



# **PROCESSAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉ- RICA REFORÇADOS COM FIBRAS CUR- TAS DE CASCA DE CASTANHA**

Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção Industrial

João Pedro Santos Monteiro

Leiria, Março de 2023

*(Esta página foi intencionalmente deixada em branco)*



# **PROCESSAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉ- RICA REFORÇADOS COM FIBRAS CUR- TAS DE CASCA DE CASTANHA**

Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção Industrial

João Pedro Santos Monteiro

Projeto realizado sob a orientação do Professor Doutor Henrique de Amorim Almeida e do  
Professor Doutor Carlos Alexandre Bento Capela

Leiria, Março de 2023





# **Originalidade e Direitos de Autor**

A presente projeto é original, elaborado unicamente para este fim, tendo sido devidamente citados todos os autores cujos estudos e publicações contribuíram para o elaborar.

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição de que seja mencionado o Autor e feita referência ao ciclo de estudos no âmbito do qual o mesmo foi realizado, a saber, Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção Industrial, no ano letivo 2021/2022, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, e, bem assim, à data das provas públicas que visaram a avaliação destes trabalhos.

*(Esta página foi intencionalmente deixada em branco)*

# Agradecimentos

Nesta secção gostaria de deixar um agradecimento especial a todas as pessoas que me acompanharam e apoiaram durante a realização deste trabalho,

Em primeiro lugar gostaria de agradecer aos orientadores desta tese, os Professores Doutores Henrique Almeida e Carlos Capela, pela proposta de realização desta investigação, contribuindo largamente para o seu sucesso com a orientação prestada e transmissão dos seus conhecimentos.

À Sortegel pelo interesse e disponibilidade em colaborar com este trabalho, fornecendo a matéria-prima necessária para a realização do mesmo.

Um agradecimento especial aos técnicos de oficina e laboratórios do Departamento de Engenharia Mecânica, a Eng.<sup>a</sup> Fernanda Carvalho e o Eng.<sup>o</sup> Jorge Domingues, por todo o auxílio prestado ao longo da realização da componente prática desta investigação. Sem o contributo e generosidade destas pessoas, a realização deste trabalho não teria sido possível.

À instituição do Instituto Politécnico de Leiria, a todos os professores, colegas de curso e colegas de trabalho com quem me cruzei ao longo dos último 7 anos, um agradecimento por todos os ensinamentos, conselhos e experiências partilhadas

Aos meus amigos mais próximos gostaria de agradecer a amizade, ajuda e incentivo a superar todos os desafios. A eles devo muito daquilo que fui capaz de alcançar durante o meu percurso académico e também na vida pessoal.

À minha família por me terem dado a oportunidade de seguir os meus estudos, pelo apoio incansável e incalculável que prestaram ao longo de toda a minha vida. Fico muito grato por terem estado sempre presentes, pois sem eles, nada do que alcancei seria possível.

Por último, um agradecimento à pessoa que foi a peça chave para o meu sucesso académico, a minha companheira nos melhores e, sobretudo, nos piores momentos, a Patrícia Almeida. A ela agradeço todo amor e carinho que demonstra todos os dias, a sua infinita paciência, resiliência e força de vontade, que me inspira e incentiva a superar-me e ser uma pessoa melhor. Estou imensamente grato por ter a meu lado esta pessoa incrível que nunca me deixou desistir.

*(Esta página foi intencionalmente deixada em branco)*

# Resumo

O contínuo agravamento dos problemas ambientais e de sustentabilidade têm sido fatores determinantes para o impulsionamento da investigação e desenvolvimento de novos materiais compósitos com características mais amigas do ambiente. Atualmente, as fibras naturais ocupam um lugar importante na produção de compósitos com características mais sustentáveis. A incorporação, na matriz polimérica, de uma percentagem de fibras naturais é uma realidade graças aos grandes avanços tecnológicos registados ao longo das últimas décadas. A introdução deste tipo de fibras poderá ser uma forma economicamente viável e com menor impacto ambiental de produzir materiais com bom desempenho mecânico capazes de realizar as mesmas funções que outros compósitos reforçados com fibras sintéticas (fibra de vidro, aramida), particularmente em aplicações não estruturais de baixo desempenho. Compósitos reforçados com fibras naturais são usados em áreas como a indústria automóvel, engenharia aeroespacial, na medicina, construção civil, entre outras.

As fibras à base da celulose provenientes de desperdícios da indústria agroalimentar podem ser obtidas e processadas de forma muito mais económica. Para além da redução no impacto ambiental, a transformação das fibras para produção de compósitos delas derivados, pode contribuir para o desenvolvimento das regiões produtoras da matéria-prima em questão.

Existem, contudo, algumas limitações na utilização destes materiais, nomeadamente, a fraca adesão entre as interfaces fibra-matriz e baixa resistência mecânica derivada das características hidrofílicas das fibras. Muito trabalho de investigação tem sido realizado para melhor compreender as propriedades destas fibras e como melhorar a sua compatibilidade com a matriz polimérica.

Este trabalho visa a estudar potenciais processos de fabrico e caracterizar dois materiais compósitos de matriz polimérica (resina Epoxy e Polipropileno) com reforço de fibras de casca de castanha, efetuando um estudo comparativo da influência nas suas propriedades mecânicas (resistência à flexão, deformação e módulo de elasticidade) após submersão em água durante um determinado período (40 dias).

**Palavras-chave:** Castanha, Fibras Naturais, Materiais Compósitos, Polipropileno, Resina Epoxy, Propriedades Mecânicas

*(Esta página foi intencionalmente deixada em branco)*

# Abstract

The continuous worsening of environmental and sustainability problems has been a determining factor for the research and development of new composite materials with more environmentally friendly characteristics. Currently, natural fibres occupy an important role in the production of composites with more sustainable characteristics. The incorporation, in the polymer matrix, of a certain percentage of natural fibres is a reality thanks to the great technological advances recorded over the last decades. The introduction of this type of fibres may be an economically feasible way, with less environmental impact, to produce materials with good mechanical performance capable of performing the same functions as other composites reinforced with synthetic fibres (glass fibre, aramid), particularly in low performance non-structural applications. Natural fibre-reinforced composites are used in areas such as the automotive industry, aerospace engineering, in medicine, construction, among others.

Cellulose-based fibres from agri-food industry waste can be obtained and processed in a much more cost-effective way. In addition to reducing the environmental impact, the processing of fibres to produce fibre-based composites can contribute to the development of the regions where the raw material is produced.

However, there are some limitations regarding the utilisation of these materials, namely poor adhesion between fibre-matrix interfaces and low mechanical strength derived from the hydrophilic characteristics of the fibres. A considerable amount of research work is being conducted to better understand the properties of these fibres and how to improve compatibility with the polymeric matrix.

This work aims to study potential manufacturing processes and to characterize two composite materials with a polymeric matrix (Epoxy resin and Polypropylene) reinforced with chestnut shell fibres, performing a comparative study of the influence on their mechanical properties (flexural strength, deformation and elastic modulus) after submersion in water for a certain period (40 days).

**Keywords:** Chestnut, Natural Fibres, Composite Materials, Polypropylene, Epoxy Resin, Mechanical Properties

*(Esta página foi intencionalmente deixada em branco)*

# Índice

<b>Originalidade e Direitos de Autor</b>	<b>iv</b>
<b>Agradecimentos</b>	<b>vi</b>
<b>Resumo</b>	<b>viii</b>
<b>Abstract</b>	<b>x</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>xiv</b>
<b>Lista de tabelas</b>	<b>xviii</b>
<b>Lista de siglas e acrónimos</b>	<b>xx</b>
<b>1. Introdução</b>	<b>1</b>
1.1. Enquadramento	1
1.2. Motivação e objetivos	2
1.3. Estrutura do relatório	3
<b>2. Revisão Bibliográfica</b>	<b>5</b>
2.1. Produção de castanha em Portugal	5
2.2. Materiais poliméricos	7
2.2.1. Materiais termoplásticos	8
2.2.2. Materiais termoendurecíveis	9
2.3. Materiais compósitos de matriz polimérica	10
2.3.1. Influência do comprimento, orientação e concentração das fibras	11
2.3.2. Fibras naturais	12
2.3.3. Matrizes para compósitos reforçados com fibras naturais	17
2.3.4. Processos de Fabrico	19
2.3.5. Aplicações	21
<b>3. Materiais e procedimentos</b>	<b>25</b>
3.1. Cascas de castanha	25
3.1.1. Densidade aparente	27
3.2. Resina Epoxy e endurecedor	28
3.3. Polipropileno	28
3.4. Processo de fabrico dos provetes com matriz de resina Epoxy	29
3.5. Processo de fabrico dos provetes com matriz de PP	31
3.6. Caracterização dos materiais	34
3.6.1. Ensaio de flexão por 3 Pontos	34
3.6.2. Absorção de água	36
3.7. Filtro Savitzky-Golay e desenvolvimento de <i>script</i>	37

<b>4. Análise e Discussão de Resultados Experimentais</b>	<b>41</b>
4.1. Fabrico das placas e provetes com matriz de resina Epoxy	41
4.2. Densidade dos provetes com matriz de resina Epoxy	44
4.3. Absorção de água dos provetes com matriz de resina Epoxy	45
4.4. Densidade das amostras com matriz de PP	48
4.5. Absorção de água dos provetes com matriz de PP	49
4.6. Ensaio de flexão por três pontos	50
4.6.1. Provetes com matriz de resina Epoxy	51
4.6.2. Provetes com matriz de PP	55
<b>5. Conclusões</b>	<b>59</b>
5.1. Processo de fabrico	59
5.2. Análise de densidades e absorção de água	61
5.3. Propriedades mecânicas	62
5.4. Conclusões finais	63
5.5. Melhorias para trabalhos futuros	64
<b>Bibliografia</b>	<b>65</b>
<b>Anexos</b>	<b>69</b>

# Lista de figuras

Figura 1 - Principais produtores mundiais de castanha (2010) [6].....	6
Figura 2 - Área de produção de castanheiros em Portugal (2010) [6].....	6
Figura 3 - Estrutura molecular do Propileno [13] .....	9
Figura 4 - Representação das características das fase dispersa: (a) concentração, (b), tamanho, (c), geometria, (d) distribuição e (e) orientação [10].....	11
Figura 5 - Classificação dos vários tipos de materiais compósitos (adaptado de [10]) .....	11
Figura 6 - Representação da possível orientação das fibras na matriz polimérica [10].....	12
Figura 7 - Classificação dos vários tipos de fibras naturais (adaptado de [17]) .....	13
Figura 8 - Diagrama das paredes celulares [17] .....	14
Figura 9 - Esquema de polímero linear de celulose [17].....	14
Figura 10 - Mecanismo de absorção de água [19].....	16
Figura 11 - Principais polímeros em utilização para fabrico de biocompósitos em função da sua biodegradabilidade [20] .....	18
Figura 12 - Esquema de moldação por compressão (adaptado de [10]).....	20
Figura 13 - Componentes de uma máquina de injeção [9] .....	21
Figura 14 - Prancha de plástico reciclado e fibras de madeira para aplicação em deques [28].....	23
Figura 15 - Painel interior de uma porta para um carro da BMW [29] .....	23
Figura 16 - Prancha de surf fabricada com material compósito reforçado com fibras naturais [31].....	24
Figura 17 - Guitarra produzida com bio-resina reforçada com fibras de linho [33].....	24
Figura 18 - Moinho de Facas Plasmaq MRU 22.30 IB .....	26
Figura 19 - Cascas de castanha rececionadas.....	26
Figura 20 - Cascas de castanha após trituração .....	26
Figura 21 - Molde para produção de placas de resina Epoxy.....	29
Figura 22 - Mistura de resina Epoxy com 10% de casca .....	30
Figura 23 - Estufa HEK MCP .....	30
Figura 24 - Máquina de injeção .....	31
Figura 25 - Molde para fabrico dos provetes em PP .....	31
Figura 26 - Equipamento utilizado para realizar a extrusão da mistura de PP com fibras de castanha.....	32

Figura 27 - Material obtido pelo processo de extrusão.....	32
Figura 28 - Granulado obtido após trituração do material extrudido.....	32
Figura 29 - Exemplo de injeção incompleta .....	34
Figura 30 - Provetes com matriz de PP .....	34
Figura 31 - Diagrama de aplicação de carga [36].....	35
Figura 32 - Máquina de ensaios universal utilizada para realizar os ensaios de flexão (à esquerda) e detalhe de um provete durante um teste à flexão (à direita) .....	35
Figura 33 - Exemplo de aplicação do filtro Savitzky-Golay para suavização de um sinal com ruído [38] .....	38
Figura 34 - Resultado da aplicação do filtro Savitzky-Golay num gráfico Força-Deslocamento para um provete de resina Epoxy .....	38
Figura 35 - Exemplo de placas com bolhas de ar .....	43
Figura 36 - Densidade de provetes com matriz de resina Epoxy e carga de 10% .....	44
Figura 37 - Densidade de provetes com matriz de resina Epoxy e carga de 20% .....	44
Figura 38 - Densidade de provetes com matriz de resina Epoxy e carga de 30% .....	45
Figura 39 - Evolução da densidade dos provetes com matriz de resina Epoxy submersos durante 40 dias ....	46
Figura 40 - Secção de corte de provetes com matriz de resina Epoxy.....	47
Figura 41 - Densidade dos provetes com matriz de Polipropileno e carga de 10% .....	48
Figura 42 - Densidade dos provetes com matriz de Polipropileno e carga de 20% .....	48
Figura 43 - Densidade dos provetes com matriz de Polipropileno e carga de 30% .....	48
Figura 44 - Evolução da densidade dos provetes com matriz de resina Epoxy submersos durante 40 dias ....	50
Figura 45 - Tensão máxima à flexão dos provetes com matriz de resina Epoxy.....	52
Figura 46 - Deformação máxima à flexão dos provetes com matriz de resina Epoxy.....	52
Figura 47 - Módulo de elasticidade dos provetes com matriz de resina Epoxy.....	52
Figura 48 - Gráfico tensão-deformação para um provete com matriz de resina Epoxy de cada fração mássica, com 0 dias de submersão .....	52
Figura 49 - Gráfico tensão-deformação para um provete com matriz de resina Epoxy de cada fração mássica, com 40 dias de submersão .....	52
Figura 50 - Rotura de provete causada por impureza .....	53
Figura 51 - Bolhas de ar no interior dos provetes.....	53
Figura 52 - Tensão máxima à flexão dos provetes com matriz de PP .....	55
Figura 53 - Deformação para o valor máximo da Tensão dos provetes com matriz de PP .....	55
Figura 54 - Módulo de elasticidade dos provetes com matriz de PP .....	56

Figura 55 - Gráfico tensão-deformação para um provete com matriz de PP de cada fração mássica, com 0 dias de submersão .....	56
Figura 56 - Gráfico tensão-deformação para um provete com matriz de PP de cada fração mássica, com 40 dias de submersão .....	56

*(Esta página foi intencionalmente deixada em branco)*

# Lista de tabelas

Tabela 1 - Comparação entre propriedades físicas e mecânicas de fibras naturais e fibras sintéticas [19] .....	17
Tabela 2 - Processos de fabrico de materiais compósitos [25].....	19
Tabela 3 - Cálculo da densidade aparente das fibras de castanha .....	27
Tabela 4 - Dados da resina Epoxy SR 1500 e endurecedor SD 2503 (adaptado de [34]) .....	28
Tabela 5 - Propriedades do Moplen HP500N (adaptado de [35]).....	29
Tabela 6 - Parâmetros da injeção para cada percentagem de reforço.....	33
Tabela 7 - Dimensões dos provetes de PP.....	34
Tabela 8 - Tabela resumo do fabrico das placas de resina Epoxy .....	41
Tabela 9 - Dimensões reais das placas .....	43
Tabela 10 - Comparação entre densidade teórica e os valores médios obtidos experimentalmente .....	43
Tabela 11 - Influência da absorção (Abs.) de água na densidade dos provetes submersos 40 dias.....	45
Tabela 12 - Influência da absorção de água na densidade dos provetes submersos 40 dias.....	49
Tabela 13 - Tabela resumo das propriedades dos provetes com matriz de resina Epoxy.....	51
Tabela 14 - Tabela resumo das propriedades dos provetes de polipropileno .....	55

*(Esta página foi intencionalmente deixada em branco)*

# Lista de siglas e acrónimos

Abs.	Absorção [%]
b	Largura do provete
bar	Bar
DEM	Departamento de Engenharia Mecânica
DOP	Denominações de Origem Protegida
$E_f$	Módulo de Elasticidade à Flexão
ESTG	Escola Superior de Tecnologia e Gestão
F	Força
h	Espessura do provete
IPL	Instituto Politécnico de Leiria
L	Distância entre suportes
LTM	Laboratório de Tecnologia Mecânica
m	Massa
$m_f$	Massa final
$m_i$	Massa inicial
PP	Polipropileno
s	Deformação do provete [mm]
$T_g$	Temperatura de transição vítrea
v	Volume
$\Delta\rho$	Variação de densidade
$\rho$	Densidade
$\rho_m$	Densidade média
$\rho_T$	Densidade teórica
$\sigma_f$	Tensão máxima à flexão

*(Esta página foi intencionalmente deixada em branco)*



# 1. Introdução

## 1.1. Enquadramento

O impacto ambiental causado pela dificuldade na gestão de resíduos provenientes da atividade do ser humano é um tema amplamente discutido. A preocupação com o impacto ambiental provocado pela poluição derivada do excessivo uso (e consequente incapacidade de reciclagem) de produtos de origem fóssil tem sido um tema altamente debatido ao longo das últimas décadas. Mais do que nunca as pessoas estão informadas acerca desta matéria e, sobretudo entre a população mais jovem, existe uma crescente mobilização na luta contra o uso destes materiais nocivos para o ambiente, tendo sido criadas regulamentações para incentivar a adoção de alternativas mais limpas. A aplicação de fibras naturais para a produção de novos materiais compósitos mais amigos do ambiente representa uma alternativa viável e económica aos materiais mais convencionais derivados do petróleo [1], [2].

Com a crescente promoção do conceito da economia circular, aplicado ao design de produto, há uma forte possibilidade de tornar prática comum a produção de componentes que incluam matéria-prima de origem orgânica (biocompósitos). Até agora, muita da matéria orgânica resultante de desperdícios da indústria agroalimentar são depositados em aterros ou para produção de compostos. Esta política poderá mudar para conferir algum valor acrescentado a estas matérias-primas. Ademais, a crescente evolução tecnológica permite a obtenção de biocompósitos com propriedades cada vez melhores e capazes de substituir materiais mais convencionais [2], [3]. Para além da sua abundância, a obtenção e aplicação da matéria-prima orgânica requerem pouca energia e registam baixas emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) [2], [4]. Deste modo, deve ser promovida a melhor gestão de resíduos e valorização dos mesmos, incentivando ao fabrico de compósitos reforçados com fibras naturais [2], [3].

Este tipo de fibra pode ter origem na refinação química de madeiras (fabrico de papel), desperdícios de colheitas ou outras atividades agrícolas. Para além do aproveitamento dos desperdícios mencionados, as fibras naturais também podem ser obtidas diretamente de sementes (algodão, coco), caules (linho, cânhamo e juta) e folhas (sisal) de plantas, cultivadas especificamente para proveito das suas propriedades fibrosas [2], [4], [5]. No que respeita à

matéria-prima utilizada neste estudo, esta trata-se de um resíduo proveniente da separação do fruto da castanha da sua casca (descasque), para depois ser congelado e comercializado.

Existe também um potencial de desenvolvimento económico das regiões rurais que tipicamente dependem da agricultura para o sustento dos seus habitantes. Podem ser feitos investimentos nestas zonas para promover o crescimento da produção agrícola, que, por sua vez, levam à criação de novos postos de trabalho para a produção e tratamento das fibras [2].

## **1.2. Motivação e objetivos**

Os fatores determinantes para a realização deste trabalho foram o desejo de desenvolver um material com características mais sustentáveis, motivado pela crescente preocupação com os problemas ambientais existentes, e recorrendo a desperdícios provenientes da indústria agroalimentar.

A realização deste trabalho teve como objetivos estudar o processamento e caracterizar materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de casca de castanha. Seleccionaram-se dois materiais poliméricos de uso corrente para fabricar provetes contendo diferentes frações mássicas de reforço.

Foram produzidos provetes em Polipropileno (PP), pelo método de injeção, bem como provetes em resina Epoxy, pelo método de moldação por compressão. Em ambos os casos, foram produzidos lotes de 25 provetes para frações mássicas de 10, 20 e 30%. A partir destes provetes serão determinadas as propriedades mecânicas dos materiais obtidos através de testes de densidade, absorção de água e ensaios estáticos de flexão por três pontos. Estes ensaios permitem ficar a conhecer a variação de densidade dos materiais em função do tempo de imersão e da percentagem de fibras, assim como de que forma estas mesmas variáveis afetam as propriedades mecânicas do material.

### **1.3. Estrutura do relatório**

O presente trabalho está organizado seguindo da seguinte forma:

1. Introdução ao tema, no qual é realizado um enquadramento teórico do processo de caracterização e são expostos os motivos, objetivos e organização do trabalho;
2. Capítulo dedicado à revisão bibliográfica, onde são abordados temas como a produção de castanha em Portugal, materiais poliméricos, materiais compósitos reforçados com fibras naturais, métodos de fabrico e aplicações;
3. Detalhamento das metodologias aplicadas na componente prática do fabrico e caracterização dos materiais em estudo;
4. Apresentação e análise dos resultados dos testes realizados;
5. Exposição das conclusões retiradas das diferentes etapas do processamento e caracterização dos materiais compósitos, terminando com sugestões de melhorias para trabalhos futuros.

*(Esta página foi intencionalmente deixada em branco)*

## 2. Revisão Bibliográfica

### 2.1. Produção de castanha em Portugal

A castanha é um fruto proveniente do castanheiro, que é uma árvore que se desenvolve maioritariamente em regiões montanhosas em sistema florestal ou em soutos. Estas árvores distinguem-se pela sua longevidade, podendo durar mais de 1500 anos. O seu pico de produtividade é atingido aos 10 anos e mantém-se até cerca dos 70 anos, quando começa a diminuir gradualmente. Estas árvores podem ter como finalidade a produção de madeira (castanheiros bravos) ou, a prática mais comum, a produção de castanhas (castanheiro manso) [6].

Existem 13 espécies diferentes de castanheiro, das quais se destacam quatro: *castanea sativa* (europeia), *castanea dentata* (americana), *castanea mollissima* (chinesa) e *castanea crenata* (japonesa). A espécie mais abundante em Portugal é a *castanea sativa* e as variedades mais produzidas são a castanha Judia, Longal, Martaínha e Boa Ventura [6].

De acordo com dados de 2010, a China é o maior produtor mundial de castanha, com o equivalente a 80% da produção mundial. Portugal ocupa a 7<sup>a</sup> posição a nível mundial e 3<sup>a</sup> na Europa (Figura 1). A recolha de dados relativos à produção nacional carece de meios que permitam uma rigorosa análise. Com base em dados registados pelas principais associações, estima-se que a capacidade de produção de castanha em Portugal esteja a crescer e se encontre entre as 35.000 e as 45.000 toneladas anuais [6], [7].

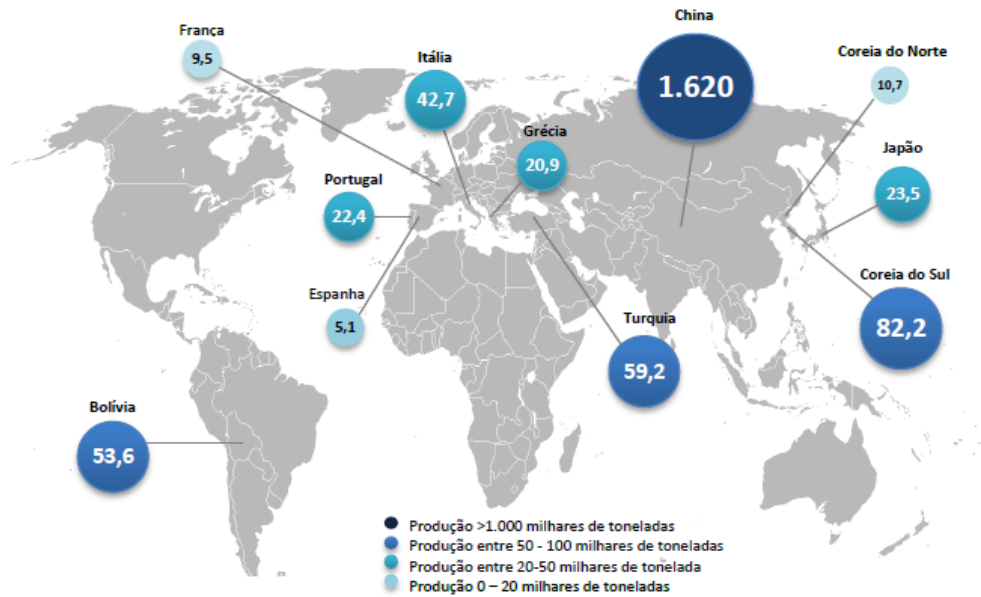


Figura 1 - Principais produtores mundiais de castanha (2010) [6]

As principais áreas de produção de castanha situam-se em regiões desfavorecidas, com acentuados índices de envelhecimento e erosão demográfica [8]. Em Portugal, a área de maior concentração de produção de castanhas está no interior norte do país, nas designadas Denominações de Origem Protegida (DOP) da Terra Fria, Padrela e Soutos da Lapa (Figura 2) [6].

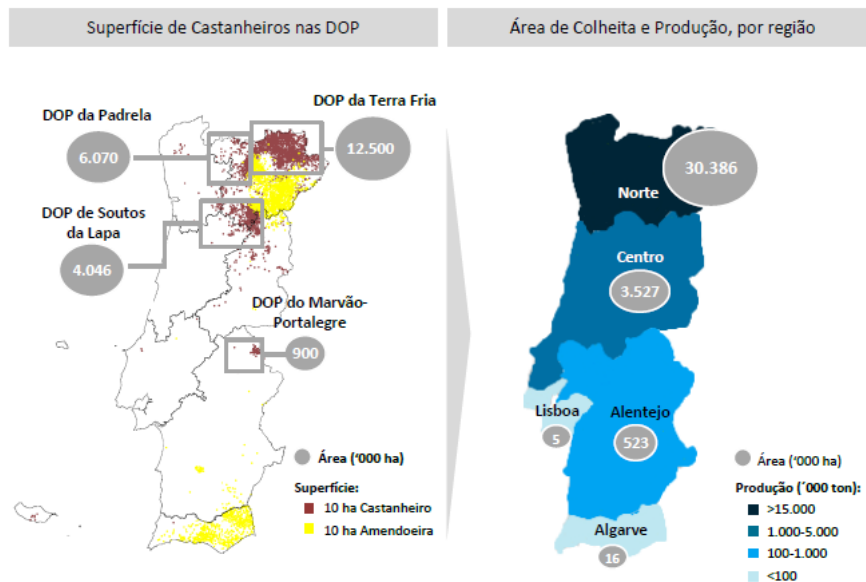


Figura 2 - Área de produção de castanheiros em Portugal (2010) [6]

Quando Portugal aderiu à União Europeia, ocorreu uma forte quebra no sector agrícola, que, como consequência, fez crescer o volume de importações e causou a estagnação dos rendimentos agrícolas. Contrariando a tendência registada com a maioria dos produtos, registou-se um acréscimo no consumo de castanha que deixou de ser visto como um “produto de sobrevivência” das populações rurais e se tornou num produto com qualidade e valor acrescentado [8].

O valor acrescentado associado à exploração da castanha é mais comercial do que industrial. Após a colheita, o fruto passa por processos de graduação e desinfeção. Os únicos processos de transformação que atribuem valor acrescentado à castanha são o descasque e a congelação. No mercado interno, a produção está sobretudo orientada para o uso em natureza ou culinária (assada, cozida, pelada e britada) [6]. Estima-se que mais de 1/3 da castanha nacional tenha como destino a exportação, pois é a melhor forma de garantir o escoamento da produção e aumentar o seu valor. Os principais importadores de castanha portuguesa são a Espanha, França e Brasil [8].

Considerando os valores apresentados, pode argumentar-se que, como a cultura de produção de castanha está presente em todo o mundo, existe uma boa oportunidade para aproveitar o desperdício que resulta do processamento das castanhas que são comercializadas sem casca. Atualmente, este desperdício é cada vez mais utilizado para fabrico de biocombustível, contudo, podem ser dados outros destinos às cascas das castanhas, procurando valorizar de outra forma esta matéria-prima, como por exemplo, a obtenção de fibras para reforço de materiais compósitos.

