CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE JUTA E LINHO: PROPRIEDADES MECÂNICAS E DESEMPENHO DE JUNTAS ADESIVAS

Rogério Albergaria de Azevedo Junior

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Orientadora: Doina Mariana Banea

Rio de Janeiro
Abril de 2025

CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE JUTA E LINHO: PROPRIEDADES MECÂNICAS E DESEMPENHO DE JUNTAS ADESIVAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Rogério Albergaria de Azevedo Junior

Banca Examinadora:

_____

Presidente, Professora Ph.D. Doina Mariana Banea (CEFET/RJ) (orientadora)

_____

Professor Ph.D. Hector Reynaldo Meneses Costa (CEFET/RJ)

_____

Pesquisadora Ph.D. Rosemere de Araujo Alves Lima (IDMEC - Instituto de Engenharia Mecânica do IST Lisboa)

Rio de Janeiro
Abril de 2025

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

A994 Azevedo Junior, Rogério Albergaria de
Caracterização de compósitos poliméricos reforçados com fibras de juta e linho: propriedades mecânicas e desempenho de juntas adesivas / Rogério Albergaria de Azevedo Junior. — 2025.
124f. : il. color. , enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2025.
Bibliografia : f. 116-124
Orientadora: Doina Mariana Banea

1. Materiais compostos. 2. Fibras naturais. 3. Juntas adesivas. 4. Tecnologia de materiais. I. Banea, Doina Mariana. (Orient.). II. Título.

CDD 688.9

Elaborada pela bibliotecária Tania Mello – CRB/7 nº 5507/04

AGRADECIMENTOS

Primeiramente,
À Deus, pela sabedoria e força concedida para que eu pudesse persistir até o fim.

A minha família,
Em especial aos meus pais, Elizete e Rogério, por sempre me incentivarem aos estudos e ao trabalho, mostrando que somente por meio desses que existe a possibilidade de mudança e melhoria de vida. Agradeço também ao meu irmão, Rodrigo, por todo apoio dado durante toda a minha formação. Agradeço também aos meus tios por todo apoio. E por fim, agradeço o apoio e dedicação da minha avó materna, Maria de Oliveira, que é uma das maiores fã e incentivadora do meu sucesso pessoal e profissional.

Aos professores,
Em especial à minha orientadora, professora Ph.D. Doina Mariana Banea, pela disponibilidade, confiança e compromisso contínuo com a pesquisa, orientação técnica e acreditar na realização deste trabalho. Agradeço também aos demais professores que de algum modo fizeram parte da minha formação.

Ao grupo de pesquisa, amigos e colegas,
Em especial ao amigo Henrique Queiroz pela dedicação para ensinar e auxiliar durante toda a pesquisa. Agradeço também ao Jorge Neto, Daniel Cavalcanti e Natália Victória, por me receberem no Laboratório de Adesivos e Materiais Compósitos (LADES) do Cefet/RJ *Campus* Maracanã e auxílio em todas as etapas do desenvolvimento dessa pesquisa.

Por fim, agradeço ao CEFET/RJ pela oportunidade de atuar como servidor na instituição. Agradeço também por toda contribuição na minha formação, desde o ensino técnico, graduação e agora no curso de mestrado.

RESUMO

CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE JUTA E LINHO: PROPRIEDADES MECÂNICAS E DESEMPENHO DE JUNTAS ADESIVAS

A crescente demanda por materiais ambientalmente sustentáveis, com menor pegada de carbono e maior reciclabilidade, tem aumentado nas últimas décadas. Nesse contexto, os compósitos reforçados com fibras naturais (CRFNs) têm se destacado como alternativas promissoras aos materiais tradicionais, oferecendo uma solução ecológica que pode mitigar a pegada de carbono e fornecer boas propriedades mecânicas. No entanto, o uso de CRFNs se restringe, em grande parte, a componentes não estruturais devido à variabilidade das propriedades mecânicas das fibras naturais. Uma abordagem eficaz para aprimorar essas propriedades é a hibridização, que combina diferentes tipos de fibras em uma única matriz. Assim, este estudo investigou o efeito da hibridização interlaminar com fibras de juta e linho, explorando suas propriedades mecânicas e sua aplicação em juntas adesivas visando contribuições para expandir o uso de CRFNs em aplicações estruturais. Compósitos híbridos interlaminares foram fabricados por moldagem por compressão, com um núcleo de 5 camadas de tecidos bidimensionais de juta, envolvido simetricamente por 1, 2 e 3 camadas externas de tecidos de linho unidirecional ou sarja (*twill*). Para fins de comparação, também foram preparados compósitos puros de linho e de juta, com 11 camadas de tecido cada. Os ensaios experimentais foram divididos em duas etapas: a primeira consistiu na caracterização mecânica com testes de tração, flexão e impacto, e a segunda envolveu a avaliação de cargas de falha e modos de falha em juntas de sobreposição simples com aderentes reforçados com 2 e 3 camadas externas de linho. Os resultados mostraram que a resistência à tração aumentou significativamente com o aumento do número de camadas de linho. As amostras reforçadas com 3 camadas de linho unidirecional e sarja (*twill*) apresentaram os melhores casos em resistência à tração, com um aumento de aproximadamente 64% e 45%, respectivamente, em comparação com o compósito puro de juta. A resistência à flexão aumentou progressivamente até as amostras com 2 camadas externas de linho, atingindo aumentos de aproximadamente 58% para a configuração unidirecional e 40% para a sarja (twill) em comparação com a juta pura. A adição de uma terceira camada não resultou em ganhos significativos, indicando uma estabilização do desempenho. Sob impacto, todos os compósitos híbridos tiveram maior energia de impacto que a juta pura. A amostra com 3 camadas de linho UD destacou-se, com 75% a mais de energia de impacto que a juta pura e 11% a mais que o linho UD puro. Na análise do desempenho das juntas, observou-se que as cargas e modos de falha foram semelhantes entre as juntas com aderentes híbridos de juta/linho e as de linho puro. As arquiteturas dos tecidos, como o padrão de torção e a orientação das fibras, provavelmente influenciaram esses comportamentos, contribuindo para a similaridade nos modos de falha. Esses resultados demonstram a eficácia da hibridização interlaminar como uma técnica promissora para o avanço do uso de CRFNs em aplicações estruturais.

Palavras-chave: Compósitos híbridos; fibras naturais; hibridização; juntas adesivas.

ABSTRACT

Characterization of Polymer Composites Reinforced with Jute and Flax Fibers: Mechanical Properties and Performance of Adhesive Joints

The growing demand for environmentally sustainable materials with a lower carbon footprint and higher recyclability has increased in recent decades. In this context, Natural Fiber Reinforced Composites (NFRCs) have emerged as promising alternatives to traditional materials, offering an eco-friendly solution that can mitigate the carbon footprint and provide good mechanical properties. However, the application of NFRCs remains largely restricted to non-structural components due to the variability in the mechanical properties of natural fibers. An effective strategy to enhance these properties is hybridization, which integrates different fiber types within a single matrix. Thus, this study investigated the effect of interlaminar hybridization with jute and flax fibers, exploring their mechanical properties and their application in bonded joints, aiming to contribute to expanding the use of NFRCs in structural applications. Interlaminar hybrid composites were manufactured via compression molding, with a core of 5 layers of bidimensional jute fabric, symmetrically surrounded by 1, 2, and 3 external layers of unidirectional or twill flax fabric. For comparison, neat jute and neat flax composites, each with 11 layers of fabric, were also prepared. The experimental tests were divided into two stages: the first consisted of mechanical characterization with tensile, flexural, and impact tests, and the second involved the evaluation of failure loads and failure modes in single-lap joints with adherents reinforced with 2 and 3 external layers of flax. The results showed that tensile strength increased significantly with the number of flax layers. The samples reinforced with 3 layers of unidirectional and twill flax exhibited the highest tensile strength, with an increase of approximately 64% and 45%, respectively, compared to the neat jute composite. Flexural strength progressively increased up to the samples with 2 external flax layers, reaching improvements of approximately 58% for the unidirectional configuration and 40% for twill, compared to neat jute. The addition of a third layer did not result in significant gains, indicating a stabilization of performance. Under impact, all hybrid composites exhibited higher impact energy than neat jute. The sample reinforced with 3 layers of unidirectional flax stood out, with 75% more impact energy than neat jute and 11% more than neat unidirectional flax. In the joint performance analysis, failure loads and failure modes were observed to be similar between joints with hybrid jute/flax adherents and those with neat flax adherents. The fabric architectures, such as the twist pattern and fiber orientation, likely influenced these behaviors, contributing to the similarity in failure modes. These results demonstrate the effectiveness of interlaminar hybridization as a promising technique for advancing the use of NFRCs in structural applications.

Keywords: Hybrid composites; Natural fibers; Hybridization; Adhesive joints.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Materiais usados em uma aeronave moderna, o Airbus A350 XWB. 13
Figura 2- (a) Tijolo de argila reforçado com capim; (b) Papiro egípcio antigo. 22
Figura 3 - Esquemático das fases de um material compósito. 23
Figura 4 - Classificação dos materiais compósitos pelo elemento de reforço. 24
Figura 5 - Esquema de classificação dos tipos de matrizes. 26
Figura 6 - Esquema representativo do grupo epóxi. 27
Figura 7 - Esquema representativo da formação de DGEBA a partir de bisfenol A e epicloridrina. 27
Figura 8 - Esquema de classificação de fibras naturais. 29
Figura 9 - Representação esquemática da hierarquia estrutural em uma fibra vegetal. . 30
Figura 10 - Juta em diversas formas (Planta, Fibra, Fio, Tecido). 33
Figura 11 - Linho em diversas formas (planta, fibra, fio, tecido). 36
Figura 12 - Configurações de hibridização. 38
Figura 13 - Comparação das distribuições de tensões em junta soldada, rebitada e adesiva. 41
Figura 14 - Esquemático de uma junta adesiva. 42
Figura 15 - Tipos de juntas adesivas. 44
Figura 16 - Tipos de carregamentos presentes em uma junta adesiva: (a) Tração, (b) Compressão, (c) Clivagem, (d) Arrancamento e (e) Cisalhamento. 45
Figura 17 - Modos de falha em juntas adesivas com substratos de materiais compósitos. 47
Figura 18 - Sistema de resina epóxi HEX 135 SLOW. 52
Figura 19 - Tecidos utilizados na fabricação dos compósitos. 53
Figura 20 - Sistema de adesivo epóxi AR-345. 54
Figura 21 - Esquemático da sequência de empilhamento e nomenclatura. 56
Figura 22 - I) Tecidos de linho e juta cortados; II) Estufa de secagem utilizada na remoção de umidade. 56
Figura 23 – Processos envolvidos na laminação de uma placa de compósito: I) homogeneização da resina; II) Laminação dos tecidos e III) Cura da placa de compósito

laminada. 57
Figura 24 - Exemplo de placa de compósito fabricada junto com alguns substratos cortados..... 58
Figura 25 - Esquemático da geometria da junta adesiva de sobreposição simples. 59
Figura 26 - Ferramentas e materiais utilizados para a fabricação das juntas coladas: I) molde metálico, II) substratos, III) espaçadores metálicos, IV) Adesivo epóxi e V) luvas, acetona P.A, lixa 100P e ferramenta para homogeneização do adesivo..... 60
Figura 27 - (a) Substratos após a preparação da superfície; (b) Homogeneização do adesivo. 61
Figura 28 - Montagem do molde, aplicação do adesivo e posicionamento dos aderentes. 62
Figura 29 - Junta fabricada e com excesso de adesivo removido..... 62
Figura 30 – a) Exemplo de ensaio de tração; b) Esquema de uma amostra de tração com as dimensões básicas. 64
Figura 31 - a) Exemplo de ensaio de flexão em 3 pontos; b) Esquema de uma amostra de flexão com as dimensões básicas. 65
Figura 32 - a) Exemplo de ensaio de impacto; b) Esquema de uma amostra de impacto com as dimensões básicas. 66
Figura 33 – Exemplo de ensaio de juntas. 67
Figura 34 – Micrografias MEV das fibras: a) linho; c) juta. 68
Figura 35 – Micrografia MEV da arquitetura dos tecidos: a) unidirecional; b) twill..... 70
Figura 36 - Curvas representativas de tensão-deformação de tração das amostras puras em função do tipo de fibra e arquitetura do tecido. 71
Figura 37 - Resistência e à tração e módulo de Young das amostras puras em função do tipo de fibra e da arquitetura do tecido. 72
Figura 38 - Curvas representativas de tensão-deformação de tração das amostras em função da hibridização. 76
Figura 39 - Resistência à tração e módulo de Young das amostras em função da hibridização para amostras reforçadas com a) linho UD e b) linho twill. 77
Figura 40 - Curvas representativas de tensão-deformação de flexão das amostras puras em função do tipo de fibra e arquitetura. 81
Figura 41 - Resistência à flexão e modulo de flexão das amostras puras em função do tipo

de fibra e da arquitetura do tecido. 82
Figura 42 - Curvas representativas de tensão-deformação de flexão das amostras em função da hibridização. 85
Figura 43 - Resistência à flexão e módulo de flexão das amostras em função da hibridização para amostras reforçadas com (a) linho UD e (b) linho twill. 86
Figura 44 – Energia de impacto das amostras em função da arquitetura. 90
Figura 45 - Energia de impacto das amostras em função da hibridização. 92
Figura 46 - Modos de falha representativos para ensaios de tração: (a) Juta pura, (b) Linho twill puro, (c) Linho UD puro. 95
Figura 47 - Modos de falha representativos para ensaios de tração: (a) Híbridos reforçados com linho twill; (b) Híbridos reforçados com linho UD. 96
Figura 48 - Micrografias MEV das superfícies fraturadas do ensaio de tração: a) J/F-Twill3 e b) J/F-UD3. 97
Figura 49 - Modos de falha representativos para ensaios de flexão: (a) Juta pura, (b) Linho UD puro, (c) Linho Sarja puro, (d) J/F-Sarja1, (e) J/F-Sarja2 (f) J/F-Sarja3, (g) J/F-UD1, (h) J/F-UD2, (i) J/F-UD3. 99
Figura 50 - Modos de falha representativos para ensaios de impacto: a) Juta; b) Linho twill; c) linho UD. 100
Figura 51 - Modos de falha representativos das juntas adesivas: a) Juta 5 (vista superior e lateral); b) J/F-UD2; c) J/F-UD3; d) J/F-Twill2; e) J/F-Twill3; f) F-Twill11 e g) F-UD11. 102
Figura 52 – Macrografias detalhadas das superfícies de falha representativas de a) F-Twill11 e b) F-UD11. 103
Figura 53 - Curvas representativas de carga-deslocamento de todas as juntas testadas em função da arquitetura do tecido de linho: a) Linho Twill e b) Linho UD. 107
Figura 54 - Dados quantitativos para os testes de SLJ em função da arquitetura do tecido de linho: a) Linho Twill e b) Linho UD. 108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química das fibras naturais lignocelulósicas. 29
Tabela 2 - Propriedades mecânicas das fibras vegetais. 31
Tabela 3 - Preço por tonelada de algumas fibras naturais. 32
Tabela 4 - Propriedades mecânicas do sistema de resina epóxi HEX 135 SLOW. 52
Tabela 5 - Parâmetros dos tecidos utilizados. 53
Tabela 6 - Propriedades mecânicas do sistema de adesivo epóxi AR-345. 54
Tabela 7 - Detalhes das placas de compósitos fabricadas. 58
Tabela 8 - Dados de teste de tração em função da arquitetura do tecido. 74
Tabela 9 - Comparação das propriedades mecânicas de tração dos compósitos de linho twill com a literatura. 74
Tabela 10 - Comparação das propriedades mecânicas de tração dos compósitos de linho UD com a literatura. 75
Tabela 11 - Dados de teste de tração em função da hibridização. 79
Tabela 12 - Comparação das propriedades mecânicas de tração dos compósitos híbridos. 80
Tabela 13 - Dados de teste de flexão em função da arquitetura. 83
Tabela 14 - Comparação das propriedades mecânicas de flexão dos compósitos de linho twill com a literatura. 84
Tabela 15 - Comparação das propriedades mecânicas de flexão dos compósitos de linho UD com a literatura. 84
Tabela 16 - Dados de teste de flexão em função da hibridização. 88
Tabela 17 - Dados do teste de impacto para compósitos puros. 90
Tabela 18 - Dados do teste de impacto para compósitos híbridos. 92
Tabela 19 - Dados quantitativos para todas as juntas testadas em função da arquitetura do tecido de linho: Linho UD e Linho Sarja. 110

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 13
1.1 Contextualização 13
1.2 Motivação 16
1.3 Objetivos 17
1.4 Metodologia 18
1.5 Organização do Trabalho 19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 21
2.1 Materiais Compósitos 21
2.2 Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras Naturais Lignocelulósicas 25
2.2.1 Matrizes Poliméricas 25
2.2.1.1 Resina Epóxi 27
2.2.2 Fibras Naturais Lignocelulósicas (FNLs) 28
2.2.2.1 Fibra de Juta 32
2.2.2.2 Fibra de Linho 35
2.2.3 Hibridização 37
2.2.4 Processos de Fabricação 39
2.3 Colagem Estrutural 40
2.3.1 Definições e Conceitos Iniciais 41
2.3.2 Adesivos e Adesão 42
2.3.3 Juntas Adesivas 44
2.3.3.1 Tipos de Juntas 44
2.3.3.2 Tipos de Carregamentos 45
2.3.3.3 Modos de Falha 47
2.3.3.4 Processos de Fabricação 48
3 MATERIAIS E MÉTODOS 51
3.1 Materiais 51
3.2 Fabricação dos Compósitos 54
3.3 Fabricação das Juntas Adesivas 59
3.4 Caracterização Mecânica – Compósitos 63
3.4.1 Ensaio de Tração 63
3.4.2 Ensaio de Flexão 64
3.4.3 Ensaio de Impacto 65

3.5 Caracterização Mecânica – Juntas Adesivas 66
3.6 Caracterização Morfológica por MEV 67
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 68
4.1 Análise morfológica das fibras e tecidos 68
4.2 Caracterização Mecânica – Compósitos 70
4.2.1 Ensaio de Tração 71
4.2.1.1 Efeito do Tipo de Fibra e Arquitetura do Tecido 71
4.2.1.2 Efeito da Hibridização 75
4.2.2 Ensaio de Flexão 81
4.2.2.1 Efeito do Tipo de Fibra e Arquitetura do Tecido 81
4.2.2.2 Efeito da Hibridização 85
4.2.3 Ensaio de Impacto 89
4.2.3.1 Efeito do Tipo de Fibra e Arquitetura do Tecido 89
4.2.3.2 Efeito da Hibridização 92
4.3 Análise das Fraturas – Compósitos 94
4.4 Caracterização Mecânica – Juntas Adesivas 100
4.4.1 Modos de falha das juntas 100
4.4.2 Influência da arquitetura do tecido e hibridização no desempenho das juntas adesivas 105
5 CONCLUSÕES 112
5.1 Trabalhos Futuros 114
REFERÊNCIAS 116

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A demanda por materiais ambientalmente sustentáveis, com menor pegada de carbono e maior reciclabilidade tem crescido nas últimas décadas. Nesse contexto, estudos sobre compósitos reforçados com fibras naturais (CRFNs, do inglês *Natural Fibre-Reinforced Composites - NFRCs*) têm sido o foco de pesquisas recentes, mostrando resultados promissores como alternativas mais ecológicas que podem mitigar a pegada de carbono e apresentar propriedades mecânicas admissíveis. Além disso, os CRFNs também têm sido o foco de vários setores industriais, como automotivo, esportivo e aeronáutico [1, 2].

Pesquisas já mostraram o avanço da aplicação de compósitos em diversos setores industriais. Por exemplo, na indústria aeronáutica, Airbus e Boeing demonstraram um considerável incremento no uso de compósitos reforçados por fibras de carbono nas aeronaves A350 (Airbus) e 787 Dreamliner (Boeing). Conforme ilustrado na Figura 1, o Airbus A350 já é composto por cerca de 53% de materiais compósitos, enquanto o 787, é composto por cerca de 50% de materiais compósitos [3, 4].

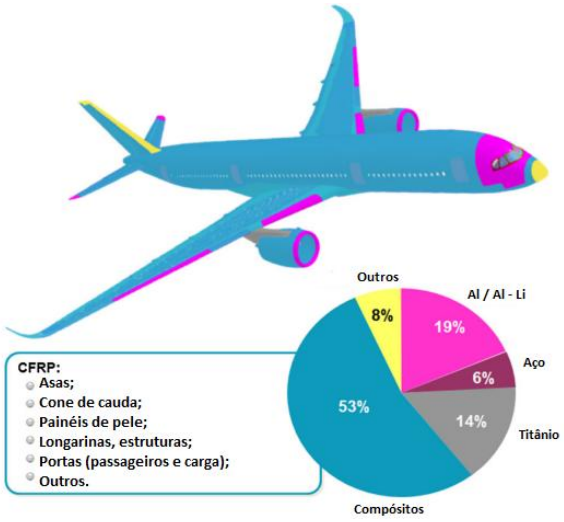


Figura 1 - Materiais usados em uma aeronave moderna, o Airbus A350 XWB.
Fonte: Adaptado de [4].

Além do setor aeronáutico, a crescente demanda por materiais leves, com boa relação resistência-peso e uma pegada mais sustentável, está ampliando o mercado de compósitos em diversos outros setores, especialmente nos setores automotivo, defesa, aeroespacial, construção civil e outros. O uso de compósitos é cada vez mais comum na produção de partes de veículos, no reforço de concretos e estruturas na construção civil, e em setores como o militar, petrolífero, naval e biomédico [5]. Segundo um relatório da *Precedence Research* [6], estima-se que o mercado global de compósitos foi de USD 111,89 bilhões em 2023 e deve atingir cerca de USD 191,36 bilhões até 2032.

