



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

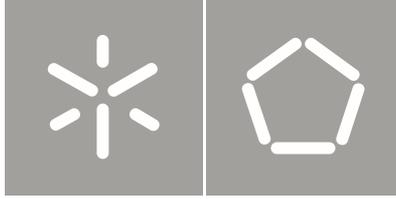
Jade Duarte de Sousa
Fabricação e Caracterização de Compósitos com base de
fio híbrido Cânhamo/PLA

Jade Duarte de Sousa

Fabricação e Caracterização de Compósitos com
base de fio híbrido Cânhamo/PLA

UMinho | 2023

novembro 2023



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Jade Duarte de Sousa

Fabricação e Caracterização de Compósitos com base de fio híbrido Cânhamo/PLA

Dissertação de Mestrado
Mestrado em Engenharia Têxtil
Área de especialização em Materiais e Tecnologias
Avançadas

Trabalho realizado sob orientação da
Professora Doutora Rosa Maria de Castro Fernandes
Vasconcelos

novembro 2023

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.



Atribuição
CC BY

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Agradecimentos

A concretização desta dissertação contou com a ajuda fundamental de docentes, técnicos de laboratório, amigos, colegas de curso e familiares, aos quais deixo o meu agradecimento.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à minha orientadora, Professora Doutora Rosa Maria de Castro Fernandes Vasconcelos, por ter aceitado o meu pedido de orientação e por me ter dado este desafio. Foi um projeto bastante desafiante no qual gostei de participar e desenvolver, apesar de todos os contratempos ocorridos. Para além disto, agradeço a paciência e disponibilidade prestada sempre que solicitada.

Não posso deixar de expressar o meu especial agradecimento à Professora Doutora Ana Maria Rocha, por na etapa final deste projeto ter se mostrado disponível a ajudar-me e pelas suas palavras de conforto.

À professora Doutora Manuela Ferreira, por ter sido o meu braço direito em França e por me ter guiado ao longo dos 4 meses e meio de trabalho.

Aos técnicos do laboratório da ENSAIT, não só pela disponibilidade, mas também pela sua partilha de conhecimentos e auxílio nos testes efetuados.

Por fim, mas não menos importante, o meu especial agradecimento aos meus pais, especialmente ao meu pai por todos estes anos ter sido o meu melhor amigo e nesta fase mais desafiadora nunca ter desistido de mim. A todos os meus amigos mais próximos, que sempre acreditaram em mim e me apoiaram em todas as minhas escolhas, sendo que esta etapa não foi uma exceção.

Obrigado a todos pelo apoio na finalização de mais uma etapa da minha vida!

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Resumo

A crescente preocupação com o ambiente levou a que o cânhamo, as fibras de cânhamo e as suas aplicações fossem estudadas para a fabricação de compósitos. Nos compósitos as fibras naturais atuam como reforço e o segundo constituinte do material compósito, designado de matriz é um material que seja capaz de transferir as tensões para a fase de reforço e que garanta a coesão do material. Assim, para o desenvolvimento deste trabalho, utilizou-se como matriz um polímero termoplástico, o PLA (polímero polilático) em multifilamento. Estes, são resinas de base biológica, derivados de recursos naturais e renováveis ao contrário dos polímeros termoendurecíveis. O PLA é um polímero biodegradável e para além disso, possui boas propriedades mecânicas e térmicas com baixa temperatura de fusão (≈ 160 °C) o que permite que seja utilizado juntamente com fibras naturais. Assim, a associação de fibras naturais a polímeros de base biológica permite a fabricação de materiais 100% ecológicos com baixo impacto ambiental e ao mesmo tempo, proporciona boas propriedades térmicas e acústicas.

Este projeto de dissertação, foi realizado na ENSAIT, *École Nationale Supérieure Des Arts et Industries Textiles*, Lille, França, pelo programa Erasmus +. Teve como objetivo a produção de fio híbrido cânhamo/PLA para a fabricação de compósitos. Para tal, produziu-se um fio híbrido PLA/Cânhamo onde um multifilamento de PLA foi envolvido à volta da mistura PLA/Cânhamo na máquina de fiação de fuso-oco. O fio híbrido PLA/Cânhamo foi fabricado de forma a ser utilizado para produzir o tecido e o mesmo foi utilizado para a produção de compósitos pelo processo de termocompressão sem necessidade de inserção de resina visto que o termoplástico foi adicionado na etapa de fiação. As propriedades têxteis e mecânicas foram caracterizadas em cada escala, desde fita até aos compósitos.

Palavras-chave: biocompósitos, fibras naturais, PLA, tecelagem, termocompressão, propriedades mecânicas.

Abstract

The growing environment concern has led to the study of hemp, hemp fibers and their applications for composite manufacturing. In the composites, the natural fibers act as reinforcement and the second component of the composite material, designated as the matrix, is a material capable of transferring the tensions to the reinforcement phase and ensuring the material cohesion. Thereby, to the development of this project, as matrix it was used the thermoplastic polymer, the PLA (polylactic polymer). These are biologically based resins, derived from natural and renewable resources, as they could be recyclable and reusable, unlike thermosetting polymers. PLA is a biodegradable polymer and, moreover, it possesses good mechanical and thermal properties with a low melting temperature (≈ 175 °C), which allows it to be used alongside with natural fibers. Thus, the combination of natural fibers with biologically based polymers enables the manufacturing of 100% environmentally friendly materials with low environmental impact while also providing excellent thermal and acoustic properties.

This dissertation project was undertaken at ENSAIT, *École Nationale Supérieure Des Arts et Industries Textiles*, Lille, France, through the Erasmus+ program. Its aim was the production of a hemp/PLA hybrid thread for composite manufacturing. To achieve this, a PLA/hemp hybrid thread was produced by wrapping a multifilament of PLA around the PLA/hemp blend on a hollow spindle spinning machine. The PLA/hemp hybrid thread was manufactured to be used for fabric production and was also utilized in the production of composites through the thermocompression process without the need for resin insertion, as the thermoplastic was added during the spinning stage. Textile and mechanical properties were characterized at every scale, from thread to composites.

Keywords: biocomposites, natural fibers, PLA, weaving, thermocompression, mechanical properties.

Índice

Agradecimentos.....	iii
Resumo	v
Abstract	vi
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos	ix
Índice de Figuras	x
Índice de Tabelas.....	xii
Índice de Equação	xiii
1. Introdução.....	1
1.1. Motivação	1
1.2. Enquadramento	2
1.3. Estrutura da Dissertação	2
2. Enquadramento Teórico	4
2.1. Materiais Compósitos	4
2.1.1. Aplicações dos Materiais Compósitos	4
2.2. Matrizes.....	6
2.2.1. Matriz Polimérica	7
2.2.2. Matriz Termoplástica.....	8
2.2.3. Matriz Termoendurecível.....	9
2.3. Compósitos Reforçados com Fibras.....	10
2.3.1. Fibras Sintéticas	12
2.3.2. Fibras Naturais	15
2.3.2.2. Limitações e Desvantagens do uso de Fibras Naturais em Compósitos	20
2.4. Fabricação do Fio Híbrido: Fiação Por Enrolamento	21
2.5. Processos de Fabrico de Compósitos.....	23
2.5.1. Moldação Manual	23
2.5.2. Moldação por Compressão a Quente.....	24
2.5.3. Moldação por Injeção.....	25
2.5.4. Moldação por Transferência de Resina (RTM).....	25
2.5.5. Moldação por Infusão a Vácuo	26
2.5.6. Enrolamento Filamentar.....	27
2.5.7. Termocompressão	27
3. Materiais e Métodos.....	29
3.1. Fabricação do Fio híbrido Cânhamo/PLA.....	30

3.1.1. Preparação das Fitas:	30
3.2. Fiação.....	32
3.3. Produção do Tecido.....	33
3.3.1. Preparação à tecelagem.....	33
3.3.2. Preparação à tecelagem e tecelagem propriamente dita	33
3.4. Compósitos.....	34
4. Análise e Discussão dos Resultados.....	37
4.1. Determinação da Massa Linear do PLA e Cânhamo	37
4.2. Caracterização do Fio.....	37
4.2.1. Massa linear	37
4.2.2. Força e Extensão à rotura	38
4.3. Caracterização do Tecido	38
4.3.1. Contração do Tecido	38
4.3.2. Contextura à Teia e à Trama	40
4.3.3. Determinação da Espessura.....	40
4.3.4. Teste da Permeabilidade ao Ar ($l/m^2/s$).....	41
4.3.5. Determinação da massa por unidade de superfície (g/m^2)	42
4.3.6. Teste de Flexão.....	43
4.3.7. Teste de Força e Extensão à Rotura.....	45
4.4. Caracterização dos Compósitos:.....	47
4.4.1. Determinação da Percentagem Exata das Fibras nos Compósitos:.....	47
4.4.2. Teste de Força e Extensão à Rotura:.....	47
5. Conclusões e Perspetivas Futuras:.....	50
5.1. Conclusões Finais	50
5.2. Perspetivas Futuras.....	51
Referências Bibliográficas:.....	53

Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos

F	FRP	<i>Fiber Reinforced Polymers</i>
	FAO	<i>Food and Agriculture Organisation</i>
L	LCM	Moldagem Líquida de compósitos
M	RTM	Moldagem por transferência de resina
P	PA	Poliamida
	PAN	Poliacrilonitrilo
	PC	Policarbonato
	PET	Poliéster termoplástico
	PLA	Polímero polilático
	PP	Polipropileno

Índice de Figuras

Figura 1. Classificação de materiais compósitos (adaptado de Pereira Da Silva, 2014).	4
Figura 2. Evolução da utilização de materiais compósitos ao longo dos anos (a) e as fibras mais utilizadas (b) Fonte:(Corbin;Anne-Clémence, 2020).	6
Figura 3. Tipos de matrizes poliméricas Fonte: Autor.....	8
Figura 4. Fibras naturais, vegetais e artificiais. Fonte: Autor.....	11
Figura 5. Orientação das fibras. Site: https://docplayer.com.br/44443464-Introducao-aos-materiais-compositos.html	11
Figura 6. Classificação de fibras sintéticas Fonte: (Melo Tomar, 2018).	13
Figura 7. Classificação das fibras naturais de origem vegetal (adaptado de Castro, 2013).....	16
Figura 8. Fibra de cânhamo. Site: https://kayamind.com/fibras-do-canhamo-utilidades/ visitado a 20/03/2023.....	17
Figura 9. Constituintes da fibra de cânhamo Fonte:(Shahzad, 2012).	18
Figura 10. (a) propriedades físicas e mecânicas das fibras de cânhamo (b) propriedades de tração da fibra de cânhamo reportadas por diferentes autores Fonte: (Shahzad, 2012).....	19
Figura 11. Comparação do preço de venda das fibras de vidro e algumas fibras naturais Fonte: (Bourmaud et al., 2018).	20
Figura 12. Hollow Spindle nos laboratórios da GEMTEX, France Fonte: Autor.....	22
Figura 13. Estrutura dos fios. (a) fio convencional torcido. (b) Fio híbrido enrolado com filamento contínuo. Fonte:(Zhang & Miao, 2010)	22
Figura 14. Etapas de moldação para formação de compósitos Fonte:(Alexandra & Faria, 2021).	23
Figura 15. Representação esquemática do processo de moldação manual Fonte: (Castro, 2013).	24
Figura 16. Esquema simplificado da moldação por transferência de resina; https://bfginternational.com.br/pt/compositos/processos/moldagem-transferencia-resina-rtm (20/01/2023).....	26
Figura 17. Esquema representativo do processo de Moldação por Infusão a Vácuo Fonte:(Abreu Freire Lopes, 2020).	26
Figura 18. Enrolamento filamentar húmido Fonte: (Sales Guimarães, 2021).....	27
Figura 19. Processo de termocompressão Fonte: (Campbell, 2010).	28
Figura 20. Microscópio utilizado para a determinação da massa linear do cânhamo. Fonte: Autor.	29
Figura 21. Tabela utilizada para saber o valor da estiragem no intersecting. Fonte: Autor.....	30
Figura 22. Aparelho utilizado para medir 5 metros de comprimento de fita Cânhamo/PLA na primeira passagem. Fonte: Autor.	31
Figura 23. Hollow Spindle Machine.	32
Figura 24. Objetivo inicial para a urdissagem programadas na urdideira.....	33
Figura 25. Processo de urdissagem e preparação da teia.	33
Figura 26. Esquemática do Cetim 6 Fonte: (Corbin et al., 2020).	34
Figura 27. Inserção dos fios da teia no tear. Fonte: Autor.	34
Figura 28. Molde de corte dos compósitos; Amostras cortadas para a etapa de termocompressão. Fonte: Autor.	35
Figura 29. Máquina de termocompressão. Fonte: Autor.	36

Figura 30. Compósitos. Fonte: Autor.....	36
Figura 31. Aparelho de medição da espessura. Fonte: Autor.	40
Figura 32. Aparelho utilizado para a realização do teste de permeabilidade ao ar. Fonte: Autor.	42
Figura 33. Amostras utilizadas para a determinação da massa por unidade de superfície. Fonte: Autor.	42
Figura 34. Material utilizado para o teste de flexão. Fonte: Autor.....	44
Figura 35. Extensão à rotura na direção teia e direção trama.	46
Figura 36. Força máxima na direção da teia e da trama.	46
Figura 37. Amostras utilizadas para o teste de força e extensão à rotura. (a) direção da teia; (b) direção da trama; (c) direção 0/90°. Fonte: Autor.	48
Figura 38. Extensão á rotura nas três direções.	49
Figura 39. Tensão Máxima nas três direções.....	49

Índice de Tabelas

Tabela 1. Requisitos a ser considerados na matriz Fonte: (Moreira, 2009).....	7
Tabela 2. Propriedades de resinas termoendurecíveis Fonte: (Mazumdar, 2002).	10
Tabela 3. Propriedades típicas das fibras tipo E, tipo S Fonte: (Castro, 2013).	13
Tabela 4. Propriedades das fibras sintéticas mais utilizadas no fabrico de materiais compósitos (adaptado de Dias Cardoso, 2021).	15
Tabela 5. Propriedades do cânhamo e PLA iniciais.....	29
Tabela 6. Massa linear das fitas de PLA e cânhamo.	30
Tabela 7. Massa linear obtida após a primeira passagem.....	31
Tabela 8. Parâmetros da <i>Hollow Spindle</i>	32
Tabela 9. Massa linear do PLA determinada pelo auxílio do Vibroscópio.....	37
Tabela 10. Massa linear do cânhamo.....	37
Tabela 11. Massa linear do fio híbrido.....	38
Tabela 12. Resultados do teste força e extensão à rotura.	38
Tabela 13. Resultados do teste de contração.	39
Tabela 14. Densidade dos fios de teia e trama.	40
Tabela 15. Valores de espessura em mm.....	41
Tabela 16. Resultados do teste de permeabilidade ao ar nos tecidos.	41
Tabela 17. Resultados da massa por unidade de superfície (g/m^2).	43
Tabela 18. Resultados do teste de flexão na direção da teia.	44
Tabela 19. Resultados do teste de flexão na direção da trama.	45
Tabela 20. Resultados do teste de força e extensão à rotura na direção da teia.	45
Tabela 21. Resultados do teste de força e extensão à rotura na direção da trama.	46
Tabela 22. Valores de tensão máxima e extensão à rotura na direção teia.	48
Tabela 23. Valores de tensão máxima e extensão à rotura na direção trama.	48
Tabela 24. Valores de tensão e extensão à rotura na direção 0/90°.	48

Índice de Equação

Equação 1. Determinação da estiragem-	30
Equação 2. Fórmula para a determinação da contração.	39
Equação 3. Fórmula utilizada para o cálculo da rigidez à flexão.	43

1. Introdução

Neste capítulo introdutório encontram-se descritas as motivações, enquadramento bem como a organização da dissertação, fazendo referência ao estado da arte e conceitos teóricos, assim como metodologias, materiais, métodos e ensaios laboratoriais realizados.

