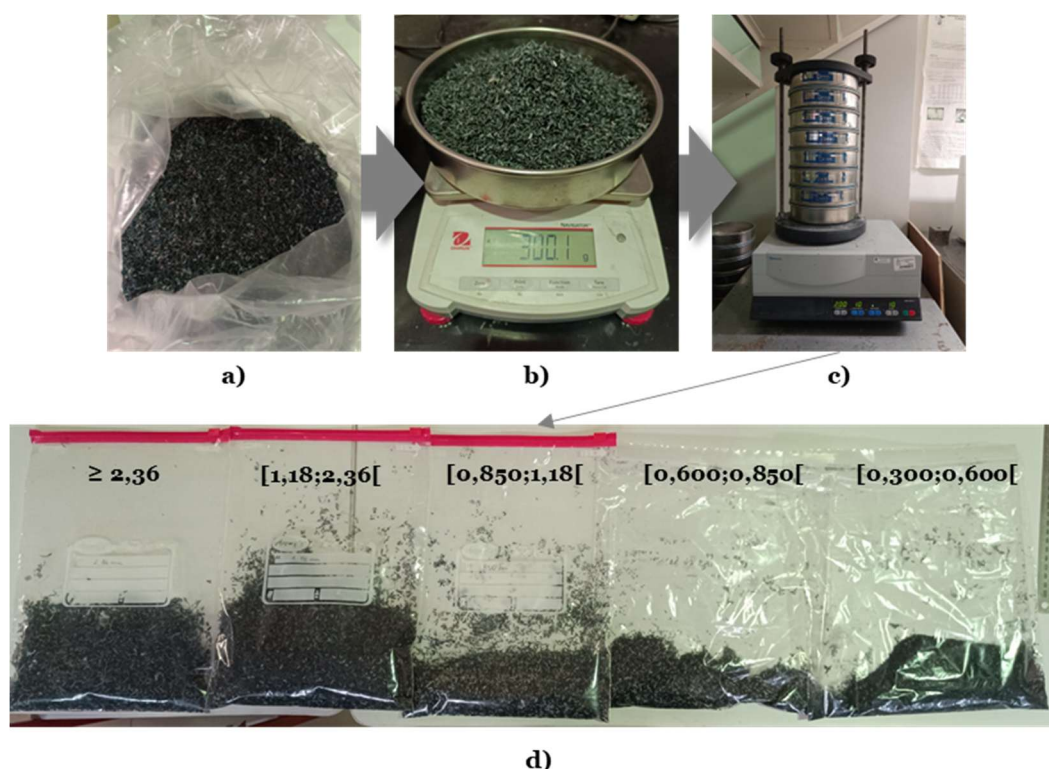


Figura 34 - Procedimento de Separação dos Resíduos de PETG: a) Aspeto dos resíduos de PETG; b) Amostra de PETG testada (300g); c) Peneiração do PETG; d) Resíduos de PETG separados por tamanhos (mm)

Considerando a capacidade do conjunto dos crivos utilizado, foram separadas amostras de 300 gramas, aproximadamente, as quais foram colocadas no crivo superior, sendo

submetidas em seguida a ciclos de peneiração de 10 minutos, de amplitude 2,00 mm/g, em intervalos de 10 segundos, de modo a aumentar a eficiência do processo, utilizando um agitador de peneiras vibratório *Retsch AS200*, (Haan, Alemanha).

Após realizada esta etapa, incluindo todos os tamanhos do conjunto de crivos, os resíduos de PETG encontravam-se separados pelos respectivos tamanhos das partículas, sendo que, apenas se verificou a deposição de material nos crivos de 2,36 mm, 1,18 mm, 0,850 mm, 0,600 mm e 0,300mm. Por conseguinte, os resíduos foram separados em sacos distintos, adequadamente identificados.

Contudo, dado que o objetivo da presente dissertação consiste na fabricação de um material de baixo custo, os resíduos de PETG retidos nos crivos de tamanhos superiores, não foram submetidos a operações de lavagem ou separação microscópica, podendo estes conter uma pequena fração de outros resíduos que permaneceram acoplados aos resíduos poliméricos de PETG e que, desta forma, dão conhecimento da realidade do ambiente industrial ao qual são sujeitos e dos processos de maquinação da empresa, confirmando a não separação dos resíduos na origem.

Não obstante, realizou-se, para o primeiro ciclo de peneiração, a pesagem das diferentes quantidades de PETG obtidas após a operação de separação das partículas, obtendo-se as quantidades que se apresentam na Tabela 11. Neste sentido, através das quantidades obtidas, foi possível determinar as percentagens relativas e acumuladas de cada amostra de tamanhos, considerando a quantidade total de PETG separado e excluindo os desperdícios que ocorreram ao longo do processo.

Tabela 11 – Quantidades de resíduos de PETG (por tamanhos) e respectivas percentagens relativas e acumuladas

Amostra de PETG			
Tamanho (mm)	Quantidade (g)	Percentagem Relativa (%)	Percentagem Acumulada (%)
[0,300; 0,600[	54,80	18,44%	18,44%
[0,600; 0,850[	41,30	13,90%	32,34%
[0,850; 1,18[	43,90	14,77%	47,11%
[1,18; 2,36[	116,50	39,20%	86,31%
≥ 2,36	40,70	13,69%	100,00%
Total	297,2	100%	
Desperdícios do processo de peneiração (g)	2,80		

Partindo das quantidades apresentadas na Tabela 11, foi possível construir um gráfico de distribuição granulométrica, no qual o eixo das abcissas representa os tamanhos de resíduos de PETG obtidos no processo de peneiração, enquanto os eixos das ordenadas correspondem às percentagens relativas (eixo mais à esquerda) e percentagens acumuladas (eixo mais à direita). Na Figura 35, apresenta-se o gráfico de distribuição granulométrica dos resíduos poliméricos industriais de PETG.

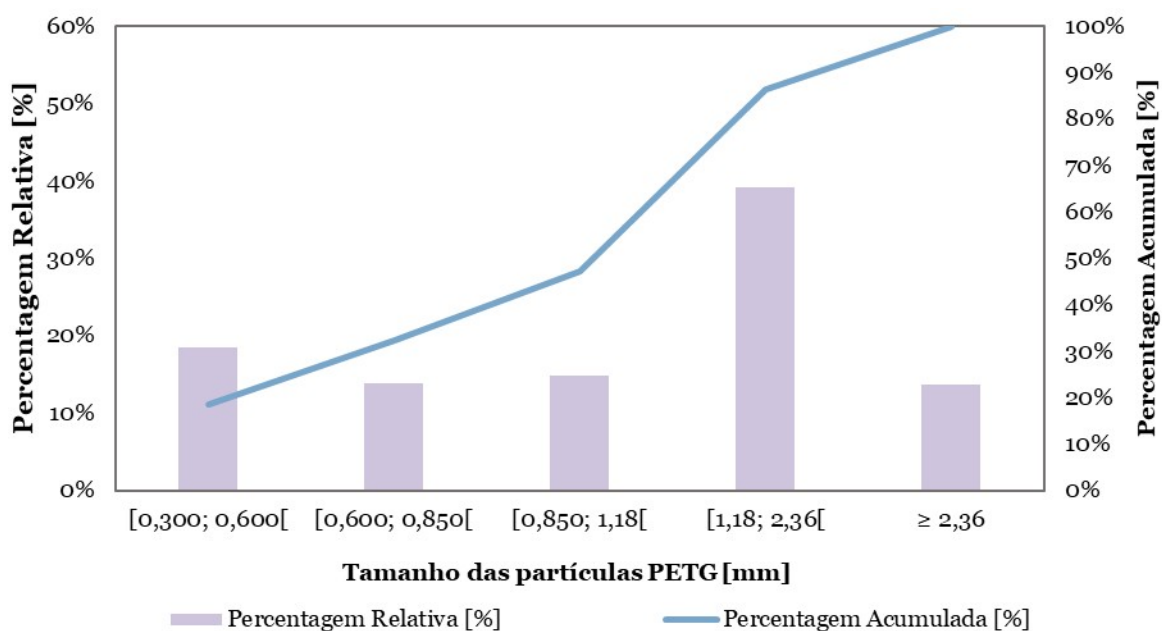


Figura 35 - Gráfico de Distribuição Granulométrica dos resíduos poliméricos industriais de PETG

Através da observação do gráfico de distribuição granulométrica dos resíduos industriais de PETG (Figura 35) e da Tabela 11, é possível perceber que os tamanhos que existiam em maior quantidade na mistura inicial eram, para as partículas de PETG de maior dimensão, [1,18; 2,36[mm e [0,300; 0,600[mm para as partículas de PETG de menor dimensão. Desta forma, estas foram as amostras selecionadas para constituição do reforço do núcleo dos painéis sanduíches.

Com o intuito de caracterizar, analisar e determinar o tamanho das partículas presentes nas duas amostras selecionadas, utilizou-se o método de microscopia eletrónica de varrimento (do inglês, *Scanning Electron Microscopy* - SEM), a partir do qual foi possível obter informações acerca da morfologia das partículas e características da superfície das mesmas (Contessi *et al.*, 2025; Malashin and Martysyuk, 2025).

De modo a compreender e realizar o método SEM apresentado, recorreu-se a um equipamento da marca *Hitachi*, cujo modelo corresponde ao S-3400N, o qual se encontrava equipado e conectado a um software de aquisição e análise de dados *Quantax ESPIRIT*.

Além disso, antes de as amostras serem submetidas ao método em questão e considerando as partículas a submeter à análise, estas foram inicialmente revestidas a ouro. Desta forma, na Figura 36, apresentam-se as imagens SEM das partículas das amostras de PETG, de tamanhos compreendidos entre [1,18; 2,36[mm (a) e [0,300; 0,600[mm (b), considerando a dispersão e a dimensão das partículas.

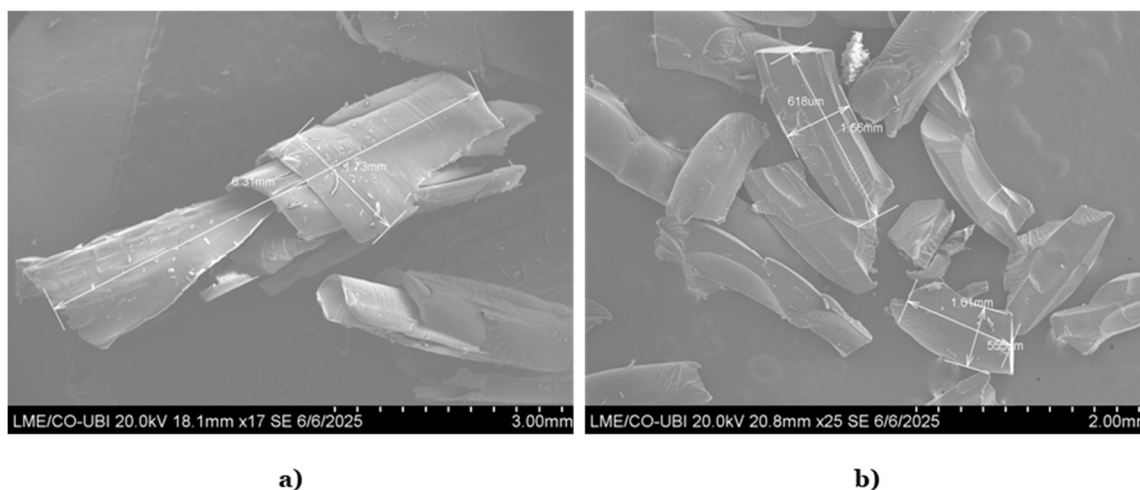


Figura 36 - Imagens SEM das partículas de PETG: a) Dimensão das partículas da amostra de [1,18; 2,36[mm; b) Dimensão das partículas da amostra de [0,300; 0,600[mm

6.1.2 Resíduos Mistos de PETG/PVC/PMMA

Tal como mencionado anteriormente, a realidade de laboração da empresa não permite, por vezes, a separação dos resíduos poliméricos industriais após os processos de maquinação, dando origem a inúmeras misturas de polímeros num único contentor, como é o caso da mistura de PETG/PVC/PMMA que a empresa forneceu para a realização da presente dissertação.

Desta forma, considerando o procedimento de separação realizado nos resíduos de PETG, o mesmo foi aplicado aos resíduos mistos de PETG/PVC/PMMA, sendo estes sujeitos a uma separação e análise granulométrica, por diferentes tamanhos, correspondentes aos diferentes crivos utilizados no processo de peneiração.

Não obstante, tratando-se de materiais diferentes, que se encontravam misturados, o comportamento dos mesmos aquando submetidos ao processo de separação, demonstrou algumas diferenças, nomeadamente uma significativa dificuldade na sua separação, evidenciando, de certa forma, uma forte adesão entre as partículas.

Na realidade, o fenómeno descrito anteriormente demonstra ser frequente em misturas granulométricas de polímeros, registando-se mais especificamente durante a reciclagem

mecânica de resíduos poliméricos industriais, onde os mesmos, na maioria das vezes, necessitam ser submetidos a processos de separação electrostática, sendo esta fortemente influenciada pelo tamanho e pela distribuição heterogénea das partículas resultante da sua trituração ou dos processos de maquinação que lhes deram origem (Daioui *et al.*, 2025; Dani *et al.*, 2025; Eddine *et al.*, 2025).

Por conseguinte, o fenómeno de atração entre as partículas poliméricas denomina-se de efeito triboelétrico, podendo ser encontrado em diversas situações como um fenómeno físico natural, caracterizado pela acumulação de cargas estáticas geradas aquando da fricção de contacto entre dois materiais de propriedades distintas (Tomar, 2024; J. Zhao *et al.*, 2025).

O efeito triboelétrico, no âmbito da eletrificação por contacto, ocorre maioritariamente na interface de contacto sólido-sólido, dependendo não só das propriedades elétricas dos materiais em questão, mas também da rugosidade das superfícies de contacto e das condições ambientais a que estes são expostos: temperatura e humidade relativa (Dani *et al.*, 2025; J. Zhao *et al.*, 2025).

De facto, a humidade relativa do ambiente e da mistura polimérica apresenta-se como um fator preponderante no desempenho da separação triboelétrica dos resíduos poliméricos, uma vez que o teor de humidade presente, pode melhorar significativamente o desempenho da separação dos polímeros (Hausmann *et al.*, 2023; Daioui *et al.*, 2025).

Na verdade, ensaios realizados por Daioui *et al.* (2025), demonstram que, para misturas em que os plásticos se encontram em formato granulométrico superior, a alteração da humidade presente na mistura melhorou consideravelmente o desempenho de separação. Não obstante, o mesmo não ocorreu perante reduções bruscas de humidade (teor inferior a 52%), verificando-se a existência de efeitos adversos, como por exemplo, a aderência das partículas em vez da sua separação (Daioui *et al.*, 2025).

No entanto, para partículas de menores dimensões, de formato granulométrico reduzido (semelhante a pó), verificou-se que a presença de uma atmosfera húmida tende a modificar as características da carga e, por conseguinte, permitem a difusão das cargas elétricas móveis entre as superfícies, impedindo a formação de cargas entre as partículas (Dani *et al.*, 2025). Adicionalmente, existem determinados casos em que a humidade ou gotas de água são introduzidos intencionalmente, de modo a originar a formação de grânulos e posterior manuseamento (Hausmann *et al.*, 2023).

Neste sentido, e compreendendo que a separação triboeletrostática é fortemente influenciada pela humidade, formato e tipologia das partículas poliméricas, o ideal será fornecer aos resíduos poliméricos condições de armazenamento adequadas, após processamento, no qual se considera e se mantém uma faixa de humidade ideal que satisfaça tanto resíduos poliméricos de formato granulométrico superior como inferior, proporcionando um equilíbrio entre a eficiência da carga, a estabilidade operacional e separação triboelétrica (Daioui *et al.*, 2025; Dani *et al.*, 2025).

Com efeito, antes de serem submetidos ao processo de peneiração, os resíduos de PETG/PVC/PMMA, foram submetidos a um processo de humidificação e, posteriormente, secos parcialmente numa estufa a 40°C, garantido a presença de uma humidade ideal na mistura, de modo que a sua separação fosse realizada de forma adequada. Na Figura 37, apresenta-se o processo de humidificação da mistura.

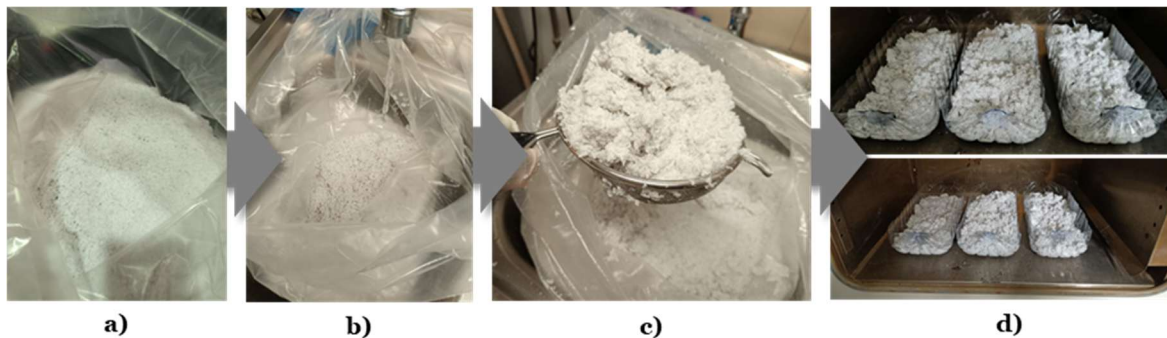


Figura 37 - Processo de Humidificação dos Resíduos mistos de PETG/PVC/PMMA: a) Aspeto inicial dos resíduos; b) Humidificação dos resíduos com água; c) Separação dos Resíduos da água; d) Secagem dos resíduos (estufa 40°C)

O processo de humidificação da mistura PETG/PVC/PMMA, teve como principal objetivo garantir que todos os resíduos poliméricos eram molhados e passados por água, de modo a aumentar a humidade da mistura, sendo que depois de serem totalmente submersos em água, verificou-se a necessidade, numa fase posterior, de remover a água presente na mistura, de modo que esta pudesse secar parcialmente.

Com o intuito de facilitar a secagem dos resíduos e conseguir controlar de melhor forma a humidade presente na mistura, estes foram separados em seis recipientes com cerca de 250-350g, sendo colocados numa estufa a 40°C durante 48 horas.

Após conclusão do processo de humidificação e secagem parcial dos resíduos, os mesmos foram deixados durante 24 horas à temperatura ambiente, estando prontos, numa fase posterior, para serem submetidos ao processo de peneiração, tal como descrito na secção

6.1.1. Na Figura 38, apresenta-se o processo de peneiração dos resíduos mistos de PETG/PVC/PMMA.

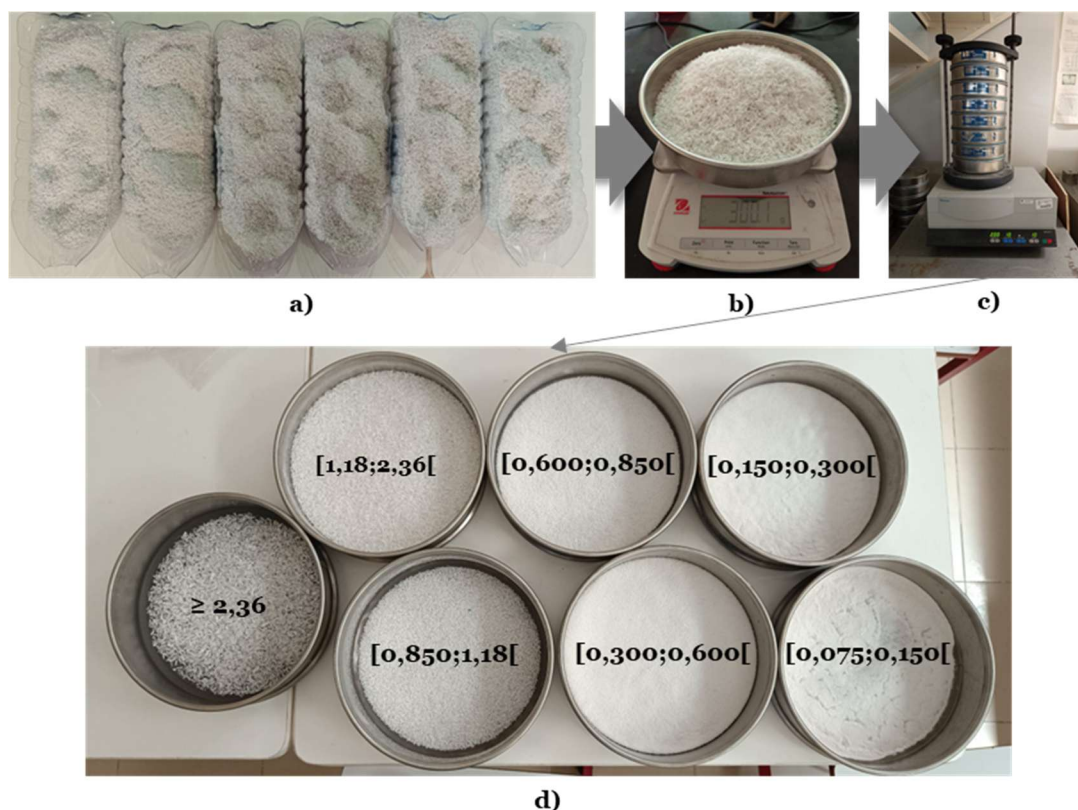


Figura 38 - Procedimento de Separação dos Resíduos mistos de PETG/PVC/PMMA: a) Aspetto da mistura parcialmente seca; b) Amostra de PETG/PVC/PMMA testada (300g); c) Peneiração do PETG/PVC/PMMA; d) Resíduos de PETG/PVC/PMMA separados por tamanhos (mm)

Considerando a capacidade do conjunto dos crivos utilizado, foram separadas, igualmente, amostras de 300 gramas, aproximadamente, tendo sido verificada a deposição de material nos crivos de 2,36 mm, 1,18 mm, 0,850 mm, 0,600 mm, 0,300 mm, 0,150 mm e 0,075 mm. Posteriormente, os resíduos foram separados em sacos distintos, adequadamente identificados, repetindo-se o processo de peneiração, de modo que toda a mistura fosse adequadamente separada.

Analogamente aos resíduos de PETG, realizou-se, para o primeiro ciclo de peneiração, a pesagem das diferentes quantidades da mistura de PETG/PVC/PMMA obtidas após a operação de separação das partículas, obtendo-se as quantidades que se apresentam na Tabela 12, com as respectivas percentagens relativas e acumuladas de cada amostra de tamanhos, considerando a quantidade total da mistura separada.

Tabela 12 - Quantidades de resíduos de PETG/PVC/PMMA (por tamanhos) e respectivas percentagens relativas e acumuladas

Amostra de PETG/PVC/PMMA			
Tamanho (mm)	Quantidade (g)	Percentagem Relativa (%)	Percentagem Acumulada (%)
[0,075; 0,150[	9,50	3,18%	3,18%
[0,150; 0,300[	41,10	13,78%	16,96%
[0,300; 0,600[	41,80	14,01%	30,98%
[0,600; 0,850[	19,60	6,57%	37,55%
[0,850; 1,18[	10,30	3,45%	41,00%
[1,18; 2,36[	164,30	55,08%	96,08%
≥ 2,36	11,70	3,92%	100,00%
Total	298,30	100,00%	
Desperdícios do processo de peneiração (g)	1,70		

Utilizando, como referência, as quantidades apresentadas na Tabela 12, foi possível construir um gráfico de distribuição granulométrica (Figura 39), no qual o eixo das abcissas representa os tamanhos de resíduos de PETG/PVC/PMMA obtidos no processo de peneiração, enquanto os eixos das ordenadas correspondem às percentagens relativas (eixo mais à esquerda) e percentagens acumuladas (eixo mais à direita).

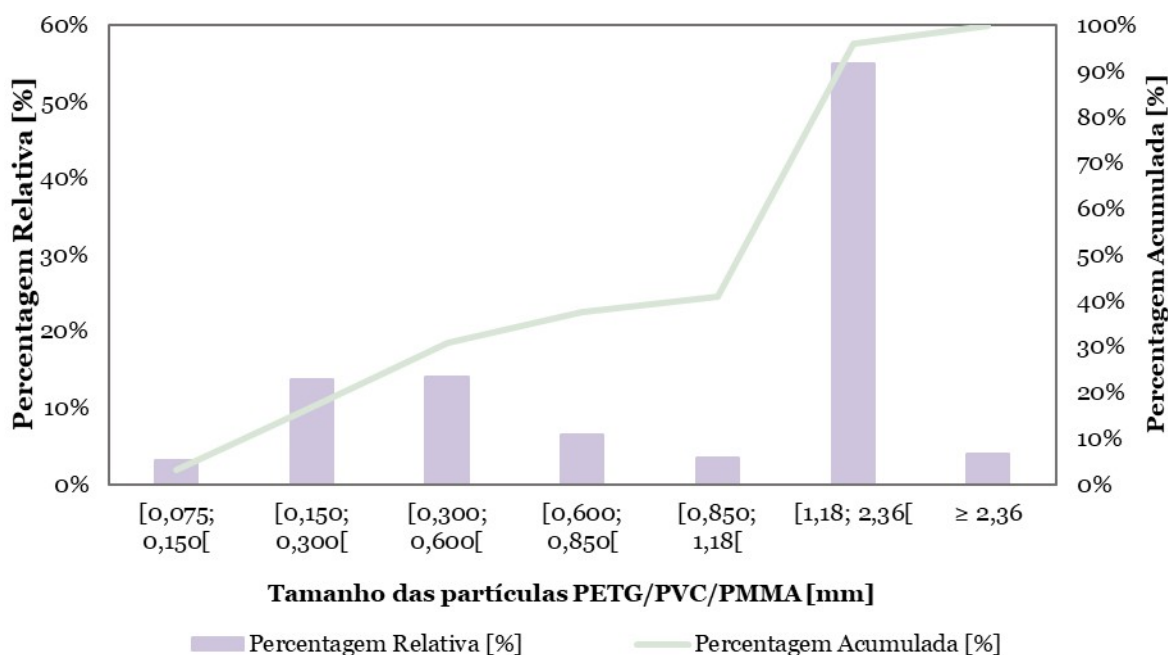


Figura 39 - Gráfico de Distribuição Granulométrica dos resíduos poliméricos industriais de PETG/PVC/PMMA

Mediante observação da Figura 39 e da Tabela 12, é perceptível que os tamanhos que apresentavam maior representatividade na amostra inicial, eram as partículas de PETG/PVC/PMMA de tamanhos compreendidos entre [1,18; 2,36[mm e [0,300; 0,600[mm, tendo sido, portanto, estas as amostras selecionadas para constituição do núcleo dos painéis sanduíches, tal como realizado para as partículas de PETG, anteriormente apresentadas.

Após a separação e a seleção das partículas da mistura de PETG/PVC/PMMA, estas foram submetidas, igualmente, ao método SEM, com o intuito de caracterizar e determinar os tamanhos presentes em cada amostra. Na Figura 40, apresentam-se as imagens SEM obtidas, considerando a dispersão e o tamanho das partículas de PETG/PVC/PMMA.

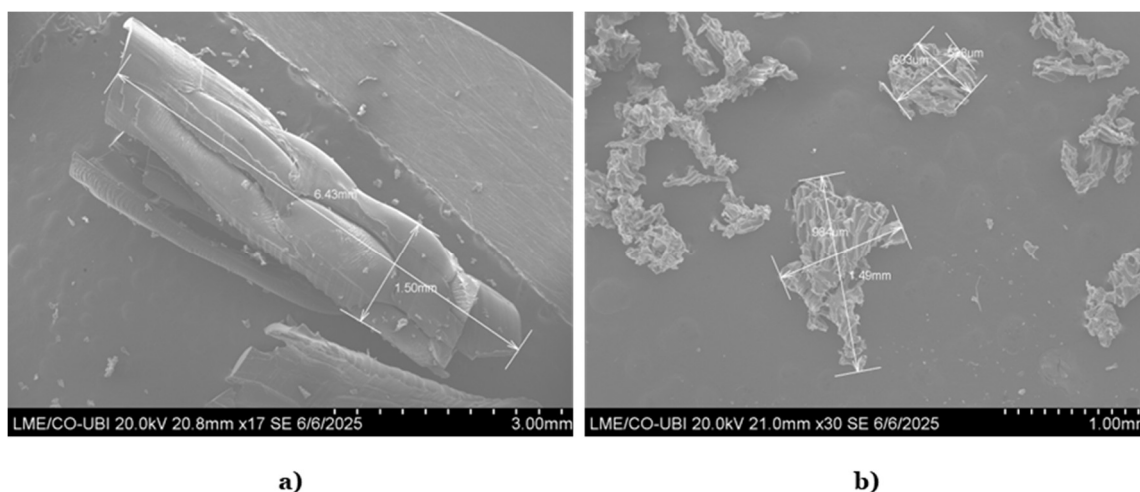


Figura 40 - Imagens SEM das partículas de PETG/PVC/PMMA: a) Dimensão das partículas da amostra de [1,18; 2,36[mm; b) Dimensão das partículas da amostra de [0,300; 0,600[mm

6.2 Matrizes de Controlo: Poliéster e Epóxi Verde

As matrizes utilizadas no fabrico do painel sanduíche foram uma matriz poliéster e uma matriz epóxi verde cujo intuito será permitir que o material desempenhe as funções requeridas, enquanto incorpora resíduos poliméricos industriais na sua composição, acompanhado pelo baixo custo da resina poliéster e contributo para a Economia Circular.

Deste modo, com o intuito de perceber o comportamento das resinas utilizadas, foram fabricadas manualmente, duas amostras de matrizes de controlo: uma de resina *SR GreenPoxy 56* com aplicação de endurecedor *SD Surf Clear*, fornecida pela *Sicomín Epoxy Systems* e outra de Resina de Poliéster com o respetivo catalisador a 1,5-2%, fornecida pela *Grouht – Soluções Químicas, Lda*. Com efeito e, uma vez que as resinas epoxídicas apresentam diferentes propriedades quando comparadas com as resinas de poliéster, a Tabela 13 apresenta as propriedades das resinas utilizadas, de acordo com as fichas técnicas

disponibilizadas pelos respectivos fornecedores (Sicomín - Epoxy Systems, 2016; Grouht - Soluções Químicas, Lda., 2019).

Tabela 13 - Propriedades das Matrizes de Resina de Poliéster *Grouht* e *SR GreenEpoxy*, segundo as fichas técnicas dos produtos (Sicomín - Epoxy Systems, 2016; Grouht - Soluções Químicas, Lda., 2019)

		Poliéster		Epóxi Verde		
		Resina Poliéster <i>Grouht</i>	Matriz Curada	<i>SR GreenPoxy 56</i>	<i>SD Surf Clear</i>	Matriz Curada [24h a 23°C + 24h a 40°C]
Aspeto/Cor	Líquido de cor azulada	Aspeto Fosco e Rosado	Líquido Incolor	Líquido Incolor	Translúcida e incolor	
Densidade [g/cm ³]	1,10 – 1,20	---	1,198	0,958	---	
Viscosidade a 25°C [cps]	300 – 550	---	800 [mPa.s±20%]	40 [mPa.s±20%]	---	
Dosagem em peso [g]	100/1,8 ¹²	---	100	38	---	
Tração	Módulo [GPa]	---	---	---	3,3	
	Resistência máxima [MPa]	---	70 – 80	---	49	
	Alongamento na rutura [%]	---	2 – 3	---	1,6	
Flexão	Módulo [MPa]	---	---	---	3,4	
	Resistência máxima [MPa]	---	110 – 130	---	114	
	Alongamento na rutura [%]	---	3 – 4	---	5,5	
Resistência ao Impacto [Kj/m ²]	---	5 – 15	---	---	---	
Temperatura de Transição Vítreá [°C]	---	65 – 75	---	---	65	

¹² Rácio em peso da mistura Resina/Endurecedor: para 100 g de resina – 1,8 g de endurecedor.

A importância do fabrico das matrizes de controlo reside no facto de ser necessário existir um valor de referência, a partir do qual se poderá comparar os resultados obtidos após a incrementação das partículas de reforço, com o intuito de ser possível perceber de que forma a sua adição influencia, quer positivamente ou negativamente, as propriedades das matrizes em separado. Além disso, para o mesmo material, podem existir variabilidades nos dados recolhidos, uma vez que, dependendo dos processos de fabrico utilizados e da quantidade de vezes que os processos são repetidos, é possível verificar-se a existência de heterogeneidades num mesmo material, resultando em ligeiras diferenças nos valores obtidos para determinadas propriedades (Callister and Rethwisch, 2018).

Partindo disto, o fabrico das matrizes de controlo deve ser realizado num espaço limpo e organizado, assegurando que o material não é contaminado com outro tipo de resíduos ou partículas existentes, sendo fundamental que todas as etapas sejam efetuadas em conformidade com os requisitos do fornecedor. Na Figura 41 apresenta-se as diferentes etapas do fabrico das matrizes de controlo, sendo estas iguais para ambas as resinas, onde a única diferença consiste no rácio de resina/endurecedor que é utilizada para cada amostra.



Figura 41 - Etapas do Fabrico das Matrizes de Controlo (Autoria Própria)

O processo de fabrico das matrizes de controlo, iniciou-se com o fabrico do molde que, neste caso prático em específico, foi produzido utilizando dois vidros (um para a parte superior do molde e outro para a parte inferior), devidamente limpos e revestidos com um plástico técnico, de modo a assegurar a sua reutilização, não contaminação e facilitar o processo de remoção da matriz do molde. Em adição, colocaram-se duas folhas de acetato nas faces internas dos vidros, com o intuito de dar um melhor acabamento ao material, sem que existam rugosidades que possam afetar as propriedades do mesmo.

Adicionalmente, numa das faces do molde que contém a folha de acetato, colocou-se uma moldura de cartão que continha exatamente a espessura que se pretendia que as amostras possuíssem, sendo que, neste caso prático, a pedido da empresa que forneceu os resíduos, foram fabricadas amostras com aproximadamente 3 mm de espessura.

Após o molde se encontrar concluído, seguiu-se a parte fundamental do processo: a preparação da matriz. Esta fase, sendo crucial para que a matriz de controlo cure adequadamente e demonstre um aspeto uniforme, deve ser realizada com precisão e cuidado. Ou seja, inicialmente, num recipiente, colocou-se a quantidade de resina pretendida juntamente com a respetiva quantidade de endurecedor, conforme as especificações do fabricante. Posteriormente, estas duas partes (resina + endurecedor) foram uniformizadas e misturadas manualmente, a uma velocidade constante e moderada, para evitar a adição de bolhas de ar.

Quando a mistura já se encontrava uniformizada, foi submetida a um ciclo de desgaseificação, com recurso a uma panela de vácuo, de forma a retirar as bolhas de ar que foram introduzidas na mistura aquando da agitação manual. O tempo que cada mistura é submetida a este processo é arbitrária e empírica, dependendo da observação do utilizador, uma vez que, dependendo do material a utilizar, poderá existir a adição de bolhas de ar em maior quantidade, como se verificou, por exemplo, na matriz de poliéster, em comparação com a matriz de epóxi verde. Contudo, de modo a existir coerência entre os processos de fabrico, ambas as misturas foram submetidas a um ciclo de desgaseificação durante 4 minutos, sob uma pressão negativa de $0,9 \pm 0,1$ bar.

Concluídas as etapas anteriores, verteu-se a mistura, cuidadosamente e de forma contínua no molde produzido inicialmente, garantindo que a espessura não era excedida. Em seguida, fechou-se o molde com o vidro superior, colocando-se na vertical, de modo que as bolhas de ar que, pudessem ainda existir, se acumulassem apenas numa extremidade que pudesse ser facilmente retirada no processo de corte. Posteriormente, as matrizes foram

curadas durante 24 horas à temperatura ambiente ($T= 19 \pm 2^{\circ}\text{C}$) e, em seguida, submetidas a um processo de pós cura, igualmente durante 24 horas, numa estufa a 40°C .

6.2.1 Provetes das Matrizes de Controlo

Após as matrizes completarem o processo de fabrico, estas seguiram o procedimento de remoção do molde, incluindo a moldura de cartão que só se retirou aquando do corte dos provetes. Na Figura 42 apresenta-se o aspeto das matrizes de controlo, epóxi verde e poliéster, após a sua cura.

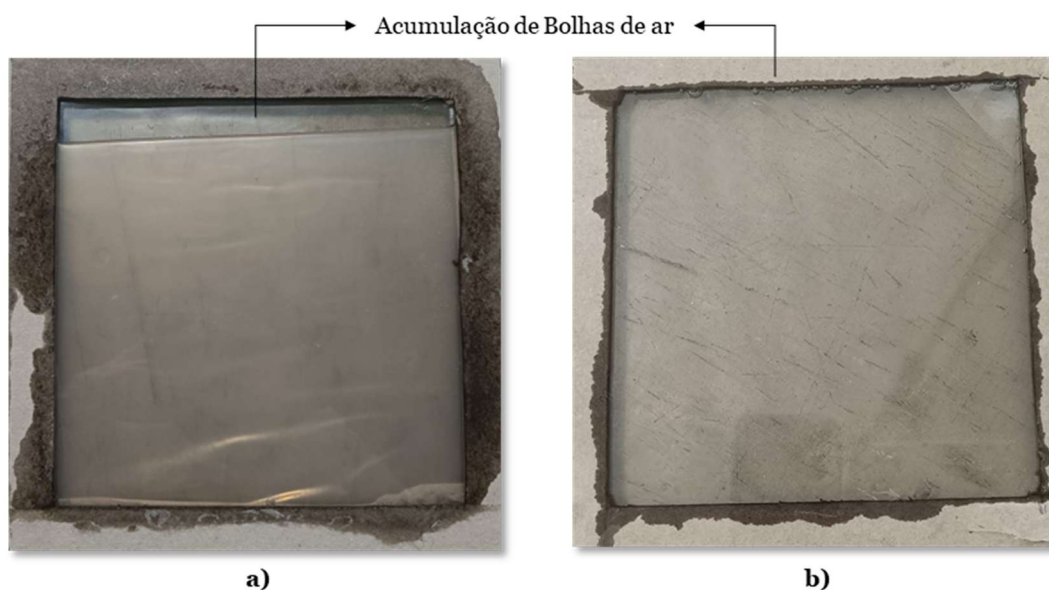


Figura 42 - Matrizes de Controlo: a) Poliéster; b) Epóxi Verde

Os provetes das matrizes de controlo, foram obtidos, mediante utilização de um equipamento de corte adequado *Struers Accutom 2*, a 900 rpm, fazendo uso de um disco de corte diamantado, refrigerado com água, evitando assim o aquecimento do material submetido ao processo de corte.