## **2.2. Materiais poliméricos**

Os materiais poliméricos constituem uma parte muito importante no nosso quotidiano. Os polímeros são muito versáteis, podendo ser utilizados na produção de componentes para todas as indústrias, por um baixo custo, devido à facilidade em processá-los. É possível obter peças leves, com elevada resistência e durabilidade.

Os polímeros são constituídos por moléculas de grandes dimensões, designadas de macromoléculas. Estas macromoléculas são constituídas por repetições de unidades chamadas de monómeros, ligadas entre si por ligações covalentes. Homopolímeros são constituídos por apenas um tipo de monómero. O polipropileno (PP) usado neste trabalho é resultante da ligação entre cadeias do monómero de propileno. Copolímeros caracterizam-se por conter

dois ou mais tipos de monómeros, podendo estes estar ligados de forma aleatória, ramificada ou em blocos, sendo que, estas estruturas desempenham um importante papel naquelas que serão as características do polímero [9]–[11].

Outra característica que define os polímeros é a cristalinidade da sua estrutura. Polímeros com cadeias ordenadas formam estruturas regulares designadas de cristais. Por outro lado, polímeros com cadeias poliméricas desorganizadas, são designados de amorfos. Esta característica permite que o material seja fundido e moldado diversas vezes. Por ser um material amorfo, não existe uma temperatura fixa para o ponto de fusão. Em vez disso, existe uma janela de valores a partir do qual o polímero se torna suficientemente viscoso e fluido para ser moldado, denominado de temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) [9].

Consoante a capacidade que um polímero tem de ser reprocessado sem sofrer grandes perdas nas suas propriedades, este pode ainda ser caracterizado de termoplástico ou termoendurecível [9]. No âmbito deste trabalho foi utilizada uma resina termoendurecível (Epoxy) e um termoplástico (PP), como mencionado anteriormente.

### **2.2.1. Materiais termoplásticos**

Dentro dos termoplásticos, estes podem ainda ser divididos entre termoplásticos de utilização geral, ou engenharia. No primeiro grupo enquadram-se os materiais de mais fácil processamento e maior versatilidade. Neste grupo estão incluídos o Polietileno (PE), Polipropileno (PP), Poliestireno (PS), para nomear apenas alguns. Estes podem ser reforçados com fibras de outros materiais para conferir melhores propriedades mecânicas. Os polímeros de uso em engenharia caracterizam-se por ser uma classe de termoplásticos de alto desempenho, que apresentam qualidades superiores a nível da resistência mecânica, térmica e à abrasão. A Poliamida (PA) e o Policarbonato (PC) são os exemplos mais comuns deste tipo de material [9].

Como referido anteriormente, o material termoplástico escolhido para a realização deste estudo foi o Polipropileno. Este é um plástico totalmente reciclável que pode ser moldado para produzir componentes maleáveis, leves e resistentes ao calor. O PP é um polímero pertencente ao grupo das resinas poliolefinas, produzido pela polimerização em cadeia do Propileno ( $C_3H_6$ ). O Propileno é um composto gasoso obtido da quebra térmica de ligações de etano, propano, butano e fração de nafta do petróleo. A sua molécula contém um par de ligações duplas de carbono, cuja estrutura molecular é  $CH_2=CHCH_3$  (Figura 3) [12].

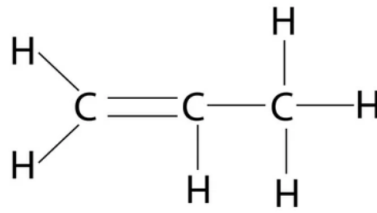


Figura 3 - Estrutura molecular do Propileno [13]

### 2.2.2. Materiais termoendurecíveis

Os termoendurecíveis são materiais que se obtêm a partir da reação química entre dois componentes: uma resina e um endurecedor ou catalisador. A esta reação dá-se o nome de cura química. As cadeias poliméricas que constituem estes materiais formam ligações rígidas, com alta densidade de reticulações, que restringem a liberdade das moléculas. Deste modo, os materiais são enformados tomando uma forma permanente, não podendo ser reciclados da mesma forma que os termoplásticos, apesar de apresentarem uma resistência térmica superior. Para além disso, estes materiais apresentam uma elevada rigidez, baixa densidade, grande estabilidade dimensional e resistência química. A baixa viscosidade destas resinas permite que ocorra uma melhor impregnação das fibras de reforço.

O processo de cura é complexo e reparte-se em várias fases. Inicialmente há uma etapa de gelificação, que ocorre desde que a resina e um catalisador (ou endurecedor) são misturados, até ao momento que esta se começa a transformar num gel. Esta reação tem a particularidade de fazer subir bastante a temperatura da mistura (pico exotérmico), reduzindo a sua viscosidade. A segunda etapa caracteriza-se pelo endurecimento da resina e subsequente estabilização. Há uma queda da temperatura e aumento da viscosidade e massa molecular [9], [14]. Após a estabilização, o compósito obtido pode ser submetido a uma pós-cura para promover a melhoria das suas propriedades. Este é um processo que pode demorar alguns dias, mas, de modo geral, quanto mais elevada a temperatura da pós-cura, menor o tempo necessário [9].

Importante referir que existem diferenças entre um catalisador e um endurecedor. Estes podem ser utilizados em conjunto, de acordo com as recomendações de cada fornecedor. Os catalisadores resultam da extração de aminas ou ácidos de Lewis e têm como função iniciar a polimerização iónica da resina Epoxy por forma a iniciar a formação das estruturas cristalinas. Por norma são aplicados em quantidades muito pequenas, inferiores a 1% da massa de

resina. No caso dos endurecedores, podem ser utilizadas aminas alifáticas ou aromáticas, em razões mássicas de 3:1 ou 10:1 [15].

Os termoendurecíveis mais utilizados são as resinas Epoxy, Poliéster e Poliuretano. Estes materiais são muitas vezes conjugados com fibras de reforço (fibras de vidro, fibras de carbono e fibras naturais) para melhorar as suas propriedades mecânicas. As resinas Epoxy, como a escolhida para o presente trabalho, são as que conferem melhores propriedades mecânicas e químicas, sendo utilizadas para aplicações estruturais na indústria automóvel, aeronáutica e aeroespacial [9]. Outras aplicações incluem o fabrico de adesivos, componentes para placas de circuitos eletrónicos [15].

### **2.3. Materiais compósitos de matriz polimérica**

O termo “material compósito” começou a ser utilizado nos meados do século XX, com o aparecimento de materiais como os polímeros reforçados com fibras de vidro. O conceito de produzir componentes multifásicos deu à origem de novos materiais tecnologicamente mais avançados (mais leves, rígidos/maleáveis, resistentes à abrasão, impacto, absorção etc.) que revolucionaram a engenharia aeronáutica, bioengenharia, e indústria subaquática [10].

Um material compósito é, portanto, um material constituído por dois ou mais meios (ou fases), procurando conjugar as melhores propriedades de cada um destes. Estes componentes devem ser dissimilares quimicamente e separados por uma interface distinta. Um exemplo comum, é a combinação de metais, cerâmicos e polímeros [10].

Nos casos mais comuns, um material compósito é constituído por duas fases. Uma é designada de matriz, que é contínua que envolve a outra, a fase dispersa (ou reforço), que tem como função conferir melhor resistência à matriz. As propriedades de um compósito são uma função das propriedades das fibras e dependem da fração mássica destas, tamanho, razão entre comprimento e diâmetro, geometria, distribuição e orientação (Figura 4) [10], [16]. A introdução de um material de reforço com maior resistência mecânica que a matriz, significa que, quando exposto a uma carga que origina tensões no interior da estrutura, as tensões são transmitidas para as partículas de reforço. Quando há boa adesão entre as interfaces das fases, as partículas absorvem os esforços, aumentando, assim, a resistência mecânica do componente [10].

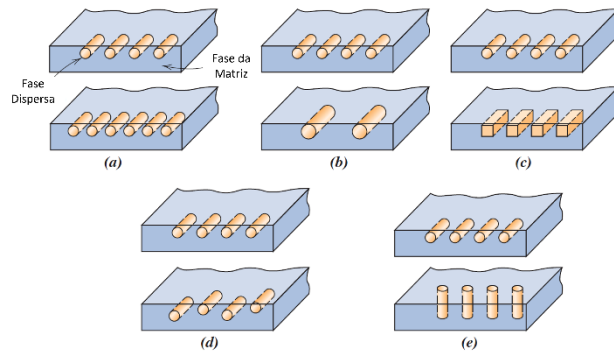


Figura 4 - Representação das características da fase dispersa: (a) concentração, (b) tamanho, (c) geometria, (d) distribuição e (e) orientação [10]

Os materiais compósitos podem ser divididos em diversas categorias, consoante o tipo de reforço e características deste, como se pode observar na Figura 5.

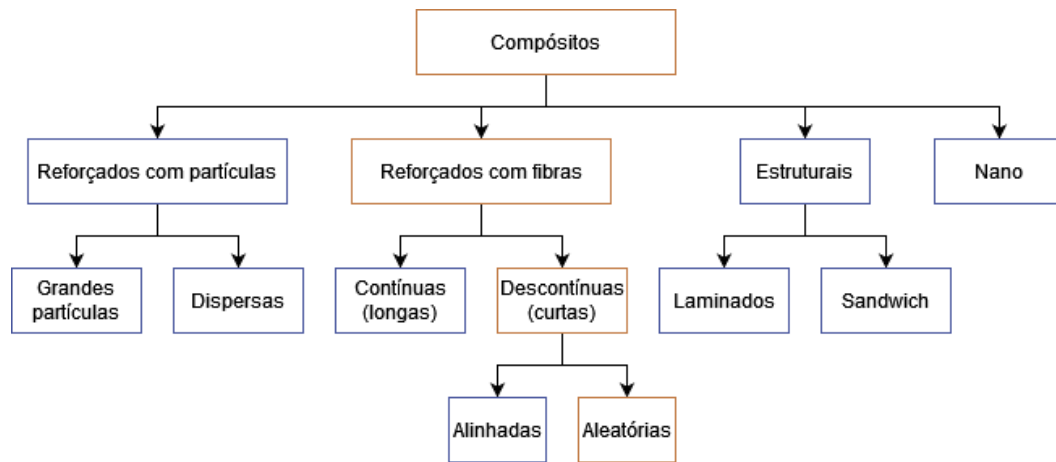


Figura 5 - Classificação dos vários tipos de materiais compósitos (adaptado de [10])

### 2.3.1. Influência do comprimento, orientação e concentração das fibras

As características mecânicas de um compósito reforçado com fibras dependem da concentração, tamanho, geometria, distribuição e orientação das fibras em relação à carga aplicada e concentração na mistura.

Fibras longas conferem uma maior transmissão dos esforços que fibras curtas devido à maior área de ligação na interface das fases. Estas têm tendência a permanecer paralelas (Figura 6.a), ao passo que fibras curtas tanto podem estar paralelas (Figura 6.b) ou orientadas de forma aleatória (Figura 6.c).

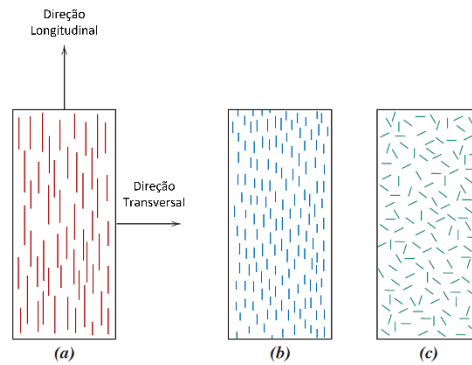


Figura 6 - Representação da possível orientação das fibras na matriz polimérica [10]

Quando as fibras de reforço são contínuas e unidirecionais, o material torna-se anisotrópico, ou seja, apresenta propriedades diferentes consoante a direção das cargas aplicadas. Por outro lado, fibras dispersas e orientadas aleatoriamente, conferem propriedades idênticas em todas as direções, ou seja, o material é isotrópico. Um compósito reforçado com fibras contínuas apresenta melhores propriedades mecânicas do que um componente idêntico com fibras curtas, mas apenas quando testado na direção longitudinal das fibras, pois é nesta direção que elas acrescentam resistência ao material [10]. O desempenho das fibras também é superior quanto maior for o conteúdo de celulose [16].

### 2.3.2. Fibras naturais

A crescente preocupação com o combate à utilização de produtos com origens em fontes não renováveis tem levado a um aumento da procura e exigência de métodos que sejam mais sustentáveis. Fibras naturais são fibras não sintéticas que podem derivar de plantas ou animais, logo, podem ser vistas como uma solução alternativa às fibras sintéticas pois são provenientes de produtos de origens renováveis [3], [16], [17].

As fibras naturais possuem uma variedade imensa, podendo ter diferentes origens. Estas dividem-se em dois grandes grupos: as de origem orgânica e as de origem mineral. Dentro das fibras orgânicas temos as derivadas das plantas (sementes, caule, frutas, folhas) e dos animais (pelos, penas) [2], [14], [17], [18]. A Figura 7 mostra alguns exemplos deste tipo de fibras e as suas origens.

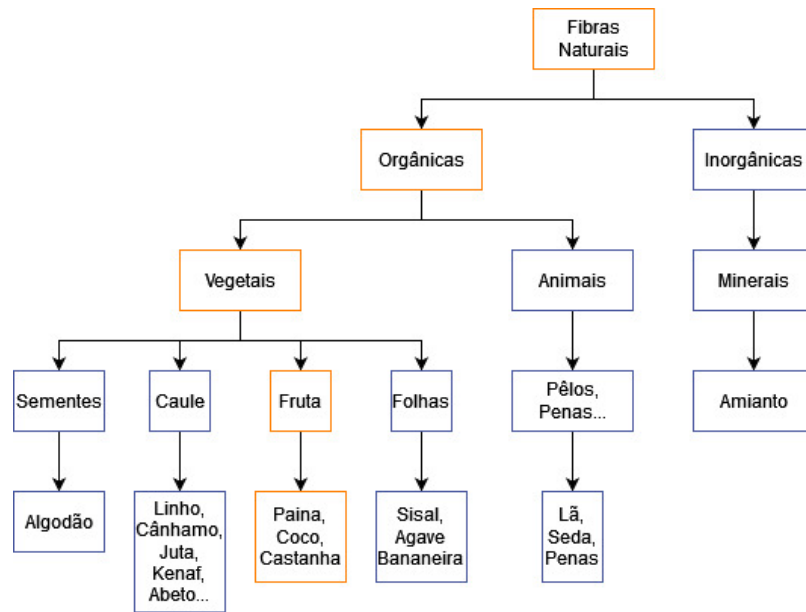


Figura 7 - Classificação dos vários tipos de fibras naturais (adaptado de [17])

Estas fibras com origem em plantas são compostas por paredes celulares constituídas por celulose  $(C_6H_{10}O_5)_n$ , hemicelulose  $(C_5H_8O_4)_m$ , ligninas  $[C_9H_{10}O_3(OCH_3)_{0.9-1.7}]_x$ , ceras e outros lípidos e outros compostos solúveis em água (Figura 8) [17], [19]. A celulose é um polímero linear de glucose com ligações intermoleculares  $\beta$ -1,4 e de hidrogénio (Figura 9). A estrutura da forma como a glucose se liga à cadeia polimérica é determinante para as propriedades das fibras. Estas estruturas podem ser cristalinas, criando ligações fortes com grande resistência mecânica, ou desordenadas, com características hidrofílicas [17]. Este comportamento advém da grande razão de ligação entre -OH e C dos grupos hidroxilos presentes na celulose e hemicelulose [19], [20]. Estas estruturas podem ser degradadas por ação de enzimas, o que significa que é possível produzir materiais compósitos de características biodegradáveis [17].

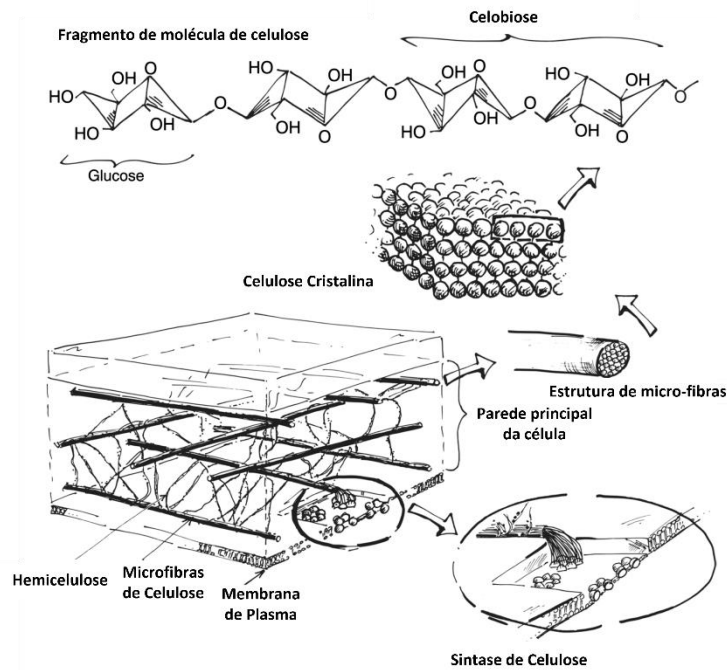


Figura 8 - Diagrama das paredes celulares [17]

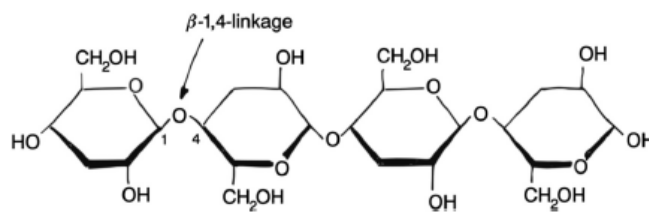


Figura 9 - Esquema de polímero linear de celulose [17]

As fibras naturais apresentam uma ampla gama de aplicações dados os benefícios que podem trazer em termos de melhoria de propriedades de uma matriz polimérica. As características mais importantes das fibras naturais são a baixa densidade, elevada resistência específica, boas propriedades de isolamento térmico e acústico, facilidade de processamento e biodegradabilidade [1], [2], [18], [21]. Em termos económicos, a obtenção das fibras assim como o seu processamento, exigem pouco investimento em recursos energéticos e de mão de obra. Têm origem de fontes renováveis e podem contribuir para o desenvolvimento de regiões menos desenvolvidas, pois muitas das fibras naturais utilizadas nesta área são originárias de países mais desfavorecidos.

Contudo, a introdução de fibras naturais nas matrizes poliméricas pode trazer algumas desvantagens, principalmente a nível estrutural [1], [2], [18], [20]. À partida, as fibras são mais resistentes que a matriz, logo, uma maior fração mássica de reforço deveria aumentar a resistência do compósito. No entanto, para tal acontecer é necessário que haja uma boa

adesão entre as fibras e a matriz, o que pode ser complicado quando se utilizam materiais hidrofóbicos como o PP [16]. A baixa compatibilidade entre as fibras e a matriz significa que há uma fraca adesão interfacial, o que pode reduzir as propriedades mecânicas do material compósito e promover uma maior absorção de água. A presença das fibras limita as temperaturas de processamento e aumenta a tendência a absorver umidade, podendo significar uma mais rápida degradação do mesmo. Esta incompatibilidade leva a que seja necessário realizar procedimentos complementares de compatibilização entre matriz e material de reforço. Modificações das fibras como tratamento por plasma, a adição de agentes ligantes como silanos [22], [23] ou anidrido maleico [24], tratamentos alcalinos, pré-impregnação das fibras, são algumas das opções existentes [20]. Em materiais termoplásticos injetados, o máximo desempenho ocorre para percentagens de reforço entre os 40 e 55%. Para valores superiores, verifica-se uma dificuldade em impregnar as fibras com a matriz, causando fraca transferência de tensões e aumento da porosidade [16].

A variabilidade da qualidade das fibras também é um fator importante que pode limitar o desempenho do material compósito. Tratando-se de fibras naturais com origem em matéria orgânica, a qualidade das fibras vai depender de fatores como a qualidade do solo, fertilização, localização da plantação, condições climáticas e climáticas, período de colheita, etc. [1], [16]. Para aplicações estruturais deve ser feita uma análise prévia à uniformidade estrutural e dimensional das fibras [1].

Para compósitos reforçados com fibras curtas, as suas propriedades também são fortemente influenciadas pela dispersão das fibras.

Os efeitos da absorção de umidade são o principal fator que restringe o uso de fibras naturais como reforço de materiais compósitos em aplicações estruturais. A exposição prolongada dos compósitos provoca um envelhecimento higrotérmico [1], que danifica as fibras e causa problemas de estabilidade dimensional [2], [20], [25]. Será necessário, no entanto, efetuar mais estudos para se compreender como a durabilidade dos compósitos é afetada a longo prazo. A maior preocupação em utilizar estes materiais para fins estruturais é o potencial de desenvolvimento de fungos, reportados em algumas investigações, que indicam o seu aparecimento ao fim de apenas 3 dias. Foi também demonstrado que a exposição à luz solar provoca descoloração, fendas na superfície do material, inchaço e redução da resistência mecânica. A modificação das fibras pelos métodos referidos anteriormente retardam estes efeitos [1].

O mecanismo de falha por difusão de água é o mais comum e encontra-se representado na Figura 10. A absorção de água inicia-se com o inchaço das fibras, ocupando espaços livres microscópicos entre a matriz e o material de reforço. Depois, as moléculas de água movem-se, penetrando pelos espaços entre as falhas na matriz, provocando a formação de fendas e quebra entre a ligação matriz-fibra. As moléculas de água que são absorvidas pelas matriz atuam, como plasticizantes, provocando a deterioração do material polimérico [19].

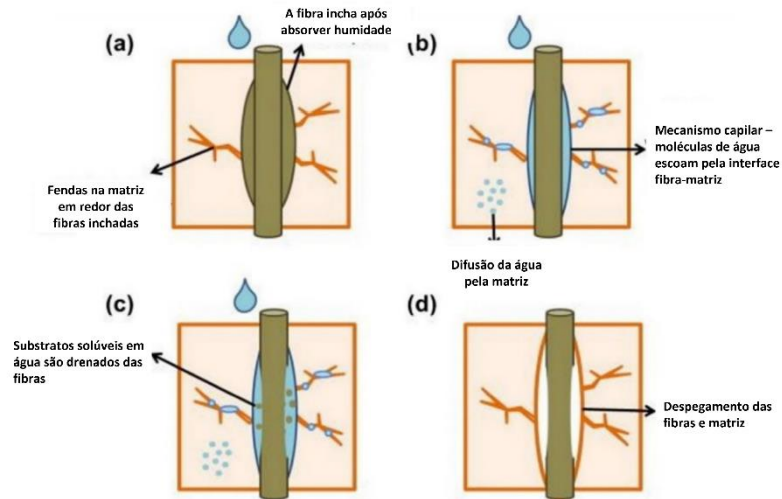


Figura 10 - Mecanismo de absorção de água [19]

A identificação dos possíveis mecanismos de falha destes compósitos é muito importante para prevenir que estes falhem durante a sua função. A descontinuidade do material, barriamento, esmagamento, esforços de corte e inchaço das fibras devido à absorção de água, são os principais fatores para a falha destes materiais.

Estes mecanismos de falha provocam a propagação de fendas e delaminação dos compósitos, que conduzem à sua eventual fratura. Quando estas fendas se propagam de forma perpendicular à superfície de deslocamento, obtém-se uma fratura por tração. Quando a fenda se propaga tangencialmente à superfície de deslocamento, trata-se de uma fratura de corte. Em materiais dúcteis, as fendas propagam-se lentamente, permitindo que o material deforme plasticamente. Por outro lado, nos materiais frágeis, as fendas propagam-se exponencialmente rápido. A delaminação ocorre em materiais que possuem várias camadas com diferentes orientações e caracteriza-se pela separação entre as interfaces matriz-fibra [19].

A Tabela 1 mostra uma comparação entre propriedades de algumas fibras naturais e sintéticas.

Tabela 1 - Comparação entre propriedades físicas e mecânicas de fibras naturais e fibras sintéticas [19]

	<b>Fibra</b>	<b>Densidade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Resistência à Tração [MPa]</b>	<b>Extensão de Rotura [%]</b>	<b>Módulo de Elas- ticidade [GPa]</b>
<b>Naturais</b>	Palmeira do Açúcar	1.292	156.96	7.98	4.96
	Bagaço	1.5	290	-	17
	Bamboo	1.25	140 a 230	-	11 a 17
	Linho	0.6 a 1.1	345 a 1035	2.7 a 3.2	27.6
	Cânhamo	1.48	690	1.6 a 4	70
	Juta	1.3	393 a 773	1.5 a 1.8	26.5
	Hibisco	1.45	215.4	1.6	53
	Sisal	1.5	511 a 535	2.0 a 2.5	9.4 a 22
	Rami	1.5	560	2.5 a 3.8	24.5
	Ananás	0.8 a 1.6	400 a 627	14.5	1.44
<b>Sintéticas</b>	Coco	1.2	138.7	30	4 a 6
	E-Glass	2.5	2000 a 3500	0.5	70
	S-Glass	2.5	4570	2.8	86
	Aramida	1.4	3000 a 3150	3.3 a 3.7	63 a 67
	Kevlar	1.44	3000	2.5 a 3.7	60

Em conclusão, os compósitos com reforço de fibras naturais apresentam propriedades químicas e mecânicas inferiores às fibras sintéticas. Contudo, do ponto de vista ambiental, as fibras naturais diferenciam-se pelos baixos custos de produção e capacidade de biodegradação superiores às fibras sintéticas. No entanto, as aplicações destes materiais passarão apenas por componentes com pouca exposição a condições adversas e de baixo desempenho mecânico [19], [26].

### 2.3.3. Matrizes para compósitos reforçados com fibras naturais

Propriedades como a forma, aparência e comportamento ambiental de um material compósito são maioritariamente influenciados pela matriz. Para além disso, a matriz funciona como barreira protetora das fibras contra a abrasão [16]. Apesar dos esforços para reduzir a utilização de matérias de origens petrolíferas, cerca de 80% dos polímeros utilizados têm origem em fontes não renováveis [20]. A Figura 11 mostra os materiais utilizados nas matrizes destes compósitos.

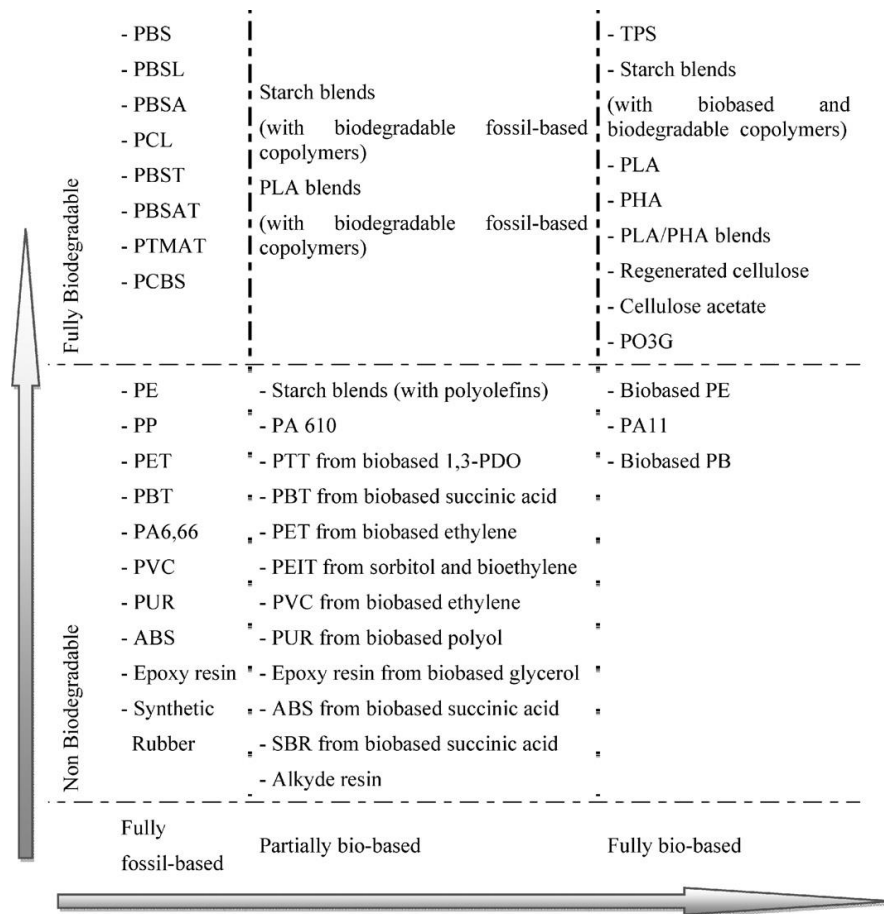


Figura 11 - Principais polímeros em utilização para fabrico de biocompósitos em função da sua biodegradabilidade [20]

No que diz respeito a aplicações com polímeros termoplásticos, Polipropileno (PP), Polietileno (PE), Poliestireno (PS) e Policloreto de Vinil (PVC) são os materiais de base mais estudados. O Poliéster (PET), Poliuretano (PU), resinas Epoxy e Formaldeído são os termoendurecíveis mais amplamente aplicados [2], [16], [20], [21]. Tendo em conta que estes materiais têm como base o petróleo, alternativas como o Ácido Poliláctico (PLA) têm sido exploradas, sendo que já foram alcançados resultados superiores comparativamente com uma matriz de PP [16], [20].

