

# **Desenvolvimento de Fibras Naturais para Filamentos Sustentáveis em Impressão 3D**

**Bruno Mendes - 49084**

**Mestrado em Engenharia Mecânica**

Novembro de 2025

## **Desenvolvimento de Fibras Naturais para Filamentos Sustentáveis em Impressão 3D**

**Bruno Mendes - 49084**

Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Bragança para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Mecânica**

**Orientadores do Instituto Politécnico de Bragança:**

Professor João da Rocha e Silva

Professor João Eduardo Pinto Castro Ribeiro

*À minha família, amigos e companheiros de jornada*

## **Agradecimentos**

O ato de agradecimento é, na sua essência, o reconhecimento de todo o bem que nos foi feito. Posto isto, deixo nesta secção um agradecimento profundo aos seguintes:

Ao departamento de Engenharia Mecânica, e ao Instituto Politécnico de Bragança, na pessoa do seu magnífico Presidente, Orlando Isidoro Afonso Rodrigues, aos seus professores e funcionários.

Aos meus Orientadores, Professor João Rocha e Professor João Ribeiro, pelo aconselhamento, orientação e disponibilidade sempre prestada. Agradeço-lhes, principalmente, a partilha do saber e as valiosas contribuições para este trabalho.

À equipa FabLabIPB, na pessoa do professor, Jorge Santos pela oportunidade e pelo desenvolvimento profissional e pessoal que me proporcionou até à data.

Agradeço igualmente ao projeto “0049\_NATUR\_FAB\_2\_E – Fomento da especialização inteligente, transição industrial e empreendedorismo através de novos materiais baseados em recursos endógenos compatíveis com tecnologias de fabrico aditivo de grande formato” o apoio e financiamento concedidos no âmbito do Programa Interreg VI A Espanha–Portugal (POCTEP), que contribuíram para a realização do presente estudo.

Aos meus colegas de curso e, em particular, à Luana Ferreira pela paciência, consideração, amizade e por me ter proporcionado uma experiência que valerá sempre a pena recordar.

Às cidades onde já vivi, Braga e Bragança, por me terem acolhido em tantas diferentes fases.

Aos meus amigos de Braga, ao Duplex, aos de Erasmus, a todas as noites de estudo, às noites sem estudo, e aos bons momentos que partilhámos juntos.

Aos meus pais, Paulinho e Susaninha, por estarem sempre presentes e por me darem a maior das liberdades para ser feliz e correr atrás do que queria. E à minha irmã, Filipa, a pequena mulher que é também o meu maior orgulho.

A todos os que se cruzaram comigo aos longo destes 2 anos e contribuíram, direta ou indiretamente, no culminar desta experiência, a Dissertação.

Por fim, às minhas avós, Augusta e Rosa e, aos meus avôs António e Adolfo. As pessoas que inculcaram em mim a vontade de lutar e que me deram asas para sonhar sempre alto. O significado da palavra Obrigado.

# Resumo

Nos últimos anos, tem-se verificado uma crescente preocupação ambiental que tem levado a indústria e a comunidade científica a procurar alternativas aos plásticos convencionais derivados do petróleo. Estes materiais, de origem fóssil, apresentam uma elevada persistência ambiental e contribuem de forma significativa para a poluição.

Entre as alternativas estudadas, o ácido poliláctico (PLA) destaca-se por ser obtido a partir de fontes vegetais e por ser biodegradável. No entanto, o PLA apresenta algumas limitações, nomeadamente rigidez elevada e fraca resistência ao impacto, fatores que restringem a sua utilização em diversas aplicações. Para ultrapassar estas limitações, tem sido estudada a incorporação de fibras naturais como reforço, de modo a melhorar as propriedades mecânicas do material e aumentar a sua durabilidade.

Entre as fibras de origem vegetal, as lignocelulósicas, como as de cânhamo, linho e castanha, têm despertado particular interesse. As fibras de cânhamo destacam-se pela rigidez e resistência, o linho pela flexibilidade e capacidade de absorção de impactos, e as fibras de castanha, embora menos exploradas, revelam propriedades comparáveis às mais utilizadas, mostrando potencial para futuras aplicações.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade da utilização destas fibras naturais na melhoria de filamentos destinados à impressão 3D, uma tecnologia de fabrico aditivo baseada na deposição camada a camada. Para tal, foram desenvolvidos processos de extração e caracterização de fibras, bem como ensaios mecânicos. A hipótese central é que as fibras naturais possam substituir as fibras sintéticas, originando produtos mais sustentáveis sem comprometer a qualidade.

Se os resultados forem favoráveis, este estudo poderá contribuir para o desenvolvimento de materiais ambientalmente responsáveis e para a inovação em diferentes setores industriais, num contexto em que a sustentabilidade representa um fator cada vez mais decisivo.

**Palavras-chave:** sustentabilidade ambiental; plásticos biodegradáveis; reforço com fibras naturais; propriedades mecânicas; polímeros de origem vegetal; cânhamo; linho; castanha; impressão 3D; compósitos ecológicos.

# Abstract

In recent years, growing environmental awareness has led both industry and the scientific community to seek alternatives to conventional petroleum-based plastics. These fossil-derived materials are known for their long environmental persistence and significant contribution to pollution.

Among the materials studied, polylactic acid (PLA) stands out as a biodegradable polymer obtained from renewable plant-based sources. However, PLA still presents certain limitations, particularly high stiffness and low impact resistance, which restrict its use in various applications. To overcome these limitations, the incorporation of natural fibres as reinforcement has been explored, aiming to enhance the mechanical properties and durability of the material.

Among the different plant-based fibres, lignocellulosic fibres such as hemp, flax and chestnut have attracted particular attention. Hemp fibres are known for their rigidity and strength, flax fibres for their flexibility and impact absorption capacity, while chestnut fibres, although less studied, exhibit properties comparable to the more traditional ones and show potential for future applications.

This work aims to assess the feasibility of using these natural fibres to improve filaments for 3D printing, an additive manufacturing technology based on layer-by-layer deposition. For this purpose, fibre extraction and characterisation processes were developed, along with mechanical testing. The central hypothesis is that natural fibres can replace synthetic ones, leading to more sustainable products without compromising quality.

If the results prove favourable, this study may contribute to the development of environmentally responsible materials and foster innovation across different industrial sectors, at a time when sustainability has become an increasingly decisive factor.

**Keywords:** *environmental sustainability; biodegradable plastics; natural fibre reinforcement; mechanical properties; plant-based polymers; hemp fibres; flax fibres; chestnut fibres; 3D printing; eco-friendly composites.*

# Índice

<b>1. Introdução .....</b>	<b>14</b>
1.1. Apresentação do Projeto.....	16
1.1.1. Projeto naturFAB.....	16
1.1.2. Principais Objetivos.....	17
1.1.3. Laboratório Fablab IPB .....	18
1.2. Enquadramento .....	20
1.3. Motivação.....	21
1.4. Objetivos .....	22
1.5. Estrutura do Relatório. ....	23
<b>2. Revisão da Literatura .....</b>	<b>24</b>
2.1. Materiais Compósitos.....	25
2.2. Fase Matriz .....	26
2.3. Fase de Reforço .....	28
2.4. Interface entre matriz e reforço .....	29
2.5. Fibras Naturais.....	30
2.6. Fibras Naturais em Portugal .....	35
<b>3. Metodologia.....</b>	<b>36</b>
3.1. Matéria-Prima .....	36
3.2. Tratamentos Químicos.....	37
3.3. Trabalho Experimental .....	38
3.3.1. Extração Química .....	38
3.3.1.1. Experiência 1 de Cânhamo .....	38
3.3.1.2. Experiência 2 de Cânhamo .....	40
3.3.1.3. Experiência 3 de Cânhamo .....	40
3.3.1.4. Experiência 4 de Cânhamo .....	41
3.3.1.5. Experiência 5 de Cânhamo .....	43

3.3.1.6. Experiência 6 de Cânhamo .....	43
3.3.1.7. Experiência 1 de Castanha .....	44
3.3.1.8. Experiência 2 de Castanha .....	45
3.4. Caraterização Mecânica .....	46
<b>4. Resultados.....</b>	<b>48</b>
4.1. Fibras de Cânhamo.....	48
4.1.1. Experiência 1 .....	48
4.1.2. Experiência 2 .....	48
4.1.3. Experiência 3 .....	49
4.1.4. Experiência 4 .....	50
4.1.5. Experiência 5 .....	50
4.1.6. Experiência 6 .....	51
4.2. Fibras de Castanha.....	52
4.2.1. Experiência 1 .....	52
4.2.2. Experiência 2 .....	52
4.3. Fibras de Linho .....	53
4.4. Caraterização Mecânica .....	54
<b>5. Conclusão.....</b>	<b>58</b>
<b>6. Referências Bibliográficas .....</b>	<b>60</b>
<b>7. Anexos.....</b>	<b>63</b>
Anexo A Curvas tensão–deformação obtidas no primeiro ensaio .....	63
Anexo B Curvas tensão–deformação obtidas no segundo ensaio .....	63
Anexo C Curvas tensão–deformação obtidas no terceiro ensaio .....	64
Anexo D Gráfico tensão–deformação do ensaio de tração do cânhamo comercial .....	64

# Índice de Figuras e Tabelas

Figura 1. Distribuição dos parceiros do projeto naturFAB [1].....	17
Figura 2. Logótipo FabLab IPB [3] .....	18
Figura 3. (a)Tijolos com reforços de palha utilizados em períodos pré-históricos; (b) foguete de pesquisa de alta altitude desenvolvido pela Scales Composites [23] ..	25
Figura 4. Comparação ilustrativa entre materiais monolíticos convencionais e compósitos [25].....	26
Figura 5. Exemplo de esquema de fases em um compósito, adaptado de [26].....	27
Figura 6. Classificação dos compósitos segundo [26] .....	28
Figura 7. Interfaces e interfases num material compósito: (a) ligação direta entre as fases primária e secundária; (b) adição de um terceiro ingrediente para ligar as fases primária e secundária e formar uma interfase; e (c) formação de uma interfase por uma nos seus limites, adaptado de [32].....	29
Figura 8. Efeitos do tratamento a resistência ao corte interfacial (RCI) do compósito de cânhamo / PLA /UP [37]. U - não tratado, NaOH - 5% em peso de hidróxido de sódio, AA - anidrido acético (C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub> ), MA - 5% em peso de anidrido maleico, S - 0,5% em peso de silano, NaOH com S - 5% em peso de hidróxido de sódio com 0,5% em peso de silano, adaptado de [34].....	30
Figura 9. Classificação das fibras, adaptado de [35] .....	30
Figura 10. Estrutura organizacional da parede celular de uma fibra lignocelulósica, adaptado de [36].....	31
Figura 11. Estrutura genérica das fibras naturais, adaptado de [36].....	32
Figura 12. Comparação de custo por peso entre compósitos naturais e sintéticos, adaptado de [39].....	33
Figura 13. Relação entre limite de resistência a tração e densidade de vários compósitos e suas respetivas fibras, adaptado de [39] .....	33
Figura 14. Relação entre limite de resistência a tração e custo por volume de vários compósitos e suas respetivas fibras, adaptado de [39] .....	33
Figura 15. Relação entre módulo de elasticidade e densidade de vários compósitos e suas respetivas fibras, adaptado de [39] .....	34
Figura 16. Relação entre módulo de elasticidade e custo por volume de vários compósitos e suas respetivas fibras, adaptado de [39]. .....	34
Figura 17. Diagrama das diversas aplicações da Cannabis sativa [4].....	36

Figura 18. Fibras de Cânhamo com um Dia de Colheita .....	38
Figura 19. Tina de Vidro Posicionada sobre a Placa de Aquecimento. ....	39
Figura 20. Fibras Removidas da Solução .....	39
Figura 21. Fibras de Cânhamo na Solução Aquecida a 80°C.....	40
Figura 22. Fibras na Solução com Condensador e Manta Térmica .....	41
Figura 23. Fibras Submetidas a Processo Mecânico.....	41
Figura 24. Fibras Retiradas da Água e Deixadas a Secar.....	42
Figura 25. Fibras na Solução num Balão de 500ml e acoplado a um condensador de 40cm e aquecido numa Manta Térmica.....	43
Figura 26. Processo de Extração em Circuito Fechado.....	44
Figura 27. Cascas Dentro do Sistema depois da Lavagem Prévia das Cascas ....	45
Figura 28. Suporte de acordo com a ASTM C1557 [45] ...	46
Figura 29. Experiência 1 de cânhamo ao microscópio .....	48
Figura 30. Experiência 1 de cânhamo ao microscópio .....	48
Figura 31. Experiência 2 de cânhamo ao microscópio .....	49
Figura 32. Experiência 2 de cânhamo ao microscópio .....	49
Figura 33. Experiência 3 de cânhamo ao microscópio .....	49
Figura 34. Experiência 3 de cânhamo ao microscópio .....	50
Figura 35. Experiência 4 de cânhamo ao microscópio... ..	50
Figura 36. Experiência 4 de cânhamo ao microscópio .....	50
Figura 37. Experiência 5 de cânhamo ao microscópio .....	51
Figura 38. Experiência 5 de cânhamo ao microscópio .....	51
Figura 39. Experiência 6 de cânhamo ao microscópio .....	51
Figura 40. Experiência 6 de cânhamo ao microscópio .....	51
Figura 41. Experiência 1 de castanha ao microscópio.....	52
Figura 42. Experiência 1 de castanha ao microscópio.....	52
Figura 43. Experiência 2 de castanha ao microscópio.....	53
Figura 44. Experiência 2 de castanha ao microscópio.....	53

Figura 45. Primeiro ensaio de tração .....	56
Figura 46. Segundo ensaio de tração .....	56
Figura 47. Terceiro ensaio de tração .....	56
Tabela 1. Vantagens e desvantagens dos compósitos naturais em relação aos sintéticos [38].....	32
Tabela 2. Comparação entre fibras naturais e cânhamo comercial.....	55

## Lista de Abreviaturas e Siglas

AA – Anidrido Acético

ASTM – American Society for Testing and Materials

DFM – Design for Maintainability

ISO – International Organization for Standardization

IPB – Instituto Politécnico de Bragança

MA – Anidrido Maleico

MIT – Massachusetts Institute of Technology

NaOH – Hidróxido de Sódio

Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> – Carbonato de Sódio

PLA – Ácido Poliláctico (Polylactic Acid)

RCI – Resistência ao Corte Interfacial

SA – Solução Alcalina

U – Não tratado (Untreated)

UP – Poliéster Insaturado (Unsaturated Polyester)

2D – Bidimensional

3D – Tridimensional

SA – Solução Alcalina

# 1. Introdução

O presente relatório de Mestrado em Engenharia Mecânica, realizado no Instituto Politécnico de Bragança (IPB) sob a orientação do Professor João Rocha, marca o final de uma etapa importante a nível pessoal, académico e profissional.

O trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto naturFAB, uma iniciativa de cooperação entre instituições portuguesas e espanholas dedicada ao desenvolvimento de materiais sustentáveis à base de fibras naturais. Este projeto integra o Programa Europeu INTERREG Espanha–Portugal (POCTEP 2021–2027), que tem como objetivo reforçar a colaboração entre regiões fronteiriças dos dois países, promovendo a inovação, a sustentabilidade e a valorização dos recursos locais através de ações conjuntas.

O naturFAB procura criar soluções que combinem tecnologia e sustentabilidade, explorando o potencial das fibras naturais na produção de materiais compósitos e filamentos para manufatura aditiva (impressão 3D). O consórcio responsável pelo projeto é constituído por várias entidades parceiras, o Instituto Politécnico de Bragança (IPB), a Universidade de Salamanca (USAL), o Instituto Politécnico de Castelo Branco (IPCB) e o Centro Tecnológico CARTIF que, em conjunto, promovem a partilha de conhecimento, recursos e infraestruturas, contribuindo para o avanço de soluções técnicas ambientalmente responsáveis.

O trabalho apresentado neste relatório foi desenvolvido no FabLab IPB, onde participei em diversas atividades relacionadas com os processos químicos e mecânicos de extração e caracterização de fibras naturais. Esta experiência permitiu-me aplicar os conhecimentos adquiridos ao longo do curso, desenvolver novas competências laboratoriais e compreender de forma prática os desafios associados à investigação e desenvolvimento de novos materiais.

O projeto decorreu sob a supervisão do Professor João Rocha e contou ainda com o acompanhamento dos Professores João Ribeiro e Jorge Santos, cujas orientações e contributos técnicos foram fundamentais para o sucesso das diferentes etapas do trabalho.

Neste relatório apresenta-se, numa primeira fase, o enquadramento do setor e a descrição do projeto naturFAB. Segue-se a caracterização das atividades desenvolvidas, nomeadamente os ensaios laboratoriais de extração química e mecânica e os testes de tração realizados para avaliar as propriedades físicas e estruturais das fibras estudadas.

Os resultados obtidos evidenciam o potencial das fibras naturais como alternativa sustentável aos reforços sintéticos, contribuindo para a valorização dos recursos endógenos e para o fortalecimento da economia circular.