1.1. Motivação

Atualmente, é importante garantir o cumprimento das normas ambientais e os compromissos assumidos na luta contra as alterações climáticas para o desenvolvimento de materiais sustentáveis, recicláveis e com menor pegada de carbono. Assim, surge o desenvolvimento de materiais compósitos para diversas áreas indústrias, como por exemplo, área automóvel, desporto de construção. As fibras naturais apresentam muitas vantagens quando comparadas a fibras que provém de recursos petrolíferos. É o caso da leveza, preço e reciclabilidade. Entre as fibras naturais, as fibras de cânhamo apresentam um bom desempenho e comparativamente a outras fibras naturais, como o linho, são mais acessíveis a nível económico (Corbin et al., 2019).

A combinação dessas fibras vegetais com polímeros de origem biológica permite a fabricação de compósitos com baixo impacto no ambiente e ao mesmo tempo proporciona melhores propriedades. Estes polímeros são essencialmente os polímeros termoplásticos, originados de recursos naturais e renováveis pois permitem a natureza reversível da sua transformação. Ao contrário desses, existem os polímeros termoendurecíveis que não possuem um desempenho de implementação vantajoso para a fabricação de compósitos. O polímero polilático (PLA) é utilizado pela sua natureza biodegradável e pelas suas propriedades mecânicas e térmicas apresentando uma baixa temperatura de fusão (180°C) o que permite a sua utilização como matriz quando o compósito é reforçado com fibras de origem natural. Para além disso, devido aos poucos trabalhos existentes na literatura sobre o mesmo torna-se interessante o seu estudo (Baghaei et al., 2013). Na literatura, muitos dos trabalhos existentes estudam os compósitos com fibras curtas de cânhamo, mas são poucos os que estudam o comportamento de compósitos com reforços à base de fibras longas de cânhamo. No entanto, de modo a combater o atual problema, há cada vez mais estudos que estudam o comportamento e fornecem soluções para desenvolver a sua utilização em compósitos (Corbin et al., 2021).

Assim, este presente trabalho tem como foco a fabricação e caracterização de fitas de cânhamo para o desenvolvimento de estruturas híbridas, misturando reforços e resinas.

1.2. Enquadramento

Neste contexto, foram desenvolvidos compósitos à base fibra natural, cânhamo e polímero termoplástico, PLA a partir do processo de termocompressão. Numa, em uma primeira fase, realizou-se a mistura das fitas de cânhamo e PLA ambas com 2500 tex no *intersecting* de modo a misturar os dois tipos de fibra e obter fitas homogéneas. Posteriormente, utilizou-se a *Hollow Spindle Machine*, produzindo-se o fio pelo processo de Fiação por Enrolamento, isto é, para incorporar-se o PLA com a mistura de PLA/Cânhamo efetuando-se a caracterização, onde se determinou a massa linear e as propriedades mecânicas do mesmo. A terceira fase, consistiu na produção do tecido, por tecelagem manual, onde se produziu um cetim 6 e caracterizou-se o mesmo. Por fim, cortou-se amostras de tecido de modo a produzir compósitos termocompressão. Foi realizada a caracterização em multi-escala em todas as etapas do projeto. Isto é, realizou-se a caracterização ao material inicial (Cânhamo e PLA); às fitas Cânhamo/PLA; ao fio híbrido; ao tecido e ao compósito.

1.3. Estrutura da Dissertação

O presente trabalho segue uma divisão em cinco capítulos, de modo a enquadrar todos os tópicos relevantes para a realização da dissertação. Para além disso, estes capítulos dividem-se em subsecções, com o intuito de facilitar a compreensão do trabalho.

O primeiro capítulo tem como base o enquadramento, motivação do tema desta dissertação. Apresenta-se também no mesmo a estrutura do projeto.

No segundo capítulo evidenciam-se os conceitos teóricos necessários para a compreensão do tema, tal como o estado da arte, onde está presente uma definição dos materiais compósitos, as áreas de aplicação dos mesmos; o que conceito de matrizes e os tipos de reforço e ainda os processos de fabrico de compósitos.

No terceiro capítulo, diz respeito à parte prática deste projeto, onde estão apresentados os materiais, máquinas e equipamentos utilizados.

No quarto capítulo estão apresentados os testes de caracterização realizados ao longo do projeto e a análise efetuado aos mesmos.

Por fim, o quinto capítulo retrata as conclusões do trabalho desenvolvido, assim como, perspectivas futuras e a minha experiência pessoal ao realizar este projeto na ENSAIT, França pelo programa ERASMUS +.

2. Enquadramento Teórico

2.1. Materiais Compósitos

Um material compósito é definido pela combinação de dois ou mais materiais em fases distintas: fase de reforço constituída por fibras, folhas ou partículas e a fase matriz por materiais metálicos, poliméricos ou cerâmicos. Estes estão presentes em diferentes áreas como a indústria aeronáutica, automóvel, artigos desportivos, indústria espacial (Elanchezhian et al., 2016). Os compósitos ressurgiram como alternativa aos materiais convencionais pois possuem excelentes propriedades mecânicas específicas (relação propriedade-peso), tais como elevada resistência à fadiga e à corrosão, elevada rigidez, elevado módulo de elasticidade específico e por serem facilmente moldáveis (Filipe, 2021). Para além disso, a área de aplicação, processo de fabrico e características da matriz são fatores que influenciam a escolha do material pois afetam significativamente as suas propriedades (Melo Tomar, 2018).

Em relação à matriz, as mais utilizadas para os materiais compósitos são as matrizes de origem polimérica e estas podem ser subdivididas em matriz polimérica termoendurecível e matriz polimérica termoplástica. No caso do reforços, os mais utilizados são fibras de vidro, aramida e carbono (Alexandra & Faria, 2021).

Os compósitos podem ser divididos em três categorias de acordo com a figura 1.



Figura 1. Classificação de materiais compósitos (adaptado de Pereira Da Silva, 2014).

2.1.1. Aplicações dos Materiais Compósitos

Atualmente, os materiais compósitos são os mais utilizados na indústria de forma a substituir os materiais tradicionais, como os metais. Estes materiais são utilizados no setor de lazer, devido às propriedades mecânicas específicas e na indústria de transportes (automóveis, aeronáutico e ferroviários).

Na área do lazer e desporto, as características dos compósitos e as suas propriedades (ganho de peso, rigidez e resistência) levam a que estes sejam uma mais-valia nestas áreas pois apresentam uma grande diversidade de materiais reforçados com fibras que podem ser fabricados para esquis para a neve, canas de pesca, pranchas de *snowboard*, raquetes de ténis, tacos de golfe, entre outras (Rodrigues Pereira, 2017).

Na indústria aeroespacial, a partir da década de 60, o desenvolvimento de fibras de carbono, boro e quartzo como reforços de materiais compósitos ofereceram oportunidades de flexibilidade em projetos estruturais como também atenderam às necessidades de desempenho em aeronaves. Assim, este avanço tecnológico permitiu criar oportunidades para estruturas de elevado desempenho e com baixo peso, como também favorecer o desenvolvimento de sistemas estratégicos, na área dos mísseis, aeronaves e foguetes (Rezende & Botelho, 2000).

Devido à crescente preocupação ambiental e devido ao uso de materiais compósitos à base de petróleo, tem se estudado cada vez mais o uso de fibra naturais para o reforço de compósitos. Assim, em 2020, a União Europeia, lançou um projeto SSUCHY *“Sustainable Structural and Multifunctional Biocomposites from Hybrid Natural Fibers and bio-based polymers”* onde o objetivo era a utilização de recursos naturais, tais como as fibras naturais e biopolímeros de modo a desenvolver materiais biocompósitos com propriedades avançadas para a indústria de transportes e lazer. Na fase de reforço utilizaram-se principalmente fibras de cânhamo e linho, e na fase de matriz, as resinas utilizadas foram à base de monómeros derivados de lignocelulose.

De acordo com a figura 2a, os materiais compósitos são utilizados desde 1960 e foi entre esta data e 2000 que se notou um forte crescimento na fabricação dos mesmos. No entanto, entre 2000 e 2010 o aumento foi de apenas 14% e somente começou a aumentar entre 2010 e 2018. Deste então e até hoje, a utilização de compósitos encontra-se em expansão nas diferentes indústrias.

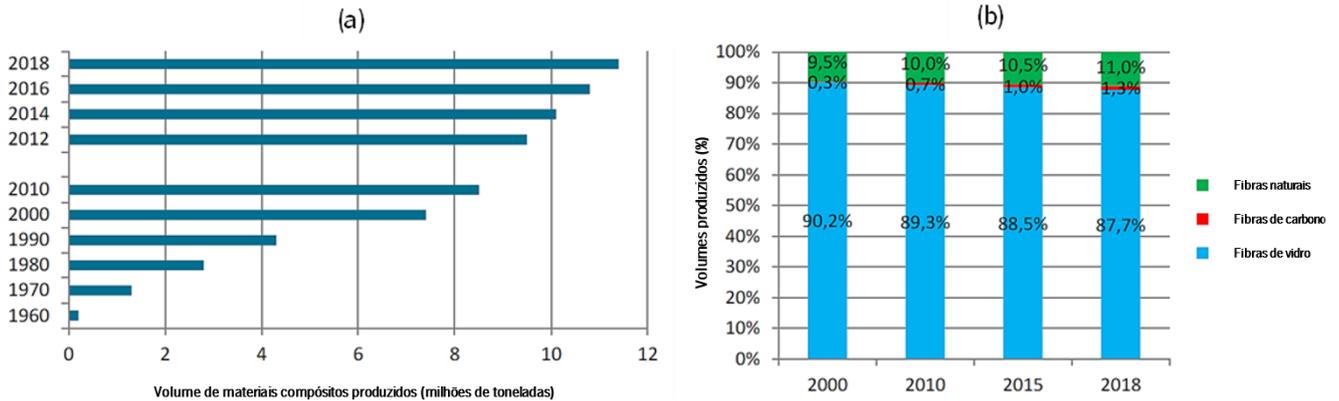


Figura 2. Evolução da utilização de materiais compósitos ao longo dos anos (a) e as fibras mais utilizadas (b) Fonte:(Corbin;Anne-Clémence, 2020).

As fibras mais utilizadas para a fabricação dos compósitos, de acordo com a figura 2b, é a fibra de vidro, carbono e fibras naturais, sendo notório, que de entre as três fibras mencionadas, a fibra de vidro é a mais utilizada para materiais compósitos. No entanto, há um aumento no uso das fibras naturais.

2.2. Matrizes

A matriz protege os materiais do reforço, transfere e transmite as cargas aplicadas entre elas e contribui para a melhoria de inúmeras propriedades. Esta ao ser impregnada no reforço protege o mesmo de altas temperaturas, humidade ou ataques químicos na sua interface permitindo ainda o aumento da rigidez e da resistência dos compósitos quando conjugado com fibras longas ou curtas (Dias Cardoso, 2021). Os compósitos reforçados com fibras ou partículas apresentam algumas diferenças quando são incorporados com uma matriz. No caso das fibras, a matriz age como um aderente que une todas as fibras proporcionando um aumento da resistência global do material enquanto, o material reforçado com partículas torna o material num só sólido atribuindo uma geometria pretendida (Ferreira, 2015).

As matrizes podem ser de origem sintética ou natural. As primeiras são produzidas industrialmente enquanto as de origem natural provém de recursos naturais (Melo Tomar, 2018). Atualmente, as matrizes mais utilizadas na produção de compósitos são as de origem polimérica devido ao facto de estas apresentarem baixa rigidez e resistência o que é vantajoso em certas aplicações (Melo Tomar, 2018) como também em termos de processamento, isto é, não necessitam de elevadas temperaturas e pressões, o que atenua possíveis problemas de degradação do reforço. Ao seleccionar a matriz é necessário ter em conta fatores como a viscosidade e a interação

matriz/reforço visto que estes são cruciais para um eficaz desempenho do material. Para além destes o custo e a capacidade de processamento são fatores relevantes (Pereira Da Silva, 2014).

Na tabela 1 encontram-se os requisitos essenciais a serem levados em conta para a escolha de uma matriz adequada para a fabricação de compósitos.

Tabela 1. Requisitos a ser considerados na matriz Fonte: (Moreira, 2009).

Propriedades Químicas	Boa adesão às fibras Resistência à degradação em ambientes quimicamente agressivos Baixa absorção de humidade
Propriedades Térmicas	Resistência a temperaturas extremas Coeficiente de dilatação térmica próxima do da fibra Baixa condutividade térmica
Propriedades Mecânicas	Resistência à tração elevada Ductilidade Resistência ao corte Tenacidade Resistência ao impacto
Outras Propriedades	Baixo custo Solidificação ou cura rápidas

2.2.1. Matriz Polimérica

A escolha do tipo de matriz polimérica a utilizar incide sobre os requisitos exigidos aos componentes finais do compósito. Os fatores que influenciam a escolha do tipo de polímero são: as propriedades mecânicas (resistência à tração elevada, resistência ao corte, tenacidade e resistência ao impacto); propriedades térmicas (resistência a temperaturas extremas, coeficiente de dilatação térmica próxima do da fibra e baixa condutividade térmica) e as propriedades químicas (boa adesão às fibras, resistência à degradação em ambientes quimicamente agressivos e baixa absorção de humidade). Para além disso, é importante ter em conta o fator económico (Moreira, 2009).

No esquema da figura 3, estão representados os diferentes tipos de matrizes poliméricas termoendurecíveis e termoplásticas.

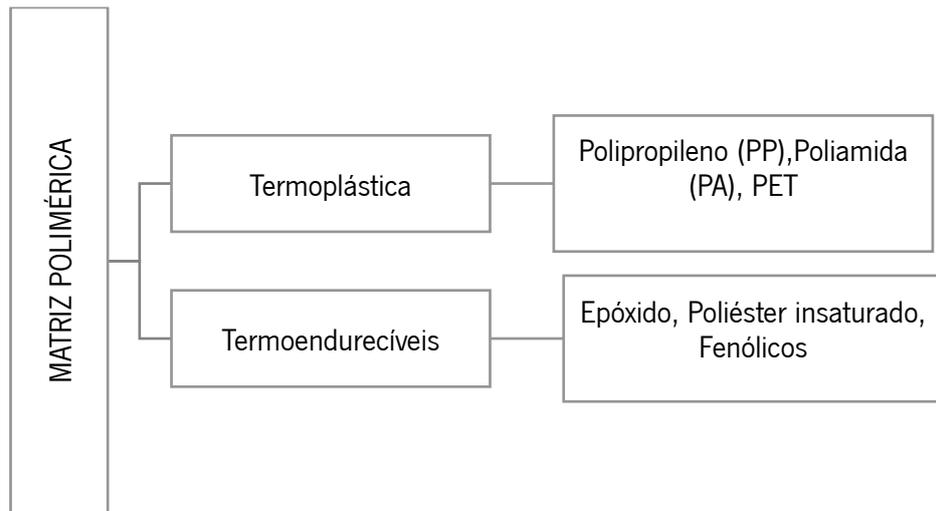


Figura 3. Tipos de matrizes poliméricas Fonte: Autor.

2.2.2. Matriz Termoplástica

Os termoplásticos são formados por macromoléculas onde a ligação não é reticulada, o que leva a que sejam mais macios e tenham a capacidade de fundir a altas temperaturas. As ligações existentes nos polímeros termoplásticos são temporariamente quebradas quando o polímero sofre aquecimento levando ao reprocessamento, isto é, fundição e solidificação sem que haja uma perda significativa das características do polímero (Francisco & Gomes Da Silva, 2005).

Os materiais termoplásticos devido à não formação de ligações cruzadas tornam-se mais flexíveis e enformáveis sendo utilizados sem preenchimentos ou reforços em várias aplicações. No entanto, apresentam baixos valores de rigidez e por isso garantem melhor desempenho mecânico quando há adição de reforços ou preenchimentos (Melo Tomar, 2018).

A nível de características mecânicas, as matrizes termoplásticas apresentam boa resistência a ataques químicos e boa estabilidade térmica (Dias Cardoso, 2021). Contribuem para uma sociedade mais *eco-friendly* porque podem ser reutilizáveis, reprocessados e reparados.

Destacam-se dentro dos diferentes materiais das matrizes termoplásticas a poliamida (PA), polipropileno (PP), o poliéster termoplástico (PET) e o policarbonato (PC) (Dias Cardoso, 2021; Gomes da Silva, 2005):

- O PP é um termoplástico com um ponto de fusão relativamente baixo ($\approx 170^{\circ}\text{C}$). Este é definido pela elevada estabilidade química, dureza, rigidez, resistência ao calor e tenacidade.