Dentro dessa expansão dos compósitos e busca por materiais mais sustentáveis, as fibras naturais, como bambu, abacá, coco, linho, rami, sisal, curauá, juta e outras, tem ganhado destaque devido às suas várias vantagens como abundância, menores custos energéticos de produção em geral, maior biodegradabilidade, reciclabilidade e baixo peso específico. Embora apresentem propriedades mecânicas e físicas interessantes, quando comparadas a fibras sintéticas (por exemplo, vidro, carbono, Kevlar etc.), as fibras naturais têm algumas desvantagens, como alta suscetibilidade à umidade e degradação, menor resistência a altas temperaturas e variação nas propriedades mecânicas, limitando, assim, sua aplicação em larga escala na indústria. Apesar dessas limitações, algumas fibras naturais, como o linho, têm se destacado no mercado global devido às suas boas propriedades mecânicas, como alta resistência mecânica e rigidez, e escalabilidade industrial. Esses atributos tornam o linho um reforço promissor para compósitos poliméricos, porém, devido a quantidade de processos envolvidos na produção, o seu custo final tende a ser mais elevado [7].

Desse modo, buscando reduzir custos com a fabricação de compósitos utilizando a fibra de linho, torna-se necessário a substituição por fibras com menores custos de produção. Dentre as possibilidades, a juta surge como alternativa viável devido a sua ampla disponibilidade, boa relação custo-benefício e propriedades mecânicas que podem ser adequadas a depender do projeto. Dessa forma, para superar as limitações intrínsecas de cada fibra e o custo mais elevado da fibra de linho, torna-se necessário utilizar técnicas que tornem possível a utilização de materiais compósitos reforçados com linho. Nesse sentido, a técnica de hibridização com outras fibras pode ser empregada. Essa técnica consiste no uso de mais de um tipo de material de reforço, com o objetivo de obter um compósito com propriedades mecânicas superiores. A

hibridização permite equilibrar as características individuais de cada tipo de fibra, como resistência, rigidez e tenacidade, resultando em um material com desempenho otimizado [8].

Além da otimização das propriedades mecânicas, outro desafio importante no uso de compósitos é a união de componentes, especialmente em estruturas complexas. O uso de compósitos na indústria apresenta desafios, sobretudo quando há a necessidade de fabricação de peças de grande porte e contínuas. Apesar de já existirem tecnologias que permitem a fabricação de peças de grandes dimensões com materiais compósitos, a viabilidade dessa abordagem é frequentemente limitada pelos altos custos envolvidos. Assim, muitas indústrias optam por produzir componentes menores, que são posteriormente unidos, visando redução de custos e maior eficiência.

Para os materiais tradicionais, como os metálicos, a união dos componentes é realizada por meio dos métodos de união convencionais, com uso de parafusos, rebites e soldagem. No entanto, essas abordagens não são ideais para compósitos poliméricos reforçados com fibras, pois a fixação mecânica pode gerar perfurações que enfraquecem tanto a matriz quanto as fibras de reforço, criando pontos de concentração de tensões que podem levar à delaminação e comprometer a integridade do material. Existem alternativas para a união de compósitos, como a fusão por calor, a união por adesivos de alta performance, e o uso de técnicas como a soldagem a laser, união por termofusão e outros, a depender do tipo de matriz e fibras utilizadas. Adicionalmente, há o método de colagem estrutural que se destaca como uma solução eficaz para a união de compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais [9, 10].

A colagem estrutural por meio das juntas adesivas surge como uma solução eficiente para a união de compósitos, apesar de algumas limitações inerentes ao método. Embora as juntas adesivas apresentem desvantagens, como menor resistência mecânica e durabilidade em comparação com fixações mecânicas clássicas, elas oferecem vantagens significativas para esses materiais, como a distribuição uniforme das tensões ao longo da área de adesão, a eliminação de perfurações que poderiam enfraquecer a matriz e as fibras de reforço, e a capacidade de unir diferentes tipos de substratos. A leveza dos compósitos reforçados com fibras naturais se alinha com a leveza das juntas adesivas, proporcionando soluções mais eficientes em termos de peso total da estrutura. Além disso, a capacidade das juntas adesivas de evitar danos estruturais, como

perfurações, torna-as uma escolha vantajosa para compósitos cujas fibras podem ser sensíveis a danos localizados. Desse modo, o aprofundamento da compreensão sobre a utilização de juntas adesivas com compósitos reforçados com fibras naturais se faz necessário, explorando novas alternativas e soluções para otimizar suas propriedades mecânicas e de união [9].

Portanto, as juntas adesivas se apresentam como uma alternativa interessante para a união de compósitos de fibras naturais, considerando sua leveza, a preservação das propriedades estruturais e as vantagens em termos de distribuição de tensões e integridade da junta. Para ampliar ainda mais o campo de aplicações dos compósitos reforçados com fibras naturais e das juntas adesivas, é essencial que mais estudos sejam realizados. Embora haja uma quantidade considerável de publicações sobre a tecnologia, é necessário aprofundar os conhecimentos, especialmente no que se refere à aplicação específica desses materiais em compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais.

1.2 Motivação

A motivação para a realização do presente trabalho baseia-se na crescente busca por materiais sustentáveis que possam substituir os materiais tradicionais existentes (fibras sintéticas - vidro, carbono, aramida etc.), dando ênfase em novas configurações de compósitos híbridos reforçados com fibras naturais (CRFNs). Esses compósitos apresentam um potencial significativo para serem utilizados em diversas indústrias, como a automotiva, esportiva, aeroespacial e outras, oferecendo propriedades mecânicas interessantes, com menor impacto ambiental e um menor custo de produção no geral. O processo de fabricação dos CRFNs é geralmente mais barato do que o de compósitos sintéticos, resultando em um produto de menor custo e maior competitividade no mercado. Junto a isso, a hibridização de fibras naturais surge como uma estratégia para aprimorar as propriedades dos compósitos, permitindo combinar diferentes características dos reforços vegetais e alcançar um melhor equilíbrio entre resistência mecânica, rigidez e tenacidade. Embora a literatura já apresente diversos resultados sobre a hibridização de fibras naturais, ainda há uma necessidade de estudos mais aprofundados sobre novas

combinações de fibras, como a de linho e juta, e como essas configurações influenciam o desempenho mecânico e estrutural.

Além disso, o estudo sobre juntas adesivas com substratos de compósitos reforçados com fibras naturais mostra-se promissor, devido às vantagens que oferecem, como a redução do peso estrutural, a melhor distribuição de tensões e um maior apelo sustentável devido às fibras naturais.

Nesse contexto, é essencial compreender como a hibridização de fibras naturais pode influenciar o desempenho estrutural dos compósitos e das juntas adesivas. A combinação de diferentes fibras no compósito híbrido pode contribuir para a melhoria das propriedades mecânicas tanto do material quanto das juntas adesivas, influenciando a distribuição de tensões e o comportamento sob carga. Dessa forma, o presente estudo busca contribuir para o avanço no entendimento tanto do comportamento mecânico desses compósitos quanto do desempenho estrutural de juntas adesivas, explorando as vantagens da hibridização de fibras naturais e sua aplicabilidade em soluções mais sustentáveis e eficientes para diversas indústrias. Combinando baixo impacto ambiental, menor custo e boas propriedades mecânicas, os CRFNs híbridos podem representar uma alternativa viável e competitiva para aplicações estruturais futuras.

1.3 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é investigar a influência da hibridização interlaminar nas propriedades mecânicas de compósitos epóxi reforçados com fibras de linho (unidirecional e em sarja - *twill*) e juta, bem como avaliar o comportamento mecânico desses materiais quando aplicados em juntas adesivas sobrepostas simples, buscando identificar a melhor configuração de junta com adente de compósito híbrido que possa possibilitar a substituição da junta com adente de compósito puro. Para alcançar esse objetivo, a pesquisa foi estruturada nos seguintes objetivos específicos:

- Fabricar compósitos poliméricos puros e híbridos reforçados com fibras de linho e juta;
- Caracterizar o efeito da hibridização nas propriedades mecânicas dos compósitos,

com foco em resistência, rigidez e tenacidade;

- Fabricar juntas adesivas sobrepostas simples utilizando os compósitos previamente caracterizados como substratos;
- Analisar o comportamento mecânico das juntas adesivas em cisalhamento por meio de tração uniaxial, identificando possíveis correlações entre a configuração dos compósitos e o desempenho das juntas;
- Determinar a melhor configuração de junta adesiva, priorizando o uso de compósitos híbridos como alternativa aos compósitos puros, visando otimizar o desempenho mecânico e a viabilidade técnica.

1.4 Metodologia

A metodologia deste trabalho foi dividida em duas principais fases, conforme descrito a seguir:

- Fase 1 - Fabricação e caracterização de compósitos puros e híbridos poliméricos reforçados com fibras de linho e juta:

- Revisão Bibliográfica: O estudo inicial envolveu uma extensa revisão bibliográfica sobre materiais compósitos, polímeros e fibras naturais de linho e juta. Foram abordadas também conceitos básicos de métodos fabricação de compósitos e aplicações;
- Seleção de Materiais: Foram selecionadas as fibras de juta e linho como reforço natural e uma matriz epóxi para a fabricação dos compósitos;
- Fabricação dos Compósitos: A fabricação dos compósitos puros e híbridos foi realizada por meio de um processo de moldagem por compressão auxiliado por uma prensa hidráulica aquecida. Diferentes tipos de placas de compósitos foram fabricados;
- Caracterização Mecânica dos Compósitos: Após a fabricação dos compósitos puros e híbridos, foram realizados ensaios mecânicos para determinar suas propriedades. Ensaios de tração, flexão e impacto foram conduzidos baseados em normas internacionais pertinentes (ASTM). Os resultados desses testes foram

analisados com o objetivo de gerar comparações entre os compósitos puros e híbridos e identificar as melhores combinações em termos de desempenho mecânico.

- Fase 2 - Juntas adesivas com substratos de compósitos híbridos:

- Revisão bibliográfica: Foi realizada uma revisão bibliográfica, desta vez com foco em colagem e adesivos estruturais aplicados a juntas adesivas de compósitos, a fim de compreender os fenômenos envolvidos no processo de juntas adesivas em materiais compósitos poliméricos;
- Seleção de Substratos e Adesivos: Com base nos resultados da caracterização dos compósitos híbridos na primeira fase, foram selecionados os materiais com melhores desempenhos para uso como substratos em juntas adesivas;
- Fabricação das Juntas Adesivas: Foram fabricadas juntas adesivas de sobreposição simples utilizando os substratos de compósitos híbridos selecionados. O processo de fabricação envolveu a preparação cuidadosa das superfícies dos substratos, aplicação do adesivo estrutural e montagem das juntas com controle de alinhamento e espessura da camada adesiva;
- Ensaios Mecânicos das Juntas Adesivas: As juntas coladas foram submetidas a ensaios de tração para avaliar sua resistência mecânica ao esforço de cisalhamento;
- Análise dos Dados: Os dados experimentais obtidos nos ensaios de tração das juntas adesivas foram analisados e tratados. A análise incluiu a comparação dos diferentes substratos, bem como a avaliação das falhas observadas nos testes, buscando correlações entre o comportamento mecânico das juntas e a configuração dos compósitos utilizados como substrato.

1.5 Organização do Trabalho

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos, conforme descrito a seguir:

- Capítulo 1: Apresenta a introdução, abordando a motivação para o estudo, os

objetivos propostos, a metodologia empregada e a organização da dissertação;

- Capítulo 2: Oferece uma revisão bibliográfica detalhada sobre materiais compósitos poliméricos, matriz polimérica e fibras naturais lignocelulósicas. Além de descrever conceitos de colagem estrutural e juntas adesivas;
- Capítulo 3: Descreve os materiais selecionados para os experimentos, além dos equipamentos e métodos experimentais utilizados para a realização da pesquisa;
- Capítulo 4: Apresenta e discute os resultados experimentais, por meio de gráficos, tabelas e imagens, fornecendo uma análise detalhada dos dados obtidos e realizando comparações com estudos da literatura;
- Capítulo 5: Traz as conclusões da pesquisa, destacando os principais achados e sugerindo direções para estudos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No capítulo que se segue será apresentada uma revisão teórica abordando conceitos necessários para a compreensão do trabalho. O presente capítulo servirá como embasamento para a compreensão da metodologia aplicada e dos resultados obtidos.

2.1 Materiais Compósitos

Entende-se por compósito como sendo um material multifásico formado pela combinação de, pelo menos, dois constituintes (matriz e reforço) que apresentam características (composição química e físicas) diferentes e insolúveis entre si. E assim que produzido, apresenta propriedades não encontradas isoladamente em cada constituinte e atende requisitos pré-definidos de projeto tornando assim o compósito um material útil de engenharia com características e propriedades únicas e aplicáveis a diversas áreas da engenharia [11].

Desde a pré-história, a humanidade tem utilizado materiais compósitos, mesmo sem o conhecimento científico que temos hoje. Utensílios e ferramentas necessárias à sobrevivência, construção civil, entre outros, já empregavam essa tecnologia. Um exemplo, pós período pré-histórico, de utilização de material compósito em civilizações antigas é na construção civil, em que se misturava capim seco à argila para produzir tijolos (Figura 2a) para utilização em estruturas que demandavam mais resistência e durabilidade [12]. O papel de papiro feito pelos egípcios a cerca de 4000 a.C também pode ser considerado um exemplo de material compósito, pois era fabricado a partir da sobreposição de tiras da planta *Cyperus Papers* dispostas em camadas perpendiculares e unidas por compressão, formando um material mais resistente e flexível (Figura 2b). Ademais, sabe-se que os compósitos podem ser encontrados naturalmente em diversas situações, como em árvores, pelos de animais, até sistemas mais complexos como o corpo humano que formam os músculos, cabelo e ossos, por exemplo, ou seja, materiais compósitos sempre existiram, mesmo que em grau menos tecnológico e aplicado [13].



(a) (b)

Figura 2- (a) Tijolo de argila reforçado com capim; (b) Papiro egípcio antigo.
Fonte: Adaptado de [13].

Embora os compósitos existam há milhares de anos, seu desenvolvimento para aplicações avançadas teve uma impulsão significativa a partir da primeira metade do século 20, com aplicações iniciais na indústria aeroespacial e de defesa (Segunda Guerra Mundial) e, posteriormente, na aviação comercial e civil. Inicialmente, fibras sintéticas de carbono e vidro foram utilizadas para substituir peças e reduzir o peso em partes não estruturais. Com o avanço da tecnologia, esses materiais passaram a ser empregados também em partes estruturais, trazendo melhorias significativas em desempenho e eficiência. Além disso, uma das grandes vantagens do uso de juntas adesivas é a possibilidade de aplicação em estruturas multimateriais, ampliando ainda mais o potencial dos compósitos em diferentes setores industriais. A partir desse ponto, a ciência por trás dos materiais compósitos vem evoluindo gradativamente em busca de materiais cada vez mais leves, resistentes e com bom custo-benefício. Mais recentemente, a sustentabilidade tem se tornado um fator essencial nesse desenvolvimento, impulsionando pesquisas sobre o uso de fibras naturais e resinas biodegradáveis para reduzir o impacto ambiental desses materiais [14, 15].

De modo geral, os materiais compósitos consistem em, pelo menos, duas fases: uma fase contínua denominada matriz e a fase de reforço ou dispersa. A matriz envolve e protege o reforço, garantindo sua orientação e posição, além de protegê-lo contra intempéries externas, como umidade e abrasão. Também é responsável por distribuir os esforços de forma uniforme. Geralmente, sua resistência mecânica é inferior à do reforço. As matrizes empregadas em compósitos podem ser divididas em metálicas, cerâmicas e poliméricas. A escolha da matriz depende das propriedades, aplicação e método de fabricação requeridos no projeto [7].

As matrizes metálica e cerâmica apresentam propriedades como elevada

resistência mecânica, alta resistência ao desgaste, módulo de elasticidade elevado, resistência a oxidação em temperaturas elevadas e boa capacidade de amortecimento. Por essas características, são utilizadas em materiais submetidos a condições severas, como em aplicações específicas nos setores aeronáutico, automobilístico e outros [16]. A matriz polimérica apresenta, no geral, boas propriedades mecânicas, baixa densidade, menor abrasividade, baixo custo de produção e processamento mais fácil comparativamente às matrizes já citadas. Quando combinada com reforços fibrosos sintéticos ou naturais, pode resultar em compósitos com alta resistência, rigidez e tenacidade, além de boas relações resistência/densidade e rigidez/densidade, tornando-os atrativos para aplicações estruturais nos setores automotivo, aeronáutico, civil e outros [17].

A fase reforçadora ou fase dispersa é responsável pela garantia da resistência mecânica às tensões aplicadas ao compósito. Além disso, o reforço tende a melhorar as propriedades físicas, químicas e térmicas do compósito, fornecendo características desejáveis como leveza e uma boa resistência ao desgaste. O reforço pode ser proveniente de fibras, particulados ou estruturais. As fibras são um dos tipos mais comuns de fase de reforço em compósitos poliméricos e podem ser subdivididas em naturais (animais, minerais ou vegetais) e sintéticas [7, 11].

Daniel e Ishai (2005) preveem ainda a formação da fase interfacial, que está relacionada as interações químicas, mecânicas ou outros efeitos do processamento das fases constituintes (matriz e reforço) do compósito. Apesar dos constituintes primários não serem solúveis entre si, é essencial que haja afinidade entre a matriz e o reforço, pois isso é fundamental para garantir a coesão e a correta distribuição das cargas entre as fases do compósito para que se alcance os requisitos de projeto [18].

A Figura 3 representa as fases que constituem um material compósito.

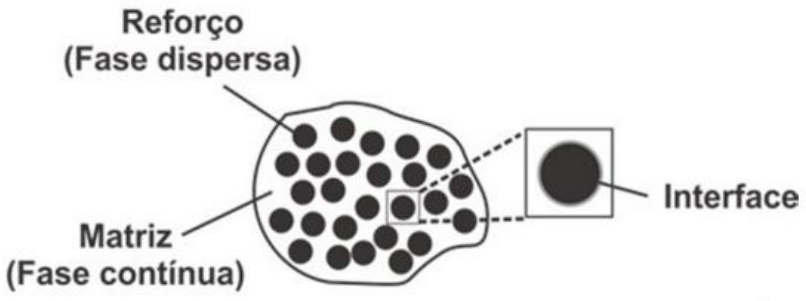


Figura 3 - Esquemático das fases de um material compósito.
Fonte: Adaptado de [18].

Os materiais compósitos podem ser classificados de diversas formas, conforme sua forma, tipo de matriz, tipo de reforço, entre vários outros critérios. Uma classificação comum é de acordo com Callister (2005), onde os materiais compósitos são classificados pelo elemento de reforço, como apresentado na Figura 4 [11].

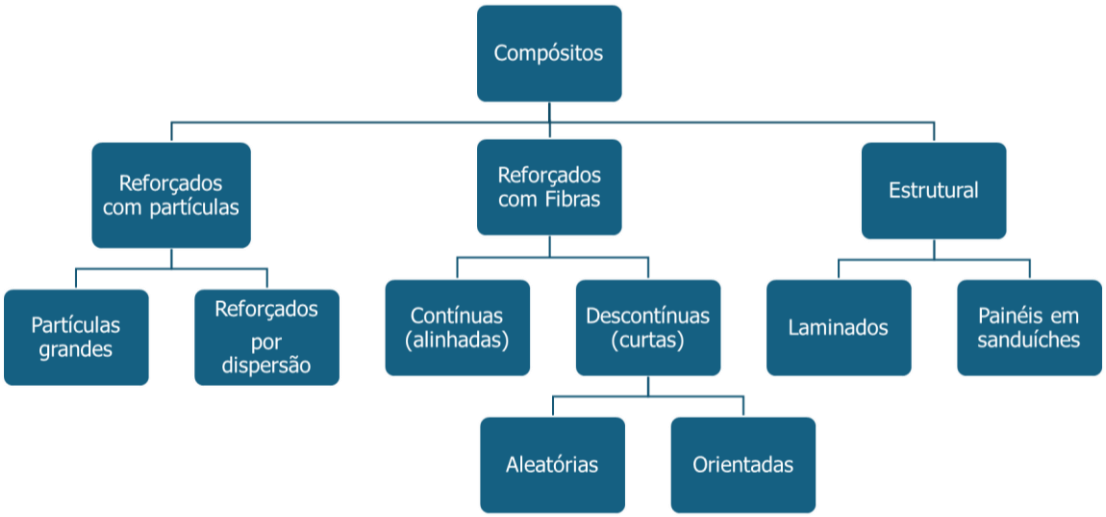


Figura 4 - Classificação dos materiais compósitos pelo elemento de reforço.
Fonte: Adaptado de [11].

Daniel e Ishai (2005) acrescentam ainda que os compósitos reforçados com fibras contínuas podem ser subdivididas em fibras unidirecionais, fibras cruzadas ou de tecido (bidirecionais) e fibras multidirecionais [18]. Já Neto e Pardini (2021) sugerem a classificação apresentada anteriormente, porém acrescentam ainda um conceito de compósitos reforçados com fibras em multicamadas, que podem ser subdivididos em: (i) compósitos laminados com várias lâminas de um tipo de fibra e (ii) compósitos híbridos, onde dois ou mais tipos de fibras ou reforços (metálicos ou não) [19].

Além da classificação pelo tipo de reforço, os materiais compósitos podem ser classificados pela sua matriz. Daniel e Ishai (2005) traz que os compósitos podem ser classificados pelas matrizes em:

- Poliméricas - termofixos e termoplásticas;
- Metálicas;
- Cerâmicas [18].