Em síntese, esta investigação procura responder às atuais exigências da indústria, aliando tecnologia, ambiente e inovação. O trabalho reforça a relevância das fibras naturais como uma solução viável e promissora para uma manufatura mais sustentável e responsável, alinhada com os princípios da economia circular e da transição ecológica.

Importa ainda salientar que o desenvolvimento deste trabalho implicou a execução de um conjunto alargado de atividades experimentais, envolvendo a preparação e tratamento das matérias-primas, a aplicação de diferentes processos químicos e mecânicos de extração de fibras naturais, bem como a realização de ensaios laboratoriais para a sua caracterização física e mecânica. Estes trabalhos exigiram a definição e implementação de metodologias experimentais, o manuseamento de equipamentos laboratoriais específicos, a recolha e análise crítica de dados e a interpretação dos resultados obtidos, contribuindo de forma direta para a avaliação do potencial das fibras naturais estudadas e para a consolidação dos objetivos propostos no âmbito do projeto.

## **1.1. Apresentação do Projeto**

Este capítulo começa por apresentar o enquadramento do projeto naturFAB, seguindo-se uma breve descrição do FabLab IPB, da sua área de intervenção e dos objetivos que orientam a sua atividade.

### **1.1.1. Projeto NaturFab**

O projeto NaturFAB é uma iniciativa de cooperação transfronteiriça entre Portugal e Espanha que visa promover a inovação sustentável através da valorização dos recursos naturais e do desenvolvimento de novos materiais e processos produtivos baseados na economia circular. Este projeto enquadra-se nas estratégias de especialização inteligente das regiões participantes, respondendo a prioridades partilhadas no que se refere à transição industrial, à promoção da economia circular e à valorização da inovação como motor de desenvolvimento económico local e de mitigação do despovoamento [1]. No âmbito desta iniciativa, serão desenvolvidos, testados e demonstrados diferentes produtos e processos de carácter inovador e circular, recorrendo aos recursos endógenos de cada território envolvido. Paralelamente, será implementada uma estratégia proativa de transferência de conhecimento e tecnologia para o tecido empresarial da região transfronteiriça, incentivando, igualmente, a criação de novas iniciativas empresariais. Para tal, recorrer-se-á à rede de FabLabs existente no espaço de cooperação, a qual desempenhará um papel central na incubação e dinamização de novos projetos. Adicionalmente, está prevista a realização de ações orientadas para a transferência dos resultados alcançados para o domínio das políticas públicas, com o objetivo de assegurar a continuidade e ampliação do impacto do projeto para além do seu período de execução e do território diretamente abrangido.

A parceria responsável pela implementação do projeto é composta por oito entidades, figura 1, com competências distintas e complementares: a Universidade de Salamanca, a Universidade de Leão, a Câmara de Comércio, Indústria e Serviços de Zamora, o Instituto Politécnico de Bragança, o NERBA Associação Empresarial do Distrito de Bragança, o Brigantia Ecopark Associação para o Desenvolvimento do Brigantia Ecopark, a Diputación Provincial de Ávila e a Fundação Universidades y Enseñanzas Superiores de Castilla y León (FUDESCYL). Estas instituições integram três universidades de referência, duas autoridades públicas e três entidades de apoio empresarial, reunindo experiência científica, técnica e de gestão de projetos de cooperação, bem como um forte enfoque na promoção da competitividade e da transferência de inovação. Ao consórcio de beneficiários diretos junta-se ainda a colaboração de cinco entidades, entre empresas e organismos públicos, cuja participação prática é considerada essencial para o desenvolvimento e validação das atividades propostas.

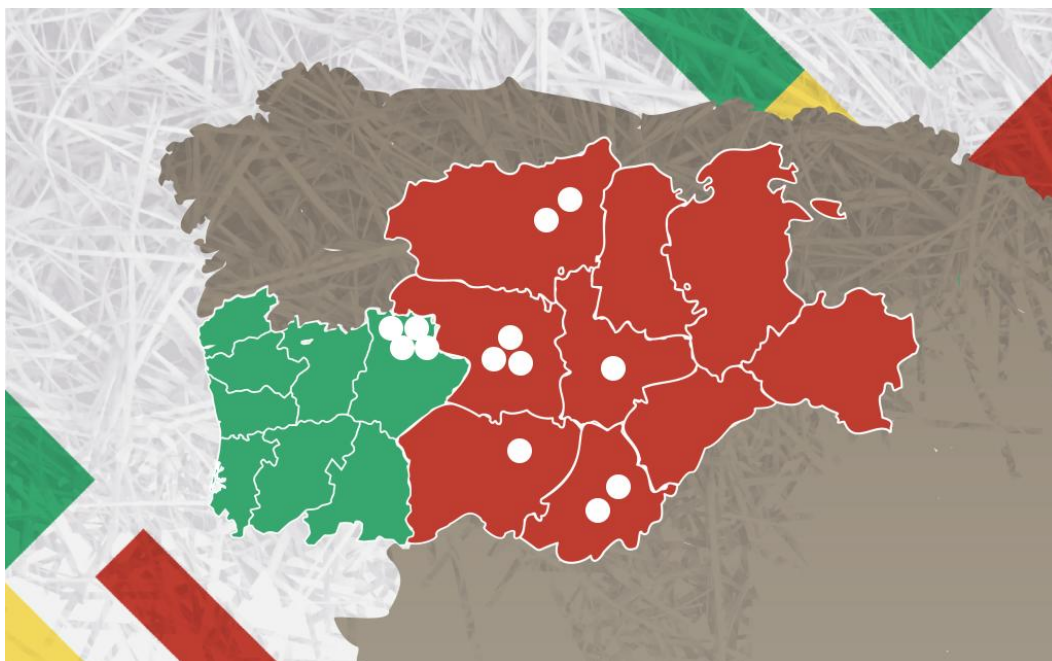


Figure 1 – Distribuição dos parceiros do projeto naturFAB [1].

### 1.1.2. Principais Objetivos

Em linha com os objetivos apresentados na secção anterior, o projeto naturFAB tem como propósito reforçar a cooperação entre os ecossistemas de investigação, inovação e o setor empresarial das regiões de Castela e Leão e do Norte de Portugal. Pretende-se criar condições para uma colaboração mais próxima e eficaz entre os diferentes agentes económicos, científicos e institucionais, promovendo o desenvolvimento regional e a coesão territorial [1].

No âmbito deste projeto, procede-se à identificação e valorização de recursos endógenos com potencial para serem integrados em sistemas de produção baseados na economia circular, recorrendo a tecnologias de fabrico aditivo. Esses recursos são analisados quanto à sua aplicabilidade e capacidade de resposta às necessidades do tecido produtivo local.

O naturFAB promove também a criação de mecanismos de inovação colaborativa entre o meio académico e o mercado empresarial, com o objetivo de identificar desafios concretos e desenvolver soluções ajustadas, apoiadas em tecnologias sustentáveis e eficientes.

Entre as ações previstas, destacam-se os testes-piloto dedicados à caracterização das propriedades mecânicas, térmicas, reológicas e de qualidade superficial dos novos materiais obtidos a partir dos recursos locais. Estes ensaios permitem validar as soluções desenvolvidas e avaliar a sua adequação às exigências da indústria.

Após essa fase, o projeto prevê a sistematização do processo produtivo e a preparação de estratégias que facilitem a sua futura escalabilidade e aplicação industrial. Com esta abordagem, pretende-se incentivar a adoção de tecnologias mais modernas e sustentáveis por parte das empresas, apoiando a transição para modelos produtivos ambientalmente responsáveis.

Paralelamente, o naturFAB procura reforçar o posicionamento da região no espaço europeu, através da integração em redes e estruturas de inovação, consolidando a zona de cooperação como um pólo de referência em desenvolvimento sustentável e especialização inteligente.

Por fim, será implementada uma estratégia de comunicação orientada para a divulgação das atividades e resultados do projeto, de modo a garantir a sua visibilidade junto das comunidades científica, empresarial e institucional.

Todas estas ações estão alinhadas com os objetivos do Programa Europeu INTERREG Espanha–Portugal (POCTEP 2021–2027), uma iniciativa da União Europeia que apoia projetos de cooperação entre regiões fronteiriças dos dois países, promovendo a inovação, a sustentabilidade e o desenvolvimento económico conjunto.

### **1.1.3. Laboratório FabLab IPB**

O FabLabIPB, cujo logotipo se apresenta na figura 2, é um laboratório do Instituto Politécnico de Bragança (IPB), constituído por um grupo de docentes, estudantes e diplomados da Escola Superior de Tecnologia e Gestão. O FabLab IPB está integrado na FabLab Foundation, uma das mais reconhecidas plataformas de promoção da fabricação digital a nível mundial [2].



*Figure 2 - Logótipo FabLab IPB [3].*

A atividade do FabLabIPB teve início em 2014, com a introdução de equipamentos de fabrico digital como impressoras 3D, plotters de corte e máquinas de gravação a laser, inicialmente aplicados em projetos das áreas de engenharia biomédica, mecânica e eletrotécnica. Posteriormente, o laboratório alargou a sua intervenção a outros domínios, como arquitetura, design e artes, fomentando a interdisciplinaridade e o cruzamento de saberes e práticas.

Desde 6 de março de 2016, o FabLabIPB é oficialmente reconhecido pelo Center for Bits and Atoms do Massachusetts Institute of Technology (MIT), através da Fab Foundation. Esta rede internacional funciona como uma plataforma distribuída de ensino e investigação aplicada, onde cada FabLab atua como uma unidade educativa e laboratorial, fazendo do planeta um verdadeiro campus global de aprendizagem colaborativa e contínua. Neste contexto, os estudantes, docentes e investigadores exploram os princípios e as potencialidades das tecnologias de fabricação digital, promovendo a inovação, a experimentação e a prototipagem rápida.

A missão do FabLabIPB assenta na democratização do acesso a ferramentas e tecnologias de fabrico digital, bem como na disseminação de conhecimento técnico e científico, permitindo a qualquer pessoa conceber e construir (quase) tudo. O objetivo passa por criar oportunidades de desenvolvimento pessoal, social e económico, através da inovação tecnológica, contribuindo para a melhoria das condições de vida e para a criação de novas soluções ajustadas às necessidades das comunidades locais e globais.

Para além do apoio a programas académicos e projetos de investigação aplicada, o FabLabIPB destaca-se pelo fabrico de protótipos de diferentes escalas e níveis de complexidade, abrangendo áreas tão diversas como a mecânica, a eletrónica, a biomédica, as artes visuais, a arquitetura e o design. Assim, o laboratório funciona como um espaço de aprendizagem prática, de experimentação tecnológica e de apoio ao empreendedorismo, promovendo uma cultura de inovação aberta e colaborativa.

## 1.2. Enquadramento

Atualmente, a indústria atravessa um período de grande transformação, impulsionado pela transição para a chamada Indústria 4.0, caracterizada pela digitalização dos processos produtivos, pela automação avançada e pela integração de tecnologias emergentes, como a impressão 3D, a inteligência artificial e a Internet das Coisas (IoT). Este novo paradigma industrial tem vindo a alterar de forma significativa a forma como os produtos são concebidos, fabricados e disponibilizados ao mercado, exigindo das empresas uma permanente capacidade de adaptação, inovação e melhoria contínua.

Em paralelo, a crescente preocupação com as questões ambientais e as exigências associadas à sustentabilidade e à economia circular impuseram novos desafios às cadeias de valor industriais, incentivando a adoção de materiais ecológicos, renováveis e com menor impacto ambiental. Neste contexto, as fibras naturais assumem um papel de particular relevância enquanto alternativa viável aos materiais de origem sintética, pelas suas características ecológicas, biodegradabilidade e disponibilidade em diversas regiões.

A impressão 3D, ou fabrico aditivo, tem-se destacado como uma das tecnologias centrais da Indústria 4.0, proporcionando vantagens consideráveis ao nível da personalização de produtos, da otimização de recursos e da minimização de desperdícios. Contudo, verifica-se que a grande maioria dos filamentos comercialmente disponíveis para impressão 3D continua a ser produzida a partir de polímeros derivados de recursos fósseis, o que condiciona o potencial sustentável desta tecnologia.

É neste enquadramento que se insere o presente projeto, cujo objetivo consiste na extração de fibras naturais e as suas propriedades mecânicas através de ensaios de tração, desenvolvendo assim um processo inovador de transformação de fibras naturais, nomeadamente cânhamo, linho e castanha em filamentos compatíveis com impressão 3D. Pretende-se, deste modo, contribuir para a diversificação da oferta de materiais ecológicos aplicáveis ao fabrico aditivo, explorando as potencialidades de recursos naturais endógenos e ambientalmente responsáveis.

Este projeto responde não apenas às exigências atuais da Indústria 4.0 no domínio da inovação tecnológica e da adaptação dos processos produtivos, como também às prioridades das agendas ambientais e de desenvolvimento sustentável, ao promover soluções técnicas baseadas em matérias-primas renováveis. Ao integrar fases como a caracterização das fibras, a seleção de polímeros compatíveis, o desenvolvimento do processo de extrusão e a validação dos filamentos obtidos através de ensaios práticos de impressão 3D, esta investigação propõe-se apresentar uma abordagem sólida, inovadora e passível de aplicação no contexto industrial.

Assim, a presente dissertação posiciona-se num domínio de significativa atualidade, articulando inovação tecnológica, sustentabilidade e valorização de recursos naturais, num sector industrial em permanente evolução.

### **1.3. Motivação**

Num contexto industrial cada vez mais competitivo e em permanente evolução, a capacidade de desenvolver e apresentar soluções tecnológicas diferenciadoras e ambientalmente responsáveis constitui um fator determinante para o posicionamento e a sustentabilidade das empresas no mercado. A crescente exigência dos consumidores, associada às políticas ambientais e de transição ecológica definidas a nível nacional, europeu e internacional, impõe ao sector produtivo a procura contínua de alternativas mais eficientes e sustentáveis.

Neste sentido, o investimento na inovação, na capacitação técnica e no desenvolvimento de novas tecnologias revela-se fundamental para garantir a competitividade e a modernização das organizações. A impressão 3D, enquanto tecnologia emergente no âmbito da Indústria 4.0, oferece oportunidades únicas para a otimização de processos, a redução de custos e a personalização de soluções, apresentando-se como uma área estratégica com elevado potencial de crescimento. Esta tecnologia ganha ainda maior relevância quando associada à utilização de materiais ecológicos e de origem natural, contribuindo ativamente para a implementação de práticas mais sustentáveis na indústria.

A motivação para a realização desta dissertação surge, assim, da vontade de contribuir para a diversificação da oferta de materiais sustentáveis aplicáveis à impressão 3D, explorando o potencial de fibras naturais, nomeadamente de cânhamo, linho e castanha. Pretende-se, com este trabalho, desenvolver um processo inovador de extração destas fibras, e testar mecanicamente através de ensaios de tração com objetivo de num futuro servirem para a obtenção de filamentos compatíveis com impressão 3D, promovendo simultaneamente a valorização de recursos naturais endógenos e a redução da dependência de polímeros de origem fóssil.

Para além de responder às atuais tendências do mercado e às exigências ambientais, esta investigação representa uma oportunidade para potenciar o desenvolvimento económico regional e nacional, criando oportunidades de negócio e reforçando a competitividade das empresas que operam neste sector. De igual forma, contribuirá para o alargamento do conhecimento científico e tecnológico nesta área, capacitando profissionais e organizações e posicionando-as estrategicamente num mercado cada vez mais exigente, dinâmico e globalizado.

## **1.4. Objetivos**

O principal objetivo desta dissertação consiste no desenvolvimento de um processo inovador que permita transformar fibras naturais, nomeadamente de cânhamo, linho e castanha, em filamentos compatíveis com tecnologias de impressão 3D. O processo proposto engloba várias etapas fundamentais, que se iniciam com a extração das fibras a partir das matérias-primas selecionadas e se prolongam até à realização de ensaios de tração destinados a avaliar as propriedades mecânicas dos materiais obtidos.

Procura-se que o sistema de trabalho desenvolvido apresente características que assegurem a sua aplicabilidade e fiabilidade. Assim, pretende-se que o método seja universal, permitindo a adaptação a diferentes tipos de fibras naturais e recorrendo, sempre que possível, a procedimentos e materiais normalizados. Paralelamente, é essencial garantir a consistência do processo, assegurando resultados reprodutíveis e uma qualidade estável no desempenho dos filamentos produzidos. Outro aspeto relevante é a intuitividade do método, de modo a torná-lo acessível e de fácil aplicação, reduzindo o tempo de desenvolvimento e os custos associados, sem comprometer a qualidade técnica.

O projeto inclui ainda a caracterização física, estrutural e mecânica das fibras estudadas, bem como a seleção criteriosa de polímeros compatíveis e o desenvolvimento de um método de mistura e extrusão eficiente. A validação experimental será realizada através de ensaios de tração, que permitirão avaliar o comportamento das fibras e a sua viabilidade de aplicação em contexto industrial. Por fim, será efetuada uma análise comparativa dos resultados obtidos para as três fibras selecionadas, identificando as respetivas vantagens e limitações, de forma a contribuir para o avanço do conhecimento no domínio dos materiais compósitos sustentáveis e da impressão 3D.