- A PA pode ter diferentes designações de acordo com a amida que lhes deu origem. Têm elevada flexibilidade, tenacidade e resistência à tração, bem como, boa resiliência e coeficiente de atrito e são amplamente usados no setor automóvel para diversas funções.
- O PC tem estrutura cristalina e destacam-se pelo bom isolamento elétrico, clareza ótica, durez, tenacidade e resistência à corrosão. Este polímero é utilizado sobretudo na indústria automóvel e aeroespacial.

2.2.2.1. Ácido Polilático (PLA)

O ácido polilático, mais conhecido como PLA é um polímero termoplástico que desde há muito tempo vem substituindo plásticos convencionais em diversas aplicações.

No processo de produção do PLA, as bactérias produzem ácido polilático por meio de fermentação de vegetais como amido, a beterraba e o milho fazendo que este seja produzido através de fontes renováveis.

Apesar das suas vantagens a nível ambiental, o PLA não tem boas propriedades mecânicas. No entanto, devido à necessidade de produção materiais biodegradáveis, surgem os biocompósitos, que, são combinados com fibras naturais onde estas atuam como reforço e o material polimérico atua como matriz. Esta combinação de materiais (matriz polimérica/fibra natural) visa a melhorar as propriedades finais do compósitos ao mesmo tempo que é uma alternativa sustentável.

Neste trabalho em específico, utiliza-se o PLA em multifilamento onde este atua como matriz e é enrolado à volta do fio alma que também tem na sua constituição fibra PLA e fibra de cânhamo.

2.2.3. Matriz Termoendurecível

As matrizes termoendurecíveis são formadas por cadeias moleculares que formam estrutura tridimensional devido ao processo de reticulação, isto é, durante o processo de cura as cadeias moleculares deixam de ser independentes ao criarem ligações cruzadas com as cadeias vizinhas (Francisco & Gomes Da Silva, 2005).

Estes polímeros são comercializados sob a forma de mistura de dois ou três componentes: resina, catalisador e acelerador (Nogueira Romão, 2003). Em alguns casos a polimerização e reticulação ocorre após a mistura dos referidos componentes à temperatura ambiente, enquanto outros tipos de termoendurecíveis exigem a aplicação de calor e pressão adicional para que o processo de cura se realize. Depois do processo de cura se dar, não existe a possibilidade de reprocessar este tipo de matriz polimérica, sendo esta uma das principais desvantagens associada aos materiais

termoendurecíveis. Contudo, a baixa viscosidade deste tipo de resinas antes da cura, é uma clara mais-valia para a impregnação das fibras. Comparativamente aos termoplásticos, a utilização de matrizes termoendurecíveis permite obter compósitos com mais resistência e rigidez (Filipe, 2021).

Os exemplos mais comuns de resinas termoendurecíveis são as resinas de epóxido, poliéster insaturado, fenólicas e vinil éster (Nogueira Romão, 2003).

Na tabela 2 é possível observar algumas propriedades de resinas termoendurecíveis mais utilizadas.

Tabela 2. Propriedades de resinas termoendurecíveis Fonte: (Mazumdar, 2002).

Materiais	Densidade (g/cm³)	Tensão de Rutura (MPa)	Módulo de Young (GPa)
Resina Epoxídica	1,2 – 1,4	50 – 110	2,5 – 5,0
Resina Fenólica	1,2 – 1,4	35 - 60	2,7 – 4,1
Poliéster	1,1 – 1,4	35 - 95	1,6 – 4,1

2.3. Compósitos Reforçados com Fibras

Cada vez mais recorre-se a materiais compósitos para desenvolver produtos que requerem alto desempenho. Os polímeros reforçados com fibra (*FRP- Fiber Reinforced Polymers*) estão presentes em inúmeras áreas, tais como, construção civil, indústria automóvel, aeronáutica, entre outras. As fibras ao atuarem como reforço têm como principal função conferir resistência e suportar os compósitos, enquanto a matriz tem de garantir estabilidade aos compósitos, e assegurar a transmissão de esforços às fibras e proteger a sua superfície.

Relativamente ao reforço, as fibras, devem apresentar características que permitam reforçar os polímeros de uma forma eficaz. Assim espera-se que esta possua um módulo de elasticidade superior ao polímero a reforçar; tensão de rotura superior à do polímero a ser reforçado; geometria adequada a uma boa adesão à matriz e resistência à deterioração em contacto com a matriz (Castro, 2013).

No esquema da figura 4, está representado dois tipos de fibras: sintéticas, se forem fabricadas pelo Homem e fibras naturais quando retiradas da natureza. Estas, podem ser, de origem animal, mineral ou vegetal.

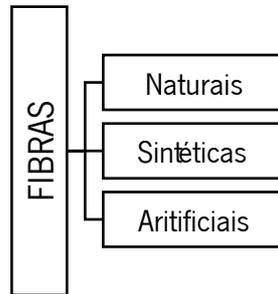


Figura 4. Fibras naturais, vegetais e artificiais. Fonte: Autor.

Existem outros fatores que afetam as propriedades finais de um compósito. Ao utilizar fibras como reforço, características como a quantidade de fibra, orientação e o seu comprimento influenciam diretamente as propriedades dos polímeros reforçados com fibras. De tal forma, os compósitos podem ser classificados como compósitos de partículas (figura 5a); compósitos de fibras descontínuas/curtas (figura 5b) e compósitos de fibras longas/contínuas (figura 5c).

Relativamente a orientação das fibras estas podem ainda ser orientadas em diferentes direções, podendo tornar o material compósito num material ortotrópico, ou caso sejam distribuídas aleatoriamente, tornar o mesmo em um material com características quase homogêneas, classificando-se assim como um material isotrópico (Melo Tomar, 2018).

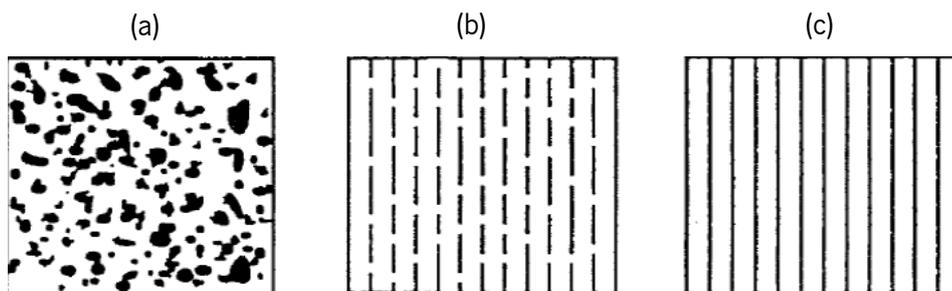


Figura 5. Orientação das fibras. Site: <https://docplayer.com.br/44443464-Introducao-aos-materiais-compositos.html>

Os compósitos de fibras contínuas ou compósitos fibras longas possuem o seu reforço sob a forma de fibras muito longas levando a que estes sejam os que garantam melhores propriedades mecânicas. Neste tipo de compósitos, as fibras podem ser orientadas numa só direção, isto é, paralelas entre si, orientadas em duas direções e podem ainda ser orientadas em múltiplas direções fazendo com que o produto final tenha propriedades quase isotrópicas (Daniel & Ishai, 2006). A utilização de fibras longas leva a que seja necessário recorrer a processos de fabrico

manuais, com mão-de-obra especializada, sendo que por vezes, possa ser necessário o uso de equipamentos mais caros.

Relativamente aos compósitos de fibras descontinuas ou compósitos de fibras curtas, possuem o seu reforço sob a forma de fibras onde o comprimento pode variar entre 10 a 50 mm. No que diz respeito à orientação estas podem ser orientadas numa certa direção promovendo um compósito num material ortotrópico ou podem ser distribuídas aleatoriamente originando um produto final com características quase homogéneas (Castro, 2013). A eficiência de um compósito de fibras descontinuas quando comparada com os compósitos reforçados com fibras continuas é muito baixa (Carboni & Culcheshk, 2009). Relativamente aos processos utilizados para este tipo de fibra são mais económicos comparativamente aos processos utilizados para as fibras longas.

Por fim, os compósitos reforçados por partículas têm na sua composição partículas de várias dimensões que se encontram distribuídas aleatoriamente pela matriz permitindo que o produto final tenha propriedades quase homogéneas (Daniel & Ishai, 2006). Os compósitos são reforçados maioritariamente com fibras sintéticas, tais como vidro, aramida, carbono, boro, entre outras (Alexandra & Faria, 2021). Dado ao elevado custo económico das fibras de carbono e aramida estas são utilizadas somente na indústria espacial e aeronáutica (Castro, 2013) fazendo com que a fibra de vidro seja a mais utilizada para o reforço de compósitos nos mercados de grande consumo.

2.3.1. Fibras Sintéticas

Nos últimos anos, grande parte da produção comercial de fibras tem origem sintética. Estas fornecem propriedades mecânicas geralmente superiores às de origem natural e uma maior resistência à degradação (Melo Tomar, 2018). Na figura 6, estão apresentadas as classificações das fibras sintéticas mais utilizadas para a fabricação de compósitos, sendo que, como já foi referido, as mais utilizados no mundo dos compósitos são as fibras de vidro, carbono e as fibras aramídicas.

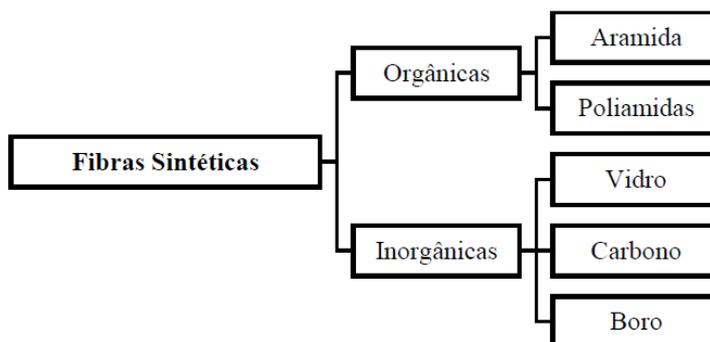


Figura 6. Classificação de fibras sintéticas Fonte: (Melo Tomar, 2018).

2.3.1.1. Fibra de Vidro

As fibras de vidro são as fibras sintéticas mais utilizadas no fabrico de materiais compósitos. São sólidos amorfos compostos por sílica, apresentando-se maioritariamente na forma de dióxido de silício.

Na área de fabricação de compósitos estruturais utilizam-se as fibras *E-glass* e as fibras *S-glass*. As fibras *E-glass* apresentam propriedades mecânicas razoáveis e a nível económico têm menor custo comparativamente as *S-glass*. Contudo, em termos de propriedades de mecânicas as fibras *S-glass* apresentam melhores propriedades térmicas, como por exemplo, mais 40% de resistência à tração e com módulo de elasticidade à tração de 20% mais, levando a que, esta fibra seja a mais adequada para fabricação de compósitos de elevado desempenho (Dias Cardoso, 2021).

Na tabela 3 encontram-se as propriedades das fibras *E-glass* e *S-glass*.

Tabela 3. Propriedades típicas das fibras tipo E, tipo S Fonte: (Castro, 2013).

Propriedades	Vidro E	Vidro S
Densidade	2,6	2,49
Módulo de elasticidade (GPa)	73,0	85,5
Resistência à tração (MPa)	3400	4580
Deformação na rotura (%)	4,4	5,3
Coefficiente de expansão térmica ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	5,0	2,9
Diâmetro das fibras (μm)	3-20	8-13

2.3.1.2. Fibra de Carbono

As fibras de carbono são conhecidas devido aos seus elevados valores de resistência e rigidez e são utilizadas especialmente para aplicações industriais e elétricas (Dias Cardoso, 2021).

No mercado, existem dois tipos de fibras de carbono, consoante a percentagem de carbono que apresentam (80% e 95%) e ainda as fibras de grafite onde a percentagem de carbono pode chegar aos 99% utilizadas para aplicações que exigem um elevado desempenho, como é o caso da indústria aeroespacial e aeronáutica.

Relativamente aos processos de obtenção deste tipo de fibra, estas podem ser obtidas a partir:

- de celulose (*"Rayon fibers"*)
- do alcatrão (*"pitch"*)
- do poliacrilonitrilo (PAN) (Ferreira, 2015)

As fibras de carbono obtidas através do alcatrão apresentam propriedades mecânicas inferiores. Relativamente à obtenção de fibras de carbono a partir da celulose, por ser um processo que exige temperaturas elevadas, tornando-se dispendioso. Assim, o processo mais atual e conseqüentemente mais utilizado é o poliacrilonitrilo que através do processo de oxidação e posteriormente o processo de pirolise de filamentos de PAN, é possível convertê-los em filamentos de carbono para depois serem utilizados nos compósitos (Ferreira, 2015).

2.3.1.3. Fibra de Aramida

As fibras de aramida, designadas por *Kevlar* são fibras altamente cristalinas e no mercado são as que apresentam melhor relação resistência à tração/massa volúmica para fibras de reforço. Para além disso, garantem boa resistência ao impacto e flexibilidade, por isso, são utilizadas para o setor balístico, militar, automóvel, entre outros. Por serem quimicamente inertes, quando fabricadas para materiais compósitos requerem tratamento superficial de modo a melhorar o seu desempenho (Cao et al., 2021; Dias Cardoso, 2021).

Na tabela 4 encontram-se detalhadas as fibras sintéticas mais utilizadas no reforço de compósitos, bem como algumas propriedades importantes para a fabricação dos mesmos.

Tabela 4. Propriedades das fibras sintéticas mais utilizadas no fabrico de materiais compósitos (adaptado de Dias Cardoso, 2021).

Fibras	Massa volúmica (g/cm ³)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade à tração (GPa)
Fibra de vidro (<i>S-glass</i>)	2,48	4300	72,4
Fibra de carbono (elevado módulo de elasticidade)	1,90	2100	390,0
Fibra de carbono (elevada resistência à tração)	1,90	2500	240,0
Fibra de aramida (Kevlar 49)	1,45	3620	131,0

2.3.2. Fibras Naturais

Atualmente devido ao crescente desenvolvimento tecnológico, preocupação com o meio ambiente e com os danos causados pelo Homem, a substituição de materiais sintéticos por fibras naturais tem sido o foco de interesse por parte de indústrias e cientistas (Borsoi et al., 2011). Assim, a fabricação de compósitos que incorporem fibras naturais como o linho, juta, cânhamo, sisal, bambu, banana, algodão, ananás, entre outras, como reforço (Elanchezhian et al., 2016) têm vindo a ser uma alternativa de forma a reduzir o impacto ambiental. Estas unem inúmeras vantagens, isto é, para além de serem provenientes de fontes renováveis e serem biodegradáveis, quando comparadas com as fibras sintéticas, apresentam baixo custo, baixa massa volúmica e alta resistência à rigidez e rotura, resistência elétrica e isolamento térmico e acústico (Andrade Martins, 2018).

O uso de fibras naturais como reforço em materiais compósitos visa melhorar o desempenho dos polímeros, garantir boa estabilidade dimensional, boas propriedades mecânicas e reduzir o impacto ambiental (Borsoi et al., 2011). Contudo, apresentam algumas preocupações como é o caso da emissão de odores, absorção de água, baixa resistência à temperatura e pouca adesão entre fibras e matrizes (Castro, 2013).

2.3.2.1. Fibras Naturais Vegetais

No mundo dos compósitos, as fibras naturais mais utilizadas são as origem vegetal. Na figura 7 mostra-se a classificação.

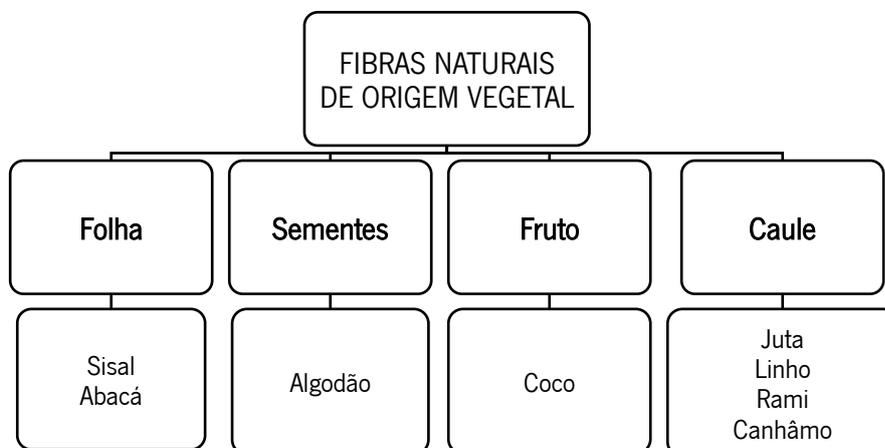


Figura 7. Classificação das fibras naturais de origem vegetal (adaptado de Castro, 2013).