Por fim, pesquisas recentes trazem classificações baseadas na escala, em que existem os nano-compósitos. Somado a isso, existe também a ideia dos biocompósitos,

em que tanto o reforço quanto a matriz são de materiais biodegradáveis [20, 21].

Dentre as diversas opções de compósitos, que podem contar com reforços sintéticos ou naturais e matrizes poliméricas, metálicas ou cerâmicas, os compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais, especialmente as lignocelulósicas, têm se destacado por suas características vantajosas, como a sustentabilidade e propriedades adequadas para diversas aplicações. A seguir, será explorado mais a fundo o uso das fibras lignocelulósicas em compósitos poliméricos.

2.2 Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras Naturais Lignocelulósicas

Os materiais compósitos, conhecidos por combinar de diferentes elementos para criar produtos com propriedades superiores, têm sido amplamente utilizados em diversos setores industriais devido à sua versatilidade e desempenho aprimorado. Contudo, a crescente preocupação com o impacto ambiental e a busca por soluções mais sustentáveis tem direcionado as pesquisas e desenvolvimentos para alternativas mais ecológicas. Nesse contexto, os compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais, particularmente as lignocelulósicas, surgem como uma solução promissora. Isso deve-se ao fato de que essa combinação de matriz e fibras apresentar, em geral, boa estabilidade dimensional, boas propriedades térmicas e elétricas, fácil processamento para produção dos compósitos, boas propriedades mecânicas, como resistência à tração e boa tenacidade, que variam conforme o design e o tipo de fibra utilizada. Portanto, é fundamental compreender os constituintes dessa classe de compósito.

2.2.1 Matrizes Poliméricas

As matrizes poliméricas são amplamente utilizadas em compósitos reforçados com fibras sintéticas e vegetais devido à sua facilidade de processamento e boa relação

entre densidade e propriedades mecânicas. Elas oferecem um equilíbrio entre resistência e leveza, sendo ideais para setores como aeroespacial, automotivo, construção civil e outros. Podem ser classificadas em dois grupos: termofixas, que, uma vez endurecidas, não podem ser reprocessadas e oferecem alta resistência térmica e mecânica, e termoplásticas, que podem ser remoldadas ao serem aquecidas, oferecendo maior flexibilidade e facilidade de reciclagem. Embora as termofixas sejam mais difíceis de reciclar, sua durabilidade e desempenho em ambientes críticos contribuem para a sustentabilidade ao reduzir a necessidade de substituições frequentes [7]. A Figura 5 apresenta um diagrama da classificação das matrizes, destacando os principais polímeros utilizados nas matrizes poliméricas termofixas e termoplásticas.

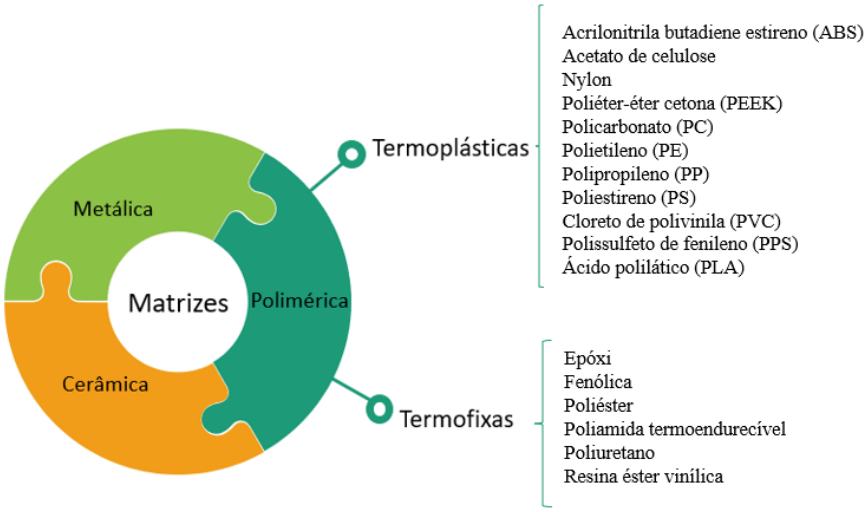


Figura 5 - Esquema de classificação dos tipos de matrizes.
Fonte: Adaptado de [7].

Das matrizes poliméricas apresentadas, uma das mais utilizadas na produção de compósitos reforçados com fibras, e que será utilizada neste trabalho, é uma resina do subtipo da família dos polímeros termofixos, o epóxi. A utilização desse material deve-se ao fato de ser amplamente empregados nas indústrias, apresentar relativo baixo custo, boas propriedades mecânicas, resistência química e física adequadas, e ser de fácil manuseio [22].

2.2.1.1 Resina Epóxi

O epóxi é um dos principais materiais utilizados como matrizes termofixas. Trata-se de um polímero que contém um grupo de um átomo de oxigênio ligado a dois átomos de carbono, formando um anel em sua estrutura química (Figura 6). Esse anel é conhecido como grupo epoxídico ou oxirano e apresenta boa reatividade, permitindo que se forme ligações cruzadas ocasionando o endurecimento do polímero ao utilizar um agente catalisador [11].

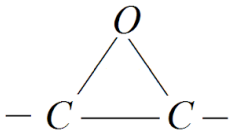


Figura 6 - Esquema representativo do grupo epóxi.
Fonte: Adaptado de [11].

As propriedades dependem da combinação específica do tipo de resinas epóxi e agentes catalisadores usados. Os agentes catalisadores são compostos orgânicos de aminoácidos ou ácidos. A resina mais comercializada é à base de Bisfenol A ou éter diglicidílico do bisfenol A (DGEBA) e é produzida pela reação da epicloridrina com o bisfenol-A na presença de um catalisador básico (Figura 7) [22].

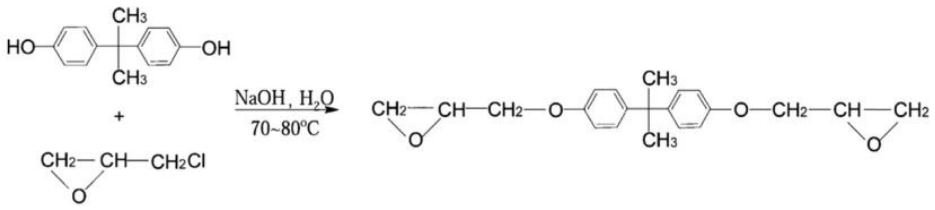


Figura 7 - Esquema representativo da formação de DGEBA a partir de bisfenol A e epicloridrina.
Fonte: Adaptado de [22].

As resinas epóxi possuem boa resistência mecânica e resistência à degradação ambiental, especialmente quando comparadas a resinas poliéster e éster vinílicas, que tendem a ser mais sensíveis à umidade e à exposição a agentes químicos. Além disso, apresentam boas propriedades de adesão e são relativamente fáceis de curar em

comparação a resinas fenólicas, que geralmente exigem temperaturas mais elevadas e tempos de cura mais longos. A cura das resinas epóxi ocorre por meio de uma reação química catalítica, transformando-as de um estado líquido para sólido. Esse processo cria ligações covalentes fortes e irreversíveis, garantindo alta estabilidade térmica e mecânica. Diferentemente das resinas poliéster e fenólicas, as resinas epóxi não liberam agentes voláteis durante a cura, o que reduz a emissão de compostos orgânicos voláteis e minimiza retrações dimensionais indesejadas [23].

No entanto, uma limitação das resinas epóxi é sua relativa fragilidade, o que pode comprometer as propriedades interlaminares em compósitos reforçados com fibras naturais. Essa característica pode ser um fator crítico para a resistência ao impacto e à delaminação nesses materiais. Além disso, devido à sua cura por reticulação química, as resinas epóxi apresentam desafios significativos para reciclagem e reprocessamento, diferentemente de algumas resinas termoplásticas que podem ser fundidas e reutilizadas [23].

Nos últimos anos, esforços têm sido feitos na formulação de resinas epóxi com menor dependência de derivados de petróleo, incorporando componentes *bio-based*, como precursores obtidos de óleos vegetais e lignina. Essas novas formulações têm sido exploradas como alternativas mais sustentáveis, visando reduzir a pegada ambiental dos compósitos reforçados com fibras naturais [24].

2.2.2 Fibras Naturais Lignocelulósicas (FNLs)

Em diversos setores da indústria é crescente a tendência de substituição de fibras sintéticas por fibras naturais, como por exemplo no setor automobilístico que vem utilizando fibras vegetais em compósitos laminados aplicadas em painéis e outras partes dos veículos [25]. Apesar de existir diversas fontes de fibras naturais, tais como mineral, animal e vegetal, somente essa última tem grande aplicação devido ao seu preço relativamente baixo, não agressão a saúde humana como fibras de fonte minerais, propriedades mecânicas superiores comparadas com outros tipos de fibras naturais [7].

As fibras naturais vegetais ou lignocelulósicas são todas as fibras extraídas de

algum tipo de planta. Segundo Neto *et al.* (2022), podem-se classificar as fibras naturais lignocelulósicas conforme sua localização na planta, sendo: fibras de folhas, de sementes, de caule, de grama e cana, núcleo e outros tipos [7]. A Figura 8 apresenta um esquema com as fontes de extração das fibras naturais e exemplos de fibras, com ênfase na fonte vegetal ou lignocelulósica, tendo apresentadas diversos tipos de fibras de acordo com sua localização na planta de origem.

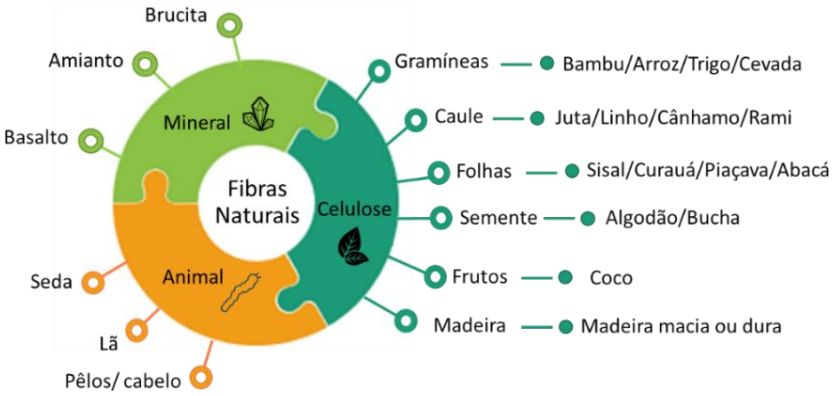


Figura 8 - Esquema de classificação de fibras naturais.
Fonte: Adaptado de [7].

As fibras vegetais são chamadas de lignocelulósicas por terem em sua constituição principalmente celulose, lignina e hemicelulose; além de pectina e pequenas quantidades de outros constituintes como sais, cera, cinzas e outras substâncias naturais. A Tabela 1 relaciona os principais constituintes químicos para alguns tipos de fibras.

Tabela 1 - Composição química das fibras naturais lignocelulósicas.

Fibra	**Celulose** (%)	**Hemicelulose** (%)	**Lignina** (%)	**Pectina** (%)	**Outros** (%)
Juta	61-72	14-16	8-11	0,2 - 10	0,5 – 3
Linho	64-72	16,70 -20	2,0 – 5	1,8 – 2,3	1,5 - 2
Sisal	65 – 73	10 – 14	8 – 11	0,8 – 10	0,5 - 2
Curauá	70,7 – 73,6	9,9	7,5 -11,1	-	-
Rami	68,6 – 76,2	5 – 16	0,4-0,7	1,5 – 2,0	-
Bambu	26 – 43	30	5 – 31	-	10
Coco	32-43	41-45	0,15-0,25	3-4	1,5- 3
Abacá	53-63	20-25	7-9	-	1,5 - 3

Fonte: Adaptado de [7], [26] e [27].

As fibras, de maneira geral, estão organizadas em uma estrutura fibrilar em camadas complexa. A Figura 9 apresenta um esquemático da estrutura de uma fibra.

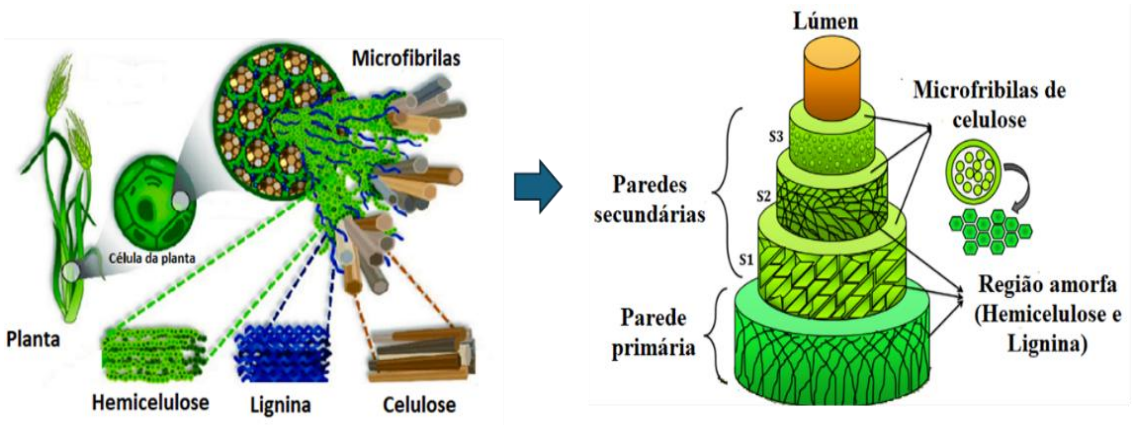


Figura 9 - Representação esquemática da hierarquia estrutural em uma fibra vegetal.
Fonte: Adaptado de [28] e [29].

As fibras vegetais são constituídas, no geral, por células individuas em que se encontra as microfribilas arranjadas de maneira helicoidal constituídas por uma parede primária - responsável pela primeira ação de proteção física da estrutura - e pela parede secundária, que possui 3 camadas, onde a segunda camada é a mais espessa em comparação com as demais. Na segunda camada é onde se concentra uma grande quantidade de celulose, hemicelulose e lignina. As microfibras são formadas por um conjunto de fibrilas de celulose que são ligadas e mantidas em um certo grau de organização pela hemicelulose que também tem a função de preencher vazios da célula vegetal. Já a lignina tem como função preencher os espaços vazios deixado pela celulose e hemicelulose, empacotando esses constituintes e atuando como um selante; além de agir como uma membrana protetora contra o fluxo de fluidos, fungos e bactérias [28].

Em relação às propriedades mecânicas, as FNLs apresentam uma grande gama de valores de resistência e rigidez mecânica, mudando para cada tipo de fibra. A Tabela 2 apresenta algumas dessas propriedades para vários tipos de fibras lignocelulósicas.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas das fibras vegetais.

Fibra	Densidade (g/cm³)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação (%)
Juta	1,23	393 – 800	13 – 26,5	1,16 – 1,80
Linho	1,38	800 - 1500	60 – 80	1,20 – 1,60
Sisal	1,20	507 – 855	9 – 22	1,90 – 3
Curauá	0,92	1250 – 3000	30 – 80	4,5 - 6
Rami	1,44	400 – 938	61,40 – 128	2 - 4
Bambu	0,60 – 1,10	140 – 441	11 – 36	1,3 -8
Coco	1,20	175	6	15 - 25
Abacá	1,50	430 – 813	31,10 – 33,60	2,9

Fonte: Adaptado de [30] e [26].

É possível notar uma ampla variação nos valores das propriedades mecânicas das fibras naturais lignocelulósicas (FNL). Segundo Satyanarayana *et al.* (2007) isso se deve ao fato de que o crescimento e desenvolvimento dessas estruturas são influenciados por processos metabólicos das plantas, logo, as características de cada fibra são afetadas por fatores como composição do solo, disponibilidade de água e luz e até mesmo a carga genética de cada planta [31]. Logo, essa não homogeneidade resultam em diferenças nos teores da composição química (Tabela 1) e nas propriedades mecânicas dessas fibras (Tabela 2).

Embora exibam propriedades mecânicas específicas interessantes, como uma boa resistência à tração e a boa relação resistência/peso, quando comparadas a fibras sintéticas (por exemplo vidro, carbono, Kevlar etc.), as fibras naturais lignocelulósicas têm algumas desvantagens, como alta suscetibilidade à umidade e degradação, menor resistência a altas temperaturas e variação nas propriedades mecânicas, limitando, assim, sua aplicação em larga escala na indústria [7].

Além das propriedades mecânicas e física, o custo das fibras naturais é um fator crucial na seleção de fibras para aplicações em compósitos. Em geral, as fibras naturais são consideradas mais econômicas do que as fibras sintéticas, como fibra de vidro e fibra de carbono, tanto em termos de custo de produção quanto de consumo de energia. No entanto, o preço das fibras naturais pode variar significativamente dependendo do tipo de fibra, da região de cultivo, das condições de colheita e dos tratamentos aplicados. A

Tabela 3 apresenta uma comparação dos preços de diferentes fibras naturais no mercado, com base em publicações científicas (a letra sobrescrita “a” indica o valor médio). A variação de preços reflete não apenas a disponibilidade e a demanda, mas também as propriedades mecânicas e a complexidade do processamento de cada fibra.

Tabela 3 - Preço por tonelada de algumas fibras naturais.

Fibra	**Preço (US$/ton) [a]**	**Fibra**	**Preço (US$/ton) [a]**
Abacá	345	Cânhamo (Hemp)	1000–2100 (1550)
Bambu	500	Juta	400–1500 (950)
Banana	890	Kenaf	300–500 (400)
Coco	200–500 (350)	Abacaxi	360–550 (455)
Algodão	1500–4200 (2850)	Ramie	2000
Linho (Flax)	2100–4200 (3150)	Sisal	600–700 (650)

Fonte: adaptado de [32].

A análise dos custos das fibras naturais é essencial para a seleção do material mais adequado para cada aplicação, considerando não apenas o preço, mas também as propriedades mecânicas e a disponibilidade. No contexto de compósitos, a escolha da fibra natural ideal deve levar em conta o equilíbrio entre custo e desempenho, especialmente em setores de alta tecnologia, onde a redução de custo é um fator crítico. Nas próximas subseções, serão discutidas em detalhes as fibras de linho e juta, destacando suas propriedades, aplicações e vantagens.

2.2.2.1 Fibra de Juta

Dentre as plantas com potencial de extração de fibras para aplicação industrial, destaca-se a juta (*Corchorus capsularis*). É uma fibra têxtil vegetal que provém da família *Tilioideae*, originária da China, Índia, Bangladesh e Indonésia. É uma fibra com alto volume de cultivo e produção mundial, sendo facilmente cultivada em uma atmosfera úmida e em uma alta faixa de temperatura, clima tipicamente encontrado em regiões da Ásia - maior produtor de juta e contribui com cerca de 95% da produção total de juta no

mundo [33]. No Brasil, sua produção se concentra na região Norte, devido as condições climáticas favoráveis - abundância de água e temperaturas adequadas [31]. Sua planta alcança um tamanho de até 4 metros e o seu talo tem um diâmetro de, aproximadamente, 20 mm. Após a colheita, para a produção da fibra, a planta passa por processos manuais (corte, separação, lavagem e outros) e mecânicos (tratamentos, bobinamento, tecelagem) que podem levar algumas semanas [34]. A Figura 10 ilustra as formas que podem ser encontradas a juta.



Figura 10 - Juta em diversas formas (planta, fibra, fio, tecido).
Fonte: Adaptado de [34].

Desse modo, devido as variadas formas que a fibra pode ser encontrada torna-se a matéria prima ideal para diversas aplicações como sacaria, cordas, telas e tapetes, por exemplo. Além disso, a fibra de juta é expressivamente utilizada como reforço em compósitos poliméricos, devido sua versatilidade, baixo custo energético de produção e grande disponibilidade [33].

A fibra de juta é considerada uma das fibras mais importantes para a produção de biocompósitos e bioplásticos, por isso suas propriedades mecânicas isoladas, ou seja, sem estar laminadas junto a uma matriz, já foi amplamente estudada. Por exemplo, Lima *et al.* (2020) relata valores de 254,46 ± 80,3 (MPa), 22,33 ± 10,1 (GPa) e 2,52 ± 0,4 (%) para resistência a tração, módulo de Young e alongamento, respectivamente [35]. Esses

valores podem ser diferentes a depender da safra da colheita da planta.

Devido suas propriedades mecânicas aceitáveis e boa aplicabilidade para diferentes fins, diversas pesquisas já foram realizadas buscando compreender o comportamento da fibra de juta modificando diferentes parâmetros e como material de reforço em diferentes tipos de compósitos. Por exemplo, Gopinath *et al.* (2014) comparam compósitos reforçados com fibras de juta de comprimento de fibra de 5-6 mm com dois tipos de matriz, resinas de poliéster e epóxi. Os compósitos foram submetidos à caracterização mecânica, revelando que os compósitos de juta-epóxi apresentaram melhores propriedades mecânicas. A resistência à tração foi de 12,46 MPa para juta-epóxi e 9,23 MPa para juta-poliéster, enquanto o módulo de elasticidade foi de 1,046 GPa e 0,811 GPa, respectivamente. A resistência à flexão foi maior para os compósitos de juta-poliéster (44,71 MPa) em comparação com juta-epóxi (38,68 MPa), mas o módulo de flexão foi superior para os compósitos epóxi (3,08 GPa contra 1,91 GPa para poliéster), indicando maior rigidez. Os compósitos de juta-poliéster demonstraram maior resistência ao impacto, enquanto os valores de dureza foram semelhantes para ambos os compósitos. os resultados mostram que o compósito epóxi reforçado com juta exibiu melhores propriedades mecânicas do que o compósito juta-poliéster [36].