## **1.5. Estrutura do Relatório**

O presente relatório está organizado em cinco capítulos, cuja estrutura se descreve de seguida.

O Capítulo 1 apresenta o projeto naturFAB e o FabLab IPB, contextualizando o tema de investigação, a motivação do estudo e os principais objetivos definidos. Inclui ainda as contribuições do autor e a explicação da estrutura global do trabalho.

O Capítulo 2 corresponde à revisão bibliográfica, onde são abordados os fundamentos teóricos e os principais estudos de referência relacionados com fibras naturais, compósitos poliméricos e fabrico aditivo.

No Capítulo 3 é feita a caracterização dos materiais utilizados na extração das fibras naturais, estabelecendo a sua origem, propriedades mais relevantes e enquadramento no âmbito do estudo.

Os Capítulos 4 e 5 descrevem, respetivamente, os processos químicos e mecânicos aplicados às fibras e os ensaios de tração realizados após a extração, apresentando todas as etapas experimentais e a discussão dos resultados obtidos.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões gerais e propõe trabalhos futuros, com base nas observações e resultados alcançados.

## 2. Revisão da Literatura

O estudo sobre fibras naturais e materiais compósitos reforçados com estas fibras é um tema recorrente na seção de Compósitos, Fibras e Polímeros. A motivação para o uso desses materiais é sustentada por vários fatores, que incluem: serem materiais ecológicos, de baixo custo e peso, terem benefícios sociais e boas propriedades mecânicas.

O primeiro argumento, "materiais ecológicos", baseia-se em diversos fatores, como a biodegradabilidade das fibras naturais, a sua origem em fontes renováveis e sua pegada de carbono reduzida [5] [6]. Esses compostos, quando feitos com matrizes naturais e reforçados com fibras naturais, podem ser completamente biodegradáveis [7] [8]. O argumento de baixo custo está relacionado à utilização de fibras de alto desempenho, que muitas vezes provêm de resíduos de outros processos [9] [10]. Em termos de peso, as fibras naturais, como as de linho ou cânhamo, apresentam densidades competitivas em comparação com fibras sintéticas como vidro, basalto ou carbono, tornando-as vantajosas em diversas aplicações [11].

Os benefícios sociais estão associados ao cultivo dessas fibras, muitas vezes em regiões economicamente desfavorecidas ou com ambientes degradados [12]. Nesses locais, o cultivo de fibras naturais pode gerar benefícios econômicos adicionais para as comunidades, além de promover a recuperação ambiental. Em algumas situações, as fibras naturais podem ser resíduos de culturas agrícolas, o que ainda justifica o uso dessas fibras, gerando um rendimento extra para os produtores.

Quanto às propriedades mecânicas, estas fibras têm demonstrado bom desempenho em características como resistência à tração, módulo de elasticidade e absorção de energia de impacto [5] [13]. Embora o termo "propriedades mecânicas" seja amplo, muitos estudos indicam que, quando usadas como reforço em compósitos de matrizes poliméricas, algumas combinações de fibra e resina podem apresentar resultados semelhantes aos compostos com fibra de vidro. Em comparação com fibras sintéticas como carbono ou aramida, as fibras naturais possuem propriedades mecânicas competitivas, especialmente quando se considera o peso unitário [14].

Além dos argumentos mencionados, outros fatores também têm motivado a pesquisa e o desenvolvimento de materiais com fibras naturais, como sua capacidade de absorver contaminantes em fluidos, baixa abrasão e propriedades de isolamento térmico e acústico [15] [16] [17]. No entanto, esses materiais ainda apresentam algumas limitações, como a degradação de propriedades devido à humidade, variações de temperatura ou problemas na interface fibra e matriz. Muitos estudos têm focado em melhorar essas características [18].

O mercado de compósitos reforçados com fibras naturais está em expansão em diversas indústrias, como a automotiva, construção de interiores, materiais desportivos e de escritório. Espera-se que, no futuro, novas áreas de aplicação para esses materiais sejam descobertas, com destaque para a manufatura aditiva de compostos reforçados com fibras naturais [5] [19].

## 2.1. Materiais Compósitos

A diversidade de materiais atualmente disponíveis para a engenharia é extraordinária, permitindo o desenvolvimento de materiais altamente especializados para aplicações específicas. Os materiais compósitos surgem como elementos fundamentais dentro dos materiais de engenharia não tradicionais, sendo utilizados em diversas áreas como a indústria aeroespacial, construção civil e setor energético.

Historicamente, materiais compósitos já eram utilizados desde a Antiguidade. Há registos de fabrico e uso de materiais compósitos como o papiro, utilizado pelos egípcios por volta de 4000 a.C., e tijolos de argila reforçados com palha. No século XIX, o desenvolvimento do betão armado abriu caminho para novas inovações nesta área. No século XX, avanços significativos na ciência dos materiais permitiram a criação de fibras sintéticas como o carbono e o Kevlar, expandindo o uso dos compósitos [20] [21] [22].

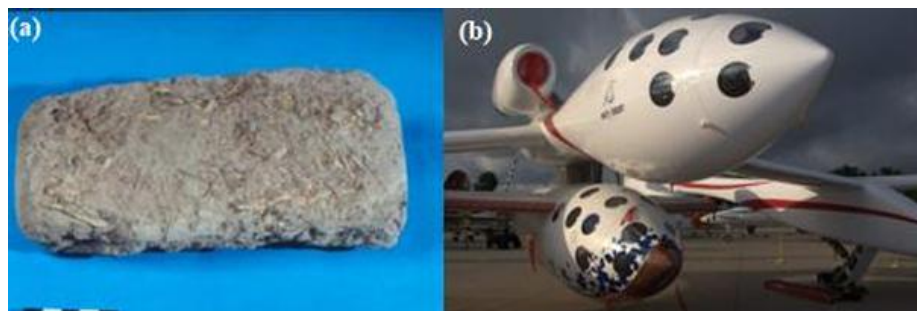


Figura 3 - (a) Tijolos com reforços de palha utilizados em períodos pré-históricos; (b) foguete de pesquisa de alta altitude desenvolvido pela Scales Composites [23].

Desde a década de 1960, a procura por materiais mais leves e resistentes tem aumentado em setores como energia, construção civil e aeroespacial. No caso da indústria aeroespacial, um exemplo notável é o uso avançado de compósitos no foguete de pesquisa SpaceShipOne, desenvolvido pela Scale Composites (Figura 3.b). Com isso, materiais monofásicos convencionais tornaram-se menos atraentes para aplicações de alto desempenho, levando ao ressurgimento da ideia de combinar diferentes materiais para obter propriedades melhoradas, conceito que define os compósitos [22]. A Figura 4 ilustra essa abordagem, comparando as propriedades de materiais convencionais, como aço e alumínio, com compósitos alternativos [24] [25].

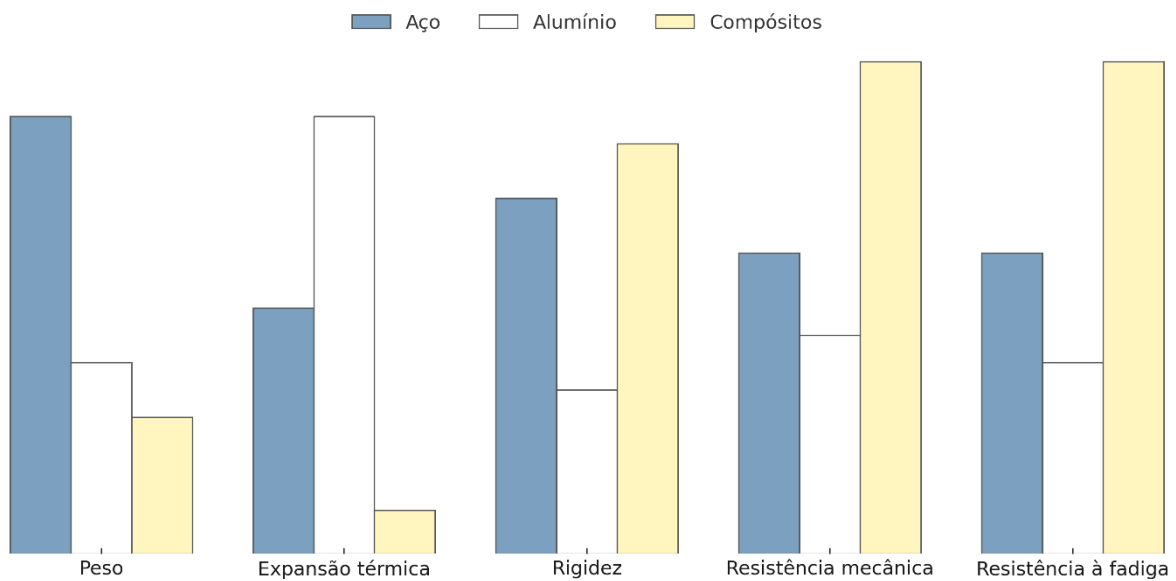


Figura 4 - Comparação ilustrativa entre materiais monolíticos convencionais e compósitos [25].

## 2.2. Fase de Matriz

Os materiais compósitos podem ser definidos como composições multifásicas formadas por uma matriz e um reforço, Figura 5 a matriz é o componente contínuo, cuja função é envolver e proteger o reforço, distribuindo as tensões mecânicas pelo material. O reforço, por sua vez, confere propriedades mecânicas superiores ao compósito, aumentando a sua resistência e rigidez [21] [26].

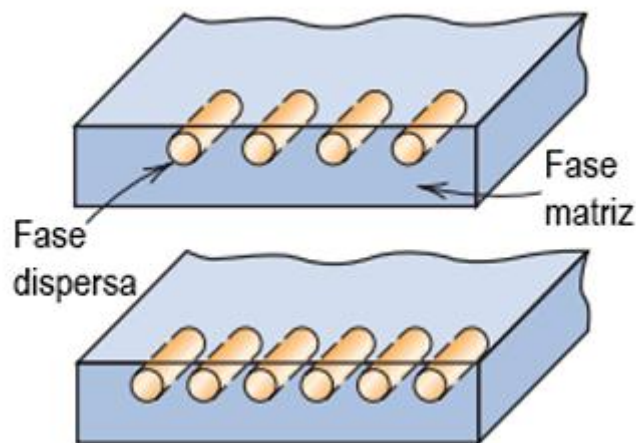


Figura 5 - Exemplo de esquema de fases em um compósito, adaptado de [26].

A matriz pode ser constituída de diversos materiais e tem como principal função unir as fases dispersas e transferir as cargas aplicadas entre elas. No entanto, essa fase também possui o papel de [27]:

- Manter as fibras na orientação e localização desejadas no caso de compósitos fibrosos;
- Proteger o reforço de um ambiente adverso e danos causados por temperatura, umidade, produtos químicos e degradação por abrasão;
- Transferir as forças de corte interlaminar;
- Melhorar as propriedades transversais do compósito;
- Melhorar a resistência ao impacto e à fratura do compósito.

Podemos classificar os compósitos em relação ao tipo de material da sua fase matriz. Dessa maneira, temos as seguintes classes: Compósitos com matriz metálica, que misturam cerâmica, carbonetos cimentados, fibras fortes e de alta rigidez e também outros metais a uma matriz metálica. Compósitos de matriz cerâmica, constituindo a categoria menos comum. Compósitos de matriz polimérica, as resinas termoendurecíveis são os polímeros mais utilizados nessa categoria. Epóxi e poliéster são comumente misturados com reforços de fibra. No caso de polímeros termoplásticos como matriz, utiliza-se em geral pós como fase dispersa [28].

## 2.3. Fase de Reforço

Os reforços são os principais responsáveis pelas propriedades mecânicas que os componentes em material compósito apresentam. A seleção das fibras de reforços a utilizar no compósito é principalmente condicionada pelo fim a que se destina o produto final e deve ter por base a densidade, propriedades mecânicas, compatibilidade com matriz, facilidade de processamento, intimamente ligado à permeabilidade, e custo que as fibras disponíveis no mercado apresentam [29].

Os reforços disponíveis apresentam-se normalmente sob a forma de fibras, que podem ser curtas, longas ou contínuas. As fibras de reforço conferem ao material compósito uma elevada resistência na sua direção longitudinal, o que do ponto de vista de projeto se torna interessante, na medida em que se podem variar as características mecânicas em direções diferentes do produto final e também se podem orientar longitudinalmente as fibras nas direções em que os compósitos terão de suportar maiores cargas em serviço.

Os compósitos podem ser classificados também de acordo com seu reforço, conforme pode ser visto na Figura 6 [26].

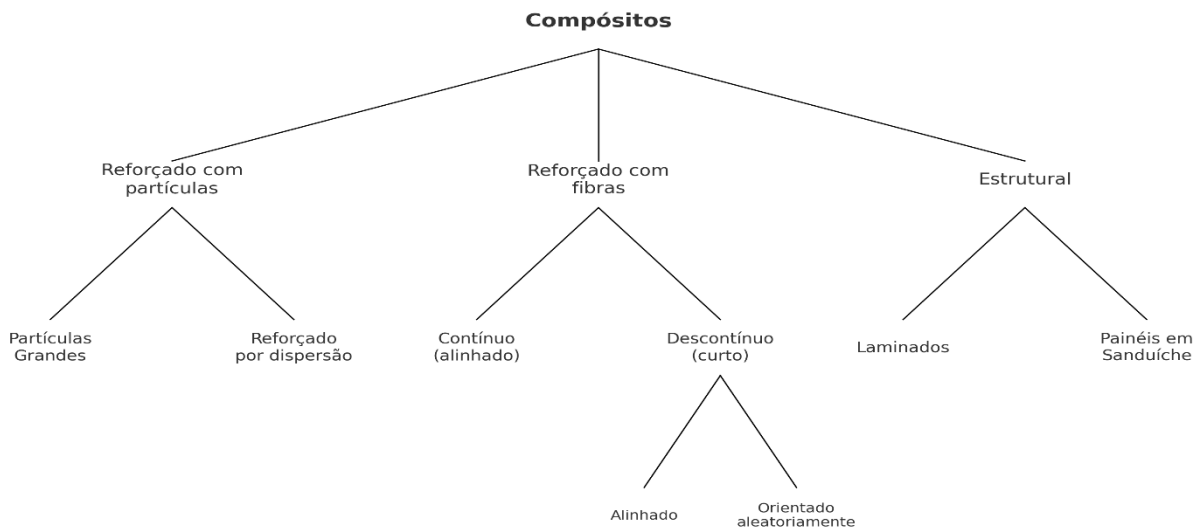


Figura 6 - Classificação dos compósitos segundo [26].

Essa classificação divide os compósitos em três principais classes: os reforçados com partículas, reforçados com fibras e os estruturais. Compósitos reforçados com partículas apresentam a fase dispersa com eixos iguais, ou seja, as dimensões das partículas são aproximadamente iguais em todas as direções. Aqueles reforçados com fibras possuem fase dispersa com geometria de fibra, tendo comprimento maior que o diâmetro. E por fim, a última classificação se dá aos compósitos estruturais, os quais são combinações de compósitos e materiais homogêneos [26].

## 2.4. Interface entre matriz e o reforço

A interface entre as fases constituintes (Figura 7.a) influencia diretamente nas propriedades finais do material, pois apesar dos materiais primários serem geralmente insolúveis entre si, é necessário que haja afinidade química entre matriz e reforço para que se mantenha a coesão e a distribuição das cargas entre as fases do compósito [30] [31].

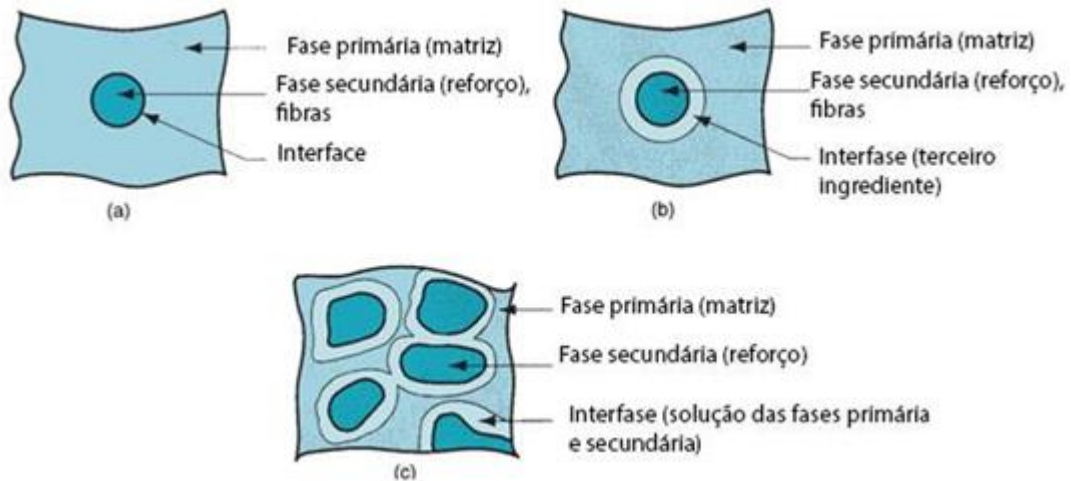


Figura 7 - Interfaces e interfases num material compósito: (a) ligação direta entre as fases primária e secundária; (b) adição de um terceiro ingrediente para ligar as fases primária e secundária e formar uma interfase; e (c) formação de uma interfase por uma nos seus limites, adaptado de [32].