As fibras vegetais são constituídas essencialmente por celulose (principal constituinte das fibras), hemicelulose e lenhina. Para além destes constituintes algumas podem ainda ter na sua composição pectina, ceras e gorduras.

A celulose é a principal responsável pelas propriedades mecânicas das fibras. É uma macromolécula linear, constituída por milhares de monómeros de glicose muito resistente a soluções alcalinas fortes e pouco resistente em meios ácidos e é moderadamente resistente a agentes oxidantes. A hemicelulose é muito hidrófila, solúvel em soluções alcalinas e pouco resistente a soluções ácida, contrariamente à lenhina que é pouco resistente a soluções alcalinas e resistente a ácidos (Kaith & I. Kaur., 2011).

As propriedades mecânicas das fibras estão intrinsecamente ligadas à quantidade de celulose e à orientação das microfibrilas de celulose (Castro, 2013) e a resistência à tração e o módulo de elasticidade das fibras aumenta consoante o aumento da quantidade de celulose. Relativamente ao ângulo de orientação das microfibrilas em relação ao eixo longitudinal, determina a rigidez das fibras. Assim as fibras vegetais são mais dúcteis quanto maior for o ângulo de orientação.

A principal vantagem das fibras naturais em comparação com as fibras de vidro são: boas propriedades mecânicas específicas devido à baixa densidade, recurso renovável, baixo custo e investimento, fácil processamento, boas propriedades térmicas, acústicas e reciclabilidade (Dittenber & Gangarao, 2012).

2.3.2.1.1. Fibra de Cânhamo

A fibra de cânhamo, figura 8, é extraída do caule das plantas e proveniente da espécie *Cannabis sativa* e são um exemplo de fibras naturais utilizadas para reforço de materiais poliméricos. O cultivo desta espécie de planta representa uma mais-valia em termos ecológicos, sendo que um hectare de plantas desta espécie absorve 2,5 toneladas de dióxido de carbono da atmosfera, no seu período de crescimento. Comparativamente as fibras de linho, as fibras de cânhamo são mais grossas, possuindo comprimentos de no mínimo 1,8 m. Em termos de propriedades mecânicas apresentam boa resistência à tração, alta tenacidade (20% maior que as fibras de linho), boa rigidez à abrasão e elevada durabilidade. Contudo, apresentam baixa extensão após a rotura. Para além disso não apresentam boa capacidade de resistir à humidade, em comparação com outras fibras naturais e degradam-se muito lentamente quando emersas em água (Castro, 2013; Nogueira Romão, 2003). A produção do cânhamo encontra-se distribuído por vários países, mas existem áreas onde a sua produção é mais intensiva, como por exemplo, no Canadá, China e Europa, sendo que, nestas diferentes áreas o cânhamo é fabricado para diversas aplicações (site: https://www.interchanvre.org/la_culture visitado a 20/05/2023).



Figura 8. Fibra de cânhamo. Site: <https://kayamind.com/fibras-do-canhamo-utilidades/> visitado a 20/03/2023.

A fibra de cânhamo é extraída do caule das plantas e proveniente da espécie *Cannabis sativa* e são um exemplo de fibras naturais utilizadas para reforço de materiais poliméricos. O cultivo desta espécie de planta representa uma mais-valia em termos ecológicos, sendo que um hectare de plantas desta espécie absorve 2,5 toneladas de dióxido de carbono da atmosfera, no seu período de crescimento. Comparativamente as fibras de linho, as fibras de cânhamo são mais grossas, possuindo comprimentos de no mínimo 1,8 m. Em termos de propriedades mecânicas apresentam boa resistência à tração, alta tenacidade (20% maior que as fibras de linho), boa

rigidez à abrasão e elevada durabilidade. Contudo, apresentam baixa extensão após a rotura. Para além disso não apresentam boa capacidade de resistir à humidade, em comparação com outras fibras naturais e degradam-se muito lentamente quando emersas em água (Castro, 2013; Nogueira Romão, 2003). A produção do cânhamo encontra-se distribuído por vários países, mas existem áreas onde a sua produção é mais intensiva, como por exemplo, no Canadá, China e Europa, sendo que, nestas diferentes área o cânhamo é fabricado para diversas aplicações (site: https://www.interchanvre.org/la_culture_visitado_a_20/05/2023).

As fibras de cânhamo e linho são conhecidas por serem as mais resistente, fazendo com que sejam as mais utilizadas para reforços de compósitos. Relativamente ao cânhamo, tem havido um crescimento exponencial da sua utilização ao longo destes anos. De acordo com o FAO (*Food and Agriculture Organisation*) a produção deste cresceu 50,000 toneladas em 2000 para quase mais de 90,000 toneladas em 2005 (Shahzad, 2012).

Os principais constituintes da fibra de cânhamo são a hemicelulose, pectinas, lignina e celulose e estes constituintes são os que definem as propriedades às fibras e encontram-se representados na figura 9 os constituintes das fibras de cânhamo.

Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Pectina (%)	Lignina (%)	Outros (%)
67.0	16.1	0.8	3.3	2.8
74.4	17.9	0.9	3.7	0.8
74.0	18.0	1.0	4.0	
55.0	16.0	18.0	4.0	7.0
76.0	11.5	1.3	3.2	
57-77			9-13	
75.1	<2		8.0	
70-74	17.9-22.4	0.9	3.7-5.7	0.8
75.6	10.7		6.6	
78.3			2.9	
76.1	12.3	1.6	5.7	3.3

Figura 9. Constituintes da fibra de cânhamo Fonte:(Shahzad, 2012).

(a)		(b)		
Properties	Values	Tensile strength (MPa)	Tensile modulus (GPa)	Elongation at break (%)
Length (ultimate) (mm)	8.3–14	690		1.6
Diameter (ultimate) (μm)	17–23	1235		4.2
Aspect ratio (length / diameter)	549	310–750	30–60	2–4
Specific apparent density (gravity)	1500	550–900	70	1.6
Microfibril angle (θ)	6.2	690		1.6
Moisture content (%)	12	895	25	
Cellulose content (%)	90	500–1040	32–70	1.6
Tensile strength (MPa)	310–750	920	70	
Specific tensile strength (MPa)	210–510	690–1000	50	1.0–1.6
Young's modulus (GPa)	30–60	920	70	1.7
Specific Young's modulus (GPa)	20–41	270–900	20–70	1.6
Failure strain (%)	2–4			

Figura 10. (a) propriedades físicas e mecânicas das fibras de cânhamo **(b)** propriedades de tração da fibra de cânhamo reportadas por diferentes autores Fonte: (Shahzad, 2012).

Na figura 10 estão apresentadas as propriedades físicas da fibra de cânhamo, bem como, as propriedades de tração referenciadas por diversos autores. Mais uma vez, é notada uma variação de valores. Esta fibra apresenta, alta resistência à tração, rigidez e baixa densidade o que faz com que sejam uma opção de reforço de compósitos. No entanto, por serem fibras naturais, apresentam uma forma não regular, superfícies não lisas, propriedades não uniformes e baixa resistência à absorção de água (Shahzad, 2012).

Na figura 11 encontra-se o preço de venda da fibra de vidro em comparação com algumas fibras vegetais. Estas apresentam diferentes gamas de valores comerciais. Ainda assim, as fibras naturais são mais acessíveis a nível monetário que as fibras sintéticas, o que leva a que os custos de matéria-prima sejam mais reduzidos. Relativamente às fibras vegetais, as fibras de linho, por serem fibras longas, terem um processo de extração complexo e garantirem boas propriedades são as que tem um preço de venda mais elevado. O preço de venda do cânhamo é mais barato que a última fibra mencionada, mas ainda assim, é possível dentro da mesma espécie de plantas, os preços de vendas serem diferentes. Estas diferenças de preço são justificadas pela qualidade da fibra e resistência mecânica (Bourmaud et al., 2018). Assim, cada vez mais, alinhado as propriedades mecânicas oferecidas pelo cânhamo e devido ao preço de venda do mesmo, há um interesse em desenvolver mais cânhamo de modo a tornar os processos de fabricação de compósitos, por exemplo, mais barato quando comparado com a fabricação de compósitos em linho.

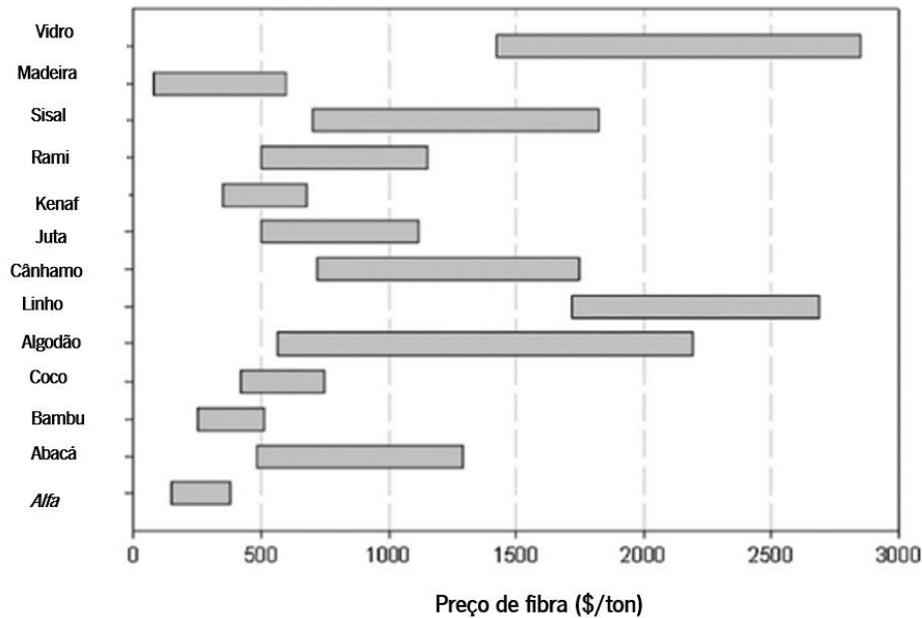


Figura 11. Comparação do preço de venda das fibras de vidro e algumas fibras naturais Fonte: (Bourmaud et al., 2018).

2.3.2.2. Limitações e Desvantagens do uso de Fibras Naturais em Compósitos

Os compósitos apesar de serem úteis e apresentarem vantagens nas indústrias que os utilizam, tal como todos os materiais, apresentam aspetos negativos e algumas limitações.

Assim, comparativamente a materiais como metais ou polímeros, os compósitos têm custos superiores; em termos de produção de componentes ou produtos há uma cadência devido aos processos de produção demorados; existem limitações de design e geometria por falta de testes e informação; alguns compósitos tem um excesso de absorção de humidade, o que leva a que a sua estrutura e durabilidade esteja comprometida ao longo dos anos e a resistência térmica e química são determinadas pela resistência da matriz (Alexandra & Faria, 2021). Os compósitos fabricados com fibras naturais apresentam inúmeras vantagens quando comparados aos sintéticos. No entanto, as mesmas estão limitadas em alguns aspetos, tais como, o desempenho mecânico, os limites de temperatura de processamento e a suscetibilidade a condições húmidas e degradação ambiental (Melo Tomar, 2018).

(Kamal et al., 2014) e outros autores, estudaram a viabilidade da aplicação de materiais com fibras naturais e afirmam que existem limitações ao usar materiais naturais no que toca à sua capacidade de resistir a diferentes condições e apresentarem fraca resistência ao fogo.

As propriedades físicas e mecânicas das fibras dependem principalmente dos seguintes fatores: teor de celulose, lignina, hemicelulose, pectina, ceras e teor de água; geometria da célula elementar; ângulo do eixo da hélice da fibra e geralmente, como não são filamentos únicos têm variadas formas físicas. Para além disso, o comprimento e diâmetro da fibra deriva da sua constituição. De forma a evitar os problemas mencionados, as fibras são submetidas a tratamentos da superfície (químicos e físicos), aditivos e revestimentos no material (Jauhari et al., 2015). Os tratamentos químicos podem ser do tipo alcalino, silano, aditivos repelentes de água, peróxidos, entre outros e observou-se que estes tratamentos melhoram significativamente as propriedades mecânicas das fibras naturais porque modificam a estrutura cristalina e removem hemicelulose e lignina da estrutura da fibra. No que se refere a tratamentos físicos, o mais utilizado na modificação da superfícies das fibras naturais é o tratamento com plasma. Para além disso, pode melhorar a rugosidade da superfície resultando em uma melhor adesão entre fibra/matriz (Cruz & Fangueiro, 2016).

2.4. Fabricação do Fio Híbrido: Fiação Por Enrolamento

Atualmente, a maior parte dos compósitos são feitos à base de resinas termoendurecíveis, mas devido à sua dificuldade de reciclagem, as utilizações de resinas termoplásticas têm crescido exponencialmente. Estas são recicláveis e para além disso, o tempo e custos de produção são mais reduzidos. Porém a impregnação pode se revelar mais difícil devido à sua viscosidade (Baghaei et al., 2013; Jiang & Chen, 2012).

Assim, este projeto diz respeito a reforços produzidos com de compostos combinados de fibra natural (cânhamo) e polímero termoplástico (PLA) onde as fitas de fibras naturais e as fitas de fibras termoplásticas são estiradas conjuntamente de forma a misturar os dois tipos de fibras. Esta tecnologia visa melhorar o desempenho mecânico do compósito, em particular a sua rigidez à flexão, uma vez que, o fio combinado por mistura íntima, as fibras encontram-se alinhadas no eixo (Karger-Kocsis & Karger-Kocsis, 1998; Zhang & Miao, 2010).

O método de fiação utilizado foi criado no final da década de 1970, é conhecida como fiação paralela de fuso-oco, onde se utilizada a máquina *Hollow Spindle* (figura 12). Esta técnica permite a fiação de fibras descontínuas sem torção que serão envolvidas por um filamento, como está esquematizado na figura 13 (Zhang & Miao, 2010).

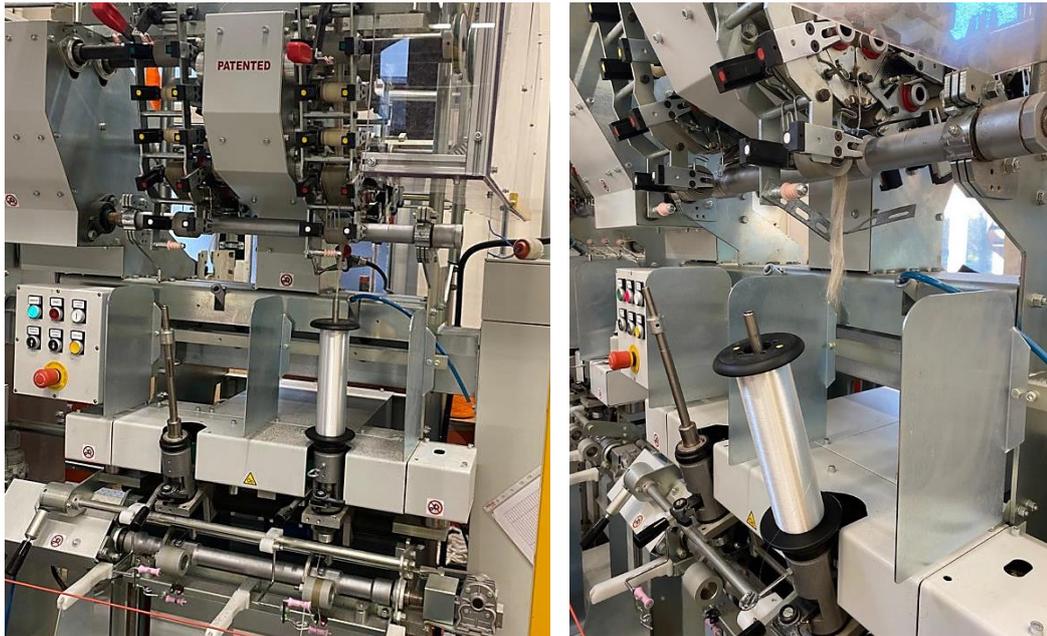


Figura 12. Hollow Spindle nos laboratórios da GEMTEX, France Fonte: Autor.