A temperatura de degradação das fibras tem influência na escolha de matriz a utilizar. Este limite situa-se entre os 175 e 200°C, portanto apenas materiais termoendurecíveis e os termoplásticos com temperaturas de processamento inferiores (PP, PE, PVC) podem ser utilizados como matriz [16].

### 2.3.4. Processos de Fabrico

Existe uma ampla variedade de processos de fabrico para materiais compósitos. Estes podem ser classificados de acordo com o material de base e reforço utilizados, e também conforme o processo de cura adotado. Outra forma mais geral de classificar os processos de fabrico são as técnicas com molde aberto ou molde fechado (Tabela 2). O método de fabrico escolhido deve ter em consideração as propriedades capazes de conceder ao produto final, quantidade de peças a produzir, a geometria das mesmas, custos económicos e impacto ambiental.

Técnicas de molde aberto são mais simples e rudimentares que têm baixos custos associados. As moldações em molde fechado apresentam qualidade superior, produzem menos desperdício de material e obtêm-se peças com melhores acabamentos, sendo que muitas das tarefas podem ser automatizadas [25]. Nesta secção serão descritos os processos levados a cabo neste trabalho, a moldação por compressão a frio para obtenção dos provetes com matriz de resina Epoxy, e a moldação por injeção, utilizada para o fabrico dos provetes com matriz de PP.

Tabela 2 - Processos de fabrico de materiais compósitos [25]

Molde Aberto	Aplicação por camadas
	Aplicação por <i>spray</i>
	Enrolamento de filamentos
Molde Fechado	Moldação em saco com vácuo
	Moldação por transferência de resina
	Infusão de resina
Molde Fechado	Moldação por compressão
	Moldação por Injeção
	Pultrusão

#### Moldação por compressão

A moldação por compressão é uma das técnicas mais comuns de processamento de materiais compósitos e é adequada à enformação de termoplásticos e termoendurecíveis, podendo ser realizada com o molde aquecido, ou à temperatura ambiente. Permite o fabrico de peças semiacabadas com espessuras até 20mm, com complexidade geométrica moderada ou com materiais que não possam ser injetados (compósitos reforçados com fibras longas). Os

custos desta técnica são inferiores à injeção, mas permitem obter um número muito menor de peças. A maioria das aplicações desta técnica estão associadas à indústria automóvel [10], [17].

Em primeiro lugar efetua-se a mistura da matriz com as fibras de reforço. De seguida, esta é vazada na cavidade do molde, fecha-se o molde e, por fim, este é colocado sob pressão numa prensa hidráulica. A cura do material dá-se dentro do molde e pode ser depois sujeito a uma pós cura para melhor consolidação. A Figura 12 mostra um exemplo de moldação por compressão com prensa hidráulica acoplada [10].

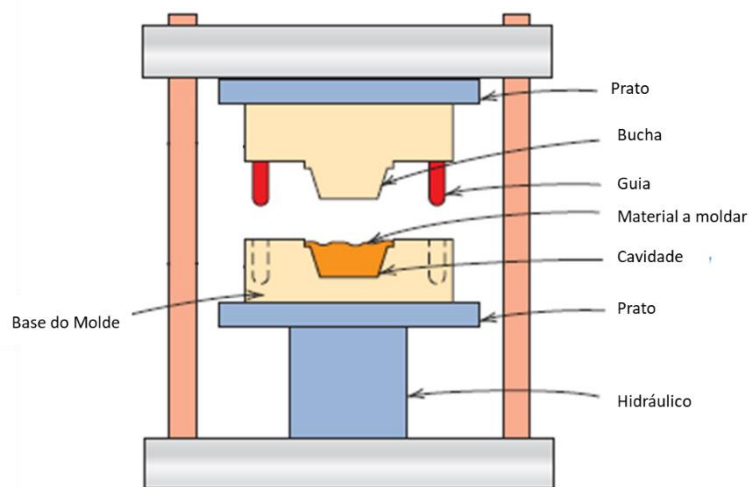


Figura 12 - Esquema de moldação por compressão (adaptado de [10])

### Moldação por Injeção

A moldação por injeção é o processo de produção de materiais termoplásticos mais importante, mais desenvolvido e mais capaz de produzir peças finais com geometria complexa. No entanto, a sua aplicabilidade para processamento de materiais compósitos é mais reduzida, comparativamente a outros materiais mais convencionais. Não obstante, a elevada procura por componentes mais sustentáveis indica que esta técnica poderá a vir desempenhar um papel ainda mais importante na indústria, devido à grande capacidade de produção, qualidade e reprodutibilidade [10], [17].

Este processo realiza-se numa máquina de injeção. Este equipamento é constituído por três sistemas funcionais: sistema de controlo, plasticização e fecho. No sistema de plasticização encontram-se os componentes mais importantes da máquina: tremonha, bandas de aquecimento, cilindro, fuso, bico de injeção (Figura 13).

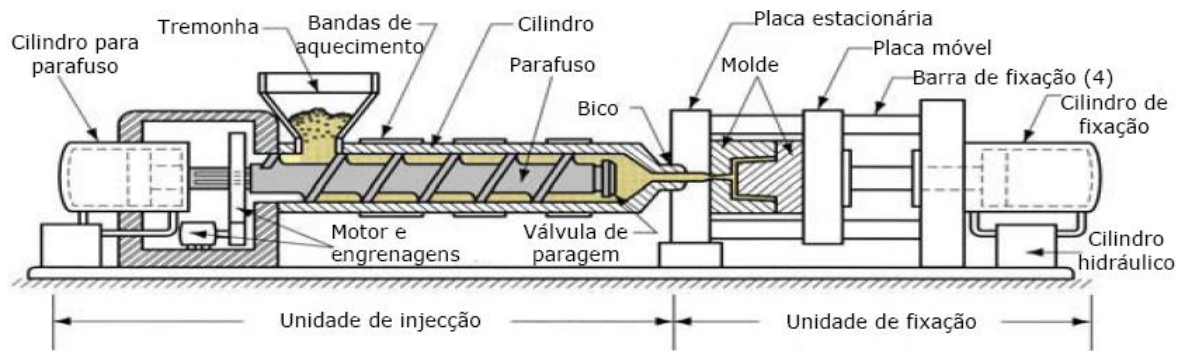


Figura 13 - Componentes de uma máquina de injeção [9]

Neste processo, o material utilizado, que vem na forma de granulado, é introduzido numa tremonha que, por ação da gravidade ou de um êmbolo, o encaminha para o cilindro. Este cilindro, ou câmara de aquecimento, contém bandas de aquecimento que fazem subir a temperatura no seu interior, aquecendo o material para além da sua temperatura de transição vítrea, transformando-o num líquido viscoso. À medida que é aquecido, o material avança pelo cilindro por ação de um fuso de secção variável. Este fuso divide-se em:

1. Zona de alimentação: onde se inicia o aquecimento do material, passando do estado sólido para fundido;
2. Zona de compressão: material é comprimido e encaminhado para a zona de medição;
3. Zona de medição: material é depositado na frente do fuso, preparado para ser injetado no molde.

Quando há material e pressão suficiente, dá-se o avanço do fuso que empurra o material fundido através do bico de injeção, para o interior da cavidade do molde. Após um ciclo de compactação e arrefecimento para o material solidificar, o molde abre e as peças são ejetadas pelo sistema de extração da máquina [9], [10], [17].

### 2.3.5. Aplicações

Ao longo da história, sempre foram utilizados polímeros que ocorrem na natureza. Materiais de origem animal e vegetal como a madeira, algodão, lã e couro, são materiais poliméricos. Outros polímeros naturais que desempenham um importante papel em processos biológicos das plantas e animais são as proteínas, enzimas, amido e celulose. Muitos dos plásticos, borrachas e materiais fibrosos são polímeros sintéticos, cuja existência se deve à investigação realizada para determinar as estruturas moleculares destes polímeros naturais. Atualmente, as técnicas de produção destes materiais são economicamente acessíveis e os

produtos obtidos conseguem ter propriedades mecânicas cada vez melhores, tornando-se, muitas vezes, substitutos ideais de metais e madeiras.

A utilização das fibras naturais como material de reforço remonta civilizações antigas. Foram encontradas peças de olaria produzidas na china em 10000 AC, que continham no seu interior fibras de cânhamo. Durante muitos anos, foram utilizadas ervas e palha para reforçar tijolos de barro. Há 3000 anos, os egípcios envolviam as suas múmias com um tecido de linho impregnado com sal, resina e mel, para o proteger e reforçar [14], [17]. Num contexto mais atual, a utilização de materiais compósitos começou a ganhar ritmo com a invenção da primeira resina termoendurecível comercial, a Baquelite, patenteada em 1907 por Leo Baekeland. A Baquelite é um material quebradiço, portanto aplicava-se serradura para melhorar as suas propriedades. Como se trata de um material resistente ao calor e que atua como isolador elétrico, foi muito aplicada na construção de telefones e rádios. O primeiro caso reportado do reforço de um material compósito com fins estruturais tinha como propósito reforçar hélices recorrendo a uma mistura de resina fenólica com fibras orientadas de linho. Mais tarde, a mesma técnica foi aplicada para fabrico de outros componentes de aviões de guerra (estrutura interna das asas, fuselagem, assentos) [17].

Na indústria automóvel, durante as décadas de 1950 e 1960, fibras de madeira ou algodão começaram a ser introduzidas em matrizes de resina fenólica ou resina de poliéster não saturado, para produzir painéis de instrumentos e painéis decorativos para portas. Na década de 1970, foram produzidas casas pré-fabricadas e barcos de pesca que continham elementos estruturais com matriz de resina Epoxy reforçada com fibras de sisal. Também nesta época se procurou reduzir a utilização de amianto em construções, como material de reforço em cimento e fibras de polpa de madeira foram consideradas como alternativa [17].

Com o aproximar do séc. XXI, as preocupações com o danos ambientais causado pela atividade do ser humano levaram à criação de novas legislações e restrições à utilização de certos materiais com elevado impacto ambiental, procurando reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>. A procura de alternativas mais sustentáveis levou a um aumento do trabalho de investigação desenvolvido por todo o mundo, o que levou ao aumento do interesse pelas fibras naturais como reforço de materiais compósitos. Para além das fibras produzidas especificamente para o fabrico de materiais compósitos, existe um potencial considerável no reaproveitamento de desperdício proveniente da atividade agrícola [3], [17], [26]. A combinação de fibras naturais com materiais poliméricos biodegradáveis promove o aceleração da degradação do

compósito, particularmente devido à maior capacidade de absorção de água. Estes materiais têm ocupado um lugar de maior relevância no mercado, registrando aumentos de produção a cada ano. Em 2007, estima-se que tenham sido produzidas 0.36 milhões de toneladas, em 2013, 2.33 milhões de toneladas e 2020, 3.45 milhões de toneladas, com o PLA a desempenhar um papel cada vez mais importante [27].

Uma das áreas onde a incorporação de fibras naturais mais cresceu foi a construção. Perfis extrudido de materiais compósitos reforçados com fibras de madeira ganharam muita popularidade nos Estados Unidos pois possuem qualidades desejáveis para a construção (e reparação) de deques (Figura 14), guarda-corpos, vedações e armações de portas e janelas [16], [17], [28]. Fibras de madeira também podem ser aplicadas no fabrico de estacas prancha usadas na construção civil para contenção de solos. Estes compósitos têm potencial para substituir as estacas prancha de chapa metálica. Da mesma forma, as mesmas fibras também estão a ser estudadas para possíveis aplicações em vigas e lajes de betão [16].

Na indústria automóvel é aquela onde a aplicação de fibras naturais está mais consolidada. Podem ser encontrados destes compósitos nos painéis das portas (Figura 15), bagageira, painel de instrumentos, palas, revestimentos exteriores e nos motores e assentos em modelos das principais marcas [16], [17], [27], [29].

Produtos de utilização diária, artigos de lazer e desporto também podem incorporar fibras naturais na sua constituição [16], como embalagens, brinquedos, capas para telemóveis [30], pranchas de surf (Figura 16) [31] e guitarras (Figura 17) [32], [33].



Figura 14 - Prancha de plástico reciclado e fibras de madeira para aplicação em deques [28]



Figura 15 - Painel interior de uma porta para um carro da BMW [29]



Figura 16 - Prancha de surf fabricada com material compósito reforçado com fibras naturais [31]



Figura 17 - Guitarra produzida com bio-resina reforçada com fibras de linho [33]

## 3. Materiais e procedimentos

Para desenvolver este trabalho, foram produzidos vários provetes de matriz polimérica reforçados com diferentes percentagens de fibras de casca de castanha. Devido ao campo de aplicações dos compósitos de matriz polimérica, optou-se por estudar dois tipos de matriz: uma de base termoendurecível e outra de base termoplástica. Os provetes com matriz de base termoendurecível (resina Epoxy) foram obtidos pelo método da moldação por compressão. No caso dos provetes com matriz termoplástica, fabricaram-se provetes com PP como material de base, pelo método de moldação por injeção. Os provetes obtidos foram mergulhados em água até 40 dias e, por fim, foram submetidos a ensaios de flexão para avaliar o seu desempenho mecânico.

### 3.1. Cascas de castanha

Para obter a matéria-prima necessária à produção dos provetes foram contactadas diversas empresas do setor da produção de castanha. A resposta positiva surgiu por parte da Sor-tegel - Produtos Congelados, S.A, uma das maiores empresas a nível nacional e europeu de transformação e exportação de castanha. A empresa de Bragança mostrou grande interesse em colaborar com este estudo e cedeu cerca de 20 kg de casca, resultantes dos seus processo de transformação do fruto. A matéria-prima fornecida é desperdício resultante do processo de descasque da castanha, que é armazenada e congelada para posterior comercialização.

Após a receção das cascas, foi utilizado um moinho de facas Plasmaq MRU 22.30 IB presente no Laboratório de Tecnologia Mecânica (LTM) do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) da ESTG (Figura 18) para as triturar, com o objetivo de obter fibras mais finas e curtas (Figura 19 e Figura 20). Dado que as fibras obtidas possuíam uma granulometria considerável, a mistura obtida foi, posteriormente, submetida a um novo processo de trituração, desta vez utilizando uma picadora elétrica. É importante que as fibras sejam curtas por forma a obter uma melhor homogeneização da mistura, promovendo uma melhor ligação entre as fibras e a matriz polimérica. Para além disso, também é evitada a formação de grandes discontinuidades no núcleo e superfície dos provetes, que podem conduzir à rápida fratura dos mesmos.



Figura 18 - Moinho de Facas Plasmaq MRU 22.30 IB



Figura 19 - Cascas de castanha rececionadas



Figura 20 - Cascas de castanha após trituração

Para promover uma melhor adesão entre a superfície das fibras e a matriz polimérica, antes de qualquer procedimento, as cascas deverão passar por um processo de secagem de modo a remover a humidade que estas absorvem. A dificuldade em obter uma boa adesão traduz-se numa fraca transferência das cargas entre as fibras e a matriz, reduzindo os efeitos de reforço das fibras. Esta incompatibilidade leva a que seja necessário realizar, procedimentos complementares, como a adição de agentes ligantes como silanos ou anidrido maleico, tratamentos alcalinos, pré-impregnação das fibras, entre outros [20], [22]–[24].

Por motivos de falta de meios para tal, não foram postos em prática quaisquer destes métodos complementares.

### 3.1.1. Densidade aparente

Para caracterizar os materiais fabricados, é importante conhecer a densidade das fibras utilizadas. Dado o reduzido tamanho dos pedaços de casca obtidos, o cálculo pelo princípio de Arquimedes, torna-se impossível de realizar. Para obter uma aproximação da densidade das cascas procedeu-se a uma determinação da densidade aparente da mistura.

Este valor é calculado recorrendo à fórmula ( 1 ), onde  $\rho$  representa a densidade [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ],  $m$  é a massa da amostra [g] e  $v$  o volume da amostra [ $\text{cm}^3$ ].

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (1)$$

Para determinar as variáveis deste cálculo, foram seguidos os seguintes passos:

1. Introduzir gradualmente os pedaços de casca numa seringa com capacidade de 100 ml, comprimindo a mistura, reduzindo ao máximo o espaço vazio entre partículas;
2. Recorrer a uma balança analítica para determinar massa de um gobelé ou cadinho e efetuar a tara;
3. Vazar o conteúdo da seringa para o recipiente e determinar a massa da amostra;
4. Lavar e secar recipientes;
5. Repetir os passos anteriores mais duas vezes para calcular valor médio.

A Tabela 3 apresenta os valores obtidos:

Tabela 3 - Cálculo da densidade aparente das fibras de castanha

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Desv. Padrão	Val. Médio
<b>Massa [g]</b>	46.8610	46.7031	46.8359	0.0849	46.8000
<b>Densidade [<math>\text{g}/\text{cm}^3</math>]</b>	0.4686	0.4670	0.4684	0.0008	0.4680

### 3.2. Resina Epoxy e endurecedor

Os primeiros provetes a serem produzidos foram os de matriz de resina Epoxy. A resina fabricada pela empresa Sicomin é designada comercialmente por SR 1500. Esta resina é caracterizada por possuir uma baixa toxicidade e promover uma adesão superior para todos os tipos de material de reforço, sendo que foi desenvolvida para aplicações na indústria naval, aeronáutica, protótipos para automóveis, entre outros. Juntamente com a resina, deve ser utilizado um endurecedor fornecido pelo fabricante (SD 2503) que tem como função acelerar o processo de cura da resina e proporcionar melhores propriedades mecânicas. A Tabela 4 contém algumas das propriedades da resina, do endurecedor e da mistura, de acordo com o fornecedor.

Tabela 4 - Dados da resina Epoxy SR 1500 e endurecedor SD 2503 (adaptado de [34])

<b>SR 1500</b>	
Tg	75-81°C
Viscosidade (15°C) [mPa.s]	5 300 ± 1 000
Densidade [g/mL]	1.13
<b>SD2503</b>	
Densidade [g/mL]	1
Reatividade	Intermédia
<b>Mistura SR 1500 / SD 2503</b>	
Razão da mistura	100 / 33 g
Tempo de espera antes da pós-cura	24h
Ciclo recomendado para pós-cura	16h a 60°C
Módulo de elasticidade [N/mm <sup>2</sup> ]	2760
<b>Propriedades mecânicas (flexão)</b>	
Resistência máxima [N/mm <sup>2</sup> ]	123
Elongação (carga máxima) [%]	6.4
Elongação (fratura) [%]	7.5

### 3.3. Polipropileno

Para a segunda fase do trabalho experimental procurou-se efetuar uma injeção de material polimérico reforçado com as fibras de casca de castanha, com o intuito de estudar o comportamento destes provetes, comparando-os com os de resina Epoxy. Para este estudo, utilizou-se como material de base o PP, pois este é um dos polímeros de mais fácil processamento, e mais ampla aplicabilidade.

Este material, designado comercialmente por Moplen HP500N, é um homopolímero incolor de propósito geral indicado para produzir peças de eletrodomésticos e decoração, componentes para automóveis, brinquedos, embalagens, equipamentos médicos, entre outros. É

um material totalmente reciclável, bastante maleável, extremamente impermeável e não é biodegradável [11], [35]. As principais características deste material podem ser conferidas na Tabela 5.

Tabela 5 - Propriedades do Moplen HP500N (adaptado de [35])

<b>Moplen HP500N</b>	
Densidade	0.9 g/cm <sup>3</sup>
Temperatura de processamento (°C)	180-220
<b>Propriedades mecânicas (flexão)</b>	
Módulo de Elasticidade [MPa]	1400
Tensão de Cedência [MPa]	35
Elongação (fratura) [%]	>50
Elongação (cedência) [%]	10

### 3.4. Processo de fabrico dos provetes com matriz de resina Epoxy

O processo de obtenção de provetes de resina Epoxy inicia-se com produção de placas de material compósito com as percentagens de fibra já referidas (10, 20 e 30% em peso) e posterior corte. As placas foram moldadas por moldação por compressão a frio, recorrendo a um molde desenhado para esse efeito, existente no Laboratório de Fabrico Rápido do DEM da ESTG (Figura 21). A cavidade do molde tem um volume de 150 x 100 x 5 mm<sup>3</sup> (75 cm<sup>3</sup>).



Figura 21 - Molde para produção de placas de resina Epoxy

Antes de se proceder às misturas, é necessário garantir que o molde está bem limpo, para evitar ao máximo que a sujidade resultante deste processo adira às superfícies do molde, comprometendo a qualidade das placas. Este deve ser aberto e limpo com acetona e um utensílio que ajude a raspar os detritos, antes de qualquer moldação. No final de limpo, é

necessário aplicar três demãos de desmoldante em todo o molde, em intervalos de 20 minutos. Este passo é bastante importante de ser cumprido, caso contrário, a remoção das placas a limpeza seguinte será bastante dificultada.

Igualmente importante é colocar as cascas na estufa de um dia para o outro, por forma a retirar a humidade absorvida pelas mesmas (pelo menos 12h a 60°C).

Para fabricar as placas, foram tomados os seguintes passos:

1. Limpar superfície do molde e aplicar desmoldante;
2. Calcular fração mássica necessária de resina (considerou-se a massa correspondente a um volume de 75 ml), endurecedor e casca de castanha, consoante a percentagem desejada;
3. Vazar a resina e o endurecedor para um recipiente e misturar até homogeneizar;
4. Introduzir a casca de castanha e misturar até homogeneizar;
5. Vazar mistura no molde (Figura 22);
6. Fechar o molde e colocá-lo na prensa hidráulica (2 a 5 toneladas de força de fecho durante 24h);
7. Abrir o molde e colocar a placa na estufa (HEK MCP, Figura 23) (24h a 60°C).



Figura 22 - Mistura de resina Epoxy com 10% de casca



Figura 23 - Estufa HEK MCP

Após a cura completa das placas, estas devem ser cortadas com recurso a uma serra de fita para obtenção dos provetes com dimensões normalizadas a utilizar nos ensaios de flexão.

### 3.5. Processo de fabrico dos provetes com matriz de PP

O método mais indicado para produzir peças a partir de PP é a moldação por injeção. Para este efeito, foi utilizada a máquina injetora INAUTOM EUROINJ D80 do LTM do DEM da ESTG (Figura 24). O molde para o fabrico dos provetes (Figura 25) também já existia nas instalações e permite obter provetes normalizados para ensaios de flexão e tração.



Figura 24 - Máquina de injeção



Figura 25 - Molde para fabrico dos provetes em PP

O processo de injeção, inicia-se com a mistura entre o polímero e as fibras de cascas de castanha. As frações mássicas estudadas foram, de forma semelhante aos provetes em resina Epoxy, 10, 20 e 30%. Contudo, devido à grande diferença de densidades entre o polímero e as fibras de casca de castanha, é difícil homogeneizar a mistura. Ademais, durante o processo de injeção, na fase de plasticização e avanço do material no fuso, o material menos denso da mistura fica para trás e as peças não terão a devida percentagem do componente de reforço.

Como referido no ponto 2.3.2, poderão ser aplicados, na mistura, agentes ligantes que promovem a adesão entre o granulado de PP e as fibras. Como tal não foi possível de pôr em prática, procurou-se minimizar este problema, realizando, em primeira instância, uma extrusão. Na extrusão é mais fácil manter um controlo da percentagem de casca pois o material é extrudido em pequenas quantidades e as perdas são reduzidas.

Para este trabalho, foi utilizado um equipamento presente no LTM (Figura 26) cujo modelo não foi possível identificar. Esta extrusora possui um fuso com três zonas de aquecimento, programadas para 220°C. Para conduzir a mistura para o fuso, esta deve ser introduzida no funil do equipamento e impelida manualmente pois é muito leve e não cai com a gravidade. Nesta fase do processo de produção, foi possível verificar a dificuldade real em garantir um fluxo homogêneo da mistura de PP com as fibras, particularmente para as percentagens de 20 e 30%.



Figura 26 - Equipamento utilizado para realizar a extrusão da mistura de PP com fibras de castanha

De modo a haver material suficiente para produzir o número de provetes necessários (considerando uma larga margem de segurança), para cada percentagem, foram preparados cerca de 3.5 kg de PP, mais a respetiva proporção de fibras. A mistura foi sendo doseada para a máquina e o material extrudido final (Figura 27) seguiu para o moinho por forma a produzir granulado (Figura 28). Após permanecerem na estufa a 80°C durante 8 a 12h para remover humidade absorvida pelas fibras, o granulado foi conduzido para a máquina de injeção, onde se procedeu com a moldação por injeção dos provetes.



Figura 27 - Material obtido pelo processo de extrusão



Figura 28 - Granulado obtido após trituração do material extrudido

A elevada percentagem de fibra de castanha afeta fortemente o escoamento do material. Para combater este problema é necessário adaptar os parâmetros da máquina por forma a obter provetes com a melhor qualidade possível. Os parâmetros apresentados na Tabela 6 foram os que permitiram injetar os provetes com os melhores resultados.

Tabela 6 - Parâmetros da injeção para cada percentagem de reforço

	10%	20%	30%
<b>Temperatura</b>			
<b>Bico [°C]</b>	217 ±15	220 ±15	220 ±15
<b>Zona 2 [°C]</b>	217 ±15	220 ±15	220 ±15
<b>Zona 3 [°C]</b>	210 ±15	210 ±15	210 ±15
<b>Zona 4 [°C]</b>	200 ±15	200 ±15	200 ±15
<b>Injeção</b>			
<b>Pressão [bar]</b>	100	120	120
<b>Velocidade [%]</b>	80	80	80
<b>Manutenção</b>			
<b>Pressão [bar]</b>	80	80	80
<b>Velocidade [%]</b>	60	60	60
<b>Duração [s]</b>	3.5	3.5	3.5
<b>Carga</b>			
<b>Pressão [bar]</b>	90	90	90
<b>Velocidade [%]</b>	50	60	60
<b>Descompressão</b>			
<b>Pressão [bar]</b>	10	10	10
<b>Velocidade [%]</b>	30	30	30

Para uma percentagem de 10%, as injeções decorreram sem contratemplos. No entanto, para as percentagens superiores, verificaram-se diversos defeitos nas amostras. Mesmo tendo permanecido na estufa durante 8 a 12 horas, alguma humidade permanece presente na mistura e, devido às altas temperaturas de processamento do material, esta evapora, dando origem a gases que não conseguem escapar durante a injeção, pois o molde não está otimizado para tal. Isto leva, sobretudo, a problemas de injeções incompletas (Figura 29). Para mitigar estes efeitos, aumentou-se a temperatura e pressão de injeção, como indicado na Tabela 7. No final, foram seleccionados 30 provetes de cada fração mássica de fibra (Figura 30).

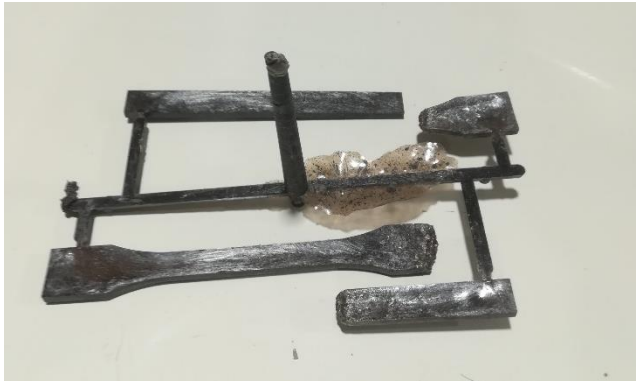


Figura 29 - Exemplo de injeção incompleta



Figura 30 - Provetes com matriz de PP

Tabela 7 - Dimensões dos provetes de PP

<b>Comprimento [mm]</b>	126.2
<b>Largura [mm]</b>	12.5
<b>Espessura [mm]</b>	4.4
<b>Volume [cm<sup>3</sup>]</b>	6.94

### 3.6. Caracterização dos materiais

Para avaliar potenciais aplicabilidades do material criado, é necessário efetuar uma caracterização mecânica para compreender o seu comportamento perante determinadas condições. Neste estudo, pretende-se perceber se a exposição a um meio aquoso prejudica a integridade de compósitos poliméricos reforçados com fibras de casca de castanha,

#### 3.6.1. Ensaio de flexão por 3 Pontos

Para determinar a resistência à flexão, foram seguidas as práticas descritas na norma ASTM D 7264/D 7264M – 07, norma esta que define o método de teste das propriedades à flexão de materiais compósitos de matriz polimérica [36].