Quando há a predominância dessa afinidade química na interface ocorre a formação de uma fase intermediária ou interfase que une a primeira e a segunda fase do compósito, como pode ser visto na Figura 7.b. Essa fase intermediária é consolidada pelas forças intermoleculares e energia livre de superfície, podendo ser encontrada por todo o material (Figura 7.c). A qualidade dessa interfase depende de alguns fatores como a humidade, a reação química, as tensões residuais, a morfologia da superfície e a rugosidade dos materiais [33].

Muitos exemplos na literatura vêm obtendo, com sucesso, o aprimoramento das propriedades dos compósitos por meio de tratamentos químicos nas fases, como é o caso do experimento realizado por onde compósitos de cânhamo e poliéster(UP) e cânhamo e ácido polilático (PLA) tiveram as suas fibras submetidas a diversos tratamentos, o que resultou em aumento da resistência ao corte interfacial (RCI) máxima de aproximadamente 100%, como pode ser visto na Figura 8. Isso resultaria numa melhor intertravamento mecânico entre fibra e matriz e conseqüentemente uma maior distribuição das tensões pelo material [34].

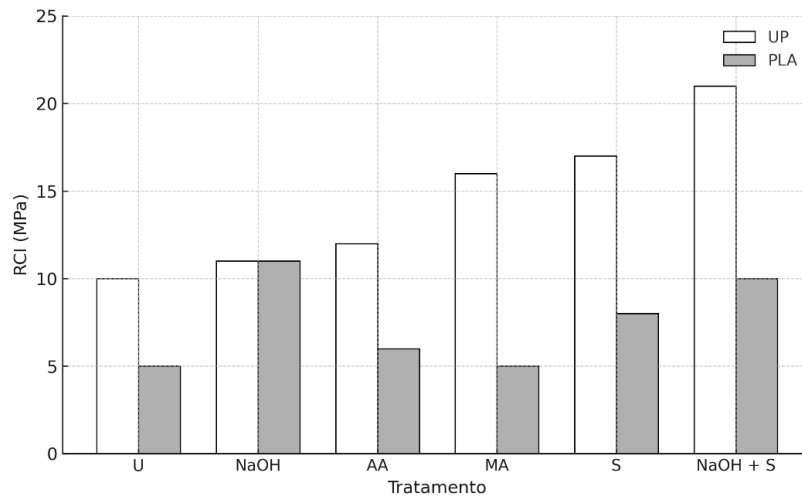


Figura 8 - Efeitos do tratamento a resistência ao corte interfacial (RCI) do compósito de cânhamo / PLA /UP [37]. U - não tratado, NaOH - 5% em peso de hidróxido de sódio, AA - anidrido acético (C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>O<sub>3</sub>), MA - 5% em peso de anidrido maleico, S - 0,5% em peso de silano, NaOH com S - 5% em peso de hidróxido de sódio com 0,5% em peso de silano, adaptado de [34].

## 2.5. Fibras Naturais

As fibras são classificadas de acordo com a origem (Figura 9), sendo utilizados diversos materiais para a sua confecção. No entanto, as mais utilizadas, segundo a literatura, são as fibras de vidro, de carbono e as naturais [35].

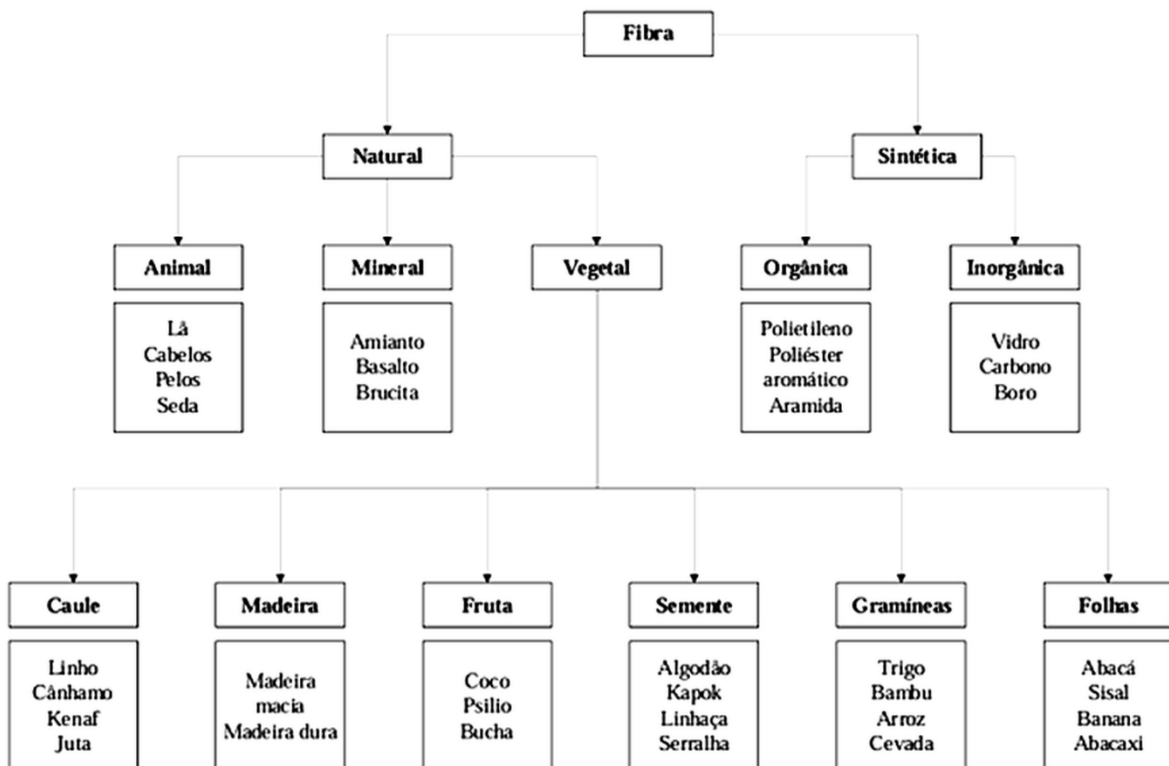


Figura 9 - Classificação das fibras, adaptado de [35].

As fibras naturais ou biofibras são subdivididas de acordo com a sua origem, podendo ser de plantas, animais ou minerais. Todas as fibras originadas de plantas são compostas principalmente por celulose (Figura 10), por isso o nome fibras lignocelulósicas, enquanto as de animais são formadas por proteínas (Ex.: lã, seda, cabelo).

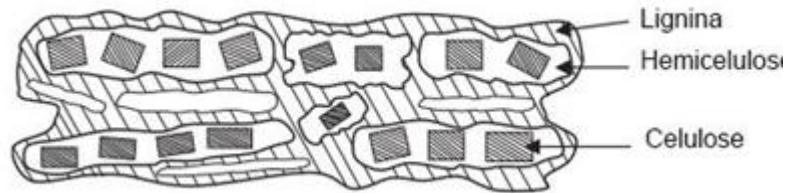


Figura 10 - Estrutura organizacional da parede celular de uma fibra lignocelulósica, adaptado de [36].

O foco deste trabalho será exclusivamente nas fibras vegetais, dessa forma, o uso do termo “fibras naturais” referir-se-á exclusivamente a fibras provenientes de vegetais. As fibras dos vegetais podem ser extraídas da entrecasca, do caule, das sementes, das folhas e dos frutos da planta [37].

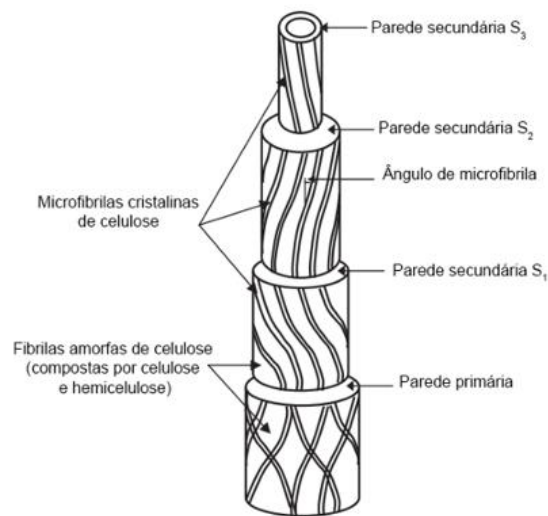


Figura 11 - Estrutura genérica das fibras naturais, adaptado de [36].

Esse tipo de fibra é caracterizado pela presença de fibrilas de celulose incorporadas em uma matriz de lignina. As fibrilas de celulose são alinhadas ao longo do comprimento da fibra (Figura 11), o que confere resistência máxima à tração e à flexão, além de proporcionar rigidez. A eficiência de reforço da fibra natural está relacionada à natureza da celulose e sua cristalinidade. Os principais componentes das fibras naturais são celulose, hemicelulose, lignina, pectinas e ceras.

A utilização das fibras naturais como reforço tem como vantagem o fato de serem abundantes, biodegradáveis e renováveis. Além disso, as fibras vegetais, em geral, são resistentes à corrosão, mais leves e baratas quando comparados com as de vidro, carbono e kevlar. Essas características têm atraído a atenção da indústria por ser possível atingir uma alta performance com um baixo custo.

A Tabela 1 mostra as principais vantagens e desvantagens da utilização das fibras naturais em relação às sintéticas.

*Tabela 1 - Vantagens e desvantagens dos compósitos naturais em relação aos sintéticos [38].*

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<i>Reciclável</i>	<i>Alta absorção de humidade</i>
<i>Baixa densidade</i>	<i>Instabilidade dimensional</i>
<i>Emissões negativas de CO<sub>2</sub></i>	<i>Inflamável</i>
<i>Melhores prioridades mecânicas comparadas com fibra de vidro</i>	<i>Menor força e resistência térmica comparada com fibras de vidro</i>
<i>Processamento não abrasivo</i>	<i>Comportamento anisotrópico</i>
<i>Menos energia para a produção quando comparado com fibra de vidro</i>	<i>Temperatura de processamento limitada quando comparada com fibras de vidro</i>

A características físicas, económicas e mecânicas das fibras naturais, de acordo com a literatura, têm grande potencial para substituir os sintéticos nos próximos anos. Um exemplo é o estudo realizado que comparou diversos dados de estudos com compósitos de fibras naturais e compósitos de fibras sintéticas [39]. O autor constatou que, em geral, as fibras naturais são relativamente mais baratas que as sintéticas (Figura 12). A fibra de vidro, a mais comum entre as sintéticas, mesmo sendo a mais barata da categoria, possui alta densidade em relação às fibras naturais (Figura 12), tornando-a pesada e limitando seu uso em certas aplicações.

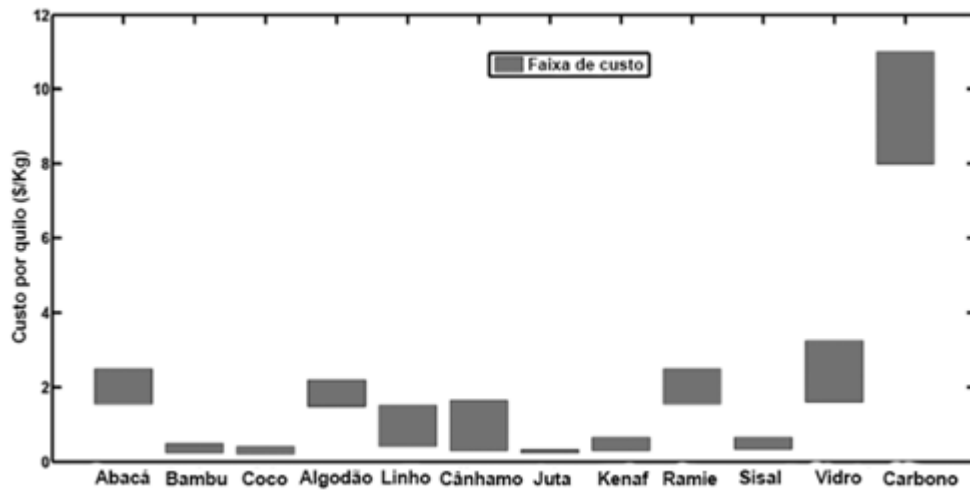


Figura 12 - Comparação de custo por peso entre compósitos naturais e sintéticos, adaptado de [39].

A relação entre custo, densidade, módulo de Young e resistência à tração de compósitos e fibras naturais e sintéticas foram comparadas e estão representadas na Figura 13, Figura 14, Figura 15 e Figura 16 [39].

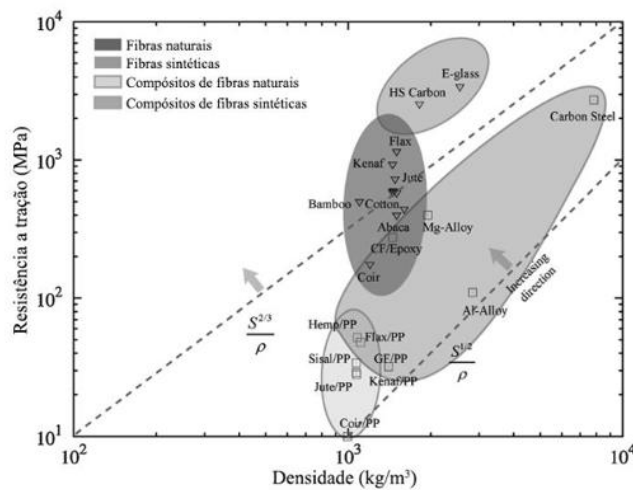


Figura 13 - Relação entre limite de resistência a tração e densidade de vários compósitos e suas respectivas fibras, adaptado de [39].

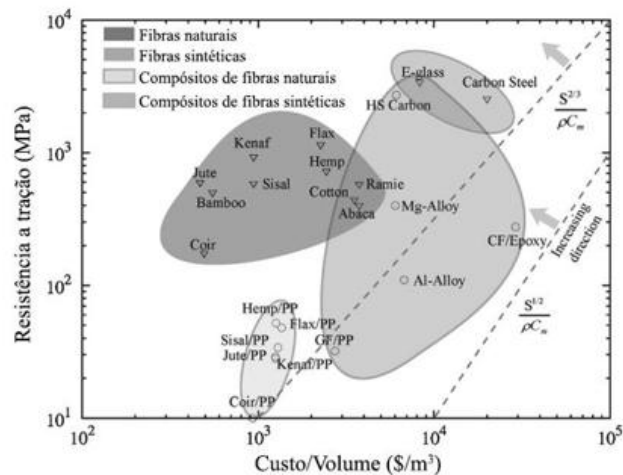


Figura 14 - Relação entre limite de resistência a tração e custo por volume de vários compósitos e suas respectivas fibras, adaptado de [39].

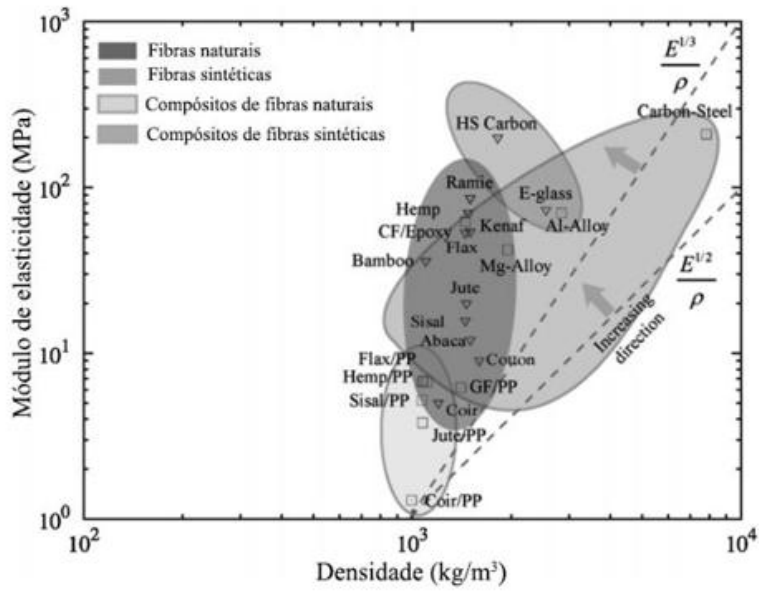


Figura 15 - Relação entre módulo de elasticidade e densidade de vários compósitos e suas respectivas fibras, adaptado de [39].