Além disto, considerando que os provetes serão posteriormente submetidos a ensaios de flexão em três pontos, a sua dimensão foi determinada de acordo com os requisitos especificados na Norma BS EN ISO 178:2019 (BSI, 2019). Posto isto, as dimensões definidas para os provetes, considerando as diferentes matrizes de controlo, são:

- Matriz Epóxi Verde: largura de $10,06 \pm 0,15$ mm e espessura de $3,07 \pm 0,05$ mm;
- Matriz de Poliéster: largura de $10,03 \pm 0,17$ mm e espessura de $2,76 \pm 0,07$ mm.

Na Figura 43, apresenta-se o processo de corte dos provetes, desde que a matriz é retirada do molde, até que se obtêm os provetes.

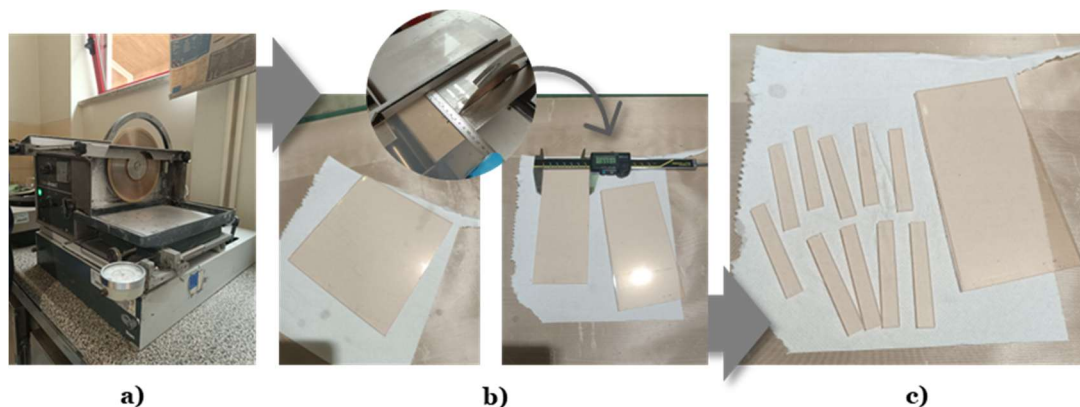


Figura 43 - Processo de Corte dos Provetes: a) Equipamento *Struers Accutom 2*; b) Corte da matriz; c) Corte dos Provetes

6.3 Núcleo do Painel Sanduíche

Considerando a importância dos núcleos dos painéis sanduíche, foi inicialmente estabelecido que estes seriam compostos por uma matriz de poliéster e epóxi verde, respetivamente, reforçada com partículas de resíduos poliméricos industriais – PETG ou mistura de PETG/PVC/PMMA.

Neste sentido, de modo a determinar qual a melhor combinação de propriedades para a constituição dos núcleos dos painéis sanduíche, produziram-se, inicialmente, doze materiais compósitos para a matriz de poliéster, sendo utilizado como reforço 20 wt. %, 30 wt. % e 40 wt. % de partículas de PETG de dois tamanhos distintos ([1,18; 2,36[mm e [0,300; 0,600[mm) e 20 wt. %, 30 wt. % e 40 wt. % de partículas de PETG/PVC/PMMA com os mesmos tamanhos¹³.

Tendo em consideração as propriedades obtidas para os materiais compósitos de matriz poliéster, optou-se por produzir, posteriormente, três materiais adicionais constituídos por 50 wt. % de partículas de PETG/PVC/PMMA de tamanho [1,18; 2,36[mm, bem como por 50 wt. % e 60 wt. % de tamanho [0,300; 0,600[mm).

Em contrapartida, a escolha dos tamanhos e da percentagem de partículas em peso utilizadas para a fabricação dos compósitos de matriz epóxi verde, foram determinadas considerando as propriedades obtidas nos compósitos de matriz poliéster, tendo sido, portanto, fabricados nove materiais compósitos constituídos por 20 wt. % e 30 wt. % de partículas de PETG de dois tamanhos distintos ([1,18; 2,36[mm e [0,300; 0,600[mm), por

¹³ A escolha dos tamanhos das partículas, foi determinada tendo em consideração as partículas existentes em maior quantidade nas amostras iniciais.

20 wt. % e 40 wt. % de partículas de PETG/PVC/PMMA de tamanho [1,18;2,36[mm e, finalmente, 30 wt. %, 40wt. % e 50 wt. % de partículas de PETG/PVC/PMMA de tamanho [0,300; 0,600[mm.

De forma a garantir a coerência entre os materiais fabricados e as respetivas comparações de propriedades, a fabricação dos materiais compósitos, seja de matriz poliéster ou matriz epóxi verde, realizou-se utilizando sempre a mesma metodologia. Deste modo, na Figura 44, apresenta-se o método de fabrico utilizado, bem como as respetivas etapas de preparação dos materiais.

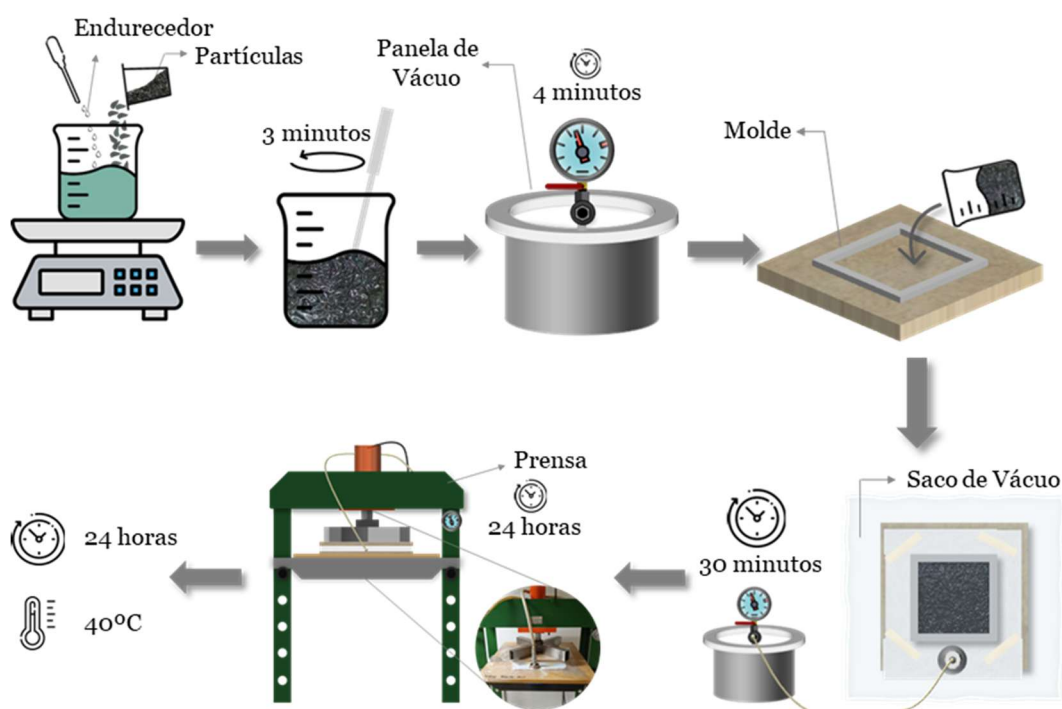


Figura 44 - Processo de fabrico dos materiais compósitos (Autoria Própria)

Partindo da metodologia utilizada na fabricação das matrizes de controlo, os materiais compósitos elegíveis para a constituição dos núcleos dos painéis sanduíche, foram produzidos utilizando um processo de moldagem manual, utilizando como molde uma moldura de cartão quadrada, de dimensões $3 \times 200 \times 200$ mm.

Neste sentido, a produção dos materiais compósitos, iniciou-se com as pesagens das quantidades de resina, de endurecedor e de partículas determinadas inicialmente, sendo estas posteriormente misturadas manualmente, até que todas as partículas se encontrassem embebidas pela matriz.

Posteriormente, a mistura obtida na etapa anterior foi submetida a um ciclo de degaseificação numa panela de vácuo, durante 4 minutos, sob pressão negativa de $0,9 \pm 0,1$ bar. Em seguida, após vertida a mistura para o molde, todo o conjunto foi colocado dentro de um saco de vácuo, devidamente selado, e submetido novamente a um ciclo de degaseificação, por um período de 30 minutos, durante o qual foram retirados manualmente, com o auxílio de um cartão, os espaços vazios de maiores dimensões presentes na mistura garantindo-se, em simultâneo, a uniformização do material.

Passado o tempo estabelecido para este processo, o molde, em vácuo, seguiu o processo de cura à temperatura ambiente, por um período de 24 horas, numa prensa hidráulica à pressão de 2500 kN/m^2 . Posteriormente, o processo de pós-cura do material foi realizado numa estufa, igualmente durante 24 horas, a uma temperatura de 40°C .

Concluído o processo de fabrico dos materiais compósitos, estes encontravam-se totalmente curados, sendo possível observar a dispersão das partículas poliméricas que constituíam o reforço da matriz. Na Figura 45 apresentam-se, quatro dos materiais compósitos obtidos para a matriz poliéster, considerando as partículas utilizadas, bem como os respetivos tamanhos.

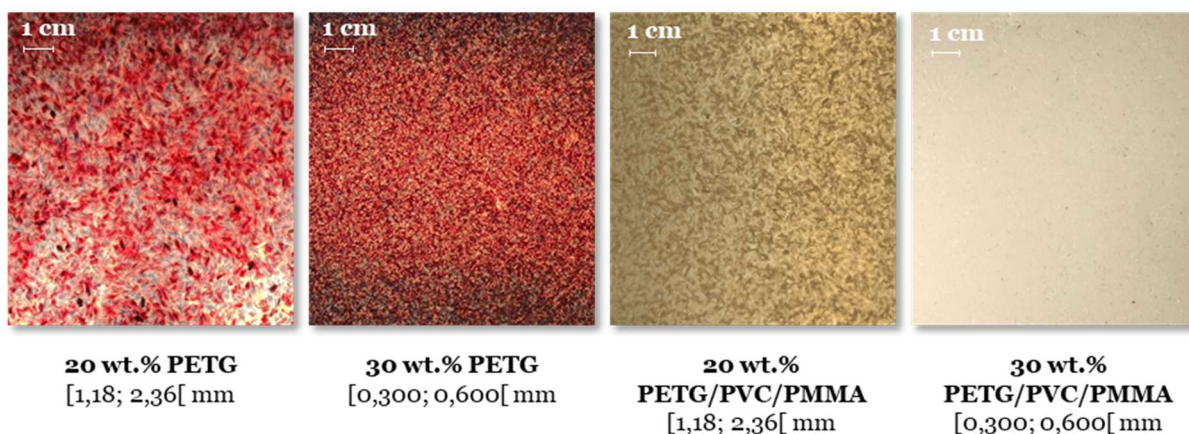


Figura 45 – Exemplo de materiais compósitos de matriz poliéster, reforçados com partículas de PETG e de PETG/PVC/PMMA

Mediante observação da Figura 45, os materiais compósitos apresentaram aspetos distintos, dependendo das partículas de reforço utilizadas, considerando, portanto, as diferenças substanciais dos diferentes polímeros utilizados. Na realidade, as diferenças visuais foram, analogamente notórias nos materiais de matriz epóxi verde produzidos. Na Figura 46 apresentam-se, quatro dos materiais compósitos obtidos para a matriz epóxi verde, considerando as partículas utilizadas, bem como os respetivos tamanhos.

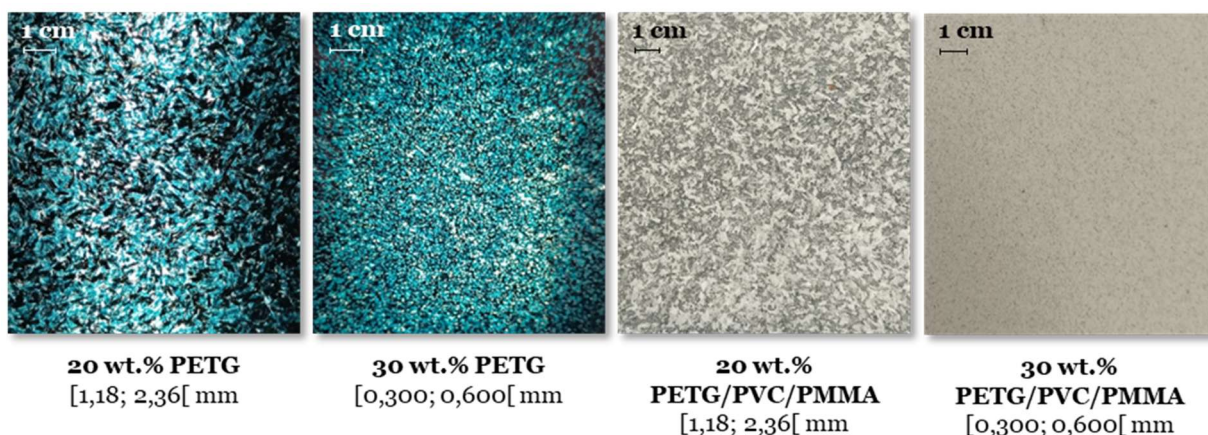


Figura 46 - Exemplo de materiais compósitos de matriz epóxi verde, reforçados com partículas de PETG e de PETG/PVC/PMMA

6.3.1 Procedimento Experimental: Ensaios Mecânicos

O conhecimento das propriedades mecânicas dos materiais produzidos, torna-se relevante na medida em que, partindo da caracterização mecânica dos materiais é possível prever as suas possíveis aplicações. Ou seja, compreender de que forma os materiais se deformam elástica e plasticamente, possibilita a alteração e controlo de outras propriedades a si associadas, como o módulo de elasticidade e a resistência (Callister and Rethwisch, 2018).

Desta forma, os núcleos elegíveis para a constituição do painel sanduíche, foram submetidos ao ensaio mecânico de flexão em três pontos, à temperatura ambiente, num momento pós-produção, com o intuito de caracterizar mecanicamente os materiais compósitos obtidos, quanto à tensão de flexão, rigidez e deformação.

Os ensaios de flexão em três pontos foram conduzidos de acordo com os requisitos especificados na Norma BS EN ISO 178:2019, que prevê e especifica os métodos que devem ser utilizados para a definição das propriedades de flexão de materiais rígidos e semirrígidos, nomeadamente materiais termoendurecidos, incluindo compósitos reforçados (BSI, 2019).

Por conseguinte, os ensaios foram realizados com recurso a uma máquina de ensaios universal, modelo AGS-X, da marca *Shimadzu*, de célula de carga de 10 kN, composta por dois suportes paralelos, cuja extremidade apresenta um raio de $5,0 \pm 0,2$ mm (R2), dado a espessura dos provetes, bem como uma borda de carga central, de igual raio (R1), disposta, conforme a Figura 47 (BSI, 2019).

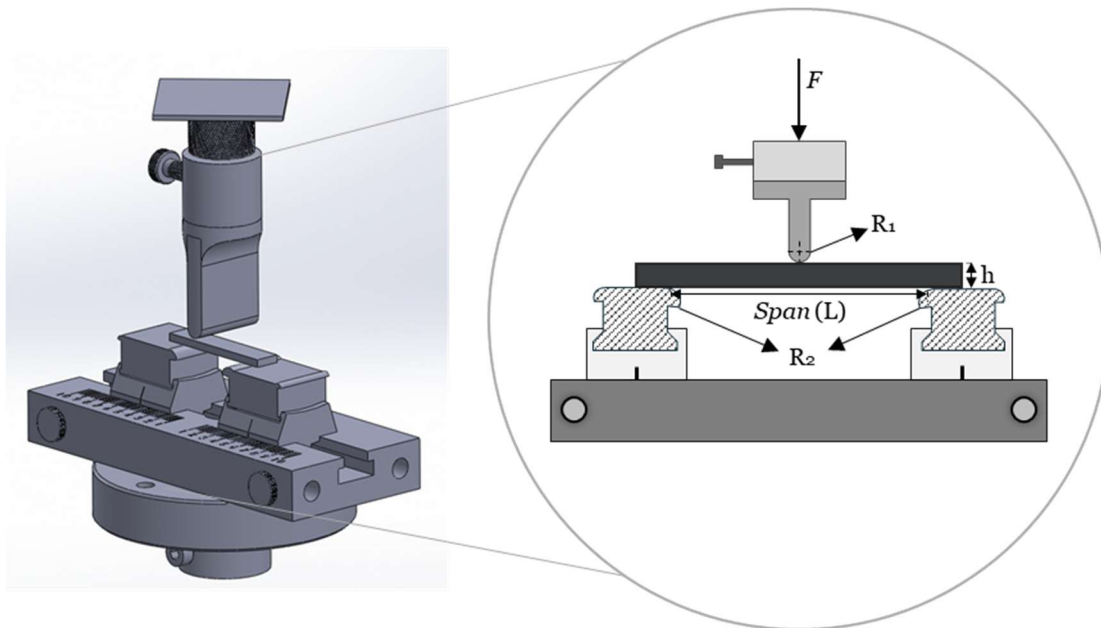


Figura 47 - Ilustração do Equipamento Utilizado no Ensaio de Flexão em três pontos dos materiais compósitos para a constituição do núcleo (Autoria própria baseado na Norma BS EN ISO 178:2019)

Considerando as especificidades características do ensaio de flexão em três pontos, testaram-se cinco provetes de cada compósito fabricado, a uma velocidade de teste de 2mm/min, a partir do qual, se determinaram as propriedades pretendidas e se obtiveram os gráficos tensão/deformação, mediante utilização de um sistema de aquisição de dados, *Trapezium X*, versão 1.4.0. Na Figura 48 apresenta-se a curva típica de tensão de flexão, σ_f , em função da deformação, ϵ_f (BSI, 2019).

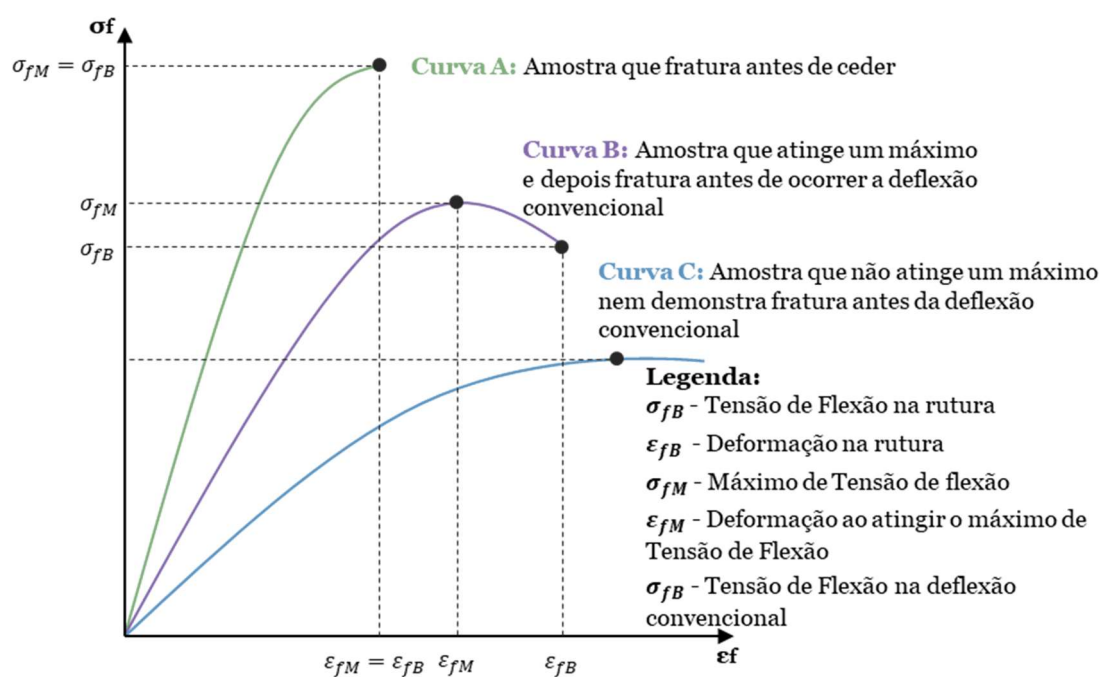


Figura 48 - Curva Típica de tensão de flexão, σ_f , em função da deformação, ϵ_f (Adaptado de BSI, 2019)

Atendendo às grandezas que se pretendem obter, a tensão de flexão determinou-se em função da tensão nominal aplicada na secção central entre os apoios, pela equação 6 (BSI, 2019):

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \quad [6]$$

onde F representa a força aplicada, L o *span*, b a largura e h a espessura do provete. Por outro lado, a deformação de flexão foi determinada em função da deflexão ocorrida durante o ensaio, S , mediante aplicação da equação 7 (BSI, 2019):

$$\varepsilon_f = \frac{6 \cdot S \cdot h}{L^2} \quad [7]$$

Em contrapartida, o módulo de rigidez foi obtido através da deflexão de dois pontos, num intervalo na região linear do gráfico tensão/deformação, calculada pela equação 8, deduzida da seguinte forma:

$$\begin{aligned} E &= \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}} = \frac{\frac{3 \cdot F_2 \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} - \frac{3 \cdot F_1 \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2}}{\frac{6 \cdot S_2 \cdot h}{L^2} - \frac{6 \cdot S_1 \cdot h}{L^2}} = \\ &= \frac{\frac{3 \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} (F_2 - F_1)}{\frac{6 \cdot h}{L^2} (S_2 - S_1)} = \frac{\frac{3 \cdot \Delta F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2}}{\frac{6 \cdot \Delta S \cdot h}{L^2}} = \frac{3 \cdot \Delta F \cdot L^3}{12 \cdot \Delta S \cdot bh^3} = \\ &= \frac{3 \cdot \Delta F \cdot L^3}{12 \cdot \Delta S \cdot 12 \cdot I^{14}} = \frac{\Delta F \cdot L^3}{4 \cdot 12 \cdot \Delta S \cdot I} = \\ &= \frac{\Delta F \cdot L^3}{48 \cdot \Delta S \cdot I} \quad [8] \end{aligned}$$

Na equação 8, importa realçar que, o módulo de rigidez é calculado fazendo uso do momento de inércia dos provetes, I , bem como da variação da carga aplicada na secção transversal entre os dois apoios, ΔF , e a variação da deflexão ocorrida durante a aplicação da força, ΔS (BSI, 2019).

¹⁴ O momento de inércia de uma secção transversal retangular é dado por $I = \frac{b \cdot h^3}{12}$. Então, $12 \cdot I = b \cdot h^3$ (Beer *et al.*, 2015).

6.3.2 Procedimento Experimental: Provetes

Os provetes dos materiais compósitos destinados à realização dos ensaios de flexão em três pontos, foram obtidos mediante utilização do equipamento de corte *Struers Accutom 2*, a 900 rpm, fazendo uso de um disco de corte diamantado, refrigerado com água, tal como aplicado aos provetes das matrizes de controlo.

Por conseguinte, em primeiro lugar, cinco provetes de cada um dos materiais compósitos, foram submetidos a ensaios estáticos de flexão em três pontos, tendo sido a sua dimensão determinada segundo a Norma BS EN ISO 178:2019. Deste modo, na Tabela 14 apresentam-se as dimensões dos provetes dos materiais compósitos de matriz poliéster e matriz epóxi verde, submetidos ao ensaio de flexão em três pontos.

Tabela 14 - Dimensões dos provetes dos materiais compósitos, segundo a Norma BS EN ISO 178:2019

		Matriz Poliéster			Matriz Epóxi Verde		
		b [mm]	h [mm]	L [mm]	b [mm]	h [mm]	L [mm]
PETG [1,18; 2,36][mm]	20 wt. %	9,87 ± 0,23	3,30 ± 0,14	50	10,09 ± 0,10	3,02 ± 0,10	50
	30 wt. %				---	---	---
	40 wt. %				---	---	---
PETG [0,300; 0,600][mm]	20 wt. %	9,91 ± 0,16	3,18 ± 0,17	50	9,98 ± 0,21	2,90 ± 0,11	50
	30 wt. %				---	---	---
	40 wt. %				---	---	---
PETG/PVC/PMMA [1,18; 2,36][mm]	20 wt. %	9,88 ± 0,12	3,87 ± 0,25	50	10,05 ± 0,08	2,77 ± 0,09	50
	30 wt. %				---	---	---
	40 wt. %				10,09 ± 0,10	3,23 ± 0,14	50
	50 wt. %				---	---	---
PETG/PVC/PMMA [0,300; 0,600][mm]	20 wt. %	10,01 ± 0,09	4,75 ± 0,25	80	---	---	---
	30 wt. %				---	---	---
	40 wt. %	10,03 ± 0,17	3,30 ± 0,11	50			
	50 wt. %	10,05 ± 0,06	3,30 ± 0,20	50	---	---	---
	60 wt. %				---	---	---

6.4 Faces do Painel Sanduíche

Atendendo à definição de um material compósito em formato sanduíche, este incorpora na sua composição duas folhas exteriores que, podendo ser constituídas por diversos materiais, desempenham a importante função de suportar as cargas de flexão aplicadas em todo o material (Callister and Rethwisch, 2018).

Neste sentido, para a constituição das faces do material a ser produzido, optaram-se por placas poliméricas de HIPS branco, com 1 mm de espessura, fornecidas pela mesma empresa que forneceu os resíduos poliméricos, uma vez que este material se enquadra, de igual modo, no sistema produtivo da WD Retail, bem como configura um resíduo identificado em formato de placa.

6.4.1 Procedimento Experimental: Ensaios Mecânicos

Com o intuito de obter as propriedades necessárias para a caracterização do painel sanduíche posteriormente produzido, as faces de HIPS utilizadas foram submetidas a um ensaio mecânico de tração, a partir do qual se pretendeu aferir a resistência à tração, bem como a rigidez do material em questão.

O ensaio de tração, à semelhança do ensaio de flexão em três pontos, foi conduzido de acordo com os requisitos presentes na ASTM D638-14, que prevê e especifica a determinação das propriedades de tração de plásticos reforçados e não reforçados, em amostras cujo formato padrão é especificado como “osso de cão”, testadas sob condições definidas de pré-tratamento, temperatura e humidade, bem como considerando a velocidade do equipamento de ensaio (ASTM, 2014).

Deste modo, o ensaio foi realizado, à temperatura ambiente, mediante utilização do mesmo equipamento dos ensaios de flexão em três pontos (*Shimadzu* – modelo *AGS-X*), com uma célula de carga de 10 kN e taxa de deslocamento de 5 mm/min. Ademais, as garras utilizadas, foram dispostas verticalmente a uma distância de 115 mm entre si, correspondente ao comprimento intermédio da amostra submetida a teste, tal como apresentando na Figura 49.

Além disto, a cada uma das amostras acrescentaram-se 4 abas de fixação (Figura 49), com o intuito de evitar, na medida do possível, o deslizamento da amostra em relação às garras, considerando, de igual forma, a necessidade de as garras permanecerem rigidamente fixadas aos membros fixos e móveis do equipamento de ensaio, garantindo que a amostra é colocada e fixada de modo que o seu eixo longitudinal coincida com a direção da tração,

evitando assim, a ocorrência de movimentos rotativos que possam proporcionar o desalinhamento das garras (ASTM, 2014).

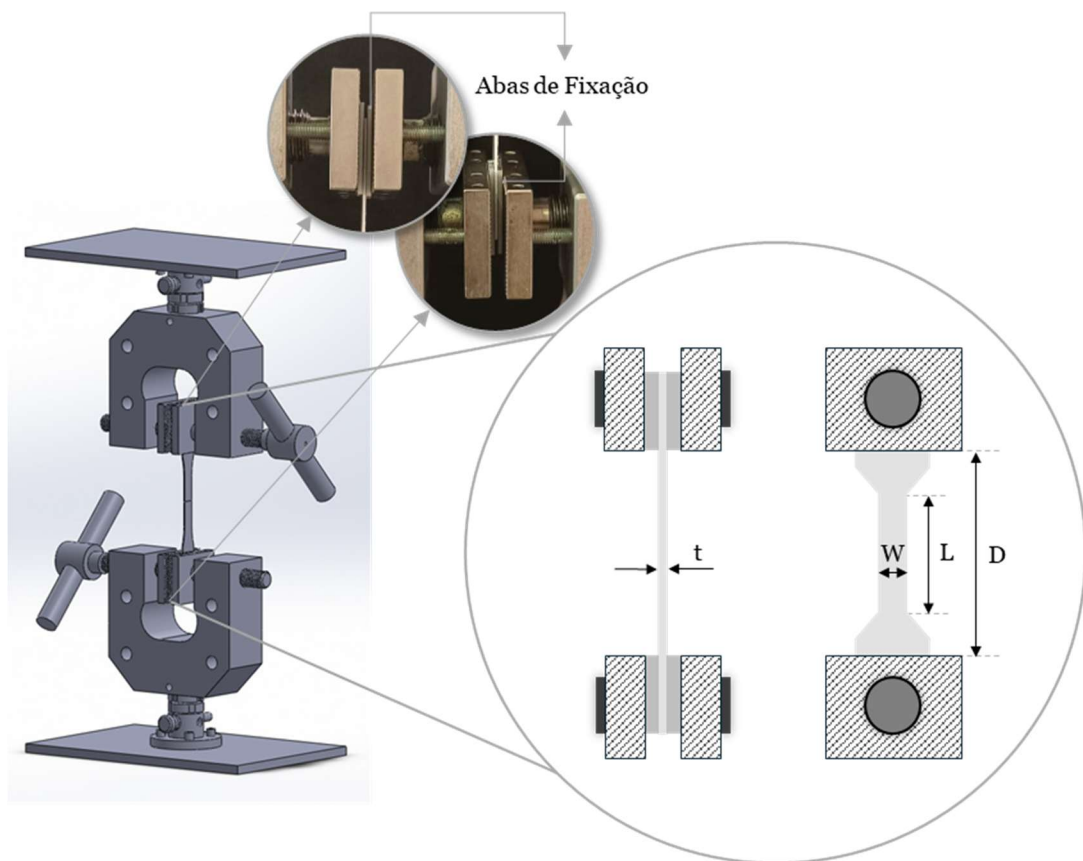


Figura 49 - Ilustração do equipamento utilizado no ensaio mecânico de tração (Autoria própria baseado na ASTM D638-14)

Na realidade, a aplicação deste tipo de ensaio mecânico, permite caracterizar o material polimérico utilizado quanto a propriedades mecânicas relevantes, como o limite de escoamento, σ_l , e o limite de resistência à tração (LRT), caracterizando-se, respetivamente, como o valor máximo na curva, imediatamente após a região elástica e a tensão na qual ocorre a rutura do material (Callister and Rethwisch, 2020). Adicionalmente, é possível determinar, de igual modo, o módulo de elasticidade/rigidez do material em estudo.

Por conseguinte, na Figura 50, apresentam-se as curvas típicas obtidas nos ensaios de tração (a), bem como a curva tensão-deformação característica de um polímero plástico, representando a deformação ocorrida no material, o limite de escoamento, σ_l , e o LRT (b) (ASTM, 2014; Callister and Rethwisch, 2020).

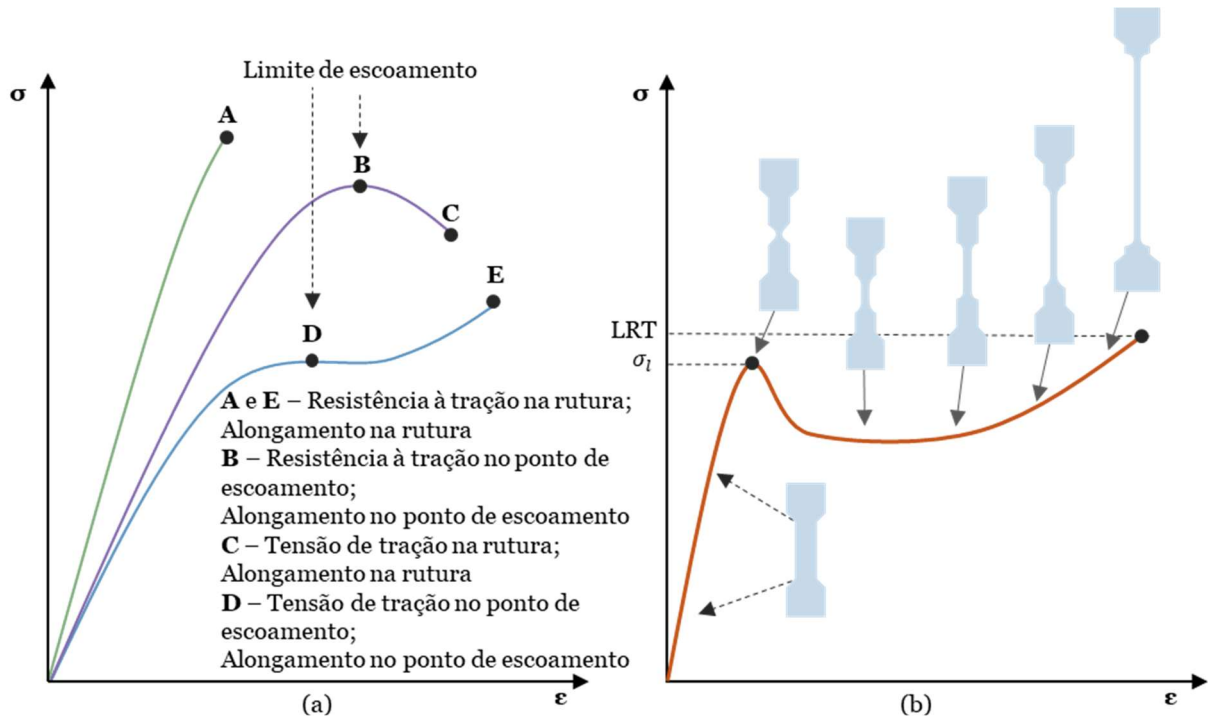


Figura 50 - Curvas tensão-deformação: a) curvas típicas dos ensaios de tração; b) curva típica de um polímero plástico (Adaptado de ASTM, 2014; Callister and Rethwisch, 2020)

Considerando a finalidade do ensaio de tração realizado, a tensão de tração determinou-se através do quociente entre a carga aplicada, P , e a área inicial do material, A_0 , conforme demonstrado pela equação 9 (ASTM, 2014):

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad [9]$$

onde a área corresponde à multiplicação da largura (w) e da espessura (t) da secção transversal do provete. Em contrapartida, o módulo de elasticidade determinou-se, mediante aplicação da *Lei de Hooke* (equação 10), considerando-se que a tensão, σ , e a deformação, ϵ , são proporcionais entre si, na secção linear da região elástica do material (Callister and Rethwisch, 2020):

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad [10]$$

onde a constante de proporcionalidade, E , representa o módulo de elasticidade ou módulo de Young (Callister and Rethwisch, 2020).

6.4.2 Procedimento Experimental: Provetes

Os provetes de HIPS destinados à realização do ensaio mecânico de tração, foram obtidos através da utilização de um equipamento de corte com jato de água, *Pronum* de três eixos, sendo que as dimensões dos 5 provetes obtidos, foram determinadas mediante as especificações presentes na Norma ASTM D638-14, considerando que o material polimérico utilizado se enquadra na categoria de materiais poliméricos rígidos/semirrígidos de Tipo I. Na Figura 51 apresenta-se a representação das dimensões utilizadas para obtenção dos provetes de HIPS.

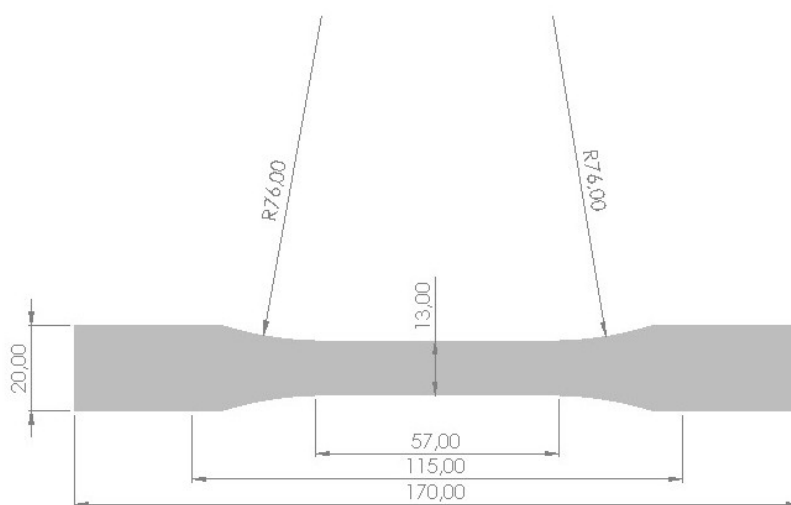


Figura 51 - Representação das dimensões dos provetes de HIPS (Adaptado de ASTM, 2014)

6.5 Painel Sanduíche

Após submeter ao ensaio de flexão em três pontos os núcleos elegíveis para constituição do painel sanduíche, foi selecionado o material compósito constituído por 30 wt. % de partículas de PETG de dimensões [0,300; 0,600]mm, como a melhor solução para fabricação do material final.

Deste modo, foram produzidos dois painéis sanduíches distintos, um cujo núcleo é constituído por uma matriz de poliéster e outro de matriz epóxi verde, considerando a necessidade de comparar as propriedades e desempenhos obtidos para ambos os materiais de diferentes matrizes.

De modo a garantir a coerência entre os materiais fabricados, o processo de fabrico dos painéis sanduíche baseou-se no processo utilizado para a produção dos núcleos reforçados com resíduos poliméricos, cuja única diferença reside na aplicação de duas faces de HIPS,

uma na parte inferior do molde e a outra na parte superior. Na Figura 52 apresenta-se o processo de fabrico utilizado, até à deposição da mistura de matriz e reforço no molde.