Neste teste, uma barra de secção retangular apoiada em dois pontos é deformada a um ritmo constante por meio de um punção. A força é aplicada a meio vão e é registada até ocorrer a rotura do provete ou uma deformação pré-definida seja atingida (Figura 31).

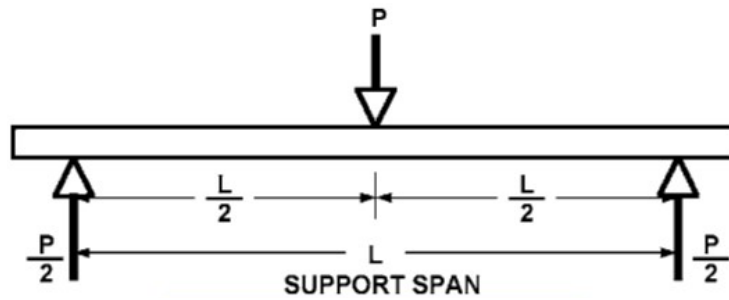


Figura 31 - Diagrama de aplicação de carga [36]

Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente na máquina universal de ensaios mecânicos *Zwick Z100*, presente no Laboratório de Materiais do DEM da ESTG (Figura 32), na qual estava acoplada uma célula de carga de 100kN. A máquina de ensaios registra a força aplicada na amostra e o deslocamento do punção, que corresponde à deflexão no ponto médio da viga. Os testes são conduzidos a um ritmo constante de 1mm/min, após uma pré-carga de 5 N. Para efeitos de validação dos testes, devem ser testados pelo menos 5 provetes com resultados válidos.

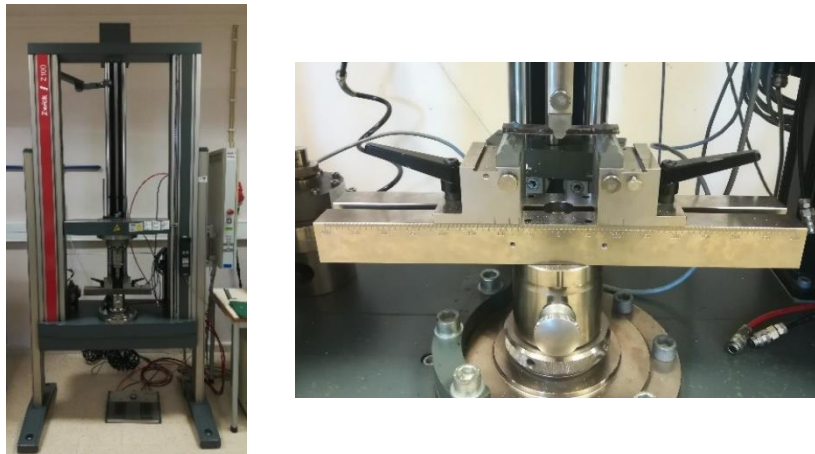


Figura 32 - Máquina de ensaios universal utilizada para realizar os ensaios de flexão (à esquerda) e detalhe de um provete durante um teste à flexão (à direita)

A norma determina que as dimensões dos provetes devem seguir determinados rácios. A razão entre a distância de vão e a espessura do provete deve ser 1:32, sendo que a espessura deve ser 4 mm e a largura 13 mm. O comprimento total do provete deve ser 20% maior que a medida do vão calculada.

### Provetes com matriz de resina Epoxy

Dadas as dimensões das placas de resina Epoxy (151.4x102x5.3 mm<sup>3</sup>), percebe-se que os provetes não terão a espessura recomendada. Alternativamente, a norma sugere a utilização de um rácio de 1:16. Com esta informação, calculou-se que a medida do vão deve ser 84.8 mm, logo e o comprimento mínimo dos provetes deve ser 101.8 mm.

### Provetes com matriz de PP

No caso dos provetes injetados, como não era possível alterar as dimensões do molde, a relação entre espessura e comprimento foge à recomendada pela norma. Calculou-se que a distância de vão deveria ser 70.4 mm. No entanto, devido a um erro de medição na hora de preparar o primeiro ensaio, a distância real era de 86.3 mm. Os restantes testes foram realizados com esta medida por motivos de coerência.

### Cálculos

Com os valores da força e deslocamento lidos pela máquina e as dimensões conhecidas dos provetes, pode-se determinar a tensão à flexão ( $\sigma_f$ ), a deformação ( $s$ ) e módulo de elasticidade ( $E_f$ ), através das equações ( 2 ) a ( 4 ).

$$\sigma_f = \frac{3FL}{4bh^2} \quad ( 2 ) \quad \varepsilon_f = \frac{6sh}{L^2} \quad ( 3 ) \quad E_f = \frac{L^3m}{4bh^3} \quad ( 4 )$$

Onde:

$\sigma_f$  = tensão à flexão [MPa];

F = força aplicada [N];

L = distância entre suportes [mm];

b = largura do provete [mm];

h = espessura do provete [mm];

s = deformação no centro do provete [mm];

$E_f$  = módulo de elasticidade à flexão [MPa];

#### 3.6.2. Absorção de água

Como posteriormente se pretende estudar a influência da submersão em água nas propriedades mecânicas do material, a variação da densidade dos provetes foi avaliada ao longo do tempo. Através dos resultados obtidos poderá até ser possível fazer uma previsão de quanto tempo uma amostra esteve submersa.

Foi estabelecido, junto dos orientadores deste trabalho, que os provetes iriam ser avaliados a cada 10 dias, até que se verificasse uma estabilidade na absorção de água. Os provetes com as várias percentagens de castanha foram pesados e ensaiados seguindo este planeamento. Sabendo as dimensões dos provetes (desprezando possíveis alterações devido à absorção de água) e a sua massa, podemos calcular a densidade de cada um, tal como mostra a equação ( 1 ). As amostras estiveram submersas em água destilada (à temperatura ambiente) e esta foi renovada após cada pesagem.

A análise da absorção de água por parte dos provetes realizou-se monitorizando a evolução da densidade periodicamente ao longo de 40 dias. Cada provete esteve submerso em água destilada à temperatura ambiente até ser retirado para ser pesado e ensaiado. Para estudar a quantidade de água absorvida, foram registados os ganhos de massa das amostras, a respetiva influência na densidade e a taxa de absorção.

A taxa de absorção foi calculada pela seguinte fórmula:

$$\%Absorção = \frac{m_f - m_i}{m_i} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

$m_f$  = massa do provete após ser retirado da água e secado

$m_i$  = massa do provete obtida na pesagem anterior

### 3.7. Filtro Savitzky-Golay e desenvolvimento de *script*

À medida que decorriam os ensaios de flexão, era notório que os gráficos das curvas força-deslocamento apresentavam um significativo ruído. Esta interferência no sinal enviado dos sensores para a máquina impedia realizar uma leitura clara da informação apresentada. Não foi possível determinar a causa raiz deste problema, mas a sua origem poderá estar em erros da calibração dos sensores, mau isolamento de componentes elétricos ou inferências com outros equipamentos nas proximidades.

Para tratar os dados retirados da máquina de ensaios, elaborou-se um pequeno *script* em linguagem Python 3.9 que tivesse a capacidade de filtrar o referido ruído [37], [38]. Desta forma foi possível automatizar esta fase do tratamento de dados, gerando valores mais fidedignos, possibilitando a posterior recriação dos gráficos de forma mais legível. Uma breve descrição de como usar o *script* pode ser consultada nos Anexos A.1 e A.2.

O método seguido foi proposto por A. Savitzky e M. Golay, num artigo publicado em 1964 [39], no qual estes investigadores procuravam suavizar um conjunto de dados provenientes de análises a espectros químicos, recorrendo a uma técnica inspirada no método de mínimos quadrados. Este filtro permite eliminar o ruído mais proeminente, suavizando a curva, mantendo a sua forma (Figura 33 e Figura 34) [38], [40]–[42]. É aplicado em pontos equidistantes e baseia-se em encontrar um polinómio adequado, de um determinado grau  $n$  que possa ser aplicado a uma vizinhança  $k - m \dots k + 1$ , para cada ponto, sendo que cada vizinhança contém  $2m + 1$  pontos [42].



Figura 33 - Exemplo de aplicação do filtro Savitzky-Golay para suavização de um sinal com ruído [38]

A Figura 34 mostra um exemplo da transformação de um gráfico proveniente de um ensaio de um provete de resina Epoxy. Como se pode observar na imagem, de um sinal com ruído, resulta uma curva muito mais próxima daquilo que se espera de um ensaio de flexão.

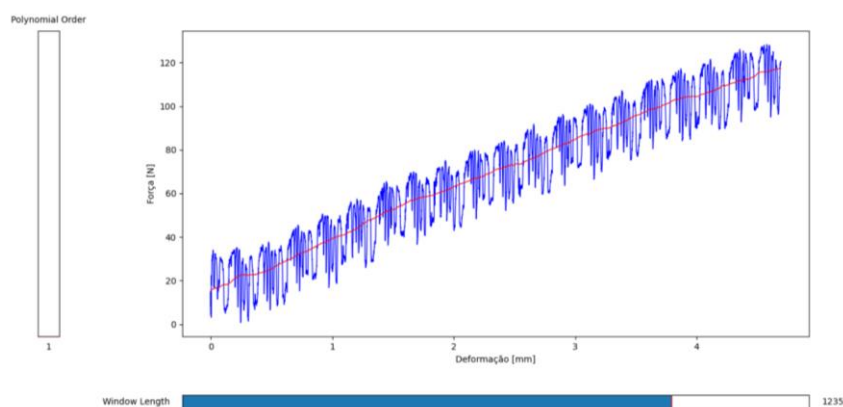


Figura 34 - Resultado da aplicação do filtro Savitzky-Golay num gráfico Força-Deslocamento para um provete de resina Epoxy

Entre a aplicação do método dos mínimos quadrados e o filtro Savitzky-Golay, este último apresentou os resultados mais satisfatórios e maior facilidade em ajustar os parâmetros por forma a adaptar o gráfico resultante aos dados iniciais.

A função *savgol\_filter()*, é fornecida para uso em Python pelo SciPy API. Segundo a documentação deste filtro [37], [38], os dados têm de ser apresentados na forma de um arranjo unidimensional e é necessário definir o comprimento da janela (*window\_length*) do filtro (nº de coeficientes), o grau do polinómio (*polyorder*), entre outros parâmetros opcionais que não foram ajustadas.

O comprimento da janela foi definido com base numa análise dos gráficos originais. Observou-se que as curvas possuíam um período de oscilação consistente, entre 550 e 650 pontos de medição.

Modificando as variáveis *window\_length* e *polyorder*, determinou-se que a curva que melhor se adequava aos dados originais era originada quando a *window\_length* tomava valores de 1235 (provetes com matriz de resina Epoxy) e 1161 (provetes com matriz de PP), com *polyorder* igual a 1.

O programa tem capacidade de ler as tabelas dos ficheiros originais e criar um ficheiro Excel com uma listagem dos novos valores resultantes da aplicação do filtro.

A utilização deste filtro visa a obter uma aproximação daquela que deveria ser a força registada pela máquina de ensaios. Não obstante, alerta-se para o facto de os resultados apresentados conterem algum erro, pois não são conhecidos os valores efetivamente reais.

*(Esta página foi intencionalmente deixada em branco)*

## 4. Análise e Discussão de Resultados Experimentais

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos nas diferentes fases do processo de fabrico dos provetes. Esta análise permitirá caracterizar os materiais obtidos e, com base nos resultados, determinar as suas potenciais aplicações. Outro objetivo é determinar a influência das propriedades mecânicas do material, resultantes da sua submersão em água. Como já foi referido, esta fibra natural possui características hidrofílicas, o que significa que tem uma forte tendência de absorver água. Por sua vez, esta água poderá deteriorar as fibras, enfraquecendo-as.

### 4.1. Fabrico das placas e provetes com matriz de resina Epoxy

A caracterização do material começa pela análise da densidade das placas produzidas com diferentes percentagens de fibra. Concluída a pós-cura, as placas foram pesadas utilizando uma balança analítica (Mettler Toledo AG204) e cortadas com uma serra de fita, por forma a obter os provetes normalizados a usar nos ensaios de flexão. A Tabela 8 apresenta um resumo dos dados referentes a cada placa.

Tabela 8 - Tabela resumo do fabrico das placas de resina Epoxy

10%	Força		Temp.		Massa [g]	Qtd.	
	Fecho [t]	Duração [h]	Cura [°C]	Duração [h]		Prov.	Defeitos Observados
1ª placa	2	24	60	24	89.6342	3	Bolhas de ar, corte impreciso
2ª placa	2	21	60	24	85.6630	7	Bolhas de ar, danos superficiais
3ª placa	5	20	60	24	86.2484	6	Defeitos superficiais, bolhas de ar
4ª placa	5	21	60	24	89.1315	6	Defeitos superficiais, bolhas de ar
5ª placa	5	22	60	24	87.9409	5	Defeitos superficiais, bolhas de ar
<b>média</b>					87.7236	<b>27 /25</b>	

20%	Força		Temp.		Massa [g]	Qtd.	
	Fecho [t]	Duração [h]	Cura [°C]	Duração [h]		Prov.	Defeitos Observados
1ª placa	5	21	60	24	77.5443	9	Corte impreciso
2ª placa	5	21	60	24	79.4759	7	Defeitos superficiais
3ª placa	5	20	60	24	84.5597	10	-
<b>média</b>					80.5266	<b>26 /25</b>	

30%	Força		Temp.		Massa [g]	Qtd.	
	Fecho [t]	Duração [h]	Cura [°C]	Duração [h]		Prov.	Defeitos Observados
1ª placa	5	21	60	24	85.9026	9	Corte impreciso
2ª placa	5	21	60	24	87.5724	8	Corte impreciso
3ª placa	5	22	60	24	85.6997	9	Corte impreciso
<b>média</b>					86.3915	<b>26 /25</b>	

Observando os dados da tabela, podemos notar de imediato diversos defeitos no processo de fabrico destas placas.

Ao analisar a coluna dos defeitos, vemos que, para percentagens de 10%, ocorreram vários problemas. O mais prevalente é a existência de bolhas de ar, com dimensão considerável, à superfície e no interior das placas (Figura 35). Durante este procedimento, observou-se que a mistura manual da resina Epoxy e endurecedor leva à formação de pequenas bolhas, pelo que a presença de uma percentagem maior fibras de casca de castanha ajuda a promover uma melhor consolidação da mistura final. Neste caso, 10% de fibras não é suficiente para mitigar este efeito, resultando em num maior número de defeitos.

Apesar de tudo, este efeito não afetou significativamente a obtenção de provetes com aparência e dimensões aceitáveis. Por outro lado, a serra usada para o corte não permitia conferir muita estabilidade à placa, pelo que se registou um grande variância no valor médio da largura dos provetes, que se desvia um pouco do previsto na norma.

A principal causa para os danos superficiais mencionados, deve-se ao facto de haver regiões onde o desmoldante não protegeu devidamente a superfície do molde. Deste modo, a mistura de resina e castanha aderiu ao aço em algumas zonas, danificando a placa.

Pelas imagens também é possível perceber como existem partículas que não são fibras da casca de castanha, tratando-se de pedaços do fruto de castanha, presentes na mistura.

Imperfeições estruturais como estas agora descritas comprometem a resistência das placas, pois diminuem a adesão entre as fibras e a matriz polimérica e aceleram o aparecimento e propagação de fissuras enquanto o material estiver sujeito a esforços mecânicos ou exposto às condições ambientais.

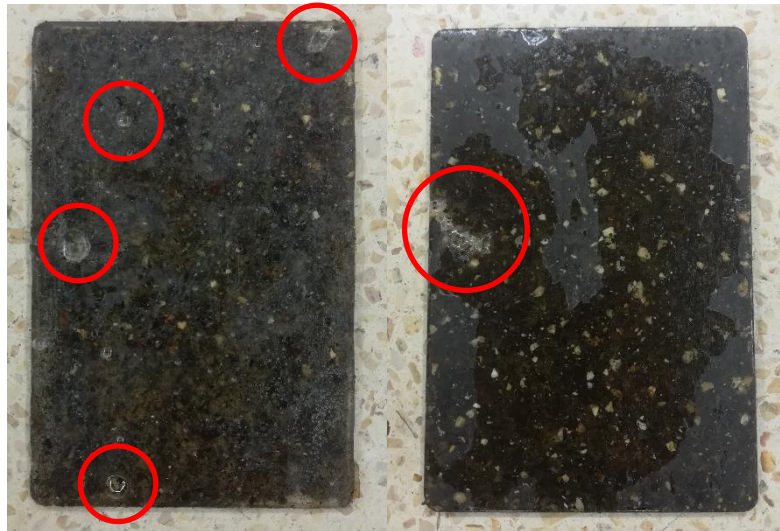


Figura 35 - Exemplo de placas com bolhas de ar

Sendo este um procedimento totalmente manual, não há um controlo absoluto de todas as variáveis que influenciam a composição final das placas. Existe uma grande probabilidade de ocorrerem erros durante a medição de quantidades de material. Sabendo que a densidade das fibras de castanha é muito inferior à da resina Epoxy, seria de esperar que o peso total de cada placa fosse diminuindo com o aumento da percentagem de fibras. No entanto, os cálculos da densidade média das placas obtidas com 30% de reforço, mostraram que a densidade destas se encontrava entre os valores das placas de 10 e 20%.

Abaixo podem ser consultadas as dimensões reais das placas obtidas (Tabela 9) e uma comparação entre a densidade esperada e o valor médio da densidade das mesmas (Tabela 10).

Tabela 9 - Dimensões reais das placas

<b>Largura [mm]</b>	151.4
<b>Comprimento [mm]</b>	102
<b>Espessura [mm]</b>	5.3
<b>Volume [cm<sup>3</sup>]</b>	81.85

Tabela 10 - Comparação entre densidade teórica e os valores médios obtidos experimentalmente

	% Fibra		
	10%	20%	30%
$\rho_T$ [g/cm <sup>3</sup> ]	1.0638	0.9976	0.9314
$\rho_m$ [g/cm <sup>3</sup> ]	1.0718	0.9839	1.0555

A causa mais provável para este acontecimento é ter havido uma falha na execução da mistura de resina com endurecedor, na qual as proporções utilizadas, excederam a quantidade necessária,

Por fim, devido ao tempo disponível para realizar as tarefas descritas, os tempos de cura e pós cura não puderam ser cumpridos à risca. Caso o tempo de estufa não seja suficiente para concluir a pós cura da resina, a resistência mecânica dos provetes poderá ser afetada.

## 4.2. Densidade dos provetes com matriz de resina Epoxy

Após uma verificação dimensional e pesagem, foram calculadas as densidades de cada provete. Os gráficos da Figura 36 até à Figura 38 apresentam os valores obtidos para cada percentagem. No anexo A.3 pode ser consultada a tabela com as dimensões e características iniciais de todos os provetes.

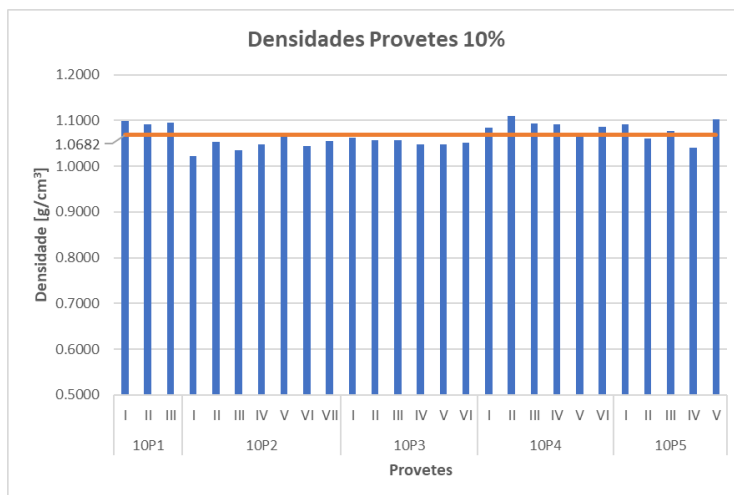


Figura 36 - Densidade de provetes com matriz de resina Epoxy e carga de 10%

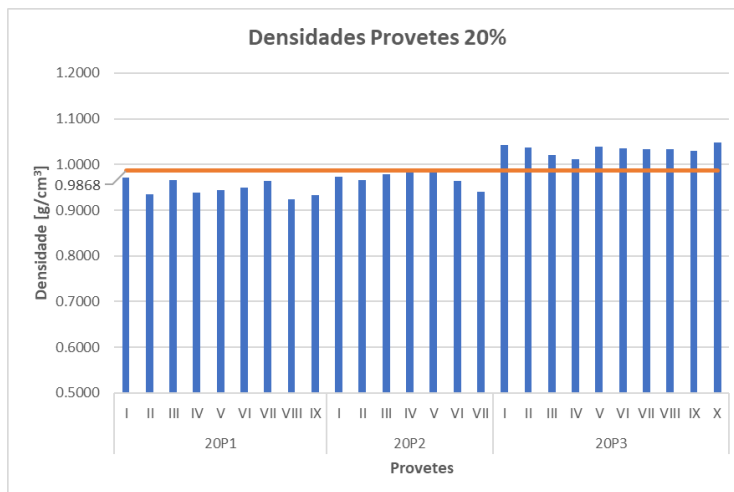


Figura 37 - Densidade de provetes com matriz de resina Epoxy e carga de 20%

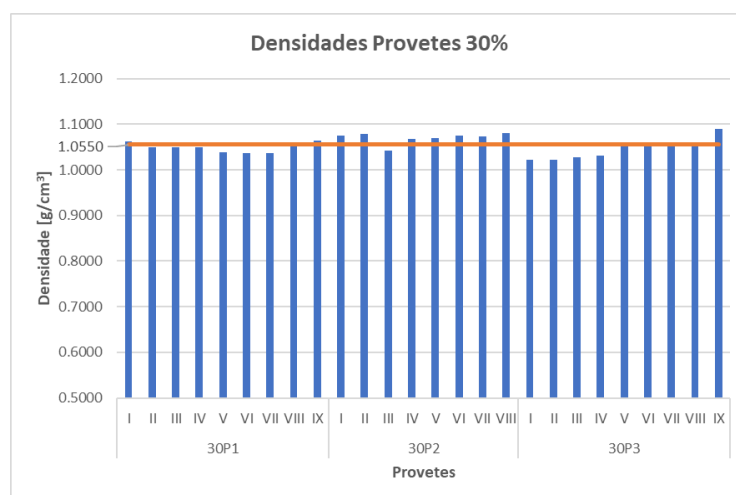


Figura 38 - Densidade de provetes com matriz de resina Epoxy e carga de 30%

Analisando os gráficos podemos perceber que existe alguma variância da densidade entre provetes, vindos das mesmas placas. Este facto pode ser explicado pela presença de bolhas de ar no interior da placa e pela dificuldade em homogeneizar a mistura e proporcionar uma igual distribuição das fibras de casca de castanha dentro da matriz polimérica. Contudo, para a mesma placa, estas diferenças não são muito significativas pois não ultrapassam as  $0.1 \text{ g/cm}^3$ . De notar apenas a diferença de densidade dos provetes da terceira placa com 20% de fibra, comparativamente às duas primeiras, que se pode explicar pela presença de uma percentagem de resina superior à desejada.

### 4.3. Absorção de água dos provetes com matriz de resina Epoxy

A Tabela 11 e Figura 39 apresentam um resumo destes dados, para os provetes que estiveram submersos durante 40 dias. No anexo A.4, pode consultar-se a variação da densidade de todas as amostras.

Tabela 11 - Influência da absorção (Abs.) de água na densidade dos provetes submersos 40 dias

	$\rho_0$ Dias	$\rho_{10}$ Dias	$\rho_{20}$ Dias		$\rho_{30}$ Dias		$\rho_{40}$ Dias		$\Delta\rho$ TOT	Abs.	
	[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]	Abs. [%]	[g/cm <sup>3</sup> ]	Abs. [%]	[g/cm <sup>3</sup> ]	Abs. [%]	[g/cm <sup>3</sup> ]	Abs. [%]	TOT [%]	
<b>10%</b>	1.0769	1.0935	1.87	1.0988	0.36	1.1053	0.50	1.1084	0.28	<b>0.0315</b>	<b>2.94</b>
<b>20%</b>	0.9511	1.0127	6.48	1.0276	1.47	1.0448	1.68	1.0491	0.41	<b>0.0980</b>	<b>10.30</b>
<b>30%</b>	1.0497	1.1388	8.47	1.1560	1.51	1.1682	1.05	1.1752	0.60	<b>0.1255</b>	<b>11.94</b>

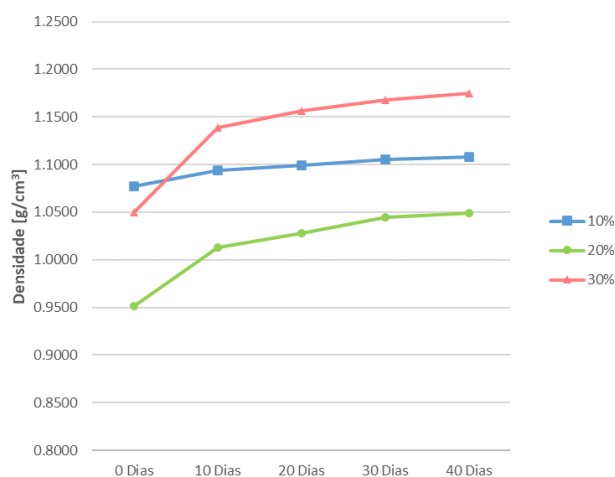


Figura 39 - Evolução da densidade dos provetes com matriz de resina Epoxy submersos durante 40 dias

Esta monitorização da evolução da massa das amostras permitiu revelar que os provetes com maior percentagem de fibra têm uma propensão muito maior a absorver água. No final do período de análise, as amostras com 20 e 30% de carga absorveram água mais rapidamente e em maior quantidade (um aumento de densidade entre 10 e 12%) do que os provetes com 10% de fibra de castanha (aumento de densidade de 3%). A maior taxa de absorção é registada nos primeiros 10 dias.

O principal fator para o material absorver água é a introdução das fibras celulósicas. Devido à porosidade das superfícies dos provetes, mais facilmente a humidade é absorvida pelas fibras após as moléculas de água serem conduzidas pelas falhas microscópicas existentes nas interfaces entre fibras e polímero. Estas lacunas entre a resina Epoxy e as fibras naturais são provocadas pela dificuldade em proporcionar uma impregnação total das fibras. Como consequência da absorção de água, as fibras degradam-se, levando à perda de propriedades mecânicas do material compósito [43].

Uma característica do material fabricado por este processo é que se forma uma película de resina que envolve toda a placa. O facto de estes provetes terem sido obtidos pelo corte das placas, significa que cada um deles tinha duas secções de corte onde as fibras estão mais expostas (Figura 40), o que influencia bastante a quantidade de água que absorvem.



Figura 40 - Secção de corte de provetes com matriz de resina Epoxy

Tomando como valor de referência os ensaios de absorção conduzidos por outros investigadores [44], sabe-se que a taxa de absorção máxima de uma resina Epoxy sem elementos de adição é de aproximadamente 2.5%. No entanto, este valor pode variar consoante as especificidades da resina, tempo de cura, porosidade das amostras, entre outros fatores. Os resultados obtidos desta análise mostram que a introdução de fibras de casca de castanha na matriz leva a um aumento significativo da absorção de água das amostras, o que pode conduzir à mais rápida degradação do material quando exposto à humidade. Esta tendência é tanto maior quanto maior for a percentagem de fibra.

Observa-se que a saturação das amostras é atingida a partir dos 40 dias, aproximadamente. Nesta fase, a percentagem de absorção rondava ou era inferior a 0.5%. O estudo poderia ter sido prolongado para avaliar os efeitos da humidade a longo prazo, no entanto não foram produzidos mais provetes para dar continuidade a esta análise em tempo útil e os já existentes encontravam-se danificados como resultado dos ensaios de flexão.

#### 4.4. Densidade das amostras com matriz de PP

Os gráficos da Figura 41 até à Figura 43 apresentam a densidade dos provetes selecionados. Mais detalhes sobre os provetes, podem ser consultados no anexo A.5.