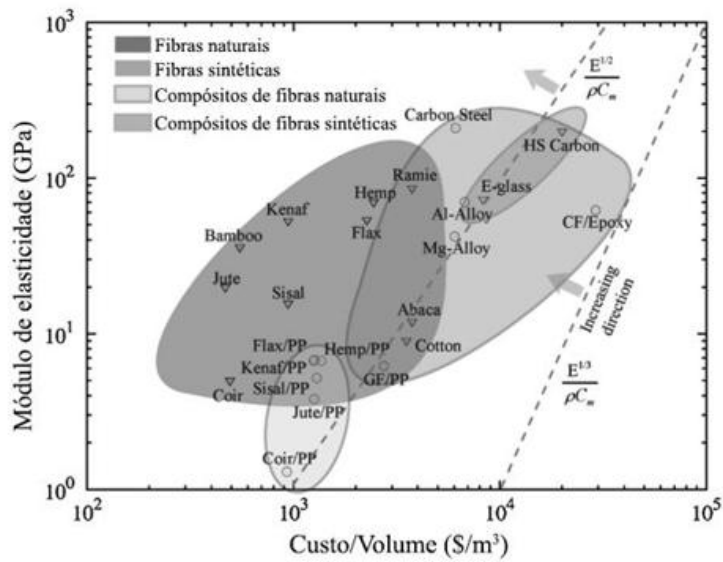


Figura 16 - Relação entre módulo de elasticidade e custo por volume de vários compósitos e suas respectivas fibras, adaptado de [39].

## 2.6. Fibras Naturais em Portugal

Portugal possui uma rica tradição no cultivo e utilização de fibras naturais, destacando-se o cânhamo, o linho e a castanha. Historicamente, estas fibras desempenharam um papel crucial no desenvolvimento económico e cultural do país, sendo integradas em diversas indústrias e práticas artesanais. Nos últimos anos, tem-se verificado um renovado interesse por estas fibras, impulsionado por preocupações ambientais e pela procura de materiais sustentáveis [40].

O cultivo de cânhamo em Portugal remonta ao século XIV, sendo utilizado principalmente na produção de cordas e velas para as embarcações durante a Era dos Descobrimentos. Após um período de declínio, o interesse por esta cultura tem ressurgido, especialmente devido às suas aplicações na indústria têxtil e ao seu potencial sustentável. Estudos recentes focam-se na extração e caracterização de fibras de cânhamo para uso têxtil, investigando métodos sustentáveis de pré-tratamento das plantas para otimizar a qualidade das fibras [40]. Adicionalmente, as propriedades mecânicas das fibras de cânhamo podem ser comparáveis às do linho, dependendo de fatores como condições de crescimento e técnicas de processamento.

O linho é uma planta herbácea pertencente à família Linaceae, cultivada em Portugal há séculos, especialmente nas regiões do Minho e Trás-os-Montes. As fibras de linho são obtidas a partir do caule da planta e são valorizadas pela sua resistência, durabilidade e capacidade de absorção, sendo amplamente utilizadas na produção de tecidos de alta qualidade. Estudos indicam que as fibras de linho possuem um diâmetro aproximado de 0,02 mm e representam cerca de 25% do peso do caule [41]. A produção de linho na Europa tem mostrado um crescimento significativo. Este aumento na produção reflete a crescente demanda por fibras naturais e sustentáveis na indústria têxtil [42].

Embora a castanha seja mais conhecida pelo seu valor nutricional, subprodutos do seu processamento, como cascas e ouriços, têm potencial para a produção de fibras. Projetos de investigação têm explorado o reaproveitamento destes resíduos para criar materiais, promovendo a sustentabilidade e a inovação na utilização de recursos naturais [43].

Em suma, Portugal possui uma tradição diversificada e significativa no cultivo e utilização de diferentes tipos de fibras naturais, abrangendo desde aplicações têxteis tradicionais até inovações na indústria e na saúde pública.

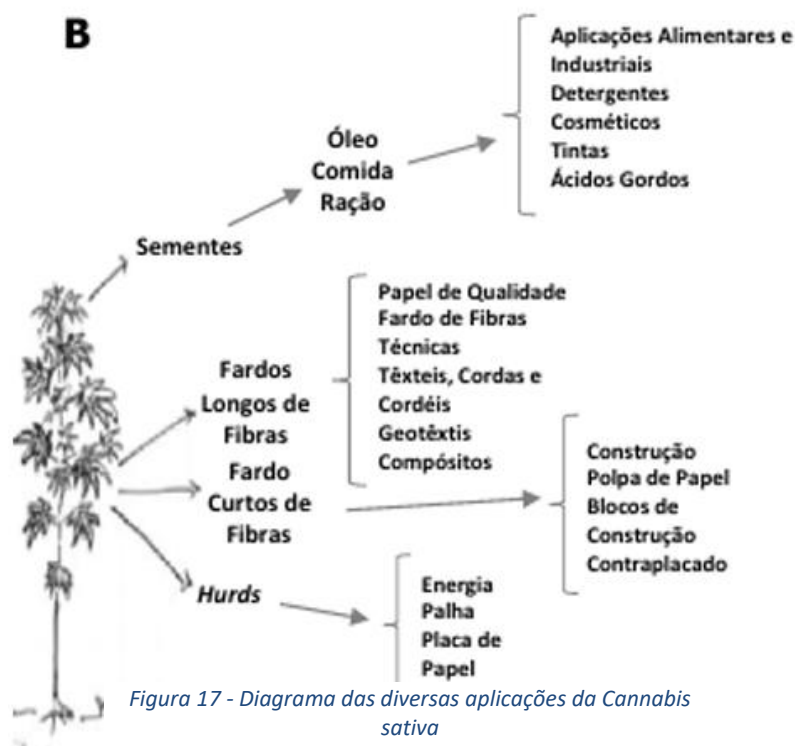
### 3. Metodologia

Neste capítulo descreve-se a metodologia adotada para o desenvolvimento do presente trabalho, abordando de forma sistemática as diferentes etapas envolvidas, desde a seleção da matéria-prima até à realização dos trabalhos experimentais.

#### 3.1. Matéria-prima

O cânhamo foi escolhido pelo seu reconhecido potencial fibroso, particularmente ao nível do caule, onde se concentram as fibras de interesse tecnológico. As plantas foram obtidas em pequenas parcelas de cultivo não comerciais na região de Bragança, sem aplicação de fertilizantes, pesticidas ou quaisquer produtos fitossanitários. Após a colheita, o material vegetal foi deixado a secar naturalmente, sob condições ambientais locais, durante várias semanas, evitando processos de cura ou beneficiamento industrial que pudessem alterar as propriedades originais da fibra. Antes da sua utilização, verificou-se a ausência de sinais de infestação por pragas ou contaminação microbiológica.

Para os ensaios laboratoriais, foram selecionados exclusivamente os caules, uma vez que é nesta zona que se encontram as fibras de maior interesse (Figura 17). As folhas e inflorescências foram removidas manualmente e os caules cortados em segmentos uniformes de aproximadamente 7 cm, de modo a facilitar a manipulação e a padronizar as amostras para os tratamentos posteriores. Cada segmento manteve a estrutura integral do caule, incluindo a casca exterior, com o intuito de preservar as características naturais do material até à fase de extração.



De forma complementar, foi utilizada casca de castanha, um subproduto agrícola abundante na região e geralmente desvalorizado. A sua inclusão teve como objetivo explorar o potencial de aproveitamento deste resíduo lignocelulósico, promovendo uma abordagem mais abrangente de valorização de recursos endógenos e sustentáveis.

As experiências laboratoriais foram realizadas com amostras sujeitas a diferentes períodos de exposição ambiental — entre 1 e 42 dias após a colheita — com vista a avaliar o efeito das condições atmosféricas no estado físico do material e na qualidade das fibras obtidas. Em alguns casos, fibras já tratadas foram novamente submetidas ao processo químico, permitindo estudar o impacto de sucessivos tratamentos na sua integridade e resistência.

## **3.2. Tratamentos Químicos**

A extração das fibras foi realizada por via química, com o objetivo de remover a fração lignocelulósica responsável pela coesão das fibras no caule e facilitar a sua individualização para posterior caracterização. O processo baseou-se na aplicação de uma solução alcalina (SA) composta por hidróxido de sódio (NaOH) e carbonato de sódio (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), ambos em concentração de 2 g/L, e 0,5 mL/L de detergente neutro, dissolvidos em água destilada.

A solução foi preparada num balão de fundo redondo com capacidade de 500 mL e homogeneizada por agitação manual até completa dissolução dos reagentes. De seguida, foi aquecida até atingir 80 °C, temperatura à qual se iniciou a imersão das amostras. O tempo de exposição variou conforme o grupo experimental, permitindo estudar a influência da duração do tratamento na eficiência da separação das fibras.

Após o período definido, as amostras foram cuidadosamente removidas da solução, lavadas abundantemente com água destilada para eliminar resíduos químicos e deixadas a secar à temperatura ambiente, em local ventilado e protegido da luz direta. Este procedimento visou preservar as propriedades físicas e estruturais das fibras, assegurando a sua integridade para as análises microscópicas e ensaios de tração realizados posteriormente.

### 3.3. Trabalho Experimental

Agora são apresentados os procedimentos adotados para a extração química e a caracterização mecânica das fibras utilizadas no presente projeto. Numa primeira fase, descrevem-se de forma pormenorizada as diferentes metodologias de extração aplicadas, quer às fibras de cânhamo, quer às provenientes das castanhas. Seguidamente, é efetuado um breve enquadramento das técnicas utilizadas na caracterização mecânica das fibras extraídas.

#### 3.3.1 Extração Química

##### 3.3.1.1 Experiência 1 de Cânhamo

No dia 30 de outubro de 2024, foi conduzida a primeira etapa experimental em laboratório com fibras de cânhamo com um dia de colheita (Figura 18). O objetivo principal deste ensaio foi avaliar o comportamento do material sob um processo de tratamento químico, visando a remoção de impurezas superficiais e internas, bem como à melhoria das propriedades das fibras para futuras aplicações tecnológicas.



*Figura 18 - Fibras de Cânhamo com um Dia de Colheita.*

Após a preparação da solução, as fibras foram introduzidas num balão de vidro, o qual foi colocado em uma tina de vidro posicionada sobre uma placa de aquecimento (Figura 19), em circuito aberto. O processo de aquecimento durou, aproximadamente, 95 minutos, com incremento gradual de temperatura até alcançar 80°C, onde se observou o início da ebulição da solução. Esta temperatura foi mantida durante 30 minutos, de modo a assegurar a eficácia da ação dos reagentes sobre a estrutura das fibras.



*Figura 19 - Tina de Vidro Posicionada sobre a Placa de Aquecimento.*

Concluído o tratamento, as fibras foram removidas da solução e submetidas a um processo de secagem em ambiente controlado por um período de 24 horas (Figura 20). Esta etapa teve como finalidade a eliminação da humidade residual, preparando as amostras para análises físico-químicas subsequentes.

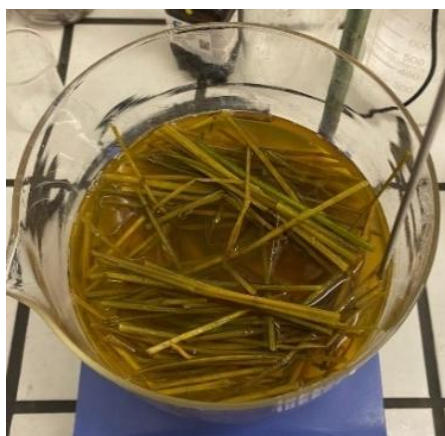


*Figura 20 - Fibras Removidas da Solução.*

### 3.3.1.2 Experiência 2 de Cânhamo

Em 6 de novembro de 2024, com o cânhamo colhido oito dias antes, foi realizada a segunda experiência laboratorial com o objetivo de avaliar o seu comportamento químico e otimizar as propriedades das fibras para aplicações futuras. Para o tratamento, foi preparada uma solução. A solução foi colocada num balão de 500 mL e aquecida, aproximadamente, 60 minutos, com incremento gradual de temperatura até alcançar 80°C, onde se observou o início da ebulição da solução. Esta temperatura foi mantida por 1 hora e 30 minutos, com o processo encerrado às 12h05 (Figura 21).

Após o tratamento, as fibras foram lavadas com água destilada quente para remover resíduos da



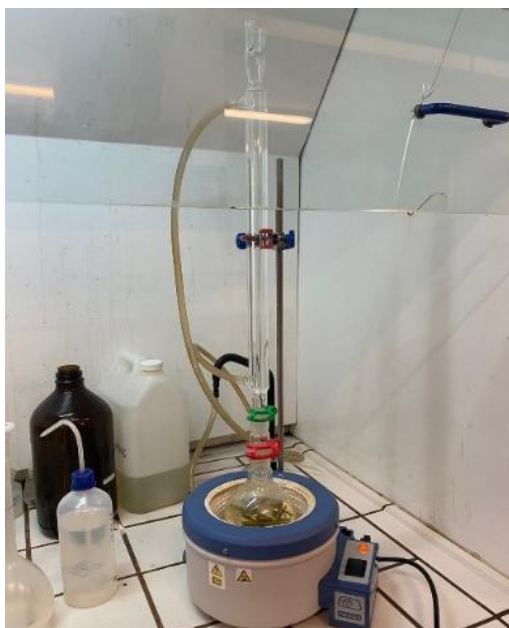
*Figura 21 - Fibras de Cânhamo na Solução Aquecida a 80°C.*

solução química e, em seguida, deixadas a secar por 24 horas em ambiente controlado. Esta etapa final visou eliminar a humidade residual, preparando as amostras para análises posteriores.

### 3.3.1.3 Experiência 3 de Cânhamo

No dia 19 de novembro de 2024, realizou-se a terceira experiência laboratorial com fibras colhidas vinte e um dias antes da experiência, com o objetivo de promover a remoção de impurezas para otimização das propriedades do material. Nesta etapa, recorreu-se a um sistema em circuito fechado, utilizando a solução.

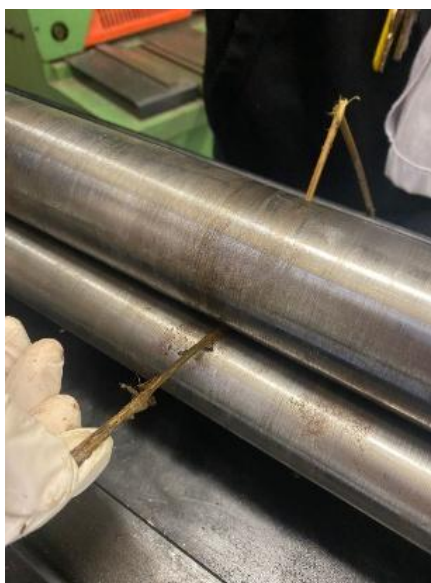
A solução foi colocada num balão de destilação de 500 mL (marca Schott), acoplado a um condensador de 40 cm e aquecido numa manta térmica (Figura 22). O ponto de ebulição foi atingido, aproximadamente, 7 minutos depois, sendo adicionados inibidores de ebulição para evitar turbulência excessiva. O tratamento foi mantido por 1 hora sob temperatura constante. Em seguida, o sistema foi desligado e as fibras deixadas a arrefecer antes do prosseguimento das análises.



*Figura 22 -Fibras na Solução com Condensador e Manta Térmica.*

### **3.3.1.4 Experiência 4 de Cânhamo**

A quarta experiência laboratorial foi realizada em 26 de novembro de 2024, utilizando fibras de cânhamo com vinte e oito dias de colheita. Após permanecerem submersas em água destilada à temperatura ambiente por sete dias, as fibras foram submetidas a um processo mecânico utilizando uma calandra (Figura 23), com o objetivo de promover a compressão e o alongamento das fibras, melhorando sua estrutura para o tratamento químico subsequente.



*Figura 23 - Fibras Submetidas a Processo Mecânico.*

A etapa química foi realizada em sistema de circuito fechado, utilizando uma solução SA. A solução foi colocada num balão de destilação de 500 mL (marca Schott), acoplado a um condensador de 40 cm e aquecido em manta térmica, atingindo o ponto de ebulição, aproximadamente, 10 minutos depois. Inibidores de ebulição foram adicionados para controlar a intensidade da fervura. O processo foi mantido por 1 hora e 30 minutos, com posterior arrefecimento do sistema.

Após o tratamento, as fibras foram deixadas em água destilada, aproximadamente, 8 dias para eliminar resíduos da solução. Por fim, foram retiradas da água e deixadas a secar em ambiente controlado (Figura 24), ficando prontas para análises posteriores.



*Figura 24 - Fibras Retiradas da Água e Deixadas a Secar.*

### 3.3.1.5 Experiência 5 de Cânhamo

Nesta experiência, utilizei as fibras de cânhamo resultantes da experiência 4 e repetimos todo o processo químico desde o início. O cânhamo foi, portanto, submetido a um tratamento mecânico, seguido de dois tratamentos químicos, com o objetivo de avaliar o efeito cumulativo desses processos nas propriedades das fibras.