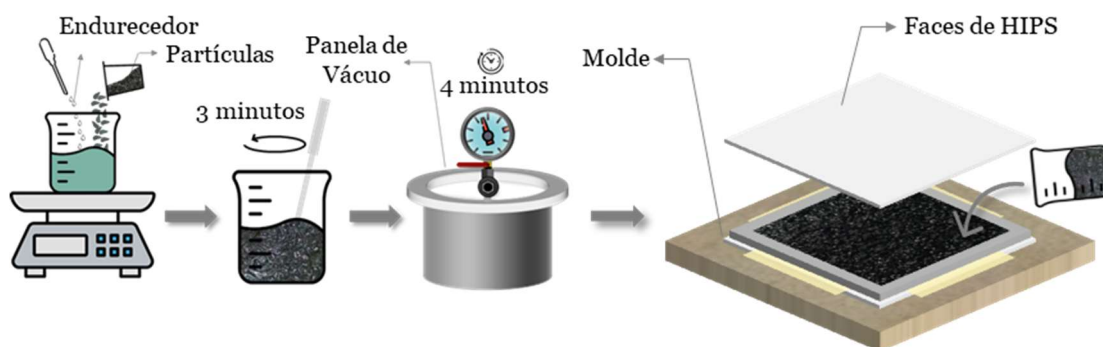


Figura 52 - Processo de Fabrico dos Painéis Sanduíche (Autoria Própria)

Posteriormente, à semelhança dos núcleos, o molde dos painéis sanduíche foi introduzido dentro de um saco de vácuo devidamente selado e, submetido novamente a um ciclo de degaseificação, durante 30 minutos, seguindo o processo de cura à temperatura ambiente, por um período de 24 horas, numa prensa hidráulica à pressão de 1250 kN/m^2 , com o intuito de garantir a total aderência do núcleo às faces e uniformização do material. Finalizado o processo de pós-cura à temperatura ambiente, o material foi colocado durante as 24 horas seguintes numa estufa a 40°C . Na Figura 53 apresenta-se a aparência do painel sanduíche obtido, evidenciando-se as suas camadas: núcleo e faces de HIPS.

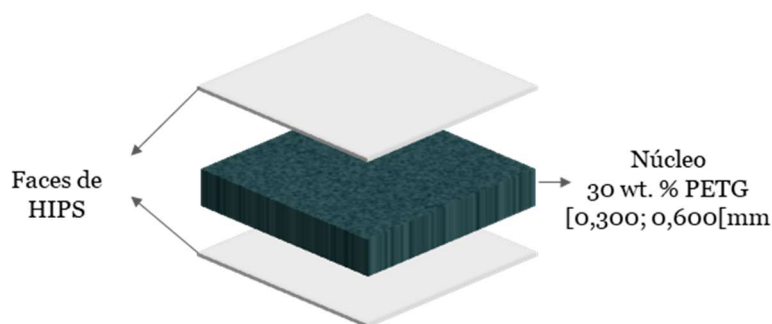


Figura 53 - Aparência do Painel Sanduíche: núcleo e faces de HIPS (Autoria Própria)

6.5.1 Procedimento Experimental: Ensaios Mecânicos

Assim como os núcleos elegíveis para constituição do material final e as faces de HIPS, os painéis sanduíches evidenciaram, de igual modo, a necessidade de serem submetidos a ensaios mecânicos, com vista a determinar o seu desempenho e propriedades, tendo sido, para isso, utilizados o ensaio de flexão em três pontos e o ensaio de impacto de baixa velocidade.

De facto, considerando a metodologia utilizada nos ensaios mecânicos aplicados aos materiais compósitos fabricados no âmbito da presente dissertação, o ensaio de flexão em três pontos foi realizado segundo as especificações da Norma ASTM C393/C393M-06, destinada à realização de métodos de ensaio que abrangem a determinação das propriedades de flexão e de que forma os momentos aplicados produzem curvatura nos revestimentos de uma construção de sanduíche plana (ASTM, 2006).

Tal como o ensaio aplicado aos núcleos dos painéis sanduíche, descrito na secção 6.3.1, o ensaio de flexão em três pontos aplicado aos painéis sanduíche foi realizado com recurso à mesma máquina de ensaios universal, modelo AGS-X, da marca *Shimadzu*, de célula de carga de 10 kN, composta por dois suportes paralelos, com 150 mm de distância entre si (S), cujas extremidades apresentam um raio de $2,5 \pm 0,2$ mm, bem como uma borda de carga central, de igual raio, disposta, conforme a Figura 54 (ASTM, 2006).

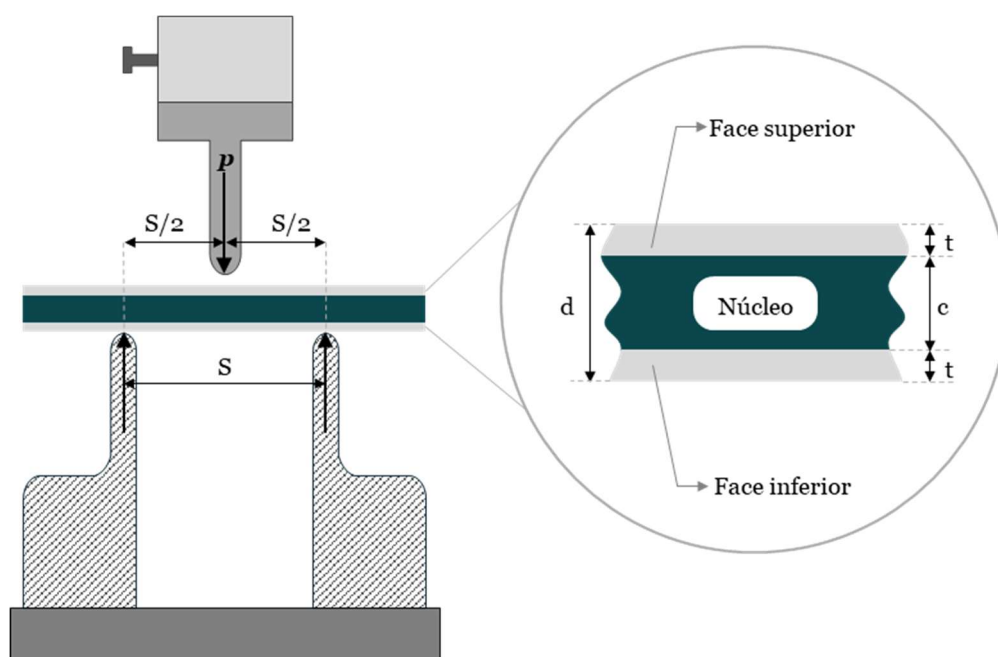


Figura 54 - Ilustração do Equipamento Utilizado no Ensaio de Flexão em três pontos dos painéis sanduíche (Adaptado de ASTM, 2006)

O ensaio de flexão em três pontos foi conduzido com uma velocidade de teste de 3 mm/min, aplicado a 5 provetes de cada um dos painéis sanduíche (matriz poliéster e matriz epóxi verde), a partir do qual se obtiveram os gráficos tensão/deformação, à semelhança do que foi determinado para os núcleos dos painéis sanduíche. Além disto, a tensão de corte do

núcleo foi determinada através da carga máxima aplicada, $P_{m\acute{a}x}$ ¹⁵, pela equação 14 (ASTM, 2006):

$$\tau = \frac{P_{max}}{(d + c) \cdot b} \quad [14]$$

onde d , c e b , dizem respeito a características do próprio material compósito, ou seja, espessura do painel sanduíche, espessura do núcleo e largura da sanduíche, respetivamente. Do mesmo modo, a tensão de flexão das faces do painel sanduíche foi obtida mediante aplicação da equação 15 (ASTM, 2006):

$$\sigma = \frac{P_{max} \cdot S}{2 \cdot t \cdot (d + c) \cdot b} \quad [15]$$

onde P_{max} representa a carga máxima, S o span utilizado e t a espessura das faces do painel sanduíche (ASTM, 2006).

Adicionalmente, a crescente procura por soluções que integrem painéis sanduíches nas mais diversas aplicações, originou a premente necessidade de explorar a sua durabilidade e capacidade de resposta, quando submetidos a incidentes reais de danos por impacto de baixa velocidade, quer seja por colisões, quedas durante a sua montagem, serviço ou manutenção (Saifullah *et al.*, 2021).

Neste sentido, a sujeição dos painéis sanduíches a ensaios mecânicos de impacto de baixa velocidade, justifica-se na medida em que a perceção da resistência ao impacto poderá contribuir positivamente para o conhecimento de suporte de carga estrutural, evitando possíveis falhas catastróficas inesperadas na estrutura do material (Saifullah *et al.*, 2021).

O ensaio de impacto de baixa velocidade permite, portanto, determinar a resistência a danos de placas laminadas de matriz polimérica multidirecional, submetidas a um impacto originado por um peso em queda livre, sendo os resultados obtidos fortemente influenciados por diversos fatores, como a geometria e a disposição da amostra, a geometria do equipamento utilizado (impactador e suporte), a massa do próprio impactador, a energia e a força de impacto (ASTM, 2012).

¹⁵ Segundo a Norma ASTM C393/C393M-06, para núcleos cuja deformação é superior a 2%, a tensão de corte é determinada através da carga exercida quando a deformação é 2%. No entanto, quando o material do núcleo evidencia uma deformação inferior a 2%, deve-se utilizar a carga máxima aplicada, $P_{m\acute{a}x}$ (ASTM, 2006).

Por conseguinte, o ensaio consiste em submeter uma placa composta, plana e retangular a um impacto concentrado fora do plano, fazendo uso de um dispositivo de queda de peso que integra um impactador hemisférico (ASTM, 2012), tendo sido utilizado para este caso prático um impactador de diâmetro de 10 mm e de 2560,85g de massa, integrado numa máquina de impacto da marca *IMATEK*, modelo IM10, tal como apresentado na Figura 55.

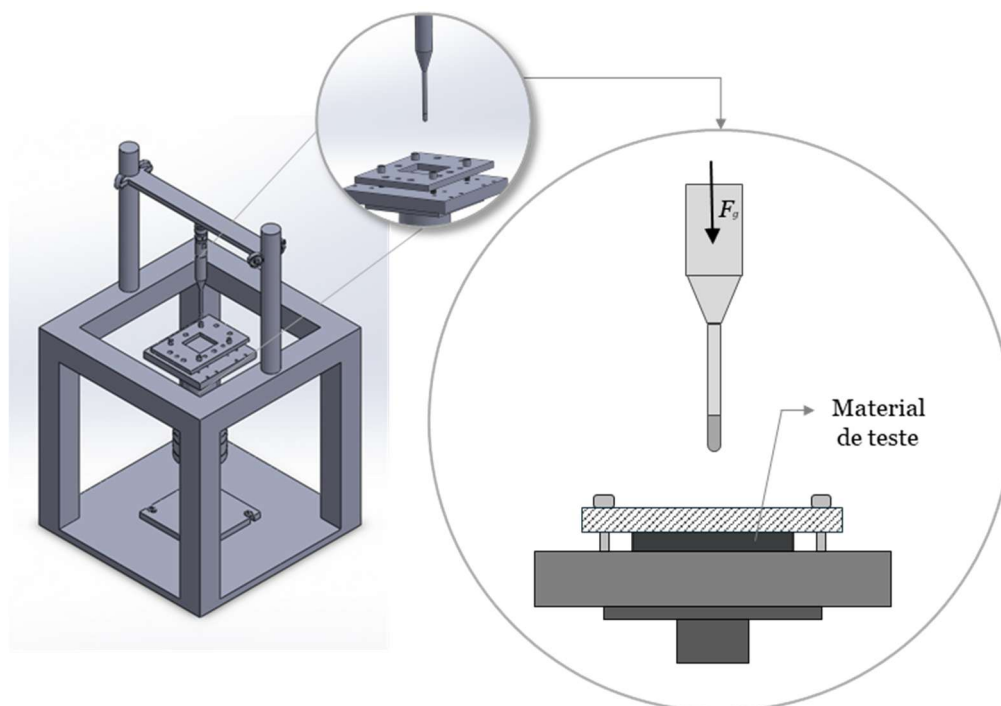


Figura 55 - Ilustração da Máquina de Impacto (Autoria Própria)

Na realidade, a energia potencial do peso de queda é definida pela massa e altura de queda do impactador, devendo ser especificada antes do ensaio mecânico, tendo sido estabelecido que, para a presente dissertação, seriam utilizadas as energias de 1J, 2J, 3J e 4J (ASTM, 2012). Por outro lado, a medição da força de contacto e a velocidade de teste foi realizada através de equipamentos e procedimentos adicionais (por meio de um sensor eletrónico e uma célula de carga que regista a velocidade no início do ensaio, respetivamente), exceto a resistência a danos que é quantificada em função do tipo de dano provocado na amostra, frequentemente caracterizados como deformação e separação do núcleo, fissuração do núcleo, delaminação da camada superior do material, bem como fissuração da matriz e queda do material de reforço (ASTM, 2012; Saifullah *et al.*, 2021).

Adicionalmente, através de um *software* especializado de aquisição de dados (*IMATEK analysis, versão 2.9*), foi possível obter as curvas típicas para este tipo de ensaios mecânicos (Figura 56) seja força-tempo, energia-tempo, deflexão-tempo e força-deflexão, a partir das quais se determina a energia absorvida, E_a , a energia elástica/recuperada, E_{el} , a energia de

perfuração, E_{perf} (caso tenha ocorrido), a deflexão ocorrida no painel sanduíche, δ , a rigidez do material, bem como a velocidade do impactador, V (Shah *et al.*, 2019).

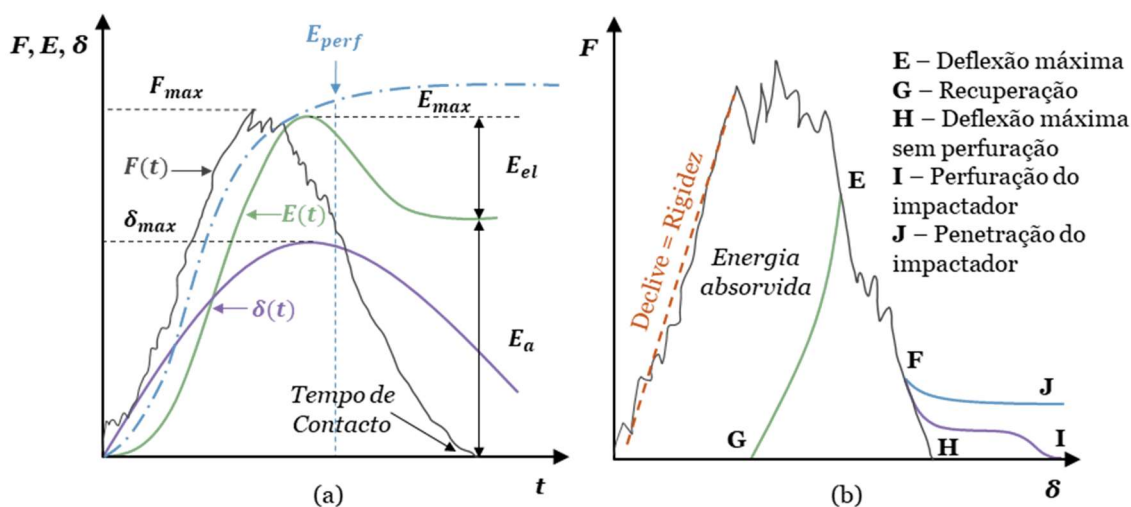


Figura 56 - Curvas Típicas obtidas dos ensaios de impacto: a) gráfico força-tempo, energia-tempo, deflexão-tempo; b) gráfico força-deflexão (Adaptado de Shah *et al.*, 2019)

As curvas típicas dos ensaios de impacto, apresentadas na Figura 56, sugerem informações relevantes para a análise e a interpretação dos resultados obtidos. Isto é, começando por analisar o gráfico de força-tempo (Figura 56 a), a curva típica apresentada, $F(t)$, indica a existência de oscilações ao longo do ensaio, as quais dizem respeito às oscilações provocadas pelas ondas de tensão transitórias que ocorrem na direção transversal, contendo a força máxima suportada pelo material de teste, bem como o tempo de contacto entre o material e o impactador (Shah *et al.*, 2019).

Além da força-tempo, importa realçar que, mediante observação da curva da energia absorvida pelo material ao longo do ensaio, $E(t)$, é possível perceber e determinar a energia absorvida durante um qualquer momento t , atingindo a energia de impacto máxima experimentada pelo material, correspondendo, normalmente, à energia potencial do peso de queda especificada no início do ensaio. Esta energia é caracterizada pela soma da energia elástica, E_{el} , e da energia absorvida, E_a (Figura 56 a) (Shah *et al.*, 2019).

Na realidade, a presença de dois tipos de energia (energia elástica e energia absorvida), remete para o facto que apenas parte da energia total é absorvida pelo material de teste, ao passo que a restante energia (E_{el}) é utilizada para o regresso do impactador à origem (Shah *et al.*, 2019).

Contudo, caso tenha sucedido perfuração do material pelo impactador, não se verifica a existência de energia elástica, uma vez que a energia de perfuração, E_{perf} , permanece constante após a perfuração, sendo caracterizada pela combinação da energia do início do dano e a energia de propagação do dano ocorrido (Shah *et al.*, 2019).

Combinando a observação do gráfico deflexão-tempo (Figura 56 a) e força-deflexão (Figura 56 b), é possível verificar que o ponto de deflexão máximo não ocorre no momento em que a força é máxima, mas no ponto de mudança de comportamento da curva (ponto E) associado à sucessão de diversos cenários, ou seja, o ponto em que nos instantes seguintes ocorre, ou a recuperação do material (ponto G) ou a perfuração/penetração do impactador (Pontos I e J, respetivamente) (Shah *et al.*, 2019).

Além disto, o gráfico força-deflexão (Figura 56 b) permite a representação da deflexão permanente do material de teste (com recuperação (Ponto G) e sem perfuração (Ponto H)), sendo este fenómeno conhecido por indentação permanente do material de teste. Analogamente, a área sob a curva força-deflexão, para o caso em que existe recuperação, representa a energia absorvida pelo material, além de que, a rigidez à flexão do material de teste submetido a ensaios de impacto de baixa velocidade (do inglês *Impact Bending Stiffness*, IBS (Yang *et al.*, 2023)) é determinada pelo declive da linha de tendência, desde o momento inicial até que atinge a força máxima (Shah *et al.*, 2019).

Por conseguinte, num ensaio de impacto de baixa velocidade, se o dispositivo monitorizar a força de contacto exercida, é gerada uma curva da velocidade do ensaio em função do tempo, mediante aplicação da integração numérica da força em função do tempo, assim como representado pela equação 11 (ASTM, 2012):

$$v(t) = v_i + gt - \int_0^t \frac{F(t)}{m} dt \quad [11]$$

onde v , representa a velocidade do impactador num instante t ; v_i , a velocidade no instante inicial ($t=0$); g , a força da gravidade; m , a massa do impactador e F a força de contacto do impactador num instante t . Analogamente, quando o dispositivo se encontra a monitorizar a força de contacto, gera uma curva de deslocamento do impactador em função do tempo, mediante aplicação da mesma integração da força em função do tempo – equação 12 (ASTM, 2012):

$$\delta(t) = \delta_i + v_i t + \frac{gt^2}{2} - \int_0^t \left(\int_0^t \frac{F(t)}{m} dt \right) dt \quad [12]$$

onde δ_i , representa o deslocamento do impactador a partir da localização de referência no momento inicial ($t=0$). Finalmente, a energia absorvida em função do tempo, $E_a(t)$, é determinada, igualmente, pela monitorização da força de contacto, mediante a velocidade do impactador no momento inicial, v_i e a velocidade num instante t , $v(t)$, representada pela equação 13 (ASTM, 2012):

$$E_a(t) = \frac{m(v_i^2 - v(t)^2)}{2} + m \cdot g \cdot \delta(t) \quad [13]$$

onde m e g são a massa do impactador e a força gravítica característica do ensaio de impacto de baixa velocidade por queda de peso – 9,81 m/s², respetivamente (ASTM, 2012).

6.5.2 Procedimento Experimental: Provetes

De forma a cumprir os requisitos especificados nas normas dos ensaios realizados (impacto de baixa velocidade e flexão em três pontos), foram fabricados 8 painéis sanduíches de dimensões 200 mm × 200 mm × 5 mm, pretendendo-se obter os provetes especificados na Figura 57.

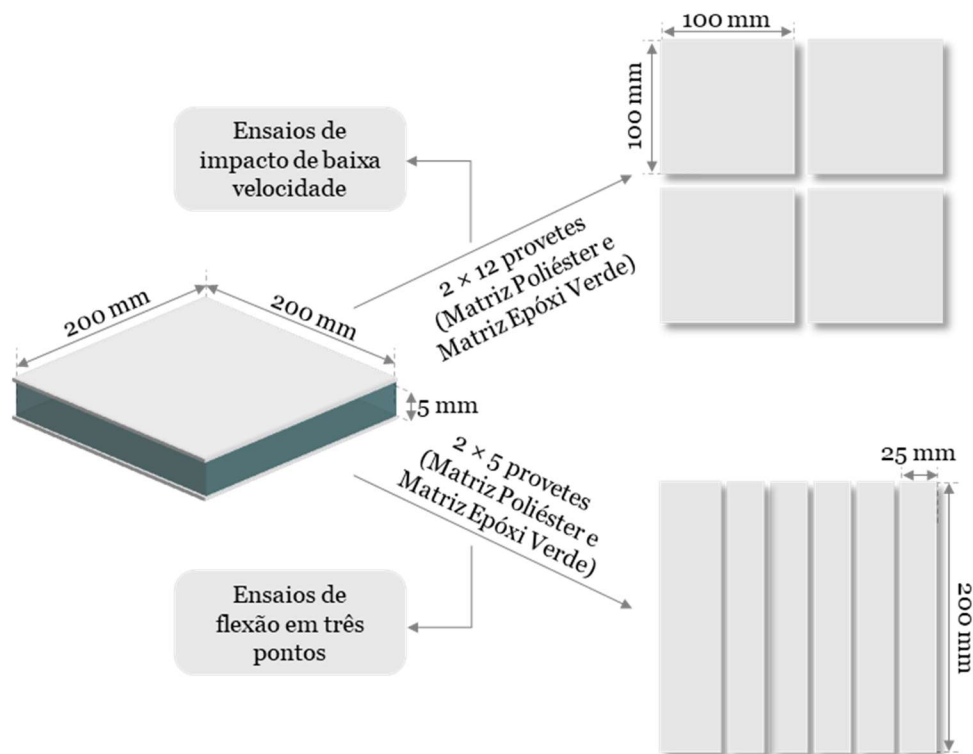


Figura 57 - Corte dos Provetes dos Painéis Sanduíches (Autoria própria)

Para o ensaio de flexão em três pontos, de acordo com os requisitos da Norma ASTM C393/C393M-06, as dimensões dos provetes influenciam diretamente os resultados obtidos. Desta forma, na Tabela 15, apresentam-se as dimensões dos provetes destinados ao ensaio de flexão em três pontos, considerando os dois painéis sanduíches produzidos: núcleo de matriz poliéster e núcleo de matriz epóxi verde.

Tabela 15 - Dimensões dos provetes dos Painéis Sanduíche segundo a Norma ASTM C393/C393M-06

		Dimensões dos provetes		
		b [mm]	d [mm]	S [mm]
Painel Sanduíche	Núcleo de Matriz Poliéster	25,51 ± 0,40	6,72 ± 0,40	150
	Núcleo de Matriz Epóxi Verde	25,83 ± 0,24	5,25 ± 0,21	150

Capítulo 7

Apresentação e Discussão de Resultados

Após exposição, definição e aplicação dos materiais e métodos, neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos com os ensaios mecânicos realizados aos materiais compósitos para constituição do núcleo, às faces de HIPS e ao painel sanduíche final, considerando e determinando, adicionalmente, os custos de produção do material desenvolvido, bem como o planejamento industrial com base na análise do ciclo de vida do produto.

7.1 Ensaios de Flexão em Três Pontos do Núcleo

Perante a premência de caracterizar mecanicamente os materiais compósitos produzidos, realizaram-se ensaios de flexão em três pontos, com vista a especificar a tensão de flexão, a rigidez e a deformação, considerando que foram submetidos a ensaios de flexão em três pontos 24 materiais compósitos produzidos (15 de matriz poliéster e 9 de matriz epóxi verde). Deste modo, verificou-se a necessidade de os distinguir e conferir-lhes uma designação própria, permitindo assim uma melhor identificação dos mesmos e garantindo a clareza da análise dos resultados obtidos.

Neste sentido, na Tabela 16 apresentam-se as designações atribuídas a cada material produzido, tendo em conta o tipo de matriz (matriz poliéster ou matriz epóxi verde) e a percentagem em peso de partículas de resíduos poliméricos que os constituem.

Tabela 16 - Designações atribuídas aos materiais compósitos produzidos

Composição do Material (dimensões das partículas em [mm])	Designação Matriz Poliéster	Designação Matriz Epóxi Verde
Matriz de Controlo	Controlo P	Controlo EV
20 wt. % de PETG [1,18; 2,36[	20% 1P1	20% 1E1
30 wt. % de PETG [1,18; 2,36[	30% 1P2	30% 1E2
40 wt. % de PETG [1,18; 2,36[	40% 1P3	---
20 wt. % de PETG [0,300; 0,600[	20% 1P4	20% 1E4
30 wt. % de PETG [0,300; 0,600[	30% 1P5	30% 1E5
40 wt. % de PETG [0,300; 0,600[	40% 1P6	---
20 wt. % de PETG/PVC/PMMA [1,18; 2,36[	20% 2P1	20% 2E1
30 wt. % de PETG/PVC/PMMA [1,18; 2,36[	30% 2P2	---

40 wt. % de PETG/PVC/PMMA [1,18; 2,36[	40% 2P3	40% 2E3
50 wt. % de PETG/PVC/PMMA [1,18; 2,36[	50% 2P4	---
20 wt. % de PETG/PVC/PMMA [0,300; 0,600[	20% 2P5	---
30 wt. % de PETG/PVC/PMMA [0,300; 0,600[	30% 2P6	30% 2E6
40 wt. % de PETG/PVC/PMMA [0,300; 0,600[	40% 2P7	40% 2E7
50 wt. % de PETG/PVC/PMMA [0,300; 0,600[	50% 2P8	50% 2E8
60 wt. % de PETG/PVC/PMMA [0,300; 0,600[	60% 2P9	---

Através dos ensaios de flexão em três pontos aplicados aos núcleos elegíveis para a fabricação dos painéis sanduíche, obtiveram-se as curvas características de cada um dos materiais fabricados, sendo a sua análise realizada mediante comparação com a respetiva matriz de controlo. Na Figura 58 apresentam-se as curvas representativas obtidas para os materiais compósitos de matriz poliéster (a) e de matriz epóxi verde (b), reforçados com diferentes percentagens em peso de partículas de PETG de tamanhos [0,300; 0,600[mm. Com o intuito de facilitar a análise e comparação de todos os resultados adquiridos com o presente ensaio, as restantes curvas representativas poderão ser consultadas no Anexo I.

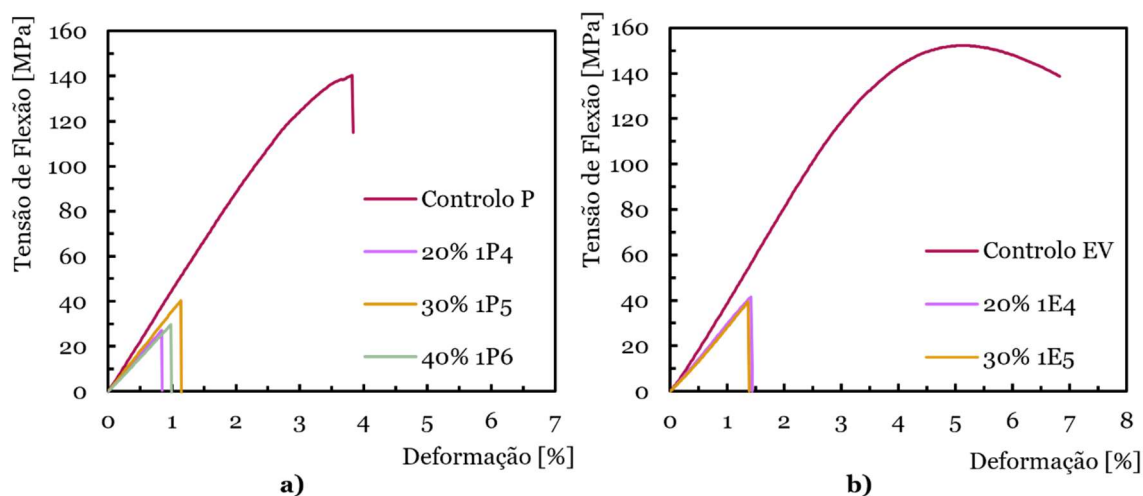


Figura 58 - Curvas Representativas de tensão-deformação de flexão dos materiais compósitos reforçados com partículas de PETG de [0,300; 0,600[mm: a) Matriz Poliéster; b) Matriz Epóxi Verde

Perante os gráficos tensão-deformação apresentados na Figura 58, importa referir o comportamento dos materiais, em termos de deformação, quando submetido a tensões externas, como é o caso da flexão em três pontos. Na realidade, observando o comportamento das matrizes de controlo, é possível retirar que a matriz de poliéster constitui um material polimérico mais frágil do que a matriz de epóxi verde, uma vez que esta fraturou pouco depois de atingir a região plástica, enquanto que a matriz de epóxi verde apresentou uma curvatura bastante superior na região plástica, na qual ocorre deformação

permanente do material e não recuperação do mesmo, aumentando a curvatura à medida que a tensão aumenta, até atingir um valor máximo (Callister and Rethwisch, 2020).

De facto, em ambas as matrizes, a transição que ocorreu entre a deformação elástica e a deformação plástica pode caracterizar-se como gradual, visto que, após a região linear inicial, caracterizada pela existência de proporcionalidade entre a tensão e a deformação, o material deformou-se plasticamente até ao momento em que ocorreu a rutura (Callister and Rethwisch, 2020).

Em contrapartida, todas as curvas representativas dos compósitos fabricados com a adição de partículas (independentemente do tamanho e percentagem adicionados), mostram que a fratura sucede logo após atingir a tensão máxima, quando estes ainda se encontravam em fases de deformação elástica, não existindo a transição para uma deformação plástica. Isto é, sendo, portanto, compósitos poliméricos mais frágeis, são caracterizados pelo facto de a fratura ocorrer enquanto estes se deformam elasticamente (Callister and Rethwisch, 2020).

Além disto, mediante observação e análise dos gráficos apresentados na Figura 58, é possível perceber que ocorreu um decréscimo da tensão de flexão máxima de cada um dos materiais compósitos fabricados, comparativamente com as respetivas matrizes de controlo, cujos valores de tensão de flexão registados foram de $136,31 \pm 9,40$ MPa para a matriz de poliéster e $148,04 \pm 7,87$ MPa para a matriz de epóxi verde. Desta forma, verificou-se um decréscimo de cerca de 80,51%, 71,93% e 78,61% no valor da tensão de flexão máxima dos materiais compósitos constituídos pela matriz de poliéster e reforçados com 20 wt. %, 30 wt. % e 40 wt. % de partículas de PETG de tamanhos [0,300; 0,600]mm, respetivamente.

Na realidade, o mesmo se verificou para os materiais compósitos de matriz de epóxi verde, observando-se uma redução de cerca de 74,13% e 73,19% no valor da tensão de flexão máxima, para os compósitos constituídos por 20 wt. % e 30 wt. % de partículas de PETG de tamanhos compreendidos entre [0,300; 0,600]mm, respetivamente.

Uma vez que foram utilizados dois tipos de partículas na produção dos núcleos elegíveis para constituição dos painéis sanduíche, o mesmo ensaio foi aplicado aos materiais compósitos com reforço de partículas de PETG/PVC/PMMA. Por conseguinte, considerando que os resultados mais aprazíveis foram verificados, igualmente, nas partículas de menor tamanho, na Figura 59, apresentam-se as curvas representativas obtidas para os materiais compósitos de matriz poliéster (a) e de matriz epóxi verde (b),

reforçados com diferentes percentagens em peso de partículas de PETG/PVC/PMMA de tamanhos [0,300; 0,600[mm, sendo que as restantes curvas se encontram, analogamente, no Anexo I.

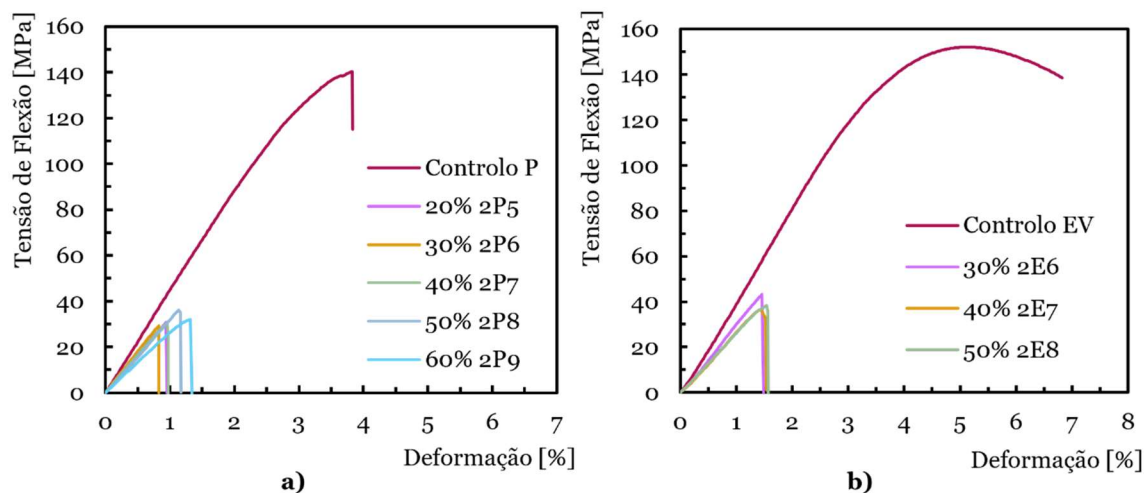


Figura 59 - Curvas Representativas de tensão-deformação de flexão dos materiais compósitos reforçados com partículas de PETG/PVC/PMMA de [0,300; 0,600[mm: a) Matriz Poliéster; b) Matriz Epóxi Verde

Os valores de tensão de flexão máxima obtidos para os materiais compósitos reforçados com partículas de PETG/PVC/PMMA de tamanhos [0,300; 0,600[mm, evidenciaram, de igual modo, um decréscimo acentuado, comparativamente com os valores de tensão de flexão das matrizes de controlo, tal como é possível observar na Figura 59. Ou seja, para os compósitos de matriz de poliéster constituídos por 20 wt. %, 30 wt. %, 40 wt. %, 50 wt. % e 60 wt. % destas partículas, registaram-se reduções de 77,51%, 78,57%, 77,56%, 74,37% e 76,64% respetivamente, enquanto para os materiais compósitos de matriz de epóxi verde reforçados com 30 wt. %, 40 wt. % e 50 wt. % das partículas de PETG/PVC/PMMA de tamanhos [0,300; 0,600[mm, os decréscimos foram de cerca de 71,05%, 74,93% e 74,18%, respetivamente.

Os decréscimos mencionados nos valores da tensão de flexão máxima dos núcleos do painel sanduíche constituídos por partículas de menor tamanho, torna-se evidente na Figura 60, na qual é apresentada a comparação entre as percentagens em peso de partículas de reforço e os valores obtidos para a tensão de flexão máxima, contemplando os dois tipos de matrizes utilizadas (matriz poliéster (a) e matriz epóxi verde (b)) e os tipos de partículas de reforço (PETG e PETG/PVC/PMMA). No Anexo I encontram-se os gráficos de todas as comparações realizadas, a fim de facilitar a sua compreensão e análise.

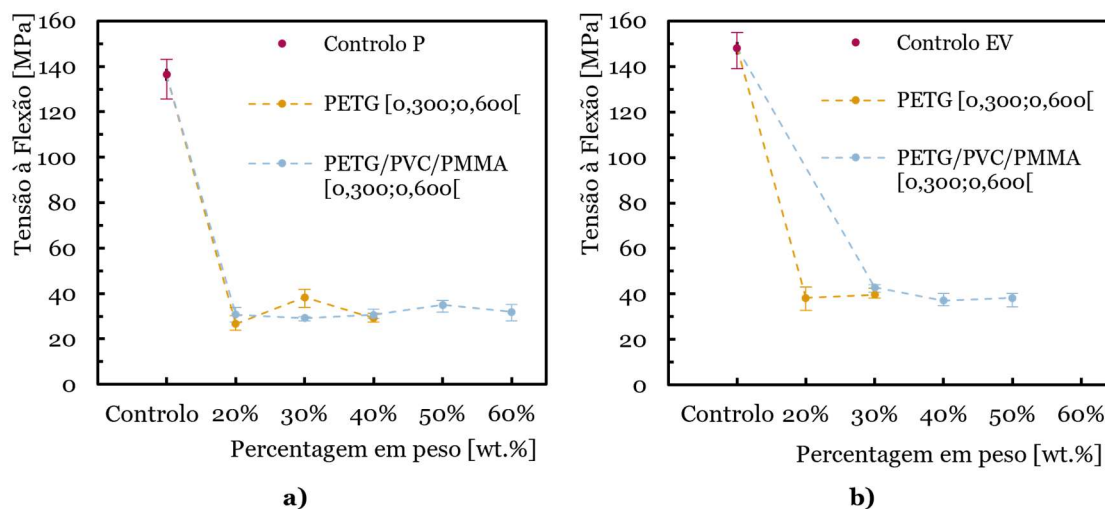


Figura 60 - Comparação entre as percentagens em peso de partículas de reforço e a tensão de flexão máxima: a) Matriz Poliéster; b) Matriz Epóxi Verde

Não obstante, para os valores de rigidez obtidos nos ensaios de flexão em três pontos, não se verificaram apenas reduções da rigidez dos materiais compósitos produzidos, comparativamente com a matriz de controlo, como ocorreu nos valores obtidos para a tensão de flexão máxima, uma vez que os materiais compósitos de matriz de poliéster constituídos por 20 wt. %, 30 wt. % e 40 wt. % das partículas poliméricas de PETG/PVC/PMMA de tamanhos compreendidos entre [0,300; 0,600][mm, evidenciaram valores de rigidez superiores ao da matriz de controlo, registando aumentos de 12,42%, 28,43% e 11,31%, respetivamente.

Contudo, o comportamento dos compósitos de matriz de epóxi verde reforçados com o mesmo tipo de partículas demonstrou ser distinto, verificando-se decréscimos acentuados de 32,28% e 40,83% para 30 wt. % e 40 wt. % de partículas de PETG/PVC/PMMA. Na Figura 61 apresenta-se a comparação entre as percentagens em peso de partículas de reforço utilizadas e os valores de rigidez, considerando os dois tipos de matriz utilizadas (matriz poliéster (a) e matriz epóxi verde (b)).