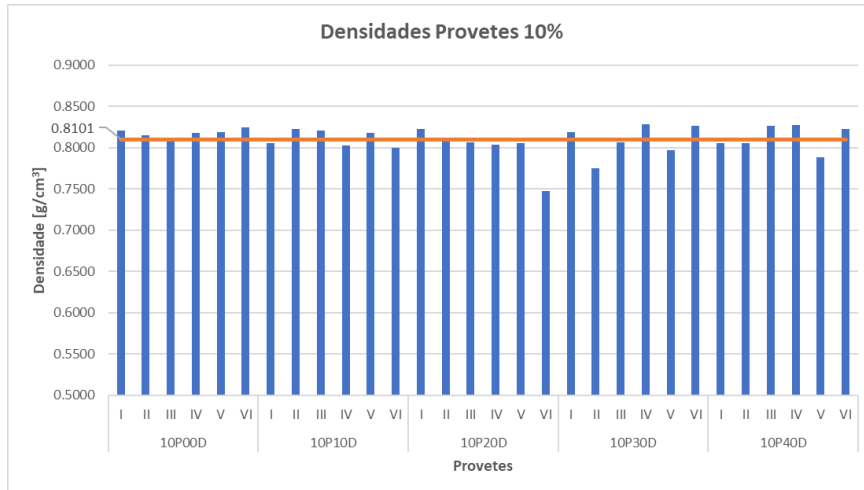


Figura 41 - Densidade dos provetes com matriz de Polipropileno e carga de 10%

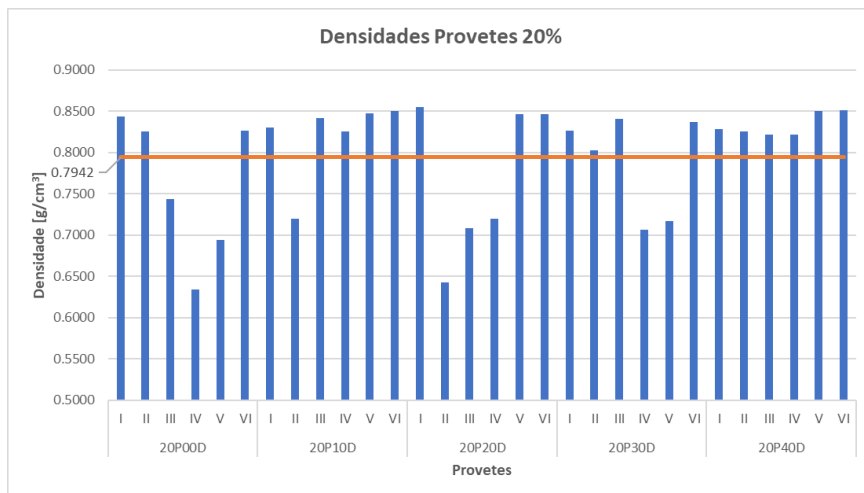


Figura 42 - Densidade dos provetes com matriz de Polipropileno e carga de 20%

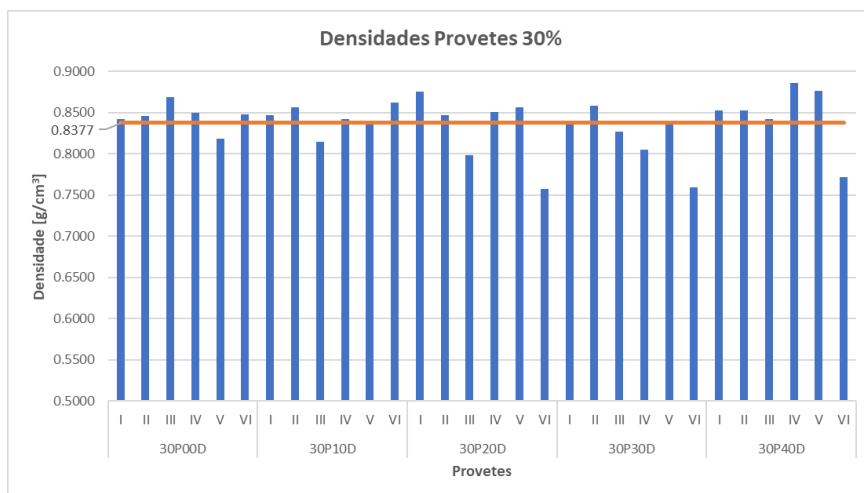


Figura 43 - Densidade dos provetes com matriz de Polipropileno e carga de 30%

Os gráficos ilustram como, de modo geral, a extrusão da mistura em primeira instância seguida do processo de injeção, confere uma grande consistência no que diz respeito à densidade dos provetes. A diferença entre o valor máximo e mínimo ronda os  $0.1 \text{ g/cm}^3$ , exce- tuando alguns casos particulares nos provetes com 20% de fibra ( $0.22 \text{ g/cm}^3$ ). A maior con- sistência verifica-se nos provetes com 10%, justificada pela maior facilidade em efetuar a extrusão e posterior injeção do material. Pelos gráficos também se verifica que, ao contrário do que seria esperado, a densidade dos provetes de 30% é superior aos restantes. Isto deve- se ao excesso de PP introduzido na mistura durante o processamento do material extrudido, devido às dificuldades sentidas para conduzir a mistura para o fuso.

#### 4.5. Absorção de água dos provetes com matriz de PP

Tendo em conta que o PP é um material extremamente impermeável, será interessante perceber que influência terá a introdução das fibras de casca de castanha na resistência me- cânica dos provetes, após as amostras estarem submersas 40 dias.

A análise da absorção de água dos provetes de polipropileno realizou-se seguindo o mesmo procedimento descrito no ponto anterior. No anexo A.6 podem ser consultados todos os dados relativamente à absorção de água por parte destes provetes. A Tabela 12 e Figura 44 mostram um resumo destes dados para os provetes imersos 40 dias.

Tabela 12 - Influência da absorção de água na densidade dos provetes submersos 40 dias

	$\rho_{0 \text{ Dias}}$	$\rho_{10 \text{ Dias}}$	Abs.	$\rho_{20 \text{ Dias}}$	Abs.	$\rho_{30 \text{ Dias}}$	Abs.	$\rho_{40 \text{ Dias}}$	Abs.	$\Delta\rho$	Abs.
	$[\text{g/cm}^3]$	$[\text{g/cm}^3]$	[%]	$[\text{g/cm}^3]$	[%]	$[\text{g/cm}^3]$	[%]	$[\text{g/cm}^3]$	[%]	$[\text{g/mL}]$	TOT [%]
<b>10%</b>	0.8125	0.8128	0.0421	0.8129	0.0117	0.8132	0.0319	0.8135	0.0313	<b>0.0009</b>	<b>0.1170</b>
<b>20%</b>	0.8332	0.8339	0.0878	0.8342	0.0398	0.8347	0.0551	0.8350	0.0337	<b>0.0018</b>	<b>0.2166</b>
<b>30%</b>	0.8471	0.8488	0.2058	0.8498	0.1207	0.8504	0.0686	0.8508	0.0487	<b>0.0038</b>	<b>0.4444</b>

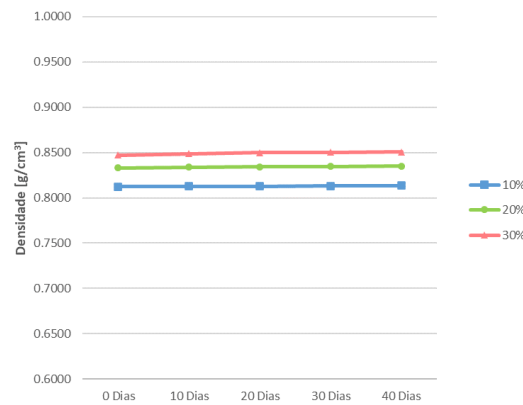


Figura 44 - Evolução da densidade dos provetes com matriz de resina Epoxy submersos durante 40 dias

Os dados apresentados comprovam a impermeabilidade do PP. Os provetes apresentam valores de densidade muito próximos e a adição de fibras celulósicas aparenta ter pouca influência na quantidade de água absorvida pelas amostras. Tal como nos provetes de resina Epoxy, quanto maior a percentagem de fibra, mais água será absorvida pelo material composto. Contudo, o aumento de densidade das amostras situou-se apenas entre os 0.1% (para os provetes com 10% de reforço) e os 0.5% (30% de reforço). Ao fim de 40 dias, a percentagem de absorção era negligenciável.

Outro fator que explica a baixa permeabilidade do material é o facto de a superfície das amostras não apresentar porosidades, impedindo que água se infiltre no seu interior. Desta forma, a humidade não penetra no material da mesma forma que ocorre nos provetes de matriz de resina Epoxy.

#### 4.6. Ensaios de flexão por três pontos

Na fase inicial do ensaio, o material apresenta um comportamento elástico, deformando-se de forma proporcional à força aplicada. Nesta fase, o provete retoma a sua forma inicial caso a força seja removida antes de ocorrer a rotura. Diz-se que a curva tensão-deformação é linear. Materiais não dúcteis apenas deformam dentro do regime elástico.

À medida que a força aplicada aumenta, o material atinge um ponto, a partir do qual já não recupera a sua forma original quando a carga é retirada. O valor da tensão neste ponto designa-se de tensão de cedência. A partir daqui o material deforma plasticamente e a curva da tensão-deformação desvia-se do regime linear. O material continua a deformar plasticamente até atingir o valor da tensão de rotura, no qual o provete parte.

Nas próximas secções serão apresentados os resultados dos ensaios realizados para cada tipo de provete. Relembrar que para cada percentagem de fibras e número de dias submersos, foram ensaiados pelo menos 5 provetes. Os resultados apresentados correspondem aos valores médios de cada conjunto de ensaios.

#### 4.6.1. Provetes com matriz de resina Epoxy

Por forma a oferecer uma melhor visão da alteração do comportamento dos provetes, a Tabela 13 e os gráficos da Figura 45 à Figura 47 mostram as propriedades do material que são possíveis de analisar partindo dos dados resultantes do ensaio de flexão. É, também, apresentada uma comparação entre o comportamento esperado destes materiais antes (Figura 48) e após (Figura 49) a sua submersão. Os dados referentes aos ensaios de cada provete podem ser conferidos no anexo A.7.

Tabela 13 - Tabela resumo das propriedades dos provetes com matriz de resina Epoxy

Ensaio	$\sigma_f$ [MPa]	s [mm]	Ef [MPa]
<b>10-0D</b>	33.51 ± 5.49	3.15 ± 0.68	2439.08 ± 106.25
<b>10-10D</b>	42.90 ± 7.30	4.30 ± 0.93	2185.25 ± 78.97
<b>10-20D</b>	38.95 ± 1.61	3.94 ± 0.06	2059.26 ± 66.50
<b>10-30D</b>	32.65 ± 6.55	3.51 ± 0.80	2083.00 ± 157.44
<b>10-40D</b>	33.80 ± 6.46	3.32 ± 0.51	2289.63 ± 96.41
<b>20-0D</b>	36.12 ± 2.92	3.94 ± 0.44	2213.10 ± 67.67
<b>20-10D</b>	33.12 ± 3.47	4.09 ± 0.47	1663.46 ± 76.66
<b>20-20D</b>	23.20 ± 1.31	3.13 ± 0.18	1655.98 ± 82.20
<b>20-30D</b>	21.30 ± 1.53	3.42 ± 0.55	1410.34 ± 122.31
<b>20-40D</b>	19.20 ± 2.89	3.49 ± 0.58	1448.91 ± 65.55
<b>30-0D</b>	31.16 ± 3.63	3.38 ± 0.53	2383.28 ± 77.84
<b>30-10D</b>	25.62 ± 2.62	4.00 ± 0.20	1441.00 ± 56.96
<b>30-20D</b>	26.04 ± 4.09	4.23 ± 0.89	1665.16 ± 59.10
<b>30-30D</b>	21.78 ± 3.98	3.80 ± 0.66	1507.88 ± 81.39
<b>30-40D</b>	22.50 ± 2.84	3.73 ± 0.46	1593.36 ± 73.89

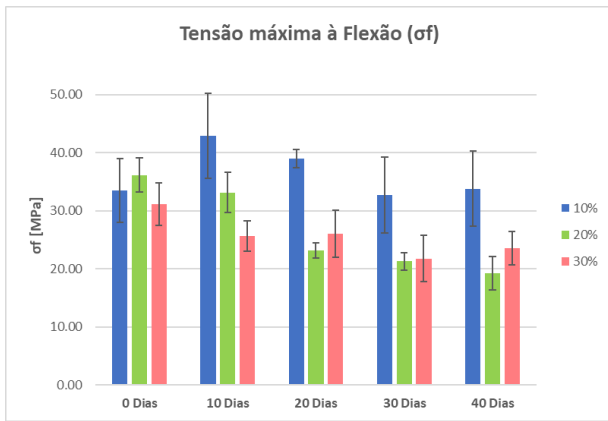


Figura 45 - Tensão máxima à flexão dos provetes com matriz de resina Epoxy

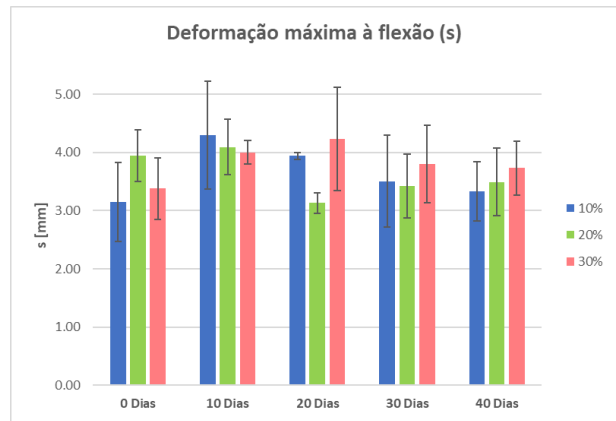


Figura 46 - Deformação máxima à flexão dos provetes com matriz de resina Epoxy

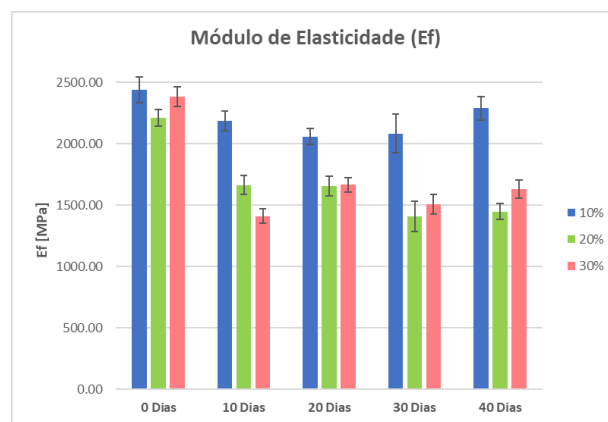


Figura 47 - Módulo de elasticidade dos provetes com matriz de resina Epoxy

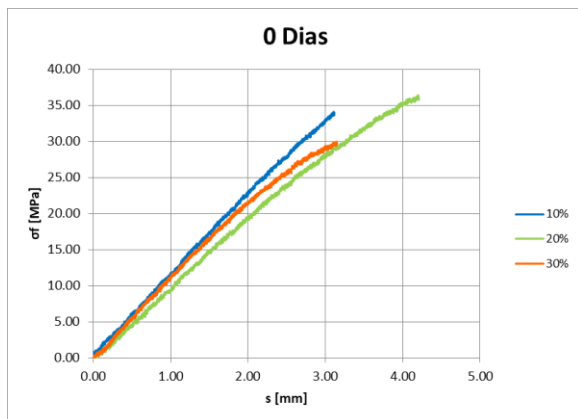


Figura 48 - Gráfico tensão-deformação para um provete com matriz de resina Epoxy de cada fração mássica, com 0 dias de submersão

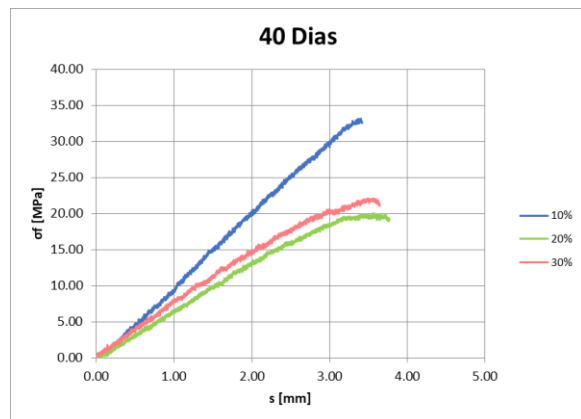


Figura 49 - Gráfico tensão-deformação para um provete com matriz de resina Epoxy de cada fração mássica, com 40 dias de submersão

As roturas tendem a ocorrer em regiões do interior das peças onde existem pedaços maiores de casca ou mesmo pedaços de castanha maiores que não foram suficientemente triturados (Figura 50), devido à fraca adesão entre a matriz e o material de reforço. Outros provetes partiram mais cedo que o esperado devido a bolhas de ar no seu interior (Figura 51).



Figura 50 - Rotura de provete causada por impureza



Figura 51 - Bolhas de ar no interior dos provetes

Analisando os gráficos anteriores é possível estabelecer algumas tendências. Mas antes, é importante referir que para alguns ensaios foram utilizados provetes de placas distintas, e que cada placa também serviu para ensaios de provetes com tempos submersos distintos. Como é sabido, o processo de fabrico das placas é muito manual e é impossível replicar as placas, pelo que alguns resultados podem divergir um pouco do esperado.

Observando a Tabela 13 e o gráfico da Figura 45, que mostra os valores da resistência à flexão, podemos retirar algumas ilações:

1. Os ensaios dos provetes secos, mostram que o valor médio da tensão máxima à flexão conseguida para as diferentes percentagens é bastante inferior à definida pelo fabricante para a resina Epoxy sem materiais de adição (123 MPa). Uma combinação de fatores como a fraca ligação entre as fibras e a resina, a existência de bolhas de ar e impurezas de maiores dimensões não permitem conferir um bom reforço da matriz, levando a uma rotura precoce dos provetes;
2. De modo geral, provetes com maior percentagem de fibra possuem resistência inferior. Este fenómeno pode ocorrer devido à fraca dispersão das fibras na matriz [45];
3. Os provetes com fração mássica de fibra igual a 10%, submersos de 10 a 40 dias, apresentam uma resistência muito superior aos restantes. Contudo, o valor elevado do desvio padrão sugere que os resultados destes ensaios não foram muito uniformes;
4. A permanência dos provetes em água, faz diminuir a sua resistência à flexão, particularmente para os provetes com percentagens de 20% de fibra de castanha.

Como já foi referido, o comportamento dos provetes situa-se no regime elástico e a deformação destes provetes é bastante reduzida (Figura 46). Destes dados, observa-se que:

1. De modo geral, os provetes registam deformações reduzidas, com valores médios entre os 3.1 e 4.3 mm;
2. Existe uma grande variância nos valores obtidos, explicada pela diferença de largura de provete para provete. Como há alguma variação na área de secção, alguns provetes são mais resistentes que outros, podendo deformar mais antes de fraturar. As barras de erro comprovam esta variância;
3. Não é possível detetar uma tendência clara da influência da percentagem de fibras na matriz na deformação dos provetes;
4. Verifica-se uma tendência crescente da capacidade de deformação até aos 20 dias em água, seguida de uma diminuição dessa capacidade até à data dos últimos ensaios;
5. Provetes com 30% de fibras de casca de castanha deformam mais que os restantes quando em contacto com a água por um maior período.

O módulo de elasticidade ( $E_f$ ) caracteriza a resistência à deformação de um determinado material. Com recurso ao gráfico da Figura 47, é possível observar que:

1. O material tende a perder resistência mecânica à carga aplicada quanto mais tempo estiver em contacto com a água. Esta quebra da resistência é menos acentuada nos provetes com 10% de fibras de reforço;
2. Percentagem de fibra superior influencia negativamente o desempenho dos provetes pois as fibras possuem um  $E_f$  muito inferior à resina;
3. Diminuição do  $E_f$  mais acentuada nos primeiros 10 dias;
4. Alguns gráficos mostram que o  $E_f$  dos provetes com 30% de reforço é superior aos com 20%. No entanto a tendência devia ser o oposto. Este fenómeno pode dever-se aos erros de produção das placas. Como já foi mencionado, as placas com 30% de reforço apresentavam uma densidade superior ao valor teórico, pelo que a fração mássica real de fibras pode ser inferior a 30%.

Uma análise aos gráficos da Figura 48 e Figura 49 permite entender que os materiais obtidos do reforço de resina Epoxy com diferentes frações mássicas fibras de casca de castanha apresentam propriedades de um material frágil e pouco maleável. Para qualquer percentagem de fibra ou tempo dentro de água, os provetes deformaram poucos milímetros e

quebraram dentro do regime elástico da deformação. Os gráficos também permitem visualizar, pelo decréscimo do declive das respectivas curvas, o efeito da diminuição de  $E_f$  nos provetes submersos mais tempo.

#### 4.6.2. Provetes com matriz de PP

Os resultados retirados dos ensaios de flexão por três pontos dos provetes de PP reforçados com fibras de casca de castanha podem ser observados na Tabela 14 e Figura 52 até à Figura 53. É, também, apresentada uma comparação entre o comportamento esperado destes materiais antes (Figura 55) e após (Figura 56) a sua submersão. Os dados referentes aos ensaios de cada provete podem ser conferidos no anexo A.8.

Tabela 14 - Tabela resumo das propriedades dos provetes de polipropileno

Ensaio	$\sigma_f$ [MPa]	s [mm]	$E_f$ [MPa]
<b>10-0D</b>	37.43 $\pm$ 0.56	16.91 $\pm$ 0.24	1153.66 $\pm$ 22.08
<b>10-10D</b>	35.72 $\pm$ 0.43	15.30 $\pm$ 0.57	1225.59 $\pm$ 26.12
<b>10-20D</b>	34.80 $\pm$ 1.38	15.91 $\pm$ 0.33	1269.72 $\pm$ 46.31
<b>10-30D</b>	38.86 $\pm$ 1.00	15.53 $\pm$ 0.50	1511.41 $\pm$ 68.06
<b>10-40D</b>	40.45 $\pm$ 0.45	15.34 $\pm$ 0.41	1525.00 $\pm$ 87.68
<b>20-0D</b>	34.49 $\pm$ 2.63	16.28 $\pm$ 0.57	1237.41 $\pm$ 77.72
<b>20-10D</b>	35.72 $\pm$ 1.42	15.32 $\pm$ 1.06	1225.69 $\pm$ 63.62
<b>20-20D</b>	32.31 $\pm$ 1.51	14.94 $\pm$ 0.46	1353.29 $\pm$ 63.65
<b>20-30D</b>	36.49 $\pm$ 1.83	14.88 $\pm$ 1.16	1387.48 $\pm$ 65.19
<b>20-40D</b>	38.24 $\pm$ 0.44	16.21 $\pm$ 0.21	1494.44 $\pm$ 51.69
<b>30-0D</b>	36.86 $\pm$ 1.14	15.78 $\pm$ 0.49	1444.75 $\pm$ 39.74
<b>30-10D</b>	36.77 $\pm$ 1.17	13.77 $\pm$ 0.67	1446.02 $\pm$ 106.46
<b>30-20D</b>	32.76 $\pm$ 2.29	15.68 $\pm$ 0.49	1244.39 $\pm$ 102.49
<b>30-30D</b>	36.03 $\pm$ 2.68	14.75 $\pm$ 1.35	1523.93 $\pm$ 83.60
<b>30-40D</b>	37.55 $\pm$ 1.47	15.34 $\pm$ 0.55	1490.09 $\pm$ 91.92

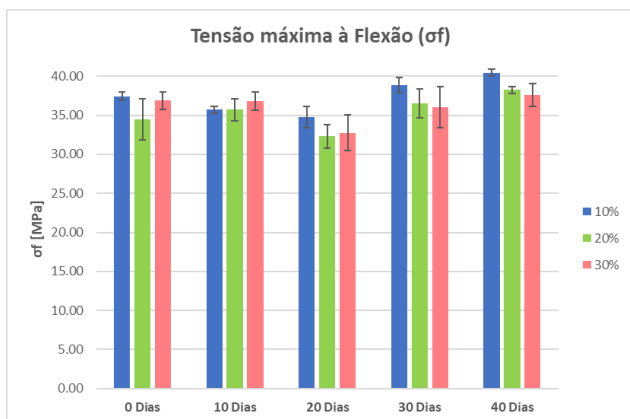


Figura 52 - Tensão máxima à flexão dos provetes com matriz de PP

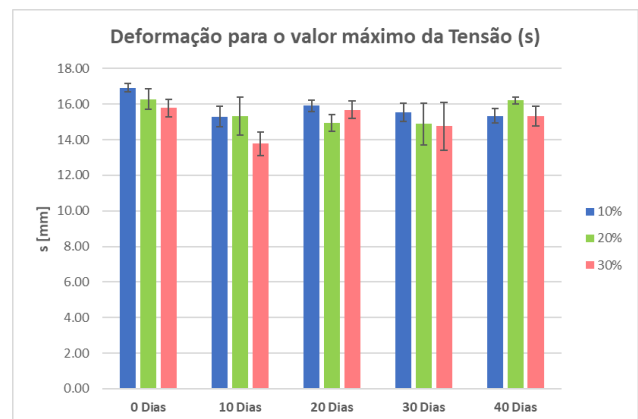


Figura 53 - Deformação para o valor máximo da Tensão dos provetes com matriz de PP

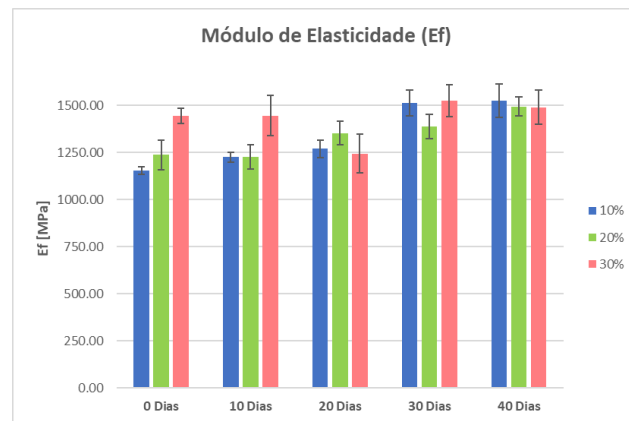


Figura 54 - Módulo de elasticidade dos provetes com matriz de PP

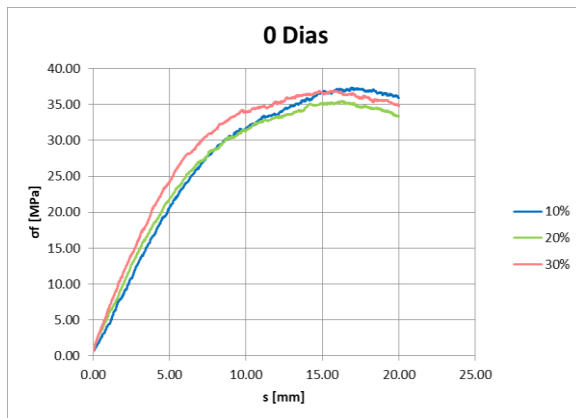


Figura 55 - Gráfico tensão-deformação para um provete com matriz de PP de cada fração mássica, com 0 dias de submersão

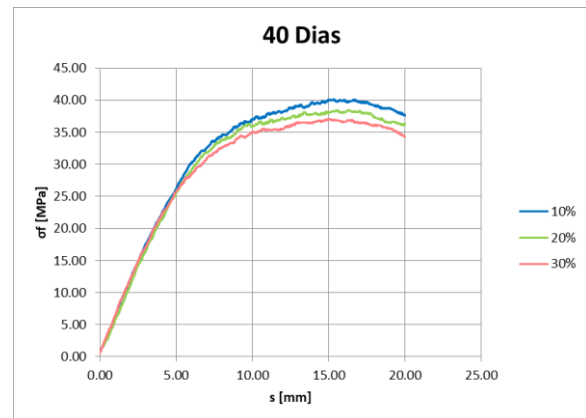


Figura 56 - Gráfico tensão-deformação para um provete com matriz de PP de cada fração mássica, com 40 dias de submersão

Analisando o gráfico da resistência à flexão (Figura 52), observa-se um decréscimo do  $\sigma_f$  máximo até aos 20 dias, seguindo-se de um aumento da resistência do material no caso dos provetes ensaiados após 30 e 40 dias imersos em água. Estes valores tendem a diminuir com o aumento da percentagem de reforço, contrariamente ao que seria esperado, de acordo com a literatura. Comparando os resultados obtidos com o valor de referência mencionado pelo fabricante do PP utilizado (35 MPa), a adição das fibras de reforço não trouxe uma melhoria significativa à resistência do material ( $\approx +1$  MPa).

Estes provetes apresentam uma grande capacidade para deformar à flexão. O pico de tensão situou-se entre os 14 e os 17 mm de deslocamento. Por motivos de eficiência, os ensaios foram interrompidos ao fim de 20 mm de deformação do provete pois já era possível retirar todas as propriedades que se pretendem analisar. Porém, o material tem capacidade

para deformar muito para além desta marca. Pelas Figuras 52, 54 e 55 podemos afirmar que o tempo de contacto com a água não afetou consideravelmente esta propriedade do material. Estes provetes com matriz de PP apresentam uma maior consistência nos valores de deformação obtidos devido à maior estabilidade dimensional das amostras, comparativamente aos provetes produzidos com matriz de resina Epoxy.