### 3.3.1.6 Experiência 6 de Cânhamo

A sexta experiência laboratorial foi realizada em 10 de dezembro de 2024, com o objetivo de avaliar o efeito do tratamento químico das fibras de cânhamo, com quarenta e dois dias após já terem sido colhidas, e promover a remoção de impurezas para otimização das suas propriedades. O ensaio foi conduzido em sistema de circuito fechado, utilizando a solução.

A solução foi colocada num balão de 500 mL (marca Schott), acoplado a um condensador de 40 cm e aquecido numa manta térmica (Figura 25). As fibras foram introduzidas no sistema às 10h05, e a solução atingiu o ponto de ebulição às 10h16. A temperatura foi mantida constante em 80 °C durante 1 hora e 30 minutos, com o processo sendo encerrado às 11h40. Em seguida, o sistema foi deixado em repouso até o arrefecimento completo das fibras à temperatura ambiente.



*Figura 25 - Fibras na Solução num Balão de 500ml e acoplado a um condensador de 40cm e aquecido numa Manta Térmica.*

### 3.3.1.7 Experiência 1 de Castanha

No dia 19 de março de 2025, foi realizada a primeira experiência laboratorial com cascas de castanha previamente submetidas a uma lavagem em água corrente, com o objetivo de avaliar o seu comportamento químico e remover impurezas superficiais e internas, otimizando as suas propriedades para futuras aplicações. O ensaio foi conduzido em sistema de circuito fechado, garantindo maior controle das condições experimentais.

Foi utilizada a solução SA, esta foi transferida para um balão de 500 mL (marca Schott), acoplado a um condensador de 40 cm e posicionado sobre uma manta de aquecimento. Inibidores de ebulição foram adicionados para controlar o processo. Foi feito o processo em circuito fechado (Figura 26).



*Figura 26 - Processo de Extração em Circuito Fechado.*

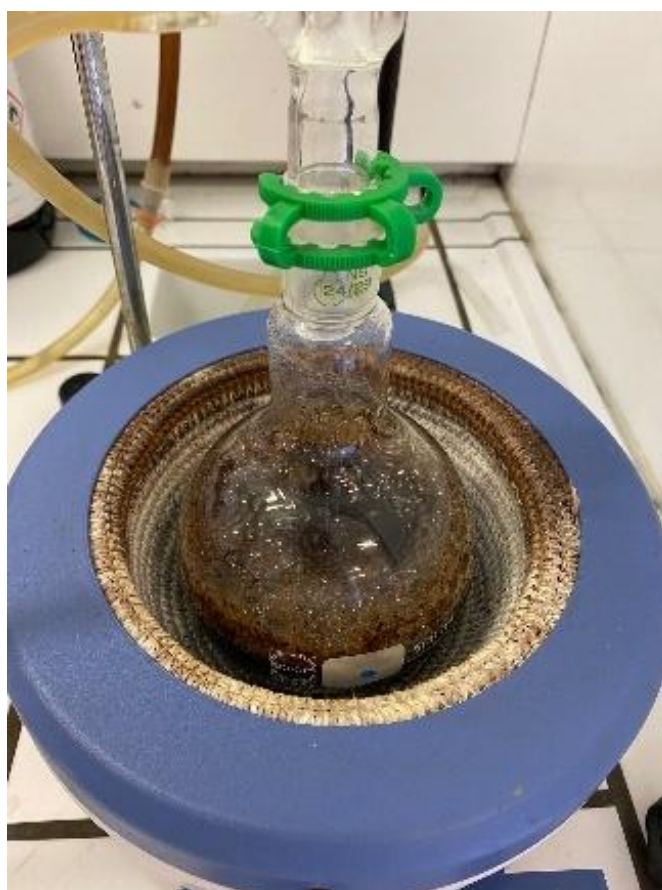
As fibras foram inseridas no sistema e a solução atingiu o ponto de ebulição, aproximadamente, 8 minutos depois. A temperatura foi mantida a 80 °C durante uma hora. Após o tratamento térmico, as cascas permaneceram no sistema até atingirem temperatura ambiente, completando o processo.

### 3.3.1.8 Experiência 2 de Castanha

No dia 9 de abril de 2025, foi realizada uma experiência laboratorial utilizando cascas de castanha em avançado estado de decomposição, com o objetivo de promover a remoção de impurezas visando à melhoria de suas propriedades para aplicações tecnológicas ou industriais.

A experiência foi conduzida em sistema de circuito fechado, utilizando a solução SA. Esta foi colocada num balão de vidro borossilicato de 500 mL (marca Schott), acoplado a um condensador de 40 cm e posicionado sobre uma manta de aquecimento. Inibidores de ebulição foram adicionados para garantir uma ebulição controlada.

Após lavagem prévia das cascas em água corrente, as amostras foram inseridas no sistema (Figura 27), e a solução atingiu o ponto de ebulição, aproximadamente, 10 minutos depois. O tratamento térmico foi mantido por 1 hora, após o qual o sistema foi deixado em repouso até o completo arrefecimento à temperatura ambiente, finalizando o processo.



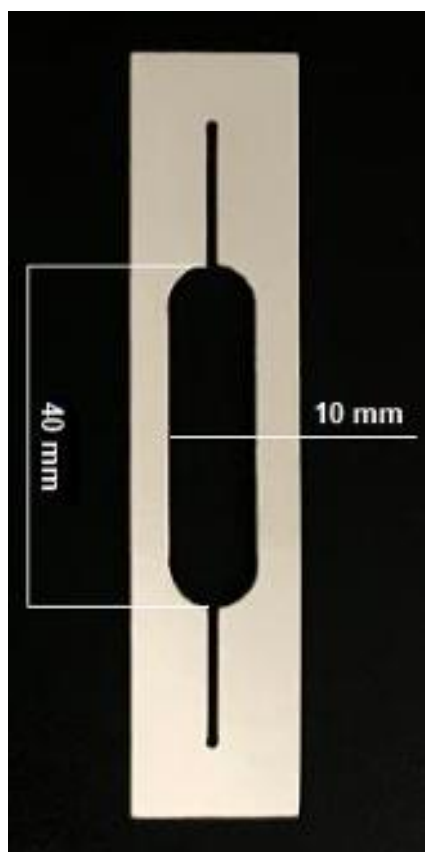
*Figura 27 - Cascas Dentro do Sistema depois da Lavagem Prévia das Cascas.*

### 3.4. Caracterização Mecânica

Os ensaios de tração uniaxial realizados nas fibras de cânhamo tiveram como referência a norma ASTM C1557 – 03 (Reaprovada em 2008), que descreve o procedimento para determinação da resistência à tração e do módulo de elasticidade (módulo de Young) de fibras individuais. Apesar da existência de versões mais recentes, optou-se pela utilização desta versão por ter sido a única disponível no momento da execução dos ensaios, continuando a garantir reconhecimento científico e validade técnica [44].

Os ensaios foram conduzidos numa máquina universal de tração Shimadzu AGS-X, equipada com célula de carga adequada à gama de forças aplicadas, assegurando assim elevada precisão e sensibilidade nas medições. A velocidade do travessão foi fixada em  $8 \times 10^{-6}$  m/s, conforme prescrito na norma, permitindo que a rutura das fibras ocorresse num intervalo de tempo inferior a 30 segundos.

Com o objetivo de garantir o correto alinhamento axial e minimizar danos mecânicos nas extremidades, as fibras foram previamente montadas em suportes específicos (Figura 28). O comprimento útil considerado foi de 7 cm, definido por conveniência e uniformidade dos ensaios.



*Figura 28 - Suporte de acordo com a ASTM C1557 [45].*

Durante a execução dos ensaios foram registadas em tempo real as curvas força–deslocamento, que possibilitaram a determinação da resistência máxima à tração — obtida pela razão entre a força máxima aplicada e a área da secção transversal da fibra na zona de fratura — e do módulo de Young, determinado a partir do declive da região linear da curva tensão–deformação.

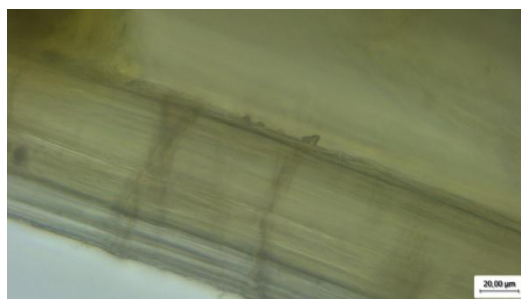
A caracterização da área da secção transversal das fibras foi realizada através de microscopia ótica com análise digital de imagem, garantindo resolução adequada e conformidade com as recomendações normativas. Apesar de não ter sido possível efetuar os ensaios em ambiente climatizado, procurou-se reduzir o impacto de variações ambientais, seleccionando dias com temperatura e humidade relativamente estáveis e realizando as medições em horários com menor flutuação térmica. Este procedimento, frequentemente adotado em estudos experimentais com recursos limitados, revelou-se satisfatório para os objetivos do presente trabalho.

## 4. Resultados

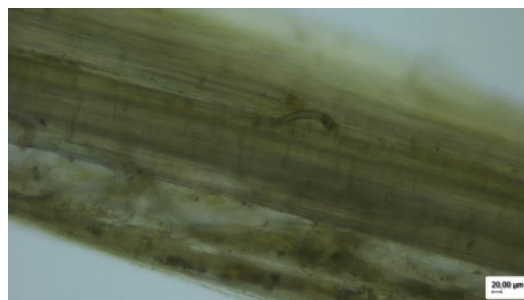
### 4.1 Fibras de Cânhamo

#### 4.1.1 Experiência 1

Este procedimento teve como principais objetivos remover componentes não celulósicos, nomeadamente lignina, hemicelulose e ceras superficiais, de modo a purificar as fibras e melhorar as suas propriedades de adesão e compatibilidade com matrizes poliméricas, em particular com o PLA. As imagens acima documentam as etapas do processo e ilustram o estado das fibras após o tratamento químico. A análise microscópica (Figuras 32 e 33) revelou, contudo, a presença residual de lignina, o que indica que a adesão entre fibra e matriz ainda seria insuficiente, comprometendo a fiabilidade estrutural do material compósito.



*Figura 29 - Experiência 1 de cânhamo ao microscópio.*

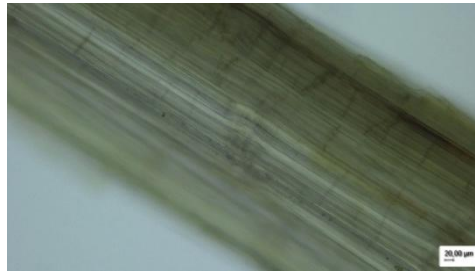


*Figura 30 - Experiência 1 de cânhamo ao microscópio.*

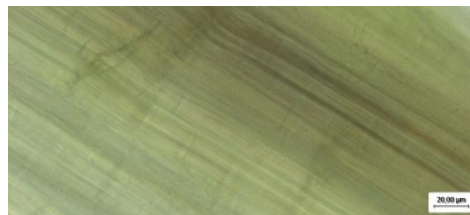
#### 4.1.2 Experiência 2

As imagens, apresentadas nas figuras 34 e 35, documentam as diferentes etapas do processo e mostram o estado das fibras após o tratamento químico.

A análise microscópica das imagens revelou que ainda persiste uma quantidade significativa de lignina nas fibras. Esta presença favorece a adesão ao PLA, uma vez que, ao remover-se a lignina, as fibras passam a dispersar-se melhor na matriz polimérica, o que pode resultar num compósito mais bem reforçado e com maior resistência. No entanto, os resultados obtidos foram inferiores aos da experiência anterior. Isso sugere que o processo não foi totalmente eficaz na remoção dessa substância. Como resultado, a aglomeração das fibras com PLA não seria viável, uma vez que a presença de lignina comprometeria a integridade e a confiabilidade do material final.



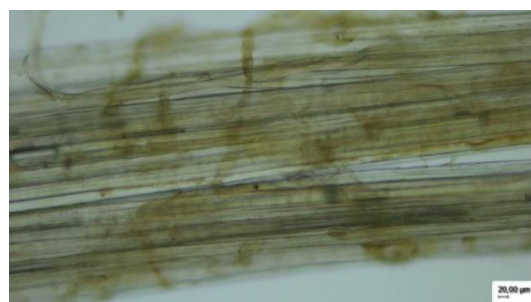
*Figura 31 - Experiência 2 de cânhamo ao microscópio.*



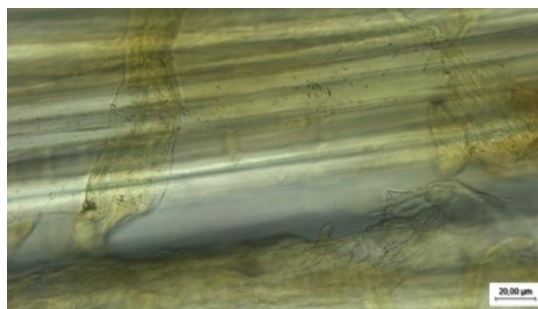
*Figura 32 - Experiência 2 de cânhamo ao microscópio.*

### **4.1.3 Experiência 3**

Após o tratamento em circuito fechado, observou-se que as fibras ficaram significativamente mais grossas do que o esperado. Este procedimento visou remover impurezas e melhorar as propriedades das fibras de cânhamo. Após a análise das imagens microscópicas, figuras 36 e 37, verifiquei que ainda existe uma quantidade de lignina nas fibras, porém melhor que nos procedimentos anteriores.



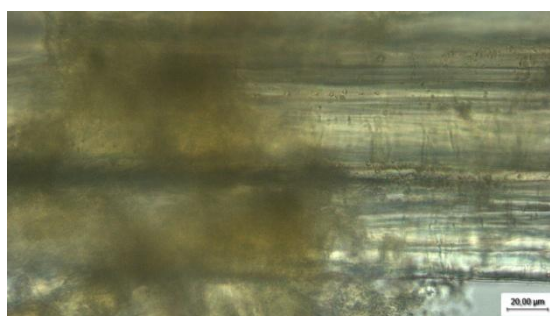
*Figura 33 - Experiência 3 de cânhamo ao microscópio.*



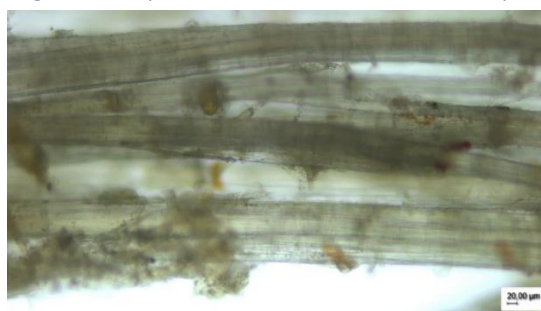
*Figura 34 - Experiência 3 de cânhamo ao microscópio.*

#### **4.1.4 Experiência 4**

Após o tratamento mecânico e depois químico em circuito fechado, observou-se que as fibras ficaram significativamente mais grossas do que o esperado e mais secas. Este procedimento visou remover impurezas e melhorar as propriedades das fibras de cânhamo. Após a análise das imagens microscópicas, figuras 38 e 39, verifiquei que ainda existe uma quantidade de lignina nas fibras, porém pior que o último procedimento em circuito fechado (experiência 3).



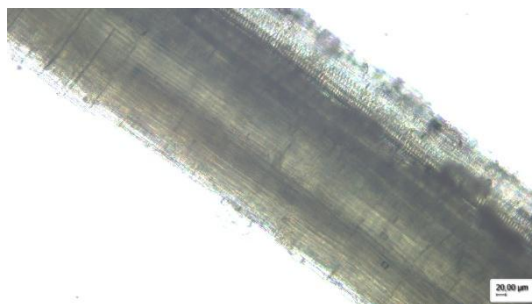
*Figura 35 - Experiência 4 de cânhamo ao microscópio.*



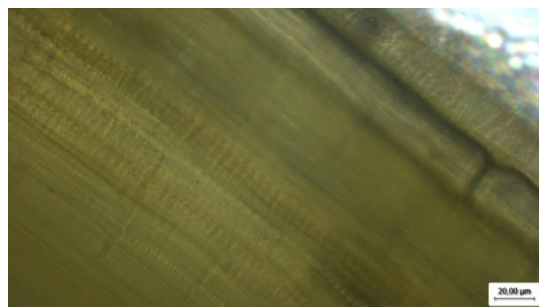
*Figura 36 - Experiência 4 de cânhamo ao microscópio.*

#### **4.1.5 Experiência 5**

Após a realização de todo o procedimento, observamos nas imagens microscópicas, figuras 40 e 41, que as fibras de cânhamo se tornaram mais frágeis, não apresentando uma melhoria significativa na remoção da lignina. As figuras seguintes ilustram esses resultados, mostrando a estrutura das fibras após o tratamento.