Já Flores *et al.* (2024) investigaram o impacto de tratamentos químicos nas propriedades de compósitos de tecido de juta/resina de poliéster. Hidróxido de sódio, peróxido de hidrogênio e ácido peracético foram usados para tratar os tecidos de juta. A avaliação incluiu absorção de água, resistência à flexão, resistência à tração e resistência ao feixe curto. Os resultados indicam que os tratamentos químicos aplicados às fibras de juta influenciaram tanto a composição química quanto a morfologia das fibras, afetando a interação fibra/matriz nos compósitos de poliéster reforçados com juta. A análise FTIR confirmou a remoção parcial de lignina e hemicelulose pelo tratamento alcalino, melhorando a compatibilidade entre a fibra e a matriz. Imagens de MEV evidenciaram um aumento na rugosidade da superfície das fibras tratadas, promovendo melhor adesão e reduzindo a incidência de arrancamento de fibras nos compósitos. Apesar do aumento da absorção de água nos compósitos tratados com NaOH, os tratamentos com peróxido de hidrogênio e ácido peracético demonstraram redução nesse efeito, sugerindo uma modificação favorável na interface fibra/matriz. Os ensaios mecânicos mostraram que todos os tratamentos melhoraram a resistência à flexão e ao cisalhamento interlaminar,

enquanto as propriedades de tração permaneceram relativamente inalteradas. [37].

Diversos outros estudos foram realizados para analisar e descobrir como a fibra de juta se comporta em compósitos poliméricos, por exemplo, quando é aplicada em compósitos para fins de hibridização [38, 39], em diferentes comprimentos de fibras [40], aplicando diferentes tipos de tratamentos químicos [41], tratamentos físicos [42] entre outros. Devido ao significante número de pesquisas e resultados em torno da fibra de juta, torna-a aplicável em diferentes indústrias, tais como automotiva, aeronáutico, civil e outros [43].

2.2.2.2 Fibra de Linho

O linho é uma planta do gênero *Linum* na família *Linaceae*. Entre as diversas espécies de linho, a mais cultivada é a *Linum usitatissimum L*. É uma das fibras mais antigas, sendo cultivada nas regiões subtropicais do mundo [44]. Os maiores produtores são a Europa (maioritariamente na França, no Reino Unido, nos Países Baixos e na Bélgica), a Rússia, Bielorrússia e a China [45].

As fibras de linho são extraídas do florema do caule da planta. Uma planta típica possui dimensões de cerca de 80-120 cm de altura e cerca de 0,15-0,30 cm de diâmetro [44, 45]. O linho pode ser encontrado em diferentes formas, como fibra, fios, tecidos fabricados em diferentes tipos de arquitetura de tecelagem e até em mantas pré-impregnadas. A Figura 11 ilustra as formas que o linho pode ser encontrado.

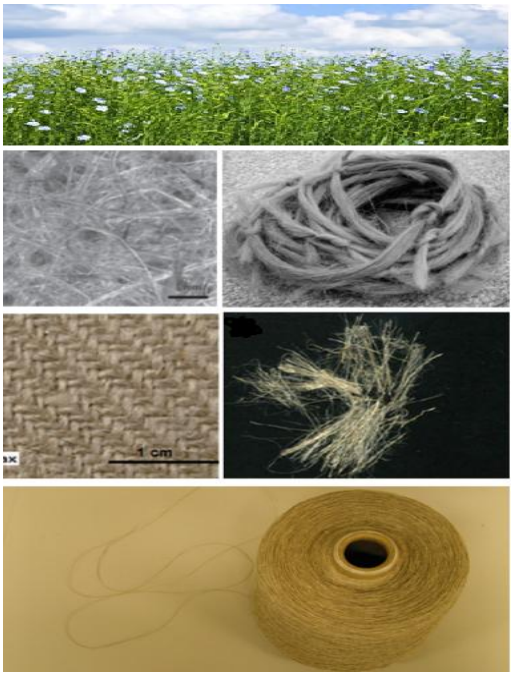


Figura 11 - Linho em diversas formas (planta, fibra, fio, tecido).
Fonte: Adaptado de [45].

Diversos estudos sobre a fibra de linho isolada já foram realizados e suas propriedades variam entre 345 – 1500 (MPa), 25 – 70 (GPa) e 1,70 – 3,25 (%) para resistência a tração, módulo de Young e alongamento, respectivamente [46, 47]. Esses valores podem ser diferentes quando a fibra é costurada em diferentes arquiteturas (unidirecional, *twill* e entre outros).

Estudos recentes têm analisado o desempenho do linho como reforço em compósitos poliméricos, explorando diferentes parâmetros para otimizar suas propriedades mecânicas. Como por exemplo, Fairlie e Njuguna (2020) investigaram como a sequência de empilhamento e a orientação das fibras afetam as propriedades de amortecimento de compósitos híbridos de fibra de linho/carbono. Utilizando resina epóxi e a técnica de infusão de resina assistida a vácuo, os compósitos foram testados quanto à tração e amortecimento. O estudo de tração revelou que a adição de uma camada de linho nas camadas externas do laminado de fibra de carbono reduziu o módulo de Young em 28% para uma camada e em 45% para duas camadas. Observou-se que, quando a orientação da fibra na camada interna da configuração [C/F2/C]s foi substituída por duas camadas ±45°, houve um efeito muito pequeno sobre o módulo de Young, mas a resistência à tração última foi reduzida em 61%. Este estudo experimental também demonstrou que a camada mais importante no que diz respeito às propriedades de

amortecimento são as camadas externas. A adição de uma camada externa de linho a um compósito epóxi/reforçado com fibra de carbono aumentou consideravelmente sua taxa de amortecimento em 53,6%, enquanto a adição de duas camadas elevou esse valor para 94% [48].

Outros estudos do comportamento da fibra de linho, variando diversos parâmetros, já foram realizados buscando encontrar alternativas para substituição de fibras sintéticas [46, 49, 50].

2.2.3 Hibridização

Embora as fibras naturais lignocelulósicas ofereçam vantagens como sustentabilidade e baixo custo, existem desafios como à variabilidade das propriedades mecânicas, menor resistência à umidade e outros. Swolfs *et al.* (2019) sugerem que, para superar as limitações inerentes aos componentes (matriz e fibras de reforço) e melhorar as propriedades gerais dos materiais compósitos, seja aplicada a técnica da hibridização [51]. A hibridização pode ser realizada não só para substituir fibras sintéticas por naturais, mas também para realizar a mistura de diferentes tipos de fibras naturais. Uma das finalidades para se hibridizar dois ou mais tipos de fibras naturais é obter compósitos mais biodegradáveis e com as melhores propriedades de cada tipo de fibra.

Os materiais compósitos híbridos demonstram na sua estrutura combinações de vários tipos de reforços, combinando fibras (sintéticas – sintéticas, natural – sintética ou natural – natural) e partículas no mesmo material ou ainda combinando mais de um tipo de fibra e de partícula no mesmo material. A combinação pode ser feita de 3 modos diferentes: interlaminar, intralaminar e intermisturado ou intrafio, ou ainda, intrafibra [51]. A Figura 12 ilustra essas configurações de hibridização que podem ser utilizadas, incluindo um exemplo sem hibridização para efeito de comparação.

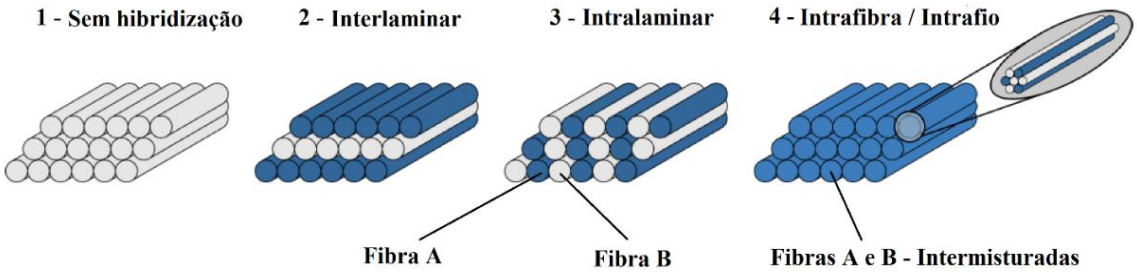


Figura 12 - Configurações de hibridização.
Fonte: Adaptado de [52].

Na configuração interlaminar, cada camada do compósito é composta por um único tipo de fibra, sendo este o método mais simples de fabricação de compósitos. Na configuração intralaminar, duas diferentes fibras estão presentes em cada camada. Isso pode ocorrer com a inserção de uma fibra contínua diferente costurada a um tecido de fibra ou com o uso de um tecido em que o urdume é de um tipo de fibra e a trama de outro. Também é possível combinar diferentes fibras em um feixe, resultando no conceito de intrafio/interfibra. No entanto, existem algumas ressalvas para essa categorização. Por mais que a Figura 13 mostre apenas híbridos de fibras unidirecionais, eles também podem ser multidirecionais. Um exemplo comercialmente disponível é um tecido trançado com fios de fibra de carbono na direção da trama e fios de fibra de vidro na direção do urdume. Tal tecido seria um híbrido de fibras intralaminar. Outra possibilidade é a combinação dessas configurações, por exemplo, co-trançando um fio híbrido intrafio com um fio não híbrido ou em um tecido intralaminar [51]. O presente trabalho foca na hibridização de duas fibras naturais lignocelulósicas diferentes (tecido de fibra de juta e tecido de fibra de linho) na configuração interlaminar.

Alguns estudos investigaram os efeitos do método da hibridização nas propriedades mecânicas e térmicas de compósitos reforçados fibras de linho com outras fibras (vegetais ou sintéticas) e fibras de juta com outras fibras, ou entre essas (linho e juta). Por exemplo, Ejaz *et al.* (2020) estudaram compósitos de fibras de juta e linho utilizando PLA como matriz. O método de moldagem por compressão a quente foi utilizado para fabricar compósitos puros de juta e linho e compósitos híbridos de linho/juta. Foram realizados testes de tração e impacto nos compósitos. Verificou-se que a resistência à tração dos compósitos de PLA/linho foi maior do que a dos compósitos de PLA/juta e compósitos híbridos. Observou-se que compósitos híbridos podem absorver

mais energia de impacto devido ao maior coeficiente de atrito entre as diferentes fibras e às interfaces aprimoradas [53]. Já Fiore e Calabrese (2019) estudaram a resposta quasi-estática e dinâmica de compósitos à base de epóxi reforçados com linho e juta. A sequência de empilhamento de compósitos de tecido puro (ou seja, juta pura e linho puro) e compósitos híbridos das duas fibras foi avaliada. Um tratamento superficial das fibras com solução de bicarbonato de sódio também foi realizado para melhorar a interface fibra-matriz. Constatou-se que a hibridização possibilitou a obtenção de propriedades mecânicas intermediárias entre as dos compósitos monolíticos. Observou-se que o tratamento superficial teve pouco efeito benéfico sobre as propriedades mecânicas dos compósitos [54].

2.2.4 Processos de Fabricação

Billah *et al.* (2021) mencionam que os processos de fabricação de compósitos poliméricos podem ser categorizados conforme o tipo de molde utilizado: com molde aberto ou com molde fechado. No processo de molde aberto, como o nome sugere, uma das superfícies do laminado permanece exposta ao ambiente e a polimerização e endurecimento (cura) da matriz é feita em temperatura ambiente. Já no processo de molde fechado, o laminado fica totalmente confinado entre as duas partes do molde sem que a face do laminado fique exposta ao ambiente, e o processo de polimerização, geralmente, é realizada com auxílio de temperatura [55].

Dentro da categoria de processos de fabricação com molde aberto os tipos mais usados são: a laminação manual (*hand lay-up*), a moldagem por pulverização à pistola (*spray-up*), a moldagem por centrifugação e a moldagem por enrolamento filamentar (*filament winding*). A moldagem por compressão (*SMC- Sheet Molding compound* e *HMC – High Sheet Molding Compound* e derivados), a moldagem por injeção (*Resin Transfer Molding- RTM, Resin Injection Molding-RIM* e derivados), a pultrusão e pultrusão são exemplos de processos de fabricação com molde fechado [55].

2.3 Colagem Estrutural

A colagem ou ainda uniões adesivas é uma técnica de união de peças e componentes empregada desde os primórdios pela humanidade. Civilizações antigas faziam utensílios de sobrevivência (lanças, arcos entre outros) a partir da colagem com adesivos naturais, além de ser muito utilizado para decoração. No entanto, apesar do surgimento de uniões adesivas ser datado de muitos séculos atrás, a técnica era rudimentar e utilizada apenas para fins que não demandavam grande resistência a grandes esforços mecânicas. A partir do desenvolvimento da tecnologia dos materiais, a técnica deixou de ser apenas não-estrutural e destinou-se a aplicações estruturais de engenharia que exigem alta resistência mecânica, térmica e durabilidade [9].

Segundo Silva *et al.* (2017) a colagem estrutural teve grande avanço a partir dos anos 40 com o surgimento dos polímeros sintéticos. A indústria aeroespacial foi a pioneira no desenvolvimento e utilização de ligações adesivas estruturais, e ainda hoje, continua sendo uma das que mais se utiliza delas [9]. Ademais, outras indústrias se beneficiaram da evolução da colagem estrutural e começaram a fazer uso dos adesivos em seus processos industriais. Um exemplo é relatado por Banea *et al.* (2018), que é da indústria automotiva que passou a utilizar juntas adesivas em seu processo de união de componentes [56].

A colagem adesiva estrutural surgiu como uma solução para alguns desafios que surgiram na indústria moderna, como quando se começou a utilização de materiais compósitos em larga escala e a necessidade de fabricação de grandes estruturas como sendo um componente único. Sabe-se que os produtos desenvolvidos pelas indústrias são fabricados separadamente em componentes menores e posteriormente unidos e que para outros tipos de materiais, como os metálicos, a união destes componentes, geralmente, é realizada por meio dos métodos de união tradicionais, com uso de parafusos, rebites e soldas. No entanto, esses métodos de fixação mecânica não são ideais para aplicação em materiais compósitos, especialmente os poliméricos reforçados com fibras, pois podem gerar perfurações que enfraquecem a matriz e as fibras de reforço, criando pontos de concentração de tensões e comprometendo a integridade do material (Figura 13). Além disso, a soldagem tradicional, amplamente empregada em materiais metálicos, também

não é viável para compósitos devido à incompatibilidade térmica entre as diferentes fases do material compósito polimérico [57].

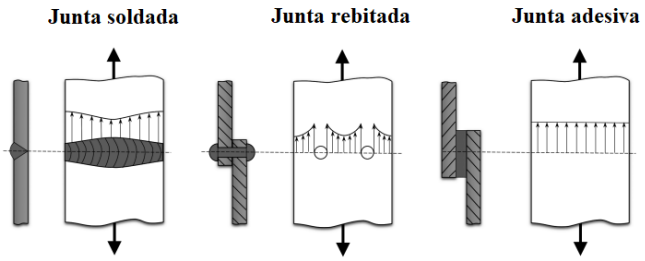


Figura 13 - Comparação das distribuições de tensões em junta soldada, rebitada e adesiva.
Fonte: Adaptado de [58].

Nesse contexto, o processo de fabricação (união) de colagem estrutural fazendo o uso das juntas adesivas surge como uma alternativa promissora, permitindo a união de peças sem comprometer suas propriedades mecânicas, distribuindo uniformemente as tensões, eliminando a necessidade de perfurações e aplicação de temperatura; além de trazer outros benefícios como redução de peso estrutural, flexibilidade de design e menor custo de fabricação. No entanto, a utilização de juntas adesivas traz consigo seus desafios a serem superados como uma menor resistência mecânica quando comparado a fixações mecânicas clássicas, limitação ao tipo de esforço e necessidade de cuidados no preparo da superfície colada [59].

O estudo das juntas adesivas está atrelado ao conhecimento de diversas áreas e tecnologias. Portanto, para compreender melhor o comportamento das juntas adesivas, é essencial explorar os conceitos fundamentais relacionados aos adesivos, adesão, características dos substratos e modos de falha, além dos esforços mecânicos envolvidos nesse tipo de união [9].

2.3.1 Definições e Conceitos Iniciais

Uma junta adesiva é o resultado da união por meio da aplicação de uma substância polimérica ligante (adesivo) entre duas superfícies distintas, conhecidas como substratos.

Os substratos podem ser metálicos, cerâmicos, poliméricos ou compósitos e não necessitam serem do mesmo material, ou seja, podem ser dissimilares e após a cura (endurecimento) do adesivo, passam a ser chamados aderentes. Uma região de pequena espessura na zona de contato do adesivo-aderente é formada e conhecida como interfase, que apresenta características físicas e químicas específicas e diferentes das partes adjacentes; dentro dessa zona de contato há a presença da interface, que é o plano de contato entre as superfícies dos dois materiais.

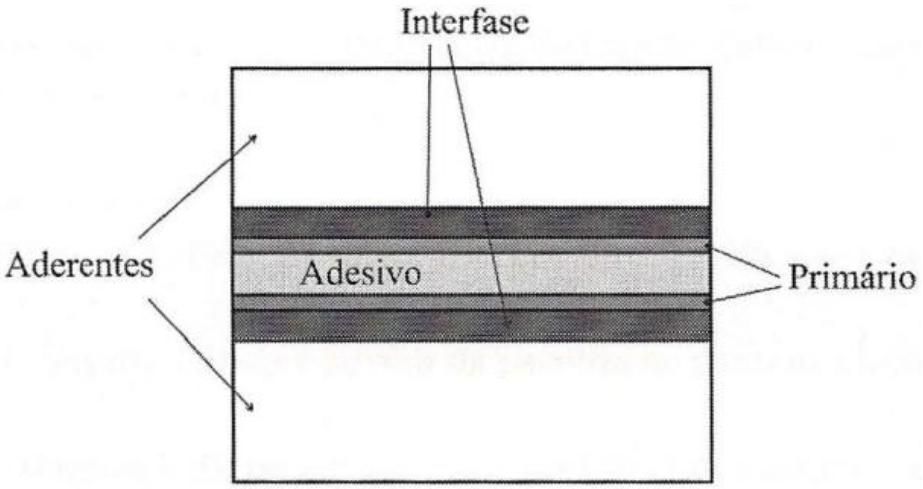


Figura 14 - Esquemático de uma junta adesiva.
Fonte: [9].

Em alguns casos, há também a presença do primário (*primer*), que é uma substância aplicada para remoção de óxidos e proteção da superfície do substrato para aplicação do adesivo [9]. A Figura 14 apresenta um esquemático com detalhamento das diferentes partes de uma junta adesiva.

2.3.2 Adesivos e Adesão

Um adesivo é um material polimérico que, ao ser aplicado em superfícies, une-as e garante resistência à separação por meio dos fenômenos de adesão e coesão. Sua função principal é assegurar a conexão entre as superfícies coladas. Para isso, é crucial que o adesivo seja capaz de transmitir tensões entre essas superfícies, permitindo uma

distribuição uniforme da tensão, o que contribui para a durabilidade da ligação [9].

Os adesivos podem ser classificados seguindo diversos critérios, como a origem, forma física, composição, modo de aplicação, custo, função, entre outros. Em colagem estrutural, um dos critérios utilizados é o de função, que apresenta duas subdivisões: os estruturais e os não-estruturais. Os adesivos estruturais possuem como principal característica a elevada resistência mecânica. Pois, são capazes de resistir a esforços elevados sem apresentar grande deformação e oferecer boa ligação às estruturas. Os adesivos estruturais são, geralmente, termoendurecíveis (classificação quanto a composição química) que necessitam de um agente catalisador e/ou fornecimento de calor para o seu processo de cura. Enquanto os adesivos não estruturais são aplicados em situações que não envolvem o suporte de cargas substanciais, por exemplo em aplicações de vedação, amortecimento de vibrações e outros [9].

Os adesivos utilizados em aplicações estruturais incluem: epóxis, cianocrilatos, anaeróbicos, acrílicos, poliuretanos, silicones e adesivos para altas temperaturas [59]. O presente trabalho irá utilizar um adesivo do tipo epóxi. Segundo Banea e Silva (2009) os adesivos epóxi são comumente utilizados para unir substratos de compósitos baseados em matriz epóxi devido à compatibilidade entre a resina e o adesivo. Os adesivos epóxis dominam uma grande parte do mercado de adesivos estruturais, são versáteis e estão disponíveis em muitas formulações e formas, que vão desde adesivos líquidos de baixa viscosidade até pastas sólidas ou filmes. Possuem boas características de molhabilidade, oferecem alto grau de adesão à maioria dos substratos. Dentre suas vantagens podemos citar: baixo custo, boa resistência mecânica, resistência química satisfatória, resistência a intempéries (umidade, luz), resistência ao óleo e solventes, excelente resistência ao cisalhamento, boa capacidade de trabalhar em uma ampla faixa de temperatura (-40°C a 180°C). Todavia apresenta algumas desvantagens como uma baixa vida útil comparado a outros tipos de adesivos, pouca resistência ao arrancamento, a menos que modificados com um polímero mais resiliente, entre outros [57, 59].

2.3.3 Juntas Adesivas

2.3.3.1 Tipos de Juntas

As juntas adesivas podem apresentar uma variedade de formas e geometrias, que varia conforme diversos fatores, como o tipo de carregamento a que a junta está submetida, incluindo a magnitude e a direção desse carregamento, modo de fabricação e outros [9]. A Figura 15 apresenta diferentes formatos de juntas mais comumente estudadas e aplicadas pelas indústrias.