O módulo de elasticidade aumenta significativamente para percentagens de fibra superiores, quando ensaiados a seco (Figura 54). Contudo, apenas os provetes com 30% de fibra superam o valor de referência do fabricante (1400 MPa). Após algum tempo em contacto com água, os valores de  $E_f$  para as três concentrações tendem a aproximar-se. Um maior período de submersão também confere um aumento no módulo de elasticidade. Este material não se comporta conforme o esperado, pois seria expectável haver uma degradação do material e menor resistência à flexão.

O baixo desvio padrão na maioria dos ensaios das amostras com uma percentagem de reforço igual a 10% revela uma boa consistência no que toca ao fabrico do material com esta característica. Para os provetes com frações mássicas superiores, houve uma maior dificuldade em garantir uma distribuição uniforme das fibras, o que se traduz na existência de uma maior variância nos resultados dos respetivos ensaios.

Pela análise do gráfico tensão-deformação (Figura 55) podemos concluir que se trata de um material dúctil. Existe uma região bem definida onde o material deforma elasticamente (até entre 6 e 8 mm de deformação). A partir deste ponto, o material entra em deformação plástica, atingindo o pico de tensão quando atingem uma deformação de aproximadamente 15 mm. Analisando o comportamento dos provetes após 40 dias submersos (Figura 56), pode observar-se, pelo aumento do declive da secção reta das curvas de cada ensaio, o aumento da resistência à deformação dos provetes com as três percentagens de fibras de reforço. A deformação plástica inicia-se após os 5 mm de deformação. Este gráfico também permite visualizar o aumento de  $\sigma_f$ .

Como o material tem uma grande capacidade de deformação, os ensaios não se prolongaram muito mais após este ponto por não haver necessidade de estudar o comportamento do material para além do ponto da tensão máxima.

*(Esta página foi intencionalmente deixada em branco)*

## 5. Conclusões

O objetivo deste estudo foi desenvolver e caracterizar dois materiais compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras de castanha, contribuindo para a criação de um material com características mais sustentáveis, por permitir dar uso a toneladas de matéria-prima desperdiçada na indústria alimentar.

Neste trabalho de investigação foram processados e caracterizados provetes de dois materiais compósitos com diferentes percentagens de reforço. Os materiais estudados tinham como matriz a resina Epoxy ou o Polipropileno. Esta foi reforçada, adicionando diferentes concentrações (10, 20 e 30%) de fibras curtas de casca de castanha. A caracterização destes materiais foi realizada recorrendo a ensaios de flexão por três pontos e estudando a sua permeabilidade. Para estudar a influência da permanência do material em água, foram selecionados pelo menos 5 provetes para serem testados periodicamente (a cada 10 dias, para um período de 40 dias). Antes de cada ensaio, pesaram-se os provetes por forma a verificar a taxa de absorção de água dos mesmos.

### 5.1. Processo de fabrico

#### Compósito com matriz de resina Epoxy

O compósito com base de resina Epoxy foi produzido recorrendo à técnica de moldação por compressão. Este é um processo demorado para produzir uma peça de tão pequena dimensão. O procedimento de preparação do molde é de extrema importância para obter placas com qualidade, mas consome muito tempo. Introduzida a mistura de resina, endurecedor e fibras, o molde tem de permanecer sob pressão durante pelo menos 18 horas para garantir que é realizada a cura da resina. Após este passo, as placas obtidas devem permanecer na estufa para o dia seguinte, por forma a conferir a pós cura, importante para a consolidação da placa e conferir uma melhoria nas suas propriedades mecânicas.

As placas obtidas apresentam alguma homogeneidade na distribuição das fibras, contudo, não foi possível evitar a formação de bolhas de ar que comprometem a estrutura interna das placas. Outro fator que contribui para a fragilidade do material é a presença de impurezas duras no seu interior, que não criam ligação com a resina. Estas impurezas são pequenos pedaços do fruto da castanha que vinham misturados com as cascas. Para evitar esta situação, deveria ter sido efetuada um filtragem da matéria-prima após a trituração.

Para além disso, existe uma grande variância no fabrico de placas dentro do mesmo grupo, devido à acumulação de imprecisões inerentes ao trabalho totalmente manual. Apesar de tudo, as placas obtidas apresentaram boa qualidade superficial, compactação e nenhuma variação dimensional relativamente à sua espessura.

### **Compósito com matriz de PP**

Os provetes com matriz de PP foram fabricados pela conjugação de duas técnicas. Primeiramente foi realizada uma extrusão do material base misturado com as fibras de reforço com o objetivo de obter uma mistura mais ou menos homogénea. O material obtido da extrusão foi triturado por forma a criar granulados que foram depois fundidos e injetados num molde próprio, com recurso a uma máquina de injeção. A necessidade deste pré-processamento prende-se com o facto de haver uma grande diferença na densidade dos componentes da mistura. Caso o material fosse injetado no seu estado natural, as fibras, por terem menor densidade, ficariam retidas no início do fuso, podendo eventualmente bloquear a máquina.

O processamento do material obtido por extrusão é simples, contudo pouco eficiente quando levado a cabo no equipamento utilizado. Foi possível produzir uma mistura homogénea para percentagens de fibra de 10%, no entanto, para percentagens superiores, foi complicado garantir que o escoamento da mistura para o fuso decorria uniformemente, causados pela diferença de densidade entre os componentes, mas sobretudo devido à reduzida dimensão e ângulo da entrada do material pouco favorável. O equipamento apresentou algumas oscilações na temperatura do fuso e este é muito suscetível a entupir, particularmente para as misturas com 20 e 30% de fibra.

Durante o processo de injeção, foram sentidas dificuldades no acerto dos parâmetros da máquina por forma a obter provetes completos e sem defeitos. A presença das fibras dificulta o escoamento do material, principalmente para percentagens de 20 e 30%, nas quais não foi possível obter boas peças consistentemente. Houve muito desperdício de material, pelo que se pode concluir que este processo não é indicado para compósitos com grandes concentrações de fibras de reforço.

A dificuldade em obter peças completas está também associada à prisão de gases no molde. A formação de gases pode indicar que as fibras não foram suficientemente secas e ainda continham água absorvida, ou pode também ser provocada pela existência de bolhas

de ar no interior do material extrudido. Contudo, os efeitos da formação de gases foram mais prejudiciais devido à falta de meios para os gases escaparem do interior do molde.

A temperatura de processamento do PP rondou os 220°C durante os processos de extrusão e injeção de provetes. O facto de as fibras terem sido aquecidas até esta temperatura por duas ocasiões e durante um período considerável, significou que estas ficaram totalmente queimadas, perdendo muita da sua resistência. Este fator é muito importante para explicar a ausência de melhoria na resistência mecânica do material, comparativamente ao material virgem sem reforço. Conclui-se que este método de processamento de compósitos com carga de fibras naturais não é recomendado, devendo-se evitar o passo intermédio da extrusão.

O rigor dimensional dos provetes obtidos por este método foi excelente.

## **5.2. Análise de densidades e absorção de água**

Os métodos descritos permitiram obter peças com densidades próximas do valor teórico para ambos os processos de fabrico. Erros experimentais levaram a que a densidade das placas de resina Epoxy com 30% de fibras apresentasse uma densidade superior ao esperado, devido a um excesso de resina. Não obstante, o comportamento à absorção destas amostras não foi severamente afetado pois, em termos quantitativos, a fração mássica de fibras na matriz foi medida corretamente. O mesmo sucedeu com os provetes de PP com 30% de reforço, porque devido à dificuldade em introduzir a mistura na máquina de extrusão, foi adicionado mais PP, afetando a proporção dos constituintes da mistura.

Comprovou-se, no entanto, que, para ambos materiais, os provetes com maiores frações mássicas absorvem mais água e que a taxa de absorção é mais elevada nos primeiros 10 dias. A saturação é atingida ao final de cerca de 40 dias.

### **Compósito com matriz de resina Epoxy**

As amostras com 10% de fibra apresentaram um aumento médio de massa de aproximadamente 2% ao fim de 10 dias e, no final dos testes, a massa ganha correspondia a um aumento total de 3%. No caso dos provetes com 20% de fibras, registou-se um aumento de massa de 6.5% nos primeiros 10 dias, sendo que no final, o ganho mássico foi de 10.3%. Por fim, os provetes de 30% absorveram mais água que os anteriores, tendo sido registado um aumento de 8.5% ao décimo dia, e 12% no final das análises.

A elevada porosidade da resina, a exposição das fibras à água nas zonas de corte e a dimensão de alguns pedaços de fibra de casca de castanha foram os principais fatores que contribuíram para uma absorção tão elevada.

### **Compósito com matriz de PP**

Esta análise comprovou a impermeabilidade do material. Ao longo dos 40 dias, para a fração mássica de fibras naturais de 30%, o aumento mássico foi inferior a 0.5%. Os provetes com 10 e 20% de reforço tiveram um ganho de massa de apenas 0.1 e 0.2%, respetivamente. O facto de as fibras estarem envoltas pelo PP contribuiu para a baixa absorção de água.

## **5.3. Propriedades mecânicas**

### **Compósito com matriz de resina Epoxy**

Os ensaios de flexão mostraram que os provetes possuíam uma resistência à flexão muito inferior ao valor de referência para a resina Epoxy utilizada. Para os provetes ensaiados a seco, o valor de  $\sigma_f$  rondou os 33 MPa, ao passo que o fabricante da resina indica um  $\sigma$  de 123 MPa. Esta discrepância pode ser explicada principalmente pela elevada presença de bolhas de ar no interior das placas. A dimensão de algumas fibras e dificuldade de impregnação das mesmas também contribuiu para uma menor adesão entre a matriz e o material de reforço, facilitando a formação e propagação das fendas.

Os gráficos obtidos permitiram concluir que, de modo geral, a permanência dos provetes em água provoca uma diminuição da resistência mecânica e módulo de elasticidade. A introdução de mais fibras na matriz polimérica também mostrou enfraquecer o material em termos de resistência à flexão.

A baixa taxa de deformação (< 5 mm) e inexistência de deformação no regime plástico indica que o material apresenta um comportamento não dúctil. Não foi possível detetar uma tendência bem definida na influência da percentagem de fibras nesta propriedade.

### **Compósito com matriz de PP**

Devido à reduzida capacidade para absorver água, para o tempo de submersão considerado, as propriedades físicas das amostras deste compósito não foram afetadas de forma severa. A introdução das fibras de reforço aparenta não influenciar os valores da tensão máxima à flexão e deformação do material de base, comparativamente aos valores de referência

do fabricante (35 MPa). Os desvios registados devem-se especialmente a pequenos defeitos de fabrico.

Por outro lado, o módulo de elasticidade é melhorado conforme o compósito contém maior percentagem de reforço. Esta melhoria pode ser explicada pela maior fração mássica das fibras no interior da matriz que dificulta a deformação do material. Contudo, apenas os provetes com 30% de fibra superaram o valor de referência do fabricante (1400 MPa). Esta diferença pode ser explicada pela perda de propriedades das fibras derivada do sobreaquecimento das mesmas durante longos períodos e pela fraca adesão entre a matriz e as fibras.

Os provetes apresentam uma grande ductilidade, típica do PP, podendo deformar muito para além dos 20 mm impostos para o término do ensaio.

#### **5.4. Conclusões finais**

O aproveitamento de fibras naturais resultantes de desperdício da indústria agroalimentar para a produção de compósitos mais sustentáveis pode contribuir para o desenvolvimento das áreas onde existe a produção desta matéria-prima, contribuindo para a criação de novos postos de trabalho, promovendo a criação de novos materiais com aplicações práticas. No caso dos materiais em estudo, estão incluídas a produção de componentes plásticos na indústria automóvel, peças de decoração, embalagens, entre outros cuja utilização não exija elevado desempenho mecânico.

As propriedades do material base não foram superadas por motivos de falhas no processo de fabrico, no caso dos provetes de resina Epoxy, mas também devido à forma como as fibras foram obtidas e aplicadas na matriz. Foi verificado, no caso dos provetes em PP, que a aplicação de fibras curtas não conferiu maior resistência aos provetes produzidos. Em ambas as aplicações, é preferível o uso de fibras longas.

A adição de mais fibras e a permanência dos compósitos de resina Epoxy em água durante um período mais prolongado significaram numa diminuição generalizada das propriedades mecânicas. No caso dos provetes de PP, não foi possível retirar conclusões definitivas, para além do aumento do módulo de elasticidade, com o acréscimo de mais fibras de casca de castanha.

Para processar materiais compósitos reforçados com fibras de casca de castanha, deverão ser priorizados métodos realizados a temperaturas baixas, de modo a não queimar as fibras, por forma a estas não perderem a sua resistência mecânica.

O *script* desenvolvido para filtrar os sinais com ruído gerados pela máquina de ensaios permitiu fazer um tratamento destes gráficos de forma rápida e intuitiva, possibilitando uma leitura da força registada mais próxima da realidade.

## **5.5. Melhorias para trabalhos futuros**

Tendo em consideração os resultados obtidos deste estudo e as conclusões apresentadas nos pontos anteriores, ficam as seguintes oportunidades de melhoria para trabalhos futuros:

- Filtrar partículas de maior dimensão utilizando um crivo;
- Realizar mistura de mistura da resina com endurecedor em vácuo remover as bolhas de ar;
- Caso se pretenda realizar uma extrusão previamente à injeção, utilizar uma extrusora de duplo fuso para melhorar a mistura das fibras com o polímero. Esta mistura também será facilitada caso a entrada do material na câmara seja na vertical e mais regulada;
- A injeção de provetes de PP com carga de 20 e 30% não é viável pois origina um grande desperdício de matéria-prima. Para além de serem mais fáceis de processar, provetes com percentagens até 15% poderão ter propriedades mecânicas superiores;
- Melhoria do sistema de moldação para permitir escape de gases;
- Estudo reológico do material com matriz de PP;
- Aplicar agente ligante (anidrido maleico, por exemplo) para promover melhor ligação entre a fase dispersa e a matriz polimérica e comparar resultados experimentais;
- Efetuar ensaios mecânicos dos materiais após um maior tempo de submersão, por forma a estudar a influência do contacto com água a longo prazo;
- Efetuar ensaios de calorimetria para determinar propriedades térmicas (temperatura de transição vítrea, ponto de fusão e capacidade térmica) dos materiais produzidos.

## Bibliografia

- [1] D. B. Dittenber e H. V. S. Gangarao, “Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 43, nº 8, p. 1419–1429, agosto de 2012. doi: 10.1016/j.compositesa.2011.11.019.
- [2] T. Väisänen, A. Haapala, R. Lappalainen, e L. Tomppo, “Utilization of agricultural and forest industry waste and residues in natural fiber-polymer composites: A review”, *Waste Management*, vol. 54. Elsevier Ltd, p. 62–73, 1º de agosto de 2016. doi: 10.1016/j.wasman.2016.04.037.
- [3] A. Kaymakci e N. Ayrilmis, “Waste chestnut shell as a source of reinforcing fillers for polypropylene composites”, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 27, nº 8, p. 1054–1064, 2014, doi: 10.1177/0892705712461648.
- [4] R. Prithvirajan, G. Bharathiraja, e S. Jayabai, “Bio-based composites from waste agricultural residues: Mechanical and morphological properties”, *Cellulose Chemistry and Technology*, 2015, [Online]. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/272318879>
- [5] A. K. Chaudhary, P. C. Gope, e V. K. Singh, “Water absorption and thickness swelling behavior of almond (*Prunus amygdalus* L.) shell particles and coconut (*Cocos nucifera*) fiber hybrid epoxy-based biocomposite”, *Science and Engineering of Composite Materials*, vol. 22, nº 4, p. 375–382, jul. 2015, doi: 10.1515/secm-2013-0317.
- [6] Fórum Florestal, “Estudo Económico de Desenvolvimento da Fileira da Castanha Relatório Global”, 2016.
- [7] Global Agrimar, “PRODUÇÃO NACIONAL PRODUÇÃO INTERNACIONAL 2017”, 2017.
- [8] A. Matos, “Diagnóstico e Plano Estratégico da Fileira da Castanha”, *IV Congresso Nacional de Economistas Agrícolas - Alimentação e Competitividade: Os Mercados e Circuitos Comerciais dos Produtos Alimentares*, 2004.
- [9] C. A. B. Capela, “PROCESSAMENTO DE PLÁSTICOS E MATERIAIS COMPÓSITOS: COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPONENTES EM SERVIÇO”, Leiria, 2010.
- [10] W. Callister e D. Rethwisch, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 10º ed. Wiley, 2018.
- [11] T. A. Osswald e J. P. (Juan P. Hernández-Ortiz, *Polymer Processing: Modeling and Simulation*. Hanser Publishers, 2006.

- [12] Encyclopaedia Britannica, “polypropylene - chemical compound”, 2009. <https://en.wikipedia.org/wiki/Polypropylene> (acedido a 29 de março de 2023).
- [13] K.K.T Madhusanka, “Chemistry illustration of 1- Propene molecule”. <https://www.shutterstock.com/image-vector/chemistry-illustration-1-propene-molecule-propylene-1987653674> (acedido a 29 de março de 2023).
- [14] R. M. Rowell, “Natural fibres: Types and properties”, em *Properties and Performance of Natural-Fibre Composites*, Elsevier Inc., 2008, p. 3–66. doi: 10.1533/9781845694593.1.3.
- [15] K. Hood, “Epoxy Resins”, em *Comprehensive Polymer Science and Supplements*, 1996, p. 667–699.
- [16] K. L. Pickering, M. G. A. Efendy, e T. M. Le, “A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 83. Elsevier Ltd, p. 98–112, 1º de abril de 2016. doi: 10.1016/j.compositesa.2015.08.038.
- [17] J. Müssig, *Industrial application of natural fibres: structure, properties, and technical applications*. Wiley, 2010.
- [18] C. W. Nguong, S. N. B. Lee, e D. Sujana, “A Review on Natural Fibre Reinforced Polymer Composites”, *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Materials and Metallurgical Engineering*, vol. Vol:7, nº No:1, 2013.
- [19] N. M. Nurazzi *et al.*, “A review on mechanical performance of hybrid natural fiber polymer composites for structural applications”, *Polymers*, vol. 13, nº 13. MDPI AG, 1º de julho de 2021. doi: 10.3390/polym13132170.
- [20] O. Faruk, A. K. Bledzki, H. P. Fink, e M. Sain, “Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010”, *Progress in Polymer Science*, vol. 37, nº 11. p. 1552–1596, novembro de 2012. doi: 10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003.
- [21] R. Kumar, M. I. Ul Haq, A. Raina, e A. Anand, “Industrial applications of natural fibre-reinforced polymer composites—challenges and opportunities”, *International Journal of Sustainable Engineering*, vol. 12, nº 3. Taylor and Francis Ltd., p. 212–220, 4 de maio de 2019. doi: 10.1080/19397038.2018.1538267.
- [22] Y. Xie, C. A. S. Hill, Z. Xiao, H. Miltz, e C. Mai, “Silane coupling agents used for natural fiber/polymer composites: A review”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 41, nº 7. p. 806–819, julho de 2010. doi: 10.1016/j.compositesa.2010.03.005.
- [23] A. K. Mohanty, M. Misra, e G. Hinrichsen, “Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: An overview”, Berlin, 1999.

- [24] C. K. Hong *et al.*, “Mechanical properties of maleic anhydride treated jute fibre/polypropylene composites”, *Plastics, Rubber and Composites*, vol. 37, nº 7, p. 325–330, set. 2008, doi: 10.1179/174328908X314334.
- [25] M. Syduzzaman, M. A. Al Faruque, K. Bilisik, e M. Naebe, “Plant-based natural fibre reinforced composites: A review on fabrication, properties and applications”, *Coatings*, vol. 10, nº 10. MDPI AG, p. 1–34, 1º de outubro de 2020. doi: 10.3390/coatings10100973.
- [26] M. Barczewski, D. Matykiewicz, A. Krygier, J. Andrzejewski, e K. Skórczewska, “Characterization of poly(lactic acid) biocomposites filled with chestnut shell waste”, *J Mater Cycles Waste Manag*, vol. 20, nº 2, p. 914–924, abr. 2018, doi: 10.1007/s10163-017-0658-5.
- [27] O. Faruk, A. K. Bledzki, H. P. Fink, e M. Sain, “Progress report on natural fiber reinforced composites”, *Macromolecular Materials and Engineering*, vol. 299, nº 1. Wiley-VCH Verlag, p. 9–26, 1º de janeiro de 2014. doi: 10.1002/mame.201300008.
- [28] Peygran, “NFC Roble Deck”. <https://www.peygran.com/en/nfc-roble-deck/> (acedido a 29 de março de 2023).
- [29] BMW Group, “BMW i Ventures invests in high-performance composites made from natural fibres”. <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0377293EN/bmw-i-ventures-invests-in-high-performance-composites-made-from-natural-fibres?language=en> (acedido a 29 de março de 2023).
- [30] Sustainable Jungle, “11 Sustainable & Eco-Friendly Phone Cases for Conscious Calls”, 2023. <https://www.sustainablejungle.com/sustainable-living/eco-friendly-phone-cases/> (acedido a 29 de março de 2023).
- [31] Solid Surf, “BIOflex Hemp”. <https://solidsurf.co/bioflex/> (acedido a 29 de março de 2023).
- [32] S. Phillips e L. Lessard, “Application of natural fiber composites to musical instrument top plates”, *J Compos Mater*, vol. 46, nº 2, p. 145–154, jan. 2012, doi: 10.1177/0021998311410497.
- [33] Blackbird Guitars, “Guitars made from eco-friendly materials and why it matters”. <https://www.blackbirdguitar.com/blogs/news/eco-friendly-materials-and-why-it-matters> (acedido a 29 de março de 2023).
- [34] Sicomin, “SR 1500 Epoxy laminating system”, *Technical Data Sheet*. 2014.
- [35] LyondellBasell, “Moplen HP500N”, *Technical Data Sheet*. [Online]. Disponível em: <http://www.lyb.com/>.
- [36] American Society for Testing and Materials, “Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials”.

- [37] Scipy, “scipy.signal.savgol\_filter”. [https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.signal.savgol\\_filter.html](https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.signal.savgol_filter.html) (acedido a 30 de março de 2023).
- [38] DataTechNotes, “Smoothing Example with Savitzky-Golay Filter in Python”, 2022. <https://www.datatechnotes.com/2022/05/smoothing-example-with-savitzky-golay.html> (acedido a 30 de março de 2023).
- [39] A. Svitzky e M. J. E. Golay, “Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares”, *Analytical Chemistry*, vol. 36. p. 1627–1639, 1964.
- [40] M. Schmid, D. Rath, e U. Diebold, “Why and How Savitzky-Golay Filters Should Be Replaced”, *ACS Measurement Science Au*, vol. 2, n° 2, p. 185–196, abr. 2022, doi: 10.1021/acsmeasuresciau.1c00054.
- [41] W. H. Press e S. A. Teukolsky, “Savitzky-Golay Smoothing Filters”, *Computers in Physics*, vol. 4, n° 6, p. 669, 1990, doi: 10.1063/1.4822961.
- [42] R. W. Schafer, “What is a savitzky-golay filter?”, *IEEE Signal Process Mag*, vol. 28, n° 4, p. 111–117, 2011, doi: 10.1109/MSP.2011.941097.
- [43] A. Espert, F. Vilaplana, e S. Karlsson, “Comparison of water absorption in natural cellulosic fibres from wood and one-year crops in polypropylene composites and its influence on their mechanical properties”, *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 35, n° 11, p. 1267–1276, nov. 2004, doi: 10.1016/j.compositesa.2004.04.004.
- [44] W. S. Chow, “Water absorption of epoxy/glass fiber/organo-montmorillonite nanocomposites”, *Express Polym Lett*, vol. 1, n° 2, p. 104–108, fev. 2007, doi: 10.3144/expresspolymlett.2007.18.
- [45] C. S. Wu, Y. C. Hsu, H. T. Liao, F. S. Yen, C. Y. Wang, e C. T. Hsu, “Characterization and biocompatibility of chestnut shell fiber-based composites with polyester”, *J Appl Polym Sci*, vol. 131, n° 17, p. 8906–8915, ago. 2014, doi: 10.1002/app.40730.

# Anexos

## A.1 – Manual de utilização do *script* – código fonte

```

# Importação de dependências para leitura escrita de ficheiros Excel (pandas, openpyxl),
# cálculos matemáticos (numpy), geração de gráficos (openpyxl, pylab, scipy)

from numpy import linspace, loadtxt, ones, convolve
import numpy as np
import openpyxl
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from openpyxl import workbook, load_workbook
from openpyxl.chart import BarChart, Reference
from pylab import plot, ylim, xlim, show, xlabel, ylabel, grid
from scipy import signal
from matplotlib.widgets import Slider
import os
from os.path import exists

# Diretório dos ficheiros originais (r"CAMINHO DA PASTA")
file_path = r"COLAR CAMINHO DA PASTA"
os.chdir(file_path)

# Leitura do ficheiro e folha de acordo com inputs
filename = input("Ensaio: ")
file = filename + ".xlsx"
sheet = input("Provete: ")

# Leitura de ficheiro com nome do input
data = pd.read_excel(file, sheet_name=sheet)

# Leitura das colunas pretendidas do Excel
# Necessário modificar ficheiros originais antes de executar script:
# - eliminar linhas 1 e 2
# - modificar nova primeira linha para [d[mm];F [N]; s [mm]]

x = list(data['d [mm]'])
y = list(data['F [N]'])

# Definição das variáveis Window Length e Polynomial Order
# Para gráficos mais suaves: Window Length - Epoxy: 1235; PP: 1161
#                               Polynomial Order - 1
win_len_init = 1235
poly_init = 1

#Definição da função de filtro
y_savgol = signal.savgol_filter(y, window_length=win_len_init, polyorder=poly_init,
                                mode="nearest")

# Criação da janela do gráfico e definição dos seus eixos
fig, ax = plt.subplots()
# Comentar esta linha (origin) para esconder gráfico original
origin = ax.plot(x,y,"b",lw=1)
line, = ax.plot(x, y_savgol, "r", lw=1)
ax.set_xlabel("Deformação [mm]")
ax.set_ylabel("Força [N]")

# Ajuste da posição do gráfico
fig.subplots_adjust(left=0.25, bottom=0.25)

# Barra de modificação da variável Window Length
axw1 = fig.add_axes([0.25, 0.1, 0.65, 0.03])
wl_slider = Slider(
    ax = axw1,
    label = 'window Length',
    valmin = 1001,
    valmax = 1301,
    valstep = 2.0,
    valfmt = '%d',
    valinit = win_len_init,
)

```

```

# Barra de modificação da variável Polynomial Order
axpo = fig.add_axes([0.1, 0.25, 0.0225, 0.63])
po_slider = slider(
    ax=axpo,
    label = 'Polynomial Order',
    valmin = 1,
    valmax = 7,
    valstep = 1.0,
    valfmt = '%d',
    valinit = poly_init,
    orientation = "vertical",
)

# Execução da função de filtro cada vez que forem modificadas as variáveis Window Length e
    Polynomial Order
def update(val):
    line.set_ydata(signal.savgol_filter(y, wl_slider.val, int(po_slider.val), mode="near-
        est"))
    fig.canvas.draw_idle()

# Atualização do gráfico
wl_slider.on_changed(update)
po_slider.on_changed(update)

# Mostrar gráfico
grid(True)
plt.show()

# Aguardar por um input (ENTER) para permitir ao utilizador ajustar os sliders, caso neces-
    sário,
# antes de avançar para a gravação de um ficheiro Excel com os novos dados
input("ENTER para gravar...")

y_savgol = signal.savgol_filter(y, window_length = int(wl_slider.val), polyorder =
    int(po_slider.val), mode = "nearest")

# Definição do caminho onde guardar o novo ficheiro de Excel com os dados filtrados
save_path = r"COLAR CAMINHO DA PASTA"
os.chdir(save_path)

d = np.array(x)
s = x-d[0]

# Alocação das variáveis à respetiva posição nas colunas e criação dos respetivos títulos
savgoldata = pd.DataFrame([x,y_savgol,s,"","",""]).T
savgoldata.columns = ["d [mm]","F [N]","s [mm]","σf [MPa]","εf [%]","m"]

# Atribuição do nome do novo ficheiro com base no input original
new_file = filename+"_savgol.xlsx"

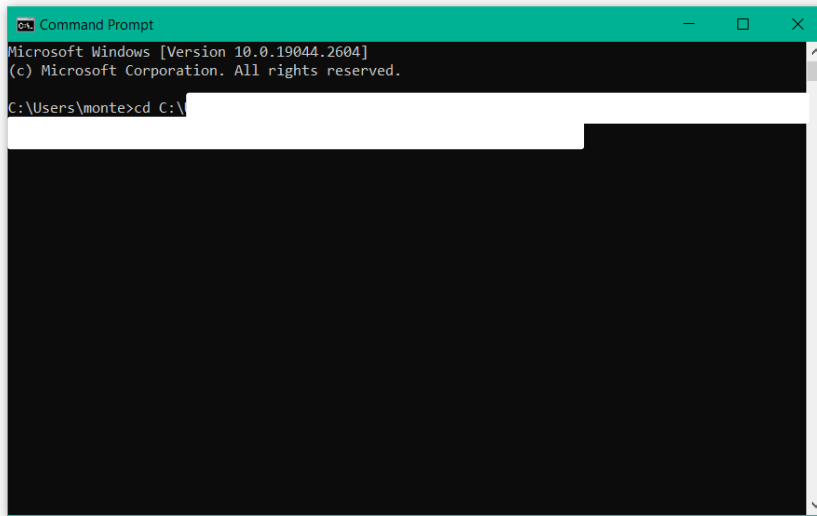
# Verificação da existência de um ficheiro com o mesmo nome
# Caso exista, novos dados são gravados nesse ficheiro
# - é criada nova folha com nome do ensaio ou,
# - se o nome for repetido, grava os dados por cima da folha existente
# Caso não exista, cria um novo ficheiro Excel
file_exists = os.path.exists(new_file)

if file_exists == True:
    write = pd.ExcelWriter(new_file, mode = 'a', engine = 'openpyxl', if_sheet_exists =
        'replace')
    savgoldata.to_excel(write, sheet_name = sheet, index = False)
    write.close()
    print("Ficheiro guardado")
else:
    savgoldata.to_excel(new_file, sheet_name = sheet, index = False)
    print("Ficheiro guardado")

```

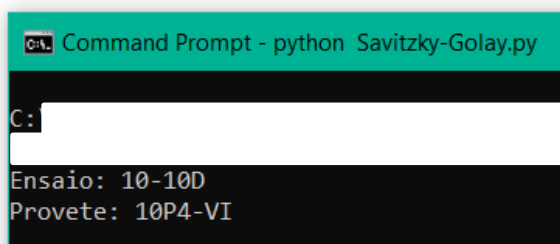
## A.2 – Manual de utilização do *script* – correr o *script*

1 - Abrir janela de comandos e introduzir caminho: `cd C:\CAMINHO DO FICHEIRO;`

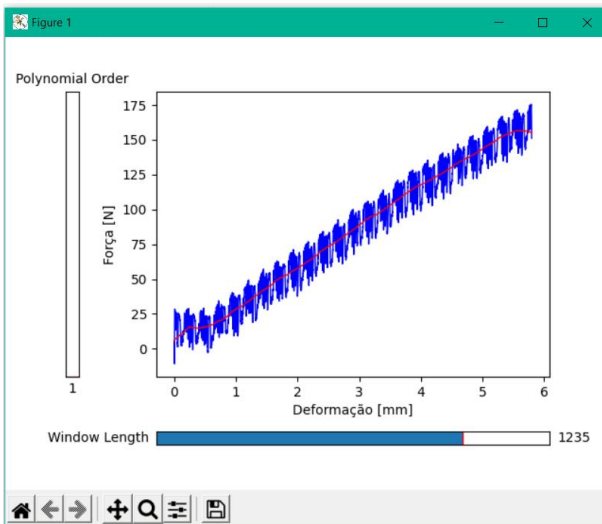


2 - Para correr o script escrever na janela de comandos: `python Savitzky-Golay.py;`

3 – Introduzir o nome do ficheiro e folha correspondentes ao ensaio pretendido;



4 – Analisar gráfico e ajustar *sliders* (melhor com gráfico original não visível);



5 – Fechar janela gráfica e premir ENTER na janela de comandos para gravar ficheiro Excel com dados filtrados;

6 – Repetir passos 2 a 5 para efetuar nova filtragem de outro ensaio.