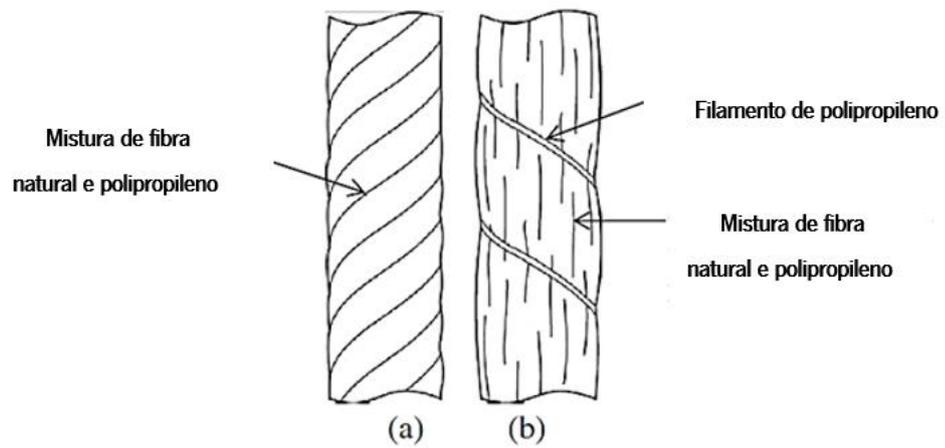


Figura 13. Estrutura dos fios. (a) fio convencional torcido. (b) Fio híbrido enrolado com filamento contínuo. Fonte:(Zhang & Miao, 2010)

2.5. Processos de Fabrico de Compósitos

A laminagem ou moldação é a técnica de processamento de material para a fabricação de um compósito. A moldação é o resultado da junção de camadas da matriz com tipos de fibras, que atuam como reforço, formando o compósito (Alexandra & Faria, 2021).

De uma forma geral e de acordo com o esquema da figura 14, existem três fases para a formação de um laminado:

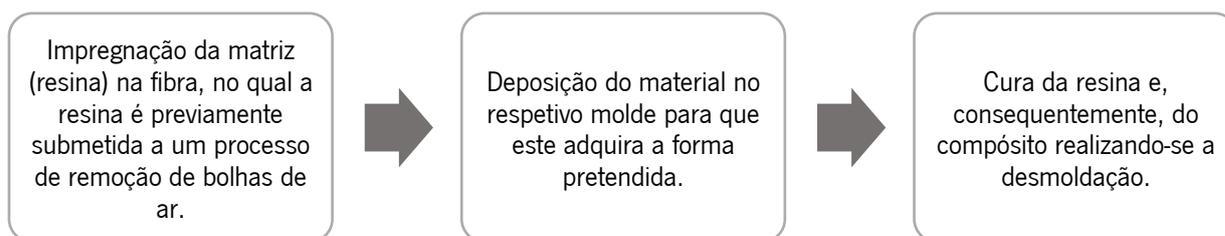


Figura 14. Etapas de moldação para formação de compósitos Fonte:(Alexandra & Faria, 2021).

O processamento de materiais compósitos incorporados com fibras naturais e matrizes poliméricas pode ser realizado por vários métodos, e depende de vários fatores, tais como do tipo de reforço (fibras longas ou curtas) e do tipo de matriz polimérica (termoendurecível ou termoplástica), das quantidades a produzir, exigências requeridas ao componente e de fatores económicos (Melo Tomar, 2018).

Os processos de fabricação mais usados para o fabrico de compósitos são: **moldação por compressão, moldação por transferência de resina, moldação por injeção, e moldagem por infusão a vácuo** (Balla et al., 2019).

2.5.1. Moldação Manual

A moldação manual é o processo mais antigo na produção de polímeros termoendurecíveis reforçados com fibras e é o método mais económico utilizado para a produção de compósitos de fibras de vidro.

Neste processo, a fase inicial é definida pela preparação do molde onde é realizado o empilhamento das camadas de reforço. Assim, é incorporado um agente desmoldante sobre o molde, com o objetivo de facilitar a desmoldagem após a cura da resina. Posteriormente, as camadas de tecido, manta ou fibras são empilhadas e impregnadas de resina, uma a uma no molde aberto. Relativamente à impregnação, está é efetuada manualmente com rolos de forma a pressionar as camadas para eliminar os excessos de resina e eventuais bolhas de ar. Após estar

concluída o empilhamento de todas as camadas, é incorporado uma placa de moldação superior de forma a permitir um bom acabamento na superfície exterior do compósito (Castro, 2013).

As vantagens da moldagem manual são sobretudo a simplicidade, reduzido investimento inicial, poucas restrições à geometria das peças. Em termos de desvantagens, é maioritariamente a quantidade de mão de obra, habilidades e cuidado por parte do operário e baixa produtividade (Rodrigues Pereira, 2017).

No caso particular da utilização do processo de moldação manual para o fabrico de compósitos reforçados com fibras, a percentagem da mesma depende das características anatómicas das fibras utilizadas. Caso as fibras utilizadas possuam um lúmen grande e paredes celulares finas, a percentagem de fibras pode ser aumentada com a aplicação de pressão, levando a redução de vazios no interior da fibra. Para além disso, outro fator a ter em conta, é a secagem das fibras, de modo a evitar fraca molhabilidade e a retenção de humidade no interior no compósito (Castro, 2013).

Na figura 15 encontra-se uma representação esquemática do processo de moldação manual.

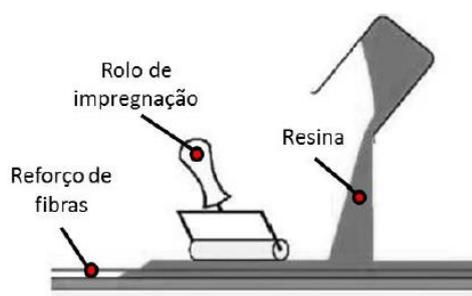


Figura 15. Representação esquemática do processo de moldação manual Fonte: (Castro, 2013).

2.5.2. Moldação por Compressão a Quente

Neste processo dá-se a compressão do reforço juntamente com a matriz que é adicionada sob a forma líquida por cima do reforço. No processo de compressão a frio, os pratos superiores e inferiores são aquecidos a uma temperatura desejada do processo. A moldagem por compressão, utilizada moldes metálicos devido às temperaturas e pressões atingidas ao longo do processo. No que toca ao ciclo de produção, este depende das condições do compósito a produzir, ou seja, variam com o tipo de matriz: se for termoplástica para além do aquecimento o arrefecimento deverá ser possível, mas, caso o polímero seja de natureza termoendurecível (onde se criam

ligações cruzadas definitivas na polimerização dos monómeros) estes cuidados já podem ser desprezados.

Nesta técnica, as peças obtidas incorporam maiores quantidades de reforço, o que garante melhores propriedades mecânicas conseguidas. As velocidades de produção, tolerâncias dimensionais e repetibilidade do processo aumentam significativamente relativamente ao processo de moldação manual.

2.5.3. Moldação por Injeção

A moldagem por injeção, na área dos compósitos, é um processo inovador e embora seja uma técnica recente comparativamente a outras técnicas, permite a produção de peças mais complexas em grandes quantidades. A matéria-prima para a moldação por injeção está na forma granular. Relativamente às fibras naturais que são frequentemente utilizadas para esta técnica são fibras curtas de modo a permitir a decomposição durante o processo. Assim, o material é aquecido e transportado para o molde, com a ajuda de uma extrusora de rosca. Posteriormente, dá-se a compactação do material, e os materiais fundidos são injetados no molde pré-aquecido de forma a formar a peça composta e a pressão é mantida no molde até que a peça solidifique e arrefeça (Balla et al., 2019).

Atualmente, este processo é utilizado para produzir compósitos poliméricas reforçados com fibras de cânhamo, linho, juta e *kenaf*.

2.5.4. Moldação por Transferência de Resina (RTM)

A moldagem por transferência de resina (RTM), figura 16, está inserida na família de moldagem líquida de compósitos (LCM). Esta compreende um conjunto de técnicas da fabricação de materiais compósitos onde uma resina termo rígida é injetada em um molde fechado impregnando o reforço. Este processo engloba três etapas: o pré-processamento, processamento ou injeção e o pós processamento. No pré-processamento o reforço é preparado e posicionado no molde. Na etapa de injeção, a resina preenche o molde e impregna o reforço fibroso e na última etapa, correspondente ao pós-processamento ocorre a cura à resina e desmoldagem (Julie et al., 2018). Esta técnica possibilita o processamento de componentes próximos da sua forma final com bom acabamento nas duas superfícies. Comparativamente ao processamento por injeção e por compressão, este permite a utilização de reforços nos mais variados formatos e assim criar vários componentes estruturais. Permite ainda a produção de componentes com custos inferiores devido

aos custos das ferramentas serem menos dispendiosos. Neste processo temos como variáveis o fluxo de resina, o processo de cura e a transferência de calor (Rodrigues Pereira, 2017).

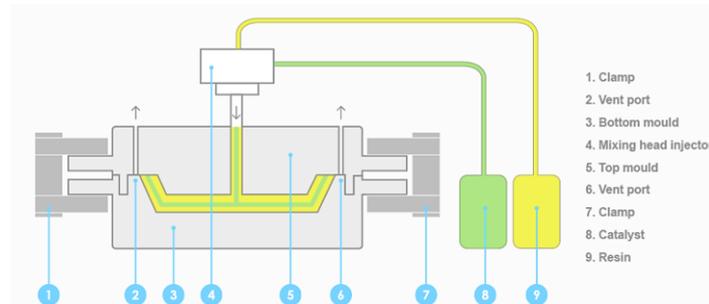


Figura 16. Esquema simplificado da moldação por transferência de resina;
<https://bfginternational.com.br/pt/compositos/processos/moldagem-transferencia-resina-rtm> (20/01/2023)

2.5.5. Moldação por Infusão a Vácuo

A técnica de moldação por infusão a vácuo que se encontra representada na figura 17, apresenta semelhanças ao processo de moldação por transferência de resina. A diferença entre estas duas técnicas deve-se ao facto de moldação por infusão a vácuo o molde não apresenta duas partes rígidas, mas sim um molde rígido e outro molde flexível (saco de vácuo). Este processo consiste na deposição de uma pré-forma seca sobre o molde rígido com uma malha de fluxo que cobre por um todo a superfície do reforço, ajudando a distribuição e aceleração do fluxo da resina. A entrada e a saída resina são efetuadas através de tubos espirais, canais de distribuição de resina que são posicionados no molde. As principais vantagens deste processos são: a elevada fração de volume de fibra que se pode alcançar; baixa quantidade de espaços vazios e elevada impregnação das fibras. Para além disso, garantem ao compósito elevadas propriedades mecânicas (Abreu Freire Lopes, 2020; Assunção, 2021).

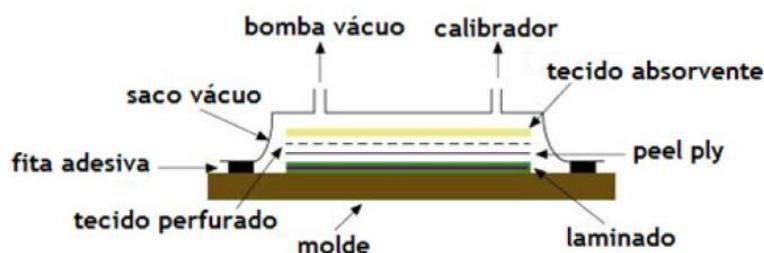


Figura 17. Esquema representativo do processo de Moldação por Infusão a Vácuo Fonte:(Abreu Freire Lopes, 2020).

2.5.6. Enrolamento Filamentar

O enrolamento filamentar é um processo automatizado e é ideal para fabricação de compósitos poliméricos. Nesta técnica os filamentos de reforço passam por um banho contendo a resina líquida e são bobinados sobre um rolo cilíndrico, formando um tubo constituído por camada de fibras conjugadas por uma matriz da resina. Após a bobinagem a cura da resina é realizada em autoclave, onde se controla parâmetros como a temperatura, pressão e tempo. As vantagens associadas ao enrolamento do filamento são: a alta velocidade em depositar as fibras e alta repetibilidade das fibras sobre o rolo cilíndrico; facilidade em usar matrizes termoplásticas e termoendurecíveis bem como fibras secas ou pré-impregnadas; fabricação de estruturas complexas e capacidade de obtenção de peças com alta fração volumétrica de fibra (Sales Guimarães, 2021). A figura 18 apresenta um esquema representativo do processo de enrolamento filamentar húmido.

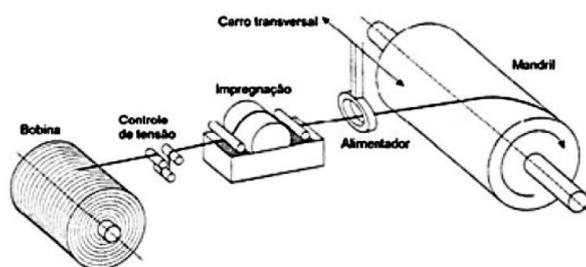


Figura 18. Enrolamento filamentar húmido Fonte: (Sales Guimarães, 2021).

2.5.7. Termocompressão

Os processos mais utilizados para a produção de biocompósitos com resinas termoplásticas são os processos de compressão porque reduzem os tempos de produção. Nesta técnica, o material é inserido em uma prensa aquecida, onde o ciclo de termocompressão pode ser dividido em três frases. A primeira fase, é a fase de aquecimento, onde a temperatura aumenta gradualmente até atingir a temperatura de fusão de modo a permitir que o polímero termoplástico funda e atinga a viscosidade ideal para impregnar nas fibras. A segunda fase, consiste na aplicação de pressão de modo a permitir que a resina penetre no interior das fibras nesta fase, havendo um aumento progressivo da pressão ao longo do processo de modo a melhorar as propriedades mecânicas do compósito. Por fim, a terceira fase, consiste no arrefecimento, a temperatura diminui gradualmente, e em seguida há a remoção da pressão. Na figura 19, encontra-se esquematizado

o processo de termocompressão utilizado para a fabricação de compósitos termoplásticos (Campbell, 2010; Corbin; Anne-Clémence, 2020).

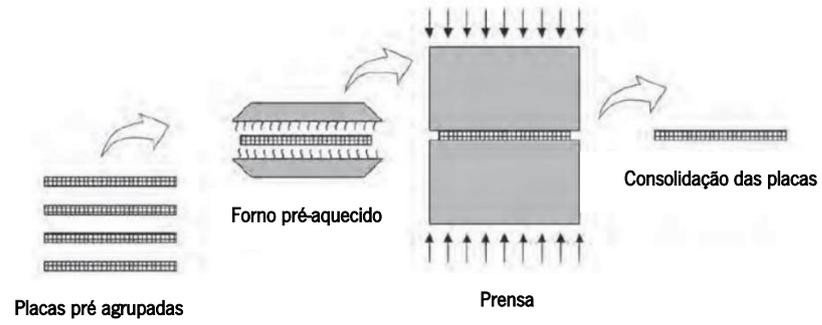


Figura 19. Processo de termocompressão Fonte: (Campbell, 2010).

3. Materiais e Métodos

Neste capítulo descreve-se a metodologia usada e as várias etapas de processo envolvidas na formação dos compósitos.

Na fase inicial da elaboração deste projeto, procedeu-se à caracterização do PLA do e cânhamo em rama. Relativamente ao multifilamento de PLA foi produzido no laboratório da GEMTEX e foi utilizado como a matriz do material compósito. O PLA é um polímero termoplástico com densidade de cerca de 1.24 g/cm^3 , derrete a uma temperatura entre $160 - 170 \text{ }^\circ\text{C}$ e uma temperatura de transição vítrea de $55 - 60^\circ\text{C}$.

Na figura 20 está representado o microscópio utilizado para a determinação da massa linear do cânhamo.