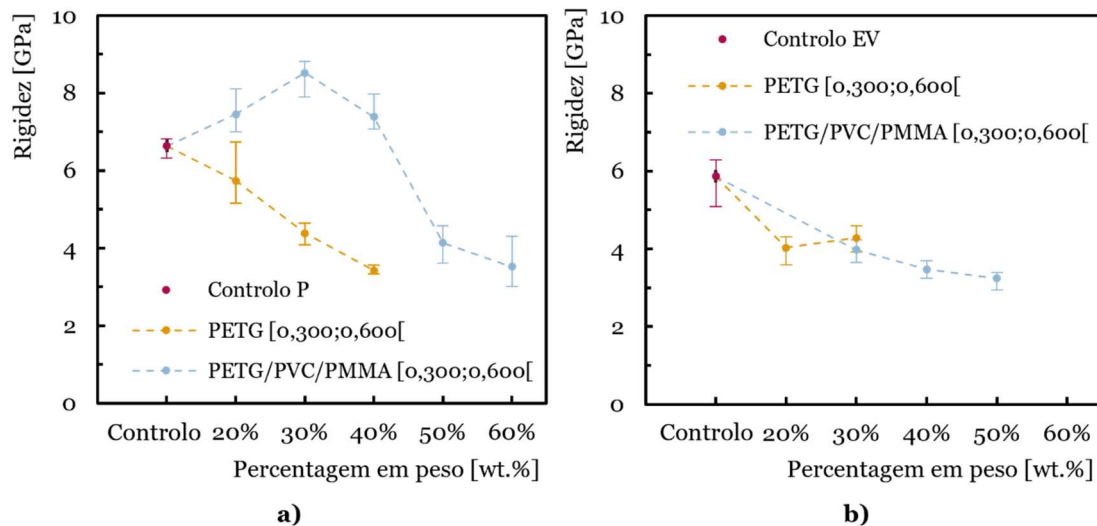


Figura 61 - Comparação entre as percentagens em peso de partículas de reforço e a rigidez: a) Matriz Poliéster; b) Matriz Epóxi Verde

No conjunto das propriedades de flexão obtidas por aplicação do ensaio de flexão em três pontos, é importante realçar a deformação sofrida pelos materiais compósitos. De facto, considerando o comportamento frágil demonstrado pelos materiais compósitos fabricados, os valores de deformação apresentaram reduções significativas, maioritariamente iguais ou superiores a 70%, comparativamente com as matrizes de controlo, cujos valores de deformação obtidos foram de, aproximadamente, 3,75% e 4,74%, para a matriz de poliéster e matriz de epóxi verde, respetivamente. Em contrapartida, os valores de deformação dos compósitos demonstraram ser, na generalidade, inferiores a 2%. Na Figura 62 apresenta-se a comparação entre as percentagens em peso de partículas de reforço utilizadas e os valores de deformação, considerando os dois tipos de matriz utilizadas (matriz poliéster (a) e matriz epóxi verde (b)).

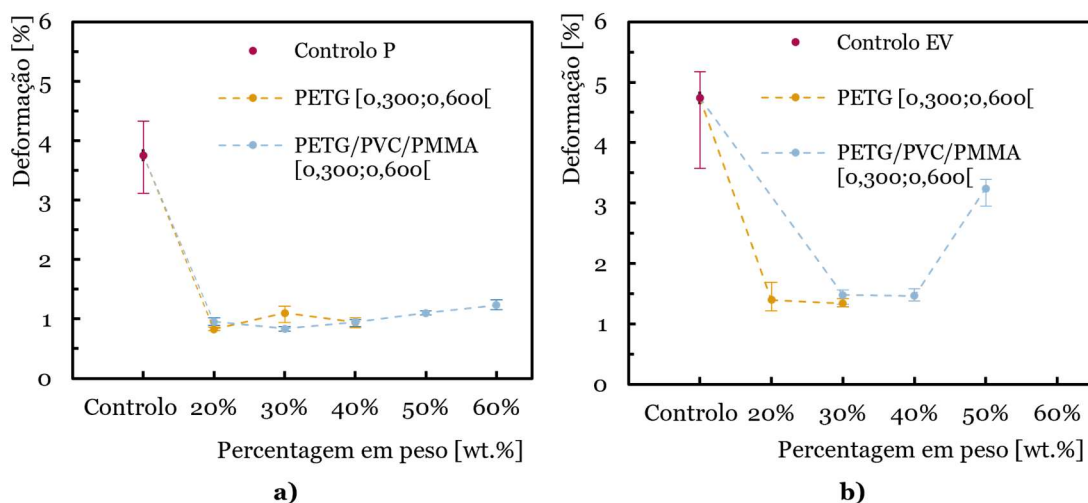


Figura 62 - Comparação entre as percentagens em peso de partículas de reforço e a deformação: a) Matriz Poliéster; b) Matriz Epóxi Verde

Na realidade, as propriedades mecânicas obtidas para os materiais compósitos fabricados (Figuras 60, 61 e 62), encontram-se diretamente relacionadas com o tamanho, a natureza, a percentagem em peso e a dispersão das partículas poliméricas utilizadas como reforço, bem como a adesão interfacial entre o reforço e a matriz. De facto, a influência destes fatores nas propriedades do material é documentada na literatura, através de estudos que utilizam diversos tipos de partículas (poliméricas, metálicas, entre outras) como reforço de matrizes termoendurecíveis (Liang, 2019; Al-Ameen *et al.*, 2020; Bogiatzidis and Zoumpoulakis, 2021; Ağcan and Kartal, 2025; Li, Li and Jiang, 2025).

Além disto, verifica-se que, a utilização de partículas de menor tamanho permite a obtenção de resultados favoráveis em comparação com a utilização de partículas de tamanhos superiores (Al-Ameen *et al.*, 2020; Bogiatzidis and Zoumpoulakis, 2021; Ağcan and Kartal, 2025; Li, Li and Jiang, 2025), tal como se verificou nas propriedades obtidas para os compósitos reforçados com partículas de PETG e de PETG/PVC/PMMA de tamanhos [1,18; 2,36]mm, cujas propriedades revelaram ser notoriamente inferiores em comparação com as partículas de tamanhos [0,300; 0,600]mm (Tabela 17).

Por conseguinte, a percentagem em peso de partículas na matriz é um fator preponderante na caracterização mecânica dos materiais compósitos, uma vez que, quando a concentração de partículas aumenta, as interações entre as partículas aumentam, proporcionando a formação de aglomerados que, por sua vez, originam uma dispersão não uniforme das partículas, a partir da qual advêm efeitos prejudiciais no desempenho mecânico dos materiais (Ağcan and Kartal, 2025; Li, Li and Jiang, 2025).

O referido comportamento, poderá, deste modo, justificar o decréscimo de propriedades à medida que as percentagens em peso eram superiores, como por exemplo, no caso do material compósito de matriz de poliéster reforçado com 50 wt. % e 60 wt. % de partículas de PETG/PVC/PMMA de tamanhos [0,300;0,600]mm e de matriz de epóxi verde de 50 wt. % das mesmas partículas, cujos valores de rigidez diminuíram exponencialmente em comparação com os materiais compósitos de percentagens em peso inferiores.

Contudo, a fragilidade e a fratura precoce dos materiais compósitos para constituição do núcleo dos painéis sanduíche, em relação à matriz de controlo, são associadas, na literatura, à interface matriz-reforço, visto ser este o local preferencial para a formação de vazios (nucleação), provenientes da fraca adesão entre as partículas e a matriz, podendo ser melhorada através do tratamento superficial das partículas (Al-Ameen *et al.*, 2020; Lebar *et al.*, 2021). Deste modo, o decréscimo das propriedades dos compósitos produzidos,

comparativamente às matrizes de controlo, pode justificar-se, de igual modo, pela não realização de tratamentos adicionais às partículas num momento pré-produção.

Na Figura 63 apresenta-se uma das imagens SEM de um dos materiais compósitos fabricados (matriz poliéster reforçado com 20 wt. % de partículas de PETG de tamanhos [1,18; 2,36[mm), na qual é possível identificar as diferentes fases que constituem os materiais compósitos, tal como a fase dispersa (as partículas), a fase contínua (matriz) e a interface matriz-reforço. Além disto, observando o aspeto das partículas é possível perceber que as partículas apresentam um aspeto superficial rugoso, característico dos processos de maquinação dos quais provêm.

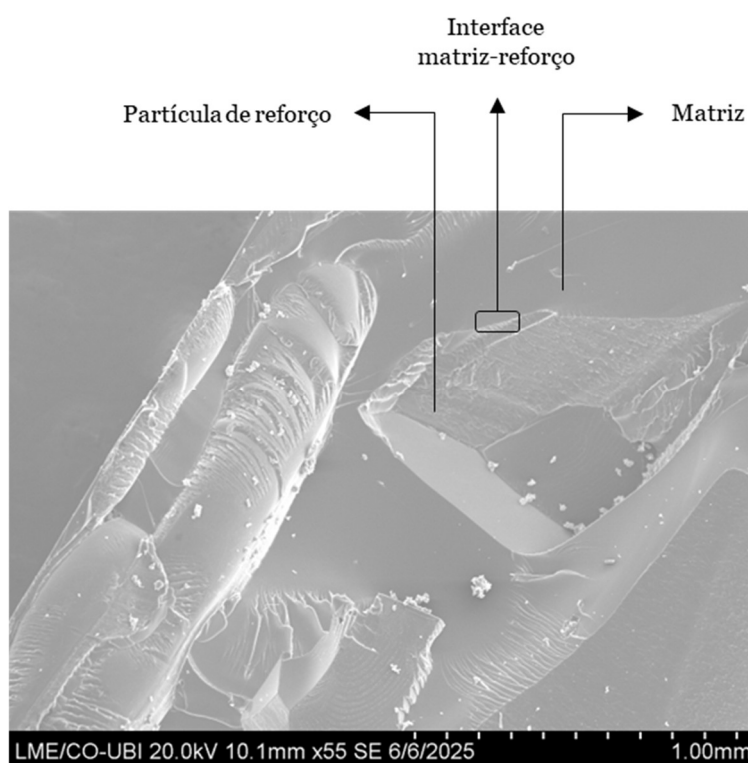


Figura 63 - Imagem SEM do material compósito de matriz poliéster reforçado com 20 wt. % de partículas de PETG de tamanhos [1,18; 2,36[mm

Após análise das propriedades de flexão de cada um dos materiais compósitos fabricados e respetiva comparação com as matrizes de controlo, na Tabela 17 apresentam-se reunidos todos os resultados médios obtidos para os materiais compósitos fabricados, bem como o respetivo desvio padrão, s , evidenciando os quatro melhores resultados de cada uma das propriedades obtidas (tensão de flexão (σ_f), rigidez (E), e deformação (ε_f)).

Tabela 17 - Resultados Médios dos Ensaios de Flexão em Três Pontos dos Materiais Compósitos Fabricados

		Matriz Poliéster						Matriz Epóxi Verde						Legenda	
		σ_f [MPa]	s [MPa]	E [GPa]	s [GPa]	ε_f [%]	s [%]	σ_f [MPa]	s [MPa]	E [GPa]	s [GPa]	ε_f [%]	s [%]		
Controlo		136,31	9,40	6,63	0,27	3,75	0,61	148,04	7,87	5,87	0,49	4,74	0,66		
PETG [mm]	[1,18; 2,36]	20 wt. %	28,56	0,89	4,94	0,72	0,87	0,06	34,92	2,98	4,48	0,50	1,21	0,13	
		30 wt. %	31,82	5,83	4,44	0,71	0,92	0,15	26,39	3,05	2,80	0,41	1,36	0,25	
		40 wt. %	23,33	2,99	3,75	0,51	0,74	0,06	---	---	---	---	---	---	
	[0,300; 0,600]	20 wt. %	26,57	2,45	5,73	0,63	0,83	0,03	38,29	4,75	4,03	0,31	1,40	0,21	
		30 wt. %	38,26	3,80	4,38	0,22	1,10	0,12	39,68	1,91	4,28	0,28	1,34	0,07	
		40 wt. %	29,16	1,60	3,42	0,10	0,94	0,07	---	---	---	---	---	---	
PETG/PVC/PMMA [mm]	[1,18; 2,36]	20 wt. %	31,23	5,43	4,53	0,35	0,86	0,11	33,96	2,32	4,35	0,39	1,21	0,06	
		30 wt. %	37,11	3,33	3,26	0,21	1,16	0,13	---	---	---	---	---	---	
		40 wt. %	37,77	1,37	3,26	0,13	1,34	0,03	28,76	1,51	3,48	0,26	1,11	0,05	
		50 wt. %	30,52	2,73	2,90	0,28	1,15	0,07	---	---	---	---	---	---	
	[0,300; 0,600]	20 wt. %	30,66	2,27	7,45	0,41	0,95	0,05	---	---	---	---	---	---	
		30 wt. %	29,22	0,71	8,52	0,36	0,83	0,03	42,86	1,47	3,97	0,26	1,48	0,11	
		40 wt. %	30,59	1,47	7,38	0,36	0,95	0,05	37,11	2,58	3,47	0,18	1,46	0,09	
		50 wt. %	34,94	2,24	4,13	0,38	1,10	0,03	38,23	2,68	3,24	0,20	1,54	0,02	
		60 wt. %	31,85	3,18	3,52	0,57	1,23	0,07	---	---	---	---	---	---	

Após apresentação e análise dos resultados obtidos, a escolha do material compósito para constituição do painel sanduíche final foi realizada com base nos melhores valores das propriedades de flexão (tensão de flexão, rigidez e deformação) e na consistência dos mesmos, tanto para a matriz de poliéster, como para a matriz de epóxi verde.

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que estes são alinhados com os dados encontrados na literatura, na medida em que os compósitos de matriz de poliéster apresentaram valores de rigidez superiores em comparação com os compósitos de matriz de epóxi verde que, por sua vez, apresentaram valores de tensão de flexão superiores (Cavalcanti *et al.*, 2021).

Neste sentido, mediante observação da Tabela 17, os materiais que correspondem aos melhores valores de tensão, rigidez e deformação são os constituídos por 30 wt. % de partículas de PETG de tamanhos [0,300; 0,600]mm, além de demonstrarem propriedades semelhantes entre as duas matrizes.

Na realidade, os materiais com esta percentagem em peso, apresentaram o melhor resultado e segundo melhor resultado de valores de tensão de flexão, para a matriz de poliéster e matriz de epóxi verde. Apesar de não ser o que apresentou melhor rigidez, os valores obtidos são consistentes em ambas as matrizes, o que não acontece, por exemplo para os materiais constituídos por 30 wt. % de partículas de PETG/PVC/PMMA de tamanhos [0,300; 0,600]mm que demonstrou um valor de rigidez bastante elevado em comparação com a matriz de poliéster de controlo e o melhor resultado de tensão para a matriz de epóxi verde. Contudo, os valores das propriedades de flexão para as duas matrizes demonstraram ser dispares.

Deste modo, considerando, portanto, a importância de selecionar um material cujas propriedades demonstraram ser satisfatórias, consistentes e equilibradas em ambas as matrizes, o material compósito selecionado para constituição do painel sanduíche final foi o núcleo reforçado com 30 wt. % de partículas de PETG de tamanhos [0,300; 0,600]mm, cujas propriedades são:

- Matriz de Poliéster: tensão de flexão: $38,26 \pm 3,80$ MPa; rigidez: $4,38 \pm 0,22$ GPa; deformação: $1,10 \pm 0,12\%$.
- Matriz de Epóxi Verde: tensão de flexão: $39,68 \pm 1,91$ MPa; rigidez: $4,28 \pm 0,28$ GPa; deformação: $1,34 \pm 0,07\%$.

7.2 Ensaio de Tração das Faces de HIPS

Com o intuito de testar mecanicamente as faces de HIPS utilizadas na produção do painel sanduíche, utilizou-se o ensaio de tração. Este é, na realidade, um ensaio importante no que diz respeito à caracterização de materiais quanto ao seu comportamento à tração, seja sob a forma de resistência à tração, deformação por tração, módulo de tração e coeficiente de *Poisson* (Mahato, Dutta and Ray, 2020).

No presente caso prático, este ensaio foi utilizado para determinar a resistência de tração aproximada, através do limite de escoamento (tensão máxima, σ_L) e do LRT, bem como a rigidez das faces, de modo a auxiliar na caracterização do painel sanduíche final, sendo, por isso, testados 5 provetes com a geometria “osso de cão”, tal como especificado pela Norma ASTM D638-14. Na Figura 64 apresentam-se as curvas tensão-deslocamento¹⁶ obtidas para cada um dos 5 provetes testados.

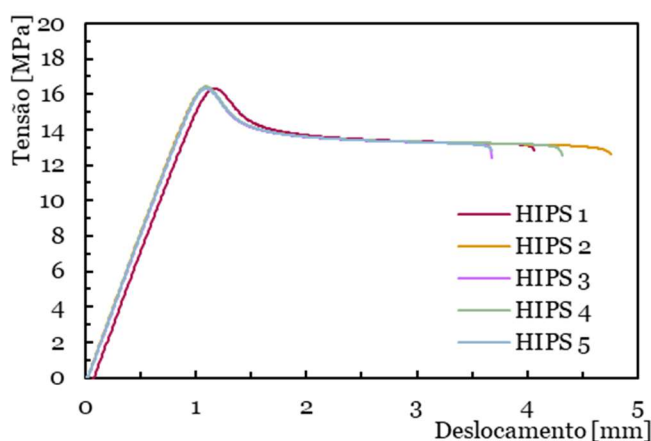


Figura 64 - Curvas tensão-deslocamento dos provetes de HIPS

Considerando a proximidade e similaridade das curvas tensão-deslocamento dos cinco provetes de HIPS testados (Figura 64), foi possível obter uma curva representativa tensão-deslocamento para o material polimérico testado, bem como os valores médios da tensão máxima e LRT, tal como apresentado na Figura 65.

¹⁶ Na generalidade, os ensaios de tração são conduzidos fazendo uso de medidores de deformação de contacto ou extensómetros, de forma a garantir a precisão da deformação ocorrida na zona de fratura do material (Song, Trivedi and Siviour, 2023). No entanto, no presente caso prático foi considerado o deslocamento médio registado pelo *software* de aquisição de dados como referência.

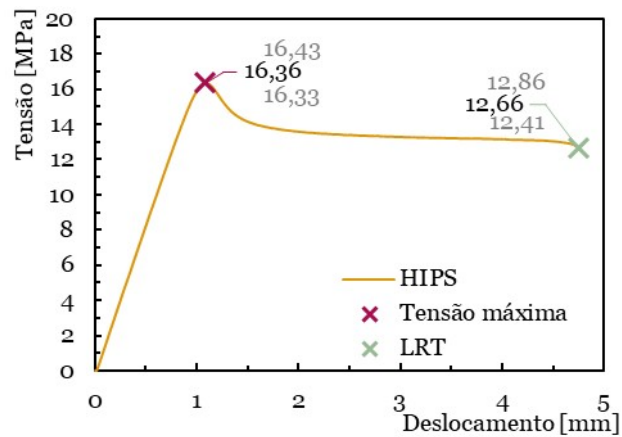


Figura 65 - Curva representativa tensão-deslocamento do HIPS

Mediante a aplicação do ensaio de tração ao HIPS, determinou-se, para o material em estudo, um valor de tensão máxima atingida após deformação elástica de $16,36 \pm 0,04$ MPa, bem como um LRT de $12,66 \pm 0,18$ MPa. Além disto, através do declive da curva na região elástica, determinou-se uma rigidez aproximada do HIPS de $1,92 \pm 0,01$ GPa. Deste modo, verifica-se que os valores determinados são condizentes com os valores mencionados na literatura, tal como sugere a informação apresentada na Tabela 8 da secção 4.1.

Além disto, o comportamento dúctil do HIPS quando sujeito a ensaios de tração é, analogamente, documentado na literatura, sendo a sua interpretação realizada com base na sua curva representativa que, por sua vez, se divide em duas partes distintas (Figura 65) (ElKori *et al.*, 2023). Isto é, num estágio inicial, à medida que a tensão ia aumentando, o material deformava-se elasticamente, até atingir o valor de tensão máxima de $16,36 \pm 0,04$ MPa, caracterizando, desta forma, o limite de escoamento, a partir do qual entrou no segundo estágio de deformação (Lopez and Ahmad, 2020; ElKori *et al.*, 2023; Poojitha *et al.*, 2023).

Deste modo, após atingir o limite de escoamento, a partir do qual se começou a deformar plasticamente, o HIPS evidenciou a capacidade de suportar mais tensão antes de ocorrer a rutura do material, sugerindo a sua considerável resistência à tração (Lopez and Ahmad, 2020; ElKori *et al.*, 2023; Poojitha *et al.*, 2023), sendo que, na realidade, a extensa deformação plástica do HIPS é justificada pelas partículas de borracha presentes na sua constituição que, por sua vez, transformam uma fratura que seria frágil, numa fratura mais dúctil (Alves, Ferreira and Pires, 2023).

No entanto, quando se trata de polímeros amorfos¹⁷, como é o caso do HIPS, o seu comportamento quando sujeitos a ensaios mecânicos é algo complexo, uma vez que é fortemente influenciado pelas condições de carga a que é sujeito, bem como outros fatores externos e intrínsecos do material (Alves, Ferreira and Pires, 2023). Nomeadamente, em ensaios de tração uniaxial, o processo de deformação não é, de todo, estável, visto que, antes de o material chegar à rutura, forma-se uma pequena zona de cisalhamento, caracterizada pela contínua propagação do dano ao longo do “pescoço” do provete (Song, Trivedi and Siviour, 2023).

De facto, durante a realização do ensaio de tração, foi possível observar o comportamento mencionado, verificando-se a formação de pequenos danos no “pescoço” do provete de HIPS, após o material se começar a deformar plasticamente, estando estas identificadas na Figura 66.

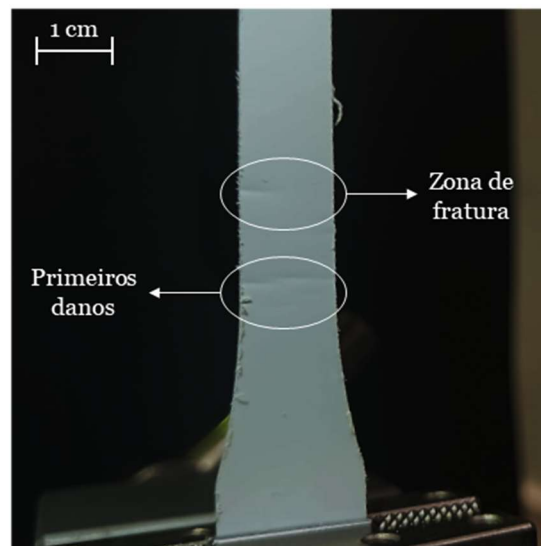


Figura 66 - Identificação dos primeiros danos e da zona de fratura do provete de HIPS

7.3 Ensaios de Flexão em Três Pontos do Painel Sanduíche

À semelhança dos materiais compósitos elegíveis para constituição do núcleo, foram realizados ensaios de flexão em três pontos aos painéis sanduíche fabricados, com vista a determinar a tensão de flexão da sanduíche, a tensão de flexão das faces e a tensão de corte do núcleo, assim como a rigidez dos painéis sanduíche.

¹⁷ Os polímeros amorfos são caracterizados por conterem uma estrutura atômica aleatória, na qual os átomos ocupam posições aleatórias sem ordem de longo alcance, ao passo que os materiais cristalinos possuem estruturas atômicas com posições espaciais distintas e organizadas (Wang and Duan, 2019).

Neste sentido, deste ensaio mecânico obtiveram-se as respetivas curvas representativas de cada um dos painéis sanduíche fabricados. Na Figura 67 apresentam-se as curvas tensão-deformação dos painéis sanduíche de núcleo de matriz de poliéster (a) e de matriz de epóxi verde (b), apresentando-se no eixo à esquerda a tensão de flexão das sanduíches e a tensão de flexão das faces e, no eixo à direita, a tensão de corte do núcleo.

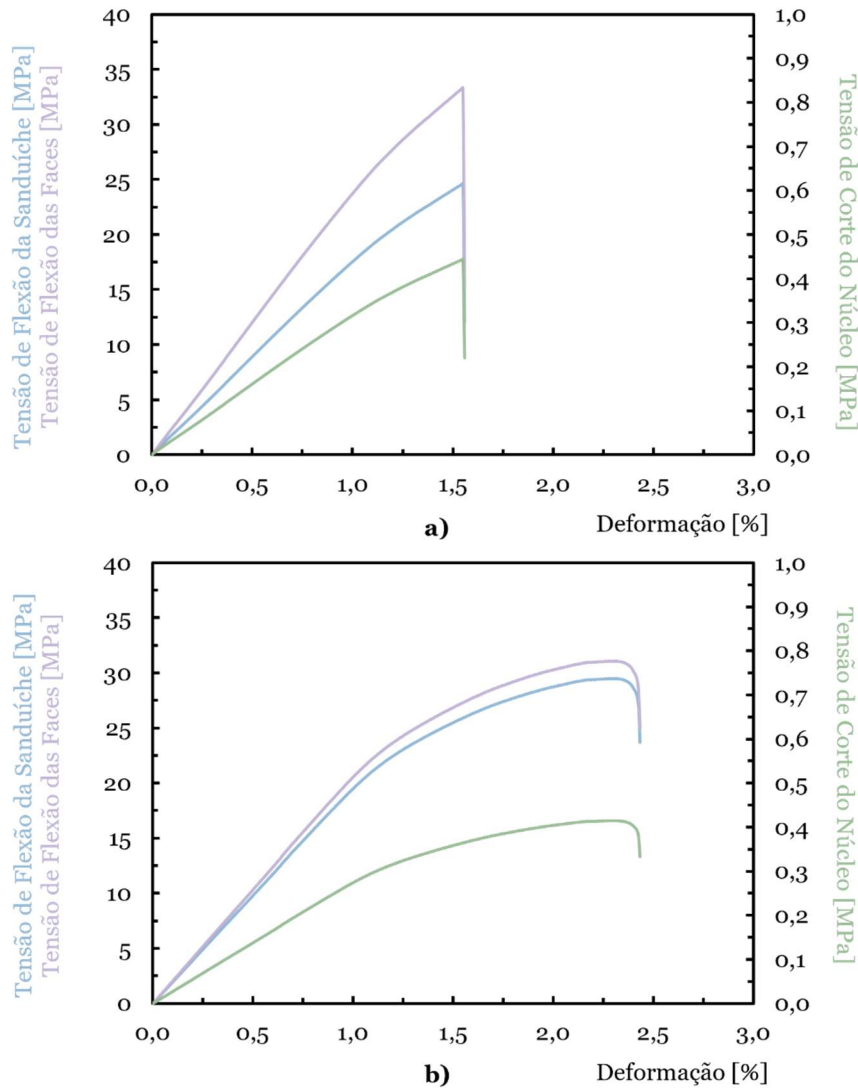


Figura 67 - Curvas de tensão-deformação dos Painéis Sanduíche: a) Núcleo de Matriz Poliéster; b) Núcleo de Matriz Epóxi Verde

As curvas de tensão-deformação apresentadas na Figura 67, dão a conhecer o comportamento mecânico de cada um dos painéis sanduíche fabricados. De facto, à semelhança das matrizes de controlo, o painel sanduíche de matriz poliéster evidenciou um comportamento mecânico frágil, em comparação com o painel sanduíche de matriz epóxi verde, cujo comportamento mecânico demonstrou ser mais dúctil (Harizi *et al.*, 2021).

Na realidade, as diferenças de comportamento mecânico de cada um dos materiais, refletem-se nos valores de deformação, sendo este superior para o painel sanduíche de núcleo de matriz epóxi verde que, por sua vez, demonstrou apresentar uma curvatura da região plástica bastante mais acentuada do que o painel sanduíche de núcleo de matriz poliéster.

Além disto, importa realçar os valores de rigidez obtidos e a sua comparação com os valores de rigidez de cada um dos núcleos em separado. Na Figura 68 apresenta-se a comparação entre os valores de rigidez dos núcleos e dos painéis sanduíche.

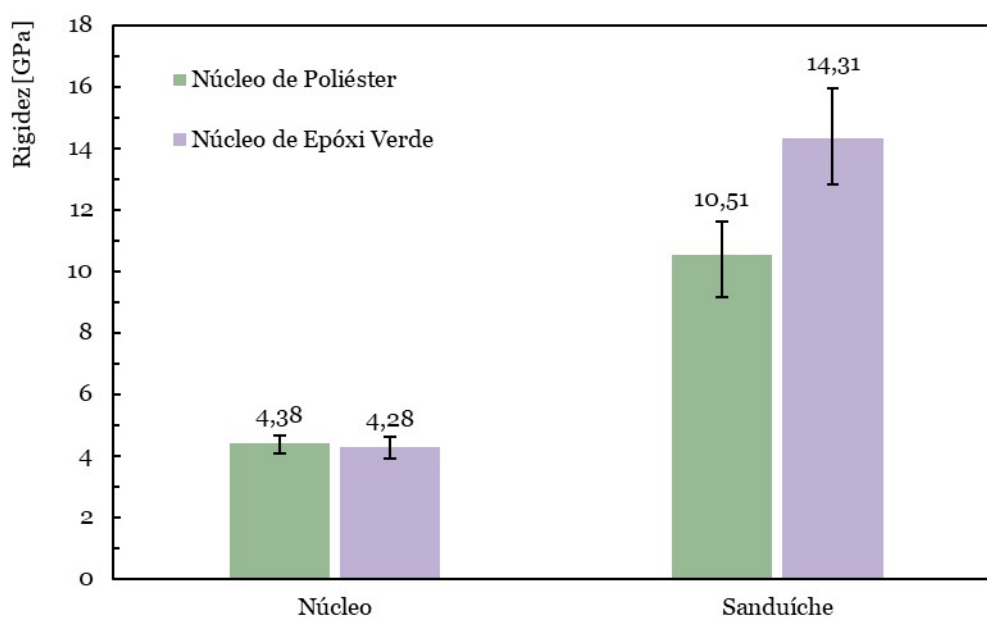


Figura 68 - Comparação entre os valores de rigidez dos núcleos e dos painéis sanduíche finais

Comparando os valores de rigidez obtidos para os núcleos reforçados com 30 wt. % de partículas de PETG de tamanhos [0,300; 0,600]mm e os valores de rigidez dos painéis sanduíche constituídos por este mesmo núcleo e por faces de HIPS, constatou-se um aumento significativo de cerca de 139,95% para a sanduíche de núcleo de matriz poliéster e de 234,35% para a sanduíche de núcleo de matriz epóxi verde.

De facto, a rigidez do painel sanduíche depende, diretamente, da rigidez do núcleo, visto que, um núcleo mais rígido, permite reduzir a probabilidade de a sanduíche apresentar falhas por indentação (deformação permanente). Como neste caso prático os núcleos são caracterizados como sendo frágeis, a resistência dos mesmos irá influenciar a capacidade de carga que os painéis sanduíche conseguirão suportar, justificando, desta forma os resultados semelhantes entre a tensão de flexão do painel sanduíche de núcleo de matriz poliéster e de matriz epóxi verde (Islam *et al.*, 2025). Na Tabela 18 apresentam-se os

resultados obtidos com a aplicação do ensaio de flexão em três pontos aos painéis sanduíche fabricados.

Tabela 18 - Resultados do Ensaio de Flexão em Três Pontos dos Painéis Sanduíche

	Núcleo de Matriz Poliéster	Núcleo de Matriz Epóxi Verde
Tensão de Flexão da Sanduíche [MPa]	25,19 ± 2,00	29,84 ± 1,10
Tensão de Corte do Núcleo [MPa]	0,44 ± 0,04	0,43 ± 0,02
Tensão de Flexão das Faces [MPa]	33,14 ± 2,91	32,24 ± 1,45
Rigidez [GPa]	10,51 ± 1,08	14,31 ± 1,31
Deformação [%]	1,51 ± 0,11	2,10 ± 0,23

Através dos resultados apresentados na Tabela 18, observa-se a existência de similaridade entre os valores obtidos para as sanduíches, nomeadamente na tensão de corte do núcleo e na tensão de flexão das faces, cujos valores obtidos para o painel sanduíche de núcleo de matriz poliéster foram $0,44 \pm 0,04$ MPa e $33,14 \pm 2,91$ MPa, respetivamente e, para o painel sanduíche de núcleo de matriz epóxi verde foram $0,43 \pm 0,02$ MPa e $32,24 \pm 1,45$ MPa.

Contudo, o valor máximo de tensão de flexão do painel sanduíche de núcleo de matriz de epóxi verde ($29,84 \pm 1,10$ MPa) demonstrou ser ligeiramente superior ao da sanduíche de núcleo de matriz de poliéster ($25,19 \pm 2,00$ MPa), tal como ocorreu na caracterização dos núcleos na secção 7.1.

Não obstante o aumento da rigidez, a tensão de flexão obtida para os painéis sanduíche apresentou um decréscimo face aos valores de tensão de flexão obtidos para os núcleos de forma isolada, podendo este comportamento ser justificado por diversos fatores documentados na literatura (Gaur, Aggarwal and Kumar, 2021; Harizi *et al.*, 2021; Kumar, Chanda and Angra, 2021; Islam *et al.*, 2025).

Os principais fatores que influenciam o comportamento mecânico e os modos de falha de um painel sanduíche, são as propriedades mecânicas e a geometria dos seus constituintes (núcleo e faces). Deste modo, tanto as propriedades, como a espessura do núcleo podem influenciar substancialmente as propriedades do painel sanduíche, seja tensão ou rigidez, sendo documentado que pequenas modificações na espessura dos núcleos permitem aumentar substancialmente os valores de rigidez das sanduíches (Harizi *et al.*, 2021).

Na realidade, quando comparadas as espessuras dos materiais compósitos produzidos inicialmente ($3,18 \pm 0,17$ mm para a matriz poliéster e $2,90 \pm 0,11$ mm para a matriz epóxi

verde), verificou-se um aumento de 48,43% e 11,72% nas espessuras dos núcleos que constituem os painéis sanduíches finais, respetivamente.

No entanto, as propriedades das faces e a espessura das mesmas, bem como a boa adesão com o núcleo, representam fatores fundamentais no desempenho mecânico dos materiais compósitos, assumindo, juntamente com o núcleo, a função importante de conferir rigidez ao painel sanduíche, sendo considerado, na generalidade que espessuras superiores melhoram as propriedades mecânicas dos painéis sanduíches finais (Gaur, Aggarwal and Kumar, 2021; Harizi *et al.*, 2021; Kumar, Chanda and Angra, 2021; Geramizadeh, Dariushi and Salami, 2022).

Do mesmo modo, os materiais mais comuns utilizados como faces de painéis sanduíche são polímeros reforçados com diversos tipos de fibras, como fibras de vidro (Mazzuca, 2024, 2024; Z. Yan *et al.*, 2024), de carbono (Le, Jin and Goo, 2022; Zhou *et al.*, 2023; W. Zhao *et al.*, 2025), de aramida (Mahesh, Joladarashi and Kulkarni, 2021b; Keerthana *et al.*, 2024) e, mais recentemente, a utilização de fibras naturais tornou-se igualmente popular, devido às suas propriedades (Laraba *et al.*, 2022; Ajayi, Pandurangan and Krishnan, 2024; Ravishankar *et al.*, 2024). Além disto, como parte externa têm sido utilizadas faces metálicas (Forcellese and Simoncini, 2020; Khardin *et al.*, 2020) e, em determinadas aplicações mais económicas e versáteis, faces termoplásticas (Islam *et al.*, 2025).

Apesar de, na literatura, não ser fortemente documentado a utilização de placas de materiais poliméricos como faces de painéis sanduíche, um estudo realizado por Islam *et al.* (2025), demonstrou que a utilização de placas de PET como faces de sanduíches de núcleos poliméricos, proporcionou um aumento das propriedades mecânicas dos núcleos, mais especificamente da rigidez, assim como a diminuição dos modos de falha. Assim, de forma análoga, a utilização de faces de HIPS na constituição dos painéis sanduíche finais, pode ter influenciado fortemente as propriedades mecânicas dos núcleos em separado, considerando que, este material polimérico, apresenta propriedades mecânicas características (presentes na Tabela 8, da secção 4.1), proporcionadas pelas partículas de polibutadieno presentes na sua constituição (El Bhilat *et al.*, 2021; Giakoumakis *et al.*, 2024).

Além disto, quando aplicadas tensões superiores àquelas que o material consegue suportar, a sanduíche apresenta modos de falha, documentados em literatura, como rugas nas faces externas, fratura das faces, separação entre as faces e o núcleo (delaminação), cisalhamento do núcleo, bem como indentação do núcleo e/ou das faces (Geramizadeh, Dariushi and

Salami, 2022). Desta forma, nos painéis sanduíche fabricados foram identificados alguns modos de falha, após realização dos ensaios de flexão em três pontos, ocorridos no momento de cedência do material.

Os principais modos de falha identificados foram, essencialmente, delaminação, sob a forma de separação entre as faces externas dos painéis sanduíche e os respectivos núcleos, sendo esta mais evidente nas sanduíches de núcleo de matriz poliéster. Adicionalmente, verificou-se a existência de propagação do dano ao longo do painel, fraturando a face inferior da sanduíche (face contrária à aplicação de tensão). Na Figura 69 apresentam-se os modos de falha ocorridos em ambos os painéis sanduíche fabricados.