### A.3 - Provete resina Epoxy - características

Tabela A. 1 - Características dos provetes obtidos das placas de resina Epoxy com 10% de casca de castanha

Placa	Provete	L [mm]	V [mm <sup>3</sup> ]	m <sub>0</sub> [g]	ρ <sub>0</sub> [g/cm <sup>3</sup> ]	ρ <sub>med</sub> [g/cm <sup>3</sup> ]	Desvio Padrão	t <sub>água</sub> [d]
10P1	I	14	7568.40	8.3185	1.0991			40
	II	14.7	7946.82	8.6685	1.0908	1.0951 ± 0.0034		40
	III	13.7	7406.22	8.1136	1.0955			40
10P2	I	14.2	7676.52	7.8543	1.0232			30
	II	15	8109.00	8.5460	1.0539			30
	III	13.3	7189.98	7.4463	1.0356			30
	IV	14.6	7892.76	8.2676	1.0475	1.0466 ± 0.0131		30
	V	14	7568.40	8.0755	1.0670			30
	VI	13.8	7460.28	7.7937	1.0447			40
	VII	14.7	7946.82	8.3799	1.0545			40
10P3	I	14.2	7676.52	8.1494	1.0616			20
	II	14.2	7676.52	8.1119	1.0567			20
	III	13	7027.80	7.4262	1.0567	1.0538 ± 0.0051		20
	IV	13.8	7460.28	7.8232	1.0486			20
	V	14.5	7838.70	8.2070	1.0470			20
	VI	14.7	7946.82	8.3603	1.0520			20
10P4	I	14.3	7730.58	8.3805	1.0841			10
	II	13	7027.80	7.7959	1.1093			10
	III	14.4	7784.64	8.5083	1.0930	1.0890 ± 0.0119		10
	IV	13.8	7460.28	8.1427	1.0915			10
	V	14.2	7676.52	8.2077	1.0692			10
	VI	14.1	7622.46	8.2858	1.0870			10
10P5	I	15.4	8325.24	9.0885	1.0917			0
	II	14.2	7676.52	8.1386	1.0602			0
	III	14	7568.40	8.1465	1.0764	1.0745 ± 0.0222		0
	IV	13.6	7352.16	7.6525	1.0409			0
	V	13	7027.80	7.7529	1.1032			0
<b>média</b>					1.0682	± 0.0117		

**Tabela A. 2** - Características dos provetes obtidos das placas de resina Epoxy com 20% de casca de castanha

Placa	Provete	L [mm]	V [mm <sup>3</sup> ]	m <sub>0</sub> [g]	ρ <sub>0</sub> [g/cm <sup>3</sup> ]	ρ <sub>med</sub>	Desvio	t <sub>água</sub> [d]
						[g/cm <sup>3</sup> ]	Padrão	
20P1	I	14.8	8000.88	7.7745	0.9717			40
	II	13	7027.80	6.5719	0.9351			40
	III	14	7568.40	7.3125	0.9662			40
	IV	14.9	8054.94	7.5606	0.9386			40
	V	15	8109.00	7.6533	0.9438	0.9474 ± 0.0156		40
	VI	13.5	7298.10	6.9278	0.9493			30
	VII	14.5	7838.70	7.5595	0.9644			30
	VIII	13.3	7189.98	6.6478	0.9246			30
	IX	14.4	7784.64	7.2646	0.9332			30
20P2	I	14.6	7892.76	7.6735	0.9722			30
	II	13.9	7514.34	7.2526	0.9652			20
	III	14.4	7784.64	7.6211	0.9790			20
	IV	13.7	7406.22	7.2903	0.9843	0.9710 ± 0.0156		20
	V	14	7568.40	7.5078	0.9920			20
	VI	13.9	7514.34	7.2453	0.9642			20
	VII	13.9	7514.34	7.0658	0.9403			20
20P3	I	14.5	7838.70	8.1706	1.0423			10
	II	13.4	7244.04	7.5121	1.0370			10
	III	13.6	7352.16	7.5045	1.0207			10
	IV	14.6	7892.76	7.9849	1.0117			10
	V	14.2	7676.52	7.9689	1.0381	1.0331 ± 0.0100		10
	VI	14	7568.40	7.8381	1.0356			0
	VII	14.4	7784.64	8.0419	1.0330			0
	VIII	15	8109.00	8.3851	1.0340			0
	IX	13.7	7406.22	7.6303	1.0303			0
	X	15.4	8325.24	8.7302	1.0486			0
<b>média</b>					0.9868	± 0.0134		

**Tabela A. 3** - Características dos provetes obtidos das placas de resina Epoxy com 30% de casca de castanha

Placa	Provete	L [mm]	V [mm <sup>3</sup> ]	m <sub>0</sub> [g]	$\rho_{med}$		Desvio Padrão	t <sub>água</sub> [d]
					$\rho_0$ [g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]		
30P1	I	14.9	8054.94	8.5626	1.0630			40
	II	14	7568.40	7.9400	1.0491			40
	III	15	8109.00	8.5036	1.0487			40
	IV	14	7568.40	7.9473	1.0501			40
	V	13	7027.80	7.2923	1.0376	1.0496 ± 0.0103		40
	VI	14.8	8000.88	8.2989	1.0372			30
	VII	13.8	7460.28	7.7328	1.0365			30
	VIII	15	8109.00	8.5908	1.0594			30
	IX	14	7568.40	8.0550	1.0643			30
30P2	I	14.2	7676.52	8.2502	1.0747			30
	II	13.8	7460.28	8.0432	1.0781			20
	III	14.4	7784.64	8.1101	1.0418			20
	IV	13.5	7298.10	7.7927	1.0678	1.0700 ± 0.0114		20
	V	15	8109.00	8.6674	1.0689			20
	VI	15.1	8163.06	8.7724	1.0746			20
	VII	13	7027.80	7.5411	1.0730			10
	VIII	15	8109.00	8.7629	1.0806			10
30P3	I	14.3	7730.58	7.8988	1.0218			10
	II	13.9	7514.34	7.6752	1.0214			10
	III	13.9	7514.34	7.7199	1.0274			10
	IV	15	8109.00	8.3645	1.0315			10
	V	14.6	7892.76	8.3626	1.0595	1.0471 ± 0.0217		0
	VI	14.2	7676.52	8.0954	1.0546			0
	VII	14	7568.40	8.0096	1.0583			0
	VIII	14.6	7892.76	8.3606	1.0593			0
	IX	15	8109.00	8.8386	1.0900			0
<b>média</b>					1.0550		± 0.0146	

## A.4 - Provetes resina Epoxy – ensaio de densidades

Tabela A. 4 - Comparação entre o ganho mássico e de densidade dos provetes após submersão

Placa	Proвете	$m_0$ [g]	$\rho_0$ [g/mL]	$m_f$ [g]	$\rho_f$ [g/mL]	$\Delta m$ [g]	$\Delta \rho$ [g/mL]	Abs. [%]	$\Delta m$ [g]	$\Delta \rho$ [g/mL]	Abs. [%]	
10P1	I	8.3185	1.0991	8.4895	1.1217	0.1710	0.0226	2.0557				40 Dias
	II	8.6685	1.0908	8.8876	1.1184	0.2191	0.0276	2.5275				
	III	8.1136	1.0955	8.3089	1.1219	0.1953	0.0264	2.4071	0.2419	0.0315	2.9385	
	VI	7.7937	1.0447	8.0760	1.0825	0.2823	0.0378	3.6222				
	VII	8.3799	1.0545	8.7218	1.0975	0.3419	0.0430	4.0800				
10P2	I	7.8543	1.0232	8.1818	1.0658	0.3275	0.0427	4.1697				30 Dias
	II	8.5460	1.0539	8.8350	1.0895	0.2890	0.0356	3.3817				
	III	7.4463	1.0356	7.7295	1.0750	0.2832	0.0394	3.8032	0.2945	0.0383	3.6713	
	IV	8.2676	1.0475	8.5800	1.0871	0.3124	0.0396	3.7786				
	V	8.0755	1.0670	8.3358	1.1014	0.2603	0.0344	3.2233				
10P3	I	8.1494	1.0616	8.4173	1.0965	0.2679	0.0349	3.2874				20 Dias
	II	8.1119	1.0567	8.3346	1.0857	0.2227	0.0290	2.7453				
	III	7.4262	1.0567	7.6915	1.0944	0.2653	0.0378	3.5725	0.2498	0.0330	3.1310	
	IV	7.8232	1.0486	8.1103	1.0871	0.2871	0.0385	3.6699				
	V	8.2070	1.0470	8.4561	1.0788	0.2491	0.0318	3.0352				
	VI	8.3603	1.0520	8.5673	1.0781	0.2070	0.0260	2.4760				
10P4	I	8.3805	1.0841	8.5410	1.1048	0.1605	0.0208	1.9152				10 Dias
	II	7.7959	1.1093	7.9104	1.1256	0.1145	0.0163	1.4687				
	III	8.5083	1.0930	8.6614	1.1126	0.1531	0.0197	1.7994	0.1423	0.0188	1.7282	
	IV	8.1427	1.0915	8.2869	1.1108	0.1442	0.0193	1.7709				
	V	8.2077	1.0692	8.3514	1.0879	0.1437	0.0187	1.7508				
	VI	8.2858	1.0870	8.4237	1.1051	0.1379	0.0181	1.6643				
10P5	I	9.0885	1.0917	9.0885	1.0917	-	-	-				0 Dias
	II	8.1386	1.0602	8.1386	1.0602	-	-	-				
	III	8.1465	1.0764	8.1465	1.0764	-	-	-				
	IV	7.6525	1.0409	7.6525	1.0409	-	-	-				
	V	7.7529	1.1032	7.7529	1.1032	-	-	-				
20P1	I	7.7745	0.9717	8.6237	1.0778	0.8492	0.1061	10.9229				40 Dias
	II	6.5719	0.9351	7.2579	1.0327	0.6860	0.0976	10.4384				
	III	7.3125	0.9662	8.0081	1.0581	0.6956	0.0919	9.5125	0.7603	0.0980	10.3043	
	IV	7.5606	0.9386	8.3450	1.0360	0.7844	0.0974	10.3748				
	V	7.6533	0.9438	8.4395	1.0408	0.7862	0.0970	10.2727				
	VI	6.9278	0.9493	7.4831	1.0253	0.5553	0.0761	8.0155				
	VII	7.5595	0.9644	8.2208	1.0487	0.6613	0.0844	8.7479				
	VIII	6.6478	0.9246	7.1883	0.9998	0.5405	0.0752	8.1305	0.5888	0.0774	8.1705	
	IX	7.2646	0.9332	7.9341	1.0192	0.6695	0.0860	9.2159				
20P2	I	7.6735	0.9722	8.1909	1.0378	0.5174	0.0656	6.7427				20 Dias
	II	7.2526	0.9652	7.7189	1.0272	0.4663	0.0621	6.4294				
	III	7.6211	0.9790	8.1492	1.0468	0.5281	0.0678	6.9294				
	IV	7.2903	0.9843	7.7474	1.0461	0.4571	0.0617	6.2700	0.4952	0.0656	6.7590	
	V	7.5078	0.9920	7.9949	1.0564	0.4871	0.0644	6.4879				
	VI	7.2453	0.9642	7.7572	1.0323	0.5119	0.0681	7.0653				
	VII	7.0658	0.9403	7.5867	1.0096	0.5209	0.0693	7.3721				
20P3	I	8.1706	1.0423	8.5244	1.0875	0.3538	0.0451	4.3302				10 Dias
	II	7.5121	1.0370	7.7777	1.0737	0.2656	0.0367	3.5356				
	III	7.5045	1.0207	7.7931	1.0600	0.2886	0.0393	3.8457	0.2964	0.0390	3.7816	
	IV	7.9849	1.0117	8.2834	1.0495	0.2985	0.0378	3.7383				
	V	7.9689	1.0381	8.2445	1.0740	0.2756	0.0359	3.4584				

<b>20P3</b>	VI	7.8381	1.0356			-	-						0 Dias
	VII	8.0419	1.0330			-	-						
	VIII	8.3851	1.0340			-	-						
	IX	7.6303	1.0303			-	-						
	X	8.7302	1.0486			-	-						
<b>30P1</b>	I	8.5626	1.0630	9.8489	1.2227	1.2863	0.1597	15.0223					40 Dias
	II	7.9400	1.0491	8.8354	1.1674	0.8954	0.1183	11.2771					
	III	8.5036	1.0487	9.4423	1.1644	0.9387	0.1158	11.0389	0.9653	0.1255	11.9440		
	IV	7.9473	1.0501	8.8436	1.1685	0.8963	0.1184	11.2780					
	V	7.2923	1.0376	8.1020	1.1529	0.8097	0.1152	11.1035					
<b>30P2</b>	VI	8.2989	1.0372	9.1161	1.1576	0.8172	0.1203	9.8471					30 Dias
	VII	7.7328	1.0365	8.4446	1.1458	0.7118	0.1093	9.2049					
	VIII	8.5908	1.0594	9.3698	1.1695	0.7790	0.1101	9.0678	0.8311	0.1221	10.1515		
	IX	8.0550	1.0643	8.8817	1.1873	0.8267	0.1230	10.2632					
	I	8.2502	1.0747	9.2711	1.2224	1.0209	0.1477	12.3742					
<b>30P3</b>	II	8.0432	1.0781	8.8534	1.1867	0.8102	0.1086	10.0731					20 Dias
	III	8.1101	1.0418	8.8175	1.1327	0.7074	0.0909	8.7225					
	IV	7.7927	1.0678	8.5518	1.1718	0.7591	0.1040	9.7412	0.7725	0.0997	9.3432		
	V	8.6674	1.0689	9.4221	1.1619	0.7547	0.0931	8.7073					
	VI	8.7724	1.0746	9.6033	1.1764	0.8309	0.1018	9.4718					
<b>30P3</b>	VII	7.5411	1.0730	8.1243	1.1560	0.5832	0.0830	7.7336					10 Dias
	VIII	8.7629	1.0806	9.5185	1.1738	0.7556	0.0932	8.6227					
	I	7.8988	1.0218	8.6894	1.1240	0.7906	0.1023	10.0091	0.6583	0.0858	8.2318		
	II	7.6752	1.0214	8.2780	1.1016	0.6028	0.0802	7.8539					
	III	7.7199	1.0274	8.3372	1.1095	0.6173	0.0821	7.9962					
<b>30P3</b>	IV	8.3645	1.0315	8.9647	1.1055	0.6002	0.0740	7.1756					0 Dias
	V	8.3626	1.0595										
	VI	8.0954	1.0546										
	VII	8.0096	1.0583										
	VIII	8.3606	1.0593										
IX	8.8386	1.0900											

## A.5 Provetes Polipropileno – características

Tabela A. 5 - Massa dos provetes em PP

Grupo	Provete						$m_{med}$ [g]	Desvio Padrão
	I	II	III	IV	V	VI		
<b>10P00D</b>	5.6991	5.6551	5.6265	5.6805	5.6820	5.7216		
<b>10P10D</b>	5.5920	5.7105	5.6994	5.5745	5.6772	5.5524		
<b>10P20D</b>	5.7137	5.6291	5.6013	5.5763	5.5895	5.1893	5.6227	± 0.1167
<b>10P30D</b>	5.6820	5.3781	5.6004	5.7471	5.5310	5.7360		
<b>10P40D</b>	5.5924	5.5900	5.7431	5.7341	5.4695	5.7085		
<b>20P00D</b>	5.8535	5.7290	5.1632	4.3994	4.8174	5.7358		
<b>20P10D</b>	5.7635	4.9955	5.8429	5.7273	5.8825	5.8981		
<b>20P20D</b>	5.9310	4.4577	4.9166	4.9942	5.8766	5.8715	5.5128	± 0.4615
<b>20P30D</b>	5.7371	5.5720	5.8341	4.9035	4.9759	5.8089		
<b>20P40D</b>	5.7514	5.7301	5.7054	5.7052	5.9002	5.9056		
<b>30P00D</b>	5.8464	5.8705	6.0309	5.8972	5.6810	5.8876		
<b>30P10D</b>	5.8788	5.9429	5.6514	5.8460	5.8260	5.9872		
<b>30P20D</b>	6.0780	5.8798	5.5410	5.9067	5.9480	5.2590	5.8142	± 0.2183
<b>30P30D</b>	5.8286	5.9600	5.7395	5.5877	5.8045	5.2715		
<b>30P40D</b>	5.9208	5.9193	5.8463	6.1482	6.0827	5.3593		

Tabela A. 6 - Densidade dos provetes em PP

Grupo	Provete						$\rho_{med}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Desvio Padrão	$\rho_{teórica}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Desvio [%]
	I	II	III	IV	V	VI				
<b>10P00D</b>	0.8211	0.8147	0.8106	0.8184	0.8186	0.8243				
<b>10P10D</b>	0.8056	0.8227	0.8211	0.8031	0.8179	0.7999				
<b>10P20D</b>	0.8232	0.8110	0.8070	0.8034	0.8053	0.7476	0.8101	± 0.0168	0.8568	-5.45
<b>10P30D</b>	0.8186	0.7748	0.8069	0.8280	0.7969	0.8264				
<b>10P40D</b>	0.8057	0.8054	0.8274	0.8261	0.7880	0.8224				
<b>20P00D</b>	0.8433	0.8254	0.7439	0.6338	0.6940	0.8264				
<b>20P10D</b>	0.8304	0.7197	0.8418	0.8251	0.8475	0.8497				
<b>20P20D</b>	0.8545	0.6422	0.7083	0.7195	0.8467	0.8459	0.7942	± 0.0665	0.8136	-2.38
<b>20P30D</b>	0.8266	0.8028	0.8405	0.7065	0.7169	0.8369				
<b>20P40D</b>	0.8286	0.8255	0.8220	0.8220	0.8501	0.8508				
<b>30P00D</b>	0.8423	0.8458	0.8689	0.8496	0.8185	0.8482				
<b>30P10D</b>	0.8470	0.8562	0.8142	0.8422	0.8394	0.8626				
<b>30P20D</b>	0.8757	0.8471	0.7983	0.8510	0.8569	0.7577	0.8377	± 0.0315	0.7704	8.73
<b>30P30D</b>	0.8397	0.8587	0.8269	0.8050	0.8363	0.7595				
<b>30P40D</b>	0.8530	0.8528	0.8423	0.8858	0.8763	0.7721				

## A.6 Provetes Polipropileno – ensaio de densidades

Tabela A. 7 - Comparação entre o ganho mássico e de densidade dos provetes após submersão

Grupo	Provete	$\rho_0$		$\rho_f$		$\Delta\rho$			Desv. Padrão	$\Delta\rho$	Desv. Padrão	Desv. Padrão
		$m_0$ [g]	[g/cm <sup>3</sup> ]	$m_f$ [g]	[g/cm <sup>3</sup> ]	$\Delta m$ [g]	[g/cm <sup>3</sup> ]	Abs. [%]				
10P00D	I	5.6991	0.8211	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	II	5.6551	0.8147	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	III	5.6265	0.8106	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	IV	5.6805	0.8184	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	V	5.6820	0.8186	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	VI	5.7216	0.8243	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10P10D	I	5.5920	0.8056	5.5939	0.8059	0.0019	0.0003	0.0340	-	-	-	-
	II	5.7105	0.8227	5.7123	0.8230	0.0018	0.0003	0.0315	-	-	-	-
	III	5.6994	0.8211	5.7009	0.8213	0.0015	0.0002	0.0263	-	-	-	-
	IV	5.5745	0.8031	5.5809	0.8040	0.0064	0.0009	0.1148	0.0032 ± 0.0021	0.0005 ± 0.0003	0.0571 ± 0.0385	-
	V	5.6772	0.8179	5.6788	0.8182	0.0016	0.0002	0.0282	-	-	-	-
	VI	5.5524	0.7999	5.5584	0.8008	0.0060	0.0009	0.1081	-	-	-	-
10P20D	I	5.7137	0.8232	5.7163	0.8236	0.0026	0.0004	0.0455	-	-	-	-
	II	5.6291	0.8110	5.6338	0.8117	0.0047	0.0007	0.0835	-	-	-	-
	III	5.6013	0.8070	5.6071	0.8078	0.0058	0.0008	0.1035	-	-	-	-
	IV	5.5763	0.8034	5.5804	0.8040	0.0041	0.0006	0.0735	0.0044 ± 0.0014	0.0006 ± 0.0002	0.0797 ± 0.0241	-
	V	5.5895	0.8053	5.5959	0.8062	0.0064	0.0009	0.1145	-	-	-	-
	VI	5.1893	0.7476	5.1923	0.7481	0.0030	0.0004	0.0578	-	-	-	-
10P30D	I	5.6820	0.8186	5.6911	0.8199	0.0091	0.0013	0.1602	-	-	-	-
	II	5.3781	0.7748	5.3861	0.7760	0.0080	0.0012	0.1488	-	-	-	-
	III	5.6004	0.8069	5.6107	0.8083	0.0103	0.0015	0.1839	-	-	-	-
	IV	5.7471	0.8280	5.7542	0.8290	0.0071	0.0010	0.1235	0.0074 ± 0.0021	0.0011 ± 0.0003	0.1314 ± 0.0373	-
	V	5.5310	0.7969	5.5351	0.7974	0.0041	0.0006	0.0741	-	-	-	-
	VI	5.7360	0.8264	5.7416	0.8272	0.0056	0.0008	0.0976	-	-	-	-
10P40D	I	5.5924	0.8057	5.5966	0.8063	0.0042	0.0006	0.0751	-	-	-	-
	II	5.5900	0.8054	5.5965	0.8063	0.0065	0.0009	0.1163	-	-	-	-
	III	5.7341	0.8261	5.7383	0.8267	0.0042	0.0006	0.0732	-	-	-	-
	IV	5.7431	0.8274	5.7478	0.8281	0.0047	0.0007	0.0818	0.0066 ± 0.0027	0.0009 ± 0.0004	0.1170 ± 0.0494	-
	V	5.4695	0.7880	5.4811	0.7897	0.0116	0.0017	0.2121	-	-	-	-
	VI	5.7085	0.8224	5.7167	0.8236	0.0082	0.0012	0.1436	-	-	-	-