Figura 20. Microscópio utilizado para a determinação da massa linear do cânhamo. Fonte: Autor.

Na tabela 5 encontram-se as propriedades dos **materiais iniciais**:

Tabela 5. Propriedades do cânhamo e PLA iniciais.

Fio	Densidade (g/cm^3)	Massa Linear (dTex)
PLA	1,24	$1,99 \pm 0,18$
Cânhamo	1,48	4

3.1. Fabricação do Fio híbrido Cânhamo/PLA

3.1.1. Preparação das Fitas:

Nesta etapa o objetivo foi a preparação de uma mistura PLA/Cânhamo de 4 g/m para posteriormente produzir o fio. Para isso, utilizou-se o *intersecting* onde se realizaram duas passagens de modo a obter um material mais homogêneo.

Tabela 6. Massa linear das fitas de PLA e cânhamo.

	Cânhamo	PLA
Massa linear (tex)	2500	2500

Assim foi possível formar fitas homogêneas através da mistura de diferentes material. Esta etapa garante fitas mais resistentes, mais alinhadas, elimina fibras soltas assim como melhora as propriedades mecânicas das fitas. A primeira passagem do consistiu na entrada de 4 fitas de PLA e 4 fitas de Cânhamo cada uma com 400 tex.

Assim, na entrada,

$$4\text{PLA} + 4\text{Cânhamo} = (4 \times 2,5) + (4 \times 2,5) = 20 \text{ g/m}$$

Pelo que, calculando a estiragem e sabendo que queríamos à saída uma massa de 4 g/m,

$$\text{Estiragem} = \frac{\text{Massa entrada}}{\text{Massa de saída}} = \frac{20}{4} = 5 \quad (1)$$

De acordo com a figura 21, e tendo em conta os valores do *intersecting*, o valor de estiragem utilizado foi 5,2, pois o valor mais perto de 5 é 5,2, na posição H-8.

1-8 A-H	1	2	3	4	5	6	7	8
A	15,0	14,7	14,4	14,1	13,9	13,6	13,4	13,2
B	13,0	12,8	12,5	12,3	12,1	11,8	11,6	11,4
C	11,3	11,1	10,9	10,7	10,5	10,3	10,1	9,9
D	9,8	9,6	9,5	9,3	9,1	8,9	8,8	8,6
E	8,6	8,4	8,3	8,1	8,0	7,8	7,7	7,6
F	7,6	7,5	7,3	7,2	7,1	6,9	6,8	6,7
G	6,6	6,5	6,4	6,3	6,1	6,0	5,9	5,8
H	5,9	5,8	5,7	5,6	5,5	5,4	5,3	5,2

Figura 21. Tabela utilizada para saber o valor da estiragem no *intersecting*. Fonte: Autor.

Assim, o objetivo após a primeira passagem seria obter uma fita com 3,85 g/m, ou seja uma fita com 3850 tex.

$$\text{tex saída: } \frac{20 \text{ g/m}}{5,2 \text{ g/m}} = 3,85 \text{ g/m.}$$

Para determinar a massa linear da fita foi utilizado o aparelho da figura 22 para medir 5 metros após o qual foi



Figura 22. Aparelho utilizado para medir 5 metros de comprimento de fita Cânhamo/PLA na primeira passagem. Fonte: Autor.

Resultados práticos da primeira passagem:

Tabela 7. Massa linear obtida após a primeira passagem.

Massa obtida (g)	Comprimento (m)	Ktex ($\frac{g}{m}$)
19,1	5	3,8
18,6	5	3,72
19,1	5	3,8
19	5	3,8

Média: 3,8 g/m

Na segunda passagem, o objetivo foi obter na saída 3 g/m. Assim, foi efetuado mais uma passagem no *intersecting* de 5,2 de modo a obter o valor pretendido e para além disso, uma fita PLA/Cânhamo mais homogênea.

Após a segunda passagem, obteve-se uma fita com 50% de PLA e 50% de Cânhamo com 2,9 ktex.

$$\text{Estiragem} = \frac{4 \times 3,8}{3} = 5$$

3.2. Fiação

No processo de fiação, produziram-se 4000 metros de fio de modo que fosse possível caracterizar fisicamente e produzir compósitos. Para isso utilizou-se a fita de PLA/Cânhamo e multifilamento de PLA. A máquina utilizada foi a *Hollow Spindle Fantaroc- fil ST3*, como está apresentada na figura 23.

Utilizou-se um multifilamento de PLA de 100 dTEX e uma mistura PLA/Cânhamo de 2,9 Ktex.



Figura 23. *Hollow Spindle Machine*. Fonte: Autor.

Durante o processo de fiação, o principal problema foi o enrolamento da fita em torno dos cilindros. Assim, ao longo do processo foi necessário desenvolver um sistema que evitasse que a fibra ficasse retida nos cilindros. Para isso, inicialmente introduziu-se uma peça anti estática e ainda foi necessário colocar pó talco para diminuir o atrito.

Os parâmetros da *Hollow Spindle* estão apresentados na tabela 8:

Tabela 8. Parâmetros da *Hollow Spindle*.

Top spindle (rpm)	Torção (vmp)	R/L	Feed	R/L	Draft
2500	200	R	1	R	5

3.3. Produção do Tecido

3.3.1. Preparação à tecelagem

Na parte inicial, a preparação à tecelagem utilizou-se a urdideira que se encontra na figura 24. O objetivo inicial foi produzir um tecido com 70 cm de largura com um total 420 fios na direção da teia.



Figura 24. Objetivo inicial para a urdissagem programadas na urdideira.

No entanto, durante o processo de urdissagem não foi possível colocar 420 fios porque não existia fio suficiente.

Por isso, diminui-se a largura para 40 cm e como o objetivo era obter um tecido de 6 fios/cm o número de fios necessários foram 240 fios.



Figura 25. Processo de urdissagem e preparação da teia.

3.3.2. Preparação à tecelagem e tecelagem propriamente dita

Após a urdissagem passou-se ao remeter. Esta tem como função introduzir os fios da teia no tear de acordo com o debuxo pretendido (cetim de 6, figura 26) Após o fim deste processo, efetuou-se a passagem dos fios através do pente de acordo com a densidade pretendida (figura 27). Por fim, procedeu-se à tecelagem sendo esta efetuada manualmente no tear *Leclerc. Weavebird*.

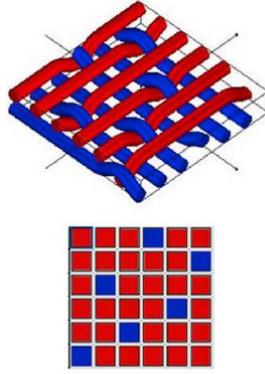


Figura 26. Esquematização do Cetim 6
Fonte: (Corbin et al., 2020).



Figura 27. Inserção dos fios da teia no tear. Fonte: Autor.

3.4. Compósitos

Para demonstrar as potenciais aplicações do cânhamo no contexto industrial criou-se um compósito Cânhamo/PLA sem a necessidade de adição de uma matriz, visto que, por se tratar de um fio que tinha na sua composição PLA, serviu de reforço e matriz. Assim, nesta fase produziram-se os compósitos e para isso cortou-se o tecido em quadrado 30x30 cm, de acordo com a figura 28. No total, foram cortadas 12 amostras de modo a criar 6 compósitos: 2 na direção teia, 2 na direção trama e 2 na direção teia e trama.



Figura 28. Molde de corte dos compósitos; Amostras cortadas para a etapa de termocompressão. Fonte: Autor.

Procedeu-se então à preparação da máquina de termocompressão apresentada na figura 29. Esta foi colocada à temperatura de 180°C e preparou-se as duas primeiras placas inseridas no meio de duas placas metálicas previamente limpas. A temperatura de fusão do PLA é cerca de 160-170°C e a temperatura de degradação do cânhamo é de 260°C. No processo foi utilizada a temperatura do processo (180°C) garantido nos primeiros 5 minutos uma pressão de 0 bar, após os 5 minutos aumentou-se novamente a pressão para 25 bar por 1 minuto e por fim, subiu-se a pressão a 60 bar por mais 2 minutos. Após isso, diminui-se a pressão para 0 bar e esperou-se o arrefecimento da máquina até os 110°C.



Figura 29. Máquina de termocompressão. Fonte: Autor.

Após estar completo a elaboração dos compósitos, deixou-se arrefecer 15 minutos. Por fim obteve-se 6 compósitos, representados na figura 30.

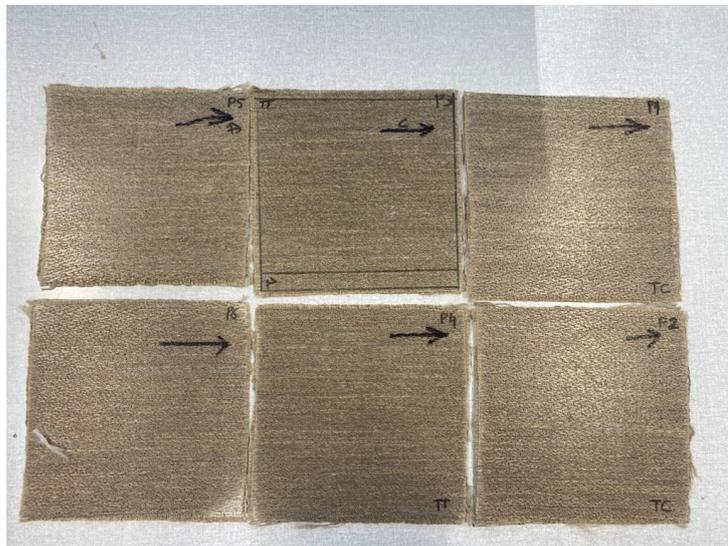


Figura 30. Compósitos. Fonte: Autor.

4. Análise e Discussão dos Resultados

4.1. Determinação da Massa Linear do PLA e Cânhamo

A determinação da massa linear do PLA foi segundo a norma NF EN ISO 1973 (1996), no aparelho Vibroscópio.

Na tabela 9 encontra-se os resultados obtidos na massa linear do PLA.

Tabela 9. Massa linear do PLA determinada pelo auxílio do Vibroscópio.

AMOSTRAS	PLA (dTEX)
1	1,86
2	1,83
3	1,9
4	2,48
5	2
6	2,01
7	1,96
8	2,02
9	1,98
10	1,94
MÉDIA	1,998±0,181

Relativamente à determinação da massa linear do cânhamo, por ser uma fibra de origem natural recorreu-se ao uso do microscópio e o resultado obtido encontra-se na tabela 10.

Tabela 10. Massa linear do cânhamo.

Amostras	Média do diâmetro (μm)
	23,1 ± 6,5

4.2. Caracterização do Fio

4.2.1. Massa linear

A massa Linear do fio Cânhamo/PLA foi determinada segundo a norma NF EN ISO 2060 e encontra-se na tabela 11.

Tabela 11. Massa linear do fio híbrido.

Amostras	Massa (g)	Comprimento (m)	tex
1	11,305	2	565,25
2	11,252	2	562,6
3	11,506	2	575,3
4	10,715	2	535,75
5	10,921	2	546,05
Média	11,14 ±0,3	2	556,99 ±15,9

4.2.2. Força e Extensão à rotura

O objetivo deste teste é determinar a força máxima à rotura (N) para posteriormente se determinar a tenacidade (cN/Tex) e a extensão à rotura (%). O aparelho utilizado foi o *MTS Criterion™ Model 43* com carga de 10 kN segundo a norma NF EN ISO 2062:2010-01. Os parâmetros utilizados foram: comprimento de 200 mm e uma velocidade de 200 mm/min.

Tabela 12. Resultados do teste força e extensão à rotura.

	Força Máxima (N)	Extensão à rotura (%)
Média	33,96 ± 2,71	21,17 ± 4,83
CV (%)	7,98	22,82
Tenacidade (cN/Tex)	6,1	-

As propriedades mecânicas do fio híbrido estão apresentadas na tabela 12. De modo a ser possível usar o fio híbrido para a tecelagem o mesmo teria que ter uma tenacidade de aproximadamente entre 10 a 15 cN/Tex (Corbin et al., 2019) de modo a evitar quebras durante a tecelagem. Apesar do valor de tenacidade ter sido inferior ao que se encontra na literatura, o fio fabricado pode ser utilizado na tecelagem graças ao uso multifilamento de PLA que ajuda a “proteger” as fibras durante a tecelagem.

4.3. Caracterização do Tecido

4.3.1. Contração do Tecido

Devido ao cruzamento dos fios de teia e trama de acordo com o debuxo, o tecido contrai, visto que, os fios de teia e trama são orientados em duas direções perpendiculares, quando se aplica

uma tensão numa das direções ocorre uma extensão originando uma contração no tecido na direção contrária.

A contração é influenciada por diversos fatores, tais como: tensão exercida na teia e trama durante o processo de tecelagem, debuxo do tecido, espaçamento entre os fios, rigidez, entre outros (Machado das Neves, 2021).

Este ensaio foi realizado segundo a norma NF G07-316 97, onde se retirou um fio e mediu-se o comprimento e calculou-se segundo a fórmula.

$$C(\%) = \frac{\text{Comprimento fio (cm)} - \text{Comprimento do tecido (cm)}}{\text{Comprimento do fio}} \times 100 \quad (2)$$

Tabela 13. Resultados do teste de contração.

Trama			Teia		
Comprimento inicial (cm)	Comprimento do fio (cm)	Contração (%)	Comprimento inicial (cm)	Comprimento do fio (cm)	Contração (%)
10	10,4	3,8	10	10,3	2,9
10	10,3	2,9	10	10,4	3,8
10	10,4	3,8	10	10,3	2,9
10	10,4	3,8	10	10,4	3,8
10	10,4	3,8	10	10,3	2,9
10	10,45	4,3	10	10,4	3,8
10	10,5	4,8	10	10,4	3,8
10	10,5	4,8	10	10,4	3,8
10	10,5	4,8	10	10,3	2,9
10	10,5	4,8	10	10,4	3,8
Média (%)	4,2		Média (%)	3,5	
Desvio-padrão	0,6		Desvio-padrão	0,5	

Estes valores traduzem a ondulação do fio no tecido e com os mesmos é possível explicar a deformação ocorrida durante os testes de tração. Assim, quanto maior é a contração maior são os valores de deformação do tecido.

4.3.2. Contextura à Teia e à Trama

Tabela 14. Densidade dos fios de teia e trama.

Direção teia		Direção trama	
	Nº de fios/cm		Nº de passagens/cm
1	6	6	5
2	6	7	5
3	6	8	5
4	6	9	5
5	6	10	6
Média	6	Média	5,2 ±0,45

Durante o processo de urdissagem colocou-se precisamente 240 fios e 40 cm de largura de modo a obter 6 fios por cm. Durante o processo de inserção dos fios de teia nas puas do pente do tear assegurou-se os 6 fios por cm. No entanto, devido ao processo de tecelagem ter sido manual durante o mesmo ocorreram erros, e por isso, não foi possível garantir os 6 fios/cm na direção trama.

4.3.3. Determinação da Espessura

A espessura do tecido foi medida segundo a norma ME ISO 5084 no aparelho apresentado na figura 31. Foram realizados 10 ensaios. Na tabela 15 encontram-se os valores.



Figura 31. Aparelho de medição da espessura. Fonte: Autor.

Tabela 15. Valores de espessura em mm.

Amostras	Espessura (mm)
1	2,47
2	2,66
3	2,8
4	2,53
5	2,58
6	2,38
7	2,33
8	2,30
9	2,69
10	2,47
Média	$2,5 \pm 0,2$
CV (%)	8

4.3.4. Teste da Permeabilidade ao Ar ($l/m^2/s$)

A permeabilidade ao ar (em $L/m^2/s$) é determinado de acordo com a norma NF EN ISO 9327 e permite calcular a quantidade de ar que passa através de um tecido. Quanto mais poroso o tecido, mais fácil é a passagem de ar. O teste de permeabilidade ao ar foi segundo a norma NF EN ISO 9237 (1995) com uma área de superfície de 20 cm^2 , temperatura de 20°C e uma pressão de 200 Pa e foi realizada no aparelho representado na figura 32.

Na tabela 16, estão apresentados os resultados obtidos.

Tabela 16. Resultados do teste de permeabilidade ao ar nos tecidos.