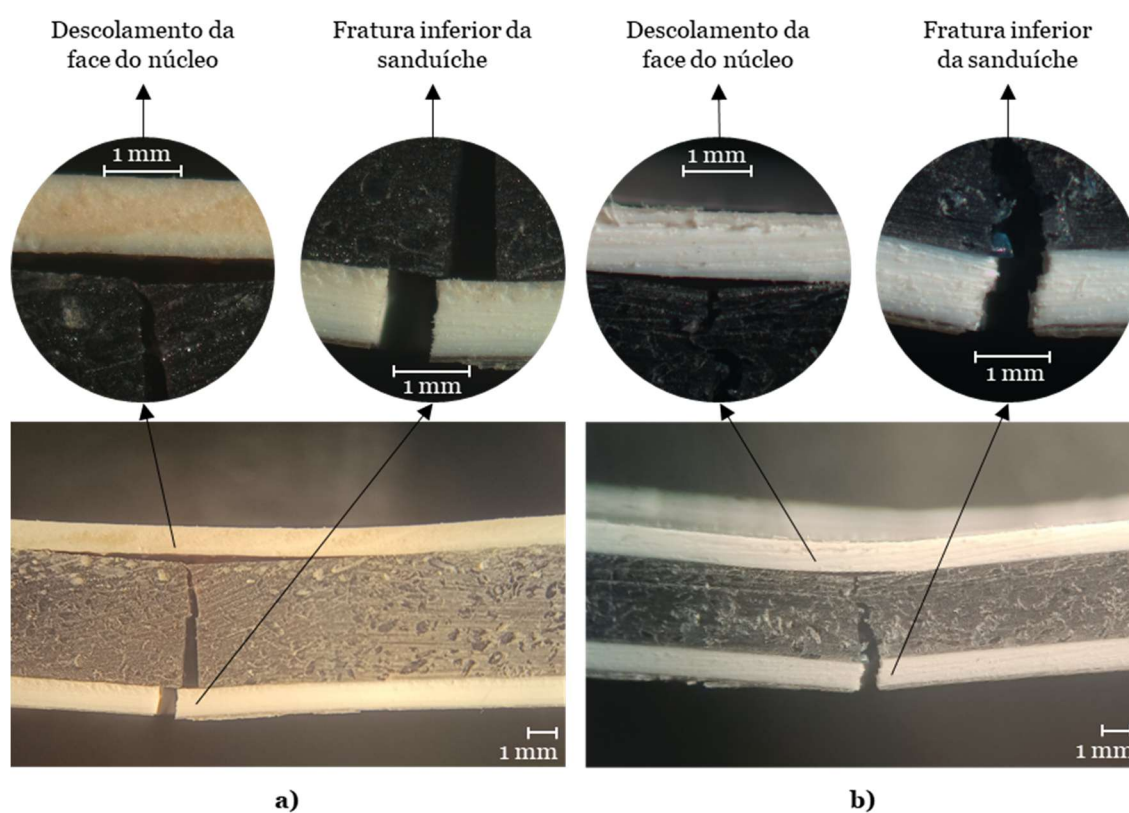


Figura 69 - Modos de Falha dos Painéis Sanduíche (Ensaio de Flexão em Três Pontos): a) Núcleo de Matriz Poliéster; b) Núcleo de Matriz Epóxi Verde

7.4 Ensaios de Impacto de Baixa Velocidade da Sanduíche

A percepção da resistência ao impacto dos painéis sanduíche fabricados, obtida através da aplicação de ensaios de impacto de baixa velocidade, permitiu, neste caso prático, agregar conhecimento do suporte de carga estrutural que os materiais produzidos conseguem suportar. Com efeito, primeiramente, foram aplicadas energias de impacto de 1J, 2J, 3J e 4J aos painéis sanduíche de núcleo de matriz poliéster e de matriz epóxi verde, ambos

reforçados com partículas de PETG de tamanhos [0,300; 0,600[mm, obtendo-se as curvas representativas Energia - Tempo, apresentadas na Figura 70.

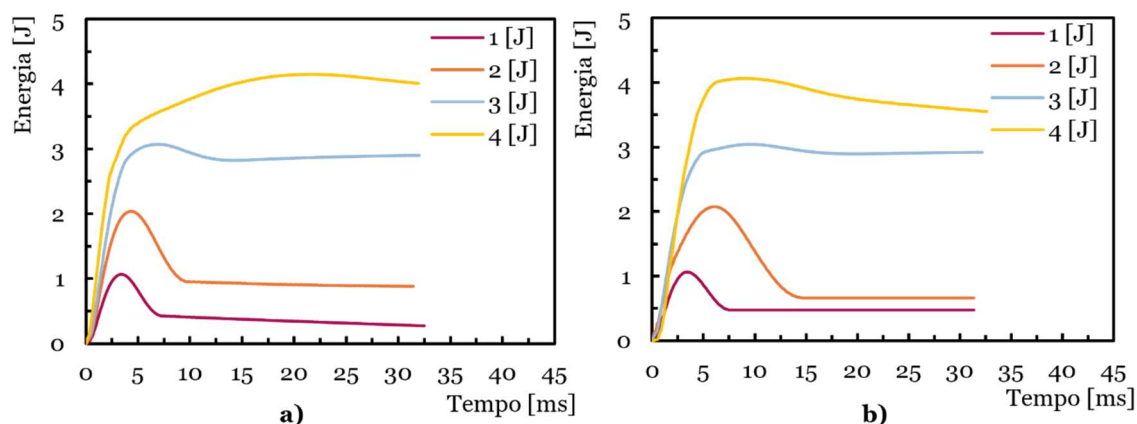


Figura 70 - Curvas Representativas Energia vs. Tempo: a) Núcleo de Matriz Poliéster; b) Núcleo de Matriz Epóxi Verde

Observando o comportamento dos painéis sanduíche representado pelas curvas energia-tempo apresentadas na Figura 70, verificou-se que, para as energias de 1J, 2J e 3J existiu recuperação do material após o impacto, ao passo que, para a energia de 4J, ocorreu a perfuração completa da sanduíche de núcleo de matriz de poliéster, enquanto a sanduíche de núcleo de matriz de epóxi verde demonstrou uma pequena recuperação.

Na realidade, ambos os materiais compósitos evidenciaram maior capacidade de recuperação após submetidos a energias de 1J e 2J, caracterizados pela energia elástica registada para essas energias. Para a sanduíche de núcleo de matriz de poliéster as energias elásticas registadas para energias de impacto de 1J e 2J foram de 58,20% e 53,81%, enquanto para a sanduíche de núcleo de matriz de epóxi verde foram de 54,62% e 61,81%, respetivamente.

Deste modo, apesar dos materiais apresentarem comportamentos semelhantes quando sujeitos a energias de impacto inferiores, salienta-se que a sanduíche com núcleo de matriz de epóxi verde apresenta maior resistência ao impacto e maior capacidade de recuperação do que a sanduíche de núcleo de matriz de poliéster, sendo este comportamento sustentado pela diferença de comportamento quando submetidos a energias de impacto superiores (3J e 4J), cujo valores para a sanduíche de núcleo de matriz poliéster foi de 9,79%, não se verificando recuperação para a energia de 4J e, para a sanduíche de núcleo de matriz epóxi verde foi de 41,09% e 10,64%, respetivamente.

As diferenças de comportamento entre cada um dos painéis sanduíche são evidentes para uma energia de impacto de 2J, nomeadamente no que diz respeito às forças máximas e deslocamentos máximos determinados para cada um dos materiais. Neste sentido, na Figura 71 apresentam-se as curvas representativas força-tempo e força-deslocamento para a energia de impacto de 2J. De modo a facilitar a compreensão e fornecer conhecimento do comportamento de cada material, as restantes curvas representativas para todas as energias poderão ser consultadas no Anexo II.

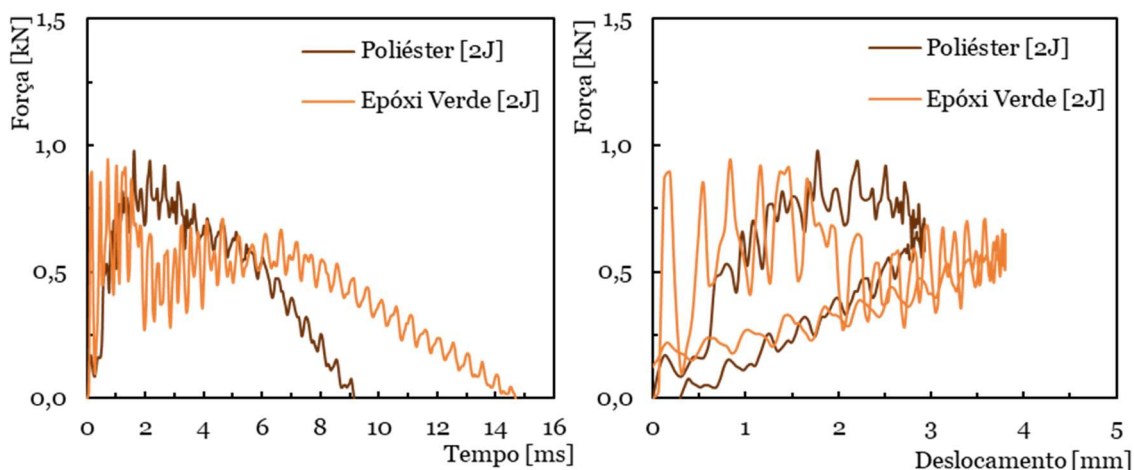


Figura 71 - Comparação entre as sandúches de núcleos de Matriz Poliéster e de Matriz Epóxi Verde para a energia de impacto de 2J: a) Curva Representativa Força-Tempo; b) Curva Representativa Força-Deslocamento

Mediante análise dos gráficos apresentados na Figura 71, é possível perceber a disparidade de comportamentos de cada um dos painéis sandúches quando submetidos a uma energia de impacto de 2J. De facto, pela curva força-tempo (Figura 71 a), são evidenciadas pequenas oscilações antes de ser atingida a força máxima, sendo possível observar que, a sandúche de núcleo de matriz de epóxi verde atingiu o seu pico de força máxima antes da sandúche de núcleo de matriz de poliéster.

Deste modo, o pico de força máxima que antecede a queda da carga aplicada, diz respeito à força necessária para que sejam verificados danos na face superior do painel sandúche, impulsionados pela queda do impactador e respetivo contacto com o material (Mack *et al.*, 2024). Contudo, verifica-se que, para a sandúche de núcleo de matriz de epóxi verde, ocorreu um segundo pico de força que, mesmo sendo claramente inferior ao primeiro pico de força, está relacionado com a propagação dos danos ocorridos no núcleo para a face inferior (Mack *et al.*, 2024). Desta forma, na Figura 72 apresenta-se a identificação dos picos de força ocorridos ao longo do ensaio de impacto de baixa velocidade.

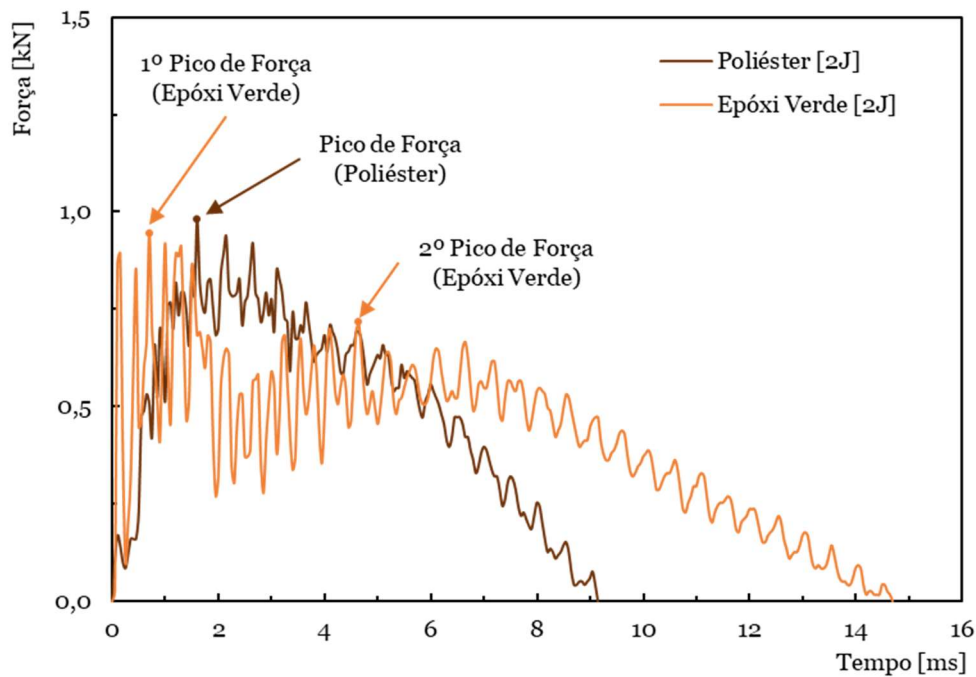


Figura 72 - Identificação dos Picos de Força registados para a energia de impacto de 2J

Adicionalmente, os deslocamentos máximos obtidos para a energia de impacto de 2J, demonstraram disparidade entre si (Figura 71 b). De facto, tal como mencionado aquando da apresentação do ensaio mecânico em questão (secção 6.5.1), o momento em que é registado o deslocamento máximo ocorrido, não corresponde ao pico de força máxima, mas sim a uma mudança de comportamento da curva força-deslocamento, sendo que, para ambos os materiais compósitos ocorreu a recuperação parcial dos mesmos, evidenciando-se indentação permanente na face superior, bem como alguns danos (microfissuras) no núcleo e face inferior do material (Shah *et al.*, 2019; Mack *et al.*, 2024).

Os principais danos identificados nos painéis sanduíche foram, de facto, pequenas fissuras nas faces, nomeadamente na face superior onde se identificou o local de contacto do impactador, bem como na face inferior, sendo este último mais evidente para a sanduíche de núcleo de matriz de poliéster. Além disto, em ambas as sanduíches se verificou a propagação do dano pelo núcleo, salientando-se, na sanduíche de núcleo de matriz de epóxi verde, o dano provocado no núcleo, por baixo da face superior onde ocorreu o impacto. Na verdade, aparentemente, este material não teria sofrido danos significativos exteriores. Desta forma, na Figura 73 apresentam-se os danos identificados nos painéis sanduíche para uma energia de impacto de 2J.

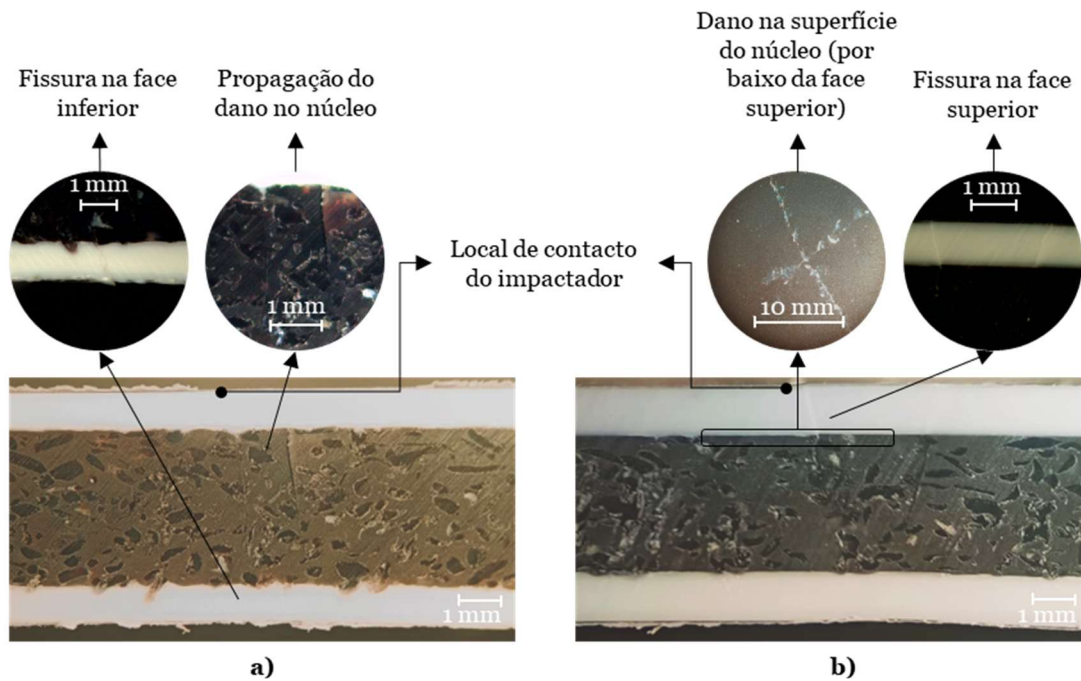


Figura 73 - Identificação dos danos ocorridos nas sanduíches para a energia de impacto de 2J: a) Núcleo de Matriz Poliéster; b) Núcleo de Matriz Epóxi Verde

Tal como mencionado anteriormente, na Figura 74 apresenta-se a identificação dos pontos de deslocamento máximo das curvas força-deslocamento, obtidas para as sanduíches de núcleo de matriz poliéster e de matriz epóxi verde.

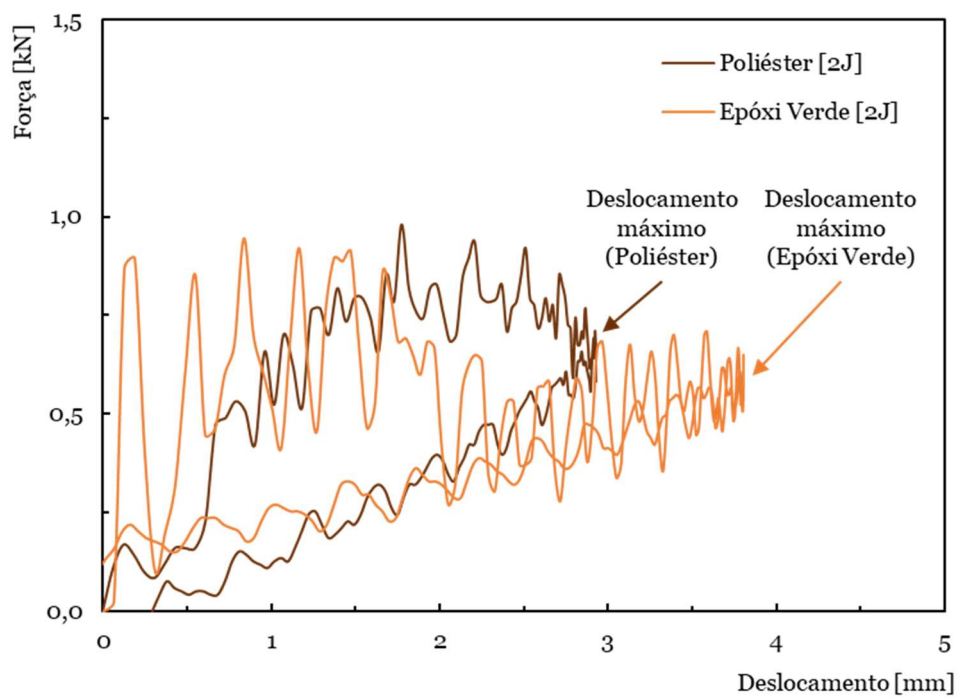


Figura 74 - Identificação dos deslocamentos máximos registados para a energia de impacto de 2J

No entanto, embora a identificação da força máxima e do deslocamento máximo de cada sanduíche seja necessária, importa realçar outras propriedades de impacto determinadas e mencionadas na secção 6.5.1. Assim, partindo do declive da linha de tendência desde o início do ensaio até que a força máxima foi atingida, determinou-se o IBS, que representa a rigidez à flexão das sanduíches sujeitas a impacto, podendo afirmar-se que este diminui à medida que a energia de impacto aumenta. Por conseguinte, de forma a facilitar a análise dos resultados obtidos, na Tabela 19 apresentam-se os valores médios de cada uma das propriedades determinadas (Força Máxima, Deslocamento Máximo, Energia Restituída, Energia Elástica e IBS) com a aplicação dos ensaios de impacto de baixa velocidade, considerando a energia de impacto.

Tabela 19 - Valores Médios do Ensaio de Impacto de Baixa Velocidade

Material da Matriz	Energia de impacto [J]	Força Máxima [kN]	Deslocamento máximo [mm]	Energia Restituída [J]	Energia Elástica [%]	IBS [kN/mm]
Poliéster	1	0,98 ± 0,14	1,91 ± 0,22	0,63 ± 0,01	58,20 ± 2,58	0,64 ± 0,30
	2	1,00 ± 0,04	3,00 ± 0,06	1,11 ± 0,09	53,81 ± 4,49	0,48 ± 0,08
	3	1,01 ± 0,10	5,47 ± 1,03	0,30 ± 0,21	9,79 ± 6,61	0,47 ± 0,11
	4	---	---	---	---	0,44 ± 0,08
Epóxi Verde	1	0,70 ± 0,22	2,25 ± 0,70	0,60 ± 0,05	54,62 ± 1,81	0,63 ± 0,40
	2	0,83 ± 0,23	4,08 ± 0,60	1,29 ± 0,26	61,81 ± 12,05	0,36 ± 0,06
	3	0,85 ± 0,06	5,50 ± 0,80	1,27 ± 0,24	41,09 ± 8,23	0,26 ± 0,21
	4	0,89 ± 0,24	8,91 ± 3,80	0,43 ± 0,55	10,64 ± 13,45	0,21 ± 0,17

Analisando os valores médios das propriedades de impacto apresentados na Tabela 19, é possível prever e constatar o comportamento do material quando submetido a diferentes energias de impacto, aferindo a respetiva resistência ao impacto. Na realidade, combinando a observação da Tabela 19 com os gráficos apresentados na Figuras 70 e 71, é possível perceber que a força máxima registada, para ambos os materiais, aumenta, à medida que a energia de impacto aumenta. Isto é, para a sanduíche de núcleo de matriz de poliéster, verificam-se forças máximas de 0,98 ± 0,14 kN, 1,00 ± 0,04 kN e 1,01 ± 0,10 kN para as energias de impacto de 1J, 2J e 3J, respetivamente, evidenciando-se aumentos de 2,04% e 1,00% entre os picos de força.

De facto, o mesmo se verificou para a sanduíche de núcleo de matriz de epóxi verde, cujos valores de força máxima para as energias de 1J, 2J, 3J e 4J foram de 0,70 ± 0,22 kN, 0,83

$\pm 0,23$ kN, $0,85 \pm 0,06$ kN e $0,89 \pm 0,24$ kN, apresentando aumentos de 18,57%, 2,41% e 4,71%, respetivamente.

Aliado ao aumento dos valores médios da força máxima, observou-se que, à medida que a energia de impacto era superior, os valores dos deslocamentos máximos registados aumentavam, uma vez que, quanto maior a energia de impacto, maior era penetração do impactador no material, proporcionando deslocamentos maiores, já que este é caracterizado pela distância que o impactador percorre desde que entra em contacto com o material até ao momento que retorna à origem, sendo este comportamento documentado em literatura para outros materiais sujeitos a ensaios de impacto (Ozdemir, Oztoprak and Kandas, 2018; Goodarz *et al.*, 2019; Tuo *et al.*, 2019; Mack *et al.*, 2024; Akbolat *et al.*, 2025).

Por conseguinte, considerando a relação existente entre a força máxima e o deslocamento ocorrido durante o ensaio (cujas curvas representativas poderão ser consultadas no Anexo II), a área sob a curva força-deslocamento representa a energia absorvida pelos painéis sanduíche, sendo possível deduzir que, para energias de impacto superiores, a energia absorvida é igualmente maior (Shah *et al.*, 2019). Ou seja, se a energia absorvida pelos painéis sanduíche é superior, então a fração de energia elástica, correspondente à recuperação do material, diminui à medida que a energia de impacto aumenta, visto que os painéis sanduíche começam a ceder para energias de impacto superiores, até ao momento em que ocorre a total penetração, como se verificou para o painel sanduíche de núcleo de matriz de poliéster para a energia de impacto de 4J (Goodarz *et al.*, 2019; Shah *et al.*, 2019).

Na Figura 75 apresenta-se a comparação entre a energia restituída pelos painéis sanduíche de núcleos de matriz poliéster e de matriz epóxi verde, na qual é possível observar a evolução da energia restituída após o impacto que, aumentando para uma energia de impacto de 2J, diminui para energias de impacto de 3J e 4J, sendo este comportamento semelhante para os dois painéis sanduíche. Além disto, prevê-se que, considerando as propriedades dos materiais desenvolvidos e os resultados obtidos para as energias de impacto de 1J, 2J, 3J e 4J, as energias de perfuração para os painéis sanduíche de núcleo de matriz de poliéster e matriz de epóxi verde são, aproximadamente, 3,35J e 4,55J, respetivamente. Para facilitar a análise e compreensão dos resultados, as restantes comparações apresentam-se no Anexo II.

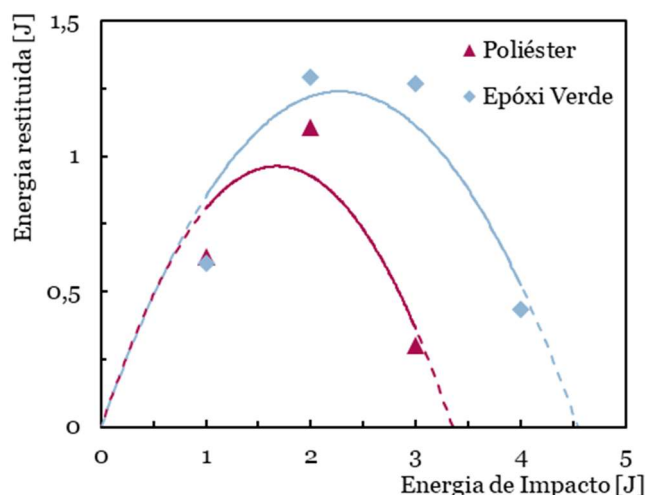


Figura 75 - Comparação entre a Energia restituída e a Energia de Impacto

No entanto, como se pode verificar pela comparação apresentada na Figura 75, para ambos os painéis sanduíche, quer de núcleo de matriz de poliéster quer de núcleo de matriz de epóxi verde, o comportamento descrito anteriormente relativo à variação da energia restituída em função da energia de impacto, apenas se verificou a partir da energia de impacto de 2J, verificando-se que entre a energia de 1J e de 2J ocorreu precisamente o contrário, ou seja, a energia restituída aumentou. O referido comportamento pode ser justificado por diversos fatores como as propriedades da matriz, uma vez que matrizes termoendurecíveis (como é o caso da matriz de poliéster e da matriz de epóxi verde) apresentam menor capacidade de absorção de energia e menor tempo de contacto em comparação com matrizes termoplásticas (Pai, Pai and Kini, 2021).

Além disto, aumentando a energia de impacto, observou-se que o tempo de contacto entre o material e o impactador aumentou, como seria esperado. Assim, associado ao pico de força máxima, a rigidez de flexão do material correspondia a quanto maior ou menor fosse o declive da curva força-deslocamento. Isto é, para energias de impacto inferiores, nas quais o tempo de contacto e a força máxima são inferiores, o IBS é superior, diminuindo à medida que a energia de impacto aumenta. Na verdade, os valores obtidos para o IBS dão conhecimento da rigidez da face superior, diminuindo à medida que o dano ocorre de forma mais brusca e repentina (Mack *et al.*, 2024).

Na Figura 76 apresenta-se a comparação entre a rigidez dos painéis sanduíche de núcleos de matriz poliéster e de matriz epóxi verde, na qual é possível observar a evolução deste valor em função da energia de impacto.

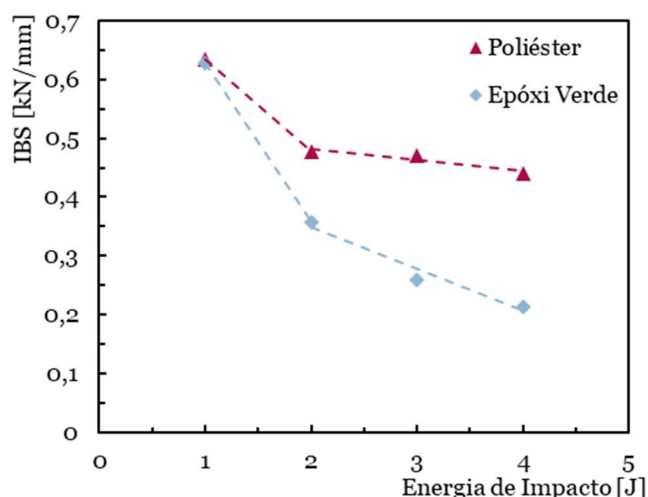


Figura 76 - Comparação entre o IBS e a Energia de Impacto

Observando os valores médios da Tabela 19 e o gráfico de comparação apresentado na Figura 76, evidencia-se uma clara tendência em ambos os painéis sanduíche, revelando que, o IBS diminui à medida que a energia de impacto aumenta, verificando-se a maior redução da energia de 1J para a energia de 2J (cerca de 25,00% e 42,86% para os painéis sanduíche de núcleos de matriz poliéster e de matriz epóxi verde, respectivamente), correspondendo à energia a partir da qual se identificavam danos proeminentes nas faces de HIPS. A variação entre as restantes energias de impacto (2J, 3J e 4J) demonstraram ser menores, com maior tendência de redução para a sanduíche de núcleo de matriz de epóxi verde.

Para mais, verifica-se que os valores de rigidez para a sanduíche de núcleo de matriz de poliéster (1J - $0,64 \pm 0,30$ kN/mm; 2J - $0,48 \pm 0,08$ kN/mm; 3J - $0,47 \pm 0,11$ kN/mm; 4J - $0,44 \pm 0,08$ kN/mm) demonstraram ser superiores em comparação com os valores para o painel sanduíche de núcleo de matriz de epóxi verde (1J - $0,63 \pm 0,40$ kN/mm; 2J - $0,36 \pm 0,06$ kN/mm; 3J - $0,26 \pm 0,21$ kN/mm; 4J - $0,21 \pm 0,17$ kN/mm), apesar de para a energia de impacto de 1J serem similares.

Deste modo, é possível aferir que o painel sanduíche de núcleo de matriz de poliéster apresenta maior resistência ao impacto do que o painel sanduíche de núcleo de matriz de epóxi verde, sendo este comportamento condizente com a literatura existente, na qual foram testados materiais compósitos de matriz poliéster e epóxi reforçados com outros materiais (Cavalcanti *et al.*, 2021).

Após realização dos ensaios de impacto de baixa velocidade, verificou-se a existência de danos nos painéis sanduíche, provenientes do impacto ocorrido entre o material e o impactador. Os danos ocorridos são descritos na literatura como delaminação, fissuração

do núcleo e das faces, seja sob a forma de micro ou macro fissuras, fratura das faces, bem como penetração do painel sanduíche para níveis de energia mais elevados (Mack *et al.*, 2024; Taheri and Llanos, 2024).

Na realidade, para níveis de energia inferiores (1J e 2J), os danos ocorridos demonstraram ser praticamente impercetíveis, dificultando a sua identificação nas faces exteriores. Contudo, para energias de impacto mais elevadas (3J e 4J), os danos tornaram-se evidentes, verificando-se a existência de indentação permanente no local de contacto do impactador com as sanduíches, bem como fissuras nas faces inferiores (opostas à zona de impacto), ocorrendo, inclusive, fratura da face superior nos painéis sanduíches de núcleo de matriz de poliéster. Na Figura 77 apresentam-se os danos identificados nas faces exteriores de HIPS dos painéis sanduíche, para a energia de impacto de 3J.

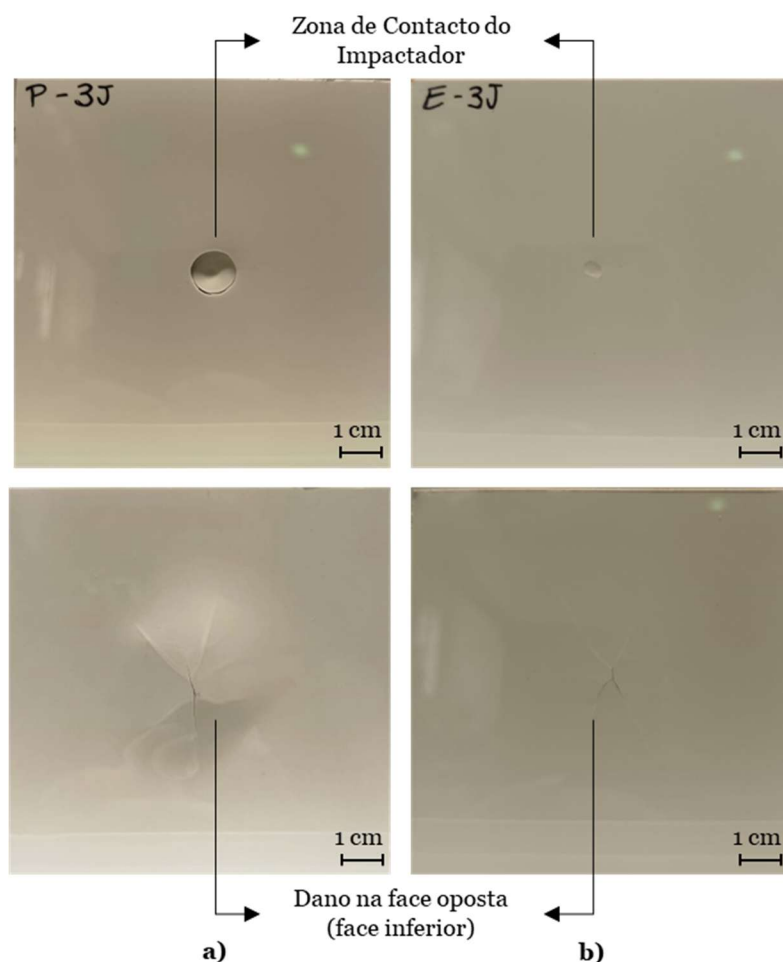


Figura 77 – Danos ocorridas nas faces exteriores dos painéis sanduíche para a energia de impacto de 3J: a) Núcleo de Matriz Poliéster; b) Núcleo de Matriz Epóxi Verde

De facto, mediante observação da Figura 77, é possível perceber que os danos ocorridos foram notoriamente superiores nos painéis sanduíche de núcleo de matriz de poliéster, tal

como seria expectável, dado que este apresentou uma energia elástica menor ($9,79 \pm 6,61$ %), em comparação com o painel sanduíche de matriz de epóxi verde ($41,09 \pm 8,23$ %). Além disto, quando observados os danos internos ocorridos em ambos os painéis sanduíche, percebeu-se a fratura proeminente do núcleo de matriz poliéster, desde a zona de impacto, até à face inferior, enquanto para a sanduíche de núcleo de matriz epóxi verde se evidenciou a indentação permanente da face superior, a fissuração do núcleo e a delaminação entre a face inferior e o núcleo.

Deste modo, na Figura 78 apresenta-se a identificação dos danos internos provenientes dos ensaios de impacto de baixa velocidade, aplicados aos painéis sanduíche fabricados.

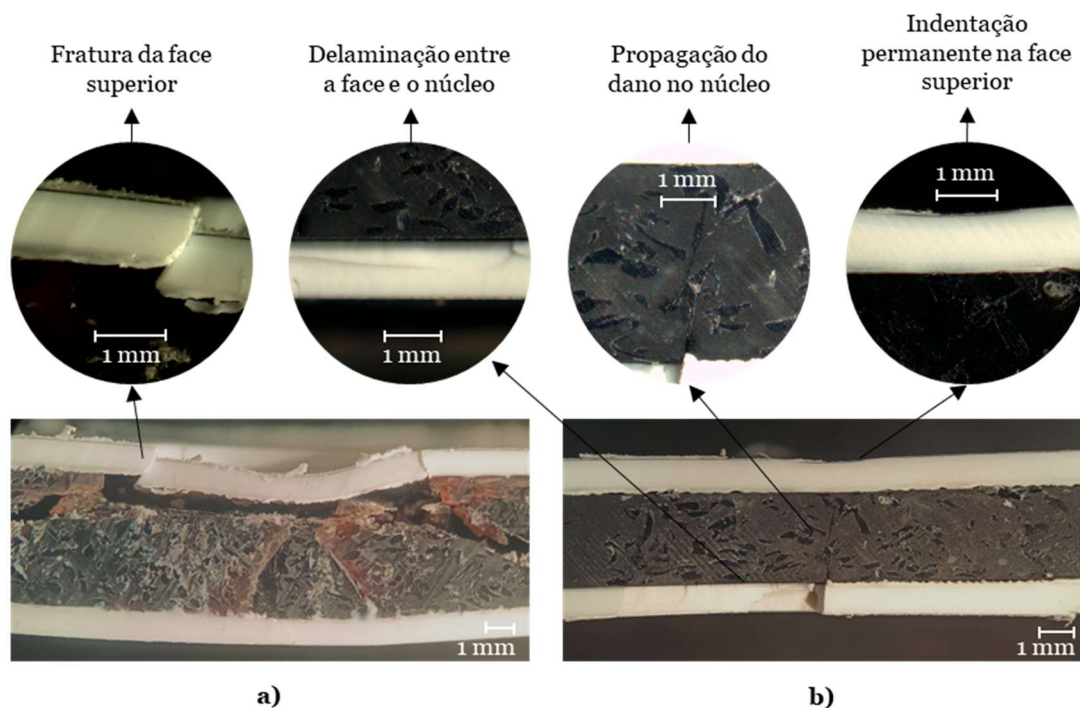


Figura 78 - Identificação dos danos internos ocorridos nas sanduíches para a energia de impacto de 3J: a) Núcleo de Matriz Poliéster; b) Núcleo de Matriz Epóxi Verde

7.5 Custos de Produção

A determinação dos custos de produção do material desenvolvido, torna-se relevante, na medida em que permite um adequado estudo da sua viabilidade e determinação de possíveis aplicações, nomeadamente quando efetuado em função das propriedades mecânicas do mesmo. Além disto, através do conhecimento dos custos de produção é possível comparar os dois materiais desenvolvidos, permitindo, desta forma, a sua avaliação na generalidade.

Por conseguinte, os custos de produção dos painéis sanduíche fabricados, foram determinados mediante inclusão dos custos da matéria-prima (MP), configurados pelo

conjunto de resina e endurecedor, considerando a resina de poliéster e a resina de epóxi verde, bem como as partículas de PETG e as placas de HIPS utilizadas nas faces dos painéis sanduíche. Por sua vez, as partículas poliméricas e as placas de HIPS foram obtidas de forma gratuita, dado serem resíduos industriais com vista à reutilização.

Adicionalmente, consideraram-se os gastos de energia provenientes da utilização do agitador de peneiras vibratório e da estufa, bem como os custos de mão de obra. Na realidade, os custos de mão de obra são estimados com base no tempo de fabricação de um painel sanduíche de 0,04 m² (1,5 horas) e, considerando que para uma sanduíche de 1 m², seriam adaptados os materiais utilizados, estimando-se um tempo de produção de 4 horas, já que o tempo de cura não depende da dimensão do material, estando este concentrado na obtenção das partículas de menor tamanho e na preparação do núcleo. Neste sentido, na Tabela 20 apresentam-se os custos de produção dos painéis sanduíche fabricados (valores com IVA à taxa legal em vigor), considerando as especificações descritas anteriormente.