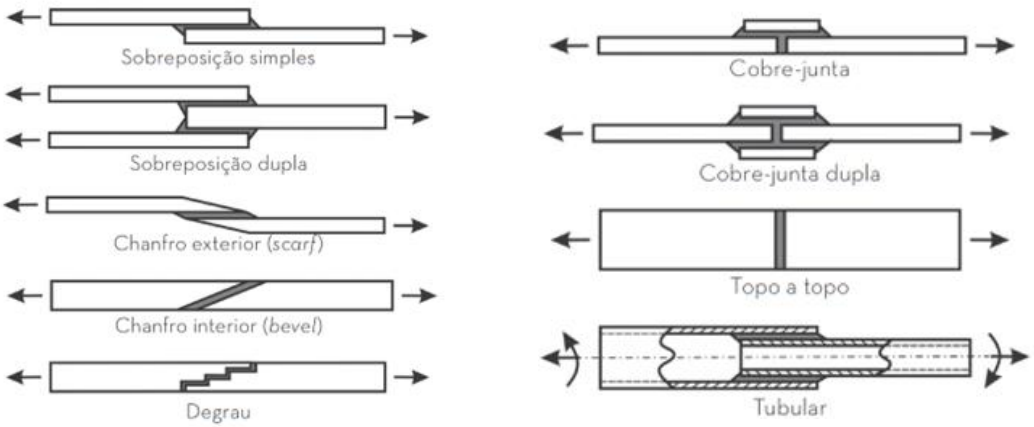


Figura 15 - Tipos de juntas adesivas.
Fonte: Adaptado de [9].

A escolha da geometria adequada para uma junta colada não é apenas uma questão de preferência estética ou simplicidade, mas deve ser baseada em análises detalhadas que considerem as condições de serviço, os materiais envolvidos e os requisitos de desempenho. Testes experimentais e simulações computacionais são frequentemente utilizados para prever o comportamento das juntas sob diferentes condições, garantindo assim a segurança e a eficiência do projeto final. Outro aspecto a ser considerado é o custo associado à fabricação da junta. Juntas mais complexas, por exemplo, podem exigir técnicas de produção mais sofisticadas ou materiais especiais, elevando o custo final. Portanto, a escolha da geometria da junta deve levar em conta não apenas a eficiência estrutural, mas também a viabilidade econômica do projeto [56, 59].

O presente estudo foca exclusivamente na junta de sobreposição simples (do inglês *Single Lap Joint*), que é uma das mais estudadas teoricamente e experimentalmente, além de ser uma das mais utilizadas na indústria devido à sua menor complexidade de fabricação e ao seu comportamento mecânico bem conhecido. Essa configuração é caracterizada pela sobreposição de duas peças, sendo uma delas colada à outra em uma única área. Essa simplicidade torna a junta de sobreposição simples mais fácil de fabricar e aplicar quando comparada a outras configurações, mas apresenta desafios, especialmente no controle da qualidade da colagem durante a fabricação e na análise dos esforços e distribuições de tensões. Além disso, esse tipo de junta é frequentemente submetido a carregamento de cisalhamento, o que pode resultar em concentrações de tensão nas extremidades da região colada, influenciando seu desempenho e tornando seu estudo essencial para otimização e aplicação em diferentes materiais.

Há uma ampla literatura de trabalhos estudando o comportamento de juntas de sobreposição simples com substratos fabricados em materiais compósitos e diferentes tipos de adesivos: [60-63], entre outros.

2.3.3.2 Tipos de Carregamentos

As juntas adesivas estão sujeitas a vários esforços, tais como: tração, compressão, cisalhamento, clivagem (*cleavage*) e arrancamento (*peel*) [9]. A Figura 16 ilustra os tipos de carregamentos citados.

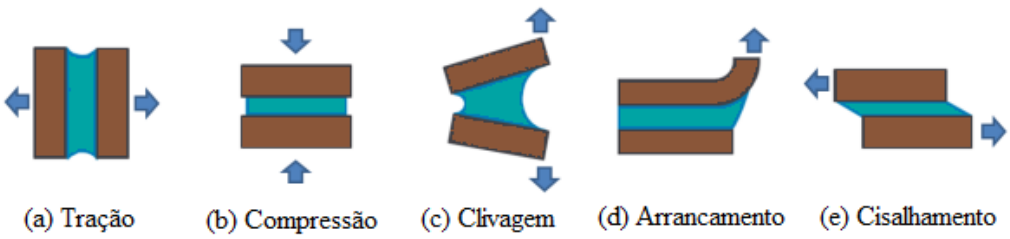


Figura 16 - Tipos de carregamentos presentes em uma junta adesiva: (a) Tração, (b) Compressão, (c) Clivagem, (d) Arrancamento e (e) Cisalhamento.
Fonte: Adaptado de [57].

Nos esforços de tração (Figura 16a) e compressão (Figura 16b), as forças são aplicadas perpendicularmente ao plano de colagem da junta adesiva. Isso resulta em tensões que são distribuídas uniformemente ao longo da área colada, o que geralmente leva a uma boa resistência da junta. No entanto, a resistência da junta pode ser influenciada por fatores como a espessura do adesivo, a rigidez dos substratos e o tipo de adesivo utilizado. No caso de compressão, como a força tende a comprimir os substratos um contra o outro, a resistência à falha é geralmente mais alta em comparação com os esforços de tração, que podem causar a ruptura mais facilmente, especialmente em juntas mal projetadas [9].

A falha da junta adesiva pode ser crítica em modos de carregamento como clivagem (Figura 16c) e arrancamento (Figura 16d), já que essas tensões são concentradas em uma região limitada. A clivagem ocorre quando há uma força normal (perpendicular) ao plano de colagem, levando à separação entre as camadas de adesivo ou entre o adesivo e o substrato. Já o arrancamento envolve uma força paralela à linha de colagem, causando o desprendimento do adesivo dos substratos. Ambos os tipos de falha resultam em perda significativa de resistência na junta, mas a clivagem foca na separação interna e o arrancamento na remoção do adesivo [9].

O cisalhamento (Figura 16e), por outro lado, ocorre quando as forças são aplicadas no plano de colagem, causando o deslizamento relativo entre os dois aderentes. Nesse caso, a força é distribuída de forma a causar tensões internas no adesivo e nos substratos. As juntas adesivas são geralmente projetadas para resistir bem ao cisalhamento, pois ele permite uma distribuição mais uniforme da carga ao longo da área de colagem. Quando possível, deve-se optar por esforços de cisalhamento, pois isso maximiza a eficiência do adesivo [9].

Em análises experimentais e/ou aplicações reais, estes tipos de tensões podem ocorrer separadamente ou de forma combinada. Assim, a junta deve ser projetada levando em consideração a solicitação a que será exposta, de tal forma que possa cumprir o seu propósito.

2.3.3.3 Modos de Falha

As juntas adesivas podem falhar por diferentes motivos e apresentar diferentes tipos de ruptura. Os mecanismos de falhas predominantes são falhas por coesão e falhas por adesão. De modo geral, a falha coesiva ocorre quando a fratura resulta no interior do adesivo e uma camada desse permanece unida à superfície dos aderentes; também pode ocorrer a falha do aderente antes do adesivo, com a fratura totalmente contida no substrato. Enquanto a falha adesiva é a falha que ocorre de modo interfacial entre o adesivo e um dos aderentes e pode indicar a existência de uma interface adesivo/aderente fraca devido a diversos fatores, como má preparação da superfície, pontos de tensão de concentração etc. [9].

Tratando-se de juntas em que os substratos são fabricados por material compósito reforçado com fibras, modos de falha específicos podem ocorrer. A norma ASTM D5573 (2019) classifica e descreve os modos de falhas tipicamente caracterizados: falha adesiva, falha coesiva, falha coesiva em camada fina, falha por rasgo leve de fibra, falha por rasgo de fibra, falha por quebra do substrato [64]. A Figura 17 ilustra os modos de falhas.

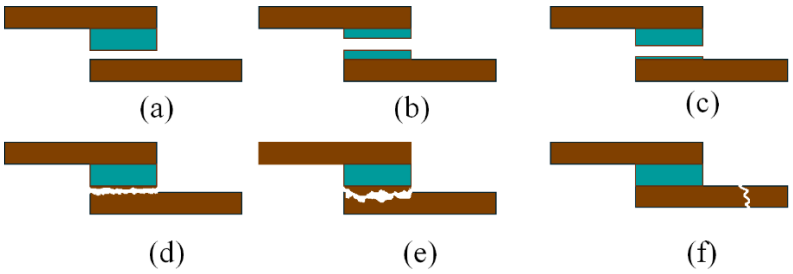


Figura 17 - Modos de falha em juntas adesivas com substratos de materiais compósitos.
Fonte: Adaptado de [59].

Os modos de falha podem ser determinados por diversos fatores como: condições da superfície de colagem (contaminação, abrasão por tratamentos mecânicos ou físicos, entre outros) em cada interface, geometria da junta, tipo de esforço (tipo de fibra, arquitetura) e outros. Além disso ainda há a influência de fatores externos [59].

2.3.3.4 Processos de Fabricação

A qualidade de uma junta adesiva depende de alguns fatores, como a escolha adequada do adesivo, o tratamento adequado das superfícies, o projeto geométrico e mecânico da junta e um bom processo de fabricação nas suas diversas fases. De modo geral, pode-se dividir a fabricação de uma junta em três etapas: (i) preparação da superfície do substrato, (ii) preparo e aplicação do adesivo e (iii) cura do adesivo.

(I) Preparação da superfície do substrato

O preparo das superfícies a serem coladas é um fator crucial na fabricação de uma junta, pois a resistência mecânica da junta está diretamente ligada a uma boa aderência do adesivo ao substrato. Segundo Banea e Silva (2009) o pré-tratamento adequado da superfície confere propriedades adicionais às superfícies aumentando a energia de superfície desses materiais, diminuindo o ângulo de contato, aumentam a tensão superficial e, como resultado, aumentando significativamente a resistência da junta. O objetivo principal da preparação de superfície é evitar falhas interfaciais, aumentando a energia superficial do substrato. Isso pode ser alcançado pela remoção de sujeiras e contaminantes, modificações químicas na superfície, alterações na rugosidade ou pela combinação desses métodos. A escolha da técnica de preparação deve considerar aspectos como a resistência e durabilidade da junta, o tipo e estado inicial dos substratos, bem como fatores de produção [59] .

Entre os métodos de preparo da superfície do substrato estão os tratamentos mecânicos e físico-químicos. Diversos tratamentos de superfície têm sido aplicados com graus variados de sucesso, visando melhorar as propriedades de adesão. Esses tratamentos incluem abrasão e limpeza com solvente, jateamento com granalha, lixamento, remoções com ácidos, processos ativos físicos como descarga de Corona, tratamento por chama ou por plasma, entre outros. No entanto, os tratamentos tradicionais de abrasão manual ou por jateamento e limpeza com solventes são os mais adequados para a maioria das juntas com substratos de compósitos e adesivos termofixos, pois o processo de abrasão irá remover a resina superficial do substrato sem expor as fibras e desse modo aumentar a rugosidade e, consequentemente, a aderência [59].

Em alguns casos de preparação da superfície, são aplicadas substâncias (primários – *primers*) diretamente na superfície dos substratos com o objetivo de melhorar a adesão ou como forma de proteção até a aplicação do adesivo. O uso de primers pode ser vantajoso, pois promove uma melhor interação entre o adesivo e o substrato, aumentando a resistência da junta adesiva. Por exemplo, Rudawska *et al.* (2017) demonstraram que a aplicação de primer antes do adesivo resulta em um aumento significativo de cerca de 85% na resistência da junta, comparado com a aplicação de adesivo apenas após a desengraxagem da superfície [65].

(II) Preparação e aplicação do adesivo

A segunda etapa consiste na preparação e aplicação do adesivo sobre a superfície do substrato. Os adesivos podem ser fornecidos como monocomponentes ou bicomponentes que devem ser misturados na proporção adequada indicada pelo fabricante. A preparação do adesivo consiste em misturar o adesivo na proporção e peso adequados, de modo a evitar a formação de bolhas. O método de aplicação varia conforme à forma (líquida, pastosa, pó e filme) como o adesivo se apresenta, ao tamanho e à forma das peças a ligar, ao volume de produção e à velocidade desejada. Pequenas velocidades podem ser realizadas manualmente, mas quando a produção é em grande escala a solução passa necessariamente pela automatização do processo.

A espessura do adesivo é um fator crítico que influencia o desempenho mecânico das juntas coladas. Para a maioria das aplicações estruturais, como na indústria aeroespacial e automotiva, a espessura ótima do adesivo está na faixa de 0,1 a 0,5 mm, com valores típicos em torno de 0,2 mm. Estudos mostram que, para adesivos epóxi, a máxima resistência ao cisalhamento é alcançada com espessuras entre 0,1 e 0,2 mm, onde a distribuição de tensões é mais uniforme e a probabilidade de defeitos internos, como vazios e microtrincas, é reduzida [66]. Em aplicações que exigem maior absorção de energia ou preenchimento de gaps, como em estruturas navais ou pás de turbinas eólicas, espessuras maiores (até 10 mm) são utilizadas, embora a resistência ao cisalhamento possa diminuir [67].

Portanto, a escolha da espessura do adesivo deve considerar o tipo de aplicação, o material do adesivo e as condições de carregamento. Espessuras finas (0,1–0,5 mm) são ideais para maximizar a resistência em juntas estruturais, enquanto espessuras maiores

são necessárias em aplicações que exigem maior absorção de impactos e preenchimento.

(III) Cura do Adesivo

Após terminar o processo de aplicação do adesivo, inicia-se a última etapa, a polimerização (cura). Em alguns adesivos o processo desenvolve-se espontaneamente e outros necessitam de um ciclo de cura para desencadearem a reação de polimerização. O processo de cura envolve habitualmente a aplicação de pressão e temperatura e tem como efeito aumentar o grau de reticulação do adesivo. As condições de cura são definidas pelo fabricante existindo, contudo, uma temperatura ideal para o efeito. Alguns equipamentos podem ser utilizados no auxílio do processo de cura, tais como: prensas hidráulicas ou pneumáticas com pratos aquecidos ou não, em outros casos mais específicos usa-se autoclaves. Podem ser utilizados também sacos de vácuo em um processo que consiste em colocar os elementos colados dentro de um ensacamento e estabelecer o vácuo. A maioria dos adesivos epóxi curam à temperatura ambiente e com baixa pressão, todavia a aplicação de uma maior temperatura pode auxiliar na aceleração do processo de cura.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão apresentados os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento do presente trabalho. Serão mostradas informações dos materiais utilizados, bem como os métodos e equipamentos envolvidos nos processos de fabricação e análises dos materiais.

A metodologia experimental foi desenvolvida com os objetivos de fabricar e caracterizar mecanicamente um material compósito polimérico reforçado com fibras de linho e juta e, posteriormente, realizar a fabricação e caracterização de juntas adesivas sobrepostas simples desse material. Desse modo, este trabalho consistiu, basicamente, em quatro etapas cada uma com algumas subetapas. A primeira foi a fabricação de diversas placas de compósitos e amostras para posterior análises. A segunda etapa foi dedicada a caracterização mecânica das placas fabricadas anteriormente, em que foram realizados ensaios de tração, flexão e impacto das amostras dos compósitos. A terceira etapa consistiu na fabricação das juntas adesivas sobrepostas simples dos melhores casos das placas anteriormente caracterizadas. Na quarta etapa as juntas adesivas foram caracterizadas mecanicamente e os resultados analisados.

3.1 Materiais

As placas de compósitos foram fabricadas tendo como matriz polimérica a resina HEX 135 SLOW, que é um sistema epóxi bicomponente fornecido pela Barracuda *Advanced Composites* (Rio de Janeiro, Brasil), conforme ilustra a Figura 18. O fabricante recomenda uma proporção de processamento por peso de resina e endurecedor de 100:33 (parte A / parte B) e um tempo de cura de 8 horas a, aproximadamente, 70ºC. As propriedades mecânicas podem ser vistas na Tabela 4.



Figura 18 - Sistema de resina epóxi HEX 135 SLOW.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas do sistema de resina epóxi HEX 135 SLOW.

Propriedade	**Valor**
Densidade (g/cm³)	1,10 – 1,20
Resistência à flexão (MPa)	100 – 120
Módulo de Elasticidade (GPa)	2,8 – 3,2
Resistência à tração (MPa)	65 – 75
Resistência a compressão (MPa)	80 – 100
Alongamento de Ruptura (%)	7,0 – 10,0

Fonte: *Datasheet* do fornecedor (Barracuda *Advanced Composites*).

Já como reforço, foram utilizados tecido de linho unidirecional, tecido de linho 2/2 *twill* (sarja) e tecido de juta bidirecional. Os tecidos de linho unidirecional e 2/2 sarja (*twill*) foram fornecidos pela empresa BComp (Friburgo, Suíça), e o tecido de juta (tipo T10) foi fornecido pela empresa SisalSul (São Paulo, Brasil). Os parâmetros básicos dos tecidos utilizados estão descritos na Tabela 5. A partir da Figura 19 pode ser visualizado os tecidos utilizados.



Figura 19 - Tecidos utilizados na fabricação dos compósitos.

Tabela 5 - Parâmetros dos tecidos utilizados.

Parâmetros	**Material**		
	Linho		Juta
Tipo de tecido	Unidirecional	2/2 *Twill* (Sarja)	Bidirecional
Densidade (g/cm³)	1,50 ± 0,02	1,47 ± 0,02	1,3 ± 0,01
Gramatura (g/m²)	300 ± 5%	200 ± 5%	350 ± 5%
Espessura (mm)	0,58	0,39	0,75
Orientação (°)	0	0/90	0/90

Fonte: *Datasheet* dos fornecedores (Sisalsul e Bcomp).

Para a fabricação das juntas adesivas foi utilizado um sistema bicomponente de adesivo epóxi, o AR345/AH345, fornecido pela Barracuda *Advanced Composites* (Rio de Janeiro, Brasil), conforme ilustra a Figura 20. O sistema de adesivo epóxi consiste em uma pasta tixotrópica e é desenvolvido para colagem de materiais metálicos e compósitos para aplicações de alta performance. O processo de cura ocorre através de uma mistura em proporções por peso de 100:45 entre os componentes A e B respectivamente. As propriedades mecânicas do adesivo estão apresentadas na Tabela 6.



Figura 20 - Sistema de adesivo epóxi AR-345.

Tabela 6 - Propriedades mecânicas do sistema de adesivo epóxi AR-345.

Propriedade	**Valor**
Densidade (g/cm³)	1,10 – 1,20
Resistência à flexão (MPa)	100 – 120
Módulo de Elasticidade (GPa)	2,8 – 3,2
Resistência à tração (MPa)	65 – 75
Resistência a compressão (MPa)	80 – 100
Alongamento de Ruptura (%)	7,0 – 10,0

Fonte: *Datasheet* do fornecedor (Barracuda *Advanced Composites*).

3.2 Fabricação dos Compósitos

Foram fabricadas 10 placas de compósitos poliméricos reforçados com fibras de linho e/ou juta, sendo 4 de compósitos puros (2 de juta e 2 de linho) e 6 híbridas. As placas híbridas foram compostas por um núcleo fixo de 5 camadas de tecido bidirecional de juta, com camadas externas de tecidos de linho (unidirecional e twill) interlaminadas simetricamente, variando entre 1, 2 e 3 camadas em cada lado.

A fabricação de placas puras serviu como referência para comparar os compósitos híbridos tanto em relação ao linho puro quanto à juta pura, permitindo analisar se a substituição parcial do linho pela juta comprometeria significativamente o desempenho mecânico e se a hibridização proporcionaria ganhos em relação à juta pura. Nas placas híbridas, a escolha do núcleo fixo de 5 camadas de juta foi motivada pelo seu menor custo em relação ao linho, além de proporcionar uma base estrutural eficiente para o compósito.

Essa abordagem, na qual um núcleo fixo de 5 camadas de juta reforçado externamente com fibras de melhor desempenho, já demonstrou bons resultados em estudos com compósitos sintéticos (camadas externas de fibra de vidro ou de carbono) feitos por Queiroz *et al.* [8, 38]. Assim, investigar essa configuração em compósitos naturais poderia ser vantajoso, combinando a redução de custos proporcionada pela juta com a tentativa de alcançar propriedades mecânicas próximas às do linho puro.

Para uma melhor organização, cada placa recebeu uma nomenclatura de acordo com os tecidos e quantidade de camadas nas quais foram laminadas. A seguir:

- Juta 11 – Placa laminada com 11 camadas de juta;
- Juta 5 – Placa laminada com 5 camadas de juta;
- F-UD 11 - Placa laminada com 11 camadas de linho unidirecional (UD).
- F-*Twill* 11 - Placa laminada com 11 camadas de linho *twill*;
- J/F-UD 1 - Placa laminada com um núcleo fixo de 5 camadas de juta e 1 camada de linho UD de cada lado;
- J/F-UD 2 - Placa laminada com um núcleo fixo de 5 camadas de juta e 2 camadas de linho UD de cada lado;
- J/F-UD 3 - Placa laminada com um núcleo fixo de 5 camadas de juta e 3 camadas de linho UD de cada lado;
- J/F-Twill 1 - Placa laminada com um núcleo fixo de 5 camadas de juta e 1 camada de linho *twill* de cada lado;
- J/F-Twill 2 - Placa laminada com um núcleo fixo de 5 camadas de juta e 2 camadas de linho *twill* de cada lado;
- J/F-Twill 3 - Placa laminada com um núcleo fixo de 5 camadas de juta e 3 camadas de linho *twill* de cada lado.

A Figura 21 esquematiza a sequência de empilhamento das camadas e a nomenclatura utilizada.