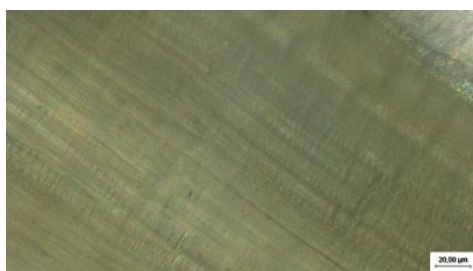
*Figura 37 - Experiência 5 de cânhamo ao microscópio.*



*Figura 38 - Experiência 5 de cânhamo ao microscópio.*

### **4.1.6 Experiência 6**

Após o tratamento em circuito fechado, observou-se que as fibras diminuíram bastante de tamanho. Este procedimento visou remover impurezas e melhorar as propriedades das fibras de cânhamo. Após a análise das imagens microscópicas, figuras 42 e 43, verifiquei que ainda existe uma quantidade de lignina nas fibras, porém não tao bom como as fibras da experiência 3.



*Figura 39 - Experiência 6 de cânhamo ao microscópio.*

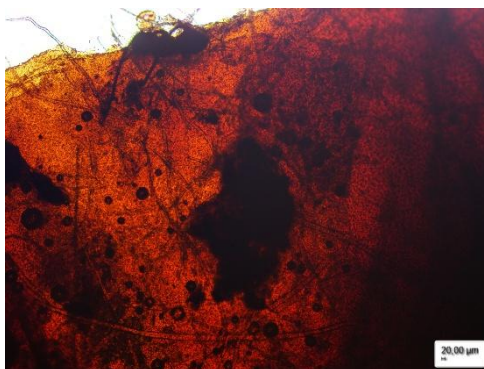


*Figura 40 - Experiência 6 de cânhamo ao microscópio.*

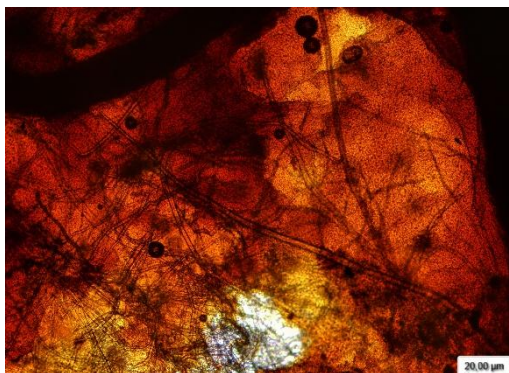
## 4.2 Fibras de Castanha

### 4.2.1 Experiência 1

A partir das imagens obtidas, figuras 44 e 45, foi possível observar que o processo realizado não foi completamente eficaz na separação da casca em relação às fibras. Visualmente, constatou-se que as cascas apresentaram significativa fragilidade estrutural como resultado do tratamento térmico e químico, no entanto, ainda permaneciam aderidas às fibras e com a presença de resíduos visíveis a olho nu. Esses resultados indicam que, apesar de alterações físicas observáveis, o método utilizado necessita de ajustes para uma remoção mais eficiente da casca.



*Figura 41 - Experiência 1 de castanha ao microscópio.*

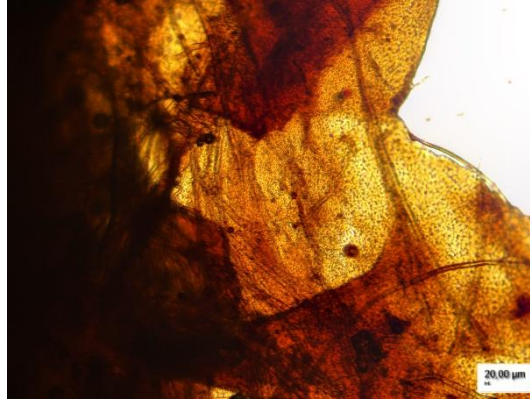


*Figura 42 - Experiência 1 de castanha ao microscópio.*

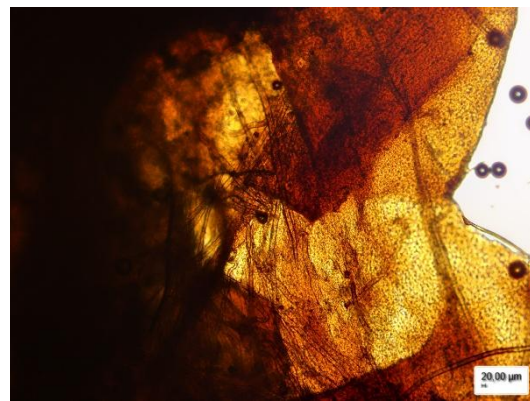
### 4.2.2 Experiência 2

A análise das imagens obtidas revelou que o procedimento adotado não foi totalmente eficaz na separação da casca em relação às fibras. Observou-se, a olho nu, que as cascas apresentavam fragilidade estrutural acentuada em decorrência do tratamento térmico e químico. No entanto, mesmo com essa degradação aparente, as cascas permaneciam parcialmente aderidas às fibras, e ainda se verificava a presença de resíduos sólidos em sua superfície.

Adicionalmente, nas amostras compostas por castanhas em estado avançado de decomposição, a remoção dos resíduos mostrou-se ainda menos eficiente e muito mais frágeis, figuras 46 e 47, o que indica que a degradação natural comprometeu a eficácia do processo aplicado. Esses resultados sugerem a necessidade de otimização dos parâmetros do tratamento para alcançar uma separação mais completa e limpa das fibras.



*Figura 43 - Experiência 2 de castanha ao microscópio.*



*Figura 44 - Experiência 2 de castanha ao microscópio.*

### **4.3 Fibras de Linho**

No caso do linho comercial utilizado neste estudo, não foi realizado qualquer tratamento químico ou processo experimental adicional. A única análise efetuada foi o ensaio de tração, com o objetivo de obter valores comparativos em relação às fibras testadas experimentalmente. Esta abordagem permitiu estabelecer uma referência para avaliação do desempenho mecânico das amostras tratadas.

## 4.4 Caracterização Mecânica

Foram realizados ensaios de tração em fibras de cânhamo utilizando uma máquina universal de ensaio Shimadzu, com o objetivo de avaliar o comportamento mecânico sob carga até à rutura. Testaram-se seis tipos de fibras quimicamente tratadas, com três repetições por amostra, de forma a garantir reprodutibilidade. Os resultados foram combinados em curvas tensão–deformação médias, das quais se determinaram o módulo elástico, a resistência máxima e o comportamento até à falha.

A análise dos dados apresentados na Tabela 2 confirma claramente a superioridade mecânica do cânhamo comercial em comparação com as fibras naturais processadas manualmente. A resistência máxima à tração é quase três vezes superior e a deformação na rutura é aproximadamente oito vezes maior, refletindo não apenas um aumento de resistência, mas também uma resposta estrutural mais estável e previsível.

O modo de falha observado na fibra comercial, caracterizado por uma rutura progressiva e pela manutenção parcial da integridade após a fratura, contrasta com a fratura abrupta das fibras naturais, evidenciando uma maior tenacidade e qualidade estrutural do material industrial.

Estes resultados sublinham o papel decisivo do processamento industrial — como o alinhamento das fibras, a eliminação de defeitos e a aplicação de tratamentos de compatibilização — no reforço das propriedades mecânicas dos materiais naturais. Assim, enquanto as fibras naturais apresentam limitações significativas para aplicações estruturais, o cânhamo comercial revela-se uma alternativa viável e eficiente em contextos que exigem desempenho mecânico consistente e fiável.

Tabela 2 - Comparação entre fibras naturais e cânhamo comercial.

<b>Parâmetros</b>	<b>Média Fibras Naturais (Ensaio de Tração)</b>	<b>Cânhamo Comercial (Ensaio de Tração)</b>
<i>Tensão máxima (<math>\sigma_{\max}</math>) [MPa]</i>	5-15 MPa	~ 35 MPa
<i>Deformação na rotura [%]</i>	0,15 – 0,25%	~2,1 %
<i>Tipo de falha</i>	Frágil, abrupta	Semi-dúctil, progressiva
<i>Fratura</i>	Múltiplas falhas locais	Clara, rotura centralizada
<i>Qualidade estrutural</i>	Irregular, com defeitos	Uniforme, industrial
<i>Comportamento pós-rotura</i>	Nulo	Com capacidade residual de suporte de carga
<i>Aplicabilidade</i>	Experimental, limitada	Industrial, elevada

A aplicação desta metodologia possibilitou a caracterização rigorosa do comportamento mecânico das fibras de cânhamo, fornecendo informação relevante para a sua utilização como reforço em compósitos de matriz polimérica. A Figura 29, 30 e 31 apresenta alguns dos provetes compósitos após os ensaios de tração, onde é possível observar claramente as zonas de fratura. Na maioria dos casos, a rotura ocorreu na região central da secção útil, o que indica falha intrínseca do material e não associada às zonas de fixação. Observou-se ainda que várias fibras romperam de forma abrupta e perpendicular ao eixo de tração, evidenciando comportamento frágil, característico de materiais naturais com baixa capacidade de deformação plástica, consultar Anexo A, B, C e D.

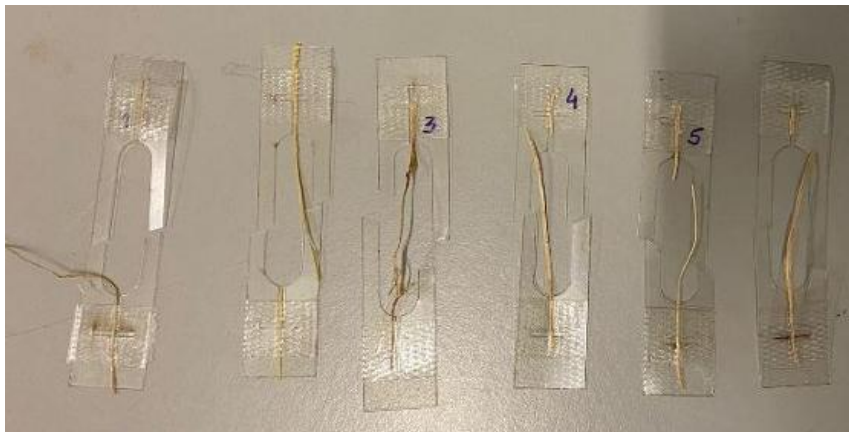


Figura 45 - Primeiro Ensaio de Tração.



Figura 46 - Segundo Ensaio de Tração.



Figura 47 - Terceiro Ensaio de Tração.

Em determinadas amostras, verificou-se o destacamento parcial das fibras da matriz, sugerindo falhas de adesão na interface fibra–matriz. Estes resultados estão em consonância com as curvas tensão–deformação obtidas, onde se registaram quebras súbitas de carga. Em alguns casos, as fibras permaneceram praticamente intactas após a rutura da matriz, o que reforça a hipótese de impregnação insuficiente ou deficiente ancoragem durante o fabrico. Foram igualmente identificados desalinhamentos após os ensaios, possivelmente relacionados com tensões residuais ou deformações acumuladas antes da fratura.

Estas observações qualitativas complementam os resultados quantitativos, contribuindo para a compreensão dos mecanismos de falha e evidenciando a necessidade de otimização do processo de fabrico, nomeadamente no que respeita à distribuição homogénea das fibras, à melhoria da impregnação da matriz e ao tratamento superficial das fibras, de modo a assegurar maior eficácia de adesão e melhor desempenho mecânico global.

## 5. Conclusão

O presente trabalho teve como principal objetivo avaliar a viabilidade técnica da utilização de fibras naturais, nomeadamente de cânhamo, linho e castanha, como reforço potencial em compósitos de matriz polimérica à base de PLA, com especial enfoque na sua aplicação sob a forma de filamentos destinados à impressão 3D. Esta investigação enquadra-se na atual procura por materiais sustentáveis e renováveis, respondendo à necessidade crescente de soluções com menor impacto ambiental no domínio dos compósitos e do fabrico aditivo.

Numa fase inicial, procedeu-se à recolha, preparação e tratamento das fibras, recorrendo a processos de trituração, secagem, desfibramento manual e tratamento químico, com o objetivo de melhorar a sua morfologia, pureza e uniformidade estrutural. Esta etapa revelou-se determinante, pois a elevada variabilidade estrutural das fibras — sobretudo nas de origem não comercial — influenciou diretamente a consistência dos resultados experimentais. As amostras de castanha e de linho apresentaram maiores dificuldades de extração e menor resistência, o que dificultou a sua caracterização mecânica, enquanto as fibras de cânhamo, particularmente as de colheita mais recente, demonstraram melhor comportamento estrutural e desempenho em tração.

A caracterização mecânica, realizada através de ensaios de tração uniaxial, evidenciou diferenças significativas nos valores de tensão máxima, deformação à rutura e tipo de fratura observada. A amostra com melhor desempenho atingiu uma resistência máxima de aproximadamente 14,5 MPa, apresentando uma resposta estável até à fratura, ao passo que outras demonstraram rutura súbita e baixa deformabilidade, associadas à degradação do material vegetal e à heterogeneidade entre feixes fibrosos.

A análise microscópica das zonas fraturadas revelou morfologias típicas de fibras vegetais, caracterizadas por fraturas transversais frágeis e desagregação parcial dos feixes, refletindo a fragilidade estrutural e irregularidade interna do material. A comparação pontual com uma fibra de cânhamo comercial serviu apenas como referência para contextualizar os resultados obtidos, evidenciando o impacto positivo dos processos industriais de purificação, alinhamento e secagem controlada na obtenção de fibras mais homogéneas e com propriedades mecânicas superiores. Esta diferença demonstra a importância de um controlo rigoroso do processo de preparação quando se pretende alcançar fibras naturais com desempenho competitivo.

Os resultados obtidos demonstram que, embora as fibras naturais apresentem potencial promissor, é necessário um controlo mais rigoroso dos processos de tratamento e preparação para que possam atingir níveis de desempenho comparáveis aos materiais comerciais. A variabilidade entre amostras, as dificuldades em obter fibras com geometria uniforme e a fragilidade das fibras pouco tratadas continuam a representar desafios técnicos significativos.

Ainda assim, os resultados confirmam o potencial do cânhamo como reforço sustentável em compósitos biodegradáveis à base de PLA, desde que sejam otimizados os processos de extração, preparação e funcionalização.

Como perspetivas futuras, destaca-se a importância de aprofundar o estudo de tratamentos químicos de melhoria da adesão fibra–matriz, de analisar a influência da orientação e do comprimento crítico das fibras no desempenho final dos materiais e de avaliar propriedades complementares, como o comportamento térmico, a resistência ao impacto e a durabilidade. Sugere-se também a integração das fibras naturais em processos de extrusão e impressão 3D, de modo a validar o seu desempenho em contexto industrial.

Em síntese, este estudo fornece uma base sólida para a utilização de fibras naturais como reforço sustentável em compósitos destinados ao fabrico aditivo. Os resultados obtidos reforçam o potencial do cânhamo e de outros recursos endógenos como alternativa viável aos materiais sintéticos, contribuindo para uma indústria mais ecológica, eficiente e tecnologicamente evoluída.