Tabela 20 - Custos de Produção dos Painéis Sanduíche (valores com IVA à taxa legal em vigor)

		Material do Núcleo da Sanduíche			
		Matriz Poliéster		Matriz Epóxi Verde	
		Custo 0,04 m ²	Custo/m ²	Custo 0,04 m ²	Custo/m ²
Matéria-Prima (MP)	Resina + Endurecedor	2,58 €	64,54 €	4,16 €	104,02 €
	Partículas PETG	---	---	---	---
	Faces de HIPS	---	---	---	---
Custo Total de MP		2,58 €	64,54 €	4,16 €	104,02 €
Energia	Peneiração	0,02 €	0,42 €	0,02 €	0,42 €
	Estufa ¹⁸	5,16 €	5,16 €	5,16 €	5,16 €
Custo Total de MP + Energia		7,76 €	70,13 €	9,34 €	109,61 €
Mão de obra (MO) ¹⁹		12,04 €	32,11 €	12,04 €	32,11 €
Custo Total de Produção (MP + Energia + MO)		19,80 €	102,23 €	21,38 €	141,71 €

Considerando que os custos de energia e de mão de obra são idênticos para cada um dos painéis sanduíche, verifica-se que a disparidade entre os custos de produção de cada uma das sanduíches é provocada pela diferença de preços entre as resinas utilizadas. De facto, tal como mencionado na secção 5.2.1, as resinas epoxídicas são mais caras que as resinas de

¹⁸ O gasto de energia com a estufa não depende da dimensão do painel sanduíche.

¹⁹ Da ótica da entidade empregadora, considerando um trabalhador com um salário de 870€ (valor do salário mínimo nacional), incluindo o Imposto sobre o Rendimento de Pessoas Coletivas (IRC, 23,75%), o Seguro de Acidentes de Trabalho (1%) e o Subsídio de Alimentação (valor médio de 4,27€/dia).

poliéster, ainda para mais, quando se trata de uma resina epóxi verde, sendo expectável que a sanduíche de núcleo de matriz de epóxi verde apresentasse um custo mais elevado (cerca de 38,62%) que a sanduíche de núcleo de matriz de poliéster.

Outrossim, em termos percentuais, a parcela correspondente ao custo da matéria-prima em cada um dos painéis sanduíche é, também um indicativo do peso do custo da resina de epóxi verde, uma vez que 73,40% do custo da sanduíche de núcleo de matriz de epóxi verde é atribuído às matérias-primas utilizadas, sendo, neste caso, apenas o conjunto da resina e endurecedor. Em contrapartida, o custo da resina e endurecedor do painel sanduíche de núcleo de matriz de poliéster configura 63,13% do custo total de produção.

7.5.1 Perspetiva de Aplicações

Valorizando as propriedades mecânicas em função do custo de produção de cada um dos painéis sanduíche, importa realçar que, além de apresentar o custo de produção mais elevado, a sanduíche de núcleo de matriz de epóxi verde evidenciou propriedades mecânicas superiores em comparação com a sanduíche de núcleo de matriz de poliéster, nomeadamente em termos de tensão de flexão e rigidez, além de demonstrar danos menos significativos quando sujeita a energias de impacto superiores.

Contudo, apesar das propriedades inferiores, a utilização da sanduíche de núcleo de matriz de poliéster poderá justificar-se em aplicações cujas necessidades permitam a implementação de um material mais frágil, menos rígido, não sujeito a impacto, nem a tensão e cuja aparência visual seja valorizada, como por exemplo, elementos decorativos de mobiliário, como imitação de azulejos, bem como placas decorativas e/ou indicativas em soluções estratégicas de *trade marketing*.

Por outro lado, a sanduíche de núcleo de matriz de epóxi verde, poderá ser aplicada em soluções que impliquem garantir algum suporte estrutural, como prateleiras destinadas ao armazenamento de produtos mais leves, por exemplo, produtos da indústria farmacêutica, garantindo mais estabilidade do que a sanduíche de núcleo de matriz de poliéster. Além disto, as suas agradáveis propriedades visuais, a fácil instalação e higienização, bem como a impermeabilidade das faces de HIPS, permitem que este painel sanduíche possa ser aplicado em estruturas de mobiliário técnico, sob a forma de divisórias.

Ademais, ambos os painéis sanduíche poderão ser aplicados como revestimentos de suportes mais rígidos, como é o caso dos “*pallet cover*”, utilizados em soluções de pontos de venda, na qual a estrutura é destinada a aguentar pesos mais elevados, mas cuja aparência

não é apreciável, sendo necessário revesti-la com materiais visualmente mais apelativos. Além das soluções para pontos de venda, os revestimentos são aplicados em diferentes produtos de mobiliário doméstico.

Deste modo, através da aplicação dos painéis sanduíche fabricados em soluções reais, contribui para a conversão da economia linear que, normalmente se verifica na produção de produtos plásticos, numa economia circular que garanta a circulação dos resíduos plásticos gerados, como é o caso das partículas de PETG incorporadas no núcleo das sanduíches (Kunlere and Shah, 2023; Mehta *et al.*, 2025).

7.5.2 Projeção Industrial e Análise do Ciclo de Vida

O desenvolvimento e a produção dos materiais compósitos propostos na presente dissertação, apresenta como principal objetivo a reintrodução dos resíduos utilizados no fluxo de produção do qual eles provêm.

Neste sentido, de modo que a sua incorporação possa ser realizada, todas as etapas da cadeia de valor devem ser repensadas e ajustadas de forma a englobar uma transição para a Economia Circular, com vista a abranger a conceção, a produção, a utilização e a reciclagem dos resíduos gerados, não abrangendo apenas o fim de vida dos produtos, mas também a conceção e o desenvolvimento de produtos mais sustentáveis (Johansen *et al.*, 2022; Fayshal, 2024).

Atentando ao atual e global sistema produtivo implementado na produção de produtos poliméricos, a produção dos painéis sanduíches de núcleos reforçados com partículas poliméricas de PETG, incorporar-se-ia com base na hierarquia de resíduos, privilegiando as operações de preparação para a reutilização (prioridade 2), de reciclagem (prioridade 3) e outros tipos de valorização (prioridade 4). Ou seja, a prioridade 2 verifica-se na reutilização das placas de HIPS na sua completa forma, sem sofrerem qualquer operação que modifique a sua estrutura física e química, enquanto as prioridades 3 e 4 se destinam à recuperação, reciclagem e valorização dos resíduos de PETG gerados no processo produtivo da empresa.

Na Figura 79 apresenta-se o esboço do fluxo produtivo que permitiria a incorporação dos painéis sanduíche concebidos, identificando o fluxo atual, bem como outras soluções para outros resíduos igualmente gerados, como é o caso das partículas de madeira, cuja incorporação é documentada pela literatura (Friedrich, 2021; Janani *et al.*, 2023; Ayana, Ha and Ali, 2024).

Considerando a possibilidade de aplicar projetos sustentáveis de reutilização e reaproveitamento aos resíduos poliméricos de PETG, o mesmo pode viabilizar a sua aplicação a outros polímeros e a resíduos de madeira igualmente gerados.

Associado à criação de fluxos produtivos mais sustentáveis com base em decisões informadas e críticas, é comumente aplicada a ferramenta de Análise de Ciclo de Vida (ACV) do produto, com vista a auxiliar na tomada de decisões através da identificação de soluções com o menor impacto ambiental possível (Jiao *et al.*, 2024; Goh *et al.*, 2025).

A aplicação desta ferramenta encontra-se normalizada, sendo a sua correta utilização especificada pelas normas NP EN ISO 14040:2008/A1:2022 e NP EN ISO 14044:2010/A1:2019. Segundo as normas mencionadas, a ACV é descrita como o conjunto e avaliação das entradas, das saídas e de todos os potenciais impactos ambientais, característicos de um sistema de produtos, considerando todo o seu ciclo de vida (IPQ, 2019, 2022).

Além disto, a correta aplicação da ACV proporciona aos decisores da indústria e às suas organizações a identificação de oportunidades que permitam aumentar o desempenho ambiental dos produtos ao longo do seu ciclo de vida, bem como selecionar as corretas técnicas de medição e marketing dos seus produtos, por exemplo, através da rotulagem ecológica. Não obstante, avaliando os aspetos ambientais de um produto, desde a aquisição das matérias-primas, até ao fim da sua vida útil, a aplicação do ACV divide-se em quatro fases fundamentais: definição do objetivo e do âmbito, análise do inventário, avaliação do impacto e interpretação final (IPQ, 2019, 2022).

Deste modo, considerando o desenvolvimento dos painéis sanduíche de núcleos reforçados com partículas de PETG, importa realçar a necessidade da completa compreensão da viabilidade, valorização e possibilidade de inserção na produção dos materiais obtidos, como solução mais sustentável para o reaproveitamento dos resíduos gerados. Por conseguinte, a compreensão dos impactos nas diversas etapas do processo de produção (excluindo o momento de distribuição, utilização e pós-consumo, Figura 79) permitirá perceber os potenciais danos, desafios e oportunidades de um sistema de reaproveitamento de resíduos poliméricos. No entanto, importa salientar que, neste caso prático, a realização da ACV é apenas uma proposta de análise qualitativa, visto não existirem dados suficientes para a sua realização com o rigor necessário.

Na Tabela 21 apresenta-se a identificação dos desafios, dos impactes e das oportunidades da produção dos painéis sanduíche em cada uma das etapas do processo produtivo.

Tabela 21 - Identificação dos desafios, dos impactes e das oportunidades da produção dos painéis sanduíche

	Etapa	Recursos	Desafios/Impactes	Oportunidades
Seleção e Separação	Recolha dos Resíduos	<ul style="list-style-type: none"> · Recipiente de Armazenamento 	<ul style="list-style-type: none"> · Correta deposição dos resíduos 	<ul style="list-style-type: none"> · Pode ser utilizado diversas vezes
	Humidificação	<ul style="list-style-type: none"> · Água · Partículas Poliméricas · Escorredor 	<ul style="list-style-type: none"> · Consumo de água · Microplásticos na rede · Pode ocorrer desperdício de partículas se manuseado inadequadamente 	<ul style="list-style-type: none"> · Melhor separação dos resíduos, garantindo uma eficiente utilização dos mesmos com menos desperdícios do que sob o efeito triboelétrico
	Separação	<ul style="list-style-type: none"> · Crivos · Agitador Mecânico 	<ul style="list-style-type: none"> · Consumo de Energia 	<ul style="list-style-type: none"> · A completa separação granulométrica das partículas permite a melhoria das propriedades do material e reaproveitamento total dos resíduos para diversas aplicações
Produção	Mistura da Matriz com as Partículas	<ul style="list-style-type: none"> · Recipiente de mistura · Balança · Agitador manual · Resinas + Endurecedores · Partículas · EPI's²⁰ 	<ul style="list-style-type: none"> · Quando manuseadas incorretamente, as resinas podem ser prejudiciais – informação do fabricante · Desperdício de partículas (efeito triboelétrico) · EPI's não são recicláveis nem reutilizáveis (exceto a bata) 	<ul style="list-style-type: none"> · Utilização de uma resina epóxi verde que garante ser mais sustentável. · O processo de agitação pode ser feito com recurso a um agitador industrial (automático), permitindo eficiência do processo produtivo e redução do tempo de fabrico.
	1º ciclo de Desgaseificação	<ul style="list-style-type: none"> · Panela de Vácuo 	<ul style="list-style-type: none"> · Consumo de Energia 	<ul style="list-style-type: none"> · Garante a remoção das bolhas de ar introduzidas aquando do processo de agitação.

²⁰ Equipamentos de Proteção Individual (Máscara, Luvas e Bata).

	Moldagem Manual	<ul style="list-style-type: none"> · Molde · Placas de HIPS · Manta Porosa Híbrida 	<ul style="list-style-type: none"> · Utilização de materiais descartáveis para constituição do molde. · Desperdício de mistura de matriz + PETG · Limpeza do material pouco eficiente 	<ul style="list-style-type: none"> · Alguns materiais do molde podem ser reciclados (folhas de acetado, plásticos técnicos e fita adesiva) · A base do molde pode ser utilizada diversas vezes para o mesmo fim ou outros. · A maioria das mantas porosas híbridas utilizadas podem ser incorporadas noutros moldes com a mesma função. · Reutilização e Valorização das placas de HIPS para constituição das sanduíches.
	2º ciclo de Desgaseificação	<ul style="list-style-type: none"> · Saco de Vácuo · Painel de Vácuo · Instrumento auxiliar de uniformização (cartão ou outros) 	<ul style="list-style-type: none"> · Saco de vácuo constituído por plástico técnico · Consumo de Energia 	<ul style="list-style-type: none"> · O plástico técnico do saco de vácuo pode ser reciclado. · Utilização de qualquer outro resíduo de outros processos como instrumento auxiliar de uniformização, desde que seja um material macio que não danifique o saco de vácuo.
	Prensagem e Cura à Temperatura Ambiente	<ul style="list-style-type: none"> · Prensa hidráulica 	<ul style="list-style-type: none"> · Origem (pouco sustentável) do óleo hidráulico 	<ul style="list-style-type: none"> · Materiais auxiliares à prensa são todos passíveis de utilizar inúmeras vezes se manuseados com precaução. · Utilização da temperatura ambiente para cura do material.
	Cura a 40°C	<ul style="list-style-type: none"> · Estufa 	<ul style="list-style-type: none"> · Elevado consumo de Energia 	<ul style="list-style-type: none"> · O consumo de energia não depende da dimensão do material. · Suporta diversos materiais ao mesmo tempo, desde que a cura se realize à mesma temperatura.
Pós-Produção	Desmoldagem	<ul style="list-style-type: none"> · Instrumento de corte 	---	<ul style="list-style-type: none"> · Os materiais retirados na desmoldagem das sanduíches (folhas de acetado, plásticos técnicos e fitas adesivas) podem ser reciclados. · O instrumento de corte pode ser utilizado para diversos fins.

Mediante observação da análise apresentada na Tabela 21, é possível constatar que, apesar de, na sua maioria, as etapas do processo produtivo apresentarem desafios e consequentes impactes ambientais, resultantes do consumo de energia, consumo de água e desperdícios do processo, todos os passos apresentam, analogamente, oportunidades de melhoria através da reutilização, reciclagem e valorização de todos os materiais utilizados ao longo do processo de fabrico, bem como a adequação do método utilizado, por forma a atingir a eficiência do processo produtivo.

Na realidade, perante os desafios, os impactes e as oportunidades identificadas com a produção dos painéis sanduíche, importa questionar qual seria o destino final dos resíduos utilizados para constituição do núcleo, caso não fosse implementada a solução apresentada na presente dissertação. Isto é, se estes resíduos não fossem utilizados nem reaproveitados, provavelmente seguiriam para aterro, incineração ou, noutra realidade, constituiriam outro tipo de soluções, mesmo que sustentáveis, não rentabilizáveis (Nordahl and Scown, 2024).

Considerando as soluções contrafactuais mais comuns no que diz respeito aos resíduos poliméricos (Nordahl and Scown, 2024), a produção dos painéis sanduíche desenvolvidos demonstram ser uma alternativa sustentável e adequada no tratamento dos resíduos poliméricos gerados pelos processos de manufatura do qual são provenientes, podendo este configurar, possivelmente, um fluxo produtivo adicional e auxiliar ao fluxo produtivo natural da empresa, constituindo uma possibilidade para soluções e aplicações mais sustentáveis, nas quais as propriedades dos materiais desenvolvidos respondam às necessidades requeridas.

Adicionalmente, em certos casos de elevada afluência do produto ou elevada geração de resíduos, poderia justificar-se a industrialização do processo produtivo dos painéis sanduíche, transformando a moldagem manual, numa moldagem automatizada e industrializada que permitisse dar uma melhor resposta às necessidades do mercado.

Capítulo 8

Conclusões

Após desenvolvimento da presente dissertação, neste capítulo são apresentadas as conclusões do caso prático desenvolvido, bem como as limitações verificadas ao longo da sua realização. Por fim, são apresentadas sugestões para trabalhos futuros que garantam a continuidade do estudo da temática, com vista a desenvolver soluções igualmente sustentáveis e que suportem as lacunas de estudos anteriores.

8.1 Considerações finais

Considerando o objetivo geral proposto, bem como os objetivos específicos definidos inicialmente, a presente dissertação foi conduzida de forma que estes pudessem ser atingidos e, conseqüentemente, contribuir positivamente para a exploração e investigação da produção de materiais compósitos mais sustentáveis, com a utilização de resíduos poliméricos industriais, contribuindo para a criação e implementação de estratégias de Economia Circular.

Por conseguinte, foram produzidos dois painéis sanduíches de núcleos distintos, mas de faces iguais, através de um método de moldagem manual, os quais foram submetidos a ensaios mecânicos estáticos e de impacto, garantindo a sua caracterização mecânica e posterior estudo de viabilidade econômica e ambiental.

Desta forma, através dos ensaios realizados, importa realçar que para os materiais compósitos fabricados numa fase inicial, os materiais de matriz poliéster evidenciaram valores de rigidez superiores, em comparação com os materiais de matriz epóxi verde, cujo valores de tensão demonstraram ser mais atrativos. Além disto, de entre os materiais produzidos, verificou-se que os materiais compósitos reforçados por 30 wt. % de partículas de PETG de tamanhos [0,300; 0,600]mm demonstraram melhores valores das propriedades de flexão (tensão de flexão, rigidez e deformação), bem como maior consistência entre resultados para os dois tipos de matrizes.

A sua integração como núcleo dos painéis sanduíches finais, juntamente com a aplicação das faces de HIPS permitiu a obtenção de diferentes propriedades de flexão, bem como de impacto. Em termos de propriedades de flexão o painel sanduíche de núcleo de matriz de poliéster evidenciou um comportamento mecânico frágil, em comparação com o painel

sanduiche de núcleo de matriz de epóxi verde que apresentou um comportamento mecânico mais dúctil, semelhante às matrizes de controlo testadas aquando da produção dos materiais do núcleo. Ademais, o painel sanduiche de núcleo de matriz epóxi verde demonstrou valores de tensão de flexão ($29,84 \pm 1,10$ MPa) e de rigidez ($14,31 \pm 1,31$ GPa) superiores, em relação ao painel sanduiche de núcleo de matriz poliéster ($25,19 \pm 2,00$ MPa e $10,51 \pm 1,08$ GPa, respetivamente), sendo estes valores influenciados pela geometria, dimensão e adesão dos seus constituintes (núcleo e faces).

Em contrapartida, quando submetidos a ensaios de impacto de baixa velocidade, o painel sanduiche de núcleo de matriz poliéster evidenciou menor capacidade de restituição de energia, ocorrendo perfuração do material para a energia de impacto de 4J, enquanto o painel sanduiche de núcleo de matriz epóxi verde demonstrou capacidade de recuperação para as energias de 1J, 2J, 3J e 4J. Não obstante, em termos de rigidez, os valores de IBS da sanduiche de núcleo de matriz de poliéster mostraram ser superiores em comparação com a sanduiche de núcleo de matriz de epóxi verde, demonstrando assim superior resistência ao impacto.

Atendendo ao processo de produção e materiais utilizados, o custo de produção estimado do painel sanduiche de núcleo de matriz epóxi verde (141,71€) revelou ser superior em comparação com o painel sanduiche de núcleo de matriz poliéster (102,23€), cerca de 38,62%, dado a resina epoxídica ser consideravelmente mais cara que a de poliéster.

Associado ao custo superior, importa realçar que o painel sanduiche de núcleo de matriz de epóxi verde evidenciou propriedades mecânicas superiores, mais especificamente em termos de tensão de flexão e rigidez, bem como apresentou danos menos significativos quando sujeito a energias de impacto superiores, sendo possível a sua valorização através da sua aplicação em soluções que impliquem garantir algum suporte estrutural e estabilidade, ao passo que o painel de sanduiche de núcleo de matriz de poliéster pode ser aplicado em soluções cujos requisitos permitam a implementação de um material mais frágil, menos rígido, não sujeito a impacto, nem a tensões elevadas.

Neste sentido, considerando a hierarquia de resíduos definida pelo RGGR, os painéis sanduiche produzidos podem ser incorporados no atual fluxo produtivo de transformação de produtos poliméricos, sob a forma de um fluxo produtivo auxiliar, agregando uma possível solução de aplicação mais sustentável, garantindo a reciclagem e reaproveitamento dos resíduos poliméricos industriais gerados que, contrafactualmente, seguiriam para

aterro, incineração ou, noutra perspetiva, constituiriam outro tipo de soluções não rentabilizáveis.

8.2 Limitações

No decorrer da presente dissertação foram identificadas algumas limitações que, certamente, influenciaram a sua realização, dificultando a tomada de decisões e proporcionando a mudança das metodologias inicialmente definidas, salientando, no entanto, possíveis oportunidades de melhoria do trabalho desenvolvido.

De facto, a maior dificuldade sentida, refletiu-se na seleção e separação das partículas poliméricas, nomeadamente, das partículas de PETG/PVC/PMMA, devido ao efeito triboelétrico existente entre si. Neste sentido, as inúmeras tentativas de humedificação das mesmas influenciaram significativamente o presente caso prático, provocando atrasos na realização do mesmo.

Além disto, a determinada altura do desenvolvimento do caso prático, verificou-se a escassez de resíduos poliméricos, tanto de PETG como de PETG/PVC/PMMA, principalmente de partículas de menor tamanho. Na realidade, esta dificuldade surge pelo facto de ser difícil numa fase posterior recolher exatamente o mesmo tipo de resíduos que tinham sido fornecidos inicialmente, visto que a realidade da empresa se encontra em constante mudança e nem sempre são produzidos e fabricados os mesmos produtos exatamente com os mesmos materiais.

Todavia, as limitações não foram apenas sentidas no que concerne à matéria-prima, mas também no que diz respeito aos equipamentos disponíveis para a realização dos ensaios, nomeadamente nos ensaios mecânicos de tração, nos quais a precisão teria sido aumentada se se utilizasse um equipamento auxiliar para a medição da deformação real do material, como é o caso de medidores de deformação de contacto ou de extensómetros.

Adicionalmente, as limitações dos ensaios mecânicos, em grande parte, deveram-se a limitações dos próprios materiais compósitos produzidos que, seja por nucleação (formação de vazios) ou outros defeitos presentes, não respondiam da forma que seria expectável, fraturando assim que eram manuseados ou que entravam em contacto com o equipamento de ensaio. Contudo, a repetição da fabricação dos materiais que não se apresentavam conformes, permitiu resolver as lacunas existentes e melhorar as limitações presentes no decorrer dos ensaios mecânicos.

Finalmente, a inexistência de literatura idêntica que permitisse uma correta comparação e justificção dos resultados obtidos, configurou, de forma análoga, uma limitação mesmo que justifique precisamente a pertinência do tema em estudo.

8.3 Sugestões para Trabalhos Futuros

Após conclusão do desenvolvimento do presente caso prático, no qual foram atingidos todos os objetivos propostos, importa salientar que, sendo esta uma temática de extrema relevância e pertinência, é premente dar continuidade ao estudo de soluções mais sustentáveis, reaproveitando e reintegrando os resíduos gerados pelos atuais fluxos de produção, com vista a garantir uma completa transição para a Economia Circular.

Por conseguinte, para trabalhos futuros sugere-se que seja realizada a mesma análise e desenvolvimento de materiais compósitos que integrem na composição do núcleo partículas de PETG/PVC/PMMA que, ao longo do presente caso prático, demonstraram propriedades igualmente satisfatórias e capazes de satisfazer a criação de soluções neste âmbito.

Ademais, a integração de outros resíduos e materiais provenientes dos processos de transformação da empresa que forneceu os resíduos utilizados, pode justificar-se na medida em que seja necessário dar-lhes um fim de vida útil mais sustentável, além de que podem integrar outro tipo de aplicações, com diferente geometria, por exemplo aumentando a espessura dos materiais desenvolvidos.

Além dos materiais utilizados para a constituição do núcleo, seria interessante comparar o desempenho das faces de HIPS utilizadas para integração dos painéis sanduíche, com outro tipo de faces, percebendo de que forma estas influenciam as propriedades do painel sanduíche, sendo relevante a contínua exploração da utilização de faces poliméricas (sem reforço de outras partículas e fibras), dado não ser muito explorado pela literatura existente, até à presente data.

Considerando as limitações dos ensaios mecânicos realizados, no que diz respeito à definição de possíveis aplicações dos materiais desenvolvidos, poderiam ser realizados outro tipo de ensaios que previssem o comportamento dos painéis sanduíche quando sujeitos a diferentes condições de temperatura e humidade, bem como a condução de ensaios de dureza, relaxação, compressão, entre outros ensaios viscoelásticos, de modo a permitir definir concretamente a aplicação dos materiais compósitos desenvolvidos.

Adicionalmente, a realização dos ensaios mecânicos mencionados poderia ser realizada através da utilização de *softwares* de tratamento de dados mais sofisticados, como por exemplo a aplicação de ensaios mecânicos de tração com recurso a correlação de imagem, de modo a definir, de forma mais completa, o comportamento do material quando sujeito a diferentes ambientes e tensões externas.

Na realidade, após o desenvolvimento deste tipo de materiais, torna-se crucial aferir a viabilidade deste ser adaptado para a escala industrial, reconhecendo os recursos e materiais necessários para a sua realização, bem como a verificação da eficácia da sua incorporação como um processo produtivo auxiliar ao fluxo produtivo natural de transformação de materiais poliméricos, realizando e detalhando, em par, uma análise quantitativa do ciclo de vida do produto, integrando não apenas a sua produção, mas todo o seu ciclo de vida, desde que os resíduos são recolhidos até ao final da sua vida útil após consumo.

Finalmente, o fim da vida útil dos materiais compósitos ainda se encontra atualmente em estudo, considerando as dificuldades que lhe são inerentes, sendo, portanto, de forma análoga, relevante explorar de que modo a produção de materiais mais sustentáveis compensa no final da sua vida útil, procurando tornar os sistemas produtivos totalmente circulares.

Bibliografia

Ağcan, A.E. and Kartal, İ. (2025) 'A review of waste-derived fillers for enhancing the properties of epoxy resins', *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 138. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2025.103944>.

Ajayi, A.A., Pandurangan, M.T. and Krishnan, K. (2024) 'Development of epoxy-based sandwich composite panel with hollow glass microspheres/clay hybrid core and banana fiber facesheet for structural applications', *Heliyon*, 10(9). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30428>.

Akbolat, M.Ç., Wang, S., Katnam, K.B., Potluri, P. and Soutis, C. (2025) 'Low-velocity impact response of carbon/epoxy laminates with interlaminar hybrid toughening via core-shell-rubber particles and non-woven thermoplastic fibre veils', *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 195. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2025.108944>.

Al-Ameen, E.S., Abdulhameed, J.J., Abdulla, F.A., Ogaili, A.A.F. and Al-Sabbagh M.N.M. (2020) 'Strength Characteristics of Polyester Filled with Recycled GFRP Waste', *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 43(2), pp. 178–185. Available at: https://www.researchgate.net/publication/342903151_Strength_Characteristics_of_Polyester_Filled_with_Recycled_GFRP_Waste (Accessed: 8 September 2025).

Al-Furjan, M.S.H., Shan, L., Shen, X., Zarei, M.S., Hajmohammad, M.H. and Kolahchi, R. (2022) 'A review on fabrication techniques and tensile properties of glass, carbon, and Kevlar fiber reinforced polymer composites', *Journal of Materials Research and Technology*, 19, pp. 2930–2959. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.06.008>.

Ali, U., Karim, K.J.Bt.A. and Buang, N.A. (2015) 'A Review of the Properties and Applications of Poly (Methyl Methacrylate) (PMMA)', *Polymer Reviews*, 55(4), pp. 678–705. Available at: <https://doi.org/10.1080/15583724.2015.1031377>.

Alinejad, F., Bordbar, H., Makowska, M. and Hostikka, S. (2022) 'Spectroscopic determination of the optical constants and radiative properties of black PMMA for pyrolysis modeling', *International Journal of Thermal Sciences*, 176. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2022.107501>.

Alves, A.F.C., Ferreira, B.P. and Pires, F.M.A. (2023) 'On the modeling of cavitation and yielding in rubber-toughened amorphous polymers: Fully implicit implementation and optimization-based calibration', *International Journal of Solids and Structures*, 283. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2023.112488>.

Amran, Y.H.M., Alyousef, R., Rashid, R.S.M., Alabduljabbar, H. and Hung, C.-C. (2018) 'Properties and applications of FRP in strengthening RC structures: A review', *Structures*, 16, pp. 208–238. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.09.008>.

APA (2020) 'Guia de Classificação de Resíduos'. Available at: https://apambiente.pt/sites/default/files/2021-06/Guia%20de%20Classifica%C3%A7%C3%A3o_vers%C3%A3o%202.0_20200107.pdf (Accessed: 14 January 2025).

APA (2021a) *Legislação*, APA, Agência Portuguesa do Ambiente. Available at: <https://apambiente.pt/residuos/legislacao> (Accessed: 14 January 2025).

APA (2021b) *Planeamento*, APA, Agência Portuguesa do Ambiente. Available at: <https://apambiente.pt/residuos/planeamento> (Accessed: 14 January 2025).

APA (2021c) *Prevenção de Resíduos*, APA, Agência Portuguesa do Ambiente. Available at: <https://apambiente.pt/residuos/prevencao-de-residuos> (Accessed: 14 January 2025).

APA (2021d) *Produção e Gestão de Resíduos*, APA, Agência Portuguesa do Ambiente. Available at: <https://apambiente.pt/residuos/producao-e-gestao-de-residuos> (Accessed: 14 January 2025).

APA (2021e) *Resíduos*, APA, Agência Portuguesa do Ambiente. Available at: <https://apambiente.pt/residuos> (Accessed: 14 January 2025).

APA (2021f) *Resíduos Não Urbanos*, APA, Agência Portuguesa do Ambiente. Available at: <https://apambiente.pt/residuos/residuos-nao-urbanos-0> (Accessed: 14 January 2025).

APA (2021g) *Resíduos Urbanos*, APA, Agência Portuguesa do Ambiente. Available at: <https://apambiente.pt/residuos/residuos-urbanos> (Accessed: 14 January 2025).

Aryee, R. (2024) 'The sustainability onion: a panoramic view of a parent concept, its paths, and progeny', *RSC Sustainability*, 2(7), pp. 1948–1962. Available at: <https://doi.org/10.1039/d3su00361b>.

Asfaw, N.T., Absi, R., B.A, L. and Ikram, E.A. (2024) 'Assessment of the thermal and mechanical properties of bio-based composite materials for thermal insulation: A review', *Journal of Building Engineering*, 97. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110605>.

ASTM (2006) 'C393/C393M-06: Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure'.

ASTM (2012) 'D7136/D7136M-12: Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event'.

ASTM (2014) 'D638-14: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics'.

Aswain, I.E.B., Ludin, N.A., Jarimi, H., Purvis-Robert, K.L., Hamid, N.H., Shariff, M.Z.M. and Burke, J. (2024) 'Harmonizing business practices of events and convention industry through sustainability assessment framework development', *Cleaner and Responsible Consumption*, 15. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.clrc.2024.100226>.

Ateeq, M., Akbar, A. and Shafique, M. (2024) 'Advancing Circular Economy: Comparative Analysis of Recycled and Virgin Carbon Fiber 3D Printed Composites on Performance and Eco-Efficiency', *Polymer* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2024.127865>.

Ayana, K.D., Ha, C.-S. and Ali, A.Y. (2024) 'Comprehensive overview of wood polymer composite: Formulation and technology, properties, interphase modification, and characterization', *Sustainable Materials and Technologies*, 40. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e00983>.

Bagheri, S., Khalafi, H., Tohidifar, M.R. and Bagheri, S. (2024) 'Thermoplastic and thermoset polymer matrix composites reinforced with bismuth oxide as radiation shielding materials', *Composites Part B: Engineering*, 278. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111443>.

Barbhuiya, S., Das, B.B. and Adak, D. (2024) 'A comprehensive review on integrating sustainable practices and circular economy principles in concrete industry', *Journal of Environmental Management*, 370. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122702>.

BCSD Portugal (2022a) *Objetivo 9: Indústria, Inovação e Infraestrutura, Objetivos de Desenvolvimento Sustentável*. Available at: <https://ods.pt/objectivos/9-inovacao-e-infraestruturas/> (Accessed: 20 November 2024).

BCSD Portugal (2022b) *Objetivo 12: Produção e Consumo Sustentáveis, Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis*. Available at: <https://ods.pt/objectivos/12-producao-e-consumo-sustentaveis/>.

BCSD Portugal (2022c) *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, Objetivos de Desenvolvimento Sustentável*. Available at: <https://ods.pt/ods/> (Accessed: 20 November 2024).

BCSD Portugal (2024) *Pacto Ecológico Europeu, Pacto Ecológico Europeu*. Available at: <https://bcdsptugal.org/pacto-ecologico-europeu/> (Accessed: 20 November 2024).

Beer, F.P., Johnston, E.R., DeWolf, J.T. and Mazurek, D.F. (2015) *Mechanics of Materials*. 7^a edição. New York: McGraw-Hill Education.

Bhandari, S., Lopez-Anido, R.A. and Gardner, D.J. (2019) ‘Enhancing the interlayer tensile strength of 3D printed short carbon fiber reinforced PETG and PLA composites via annealing’, *Additive Manufacturing*, 30. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100922>.

Bhong, M., Khan, T.K.H., Devade, K., Krishna, B.V., Sura, S., Eftikhaar, H.K., Thethi, H.P. and Gupta, N. (2023) ‘Review of composite materials and applications’, *Materials Today: Proceedings* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.10.026>.

Bogiatzidis, C. and Zoumpoulakis, L. (2021) ‘Thermoset Polymer Matrix Composites of Epoxy, Unsaturated Polyester, and Novolac Resin Embedding Construction and Demolition Wastes powder: A Comparative Study’, *Polymers*, 13, pp. 1–19. Available at: <https://doi.org/10.3390/polym13050737>.

Bragin, D.M., Popov, A.I. and Eremin, A.V. (2024) ‘The thermal conductivity properties of porous materials based on TPMS’, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 231. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125863>.

BSI (2019) ‘BS EN ISO 178:2019: Plastics - Determination of flexural properties’.

Bushuyev, S., Bushuyeva, N., Ivko, A., Bushuiev, D., Bushuieva, V. and Iazykov, D. (2023) ‘Principles of Circular Economy as a Driver of Development Projects’, in *2023 IEEE International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST). 2023*

IEEE International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST), Astana, Kazakhstan: IEEE, pp. 37–41. Available at: <https://doi.org/10.1109/SIST58284.2023.10223513>.

Callister, W.D. and Rethwisch, D.G. (2018) *Materials science and engineering: an introduction*. 10th edition.

Callister, W.D. and Rethwisch, D.G. (2020) *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. 9ª edição. LTC - Livros Técnicos e Científicos.

Carosella, S., Hügler, S., Helber, F. and Middendorf, P. (2024) ‘A short review on recent advances in automated fiber placement and filament winding technologies’, *Composites Part B: Engineering*, 287. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111843>.

Cavalcanti, D., Banea, M., Neto, J. and Lima, R. (2021) ‘Comparative analysis of the mechanical and thermal properties of polyester and epoxy natural fibre-reinforced hybrid composites’, *Journal of Composite Materials*, 55(12), pp. 1683–1692. Available at: <https://doi.org/10.1177/0021998320976811>.

Chen, S. and Hu, Y.H. (2024) ‘Advancements and future directions in waste plastics recycling: From mechanical methods to innovative chemical processes’, *Chemical Engineering Journal*, 493. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.152727>.

Chripim, M.C., Mattsson, M. and Ulvenblad, P. (2024) ‘Perception and awareness of circular economy within water-intensive and bio-based sectors: Understanding, benefits and barriers’, *Journal of Cleaner Production*, 464. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142725>.

Contessi, S., Borghi, F., Graziosi, F. and Violante, F.S. (2025) ‘Respirable Particles from Cutting and Grinding Ceramic Tiles: A Scanning Electron Microscopy Investigation’, *Results in Chemistry*, 16. Available at: <https://doi.org/10.2139/ssrn.5036763>.

Cooney, R., Sousa, D.B., Fernández-Ríos, A., Mellett, S., Rowan, N., Morse, A.P., Hayes, M., Laso, J., Regueiro, L., Wan, A.H.L. and Clifford, E. (2023) ‘A circular economy framework for seafood waste valorisation to meet challenges and opportunities for intensive production and sustainability’, *Journal of Cleaner Production*, 392. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136283>.

Da Rocha, M.S., Valente, C.A., De Lima, M.H.L., De Oliveira, S.D. and Papaléo, R.M. (2024) 'Modification of the polymer PETG by 16 MeV Au ions', *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 552. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2024.165370>.

Daioui, K., Zegloul, T., Perbet, N. and Dascalescu, L. (2025) 'Tribo-electrostatic separation of plastic flakes originating from packaging waste', *Journal of Electrostatics*, 134. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2025.104046>.

Dani, C., Achouri, I., Zegloul, T., Aouimeur, D., Lungu, M. and Dascalescu, L. (2025) 'Triboelectric Charging and Electrostatic Separation of Granular Plastic Wastes Exposed to Long-Term Action of High Levels of Ambient Humidity', *IEEE Transactions on Industry Applications*, 61(1), pp. 1194–1201. Available at: <https://doi.org/10.1109/TIA.2024.3462902>.

De, B., Bera, M., Bhattacharjee, D., Ray, B.A. and Mukherjee, S. (2024) 'A comprehensive review on fiber-reinforced polymer composites: Raw materials to applications, recycling, and waste management', *Progress in Materials Science*, 146. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2024.101326>.

Demewoz, N.M. and Yeh, S.-K. (2022) 'Fabrication and characterization of low-density nanocellular foam based on PMMA/TPU blends', *Polymer*, 240. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2021.124493>.

DGE (2015) *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável [ODS]*, *Direção-Geral da Educação*. Available at: <https://www.dge.mec.pt/objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel-ods> (Accessed: 20 November 2024).

Durgashyam, K., Reddy, M.I., Balakrishna, A. and Satyanarayana, K. (2019) 'Experimental investigation on mechanical properties of PETG material processed by fused deposition modeling method', *Materials Today: Proceedings*, 18, pp. 2052–2059. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.082>.

Eddine, K.I., Touhami, S., Aissa, B., Azzedine, L. and Amar, T. (2025) 'Mitigating particle-electrode collision in electrostatic separators: A segmented electrode approach', *Journal of Electrostatics*, 134. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2024.104027>.

Egbo, M.K. (2021) 'A fundamental review on composite materials and some of their applications in biomedical engineering', *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 33(8), pp. 557–568. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.07.007>.

El Bhilat, H., Hachim, A., Salmi, H., Mabchour, H. and El Had, K. (2021) 'Characterization and processability of post-consumer, double-recycled high impact polystyrene from disposable cups', *Materials Today: Proceedings*, 45, pp. 7264–7270. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.935>.