20P00D	I	5.8535	0.8433	-	-													0 Dias
	II	5.7290	0.8254	-	-													
	III	5.1632	0.7439	-	-													
	IV	4.3994	0.6338	-	-													
	V	4.8174	0.6940	-	-													
	VI	5.7358	0.8264	-	-													
20P10D	I	5.7635	0.8304	5.7681	0.8310	0.0046	0.0007	0.0798										10 Dias
	II	4.9955	0.7197	5.0058	0.7212	0.0103	0.0015	0.2062										
	III	5.8429	0.8418	5.8468	0.8424	0.0039	0.0006	0.0667	0.0061	0.0033	0.0009	0.0005	0.1094	0.0649				
	IV	5.7273	0.8251	5.7377	0.8266	0.0104	0.0015	0.1816										
	V	5.8825	0.8475	5.8885	0.8484	0.0060	0.0009	0.1020										
	VI	5.8981	0.8497	5.8993	0.8499	0.0012	0.0002	0.0203										
20P20D	I	5.9310	0.8545	5.9388	0.8556	0.0078	0.0011	0.1315										20 Dias
	II	4.4577	0.6422	4.4858	0.6463	0.0281	0.0040	0.6304										
	III	4.9166	0.7083	4.9363	0.7112	0.0197	0.0028	0.4007	0.0151	0.0072	0.0022	0.0010	0.2998	0.1738				
	IV	4.9942	0.7195	5.0066	0.7213	0.0124	0.0018	0.2483										
	V	5.8766	0.8467	5.8918	0.8488	0.0152	0.0022	0.2587										
	VI	5.8715	0.8459	5.8791	0.8470	0.0076	0.0011	0.1294										
20P30D	I	5.7371	0.8266	5.7546	0.8291	0.0175	0.0025	0.3050										30 Dias
	II	5.5720	0.8028	5.5795	0.8038	0.0075	0.0011	0.1346										
	III	5.8341	0.8405	5.8458	0.8422	0.0117	0.0017	0.2005	0.0139	0.0036	0.0020	0.0005	0.2544	0.0657				
	IV	4.9035	0.7065	4.9181	0.7086	0.0146	0.0021	0.2980										
	V	4.9759	0.7169	4.9894	0.7188	0.0135	0.0019	0.2713										
	VI	5.8089	0.8369	5.8273	0.8395	0.0184	0.0027	0.3168										
20P40D	I	5.7514	0.8286	5.7615	0.8301	0.0101	0.0015	0.1756										40 Dias
	II	5.7301	0.8255	5.7477	0.8281	0.0176	0.0025	0.3071										
	III	5.7054	0.8220	5.7149	0.8234	0.0095	0.0014	0.1665	0.0125	0.0027	0.0018	0.0004	0.2166	0.0478				
	IV	5.7052	0.8220	5.7189	0.8239	0.0137	0.0020	0.2401										
	V	5.9002	0.8501	5.9132	0.8519	0.0130	0.0019	0.2203										
	VI	5.9056	0.8508	5.9168	0.8524	0.0112	0.0016	0.1897										
30P00D	I	5.8464	0.8423	-	-													0 Dias
	II	5.8705	0.8458	-	-													
	III	6.0309	0.8689	-	-													
	IV	5.8972	0.8496	-	-													
	V	5.6810	0.8185	-	-													
	VI	5.8876	0.8482	-	-													
30P10D	I	5.8788	0.8470	5.9004	0.8501	0.0216	0.0031	0.3674										10 Dias
	II	5.9429	0.8562	5.9522	0.8575	0.0093	0.0013	0.1565										
	III	5.6514	0.8142	5.6671	0.8165	0.0157	0.0023	0.2778	0.0134	0.0046	0.0019	0.0007	0.2302	0.0795				
	IV	5.8460	0.8422	5.8591	0.8441	0.0131	0.0019	0.2241										
	V	5.8260	0.8394	5.8395	0.8413	0.0135	0.0019	0.2317										
	VI	5.9872	0.8626	5.9946	0.8637	0.0074	0.0011	0.1236										
30P20D	I	6.0780	0.8757	6.1034	0.8793	0.0254	0.0037	0.4179										20 Dias
	II	5.8798	0.8471	5.9099	0.8514	0.0301	0.0043	0.5119										
	III	5.5410	0.7983	5.5672	0.8021	0.0262	0.0038	0.4728	0.0256	0.0023	0.0037	0.0003	0.4441	0.0364				
	IV	5.9067	0.8510	5.9311	0.8545	0.0244	0.0035	0.4131										
	V	5.9480	0.8569	5.9728	0.8605	0.0248	0.0036	0.4169										
	VI	5.2590	0.7577	5.2817	0.7609	0.0227	0.0033	0.4316										
30P30D	I	5.8286	0.8397	5.8560	0.8437	0.0274	0.0039	0.4701										30 Dias
	II	5.9600	0.8587	5.9852	0.8623	0.0252	0.0036	0.4228										
	III	5.7395	0.8269	5.7657	0.8307	0.0262	0.0038	0.4565	0.0272	0.0056	0.0039	0.0008	0.4755	0.0939				
	IV	5.5877	0.8050	5.6223	0.8100	0.0346	0.0050	0.6192										
	V	5.8045	0.8363	5.8369	0.8409	0.0324	0.0047	0.5582										
	VI	5.2715	0.7595	5.2887	0.7620	0.0172	0.0025	0.3263										
30P40D	I	5.9208	0.8530	5.9634	0.8592	0.0426	0.0061	0.7195										40 Dias
	II	5.9193	0.8528	5.9500	0.8572	0.0307	0.0044	0.5186										
	III	5.8463	0.8423	5.8739	0.8463	0.0276	0.0040	0.4721	0.0261	0.0088	0.0038	0.0013	0.4444	0.1479				
	IV	6.1482	0.8858	6.1656	0.8883	0.0174	0.0025	0.2830										
	V	6.0827	0.8763	6.1032	0.8793	0.0205	0.0030	0.3370										
	VI	5.3593	0.7721	5.3773	0.7747	0.0180	0.0026	0.3359										

## A.7 Provetes Epoxy – resultados dos ensaios de flexão

**Nota:** resultados assinalados a vermelho não foram contabilizados para os cálculos finais.

### 10-0D

	h [mm]	b [mm]	L [mm]	Fmax [N]	s [mm]	$\sigma_f$ [MPa]	Ef [MPa]
10P5-I	5.3	15.4	84.8	115.87	3.10	34.07	2369.70
10P5-II	5.3	14.2	84.8	94.17	2.80	30.03	2397.67
10P5-III	5.3	14	84.8	77.93	2.19	25.21	2562.63
10P5-IV	5.3	13.6	84.8	122.88	4.27	40.91	2301.21
10P5-V	5.3	13	84.8	107.16	3.38	37.33	2564.17
				<b>média</b>	3.15	33.51	2439.08
				<b>stdv</b>	0.68	5.49	106.25

### 10-10D

	h [mm]	b [mm]	L [mm]	Fmax [N]	s [mm]	$\sigma_f$ [MPa]	Ef [MPa]
10P4-I	5.3	14.3	84.8	120.63	3.92	38.20	2114.60
10P4-II	5.3	13	84.8	94.78	2.95	33.02	2307.86
10P4-III	5.3	14.4	84.8	166.05	5.50	52.22	2176.07
10P4-IV	5.3	13.8	84.8	124.23	3.93	40.77	2235.14
10P4-V	5.3	14.2	84.8	84.09	2.30	26.81	2219.92
10P4-VI	5.3	14.1	84.8	156.70	5.18	50.32	2092.59
				<b>média</b>	4.30	42.90	2185.25
				<b>stdv</b>	0.93	7.30	78.97

### 10-20D

	h [mm]	b [mm]	L [mm]	Fmax [N]	s [mm]	$\sigma_f$ [MPa]	Ef [MPa]
10P3-I	5.3	14.2	84.8	120.25	3.95	38.35	2023.34
10P3-II	5.3	14.2	84.8	127.65	4.03	40.71	2150.40
10P3-III	5.3	13	84.8	105.13	3.85	36.62	1984.28
10P3-IV	5.3	13.8	84.8	116.56	3.97	38.25	2011.27
10P3-V	5.3	14.5	84.8	166.00	5.60	51.84	2145.53
10P3-VI	5.3	14.7	84.8	132.53	3.91	40.83	2126.99
				<b>média</b>	3.94	38.95	2059.26
				<b>stdv</b>	0.06	1.61	66.50

### 10-30D

	h [mm]	b [mm]	L [mm]	Fmax [N]	s [mm]	$\sigma_f$ [MPa]	Ef [MPa]
10P2-I	5.3	14.2	84.8	97.87	3.71	31.21	1854.45
10P2-II	5.3	15	84.8	104.78	3.05	31.63	2202.28
10P2-III	5.3	13.3	84.8	72.25	2.61	24.60	2001.42
10P2-IV	5.3	14.6	84.8	144.01	4.93	44.66	2050.74
10P2-V	5.3	14	84.8	96.31	3.23	31.15	2306.12
				<b>média</b>	3.51	32.65	2083.00
				<b>stdv</b>	0.80	6.55	157.44

**10-40D**

	<b>h [mm]</b>	<b>b [mm]</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Fmax [N]</b>	<b>s [mm]</b>	<b>of [MPa]</b>	<b>Ef [MPa]</b>
<b>10P1-I</b>	5.3	14	84.8	137.58	4.15	44.50	2443.04
<b>10P1-II</b>	5.3	14.7	84.8	118.44	3.64	36.48	2315.28
<b>10P1-III</b>	5.3	13.7	84.8	100.15	3.02	33.10	2309.90
<b>10P2-VI</b>	5.3	13.8	84.8	78.45	2.73	25.74	2158.27
<b>10P2-VII</b>	5.3	14.7	84.8	94.68	3.08	29.17	2221.66
				<b>média</b>	3.32	33.80	2289.63
				<b>stdv</b>	0.51	6.46	96.41

**20-0D**

	<b>h [mm]</b>	<b>b [mm]</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Fmax [N]</b>	<b>s [mm]</b>	<b>of [MPa]</b>	<b>Ef [MPa]</b>
<b>20P3-VI</b>	5.3	14	84.8	115.70	4.07	37.42	2206.50
<b>20P3-VII</b>	5.3	14.4	84.8	127.32	4.53	40.04	2256.78
<b>20P3-VIII</b>	5.3	15	84.8	103.06	3.25	31.11	2085.48
<b>20P3-IX</b>	5.3	13.7	84.8	110.23	4.20	36.44	2241.66
<b>20P3-X</b>	5.3	15.4	84.8	121.00	3.66	35.58	2275.08
				<b>média</b>	3.94	36.12	2213.10
				<b>stdv</b>	0.44	2.92	67.67

**20-10D**

	<b>h [mm]</b>	<b>b [mm]</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Fmax [N]</b>	<b>s [mm]</b>	<b>of [MPa]</b>	<b>Ef [MPa]</b>
<b>20P3-I</b>	5.3	14.5	84.8	117.50	4.56	36.70	1518.27
<b>20P3-II</b>	5.3	13.4	84.8	103.63	4.38	35.02	1732.47
<b>20P3-III</b>	5.3	13.6	84.8	100.71	4.39	33.53	1684.25
<b>20P3-IV</b>	5.3	14.6	84.8	85.57	3.28	26.54	1663.09
<b>20P3-V</b>	5.3	14.2	84.8	105.99	3.83	33.80	1719.24
				<b>média</b>	4.09	33.12	1663.46
				<b>stdv</b>	0.47	3.47	76.66

**20-20D**

	<b>h [mm]</b>	<b>b [mm]</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Fmax [N]</b>	<b>s [mm]</b>	<b>of [MPa]</b>	<b>Ef [MPa]</b>
<b>20P2-II</b>	5.3	13.9	84.8	62.26	2.98	20.28	1539.17
<b>20P2-III</b>	5.3	14.4	84.8	72.37	3.19	22.76	1643.88
<b>20P2-IV</b>	5.3	13.7	84.8	74.38	3.05	24.58	1795.81
<b>20P2-V</b>	5.3	14	84.8	73.96	3.30	23.92	1670.00
<b>20P2-VI</b>	5.3	13.9	84.8	73.29	3.30	23.88	1628.90
<b>20P2-VII</b>	5.3	13.9	84.8	63.99	2.83	20.85	1541.30
				<b>média</b>	3.13	23.20	1655.98
				<b>stdv</b>	0.18	1.31	82.20

**20-30D**

	<b>h [mm]</b>	<b>b [mm]</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Fmax [N]</b>	<b>s [mm]</b>	<b>of [MPa]</b>	<b>Ef [MPa]</b>
<b>20P1-VI</b>	5.3	13.5	84.8	61.94	3.10	20.78	1494.60
<b>20P1-VII</b>	5.3	14.5	84.8	65.33	3.42	20.40	1345.67
<b>20P1-VIII</b>	5.3	13.3	84.8	-	-	-	-
<b>20P1-IX</b>	5.3	14.4	84.8	76.05	4.32	23.92	1245.05
<b>20P2-I</b>	5.3	14.6	84.8	64.77	2.86	20.09	1556.05
				<b>média</b>	3.42	21.30	1410.34
				<b>stdv</b>	0.55	1.53	122.31

**20-40D**

	<b>h [mm]</b>	<b>b [mm]</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Fmax [N]</b>	<b>s [mm]</b>	<b>of [MPa]</b>	<b>Ef [MPa]</b>
<b>20P1-I</b>	5.3	14.8	84.8	74.86	4.09	22.90	1384.75
<b>20P1-II</b>	5.3	13	84.8	60.67	4.13	21.13	1426.51
<b>20P1-III</b>	5.3	14	84.8	45.97	2.67	14.87	1381.45
<b>20P1-IV</b>	5.3	14.9	84.8	65.97	3.57	20.05	1510.85
<b>20P1-V</b>	5.3	15	84.8	56.40	3.01	17.03	1540.98
				<b>média</b>	3.49	19.20	1448.91
				<b>stdv</b>	0.58	2.89	65.55

**30-0D**

	<b>h [mm]</b>	<b>b [mm]</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Fmax [N]</b>	<b>s [mm]</b>	<b>of [MPa]</b>	<b>Ef [MPa]</b>
<b>30P3-V</b>	5.3	14.6	84.8	91.09	3.16	28.25	2262.48
<b>30P3-VI</b>	5.3	14.2	84.8	109.04	4.09	34.77	2327.51
<b>30P3-VII</b>	5.3	14	84.8	92.63	3.14	29.96	2477.49
<b>30P3-VIII</b>	5.3	14.6	84.8	116.22	3.88	36.05	2437.26
<b>30P3-IX</b>	5.3	15	84.8	88.70	2.64	26.78	2411.66
				<b>média</b>	3.38	31.16	2383.28
				<b>stdv</b>	0.53	3.63	77.84

**30-10D**

	<b>h [mm]</b>	<b>b [mm]</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Fmax [N]</b>	<b>s [mm]</b>	<b>of [MPa]</b>	<b>Ef [MPa]</b>
<b>30P2-VII</b>	5.3	13	84.8	104.46	5.75	36.38	1651.16
<b>30P2-VIII</b>	5.3	15	84.8	88.71	4.21	26.78	1334.68
<b>30P3-I</b>	5.3	14.3	84.8	69.02	3.70	21.86	1403.74
<b>30P3-II</b>	5.3	13.9	84.8	72.41	3.96	23.59	1479.72
<b>30P3-III</b>	5.3	13.9	84.8	90.06	4.24	29.34	1471.83
<b>30P3-IV</b>	5.3	15	84.8	87.86	3.90	26.52	1367.18
				<b>média</b>	4.00	25.62	1411.43
				<b>stdv</b>	0.20	2.62	56.96

**30-20D**

	<b>h [mm]</b>	<b>b [mm]</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Fmax [N]</b>	<b>s [mm]</b>	<b>of [MPa]</b>	<b>Ef [MPa]</b>
<b>30P2-II</b>	5.3	13.8	84.8	71.78	3.43	23.55	1760.76
<b>30P2-III</b>	5.3	14.4	84.8	104.42	5.46	32.84	1662.44
<b>30P2-IV</b>	5.3	13.5	84.8	65.45	3.30	21.96	1647.43
<b>30P2-V</b>	5.3	15	84.8	76.90	3.84	23.22	1678.47
<b>30P2-VI</b>	5.3	15.1	84.8	95.53	5.11	28.65	1576.69
				<b>média</b>	4.23	26.04	1665.16
				<b>stdv</b>	0.89	4.09	59.10

**30-30D**

	<b>h [mm]</b>	<b>b [mm]</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Fmax [N]</b>	<b>s [mm]</b>	<b>of [MPa]</b>	<b>Ef [MPa]</b>
<b>30P1-VI</b>	5.3	14.8	84.8	62.89	3.44	19.24	1424.40
<b>30P1-VII</b>	5.3	13.8	84.8	85.62	4.82	28.10	1530.36
<b>30P1-VIII</b>	5.3	15	84.8	78.10	4.14	23.58	1601.54
<b>30P1-IX</b>	5.3	14	84.8	66.82	3.76	21.61	1581.93
<b>30P2-I</b>	5.3	14.2	84.8	51.27	2.84	16.35	1401.15
				<b>média</b>	3.80	21.78	1507.88
				<b>stdv</b>	0.66	3.98	81.39

**30-40D**

	<b>h [mm]</b>	<b>b [mm]</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Fmax [N]</b>	<b>s [mm]</b>	<b>of [MPa]</b>	<b>Ef [MPa]</b>
<b>30P1-I</b>	5.3	14.9	84.8	59.82	3.45	18.18	1450.44
<b>30P1-II</b>	5.3	14	84.8	68.36	3.56	22.11	1637.23
<b>30P1-III</b>	5.3	15	84.8	79.13	3.79	23.89	1633.69
<b>30P1-IV</b>	5.3	14	84.8	82.89	4.42	26.81	1650.98
<b>30P1-V</b>	5.3	13	84.8	61.70	3.15	21.49	1594.45
				<b>média</b>	3.73	23.58	1629.09
				<b>stdv</b>	0.46	2.06	21.02

**A.8 Provetes Polipropileno – resultados dos ensaios de flexão**

**Nota:** resultados assinalados a vermelho não foram contabilizados para os cálculos finais.

**10-0D**

	<b>h [mm]</b>	<b>b [mm]</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Fmax [N]</b>	<b>s [mm]</b>	<b>of [MPa]</b>	<b>Ef [MPa]</b>
<b>10P0D-I</b>	4.4	12.5	86.3	70.37	17.36	37.64	1131.07
<b>10P0D-II</b>	4.4	12.5	86.3	68.04	16.91	36.40	1148.57
<b>10P0D-III</b>	4.4	12.5	86.3	70.71	16.68	37.83	1134.48
<b>10P0D-IV</b>	4.4	12.5	86.3	70.97	16.71	37.96	1191.82
<b>10P0D-V</b>	4.4	12.5	86.3	69.80	16.91	37.34	1162.38
				<b>média</b>	16.91	37.43	1153.66
				<b>stdv</b>	0.24	0.56	22.08

**10-10D**

	<b>h [mm]</b>	<b>b [mm]</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Fmax [N]</b>	<b>s [mm]</b>	<b>of [MPa]</b>	<b>Ef [MPa]</b>
<b>10P10D-I</b>	4.4	12.5	86.3	67.67	15.19	36.20	1262.88
<b>10P10D-II</b>	4.4	12.5	86.3	67.84	15.88	36.29	1250.02
<b>10P10D-III</b>	4.4	12.5	86.3	66.13	16.02	35.38	1195.43
<b>10P10D-IV</b>	4.4	12.5	86.3	66.30	14.88	35.47	1212.66
<b>10P10D-V</b>	4.4	12.5	86.3	65.96	14.53	35.28	1206.96
				<b>média</b>	15.30	35.72	1225.59
				<b>stdv</b>	0.57	0.43	26.12

**10-20D**

	<b>h [mm]</b>	<b>b [mm]</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Fmax [N]</b>	<b>s [mm]</b>	<b>of [MPa]</b>	<b>Ef [MPa]</b>
<b>10P20D-II</b>	4.4	12.5	86.3	68.81	16.06	36.81	1258.31
<b>10P20D-III</b>	4.4	12.5	86.3	65.40	15.77	34.98	1359.61
<b>10P20D-IV</b>	4.4	12.5	86.3	65.20	15.34	34.88	1230.54
<b>10P20D-VI</b>	4.4	12.5	86.3	65.13	16.09	34.84	1239.97
<b>10P20D-VI</b>	4.4	12.5	86.3	60.70	16.28	32.47	1260.18
				<b>média</b>	15.91	34.80	1269.72
				<b>stdv</b>	0.33	1.38	46.31

**10-30D**

	<b>h [mm]</b>	<b>b [mm]</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Fmax [N]</b>	<b>s [mm]</b>	<b><math>\sigma_f</math> [MPa]</b>	<b>Ef [MPa]</b>
10P30D-II	4.4	12.5	86.3	71.04	15.00	38.00	1499.61
10P30D-III	4.4	12.5	86.3	73.69	15.13	39.42	1528.97
10P30D-IV	4.4	12.5	86.3	74.49	15.57	39.85	1622.08
10P30D-V	4.4	12.5	86.3	69.82	15.50	37.35	1496.14
10P30D-VI	4.4	12.5	86.3	74.16	16.44	39.67	1410.25
				<b>média</b>	15.53	38.86	1511.41
				<b>stdv</b>	0.50	1.00	68.06

**10-40D**

	<b>h [mm]</b>	<b>b [mm]</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Fmax [N]</b>	<b>s [mm]</b>	<b><math>\sigma_f</math> [MPa]</b>	<b>Ef [MPa]</b>
10P40D-I	4.4	12.5	86.3	75.06	15.34	40.15	1556.59
10P40D-II	4.4	12.5	86.3	72.16	15.77	38.60	1533.05
10P40D-III	4.4	12.5	86.3	74.96	14.90	40.09	1650.15
10P40D-IV	4.4	12.5	86.3	74.95	15.03	40.09	1539.23
10P40D-V	4.4	12.5	86.3	76.01	15.34	40.66	1380.53
10P40D-VI	4.4	12.5	86.3	77.10	16.09	41.24	1498.49
				<b>média</b>	15.34	40.45	1525.00
				<b>stdv</b>	0.41	0.45	87.68

**20-0D**

	<b>h [mm]</b>	<b>b [mm]</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Fmax [N]</b>	<b>s [mm]</b>	<b><math>\sigma_f</math> [MPa]</b>	<b>Ef [MPa]</b>
20P0D-I	4.4	12.5	86.3	67.84	17.09	36.29	1346.26
20P0D-II	4.4	12.5	86.3	70.45	16.10	37.68	1253.59
20P0D-III	4.4	12.5	86.3	60.81	16.50	32.53	1179.14
20P0D-IV	4.4	12.5	86.3	51.23	16.48	27.40	991.79
20P0D-V	4.4	12.5	86.3	56.92	15.19	30.44	1125.09
20P0D-Vi	4.4	12.5	86.3	66.41	16.29	35.52	1283.00
				<b>média</b>	16.28	34.49	1237.41
				<b>stdv</b>	0.57	2.63	77.72

**20-10D**

	<b>h [mm]</b>	<b>b [mm]</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Fmax [N]</b>	<b>s [mm]</b>	<b><math>\sigma_f</math> [MPa]</b>	<b>Ef [MPa]</b>
20P10D-I	4.4	12.5	86.3	69.38	15.48	37.11	1195.62
20P10D-II	4.4	12.5	86.3	61.86	17.33	33.09	1135.88
20P10D-III	4.4	12.5	86.3	68.01	14.65	36.38	1205.17
20P10D-IV	4.4	12.5	86.3	66.30	14.43	35.47	1318.14
20P10D-V	4.4	12.5	86.3	68.35	14.73	36.56	1273.63
				<b>média</b>	15.32	35.72	1225.69
				<b>stdv</b>	1.06	1.42	63.62

**20-20D**

	<b>h [mm]</b>	<b>b [mm]</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Fmax [N]</b>	<b>s [mm]</b>	<b><math>\sigma_f</math> [MPa]</b>	<b>Ef [MPa]</b>
20P20D-I	4.4	12.5	86.3	62.95	14.18	33.67	1466.30
20P20D-II	4.4	12.5	86.3	60.95	15.41	32.60	1271.48
20P20D-III	4.4	12.5	86.3	56.44	14.85	30.19	1360.56
20P20D-IV	4.4	12.5	86.3	63.76	15.42	34.11	1334.18
20P20D-V	4.4	12.5	86.3	57.93	14.85	30.99	1333.94
<b>20P20D-VI</b>	<b>4.4</b>	<b>12.5</b>	<b>86.3</b>	<b>59.62</b>	<b>15.42</b>	<b>31.89</b>	<b>1173.50</b>
				<b>média</b>	14.94	32.31	1353.29
				<b>stdv</b>	0.46	1.51	63.65

**20-30D**

	<b>h [mm]</b>	<b>b [mm]</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Fmax [N]</b>	<b>s [mm]</b>	<b><math>\sigma_f</math> [MPa]</b>	<b>Ef [MPa]</b>
20P30D-I	4.4	12.5	86.3	65.52	14.70	35.05	1362.19
20P30D-II	4.4	12.5	86.3	68.27	15.05	36.52	1401.85
20P30D-III	4.4	12.5	86.3	71.77	16.79	38.39	1428.24
20P30D-IV	4.4	12.5	86.3	63.37	14.71	33.90	1276.91
<b>20P30D-V</b>	<b>4.4</b>	<b>12.5</b>	<b>86.3</b>	<b>60.02</b>	<b>15.91</b>	<b>32.11</b>	<b>1183.07</b>
20P30D-VI	4.4	12.5	86.3	72.13	13.15	38.58	1468.22
				<b>média</b>	14.88	36.49	1387.48
				<b>stdv</b>	1.16	1.83	65.19

**20-40D**

	<b>h [mm]</b>	<b>b [mm]</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Fmax [N]</b>	<b>s [mm]</b>	<b><math>\sigma_f</math> [MPa]</b>	<b>Ef [MPa]</b>
20P40D-I	4.4	12.5	86.3	70.88	16.23	37.92	1595.97
20P40D-II	4.4	12.5	86.3	72.53	16.30	38.80	1474.51
20P40D-III	4.4	12.5	86.3	71.96	16.35	38.49	1461.23
<b>20P40D-IV</b>	<b>4.4</b>	<b>12.5</b>	<b>86.3</b>	<b>74.00</b>	<b>17.03</b>	<b>39.5</b>	<b>1539.08</b>
20P40D-V	4.4	12.5	86.3	71.84	16.34	38.43	1483.99
20P40D-VI	4.4	12.5	86.3	70.23	15.79	37.57	1456.49
				<b>média</b>	16.21	38.24	1494.44
				<b>stdv</b>	0.21	0.44	51.69

**30-0D**

	<b>h [mm]</b>	<b>b [mm]</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Fmax [N]</b>	<b>s [mm]</b>	<b><math>\sigma_f</math> [MPa]</b>	<b>Ef [MPa]</b>
30P0D-I	4.4	12.5	86.3	72.06	16.55	38.54	1447.65
30P0D-II	4.4	12.5	86.3	70.16	15.13	37.53	1448.46
<b>30P0D-III</b>	<b>4.4</b>	<b>12.5</b>	<b>86.3</b>	<b>74.99</b>	<b>16.72</b>	<b>40.11</b>	<b>1608.20</b>
30P0D-IV	4.4	12.5	86.3	65.96	15.50	35.28	1495.64
30P0D-V	4.4	12.5	86.3	69.01	15.67	36.92	1373.39
30P0D-VI	4.4	12.5	86.3	67.38	16.07	36.04	1458.59
				<b>média</b>	15.78	36.86	1444.75
				<b>stdv</b>	0.49	1.14	39.74

**30-10D**

	<b>h [mm]</b>	<b>b [mm]</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Fmax [N]</b>	<b>s [mm]</b>	<b>σf [MPa]</b>	<b>Ef [MPa]</b>
<b>30P10D-I</b>	4.4	12.5	86.3	66.48	14.37	35.56	1494.48
<b>30P10D-II</b>	4.4	12.5	86.3	71.78	12.53	38.40	1487.19
<b>30P10D-III</b>	4.4	12.5	86.3	70.59	14.01	37.76	1379.82
<b>30P10D-IV</b>	4.4	12.5	86.3	74.86	13.80	40.04	1542.40
<b>30P10D-V</b>	4.4	12.5	86.3	68.54	13.66	36.66	1279.45
<b>30P10D-VI</b>	4.4	12.5	86.3	66.31	14.28	35.47	1589.18
				<b>média</b>	13.77	36.77	1446.02
				<b>stdv</b>	0.67	1.17	106.46

**30-20D**

	<b>h [mm]</b>	<b>b [mm]</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Fmax [N]</b>	<b>s [mm]</b>	<b>σf [MPa]</b>	<b>Ef [MPa]</b>
<b>30P20D-I</b>	4.4	12.5	86.3	67.10	15.89	35.90	1380.83
<b>30P20D-II</b>	4.4	12.5	86.3	47.31	15.11	25.31	890.52
<b>30P20D-III</b>	4.4	12.5	86.3	55.95	15.04	29.93	1119.78
<b>30P20D-IV</b>	4.4	12.5	86.3	56.66	16.46	30.31	1137.21
<b>30P20D-V</b>	4.4	12.5	86.3	63.10	15.31	33.75	1326.32
<b>30P20D-VI</b>	4.4	12.5	86.3	63.40	15.69	33.91	1257.80
				<b>média</b>	15.68	32.76	1244.39
				<b>stdv</b>	0.49	2.29	102.49

**30-30D**

	<b>h [mm]</b>	<b>b [mm]</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Fmax [N]</b>	<b>s [mm]</b>	<b>σf [MPa]</b>	<b>Ef [MPa]</b>
<b>30P30D-I</b>	4.4	12.5	86.3	64.92	12.66	34.73	1467.16
<b>30P30D-II</b>	4.4	12.5	86.3	73.20	15.85	39.16	1681.08
<b>30P30D-III</b>	4.4	12.5	86.3	65.81	16.50	35.21	1523.69
<b>30P30D-IV</b>	4.4	12.5	86.3	60.06	14.08	32.13	1442.19
<b>30P30D-V</b>	4.4	12.5	86.3	72.79	14.66	38.94	1505.51
<b>30P30D-VI</b>	4.4	12.5	86.3	58.41	12.69	31.24	1299.17
				<b>média</b>	14.75	36.03	1523.93
				<b>stdv</b>	1.35	2.68	83.60

**30-40D**

	<b>h [mm]</b>	<b>b [mm]</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Fmax [N]</b>	<b>s [mm]</b>	<b>σf [MPa]</b>	<b>Ef [MPa]</b>
<b>30P40D-I</b>	4.4	12.5	86.3	67.31	15.05	36.01	1501.60
<b>30P40D-II</b>	4.4	12.5	86.3	64.02	14.12	34.25	1401.11
<b>30P40D-III</b>	4.4	12.5	86.3	72.11	16.05	38.57	1400.46
<b>30P40D-IV</b>	4.4	12.5	86.3	74.51	15.94	39.86	1633.85
<b>30P40D-V</b>	4.4	12.5	86.3	69.31	15.01	37.08	1532.29
<b>30P40D-VI</b>	4.4	12.5	86.3	67.71	14.66	36.22	1382.25
				<b>média</b>	15.34	37.55	1490.09
				<b>stdv</b>	0.55	1.47	91.92