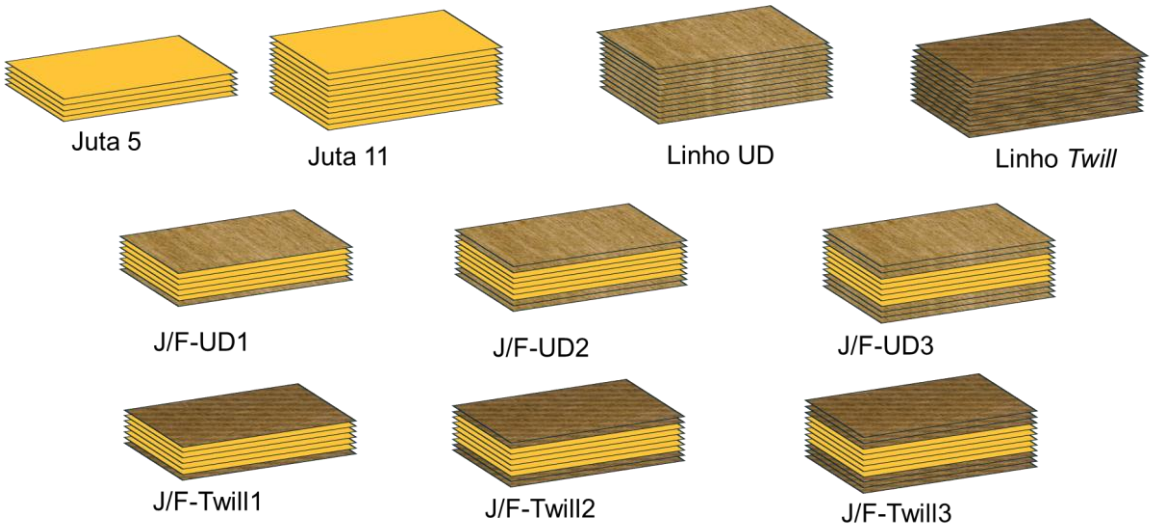


Figura 21 - Esquemático da sequência de empilhamento e nomenclatura.

Para realizar a laminação foi necessário o corte dos tecidos de linho e de juta em uma dimensão de 220 mm x 150 mm (comprimento x largura) (ver Figura 22-I). Após o corte, devido a propriedade higroscópica das fibras naturais, as mantas foram aquecidas, por aproximadamente 15 minutos à 100ºC para remoção de umidade, para isso foi utilizado uma estufa de secagem localizada no laboratório de compósitos e adesivos, LADES – CEFET/RJ, (ver Figura 22-II). Essa temperatura foi escolhida porque, de acordo com estudos termogravimétricos anteriores as fibras naturais não sofrem degradação térmica significativa abaixo de 200°C, sendo segura para a remoção de umidade sem comprometer a integridade das fibras [7, 41]. Após essa secagem, houve uma redução de massa de cerca de 5 gramas. Isso sinalizou que houve remoção de umidade.



Figura 22 - I) Tecidos de linho e juta cortados; II) Estufa de secagem utilizada na remoção de umidade.

Posteriormente, foi realizada a pesagem das mantas para o cálculo da quantidade de resina e endurecedor. De acordo com o fabricante, o sistema bicomponente de resina HEX 135 SLOW deve ser misturado na proporção de 100:33 de resina para endurecedor. O processo de mistura foi realizado manualmente até a homogeneização. Após o processo de preparo da resina, inicia-se a laminação.

As placas de compósitos foram fabricadas pelo método de moldagem por compressão a quente, na qual as camadas de tecido de fibra foram manualmente impregnadas com resina e laminadas sobre um molde de chapa metálica antes de serem submetidas à cura. Para garantir a uniformidade das placas, espaçadores metálicos, silicone e fita adesiva foram utilizados para controlar a espessura, minimizar o espalhamento excessivo de resina e permitir a saída de bolhas do interior da placa sem perda significativa de resina. A fração volumétrica teórica de fibras no compósito final foi estimada em aproximadamente 30%. Em seguida, o molde com as camadas de tecido laminadas foi colocado na prensa hidráulica aquecida Solab SL-12/20 (Piracicaba, São Paulo, Brasil), localizada no Laboratório de Adesivos e Compósitos (LADES) do CEFET/RJ - Campus Maracanã. A cura ocorreu sob uma pressão de aproximadamente 30 MPa durante 8 horas a uma temperatura de 75 °C, conforme as recomendações do fabricante. Após esse processo, as placas foram resfriadas em temperatura ambiente sob pressão para evitar concentradores de tensão térmica. Por fim, as placas curadas foram removidas da prensa e marcadas para o posterior corte dos corpos de prova. A Figura 23 ilustra as etapas do processo, incluindo (i) preparo da resina, (ii) laminação dos tecidos e (iii) cura da placa de compósito

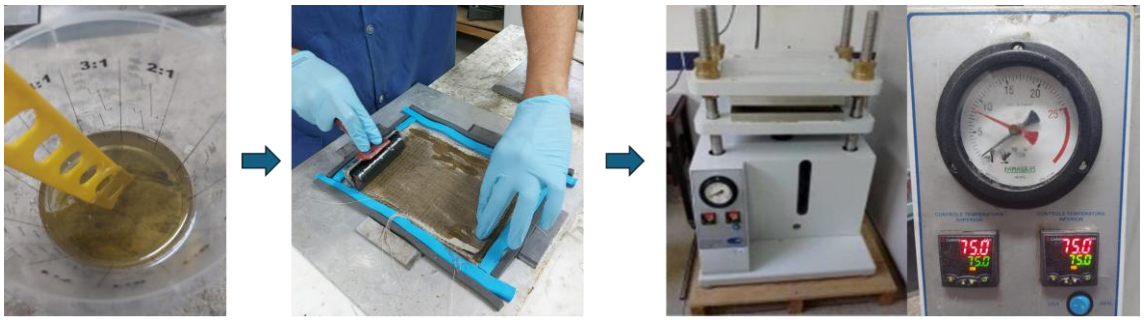


Figura 23 – Processos envolvidos na laminação de uma placa de compósito: I) homogeneização da resina; II) Laminação dos tecidos e III) Cura da placa de compósito laminada.

Por fim, as placas foram marcadas e os substratos foram cortados das placas compósitas utilizando uma mini serra circular manual. A Figura 24 mostra exemplos de uma placa marca e substratos cortados.

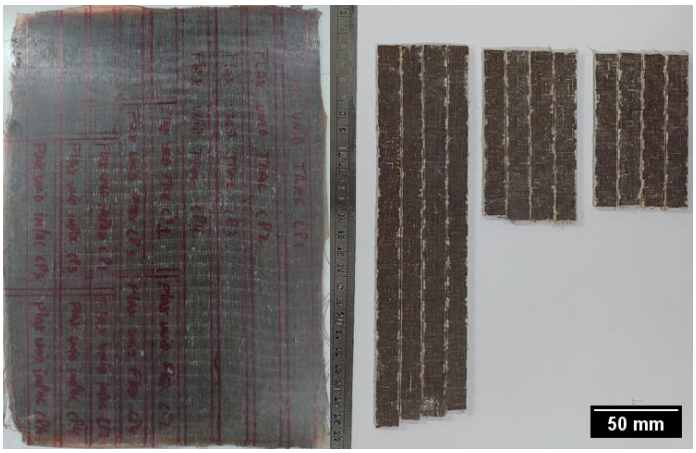


Figura 24 - Exemplo de placa de compósito fabricada junto com alguns substratos cortados.

Para mais detalhes sobre os nomes dos compósitos, número de camadas, sequência de laminação, fração em peso das fibras de linho e juta (Wf), e espessura de cada placa, veja a Tabela 7. O número subscrito que acompanha cada tipo de fibra (isto é, J - juta, UD – linho unidirecional e T – linho twill) na coluna de sequência de laminação representa o número de camadas do mesmo tecido.

Tabela 7 - Detalhes das placas de compósitos fabricadas.

Nome do Compósito	**Sequência de laminação[1]**	**Linho W_f (%)**	**Juta W_f (%)**	**Espessura (mm)**
Juta 11	J_{11}	--	51	5,40
Juta 5	J_5	--	27	4,50
Linho *Twill*	T_{11}	58	--	2,80
Linh UD	UD_{11}	62	--	3,10
J/F-UD1	UD_1 - J_5 - UD_1	14	35	3,50
J/F-UD2	UD_2 -J_5 - UD_2	23	31	3,70
J/F-UD3	UD_3 - J_5 - UD_3	28	26	4,00
J/F-Twill1	T_1 – J_5 – T_1	10	39	3,30
J/F-Twill2	T_2 – J_5 – T_2	18	32	3,50
J/F-Twill3	T_3 – J_5 – T_3	23	29	3,90

3.3 Fabricação das Juntas Adesivas

As juntas adesivas sobrepostas simples foram fabricadas para o ensaio de cisalhamento por tração, baseados na norma internacional ASTM D5868 [68]. Foram utilizados um molde e espaçadores metálicos para controlar a espessura da camada adesiva e o comprimento de sobreposição, além de evitar a formação de *spew fillets*. Os aderentes mantiveram as dimensões de 107,5 mm x 25 mm, enquanto os espaçadores apresentam medidas de 95 mm x 25 mm x 4,2 mm. Assim, o comprimento da área colada (sobreposição) foi fixado em 12,5 mm. A espessura da camada adesiva foi controlada em 0,2 mm, com o auxílio de espaçadores adicionais quando necessário. Pastilhas de alinhamento foram coladas nos extremos dos aderentes de modo a amenizar o efeito da excentricidade da aplicação da carga durante o ensaio. A Figura 25 ilustra a geometria das juntas fabricadas. Essa configuração de juntas foi utilizada em diversos estudos anteriores como em [8, 60, 61, 63], demonstrando resultados promissores em termos de resistência e durabilidade das juntas adesivas. No entanto, é importante expandir os estudos, incluindo diferentes hibridizações e tipos de fibras.

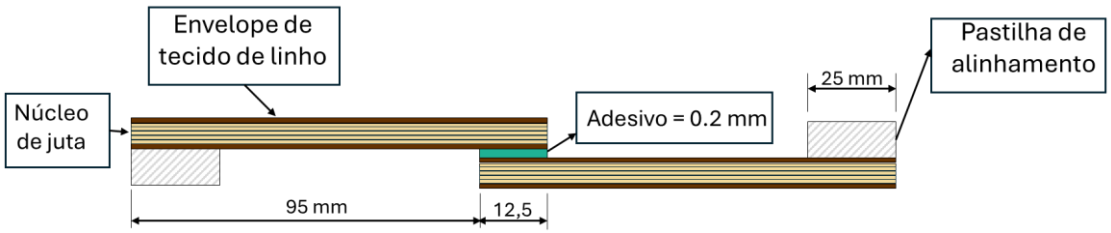


Figura 25 - Esquemático da geometria da junta adesiva de sobreposição simples.

A Figura 26 mostra todos os equipamentos utilizados para a fabricação das juntas.

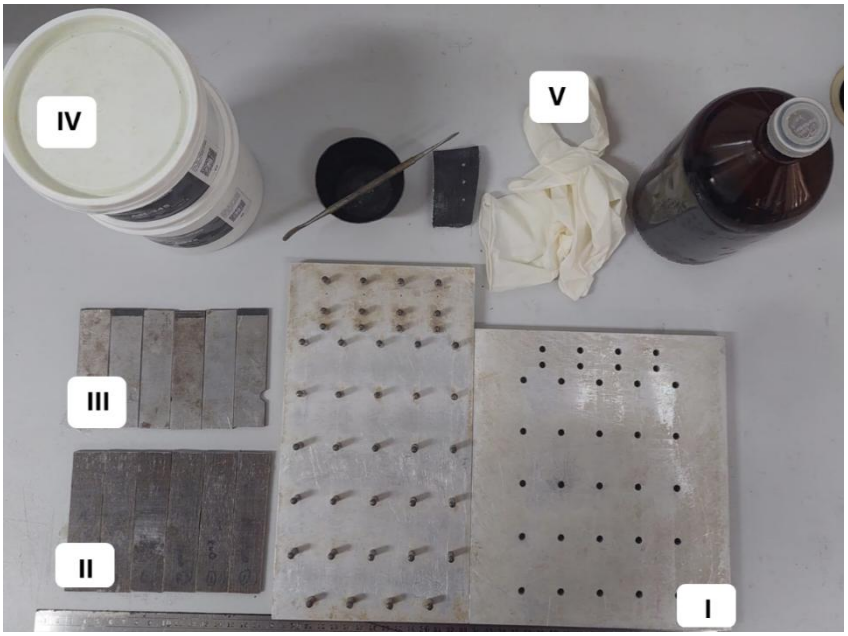
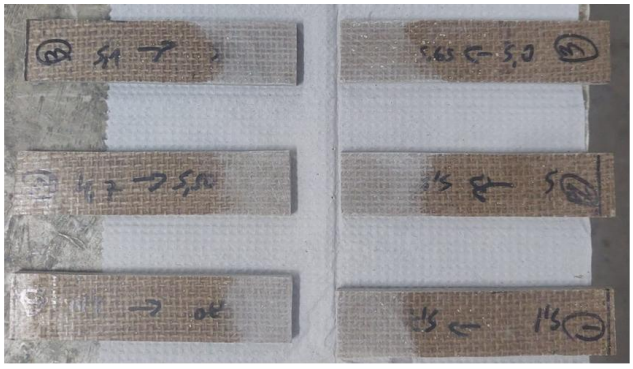


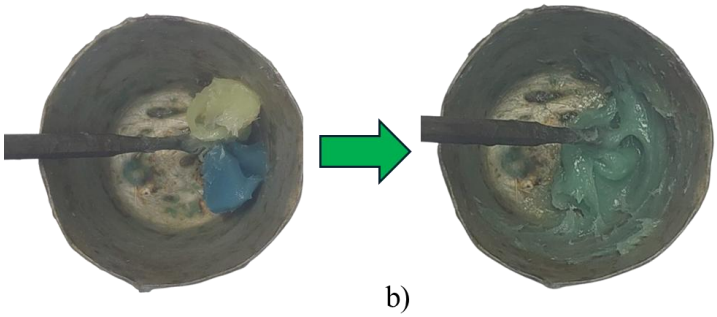
Figura 26 - Ferramentas e materiais utilizados para a fabricação das juntas coladas: I) molde metálico, II) substratos, III) espaçadores metálicos, IV) Adesivo epóxi e V) luvas, acetona P.A, lixa 100P e ferramenta para homogeneização do adesivo.

A fabricação das juntas foi realizada baseada nas etapas apresentadas anteriormente na seção **2.3.3.4 Processos de Fabricação**. Inicialmente, após o corte dos substratos nas dimensões de 107,5 mm x 25 mm, foi realizada a preparação da superfície do substrato, que é essencial para a qualidade e eficiência da adesão. Primeiramente, realizou-se um tratamento mecânico manual com o uso de uma lixa de desbaste de granulometria P100, aplicada na região destinada à colagem. Esse desbaste segue um padrão de angulação específico de 45º e -45º em relação ao eixo de simetria do comprimento do substrato. Esse processo é fundamental para melhorar a rugosidade e, consequentemente, a interação mecânica entre o adesivo e o substrato. Posteriormente, foi realizado um tratamento químico em que se aplicou acetona P.A (99% de pureza) na área lixada (ver Figura 27a). Esse procedimento, remove quaisquer resíduos superficial, gorduras ou outras partículas que poderiam comprometer a adesão química. Esses tratamentos aplicados estão de acordo com o indicado e praticado pela literatura [59].

Após, o adesivo epóxi foi preparado para aplicação. O adesivo utilizado foi um sistema epóxi bicomponente (parte “A” e “B”), que apresenta uma proporção de mistura recomendada pelo fabricante de 100:45 em peso. Inicialmente, pesou-se uma quantidade da parte “A” (5g) e de parte “B” (2,25g). Em seguida, realizou-se a homogeneização com o auxílio de uma espátula (ver Figura 27b).



a)



b)

Figura 27 - (a) Substratos após a preparação da superfície; (b) Homogeneização do adesivo.

Em seguida, foi realizada a montagem no molde, posicionando os aderentes inferiores e os espaçadores para garantir o alinhamento adequado das juntas durante o processo de cura. Com o molde devidamente montado, o adesivo previamente homogeneizado foi aplicado manualmente com o auxílio de uma espátula na região de sobreposição de ambos os aderentes, assegurando uma distribuição uniforme para minimizar a ocorrência de áreas com deficiência de adesivo. Após a aplicação do adesivo, o aderente superior foi posicionado sobre o inferior no molde, garantindo o contato adequado entre as superfícies de sobreposição. Durante essa etapa, cuidados com o correto posicionamento do substrato foram tomados para mitigar a formação de bolhas no adesivo, permitindo que eventuais bolhas fossem deslocadas para as extremidades e eliminadas (ver Figura 28). Por fim, o molde foi fechado e fixado, garantindo a correta aplicação da pressão necessária para a cura.

A cura inicial das juntas foi realizada na mesma prensa utilizada na fabricação dos compósitos, em temperatura ambiente por um período de 24 horas. Após esse tempo, as juntas foram removidas do molde e acondicionadas em um dessecador contendo sílica-gel por um período adicional de cinco dias, a fim de completar o processo de cura.

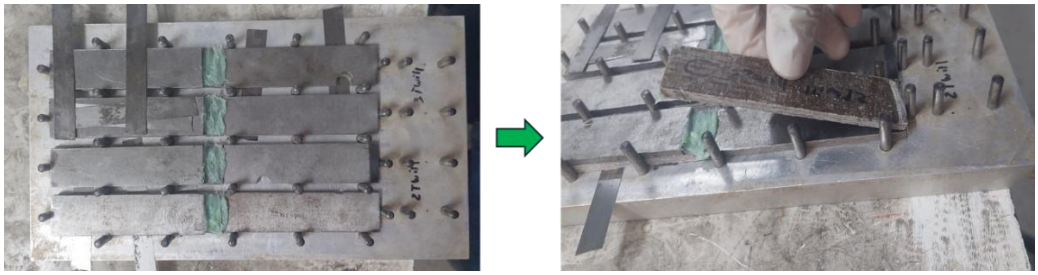


Figura 28 - Montagem do molde, aplicação do adesivo e posicionamento dos aderentes.

Após a cura, o excesso de adesivo foi cuidadosamente removido com uma lixa rotativa, assegurando que as bordas das juntas ficassem uniformemente acabadas e sem comprometer a resistência adesiva (ver Figura 29).

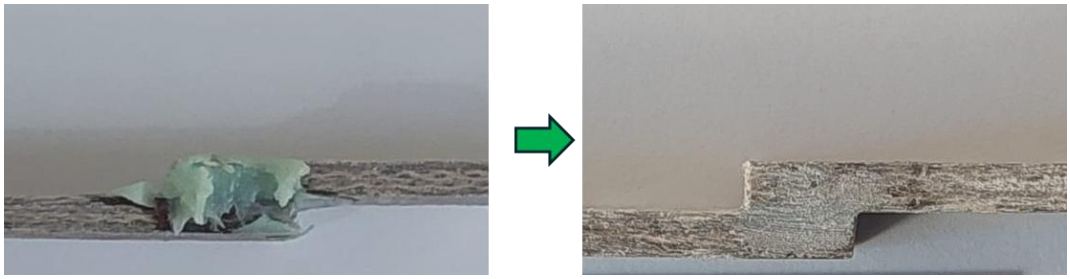


Figura 29 - Junta fabricada e com excesso de adesivo removido

A nomenclatura de cada junta foi determinada com base no tipo de tecido e no número de camadas de substrato, seguindo o mesmo padrão adotado na seção de fabricação dos compósitos, conforme descrito abaixo:

- Juta5 – Junta com substratos laminados com 5 camadas de juta;
- J/F-UD2 – Junta com substratos laminados com um núcleo de 5 camadas de juta e 2 camadas de linho UD de cada lado;
- J/F-UD3 - Junta com substratos laminados com um núcleo de 5 camadas de juta e 3 camadas de linho UD de cada lado;
- J/F-Twill2 - Junta com substratos laminados com núcleo de 5 camadas de juta e 2 camadas de linho twill de cada lado;
- J/F-Twill3 - Junta com substratos laminados com núcleo de 5 camadas de juta e 3 camadas de linho twill de cada lado;
- F-Twill11 - Junta com substratos laminados com 11 camadas de linho twill;
- F-UD11 - Junta com substratos laminados com 11 camadas de linho unidirecional (UD).

Como pode ser observado não foram fabricadas, e consequentemente ensaiadas,

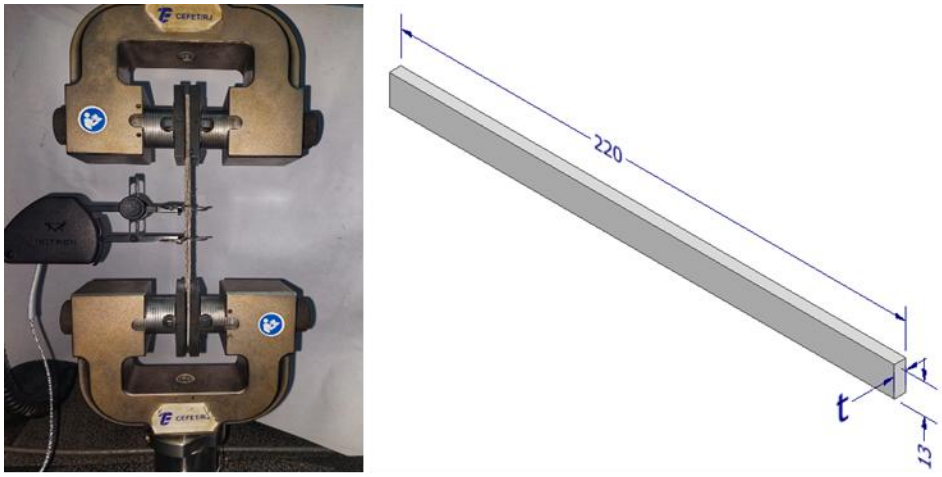
juntas com aderentes híbridos reforçados com uma camada de tecido de linho (J/F-UD1 ou J/F-Twill1) de cada lado. Isso deve-se ao fato de que, como observado em pesquisas anteriores [62, 63], o ponto ideal para juntas é a partir do uso de duas camadas em cada lado de um núcleo. Também foram consideradas as propriedades mecânicas dos substratos, assim como a otimização de materiais na definição das juntas a serem fabricadas e ensaiadas.