Elia, V., Gnoni, M.G. and Tornese, F. (2024) 'Integrating circular economy and sustainability assessment on the micro-level: An umbrella review', *Sustainable Production and Consumption*, 50, pp. 405–415. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.08.012>.

ElKori, R., Lamarti, A., Salmi, H., Hachim, A. and El Had, K. (2023) 'Experimental study of the failure of HDPE and HIPS by the damages method', *Polyolefins Journal*, 10(3). Available at: <https://doi.org/10.22063/poj.2023.3259.1242>.

Ettah, E.B., Egbe, J.G., Takim, S.A., Akpan, U.P. and Oyom, E.B. (2016) 'Investigation of the Thermal Conductivity of Polyvinyl Chloride (Pvc) Ceiling Material Produced In Epz Calabar, For Application Tropical Climate Zones', *IOSR Journal of Polymer and Textile Engineering (IOSR-JPTE)*, 3(2), pp. 34–38. Available at: <https://doi.org/10.9790/019X-03023438>.

European Commission (2019) *The European Green Deal: Striving to be the first climate-neutral continent*, *The European Green Deal*. Available at: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en (Accessed: 20 November 2024).

European Union (2014a) *2014/955/EU: Commission Decision of 18 December 2014 amending Decision 2000/532/EC on the list of waste pursuant to Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council Text with EEA relevance*, *EUR-Lex: Access to European Union law*. Available at: <http://data.europa.eu/eli/dec/2014/955/oj> (Accessed: 14 January 2025).

European Union (2014b) *Commission Regulation (EU) No 1357/2014 of 18 December 2014 replacing Annex III to Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council on waste and repealing certain Directives Text with EEA relevance*, *EUR-Lex: Access to European Union law*. Available at: <http://data.europa.eu/eli/reg/2014/1357/oj> (Accessed: 14 January 2025).

European Union (2024) *Sustainable development*, *EUR-Lex: Access to European Union law*. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/EN/legal-content/glossary/sustainable-development.html> (Accessed: 27 November 2024).

Eurostat (2024) *Waste statistics, Statistics Explained*. Available at: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics (Accessed: 14 January 2025).

Fayshal, M.A. (2024) 'Current practices of plastic waste management, environmental impacts, and potential alternatives for reducing pollution and improving management', *Heliyon*, 10(23). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40838>.

Forcellese, A. and Simoncini, M. (2020) 'Mechanical properties and formability of metal–polymer–metal sandwich composites', *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107(7–8), pp. 3333–3349. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05245-6>.

Ford, P. and Fisher, J. (2019) 'Designing consumer electronic products for the circular economy using recycled Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS): A case study', *Journal of Cleaner Production*, 236. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.321>.

Friedrich, D. (2021) 'Thermoplastic moulding of Wood-Polymer Composites (WPC): A review on physical and mechanical behaviour under hot-pressing technique', *Composite Structures*, 262. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113649>.

García-Gutiérrez, P., Amadei, A.M., Klenert, D., Nessi, S., Tonini, D., Tosches, D., Ardente, F. and Saveyn, H.G.M. (2025) 'Environmental and economic assessment of plastic waste recycling and energy recovery pathways in the EU', *Resources, Conservation and Recycling*, 215. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.108099>.

Gaur, A.K., Aggarwal, A. and Kumar, A. (2021) 'Effects of varying face sheet thickness and panel shape on flexural strength of a composite sandwich structure', *Materials Today: Proceedings*, 38, pp. 218–222. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.035>.

Genc, O. and Kurt, A. (2024) 'Mimicking nature to design eco-industrial parks: Exploring the influence of connectance on industrial network optimization', *Journal of Cleaner Production*, 475. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143704>.

Geramizadeh, H., Dariushi, S. and Salami, S.J. (2022) 'Optimal face sheet thickness of 3D printed polymeric hexagonal and re-entrant honeycomb sandwich beams subjected to three-point bending', *Composite Structures*, 291. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115618>.

Giakoumakis, N.S., Vos, C., Janssens, K. Vekeman, J., Denayer, M., Marquez, C. and De Vos, D. (2024) 'Total revalorization of high impact polystyrene (HIPS): enhancing styrene recovery and upcycling of the rubber phase', *Green Chemistry*, 26(1), pp. 340–352. Available at: <https://doi.org/10.1039/D3GC02407E>.

Gkaliou, K., Benedini, L., Sárossy, Z., Jensen, C.D., Henriksen, U.B. and Daugaard, A.E. (2023) 'Recycled PMMA prepared directly from crude MMA obtained from thermal depolymerization of mixed PMMA waste', *Waste Management*, 164, pp. 191–199. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.04.007>.

Goh, S.L., Yap, K.S., Neo, E.R., Koo, C.W., Madhavan, U., Suwandi, N.A., Lew, J., Khoo, H.H. and Tan, D.Z.L. (2025) 'Life cycle assessment of plastic waste end-of-life scenarios in South and South East Asia', *Waste Management*, 200. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.114760>.

Goodarz, M., Bahrami, S.H., Sadighi, M. and Saber-Samandari, S. (2019) 'Low-velocity impact performance of nanofiber-interlayered aramid/epoxy nanocomposites', *Composites Part B: Engineering*, 173. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.106975>.

Grouht - Soluções Químicas, Lda. (2019) 'Ficha Técnica - Resina de Poliester'.

Guessasma, S., Belhabib, S. and Nouri, H. (2019) 'Printability and Tensile Performance of 3D Printed Polyethylene Terephthalate Glycol Using Fused Deposition Modelling', *Polymers*, 11(7), pp. 1–16. Available at: <https://doi.org/10.3390/polym11071220>.

Harizi, W., Anjoul, J., Santamaría, V.A.A., Aboura, Z. and Briand, V. (2021) 'Mechanical behavior of carbon-reinforced thermoplastic sandwich composites with several core types during three-point bending tests', *Composite Structures*, 262. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113590>.

Hasan, Z. (2020) *Tooling for Composite Aerospace Structures: Manufacturing and Applications*. Colorado, USA. Available at: <https://doi.org/10.1016/C2019-0-00982-X>.

Hausmann, A., Buck, B., Shaw, L., Simons, T., Jäger, F.K. and Williams, D. (2023) 'The importance of humidity control in powder rheometer studies', *Powder Technology*, 421. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118425>.

Hirayama, D. and Saron, C. (2018) 'Morphologic and mechanical properties of blends from recycled acrylonitrile-butadiene-styrene and high-impact polystyrene', *Polymer*, 135, pp. 271–278. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2017.12.038>.

Hsissou, R., Seghiri, R., Benzekri, Z., Hilali, M., Rafik, M. and Elharfi, A. (2021) 'Polymer composite materials: A comprehensive review', *Composite Structures*, 262. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113640>.

Huang, H. and Akbari, F. (2024) 'Integrated sustainability perspective and spillover effects of social, environment and economic pillars: A case study using SEY model', *Socio-Economic Planning Sciences*, 96. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.seps.2024.102077>.

Huang, S., Fu, Q., Yan, L. and Kasal, B. (2021) 'Characterization of interfacial properties between fibre and polymer matrix in composite materials – A critical review', *Journal of Materials Research and Technology*, 13, pp. 1441–1484. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.05.076>.

Huo, D., Li, X., Yu, B., Chen, J., Dong, J., Liu, J. and Nan, D. (2025) 'Enhancing mechanical properties of epoxy resin composites with aluminum oxide-modified graphene oxide', *Diamond and Related Materials*, 151. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2024.111864>.

Hyldmo, H. da S., Rye, S.A. and Vela-Almeida, D. (2024) 'A globally just and inclusive transition? Questioning policy representations of the European Green Deal', *Global Environmental Change*, 89. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2024.102946>.

INE (2023a) *Estatísticas do Ambiente - 2023*. Lisboa, Portugal: Instituto Nacional de Estatística, I. P. Available at: https://www.ine.pt/ngt_server/attachfileu.jsp?look_parentBoui=704857095&att_display=n&att_download=y (Accessed: 14 January 2025).

INE (2023b) *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, Objetivos de Desenvolvimento Sustentável*. Available at: https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_perfsdg&objetivo=thumb2 (Accessed: 20 November 2024).

INE (2024) *Informação à Comunicação Social: Indicadores dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) em Portugal*. Available at:

https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_destaquas&DESTAQUESdest_boui=645950952&DESTAQUESmodo=2 (Accessed: 20 November 2024).

IPQ (2019) 'NP EN ISO 14044:2010/A1:2019'.

IPQ (2022) 'NP EN ISO 14040:2008/A1:2022'.

Ishaq, A., Gill, Y.Q., Nazar, R., Saeed, F., Younas, M., Theravalappil, R., Zhang, Y. and Mehmood, U. (2024) 'Rational design and elucidation of interfacial dynamics in PMMA/PVDF compatibilized blends through solution blending for stable quasi-solid-state dye-sensitized solar cells', *Electrochimica Acta*, 497. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2024.144613>.

Islam, A., Ferdous, W., Burrey, P.P., Nahar, K., Yan, L. and Manalo, A. (2025) 'Polymer Composite Sandwich Panels Composed of Hemp and Plastic Skins and Composite Wood, Recycled Plastic, and Styrofoam Cores', *Polymers*, 17, pp. 1–17. Available at: <https://doi.org/10.3390/polym17101359>.

Islam, H. (2025) 'Nexus of economic, social, and environmental factors on sustainable development goals: The moderating role of technological advancement and green innovation', *Innovation and Green Development*, 4(1). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.igd.2024.100183>.

Islam, N.F., Gogoi, B., Saikia, R., Yousaf, B., Narayan, M. and Sarma, H. (2024) 'Encouraging circular economy and sustainable environmental practices by addressing waste management and biomass energy production', *Regional Sustainability*, 5(4). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.regsus.2024.100174>.

Janani, V., Vinay, B., Kaliraj, M. and Mukilan, K. (2023) 'Study of mechanical property of treated teak wood and tamarind seed particles in the applications of reinforced composites', *Materials Today: Proceedings* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.436>.

Jeng, S.-Y., Lin, C.-W.R., Sethanan, K., Wang, H.W. and Tseng, M.-L. (2024) 'Circular economy-based integrated closed-loop farming system: A sensitivity analysis for profit optimization', *Journal of Cleaner Production*, 482. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144184>.

Jia, K., Sheng, Q., Liu, Y., Yang, Y., Dong, G., Qiao, Z., Wang, M., Sun, C. and Han, D. (2024) 'A framework for achieving urban sustainable development goals (SDGs): Evaluation and

interaction', *Sustainable Cities and Society*, 114. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105780>.

Jia, Y., Zhang, H., Yang, B. and Zhang, J. (2023) 'No temperature dependence of thermal conductivity of high impact polystyrene/Cu alloy composites: Effective medium theory study', *Journal of Alloys and Compounds*, 947. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.169519>.

Jiang, J. and Qu, L. (2020) 'Evolution and Emerging Trends of Sustainability in Manufacturing Based on Literature Visualization Analysis', *IEEE Access*, 8, pp. 121074–121088. Available at: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3006582>.

Jiao, H., Ali, S.S., Alsharbaty, M.H.M., Elsamahy, T., Abdelkarim, E., Schagerl, M., Al-Tohamy, R. and Sun, J. (2024) 'A critical review on plastic waste life cycle assessment and management: Challenges, research gaps, and future perspectives', *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 271. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.115942>.

Johansen, M.R., Christensen, T.B., Ramos, T.M. and Syberg, K. (2022) 'A review of the plastic value chain from a circular economy perspective', *Journal of Environmental Management*, 302. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113975>.

Kadell, M.Y.Z.K. and Callychurn, D.S. (2023) 'An investigation on the use algae-based material for the production of reusable bioplastic bags: A Mauritian case study', *Cleaner Materials*, 9. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.clema.2023.100201>.

Kaitwade, N. (2023) 'PETG Market Growth & Forecast 2023-2033'. Future Market Insights. Available at: <https://www.futuremarketinsights.com/reports/polyethylene-terephthalate-glycol-market> (Accessed: 7 February 2025).

Karaeva, A., Copelli, S., Romagnoli, F., Ivascu, L., Torres, E.A. and Lakatos, S.E. (2023) 'Introducing Principles of Circular Economy into Traditional Energy Sector: Barriers and Prospectives', in *2023 11th International Conference on ENERGY and ENVIRONMENT (CIEM). 2023 11th International Conference on ENERGY and ENVIRONMENT (CIEM)*, Bucharest, Romania: IEEE, pp. 1–5. Available at: <https://doi.org/10.1109/CIEM58573.2023.10349713>.

Karim, M.A., Abdullah, M.Z., Deifalla, A.F., Azab, M. and Waqar, A. (2023) 'An assessment of the processing parameters and application of fibre-reinforced polymers (FRPs) in the petroleum and natural gas industries: A review', *Results in Engineering*, 18. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101091>.

Kechagias, J.D., Zaoutsos, S.P., Fountas, N.A. and Vaxevanidis, N.M. (2024) 'Experimental investigation and neural network development for modeling tensile properties of polymethyl methacrylate (PMMA) filament material', *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 134, pp. 4387–4398. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14402-0>.

Keerthana, S., Kohila, P., Pavithra, A.S., Sagar, K.S., Jenin Joshua, J., Arunkumar, K. and Seralathan, S. (2024) 'Evaluation of mechanical properties and energy absorption of polyurethane foam core sandwich panels with kevlar/basalt-epoxy laminates as face sheets', *Journal of Physics: Conference Series* [Preprint]. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2837/1/012017> (Accessed: 8 September 2025).

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

Khallouqi, A., Halimi, A. and El Rhazouani, O. (2024) 'Evaluating polyester resin as a viable substitute for PMMA in computed tomography dosimetry phantoms', *Nuclear Engineering and Technology*, 56(9), pp. 3758–3763. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.net.2024.04.024>.

Khan, F., Hossain, N., Mim, J.J., Rahman, SM. M., Iqbal, Md. J., Billah, M. and Chowdhury, M.A. (2024) 'Advances of composite materials in automobile applications – A review', *Journal of Engineering Research* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.02.017>.

Khardin, M., Harhash, M., Chernikov, D., Glushchenkov, V. and Palkowski, H. (2020) 'Preliminary studies on electromagnetic forming of aluminum/polymer/aluminum sandwich sheets', *Composite Structures*, 252. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112729>.

Kijo-Kleczkowska, A. and Gnatowski, A. (2022) 'Recycling of Plastic Waste, with Particular Emphasis on Thermal Methods—Review', *Energies*, 15(6), p. 2114. Available at: <https://doi.org/10.3390/en15062114>.

Kim, D.H., Kim, H.H., Kim, J., Byun, Y. and Ha, K-S. (2024) 'Recovery of methyl methacrylate from waste poly (methyl methacrylate) pellets using a low-temperature

plasma and zeolites', *Chemical Engineering Journal*, 497. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.154438>.

Kristoffersen, A.E., Schultz, C.P.L. and Kamari, A. (2024) 'A critical comparison of concepts and approaches to social sustainability in the construction industry', *Journal of Building Engineering*, 91. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109530>.

Krolikowski, K. and Piszczek, K. (2017) 'Separation of high-density polyethylene/poly(ethylene terephthalate)/poly(vinyl chloride) mixtures based on differences in their hardness', *Polimery*, 62(7/8), pp. 599–602. Available at: <https://doi.org/10.14314/polimery.2017.599>.

Kucukesmen, H.C. and Sarac, M.F. (2024) 'Preparation and characterization of fumed silica added PMMA denture base materials', *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 29(8), pp. 675–684. Available at: <https://doi.org/10.1080/1023666X.2024.2410754>.

Kumar, S.K., Soundararajan, R., Shanthosh, G., Saravanakumar, P. and Ratteesh, M. (2021) 'Augmenting effect of infill density and annealing on mechanical properties of PETG and CFPETG composites fabricated by FDM', *Materials Today: Proceedings*, 45, pp. 2186–2191. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.078>.

Kumar, T.P.S., Kumar, S.S. and Kumar, L.R. (2022) 'Chapter 11 - Jute fibers, their composites and applications', in *Plant Fibers, their Composites, and Applications*. Rangappa, S.M., Parameswaranpillai, J., Siengchin, S., Ozbakkaloglu, T. and Wang, H., pp. 253–282. Available at: <https://www.sciencedirect.com/book/9780128245286/plant-fibers-their-composites-and-applications> (Accessed: 22 November 2024).

Kundu, A.M., Bag, D.S., Choudhury, A. and Sarkhel, G. (2025) 'Compression induced molecular orientation and crystallization: Enhancing the thermal and mechanical properties of PMMA for aircraft interiors', *Polymer*, 319. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2024.128009>.

Kunlere, I.O. and Shah, K.U. (2023) 'A recycling technology selection framework for evaluating the effectiveness of plastic recycling technologies for circular economy advancement', *Circular Economy*, 2(4). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cec.2023.100066>.

Laraba, S.R., Rezzoug, A., Halimi, R., Wei, L., Yang, Y., Abdi, S., Li, Y. and Jie, W. (2022) 'Development of sandwich using low-cost natural fibers: Alfa-Epoxy composite core and

jute/metallic mesh-Epoxy hybrid skin composite', *Industrial Crops and Products*, 184. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115093>.

Latko-Duralek, P., Dydek, K. and Boczkowska, A. (2019) 'Thermal, Rheological and Mechanical Properties of PETG/rPETG Blends', *Journal of Polymers and the Environment*, 27, pp. 2600–2606. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10924-019-01544-6>.

Le, V.T., Jin, T. and Goo, N.S. (2022) 'Mechanical behaviors and fracture mechanisms of CFRP sandwich composite structures with bio-inspired thin-walled corrugated cores', *Aerospace Science and Technology*, 126. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2022.107599>.

Lebar, A., Aguiar, R., Oddy, A. and Petel, O.E. (2021) 'Particle surface effects on the spall strength of particle-reinforced polymer matrix composites', *International Journal of Impact Engineering*, 150. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2020.103801>.

Li, R., Li, L. and Jiang, Y. (2025) 'A physics-based nonlocal theory for particle-reinforced polymer composites', *International Journal of Mechanical Sciences*, 285. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2024.109800>.

Liang, J.-Z. (2019) 'Effects of tension rates and filler size on tensile properties of polypropylene/graphene nano-platelets composites', *Composites Part B: Engineering*, 167, pp. 241–249. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.12.035>.

Lopez, D.M.B. and Ahmad, R. (2020) 'Tensile Mechanical Behaviour of Multi-Polymer Sandwich Structures via Fused Deposition Modelling', *Polymers*, 12, pp. 1–13. Available at: <https://doi.org/10.3390/polym12030651>.

MacDonald, S. and Headlam, N. (2010) *Research Methods Handbook*. Manchester: CLES. Available at: <https://www.cles.org.uk/wp-content/uploads/2011/01/Research-Methods-Handbook.pdf> (Accessed: 6 November 2024).

Mack, J.P., Mirza, F., Banik, A., Khan, M.H. and Tan, K.T. (2024) 'Hybridization of face sheet in sandwich composites to mitigate low temperature and low velocity impact damage', *Composite Structures*, 338. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2024.118101>.

Maeder, M. and Fröhling, M. (2024) 'Conceptualizing circular economy policy instruments: The case of recycled content standards', *Sustainable Production and Consumption*, 52, pp. 333–346. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.11.009>.

Mahato, K.K., Dutta, K. and Ray, B.C. (2020) 'Emerging advancement of fiber-reinforced polymer composites in structural applications', in *New Materials in Civil Engineering*. Elsevier, pp. 221–271. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818961-0.00006-5>.

Mahesh, V., Joladarashi, S. and Kulkarni, S.M. (2021a) 'A comprehensive review on material selection for polymer matrix composites subjected to impact load', *Defence Technology*, 17(1), pp. 257–277. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2020.04.002>.

Mahesh, V., Joladarashi, S. and Kulkarni, S.M. (2021b) 'Comparative study on kevlar/carbon epoxy face sheets with rubber core sandwich composite for low velocity impact response: FE approach', *Materials Today: Proceedings*, 44, pp. 1495–1499. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.688>.

Malashin, I. and Martysyuk, D. (2025) 'Powder particle classification with scanning electron microscopy images using machine learning techniques', *Expert Systems with Applications*, 286. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.128001>.

Mansuy, N., Barredo, J.I., Migliavacca, M., Pilli, R., Leverkus, A.B., Janouskova, K. and Mubareka, S. (2024) 'Reconciling the different uses and values of deadwood in the European Green Deal', *One Earth*, 7(9), pp. 1542–1558. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.08.001>.

Marquina, M.V.H., Le Dain, M.-A., Zwolinski, P. and Joly, I. (2022) 'Sustainable performance of circular supply chains: A literature review.', *Procedia CIRP*, 105, pp. 607–612. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.101>.

Martin, H., Chebrolu, D., Chadee, A. and Brooks, T. (2024) 'Too good to waste: Examining circular economy opportunities, barriers, and indicators for sustainable construction and demolition waste management', *Sustainable Production and Consumption*, 48, pp. 460–480. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.05.026>.

Mazurowski, B., O'Hara, P. and Duarte, C.A. (2024) 'On-the-fly multiscale analysis of composite materials with a Generalized Finite Element Method', *Finite Elements in Analysis and Design*, 236. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.finel.2024.104166>.

Mazzuca, P. (2024) 'Flexural behaviour of GFRP sandwich panels with eco-friendly PET foam core for the rehabilitation of building floors', *Structures*, 60. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105815>.

McIlhagger, A., Archer, E. and McIlhagger, R. (2020) 'Manufacturing processes for composite materials and components for aerospace applications', in *Polymer Composites in the Aerospace Industry*. 2^a. Elsevier, pp. 59–81. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102679-3.00003-4>.

Mehta, J., Dilbaghi, N., Deep, A., Hai, F.I., Hassan, A.A., Kaushik, A. and Kumar, S. (2025) 'Plastic waste upcycling into carbon nanomaterials in circular economy: Synthesis, applications, and environmental aspects', *Carbon*, 234. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2024.119969>.

Middleton, B. (2016) 'Composites: Manufacture and Application', in *Design and Manufacture of Plastic Components for Multifunctionality*. Elsevier, pp. 53–101. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-34061-8.00003-X>.

Mondal, S. and Kulkarni, S.G. (2022) 'A Blockchain Based Transparent Framework for Plastic Waste Management', in *2022 14th International Conference on COMmunication Systems & NETworkS (COMSNETS)*. 2022 14th International Conference on COMmunication Systems & NETworkS (COMSNETS), Bangalore, India: IEEE, pp. 332–334. Available at: <https://doi.org/10.1109/COMSNETS53615.2022.9668574>.

Muñoz, S., Hosseini, M.R. and Crawford, R.H. (2024) 'Towards a holistic assessment of circular economy strategies: The 9R circularity index', *Sustainable Production and Consumption*, 47, pp. 400–412. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.04.015>.

Nafiu, S.A., Azeez, O., AlAqad, K.M., Olarewaju, T.A., Yerima, E.A. and Tanimu, A. (2025) 'Waste plastic management: Recycling and the environmental health nexus', *Cleaner Materials*, 15. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100291>.

Naik, B.R., Chadalla, S.K., Awasthi, A., Tondon, R., Yadav, D.K., Taher, W.M. and Nagpal, A. (2023) 'The application of metal matrix composite materials in propulsion system valves', *Materials Today: Proceedings* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.10.083>.

Ndhlovu, E. and Dube, K. (2024) 'Agritourism and sustainability: A global bibliometric analysis of the state of research and dominant issues', *Journal of Outdoor Recreation and Tourism*, 46. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jort.2024.100746>.

Nguyen, T.Q., Luu, L.Q., Martínez-Ramón, N., Longo, S., Cellura, M. and Dufour, J. (2024) 'Sustainability and circularity assessment of biomass-based energy supply chain', *Heliyon*, 10. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38557>.

Nordahl, S.L. and Scown, C.D. (2024) 'Recommendations for life-cycle assessment of recyclable plastics in a circular economy', *Chemical Science*, 15, pp. 9397–9407. Available at: <https://doi.org/10.1039/D4SC01340A>.

Olofinnade, O., Chandra, S. and Chakraborty, P. (2021) 'Recycling of high impact polystyrene and low-density polyethylene plastic wastes in lightweight based concrete for sustainable construction', *Materials Today: Proceedings*, 38, pp. 2151–2156. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.176>.

Oo, P.Z., Prapasongsa, T., Strezov, V., Huda, N., Oshita, K., Takaoka, M., Ren, J., Halog, A. and Gheewala, S.H. (2024) 'The role of global waste management and circular economy towards carbon neutrality', *Sustainable Production and Consumption* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.11.021>.

Ouarhim, W., Zari, N., Bouhfid, R. and Quaiss, A.K. (2019) 'Mechanical performance of natural fibers–based thermosetting composites', in *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*. Mohammad Jawaid, Mohamed Thariq, Naheed Saba, pp. 43–60. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102292-4.00003-5> (Accessed: 19 February 2025).

Ozdemir, O., Oztoprak, N. and Kandas, H. (2018) 'Single and repeated impact behaviors of bio-sandwich structures consisting of thermoplastic face sheets and different balsa core thicknesses', *Composites Part B: Engineering*, 149, pp. 49–57. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.05.016>.

Pai, Y., Pai, K.D. and Kini, M.V. (2021) 'A review on low velocity impact study of hybrid polymer composites', *Materials Today: Proceedings*, 46, pp. 9073–9078. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.390>.

Parlamento Europeu (2024a) *Economia Circular: definição, importância e benefícios*, *Temas*. Available at: <https://www.europarl.europa.eu/topics/pt/article/20151201STO05603/economia-circular-definicao-importancia-e-beneficios> (Accessed: 20 November 2024).

Parlamento Europeu (2024b) *Gestão sustentável de resíduos: o que a UE está a fazer*, *Temas*. Available at: <https://www.europarl.europa.eu/topics/pt/article/20180328STO00751/gestao-sustentavel-de-residuos-o-que-a-ue-esta-a-fazer> (Accessed: 14 January 2025).

Parveez, B., Kittur, M.I., Badruddin, I.A., Kamangar, S., Hussien, M. and Umarfarooq, M.A. (2022) 'Scientific Advancements in Composite Materials for Aircraft Applications: A Review', *Polymers*, 14. Available at: <https://doi.org/10.3390/polym14225007>.

Pekdemir, M.E., Öner, E., Kök, M. and Qader, I.N. (2021) 'Thermal behavior and shape memory properties of PCL blends film with PVC and PMMA polymers', *Iranian Polymer Journal*, 30, pp. 633–641. Available at: <https://doi.org/10.1007/s13726-021-00919-8>.

Plastics Europe (2024) *Plastics – the fast Facts 2024*, Plastics Europe: Enabling a sustainable future. Available at: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2024/> (Accessed: 6 February 2025).

Poojitha, G., Talari, P., Banoth, S. and Kumar, A. (2023) 'Effects of combined infill angle with honeycomb pattern on the mechanical properties of HIPS and polypropylene in FDM process', *Materials Today: Proceedings* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.09.219>.

Prajapati, S., Sharma, J.K., Kumar, S., Pandey, S. and Pandey, M.K. (2024) 'A review on comparison of physical and mechanical properties of PLA, ABS, TPU, and PETG manufactured engineering components by using fused deposition modelling', *Materials Today: Proceedings* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2024.05.018>.

Presidência do Conselho de Ministros (2023) *Resolução do Conselho de Ministros n.º 127/2023, de 18 de outubro*. Available at: <https://files.diariodarepublica.pt/1s/2023/10/20200/0000900227.pdf> (Accessed: 14 January 2025).

Presidência do Conselho de Ministros (2024) *Decreto-Lei n.º 24/2024, de 26 de março*. Available at: <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/24-2024-857366010> (Accessed: 14 January 2025).

Qian, B., Shen, F., Zhu, H., Zhang, J., Wu, M., Liu, J., Wu, Q. and Yang, J. (2024) 'Synthesis, performance evaluation, and plasticization dynamics of biobased vanillic acid plasticizer for poly(vinyl chloride)', *Chemical Engineering Journal*, 497. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.154991>.

Ramírez-Rodríguez, L.C., Ormazabal, M. and Jaca, C. (2024) 'Mapping sustainability assessment methods through the industrial symbiosis life cycle for a circular economy',

Sustainable Production and Consumption, 50, pp. 253–267. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.08.005>.

Rasheed, K., Saad, S., Zaland, A., Khan, M.W., Ali, Z., Haris, M., Ammad, S. and Sadiq, T. (2024) ‘Circular economy and critical barriers: Mapping the pathways and success metrics for sustainable circular success in industrialised South Asian developing nations’, *Results in Engineering*, 24. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102995>.

Ravishankar, P., Arya, M., Dhakal, H., Gouda, F., Skrifvars, M. and Khalili, P. (2024) ‘Assessing the mechanical performance of natural fiber thermoplastic composite sandwiches for advanced applications’, *Results in Materials*, 23. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2024.100600>.

Rede para o Desenvolvimento (2020) ‘ABC dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável - Comunidade Educativa’. Available at: <https://rumoa2030.pt/wp-content/uploads/2021/03/ABC-ODS-Professores.pdf> (Accessed: 20 November 2024).

Rodrigo-Bravo, A., Calderón, V., Cuenca-Romero, L.A., Arroyo, R. and Gutiérrez-González, S. (2024) ‘Eco-efficiency and economic assessment of gypsum-based precast with polymeric waste: A case study’, *Case Studies in Construction Materials*, 20. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03052>.

Saifullah, A., Wang, L., Barouni, A., Giasin, K., Lupton, C., Jiang, C., Zhang, Z., Quaratino, A. and Dhakal, H.N. (2021) ‘Low velocity impact (LVI) and flexure-after-impact (FAI) behaviours of rotationally moulded sandwich structures’, *Journal of Materials Research and Technology*, 15, pp. 3915–3927. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.10.030>.

Salehi, A., Omidkhah, M., Amooghin, A.E. and Sharifzadeh, M.M.M. (2025) ‘Improved gas separation performance of PMMA/Matrimid@5218/graphene oxide (GO) mixed matrix membranes’, *Journal of CO₂ Utilization*, 91. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2024.103012>.

Salman, S., Bhattacharjee, P., Rahman, M., Nur, S.A., Sindhvani, R. and Ali, S.M. (2025) ‘Pathways to advancing sustainable practices in industrial solid waste management: Unveiling obstacles and implications’, *Next Research*, 2(1). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2024.100124>.

Sampedro-Beneyto, V., Agulló-Torres, A., Del_Campo-Gomis, F. and Arias-Navarro, I. (2024) ‘Influence of social factors and environmental behaviour in the knowledge and

opinion about circular economy’, *Futures*, 164. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.futures.2024.103490>.

Sánchez-Calderón, I., Bernardo, V., Martín-de-León, J. and Rodríguez-Pérez, M.A. (2022) ‘Thermal conductivity of low-density micro-and nanocellular poly(methyl-methacrylate) (PMMA): Experimental and modeling’, *Materials & Design*, 221. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110938>.

Schenk, V., Labastie, K., Destarac, M., Olivier, P. and Guerre, M. (2022) ‘Vitrimers composites: current status and future challenges’, *Materials Advances*, 3(22), pp. 8012–8029. Available at: <https://doi.org/10.1039/D2MA00654E>.

Schwarz, A.E., Ligthart, T.N., Bizarro, D.G., De Wild, P., Vreugdenhil, B. and Harmelen, T.V. (2021) ‘Plastic recycling in a circular economy; determining environmental performance through an LCA matrix model approach’, *Waste Management*, 121, pp. 331–342. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.12.020>.

Shah, S.Z.H., Karuppanan, S., Megat-Yussof, P.S.M. and Sajid, Z. (2019) ‘Impact resistance and damage tolerance of fiber reinforced composites: A review’, *Composite Structures*, 217, pp. 100–121. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.03.021>.

Shamsuyeva, M. and Endres, H.-J. (2021) ‘Plastics in the context of the circular economy and sustainable plastics recycling: Comprehensive review on research development, standardization and market’, *Composites Part C: Open Access*, 6. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100168>.

Sicommin - Epoxy Systems (2016) ‘Fiche Technique - SR GreenPoxy 56’.

Sirjani, E., Cragg, P.J. and Dymond, M.K. (2019) ‘Glass transition temperatures, melting temperatures, water contact angles and dimensional precision of simple fused deposition model 3D prints and 3D printed channels constructed from a range of commercially available filaments’, *Chemical Data Collections*, 22. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cdc.2019.100244>.

Smol, M. (2022) ‘Is the green deal a global strategy? Revision of the green deal definitions, strategies and importance in post-COVID recovery plans in various regions of the world’, *Energy Policy*, 169. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113152>.

Sociedade Ponto Verde (2020) *Símbolos e Ícones*, Sociedade Ponto Verde. Available at: https://www.pontoverde.pt/simbolos_e_icones.php (Accessed: 30 January 2025).

Song, P., Trivedi, A. and Siviour, C.R. (2023) 'Tensile testing of polymers: Integration of digital image correlation, infrared thermography and finite element modelling', *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 171. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2022.105161>.

Soni, A., Das, P.K., Gupta, S.K., Saha, A., Rajendran, S., Kamyab, H. and Yusuf, M. (2024) 'An overview of recent trends and future prospects of sustainable natural fiber-reinforced polymeric composites for tribological applications', *Industrial Crops and Products*, 222. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119501>.

Sousa, A.M., Pinho, A.C. and Piedade, A.P. (2021) 'Mechanical properties of 3D printed mouthguards: Influence of layer height and device thickness', *Materials & Design*, 203. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109624>.

Srinivasan, R., Prathap, P., Raj, A., Kannan, S.A. and Deepak, V. (2020) 'Influence of fused deposition modeling process parameters on the mechanical properties of PETG parts', *Materials Today: Proceedings*, 27, pp. 1877–1883. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.809>.

Sujon, M.A.S., Islam, A. and Nadimpalli, V.K. (2021) 'Damping and sound absorption properties of polymer matrix composites: A review', *Polymer Testing*, 104. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107388>.

Sumithra, G., Reddy, R.N., Kumar, G.D., Ojha, S., Jayachandra, G. and Raghavendra, G. (2023) 'Review on composite classification, manufacturing, and applications', *Materials Today: Proceedings* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.637>.

Syduzzaman, Md., Chowdhury, S.E., Pritha, N.M., Hassan, A. and Hossain, S. (2024) 'Natural fiber reinforced polymer composites for ballistic protection: Design, performance, and challenges', *Results in Materials*, 24. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2024.100639>.

Taheri, F. and Llanos, J.R.J.G. (2024) 'Comparative Performance of Kevlar, Glass and Basalt Epoxy- and Elium-Based Composites under Static-, Low- and High-Velocity Loading Scenarios—Introduction to an Effective Recyclable and Eco-Friendly Composite', *Polymers*, 16, pp. 1–25. Available at: <https://doi.org/10.3390/polym16111494>.

Techawinyutham, L., Tengsuthiwat, J., Srisuk, R., Techawinyutham, W., Rangappa, S. and Siengchin, S. (2021) 'Recycled LDPE/PETG blends and HDPE/PETG blends: mechanical,

thermal, and rheological properties’, *Journal of Materials Research and Technology*, 15, pp. 2445–2458. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.09.052>.

Theofanidis, S.A., Delikonstantis, E., Yfanti, V-L., Galvita, V.V., Lemonidou, A.A. and Geem, K.V. (2025) ‘An electricity-powered future for mixed plastic waste chemical recycling’, *Waste Management*, 193, pp. 155–170. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.12.003>.

Thuong, N.T., Lam, N.B., Son, P.A., Chien, N.B., Linh, N.P.D., Nam, C.T.H. and Vu, N.A. (2024) ‘Preparation and Characterization of Thermally Conductive High Impact Polystyrene/AlN Composite’, *International Journal of Polymer Science*. Edited by A. Caggiano, 2024(1). Available at: <https://doi.org/10.1155/2024/2723981>.

Timilsina, B. and Nguyen, P.T. (2024) ‘From awareness to practice: Insights from the managers of Finnish circular economy pioneering companies’, *Journal of Cleaner Production*, 480. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144150>.

Tomar, P. (2024) ‘Impact of nanotechnology at heterogeneous interphases @ Sustainability’, *Heliyon*, 10. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26943>.

Tong, L., Wang, X., Tong, J., Yi, X., Liu, X. and Rudd, C. (2023) ‘Re-use of jute fiber hybrid nonwoven breather within laminated composite applications: A case study’, *Sustainable Materials and Technologies*, 36. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00621>.

Traxler, I., Laske, S. and Fischer, J. (2024) ‘Closed-loop recycling of polypropylene: A case study on mechanical recycling of separately collected yogurt cups in Austria’, *Resources, Conservation and Recycling*, 205. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107537>.

Tuo, H., Lu, Z., Ma, X., Zhang, C. and Chen, S. (2019) ‘An experimental and numerical investigation on low-velocity impact damage and compression-after-impact behavior of composite laminates’, *Composites Part B: Engineering*, 167, pp. 329–341. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.12.043>.

Velásquez, E., López-de-Dicastillo, C., Tapia, A., Garrido, L., Catalán, L., Valenzuela, X., Guarda, A. and Galotto, M. (2024) ‘Repetitive mechanical recycling of post-consumer high impact polystyrene from yogurt cups: A pilot-scale performance assessment at different reprocessing cycles’, *Resources, Conservation and Recycling*, 202. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107368>.

Veley, L., Trembly, J. and Al-Majali, Y. (2023) '3D Printing of sustainable coal polymer composites: Thermophysical characteristics', *Materials Today Communications*, 37. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106989>.

Verma, C., Rhee, K.Y. and Alfantazi, A. (2025) 'Functionalized epoxy resins for enhanced interface properties and corrosion resistance: Tailoring of surface and interface properties and performance', *Applied Surface Science Advances*, 25. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2024.100685>.

Vidakis, N., Petousis, M., Michailidis, N., Papadakis, V., Mountakis, N., Argyros, A., Spiridaki, M. and Valsamos, J. (2025) 'Cyclic economy driven additive manufacturing: Valorization of mechanically recycled poly(methyl methacrylate) scrap in material extrusion 3D printing', *Journal of Cleaner Production*, 486. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144639>.

Wang, M. and Duan, B. (2019) 'Materials and Their Biomedical Applications', in *Encyclopedia of Biomedical Engineering*. Elsevier, pp. 135–152. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801238-3.99860-X>.

WD Retail (2020) *WD Retail - Soluções para Ponto de Venda, Lda*. Available at: <https://wdretail.pt> (Accessed: 21 July 2025).