## 6. Referências Bibliográficas

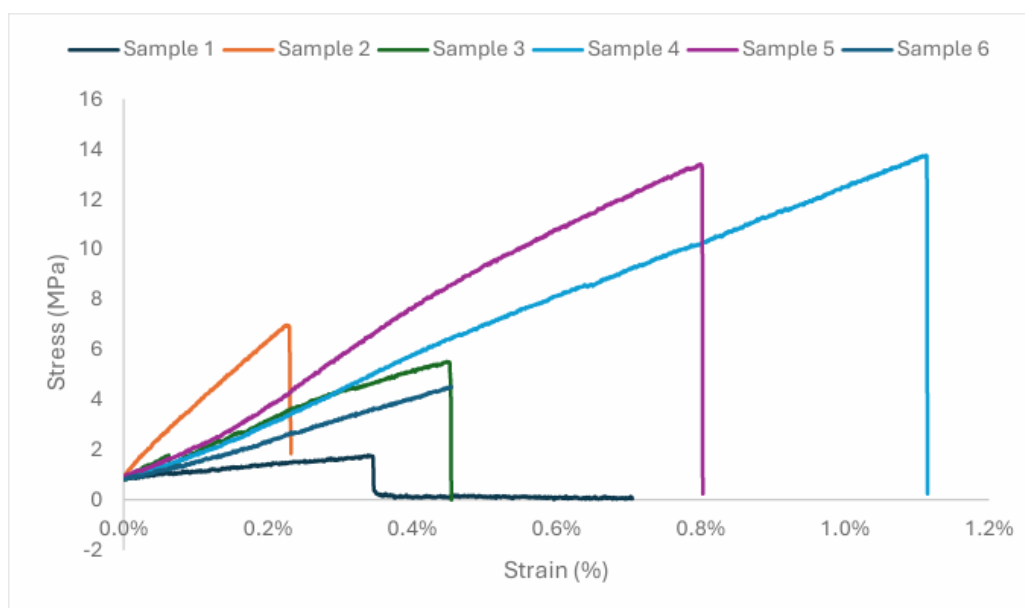
- [1] naturFAB – Parceiros. Disponível em: <https://naturfab.eu/pt/parceiros/>. Consultado em: 14 nov. 2024.
- [2] Instituto Politécnico de Bragança – FabLabIPB. Disponível em: <https://www.estig.ipb.pt/index.php/estig/a-estig/servicos-setores/laboratorios/fablalpb>. Consultado em: 14 nov. 2024.
- [3] FabLabIPB – Laboratório de Fabrico Digital. Disponível em: <http://fablab.estig.ipb.pt/>. Consultado em: 14 nov. 2024.
- [4] MIGUEL, J.; MARIZ, B. Universidade do Minho – Escola de Engenharia. 2023.
- [5] KU, H.; WANG, H.; PATTARACHAIYAKOOP, N.; et al. *A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites*. Composites Part B: Engineering, v. 42, n. 4, p. 856–873, 2011.
- [6] SOUSA, J. C.; ARRUDA, S. A.; LIMA, J. C.; et al. *Crystallization kinetics of poly(butylene adipate terephthalate) in biocomposite with coconut fiber*. Revista Matéria, v. 24, n. 3, 2019.
- [7] SATYANARAYANA, K. G.; WYPYCH, F.; GUIMARÃES, J. L.; et al. *Studies on natural fibers of Brazil and green composites*. Metals Materials and Processes, v. 17, n. 3–4, p. 183–194, 2005.
- [8] DE JESUS, L. C. C.; DA LUZ, S. M.; LEÃO, R. M.; et al. *Thermal properties of recycled polystyrene composite reinforced with cellulose from sugarcane bagasse*. Revista Matéria, v. 24, n. 3, 2019.
- [9] KORONIS, G.; SILVA, A.; FONTUL, M. *Green composites: A review of adequate materials for automotive applications*. Composites Part B: Engineering, v. 44, n. 1, p. 120–127, 2013.
- [10] MARTINS, A. P.; SANCHES, R. A. *Assessment of coconut fibers for textile applications*. Revista Matéria, v. 24, n. 3, 2019.
- [11] YANG, G.; PARK, M.; PARK, S. J. *Recent progresses of fabrication and characterization of fibers reinforced composites: A review*. Composites Communications, v. 14, p. 34–42, 2019.
- [12] ADEKOMAYA, O.; JAMIRU, T.; SADIKU, R.; et al. *A review on the sustainability of natural fiber in matrix reinforcement – A practical perspective*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, v. 35, n. 1, p. 3–7, 2016.
- [13] SANJAY, M. R.; MADHU, P.; JAWAID, M.; et al. *Characterization and properties of natural fiber polymer composites*. [Referência incompleta – falta revista, ano e páginas].
- [14] ELANCHEZHIAN, C.; RAMNATH, B. V.; RAMAKRISHNAN, G.; et al. *Review on mechanical properties of natural fiber composites*. Materials Today: Proceedings, v. 5, n. 1, p. 1785–1790, 2018.
- [15] MERCI, A.; REZENDE, M. I.; CONSTANTINO, L. V.; et al. *Evaluation of different factors in the removal of remazol brilliant blue from aqueous solutions by adsorption in sugarcane and green coconut fibers*. Revista Matéria, v. 24, n. 3, 2019.
- [16] NASCIMENTO, J. L.; MAGALHÃES JÚNIOR, G. A.; PORTELA, R. R.; et al. *Application of adsorptive process for desulphurisation of fuel using coconut fiber as adsorbents*. Revista Matéria, v. 24, n. 3, 2019.
- [17] SILVA, J. S.; DOS SANTOS, M. L.; SILVA FILHO, J.; et al. *Byproducts of babassu (Orbignya sp) as new adsorptive materials: A review*. Revista Matéria, v. 24, n. 3, 2019.

- [18] LI, X.; TABIL, L. G.; PANIGRAHI, S. *Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber reinforced composites: A review*. Journal of Polymers and the Environment, v. 15, n. 1, p. 25–33, 2007.
- [19] PARANDOUSH, P.; LIN, D. *A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites*. Composite Structures, v. 182, p. 36–53, 2017.
- [20] COUTINHO, A. S. *Fabrico e propriedades do betão*. Vol. 1–3. Lisboa: LNEC, 1988.
- [21] CHAWLA, K. K. *Composite materials*. Springer International Publishing, 2019.
- [22] VASILIEV, V. V.; MOROZOV, E. V. *Mechanics and analysis of composite materials*. 2001.
- [23] HERAKOVICH, C. T. *Mechanics of composites: A historical review*. Mechanics Research Communications, v. 41, p. 1–20, 2012.
- [24] FONTOURA, L. C. *Modelagem do módulo de Young em nanocompósitos através de inteligência computacional*. PUC-Rio, 2009.
- [25] GROOVER, M. *Fundamentals of modern manufacturing: Materials, processes and systems*. John Wiley & Sons, 2010.
- [26] CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. *Materials science and engineering: An introduction*. 8. ed. Wiley, 2009.
- [27] KARTHI, N.; KUMARESAN, K.; SATHISH, S.; et al. *An overview: Natural fiber reinforced hybrid composites, chemical treatments and application areas*. Materials Today: Proceedings, 2020.
- [28] GROOVER, M. *Fundamentals of modern manufacturing: Materials, processes and systems*. John Wiley & Sons, 2010.
- [29] MALLICK, P. K. *Fiber reinforced composites: Materials, manufacturing and design*. 3. ed. CRC Press, 2007.
- [30] MEDEIROS, M. A. R. *Propriedades mecânicas de compósitos de PVC reciclado reforçados com fibras de sisal e de nylon*. UFBA, 2006.
- [31] VALADEZ-GONZALEZ, A.; CERVANTES-UC, J. M.; OLAYO, R.; HERRERA-FRANCO, P. J. *Effect of fiber surface treatment on the fiber-matrix bond strength of natural fiber reinforced composites*. Composites Part B: Engineering, v. 30, n. 3, p. 309–320, 1999.
- [32] CARVALHO, G. C. *Estudo das propriedades mecânicas de compósitos com matriz de epóxi reforçados com fios de sisal e linho*. Instituto Politécnico de Bragança.
- [33] BRANQUINHO, T. E. L. *Processamento e caracterização de compósitos com fillers de argila expandida*. 2017.
- [34] NG, W. K.; JOHAR, M.; ISRAR, H. A.; WONG, K. J. *A review on the interfacial characteristics of natural fibre reinforced polymer composites*. In: Interfaces in Particle and Fibre Reinforced Composites. Woodhead Publishing, 2020. p. 163–198.
- [35] MOCHANE, M. J.; et al. *Recent progress on natural fiber hybrid composites for advanced applications: A review*. Express Polymer Letters, v. 13, n. 2, p. 159–198, 2019.
- [36] KABIR, M. M.; WANG, H.; LAU, K. T.; CARDONA, F. *Chemical treatments on plant based natural fibre reinforced polymer composites: An overview*. Composites Part B: Engineering, v. 43, n. 7, p. 2883–2892, 2012.
- [37] JOHN, M. J.; THOMAS, S. *Biofibres and biocomposites*. Carbohydrate Polymers, v. 71, n. 3, p. 343–364, 2008.

- [38] PICKERING, K. L.; EFENDY, M. G. A.; LE, T. M. *A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, v. 83, p. 98–112, 2016.
- [39] AHMAD, F.; CHOI, H. S.; PARK, M. K. *Natural fiber composites selection in view of mechanical, lightweight and economic properties*. 2014.
- [40] *Estudo sobre extração e caracterização de fibras de cânhamo para aplicação têxtil*. Universidade do Minho. Disponível em: <https://repositorium.sdum.uminho.pt>.
- [41] *Caracterização e desenvolvimento de fibras de linho em Portugal*. Universidade do Minho. Disponível em: <https://repositorium.sdum.uminho.pt>.
- [42] *Crescimento do mercado de linho na Europa*. Portugal Têxtil. Disponível em: <https://www.portugaltexil.com>.
- [43] *Reaproveitamento de subprodutos da castanha para novas aplicações industriais*. Disponível em: <https://repositorio.ipv.pt>.
- [44] ASTM. *Standard test method for tensile strength and Young's modulus of fibers*. 2009. Disponível em: <https://www.astm.org>.
- [45] GOMES, H. R. *Estudo do comportamento mecânico de compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de cânhamo*. 2020.

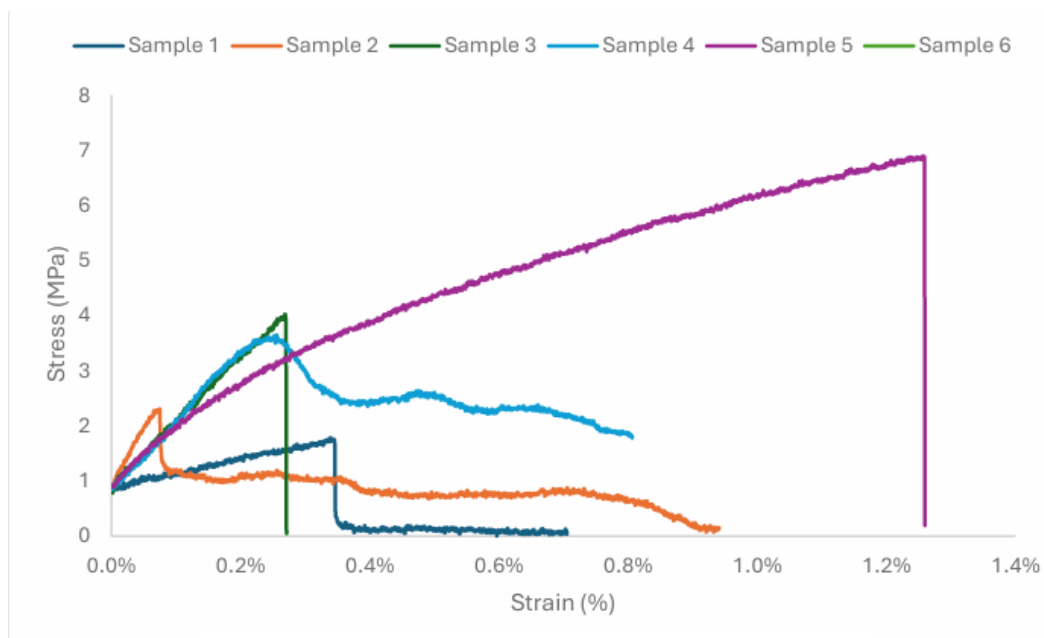
## 7. Anexos

### Anexo A



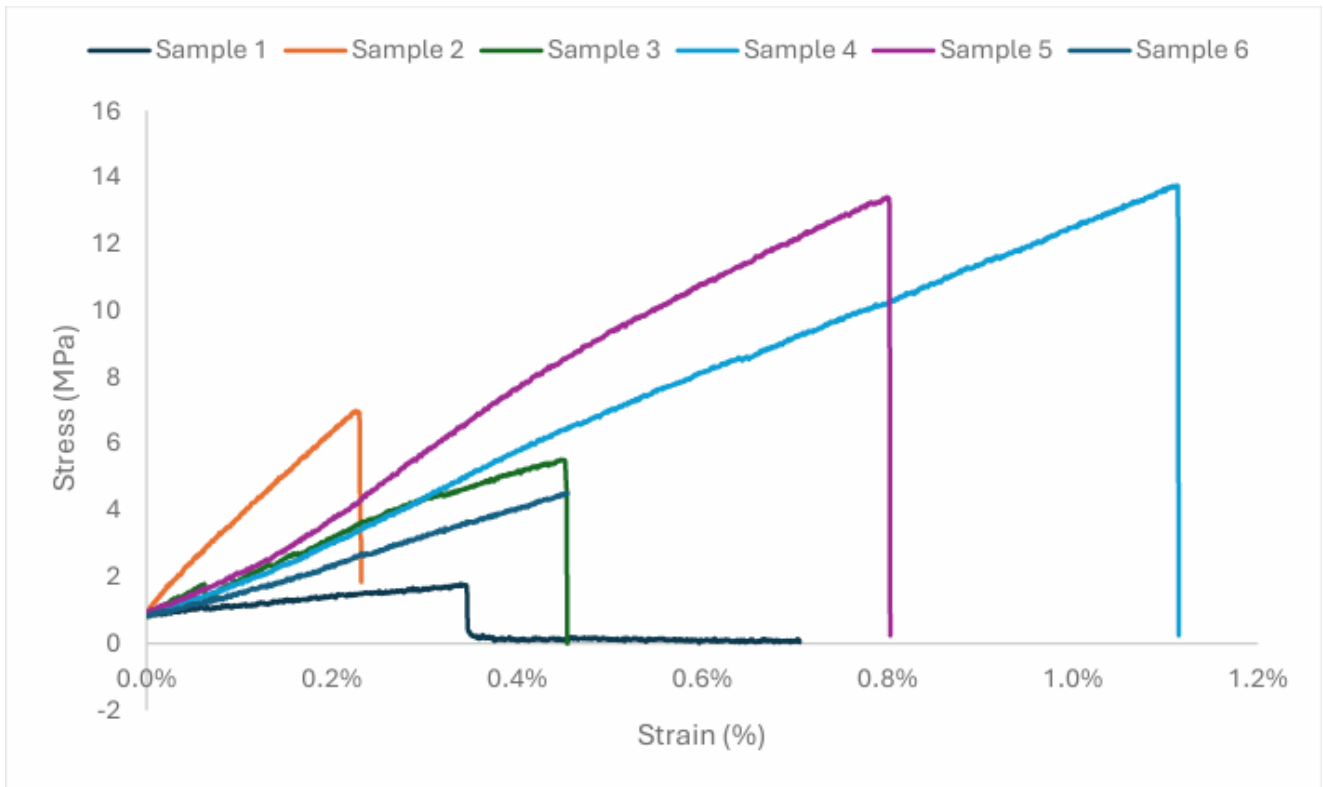
Anexo A - Curvas tensão-deformação obtidas no primeiro ensaio.

### Anexo B



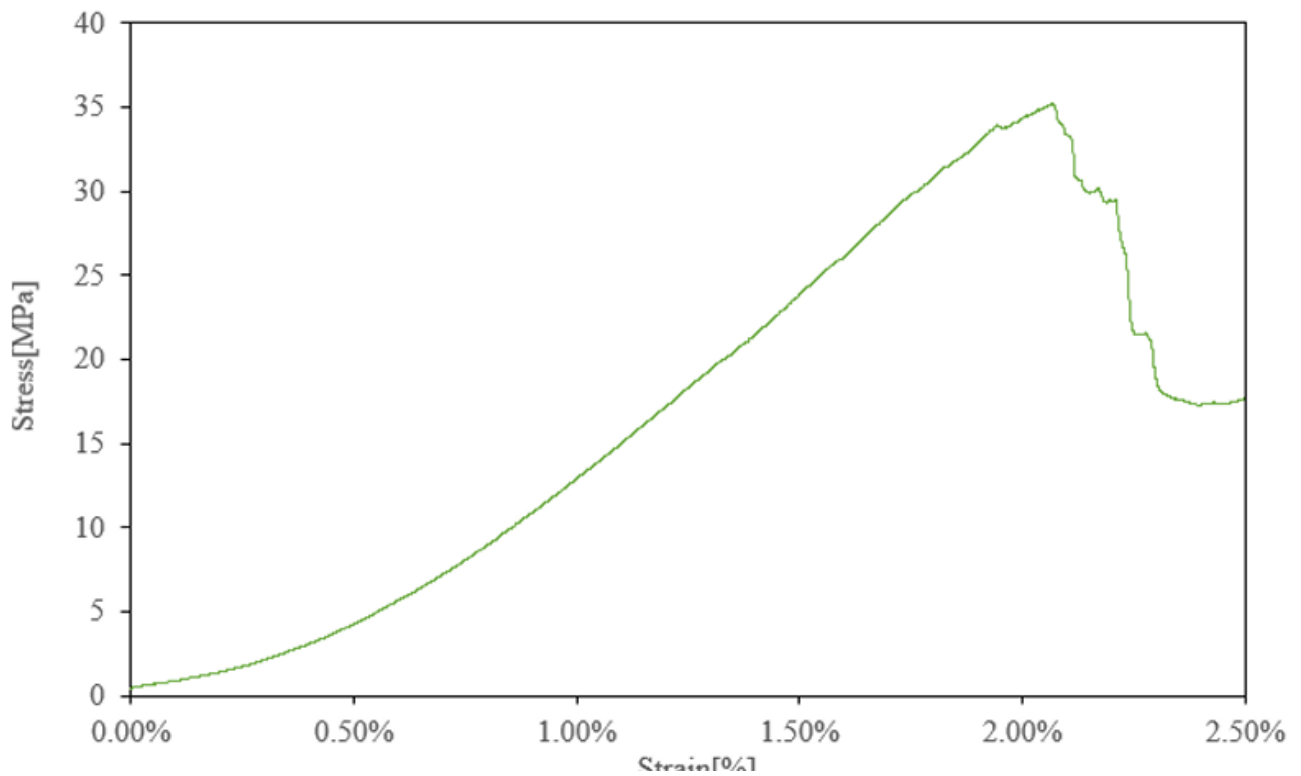
Anexo B - Curvas tensão-deformação obtidas no segundo ensaio.

## Anexo C



Anexo C - Curvas tensão-deformação obtidas no terceiro ensaio.

## Anexo D



Anexo D - Gráfico tensão-deformação do ensaio de tração do cânhamo comercial.