Ensaio	Permeabilidade ao ar ($l/m^2/s$)
1	530
2	410
3	488
4	444
5	433
Média	$461 \pm 47,86$
CV (%)	10,38



Figura 32. Aparelho utilizado para a realização do teste de permeabilidade ao ar. Fonte: Autor.

Os resultados obtidos na caracterização do tecido quanto à espessura vão de acordo com o esperado, dado à grossura do tecido em questão. Já, os valores de permeabilidade ao ar são baixos, o que significa que o ar tem dificuldade em atravessar a estrutura do tecido, indicando a compactação do mesmo.

4.3.5. Determinação da massa por unidade de superfície (g/m^2)

A determinação da massa por unidade de superfície foi utilizando uma régua com as dimensões 300x50 como se encontra demonstrado na figura 33. Para a determinação da mesma foi necessário ainda determinar a massa das 10 amostras. Os resultados obtidos encontram-se na tabela 17.

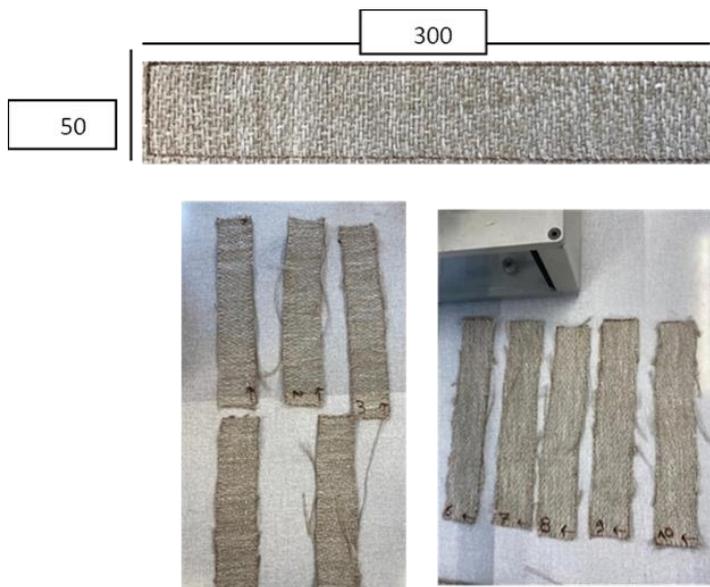


Figura 33. Amostras utilizadas para a determinação da massa por unidade de superfície. Fonte: Autor.

Tabela 17. Resultados da massa por unidade de superfície (g/m^2).

Amostras	Massa por unidade de superfície (g/m^2)
1	568,33
2	585,07
3	586,53
4	580,87
5	627,60
6	607,67
7	575,33
8	586,80
9	626,00
10	596,13
Média	594\pm 20,3

4.3.6. Teste de Flexão

O teste de flexão tem como objetivo a determinação da rigidez do tecido. A fórmula utilizada para o cálculo da rigidez à flexão foi obtida segunda a norma ISO 9073-7:1995 (F).

Para obter os valores do comprimento de flexão (C) foi necessário colocar o tecido no suporte sob a régua e fazê-lo deslizar. O teste foi dado como concluído quando a ponta suspensa tocou no suporte, registrando-se o comprimento de flexão. Realizou-se um total de 40 ensaios, 10 para cada uma das direções (teia e trama). Estes 20 ensaios foram divididos ainda, em face e avesso, ou seja, 10 para cada um e ainda nos dois sentidos. A figura 34 diz respeito ao equipamento utilizado e os resultados encontram-se nas tabelas 18 e 19.

$$G = m (g/m^2) * C^3(cm) * 10^{-3} (mN.cm) \quad (3)$$

(C -L/2 com L sendo o comprimento do tecido até o mesmo cair e **m** sendo massa por unidade de superfície)

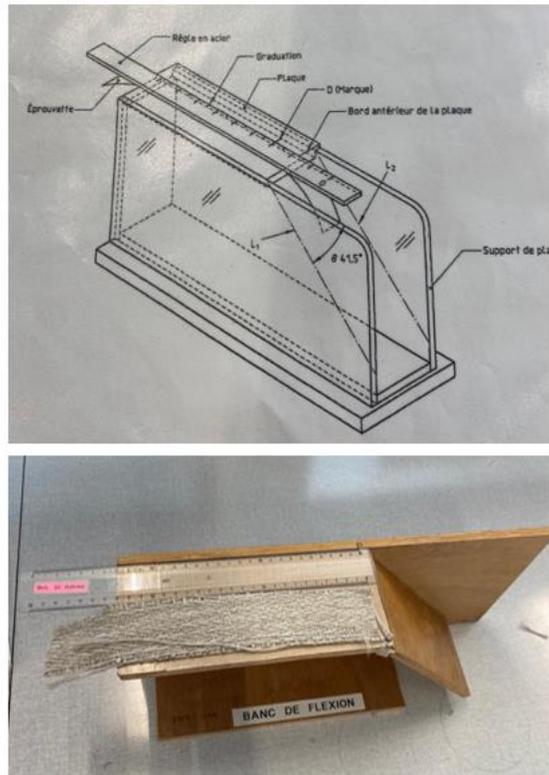


Figura 34. Material utilizado para o teste de flexão. Fonte: Autor.

Tabela 18. Resultados do teste de flexão na direção da teia.

Direção teia				
	Frente		Verso	
Amostras	Sentido (esquerdo)	Sentido (direito)	Sentido (esquerdo)	Sentido (direito)
1	12	10	12	13
2	11	12	13	13
3	9	11,5	12	13,5
4	11	11,5	13,5	12,5
5	12	11,5	13,5	13
Média	11	11,3	12,8	13
Média (em cm)	$12,03 \pm 1,14$			
Rigidez (mN.cm)	$132,4 \pm 34,7$			

Tabela 19. Resultados do teste de flexão na direção da trama.

Direção Trama				
Amostras	Frente		Verso	
	Sentido (esquerdo)	Sentido (direito)	Sentido (esquerdo)	Sentido (direito)
6	9,5	10,5	9,5	10
7	9	10	9	8,5
8	10	10	10	10,5
9	10	11	10	9
10	10	9,5	9,5	9
Média	9,7	10,2	9,6	9,4
Média (em cm)	9,7 ± 0,6			
Rigidez (mN.cm)	69 ± 12,1			

Na direção trama a rigidez e do tecido é mais baixa porque foram preparados manualmente na lançadeira o que implica a perda de torção do fio fazendo com que a rigidez diminua nessa direção. Relativamente à rigidez do tecido na direção da teia, eventualmente, por serem inseridos no tear e dada a tensão ser constante ao longo do processo de tecelagem a rigidez é maior. A contextura dos tecidos dos fios também influencia esta propriedade, isto é, visto que à teia tem 6 fios/cm a sua rigidez é maior que a rigidez à trama que tem 5,2 fios/cm (tabela 14).

4.3.7. Teste de Força e Extensão à Rotura

O teste de força e extensão à rotura efetuado no tecido foi realizado no *MTS Criterion*, com a célula de 10 kN, segundo a norma NF EN ISO 13934:1:2013, usando uma velocidade de 200 mm/min e um comprimento de 200 mm. As 5 amostras tinham uma largura de 50 mm e um comprimento de 300 mm. O teste foi realizado para ambas as direções (teia e trama).

Tabela 20. Resultados do teste de força e extensão à rotura na direção da teia.

Direção Teia		
Amostras	Força máxima (N)	Extensão à rotura (%)
1	882,57	10,50
2	929,71	9,25
3	934,05	10,42
4	897,93	6,58
5	1070,95	9,75
Média	911,06 ± 24,9	9,19 ± 1,83
CV (%)	2,73	19,91

Tabela 21. Resultados do teste de força e extensão à rotura na direção da trama.

Direção Trama		
Amostras	Força Máxima (N)	Extensão à rotura (%)
1	644,50	10,99
2	480,27	10,66
3	474,78	12,49
4	616,39	12,99
5	500,43	9,33
Média	553,99 ± 89,06	11,79 ± 1,13
CV (%)	16,08	9,58

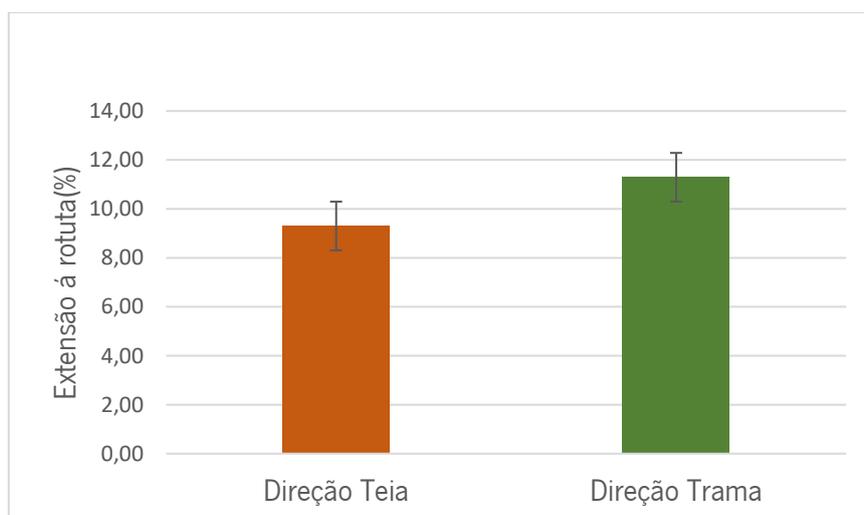


Figura 35. Extensão à rotura na direção teia e direção trama.

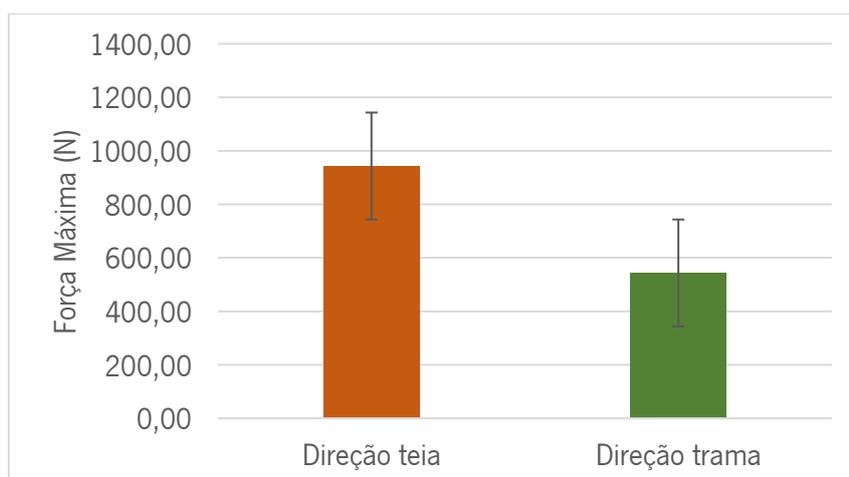


Figura 36. Força máxima na direção da teia e da trama.

Pela observação da figura 35 é possível verificar que a trama tem uma maior deformação à rotura comparativamente à teia. Um fator que influencia os valores de deformação da teia e da trama é

a contração dos fios. Visto que, os fios teia, apresentam uma contração maior comparativamente aos fios da trama, a sua deformação é menor. Relativamente à figura 36 apresenta a força máxima nas duas direções e mostra que na direção da teia há uma maior resistência comparativamente à direção da trama. Os valores de ambos os gráficos, podem ser justificados pelo processo de tecelagem manual, isto é, devido às diferentes tensões aplicadas durante o processo de tecelagem manual esta na direção da trama leva a que seja mais fácil haver deformações e consequentemente uma menor força, enquanto na direção da teia há uma tensão mais regular e menos deformações durante o processo de tecelagem.

4.4. Caracterização dos Compósitos:

4.4.1. Determinação da Percentagem Exata das Fibras nos Compósitos:

Inicialmente, a composição das fitas de Cânhamo/PLA era de 50/50. Após a realização da determinação da percentagem exata das fibras nos compósitos recorrendo-se ao teste de dissolução do PLA, em temperatura ambiente e com agitação mecânicas durante 6 horas obteve-se uma quantidade do mesmo de 59%. Este valor influencia as propriedades mecânicas dos compósitos devido a quantidade excessiva de PLA existente no fio híbrido produzido PLA/Cânhamo. No entanto, apesar de ser uma percentagem alta, como se incorporou por enrolamento multifilamento de PLA no fio híbrido era expectável que, ao realizar este teste ao compósito, houvesse uma percentagem de PLA superior.

4.4.2. Teste de Força e Extensão à Ruptura:

O teste de força e extensão à ruptura nos compósitos foi utilizando o *Criterion tensile testing machine*, e realizaram-se 5 testes segundo a norma ASTM D3039. A norma disponibiliza os procedimentos para a medição da força de tração assim como deformação à ruptura. Ambas a uma velocidade de 5 mm/min.

Como as amostras não apresentaram uma extensão significativa sob grandes tensões, foi necessário adicionar um extensómetro de modo a obter resultados mais precisos.

As amostras utilizadas encontram-se apresentadas na figura 37. Os valores obtidos estão apresentados na tabela 22, 23 e 24.

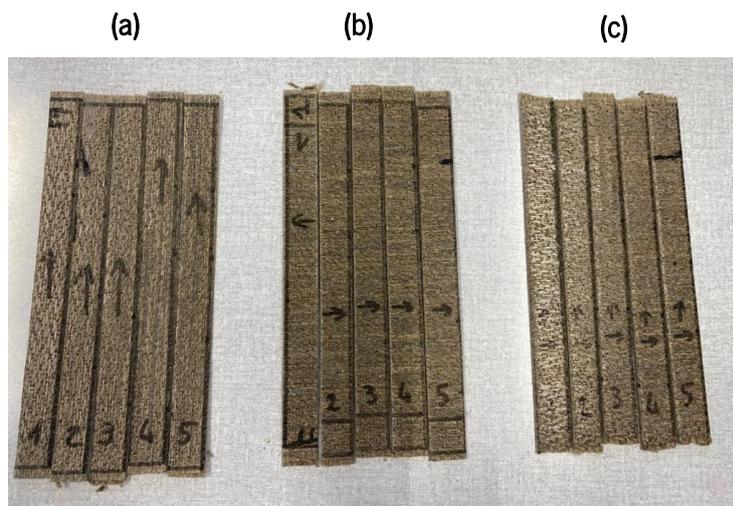


Figura 37. Amostras utilizadas para o teste de força e extensão à rotura. **(a)** direção da teia; **(b)** direção da trama; **(c)** direção 0/90°. Fonte: Autor.

Tabela 22. Valores de tensão máxima e extensão à rotura na direção teia.

Amostras	Tensão Máxima (MPa)	Extensão à rotura (%)
1	22,2	7,6
2	21,26	7,7
3	51,7	7,8
4	68,90	6,7
5	21,05	7,4
Média	$37,02 \pm 1,58$	$7,4 \pm 0,44$
CV (%)	4,27	5,95

Tabela 23. Valores de tensão máxima e extensão à rotura na direção trama.

Amostras	Tensão Máxima (MPa)	Extensão à rotura (%)
1	29,39	5,7
2	32,90	5,6
3	29,04	5,5
Média	$30,4 \pm 2,1$	$5,6 \pm 0,1$
CV (%)	6,91	1,79

Tabela 24. Valores de tensão e extensão à rotura na direção 0/90°.

Amostras	Tensão Máxima (MPa)	Extensão à rotura (%)
1	18,62	11,5
2	13,93	10,5
3	15,38	9,7
4	19,52	12,2
5	16,5	11,5
Média	$16,9 \pm 2,3$	$11,08 \pm 0,98$
CV (%)	13,61	8,84

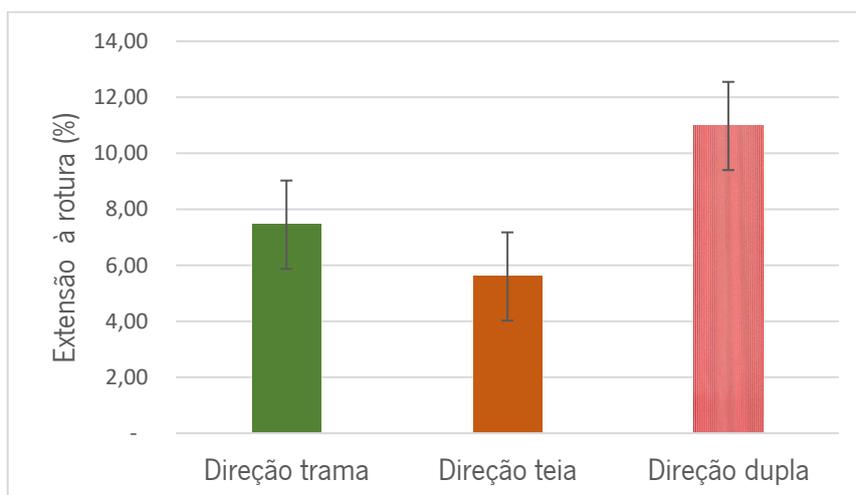


Figura 38. Extensão à rotura nas três direções.