3.4 Caracterização Mecânica – Compósitos

A caracterização das propriedades mecânicas dos compósitos foi realizada por meio de ensaios mecânicos de tração uniaxial, flexão em três pontos e impacto Charpy.

3.4.1 Ensaio de Tração

Neste trabalho, foram realizados, pelo menos, 4 ensaios de tração até a ruptura de cada compósito fabricado. Os ensaios foram realizados na máquina universal de ensaios da marca INSTRON® 5996 (Norwood, MA, EUA) equipada com uma célula de carga com capacidade de 10 kN, localizada no Laboratório de Adesivos e Compósitos (LADES) do CEFET/RJ - Campus Maracanã. Para medir os deslocamentos e, posteriormente, determinar as deformações foi utilizado um extensômetro conectado no centro das amostras ensaiadas. A velocidade do ensaio foi de 1 mm/min, baseado na norma ASTM D3039 [69]. Todas as amostras foram testadas em temperatura ambiente de, aproximadamente, 27°C. Antes e após os ensaios, as amostras foram acondicionadas em um dessecador com sílica-gel, para minimizar a ação da umidade. A Figura 30 mostra, em a) a montagem de uma amostra na máquina de tração e em b) o esquema de uma amostra de tração com suas dimensões básicas.



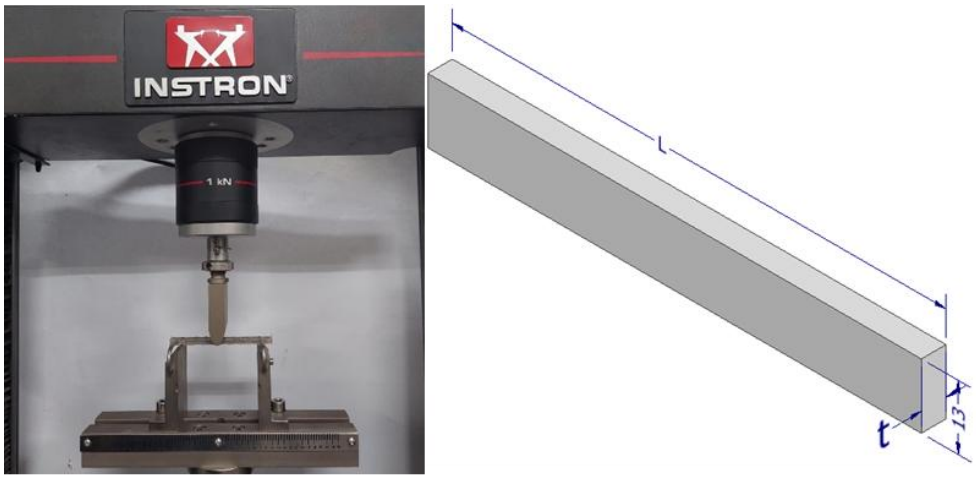
a) b)

Figura 30 – a) Exemplo de ensaio de tração; b) Esquema de uma amostra de tração com as dimensões básicas.

A geometria das amostras foi baseada na norma ASTM D3039 [69], com dimensões de tração foram 220 mm x 13 mm x t mm (comprimento x largura x espessura). A espessura "t" variou de acordo com cada placa e está descrito na Tabela 6.

3.4.2 Ensaio de Flexão

Os ensaios de flexão foram realizados em, pelo menos, 4 amostras de cada compósito fabricado utilizando uma máquina de teste universal Instron® 5966 (Norwood, MA, EUA) com uma célula de carga com capacidade de 1 kN, localizada no Laboratório de Adesivos e Compósitos (LADES) do CEFET/RJ - Campus Maracanã. A velocidade do teste foi de 1 mm/min de acordo com a norma ASTM D7264 [70]. Todos os ensaios foram realizados em temperatura ambiente de, aproximadamente, 27°C. A Figura 31 mostra em a) um exemplo da montagem de uma amostra na máquina de flexão e em b) o esquema de uma amostra de flexão com suas dimensões básicas.



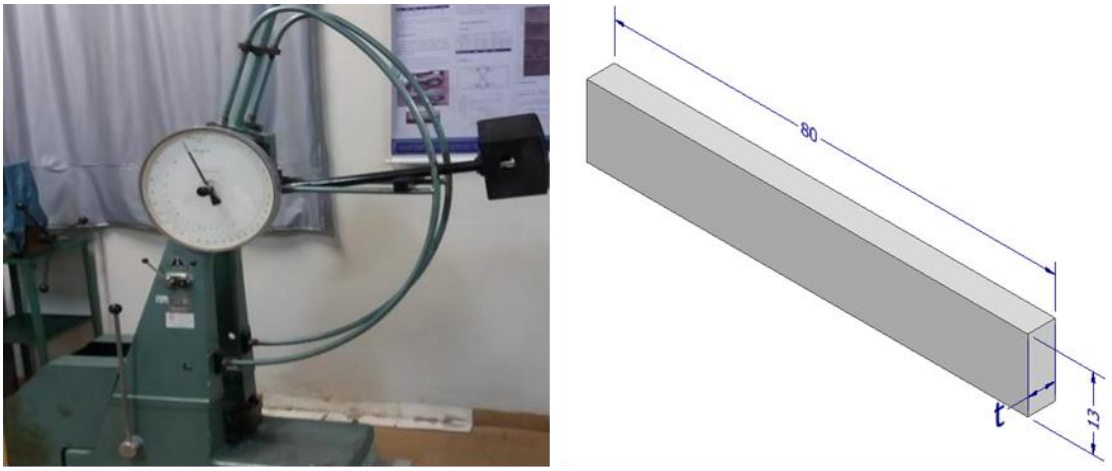
a) b)

Figura 31 - a) Exemplo de ensaio de flexão em 3 pontos; b) Esquema de uma amostra de flexão com as dimensões básicas.

As dimensões dos corpos de prova para o teste de flexão tiveram como base a norma ASTM D7264 e foram de L mm x 13 mm x t mm (onde o comprimento "L" variou de acordo com a espessura "t" e com uma razão vão/profundidade de aproximadamente 20:1). A espessura "t" variou de acordo com cada placa e está descrito na Tabela 6.

3.4.3 Ensaio de Impacto

Foram realizados, pelo menos, 4 ensaios de impacto de cada compósito fabricado. Os testes de impacto foram conduzidos utilizando uma máquina de impacto WPM PS 30 (Leipzig, Alemanha), localizada no Laboratório de Materiais (LAMAT) do CEFET/RJ - Campus Maracanã. Foi utilizado um martelo de energia máxima de 30 kgf e erro de 0,007 kgf. Os ensaios foram realizados conforme a norma ASTM D4812 [71]. Todos os ensaios foram realizados em temperatura ambiente de, aproximadamente, 27°C. A Figura 32 mostra em a) um exemplo da montagem de uma amostra na máquina de impacto e em b) o esquema de uma amostra de impacto com suas dimensões básicas.



a) b)

Figura 32 - a) Exemplo de ensaio de impacto; b) Esquema de uma amostra de impacto com as dimensões básicas.

As dimensões dos corpos de prova para o teste de impacto tiveram como base a norma ASTM D4812 e foram 80 mm x 13 mm x t mm (comprimento x largura x espessura). A espessura "t" variou de acordo com cada placa e está descrito na Tabela 6.

3.5 Caracterização Mecânica – Juntas Adesivas

Os ensaios de cisalhamento em juntas adesivas sobrepostas simples foram realizados baseados na norma ASTM D5868, recomendada para juntas com aderentes compósitos, em pelo menos 5 amostras. Os ensaios foram realizados na máquina universal de ensaios da marca INSTRON® 5996 (Norwood, MA, EUA) equipada com uma célula de carga com capacidade de 10 kN, localizada no Laboratório de Adesivos e Compósitos (LADES) do CEFET/RJ - Campus Maracanã. A velocidade do ensaio foi de 1 mm/min, baseado na norma ASTM D5868. A Figura 33 mostra a montagem de uma junta na máquina de ensaios.

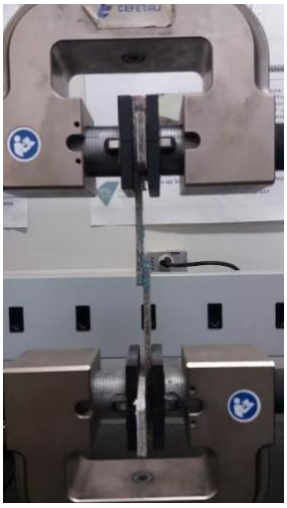


Figura 33 – Exemplo de ensaio de juntas.

Os modos de falha foram analisados conforme os critérios estabelecidos pela norma ASTM D5573, permitindo a classificação dos tipos de falha observados, como falha coesiva, adesiva ou mista. A análise dos resultados foi complementada com imagens das fraturas obtidas por análise macroscópica, permitindo uma melhor caracterização dos mecanismos de falha predominantes nas juntas adesivas sobrepostas simples.

3.6 Caracterização Morfológica por MEV

A caracterização morfológica das fibras, tecidos e superfícies de fratura de tração foi realizada por microscopia eletrônica de Varredura (MEV), utilizando o equipamento TM4000Plus Hitachi (Tóquio, Japão), localizado no Laboratório de Caracterização de Materiais do CEFET/RJ Campus Angra dos Reis. As análises foram realizadas na fibra e nos tecidos de linho e nas amostras fraturadas por tração. O objetivo foi avaliar o diâmetro e a disposição das fibras nos tecidos, além de examinar as seções de fratura dos corpos de prova submetidos aos ensaios de tração.

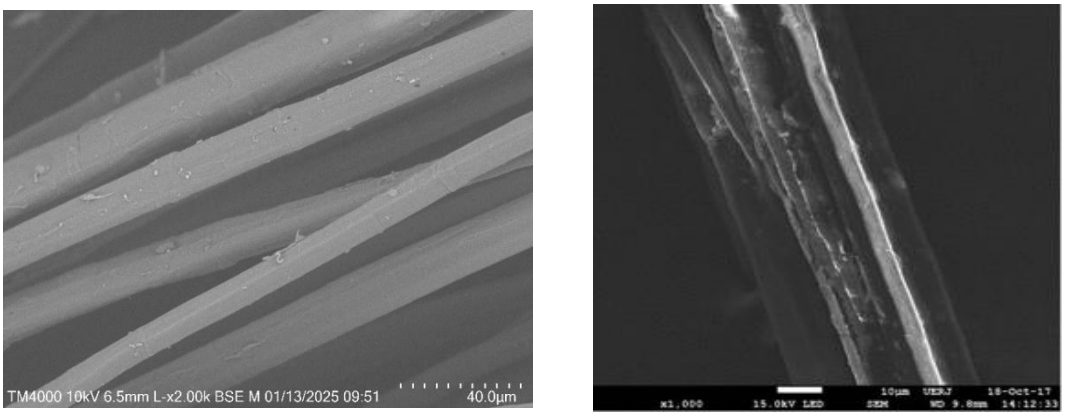
A análise das fibras foi realizada a 10 kV, enquanto os tecidos de linho unidirecional (UD) e linho sarja (Twill) foram analisados a 15 kV. As superfícies de fratura dos ensaios de tração foram examinadas a 15 kV. Todas as análises foram realizadas em condição de baixo vácuo e sem metalização das amostras.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os principais resultados dos ensaios de tração, flexão e impacto. Os valores médios, obtidos a partir de um grupo de pelo menos quatro amostras, são tratados estatisticamente para cada caso estudado. Além disso, são analisados os resultados quantitativos dos ensaios das juntas adesivas, acompanhados da avaliação de seus modos de falha. Também são apresentadas imagens de MEV, ilustrando as morfologias das fibras e tecidos, bem como as superfícies de fratura dos ensaios de tração nos principais casos.

4.1 Análise morfológica das fibras e tecidos

A análise morfológica das fibras e dos tecidos ajuda compreender as características estruturais que podem influenciar nas propriedades mecânicas e na adesão interfacial em compósitos. A Figura 34 apresenta micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) das fibras de a) linho e b) juta (retirada de [35]).



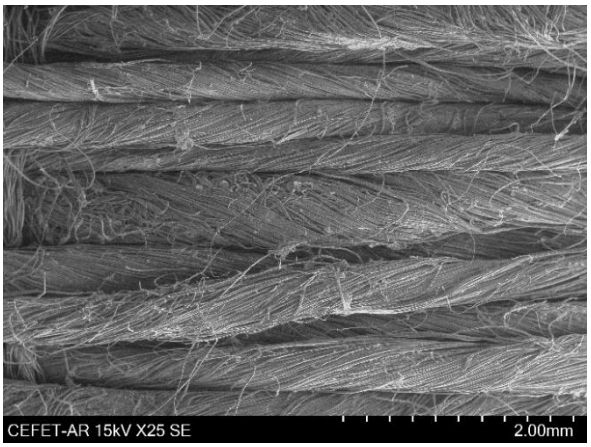
a) b)

Figura 34 – Micrografias MEV das fibras: a) linho; c) juta.

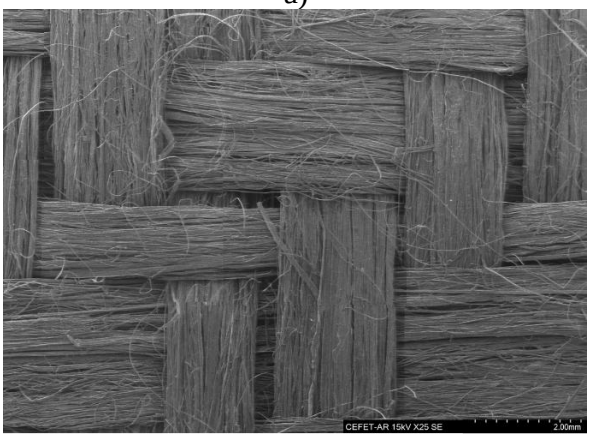
A morfologia das fibras, incluindo seu diâmetro, é um fator determinante para a adesão interfacial. Fibras com diâmetros menores tendem a apresentar uma maior área

superficial, o que pode melhorar a adesão entre a fibra e a matriz e, consequentemente, as propriedades mecânicas. A partir da Figura 34a é possível obter um diâmetro médio de 13,4 ± 0,9 µm para a fibra de linho. Já a fibra de juta, apresenta um diâmetro médio, significativamente maior, de 66 ± 13 µm, conforme relatado por Lima *et al.* [35]. O diâmetro das fibras influencia diretamente suas propriedades individuais e a adesão interfacial, uma vez que fibras com diâmetros menores, como a fibra de linho, possuem uma maior relação superfície-volume, o que favorece uma distribuição mais uniforme das tensões e uma maior área de contato com a matriz, promovendo uma adesão mais eficiente. Por outro lado, fibras com diâmetros maiores, como a fibra de juta, tendem a apresentar uma menor razão superfície-volume, o que implica em uma área de contato relativamente menor com a matriz por unidade de volume, podendo resultar em uma adesão interfacial menos eficiente. Consequentemente, isso pode afetar as propriedades mecânicas finais do compósito [72].

A Figura 35 mostra micrografias obtidas por MEV dos tecidos unidirecionais e *twill* de linho.



a)



b)

Figura 35 – Micrografia MEV da arquitetura dos tecidos de linho: a) unidirecional; b) *twill*.

Como visto na Figura 35a, o tecido unidirecional é composto por feixes (*bundles)* de fibras alinhadas em uma mesma direção (0°), o que confere, por si só, uma maior resistência e rigidez nessa direção específica. Esse alinhamento uniforme das fibras permite um controle mais preciso da distribuição de cargas ao longo do material, maximizando a eficiência na transferência de tensões e minimizando a ocorrência de descontinuidades

Por outro lado, os tecidos *twill* (Figura 35b), apresentam um padrão entrelaçado em diagonais, que podem introduzir desafios, como a formação de pontos concentradores de tensão, onde bolsões ou vazios de resina podem surgir durante o processo de fabricação. Esses defeitos podem atuar como áreas críticas para o início de falhas, comprometendo a integridade estrutural do compósito. Além disso, a presença de fibras dispostas a 90° em relação à direção da aplicação da força pode prejudicar as propriedades mecânicas em certos tipos esforços e condições, uma vez que essas fibras não contribuem efetivamente para a transferência de cargas, podendo até mesmo atuar como pontos de fragilidade.

Outro fator relevante que pode ser observado é a ocorrência de fibras mal alinhadas ou desorientadas nos tecidos UD e *twill*, que podem criar regiões de baixa adesão com a matriz, reduzindo a eficiência da transferência de tensões e impactando negativamente as propriedades mecânicas do compósito.

4.2 Caracterização Mecânica – Compósitos

Após os ensaios mecânicos dos compósitos, os dados foram tratados a fim de serem apresentados na forma de tabelas e gráficos. Os dados obtidos serão apresentados e discutidos divididos em dois grupos: efeito do tipo de fibra e arquitetura do tecido, e efeito da hibridização.

4.2.1 Ensaio de Tração

4.2.1.1 Efeito do Tipo de Fibra e Arquitetura do Tecido

A Figura 36 mostra as curvas representativas de tensão-deformação dos corpos de prova puros em função do tipo de fibra e da arquitetura do tecido.

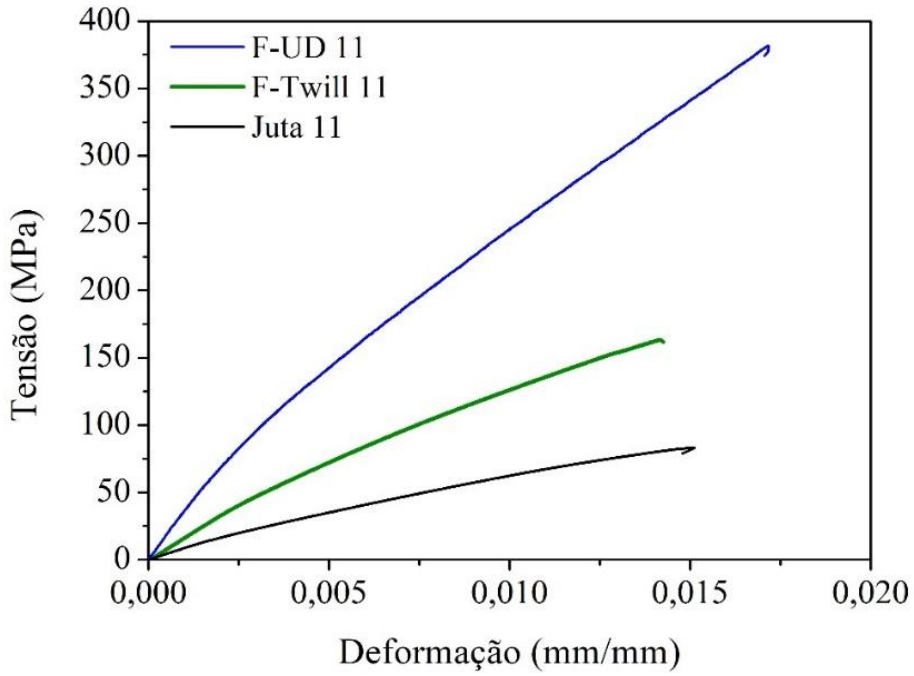


Figura 36 - Curvas representativas de tensão-deformação de tração das amostras puras em função do tipo de fibra e arquitetura do tecido.

Pode-se observar que os corpos das amostras de linho puro (F-Twill 11 e F-UD 11) exibiram uma curva característica de tensão-deformação com um regime elástico linear inicial e apresentando um leve ponto de transição para um comportamento menos linear que pode ser observado em, aproximadamente 0,002 mm/mm de deformação, o que é mais evidente na curva da amostra F-UD 11. Esse comportamento é típico de compósitos reforçados com fibras de linho, conforme já demonstrado em diversos estudos envolvendo amostras puras ou híbridas fabricadas com várias combinações de linho e outras fibras [73, 74].

Isso pode ser atribuído à redução da rigidez efetiva causada pelo deslizamento gradual (ou desenrolamento) das microfibrilas. As paredes das fibras elementares de linho possuem uma estrutura helicoidal e, sob carregamento de tração, essas estruturas se "desenrolam" em uma hélice mais aberta para se realinharem com o eixo da carga de tração. Quando esse realinhamento é concluído, altera o comportamento de suporte de carga e reduz ligeiramente a inclinação da curva tensão-deformação [75]. Nota-se também que todos os corpos de prova exibiram deformações semelhantes até a ruptura. Além disso, os corpos de prova apresentam, de modo geral, comportamento frágil.