Wirawan, R., Zainudin, E.S. and Sapuan, S.M. (2009) 'Mechanical Properties of Natural Fibre Reinforced PVC Composites: A Review', *Sains Malaysiana*, 38(4), pp. 531–535. Available at: https://www.researchgate.net/publication/288717510_Mechanical_Properties_of_Natural_Fibre_Reinforced_PVC_Composites_A_Review (Accessed: 6 May 2025).

Witten, E. and Mathes, V. (2024) *The European market for Fiber-Reinforced Plastics / Composites 2023*, pp. 1–42. Available at: https://eucia.eu/wp-content/uploads/2024/05/avk_marketreport_2024_final_eng.pdf (Accessed: 4 March 2025).

Wulf, F., Hagedorn, L., Munier, L., Balder, J., Mathi, C., Stark, R. and Pfriem, A. (2024) 'Towards digitalization of the circular economy in the furniture industry', *Sustainable Production and Consumption*, 52, pp. 45–62. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.10.010>.

- Xu, L., Jiang, J., Ni, L., Chen, Z. and Li, C. (2022) 'Preparation and study of the flame retardant properties of C60/PMMA microspheres', *RSC Advances*, 12, pp. 22623–22630. Available at: <https://doi.org/10.1039/D2RA03642H>.
- Xu, X., Cheng, L., Cai, Z., Li, J. and Ke, Y. (2025) 'Multi-source lay-up error analysis and lay-up pressure optimization for robotic automated fiber placement (AFP)', *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 193. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2025.108825>.
- Yadav, N. and Schledjewski, R. (2023) 'Review of in-process defect monitoring for automated tape laying', *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 173. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2023.107654>.
- Yan, C., Kleiner, C., Tabigue, A., Shah, V., Sacks, G., Shah, D. and DeStefano, V. (2024) 'PETG: Applications in Modern Medicine', *Engineered Regeneration*, 5(1), pp. 45–55. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.engreg.2023.11.001>.
- Yan, L. and Xu, H. (2025) 'Lightweight composite materials in automotive engineering: State-of-the-art and future trends', *Alexandria Engineering Journal*, 118, pp. 1–10. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.12.002>.
- Yan, T., Balzer, A.H., Herbert, K.M., Epps, T. H. and Korley, L.T.J. (2023) 'Circularity in polymers: addressing performance and sustainability challenges using dynamic covalent chemistries', *Chemical Science*, 14(20), pp. 5243–5265. Available at: <https://doi.org/10.1039/D3SC00551H>.
- Yan, Z., Shen, C., Fang, H., Xie, L., Bao, X. and Wang, H. (2024) 'Compressive performance of full-scale GFRP composite sandwich wall panels with wood core', *Journal of Building Engineering*, 86. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.108979>.
- Yang, B., Zhou, Q., Lee, J., Li, Y., Fu, K. and Yang, D. (2023) 'Experimental and numerical study of low-velocity impact damage in sandwich panel with UHMWPE composite facings', *International Journal of Solids and Structures*, 284. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2023.112519>.
- Yang, D., Chittoori, B., Krier, K. and Davis, K. (2023) 'Work-In-Progress: Implementing Sustainability and Resilience in An Undergraduate Construction Management Curriculum: Student's Knowledge and Attitude', in *2023 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE)*. *2023 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE)*, College Station, TX, USA: IEEE, pp. 1–4. Available at: <https://doi.org/10.1109/FIE58773.2023.10343267>.

Yao, L., Leng, Z., Lan, J., Chen, R. and Jiang, J. (2022) 'Environmental and economic assessment of collective recycling waste plastic and reclaimed asphalt pavement into pavement construction: A case study in Hong Kong', *Journal of Cleaner Production*, 336. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130405>.

Yu, J., Sun, L., Ma, C., Qiao, Y. and Yao, H. (2016) 'Thermal degradation of PVC: A review', *Waste Management*, 48, pp. 300–314. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.041>.

Zanchin, G. and Leone, G. (2021) 'Polyolefin thermoplastic elastomers from polymerization catalysis: Advantages, pitfalls and future challenges', *Progress in Polymer Science*, 113. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2020.101342>.

Zhang, H. and Sun, W. (2023) 'Mechanical properties and failure behavior of 3D printed thermoplastic composites using continuous basalt fiber under high-volume fraction', *Defence Technology*, 27, pp. 237–250. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2022.07.010>.

Zhao, J., Meng, X., Wei, Z., Mo, J., Wu, W., Luo, B., Song, H. and Nie, S. (2025) 'Enhanced electrocatalytic synthesis and degradation enabled by triboelectric effect', *Nano Energy*, 139. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2025.110962>.

Zhao, W., Li, Z., Mao, L., Pang, Z. and Du, Z. (2025) 'Investigation on the ballistic impact response and energy absorption characteristics of CFRP/aluminum honeycomb sandwich panel multi-layer structures', *Mechanical Systems and Signal Processing*, 237. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2025.113084>.

Zheng, B., Zhang, S., Shu, G., Sun, Z., Wang, Y. and Xie, J. (2023) 'Experimental investigation and modeling of the mechanical properties of construction PMMA at different temperatures', *Structures*, 57. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105091>.

Zhou, Y., Xue, B., Guo, Y., Zhang, W. and Wang, R. (2023) 'Mechanical responses of CFRP/PVC foam sandwich plate impacted by hailstone', *International Journal of Impact Engineering*, 178. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023.104631>.

Anexo I

Resultados do Ensaio de Flexão em Três Pontos do Núcleo

Na Figura 80 apresentam-se as curvas representativas de tensão-deformação dos materiais compósitos de matriz poliéster reforçados com partículas de PETG de tamanhos [1,18; 2,36][mm e [0,300; 0,600][mm, bem como pelas partículas de PETG/PVC/PMMA de tamanhos idênticos.

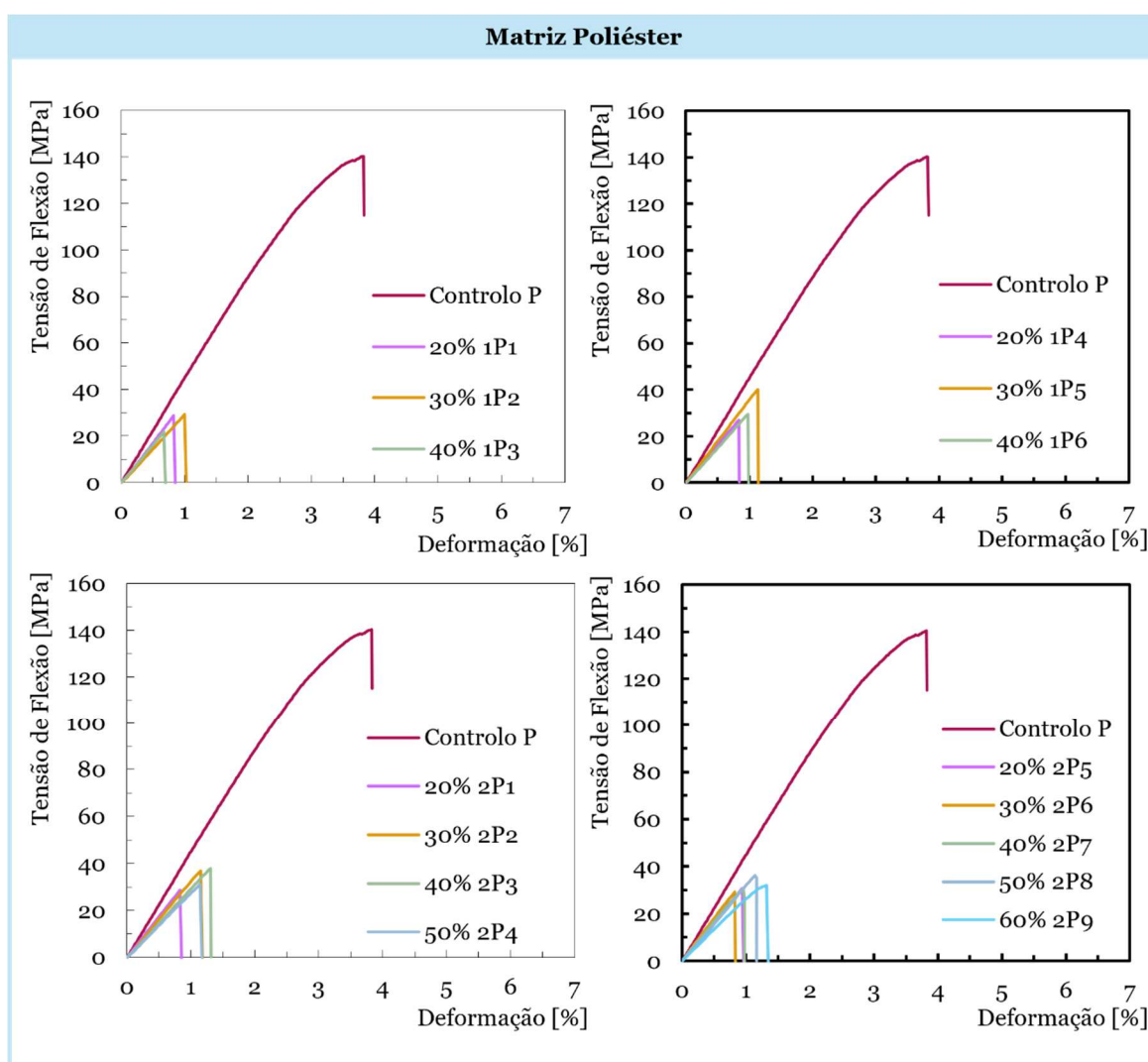


Figura 80 - Curvas representativas de tensão-deformação dos materiais compósitos de matriz poliéster²¹

²¹ Os gráficos realçados encontram-se apresentados no capítulo 7, facilitando a distinção entre si.

Na Figura 81 apresentam-se as curvas representativas de tensão-deformação dos materiais compósitos de matriz epóxi verde reforçados com partículas de PETG de tamanhos [1,18; 2,36][mm e [0,300; 0,600][mm, bem como pelas partículas de PETG/PVC/PMMA de tamanhos idênticos.

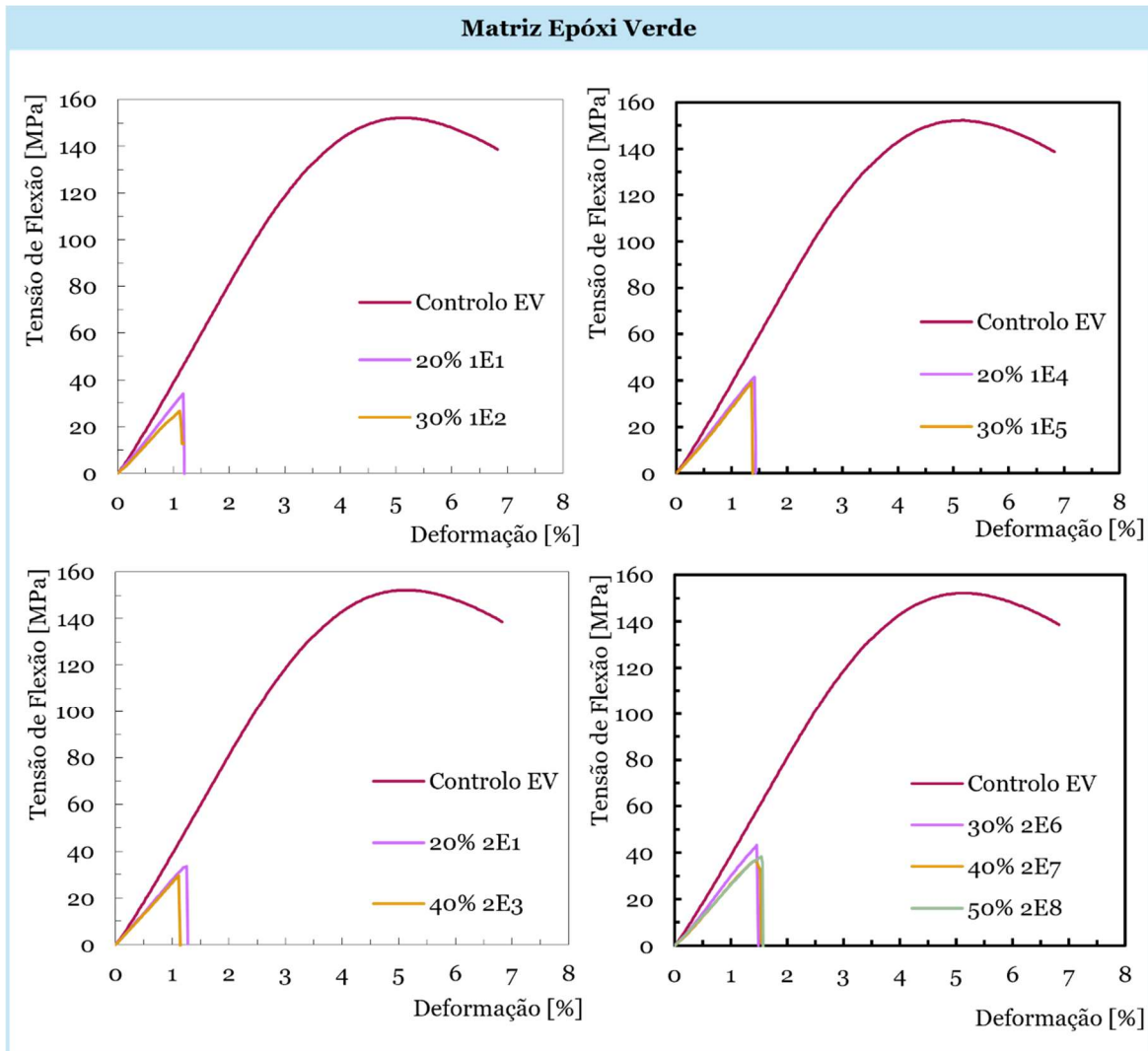


Figura 81 - Curvas representativas de tensão-deformação dos materiais compósitos de matriz epóxi verde

Considerando os resultados obtidos, na Figura 82 apresentam-se as comparações entre as percentagens em peso das partículas de PETG e PETG/PVC/PMMA, com as propriedades de flexão (tensão de flexão, rigidez e deformação), obtidas para os materiais compósitos de matriz poliéster.

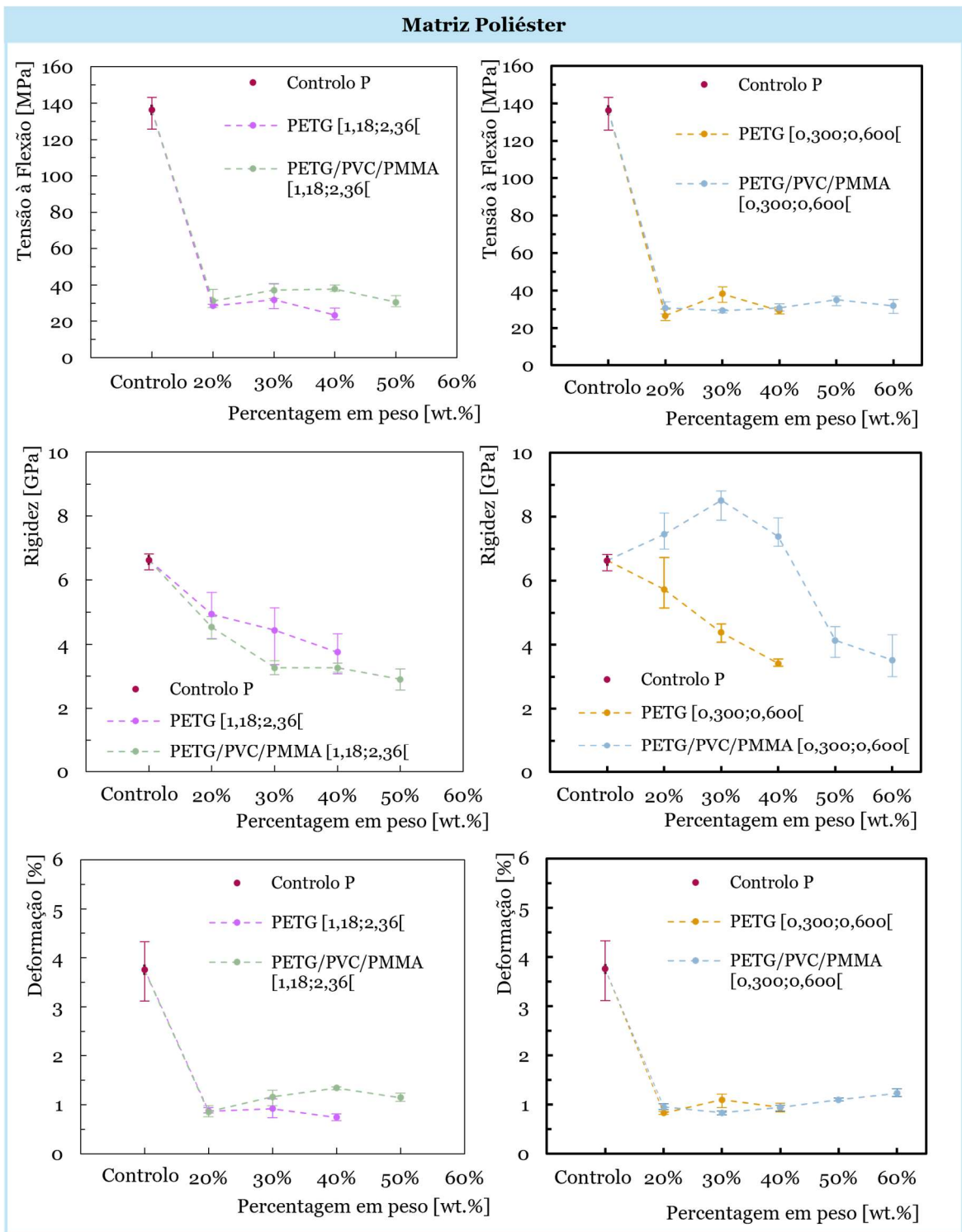


Figura 82 - Comparações entre as percentagens em peso de partículas com as propriedades de flexão (tensão de flexão, rigidez e deformação) dos materiais compósitos de matriz poliéster

Analogamente, na Figura 83 apresentam-se as comparações entre as percentagens em peso das partículas de PETG e PETG/PVC/PMMA, com as propriedades de flexão (tensão de flexão, rigidez e deformação), obtidas para os compósitos de matriz epóxi verde.

Matriz Epóxi Verde

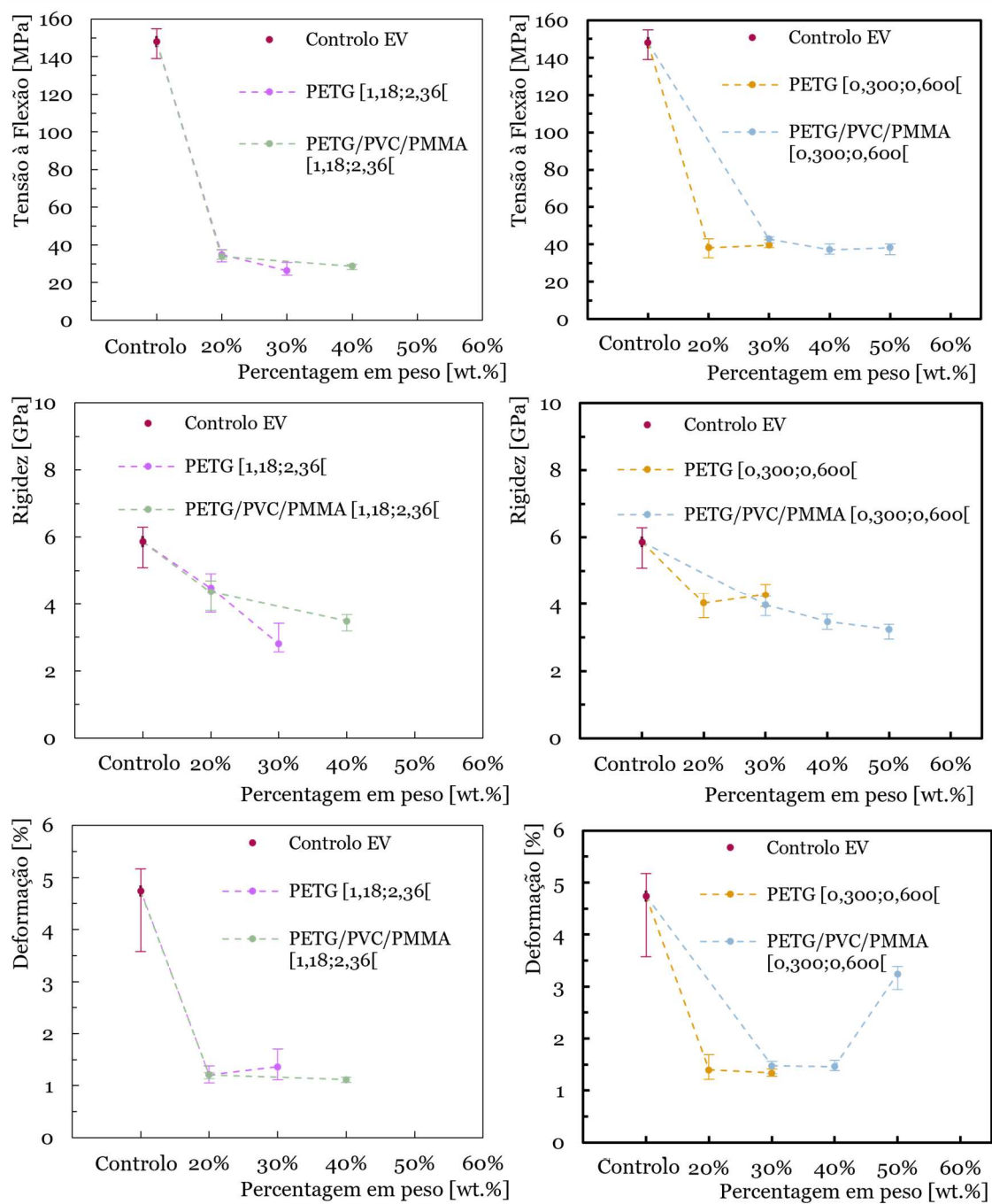


Figura 83 - Comparações entre as percentagens em peso de partículas com as propriedades de flexão (tensão de flexão, rigidez e deformação) dos materiais compostos de matriz epóxi verde

Anexo II

Resultados do Ensaio de Impacto de Baixa Velocidade do Painel Sanduíche

Na Figura 84, 85 e 86 apresentam-se os gráficos Energia vs. Tempo, Força vs. Tempo e Força vs. Deslocamento, respetivamente, obtidos com a aplicação do Ensaio de Impacto de Baixa Velocidade aos painéis sanduíche de núcleos de matriz poliéster e de matriz epóxi verde, reforçadas com 30 wt. % de partículas de PETG de tamanhos [0,300; 0,600][mm].

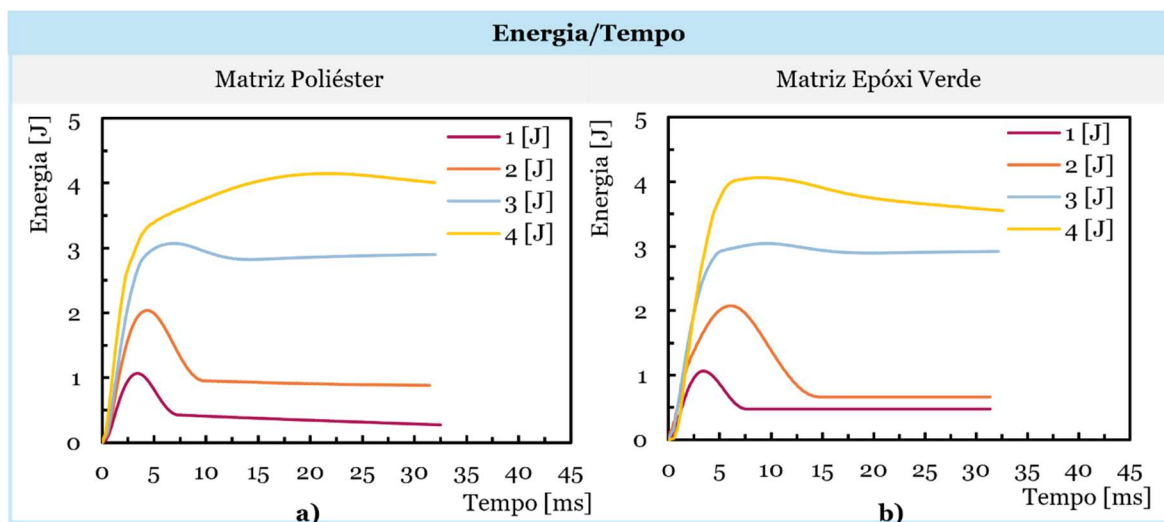


Figura 84 – Curvas representativas Energia vs. Tempo das várias energias de impacto em estudo

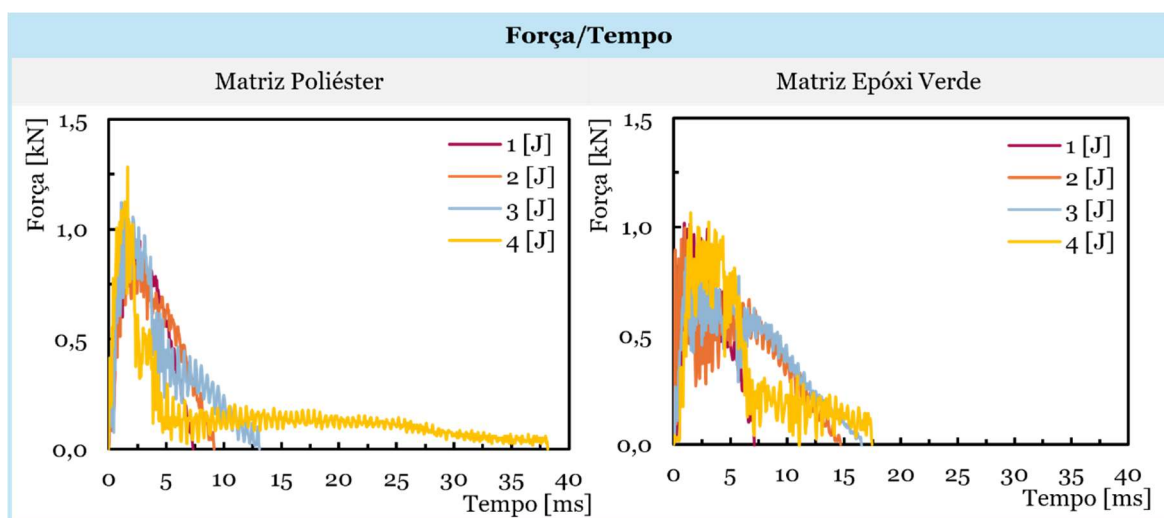


Figura 85 - Curvas representativas Força vs. Tempo das várias energias de impacto em estudo

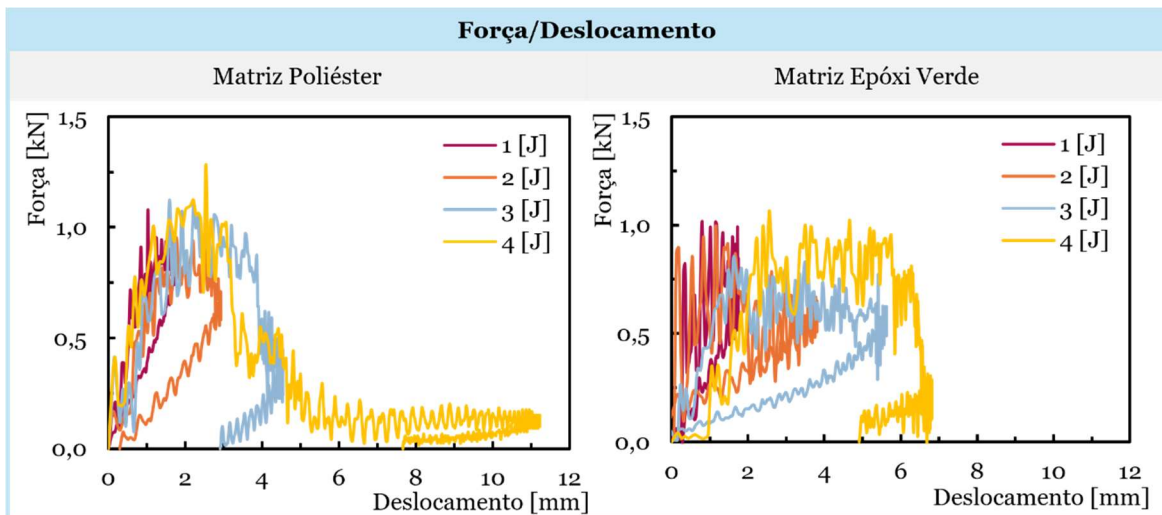


Figura 86 – Curvas representativas Força vs. Deslocamento das várias energias de impacto em estudo

Para uma melhor compreensão dos resultados obtidos, foram elaborados gráficos de comparação das propriedades de impacto (tempo de contacto, força máxima, deslocamento máximo e energia restituída), em função da energia potencial de queda (1J, 2J, 3J e 4J), para cada uma das sanduiches, apresentados nas Figuras 87, 88, 89 e 90.

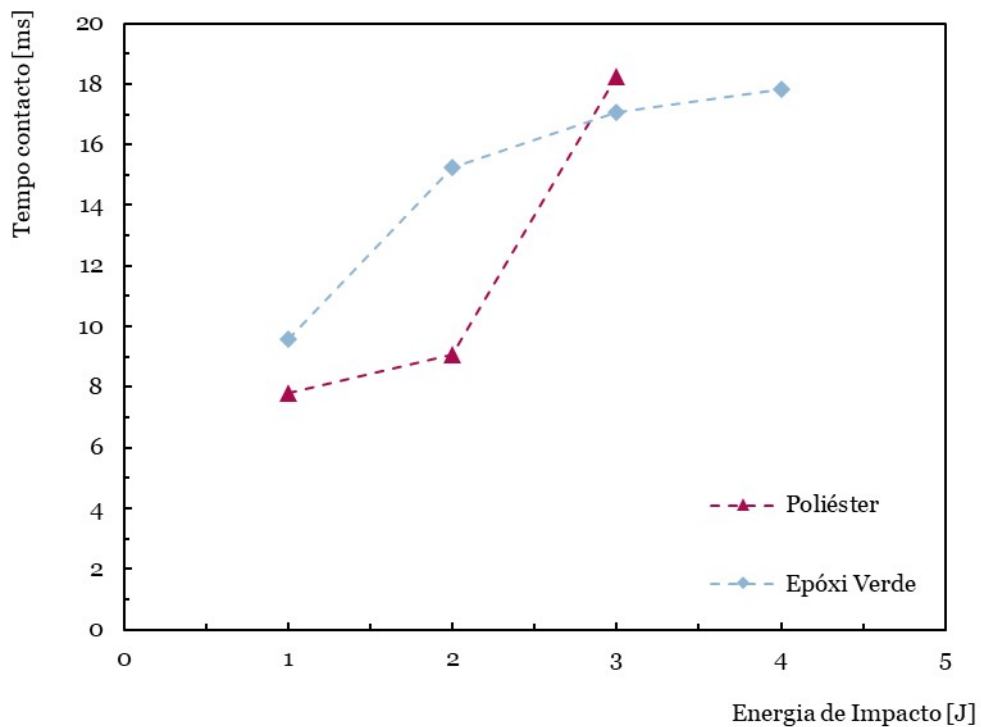


Figura 87 - Gráfico Tempo de Contacto vs. Energia

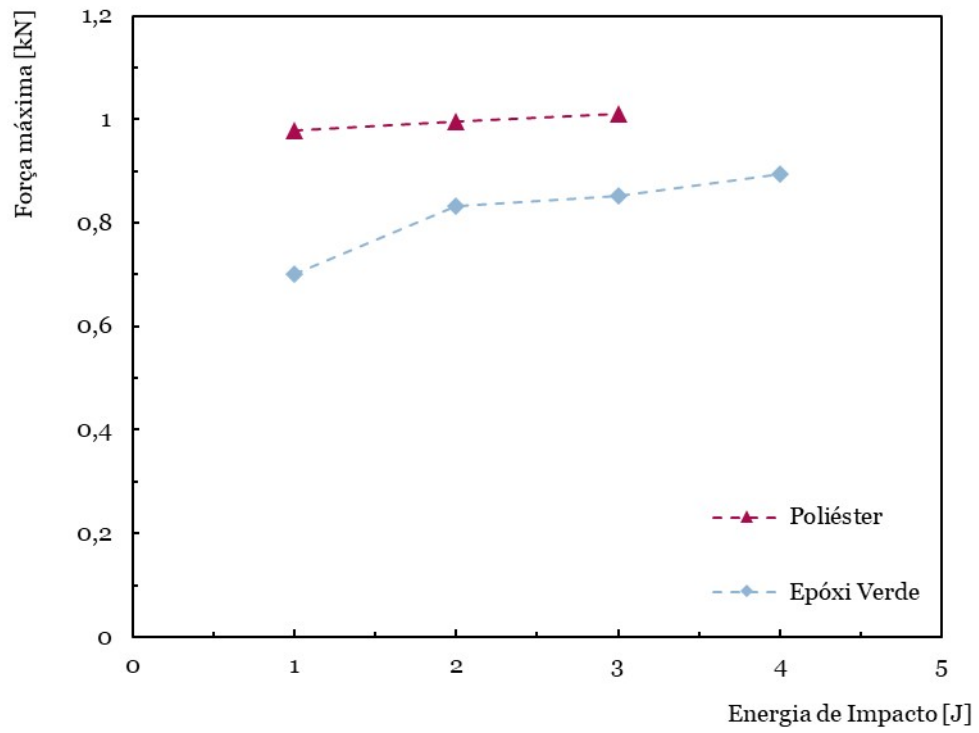


Figura 88 - Gráfico Força máxima vs. Energia

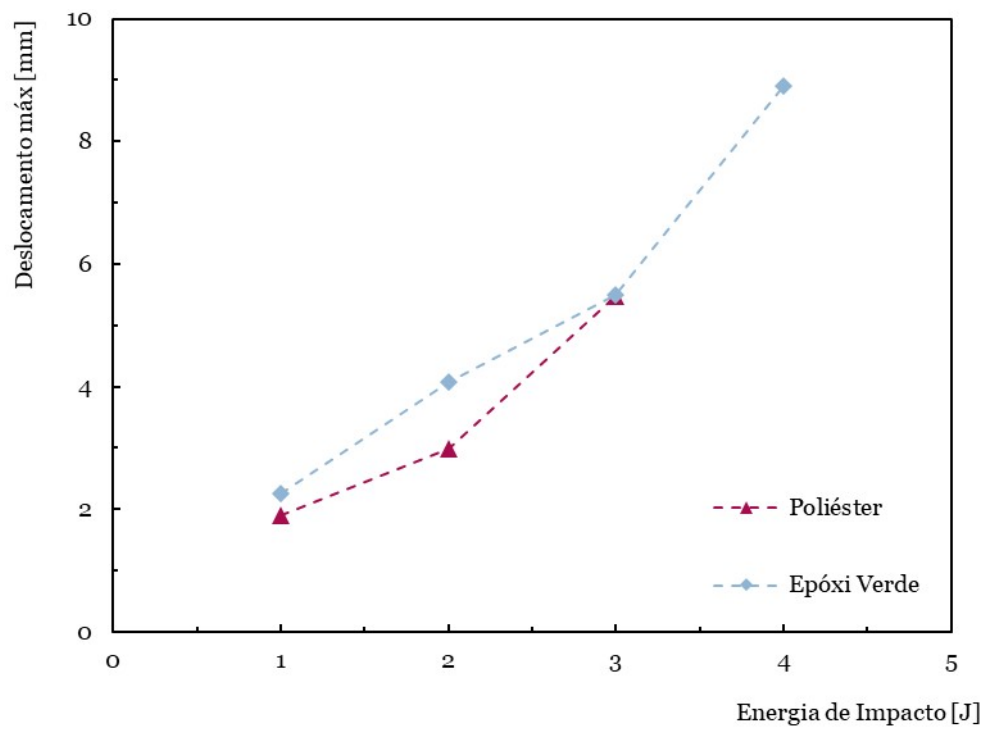


Figura 89 – Gráfico Deslocamento máximo vs. Energia

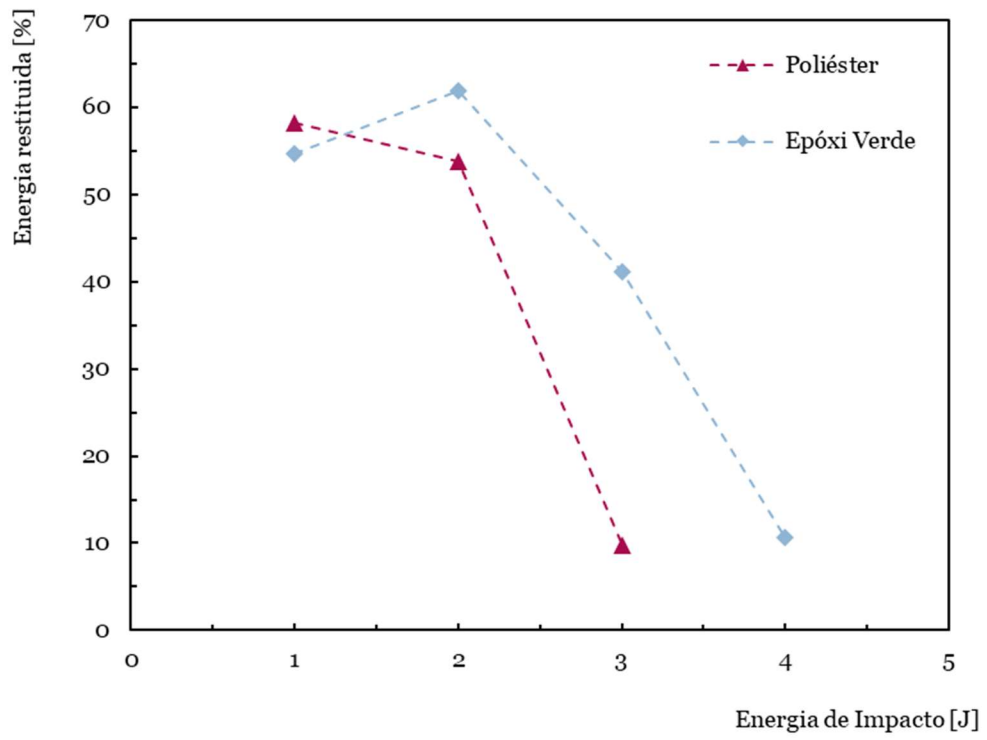


Figura 90 - Gráfico Energia Restituída vs. Energia