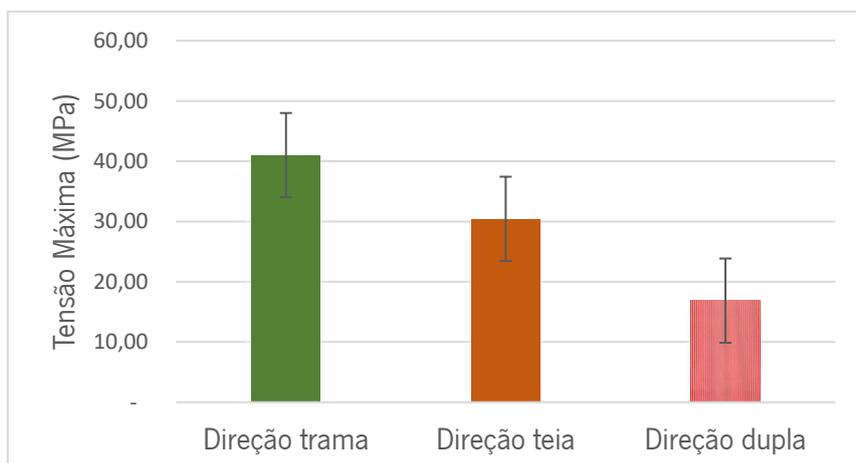


Figura 39. Tensão Máxima nas três direções.

Relativamente aos resultados obtidos na deformação à rotura na direção 0/90° (direção dupla), estes podem ser explicados pela delaminação dos dois tecidos que constituem o compósito, isto é, não houve uma boa adesão entre as duas placas levando a ter uma deformação elevada e uma força baixa.

5. Conclusões e Perspetivas Futuras:

No presente capítulo realiza-se uma compilação das conclusões retiradas no decorrer do trabalho, assim como as perspetivas futuras.

5.1. Conclusões Finais

O uso de fibras de cânhamo na área de compósitos vem apresentando um interesse para a substituição dos mesmos por derivados petroquímicos. O aquecimento global e os seus efeitos, bem como o surgimento de desenvolvimento sustentável, levaram a uma nova visão sobre os recursos renováveis e mais ecológicos. Tendo isso em conta, as fibras vegetais são alternativas interessantes para suprir essas necessidades dada a apresentarem vantagens económicas, ambientais e técnicas.

O objetivo deste trabalho foi desenvolver reforços à base de fibras de cânhamo com propriedades otimizadas. Para isso, foi realizada uma caracterização em multi-escala com a análise de propriedades nas escalas de fibra, fio, reforço e compósito.

A otimização dos parâmetros de tecelagem foi necessária de modo a minimizar a degradação das propriedades das fibras de cânhamo obtendo-se assim estruturas adequadas para a fabricação dos compósitos, pois, caso os fios não possuíssem resistência suficiente, iria afetar o processo de tecelagem.

Em primeiro lugar, foi realizada a mistura íntima das fitas de PLA e cânhamo no *intersecting*, de modo a homogeneizar a mistura. Posteriormente, foi realizado o enrolamento de um multifilamento de PLA em torno das fibras de cânhamo para obtenção do fio híbrido Cânhamo/PLA. Ao longo do processo surgiram alguns problemas devido as características do cânhamo, como por exemplo, a acumulação de fibra nos cilindros onde foi necessário a introdução de pó talco ao longo do processo de produção de fio como forma de impedir a paragem constante da máquina para retirar o excesso de fibra. Outra opção fiável, seria o uso da parafina. As duas etapas descritas anteriormente permitiram melhorar as propriedades mecânicas das fitas e possibilitaram a sua utilização na tecelagem na direção teia e na direção trama.

O desenvolvimento de um fio híbrido permitiu otimizar a mistura Cânhamo/matriz e a impregnação das fibras visto que, as propriedades dos materiais compósitos estão principalmente ligadas as propriedades dos reforços. Assim, a escolha do polímero termoplástico PLA permitiu alinhar os

firos dentro das estruturas dos reforços, melhorando as propriedades das fitas maximizando o desempenho dos compósitos.

Seguidamente, foi realizado a tecelagem manual onde se escolheu o cetim 6 dado as suas características. Dado por concluído a tecelagem do tecido, foi realizado os testes de caracterização, bem como a massa por unidade de superfície, espessura, encolhimento, permeabilidade ao ar. Estas propriedades dependem fortemente do tipo de fita utilizada bem como os parâmetros utilizados na tecelagem, particularmente da densidade da teia e trama. Após isso, foram estudadas as propriedades mecânicas de tração e flexão e os mesmos demonstraram que os parâmetros de tecelagem, bem como os materiais utilizam influenciam as propriedades do reforço.

A última fase foi a realização das placas compósitas onde se utilizou uma máquina de termocompressão de forma a haver a junção das duas placas de tecidos. No entanto, na fase final deste projeto, os resultados das propriedades mecânicas não foram os esperados. Houve erros na realização dos testes de tração, pelo que os resultados práticos não são fiáveis. Para além dos erros associados na parte de execução dos testes de tração, a fase de junção das placas das amostras de tecidos não foi bem executada levando a delaminação das placas de compósitos. Este trabalho, foi um estudo preliminar, e por isso teria sido importante, a repetição dos testes práticos, de modo a corrigir os erros e comparar os resultados, mas, devido à falta de tempo, não foi possível.

5.2. Perspetivas Futuras

Na fase de fabricação do fio híbrido, devido as características da fibra de cânhamo no futuro, será importante a incorporação de parafina ou pó talco na fase inicial da produção de modo a ser mais fácil produzir o fio e não haver tantas paragens na produção.

Não foi possível a realização dos testes físicos, de modo a ser impossível comparar resultados e melhorar os mesmos. É necessária uma melhor caracterização no teste de força e extensão à rotura das fibras de PLA e cânhamo e necessário determinar a percentagem de material na fita. A escolha da tecelagem manual deveu-se ao facto de a quantidade de fibra não ter sido suficiente para a tecelagem em teares automáticos e devido a isso, durante a produção ocorrem alguns erros, tal como por exemplo a quebra de fio e irregularidade na tecelagem, que afetaram as propriedades do tecido e compósito. Assim, no futuro, seria importante o uso de teares automáticos de modo a produzir o tecido de forma mais eficiente.

Na minha opinião, este trabalho é um projeto longo e demorado, pelo que, a realização do mesmo em apenas 4 meses não permitiu chegar a conclusões concretas sobre a viabilidade dos compósitos fabricados no mercado. É importante que, em trabalhos futuros, haja a possibilidade da realização de mais testes físicos, desde a fita até aos compósitos.

Por fim, e relativamente à minha experiência profissional e pedagógica, na ENSAIT, pelo programa Erasmus+, o meu contacto com os mais variados equipamentos presentes nos laboratórios, tanto de fiação como no de testes físicos, da Universidade previamente referida, providenciou-me mais conhecimento através do trabalho autónomo durante as primeiras fases, bem como o manuseamento dos equipamentos. Por outro lado, num contexto mais pessoal, notou-se uma falta de organização e empatia por parte das minhas colegas da ENSAIT, visto que a parte prática realizou-se em grupo, ao contrário da teórica, onde surgiram problemas a nível de comunicação, de empenho, interesse e falta de envolvimento das outras partes do grupo, ficando assim prejudicada no meu projeto final.

Referências Bibliográficas:

- Abreu Freire Lopes, I. (2020). *Estudo do processo de infusão a vácuo em materiais compósitos* [Dissertação de Mestrado]. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Alexandra, D., & Faria, S. (2021). *Aplicação de materiais naturais na tecnologia de infusão a vácuo de materiais compósitos para o desenvolvimento de interiores de aeronáutica* [Dissertação de Mestrado]. Universidade do Minho.
- Andrade Martins, J. (2018). *Inovação em Termoplásticos e Outros Compósitos pela Incorporação de Fibras Naturais* [Dissertação de Mestrado]. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Assunção, D. F. (2021). *Estudo e validação de um processo de fabrico de materiais compósitos no projeto FLY.PT* [Dissertação de Mestrado]. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Baghaei, B., Skrifvars, M., & Berglin, L. (2013). Manufacture and characterisation of thermoplastic composites made from PLA/hemp co-wrapped hybrid yarn preregs. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 50, 93–101. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.03.012>
- Balla, V. K., Kate, K. H., Satyavolu, J., Singh, P., & Tadimetri, J. G. D. (2019). Additive manufacturing of natural fiber reinforced polymer composites: Processing and prospects. In *Composites Part B: Engineering* (Vol. 174). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.106956>
- Borsoi, C., Scienza, L. C., Zattera, A. J., & Angrizani, C. C. (2011). *Obtainment and Characterization of Composites using Polystyrene as Matrix and Fiber Waste from Cotton Textile Industry as Reinforcement*.
- Bourmaud, A., Beaugrand, J., Shah, D. U., Placet, V., & Baley, C. (2018). Towards the design of high-performance plant fibre composites. In *Progress in Materials Science* (Vol. 97, pp. 347–408). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.05.005>
- Campbell, F. C. (2010). *Structural Composite Materials* (1ª). ASM International. www.asminternational.org
- Cao, C., Peng, J., Liang, X., Saiz, E., Wolf, S. E., Wagner, H. D., Jiang, L., & Cheng, Q. (2021). Strong, conductive aramid fiber functionalized by graphene. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 140. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.106161>
- Carboni, A., & Culchesh, A. (2009). *Os Compósitos e a sua Aplicação na Reabilitação de estruturas metálicas*.
- Castro, B. F. (2013). *Estudo e Caracterização Mecânica de Compósitos Reforçados com Fibras Naturais* [Dissertação de Mestrado]. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Corbin, A. C., Ferreira, M., Labanieh, A. R., & Soulat, D. (2019). Natural fiber composite manufacture using wrapped hemp roving with PA12. *Materials Today: Proceedings*, 31, S329–S334. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.307>

- Corbin, A. C., Sala, B., Soulat, D., Ferreira, M., Labanieh, A. R., & Placet, V. (2021). Development of quasi-unidirectional fabrics with hemp fiber: A competitive reinforcement for composite materials. *Journal of Composite Materials*, 55(4), 551–564. <https://doi.org/10.1177/0021998320954230>
- Corbin, A. C., Soulat, D., Ferreira, M., Labanieh, A. R., Gabrion, X., Malécot, P., & Placet, V. (2020). Towards hemp fabrics for high-performance composites: Influence of weave pattern and features. *Composites Part B: Engineering*, 181. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107582>
- Corbin; Anne-Clémence. (2020). *Manuscrit confidentiel Manuscrit provisoire*.
- Cruz, J., & Figueiro, R. (2016). Surface Modification of Natural Fibers: A Review. *Procedia Engineering*, 155, 285–288. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.030>
- Daniel, I. M., & Ishai, Ori. (2006). *Engineering mechanics of composite materials*. Oxford University Press.
- Dias Cardoso, R. F. (2021). *Estudo e Otimização do Processo de Estampagem a Quente de materiais Compósitos de matriz termoplástica reforçados com fibra contínua* [Dissertação de Mestrado]. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Dittenber, D. B., & Gangarao, H. V. S. (2012). Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. In *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* (Vol. 43, Issue 8, pp. 1419–1429). <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.11.019>
- Elanchezhian, C., Ramnath, B. V., Ramakrishnan, G., Rajendrakumar, M., Naveenkumar, V., & Saravanakumar, M. K. (2016). *Review on mechanical properties of natural fiber composites*. www.sciencedirect.com/www.materialstoday.com/proceedings2214-7853
- Ferreira, F. G. (2015). *Estudo da Delaminação em Compósitos de Epóxido Reforçado com Borracha e Fibras Naturais* [Dissertação de Mestrado]. Instituto Superior de Engenharia.
- Francisco, J., & Gomes Da Silva, M. (2005). *PRÉ-IMPREGNADOS DE MATRIZ TERMOPLÁSTICA: FABRICO E TRANSFORMAÇÃO POR COMPRESSÃO A QUENTE E ENROLAMENTO FILAMENTAR*.
- Gomes da Silva, J. F. (2005). *Pré-impregnados de matriz termoplástica: Fabrico e Transformação Por Compressão a Quente e Enrolamento Filamentar* [Tese de Doutoramento]. Faculdade de Engenharia do Porto.
- Jauhari, N., Mishra, R., & Thakur, H. (2015). Natural Fibre Reinforced Composite Laminates - A Review. *Materials Today: Proceedings*, 2(4–5), 2868–2877. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.304>
- Jiang, J., & Chen, N. (2012). Preforms and composites manufactured by novel flax/polypropylene cowrap spinning method. *Journal of Composite Materials*, 46(17), 2097–2109. <https://doi.org/10.1177/0021998311430155>

- Julie, M., Santos, N., Gilson Barbosa De Lima, A., & Rodrigues De Oliveira, I. (2018). *Escoamento de fluido em meio poroso fibroso: aplicação a manufatura de compósito polimérico via técnica RTM*. 471–482.
- Kaith, B. S., & I. Kaur. (2011). *Cellulose Fibers: Bio- and Nano-Polymer Composites: Green Chemistry and Technology*. Springer.
- Kamal, I., Zharif Thirmizir, M., Beyer, G., Saad, M. J., Azrieda, N., Rashid, A., & Kadir, Y. A. (2014). Kenaf For Biocomposite: An Overview. *Journal of Science and Technology*, 41.
- Karger-Kocsis, J. (József), & Karger-Kocsis, J. (1998). *Commingled yarns and their use for composites*. Kluwer Academic Publishers.
- Machado das Neves, A. C. (2021). *Estudo da influência das variáveis envolvidas no processo de tecelagem nas propriedades de tecidos de lyocell e bambu*. [Dissertação de Mestrado]. Universidade do Minho.
- Mazumdar, S. K. (2002). *Composites manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering* (1st edition).
- Melo Tomar, S. (2018). *Comportamento Mecânico de Materiais Compósitos de Origem Natural*. [Dissertação de Mestrado]. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- Moreira, A. (2009). *Materiais Compósitos*.
- Nogueira Romão, C. M. (2003). *Estudo do Comportamento Mecânico de Materiais Compósitos de Matriz Polimérica Reforçados com Fibras Naturais* [Dissertação de Mestrado]. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Pereira Da Silva, H. (2014). *Comportamento Mecânico de compósitos de fibra de vidro/epoxy nano-reforçados*. [Tese de Doutoramento]. Universidade de Coimbra.
- Rezende, M. C., & Botelho, E. C. (2000). O Uso de Compósitos Estruturais na Indústria Aeroespacial. In *Polímeros: Ciência e Tecnologia* (Vol. 2).
- Rodrigues Pereira, J. M. da C. (2017). *Desenvolvimento e fabrico de compósitos de matriz polimérica com fibras naturais*. [Dissertação de Mestrado]. Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.
- Sales Guimarães, B. S. (2021). *Desenvolvimento de Compósitos Epóxi/Fibra de Vidro produzido por enrolamento filamentar para revestimento interno de coluna de produção de petróleo em aço carbono na exploração Offshore* [Tese de Pós-Graduação]. Universidade Federal de São Carlos.
- Shahzad, A. (2012). Hemp fiber and its composites - A review. *Journal of Composite Materials*, 46(8), 973–986. <https://doi.org/10.1177/0021998311413623>
- Zhang, L., & Miao, M. (2010). Commingled natural fibre/polypropylene wrap spun yarns for structured thermoplastic composites. *Composites Science and Technology*, 70(1), 130–135. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2009.09.016>