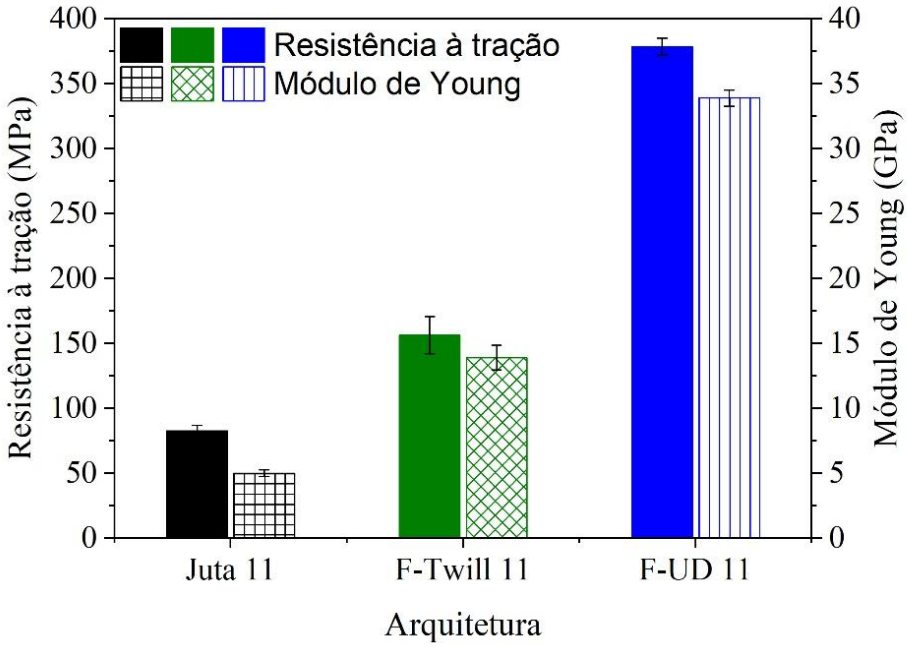


Figura 37 - Resistência e à tração e módulo de Young das amostras puras em função do tipo de fibra e da arquitetura do tecido.

Os resultados dos ensaios de tração das amostras puras (Juta 11, F-UD 11 e F-Twill 11) são apresentados na Figura 37 (acima) e na Tabela 8. Nota-se que as propriedades mecânicas são influenciadas pelo tipo de fibra e pela arquitetura do tecido. Por exemplo, observa-se que os compósitos de linho puro (F-UD 11 e F-Twill 11) apresentaram maior resistência à tração e rigidez quando comparados ao corpo de prova de compósito de juta puro. Isso se deve ao fato de a fibra de linho possuir melhores propriedades mecânicas do que a fibra de juta, como já documentado na literatura por Neto *et al.* [7].

Considerando o efeito da arquitetura do tecido nas propriedades mecânicas dos compósitos, a amostra de linho UD puro (F-UD 11) apresentou a maior resistência à tração e rigidez, seguido pelo corpo de prova de linho *twill* puro (F-Twill 11), e, por último, pelo corpo de prova de juta puro (Juta 11). A resistência à tração e a rigidez do corpo de prova de linho UD puro foram 78% e 82% maiores, respectivamente, em comparação com o corpo de prova de juta puro. Por outro lado, o corpo de prova de linho Twill puro apresentou resistência à tração e rigidez 47% e 56% maiores, respectivamente, que o corpo de prova de juta puro. Esse desempenho superior do corpo de prova de linho UD puro pode ser atribuído ao fato de que, em tecidos UD, as fibras estão alinhadas na direção da carga (0°), garantindo que a carga aplicada seja suportada de maneira mais eficaz pelas fibras de reforço. Em contraste, no corpo de prova reforçado com linho *twill*, as fibras são entrelaçadas em diferentes direções, na direção da aplicação da carga (0°) e na direção transversal a aplicação da carga (90°), resultando em uma estrutura menos equilibrada. Esse desequilíbrio, junto com as forças de cisalhamento envolvidas, leva a tensões concorrentes. Consequentemente, a resistência à tração é menor na direção longitudinal, como já documentado na literatura [76, 77].

É amplamente conhecido que vários fatores afetam o desempenho mecânico de um compósito, sendo um deles a arquitetura do tecido. Nesse sentido, diversos estudos investigaram os efeitos de diferentes arquiteturas de tecido. Por exemplo, Karaduman (2022) investigou o efeito de diferentes tramas de tecido (UD, bidirecional, 2/2 *basket* e 2/2 *twill*) nas propriedades mecânicas de compósitos de tecido de cânhamo/epóxi. Resultados semelhantes aos deste estudo foram encontrados em relação ao efeito do tecido nas propriedades mecânicas dos compósitos, onde os compósitos UD exibiram a maior resistência à tração, módulo de tração, resistência à flexão e módulo de flexão na direção 0° (fibra). Os compósitos de trama bidirecional apresentaram a segunda maior resistência à tração e flexão, juntamente com seus respectivos módulos, seguidos pelos compósitos de trama 2/2 *twill*. Os compósitos reforçados com trama 2/2 *twill* exibiram as menores propriedades mecânicas devido ao alto entrelaçamento, ângulo das fibras, estrutura menos equilibrada e forças de cisalhamento resultantes durante diferentes carregamentos [77]. De maneira semelhante, Venkateshwaran *et al.* (2012) também obtiveram resultados semelhantes, para um tipo diferente de fibra (banana), em seu estudo, no qual compararam as propriedades mecânicas de compósitos de banana/epóxi

feitos com três tipos diferentes de trama, como bidirecional, *twill* e *basket* (cesta). A arquitetura de trama bidirecional apresentou melhor resistência à tração quando comparada às tramas *twill* e cesta. Eles atribuíram esse resultado ao entrelaçamento equilibrado das fibras na estrutura do tecido bidirecional. Mostrando assim que quando maior o entrelaçamento, maior a possibilidade de concentradores de tensão que irão afetar negativamente as propriedades de tração [78].

Tabela 8 - Dados de teste de tração em função da arquitetura do tecido.

Compósito	**Resistência à tração (MPa)**	**Módulo de Young (GPa)**	**Deformação (mm/mm)**
Juta 11	82,56 ± 3,58	6,12 ± 0,16	0,015 ± 0,001
F-Twill 11	156,42 ± 14,38	13,92 ± 0,96	0,013 ± 0,001
F-UD 11	378,43 ± 6,48	33,89 ± 0,62	0,017 ± 0,001

A partir da Tabela 8, pode-se observar que a deformação na ruptura amostra de linho UD puro foi ligeiramente maior do que a do corpo de prova de compósito de linho *twill* puro. Isso pode indicar uma falha prematura do compósito de linho *twill* puro, que pode ser atribuída a pontos de concentração de tensões causados pelo alto nível de entrelaçamento do tecido, anteriormente discutidos.

Os resultados obtidos para os compósitos puros de linho *twill* e UD não apenas corroboram estudos anteriores, mas também demonstram desempenho superior em termos de resistência à tração e módulo de Young quando comparados com a literatura. A Tabela 9 e 10 apresentam uma comparação detalhada entre os resultados deste estudo e alguns trabalhos, destacando a superioridade dos compósitos desenvolvidos neste trabalho.

Tabela 9 - Comparação das propriedades mecânicas de tração dos compósitos de linho *twill* com a literatura.

Parâmetros	**Autores/Referências**			
	Próprio	Cihan [79]	Fiore [49]	Meredith *et al.* [80]
Arquitetura	2x2 Twill			
Gramatura (g/m²)	200	200	220	300
Matriz	Epóxi			
Massa de fibra (%)	58	36,28 ± 1,50	45,6 ± 0,5	42
Método de fabricação	Moldagem por compressão	Infusão de resina	*Vacuum bagging*	*Vacuum bagging* + *autoclave*
Resistência à tração (MPa)	156,42 ± 14,38	86,43 ± 4,39	90,43 ± 1,47	92,6

Módulo de tração (GPa)	13,92 ± 0,96	8,89	4,5 ±0,15	8,9

Tabela 10 - Comparação das propriedades mecânicas de tração dos compósitos de linho UD com a literatura.

Parâmetros	**Autores/Referências**			
	Próprio	Poilâne *et al.* [81]	Saadati *et al.* [82]	Moudood *et al. [83]*
Arquitetura	Unidirecional			
Gramatura (g/m²)	300	180	200	180
Matriz	Epóxi			
Massa de fibra (%)	62	60	41	50
Método de fabricação	Moldagem por compressão	Moldagem por compressão	*RTM*	Infusão à vácuo
Resistência à tração (MPa)	378,43 ± 6,48	357 ± 13	298,39 ± 17,53	360
Módulo de tração (GPa)	33,89 ± 0,62	33,10 ± 0,40	30,04 ± 1,21	28,7

Os resultados apresentados nas Tabelas 9 e 10 destacam a superioridade dos compósitos de linho *twill* e UD desenvolvidos neste estudo em relação aos trabalhos anteriores. Para os compósitos de linho *twill*, a resistência à tração e o módulo de tração superaram significativamente os valores reportados na literatura. No caso dos compósitos de linho UD, os valores de resistência à tração e módulo de tração também foram superiores. Esses resultados reforçam a eficácia das técnicas adotadas e destacam o potencial das fibras de linho, especialmente na arquitetura UD, como uma alternativa viável e sustentável para aplicações estruturais que exigem alta resistência e rigidez.

4.2.1.2 Efeito da Hibridização

A Figura 38 mostra as curvas representativas de tensão-deformação das amostras em função da hibridização.

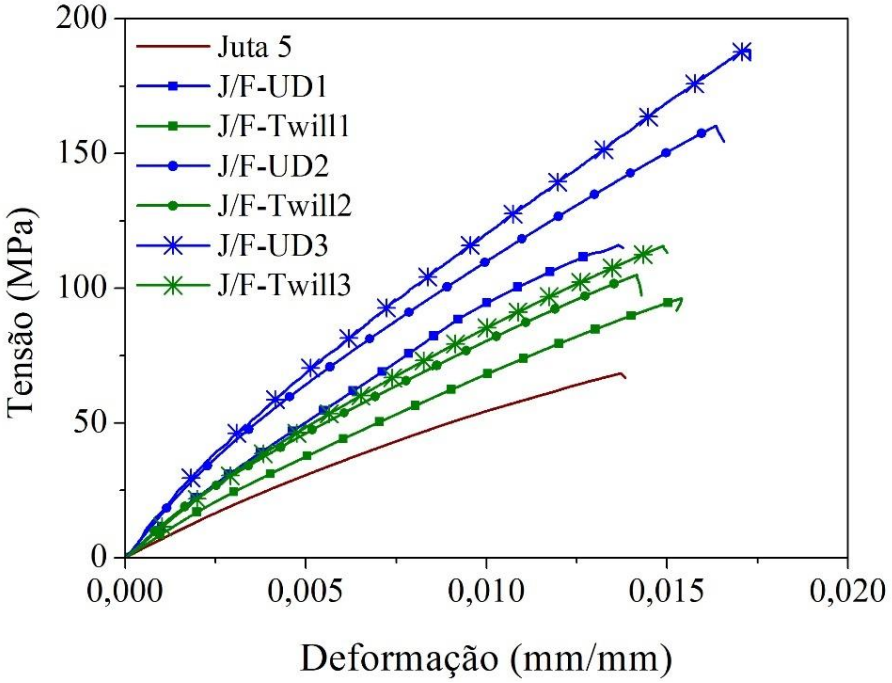
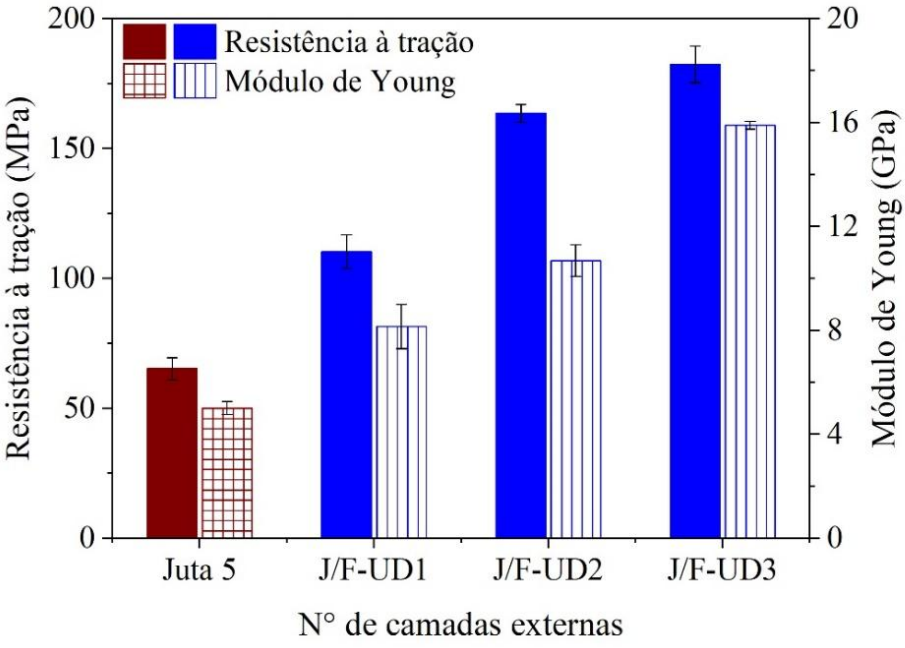
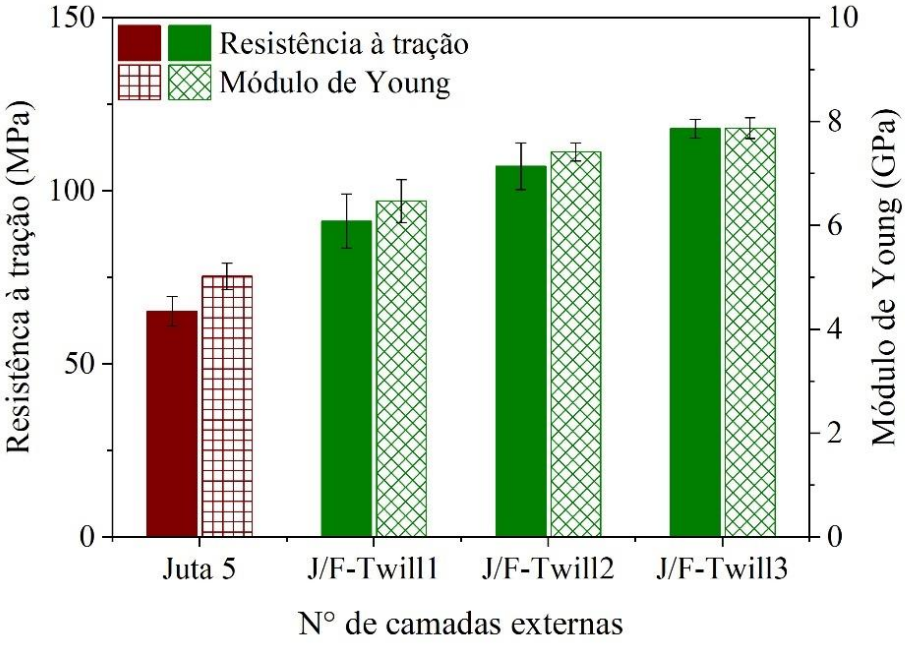


Figura 38 - Curvas representativas de tensão-deformação de tração das amostras em função da hibridização.

Pode-se observar que as curvas dos corpos de prova híbridos exibiram um comportamento muito semelhante ao dos corpos de prova puros. Os corpos de prova híbridos também apresentaram um ponto de transição (aproximadamente em 0,002 mm/mm de deformação) onde ocorre a transição de um regime linear para um regime não linear, embora com menor ênfase. Conforme explicado anteriormente, isso pode ser devido ao deslizamento e rearranjo das microfibrilas dentro das fibras. Além disso, todas as amostras apresentaram deformações semelhantes até a ruptura, sendo o corpo de prova de juta puro (Juta 5) o que exibiu a menor deformação. De modo geral, as amostras exibiram comportamento frágil.



a)



b)

Figura 39 - Resistência à tração e módulo de Young das amostras em função da hibridização para amostras reforçadas com a) linho UD e b) linho *twill*.

Como observado na Figura 39 (a) e (b) e na Tabela 11, que apresentam os resultados dos ensaios de tração dos corpos de prova híbridos (juta/linho UD e juta/linho

twill). Nota-se que a hibridização, através da combinação de fibras de linho e juta, resultou em propriedades de tração superiores em comparação com o compósito de fibra de juta pura (Juta 5), como esperado. Um dos fatores-chave para essa melhoria foi o aumento da fração volumétrica de fibra de linho, que está diretamente relacionado ao aumento do número de camadas externas de linho. Conforme o número de camadas externas de linho aumentou, a fração volumétrica de fibra de linho também aumentou, variando de 14% (1 camada) para 28% (3 camadas) nos corpos de prova reforçados com linho unidirecional (UD) e de 10% (1 camada) para 23% (3 camadas) nos corpos de prova reforçados com linho Twill. Esse aumento na fração volumétrica de fibra de linho, que possui maior resistência mecânica em comparação com a fibra de juta, teve um impacto direto e significativo nas propriedades mecânicas dos compósitos híbridos.

Por exemplo, na Figura 39a), nos casos de compósitos híbridos com fibras externas de linho UD, os aumentos na resistência à tração foram de aproximadamente 40% para J/F-UD1, 60% para J/F-UD2 e 64% para J/F-UD3, respectivamente, em comparação com o compósito de juta pura. Enquanto isso, na Figura 39b), nos casos de compósitos híbridos com fibras externas de linho *twill*, observa-se que o aumento no número de camadas de linho *Twill* resultou em uma melhoria ligeiramente menor na resistência à tração, com valores aproximados de 29% (J/F-Twill1), 39% (J/F-Twill2) e 45% (J/F-Twill3), respectivamente. Portanto, observa-se que, ao aumentar a fração da fibra mais resistente, ou seja, a fibra de linho, a resistência à tração também aumenta. Esse comportamento foi observado em outros estudos que demonstraram resultados superiores com o aumento do teor de fibra de linho [84]. Ademais, a diferença na magnitude dos ganhos entre os compósitos UD e *twill* pode ser atribuída à orientação das fibras: as fibras unidirecionais (UD) são mais eficientes na transferência de carga ao longo de uma única direção (0°), enquanto o arranjo *twill*, apresenta uma distribuição de tensões menos eficiente sob carregamento uniaxial devido a orientação das fibras em 0° e 90°.

O aumento no número de camadas externas de linho de 1 para 2 e, posteriormente, para 3 camadas resultou em aumentos de aproximadamente 33% e 40% na resistência à tração nos compósitos híbridos reforçados com linho UD nos corpos de prova J/F-UD2 (2 camadas) e J/F-UD3 (3 camadas), respectivamente, em comparação com o corpo de prova reforçado com uma camada (J/F-UD1). Enquanto isso, para os corpos de prova

reforçados com linho Twill, o aumento de 1 para 2 e 3 camadas resultou em uma variação na resistência à tração de aproximadamente 15% e 23% para os casos J/F-Twill2 (2 camadas) e J/F-Twill3 (3 camadas), respectivamente, em comparação com o caso J/F-Twill1 (1 camada).

Outro ponto importante a ser destacado é que um compósito reforçado com 2 camadas de linho UD apresentou resistência à tração superior a outro reforçado com 3 camadas de linho *twill*. Isso demonstra que, além da fração volumétrica e do número de camadas, a arquitetura das fibras (orientação e disposição) desempenha um papel crucial no desempenho final do material. Compósitos híbridos reforçados com 2 camadas de linho UD, por exemplo, exibiram maior resistência à tração do que compósitos de linho *twill* puro (F-Twill 11). Esse comportamento pode ser explorado como um fator de projeto na seleção da arquitetura de fibra mais adequada para aplicações específicas.

Ademais, na Figura 39, observa-se que a rigidez dos compósitos exibiu um comportamento semelhante ao da resistência à tração, ou seja, aumentou com o número de camadas externas de linho. Por exemplo, nos casos de compósitos híbridos com camadas externas de linho UD, os aumentos na rigidez em comparação com o compósito de juta puro foram de aproximadamente 38%, 53% e 68% para J/F-UD1, J/F-UD2 e J/F-UD3, respectivamente. Enquanto isso, nos casos com camadas externas de linho Twill, os aumentos foram de aproximadamente 22%, 32% e 36% para J/F-Twill1, J/F-Twill2 e J/F-Twill3, respectivamente. Esses resultados reforçam a importância de se considerar tanto o número de camadas externas quanto arquitetura do tecido no projeto de materiais compósitos, especialmente em aplicações estruturais onde a rigidez e a resistência são parâmetros críticos.

Tabela 11 - Dados de teste de tração em função da hibridização.

Compósito	**Resistência à tração (MPa)**	**Módulo de Young (GPa)**	**Deformação (mm/mm)**
Juta 5	65,24 ± 4,25	5,02 ± 0,25	0,014 ± 0,002
J/F-UD1	110,39 ± 6,50	8,15 ± 0,85	0,015 ± 0,001
J/F-UD2	163,65 ± 3,45	10,69 ± 0,61	0,017 ± 0,001
J/F-UD3	182,48 ± 7,13	15,91 ± 0,15	0,016 ± 0,001
J/F-Twill	91,34 ± 7,86	6,47 ± 0,41	0,015 ± 0,003
J/F-Twill2	107,13 ± 6,73	7,42 ± 0,18	0,015 ± 0,001
J/F-Twill3	117,98 ± 2,66	7,88 ± 0,20	0,016 ± 0,001

A partir da Tabela 11, pode-se observar que a deformação dos corpos de prova híbridos apresentou variação insignificante quando comparadas entre si e até mesmo com a amostra de juta puro 5. Isso pode ser explicado pelo fato de que o material do núcleo, a fibra de juta, é mais frágil do que as camadas externas (linho), e controla a deformação até a ruptura [63].

Os resultados dos compósitos híbridos de linho e juta foram comparados com estudos anteriores que investigaram a hibridização com fibras sintéticas mantendo-se a configuração de um núcleo fixo de 5 camadas de juta. A Tabela 12 apresenta uma comparação entre os resultados deste estudo e os de alguns trabalhos recentes.

Tabela 12 - Comparação das propriedades mecânicas de tração dos compósitos híbridos.

Amostras	**Resistência à tração (MPa)**	**Módulo de tração (GPa)**	**Espes. (mm)**	**Referência**
J/F-UD2 (2 camadas externas de linho)	163,65 ± 3,45	10,69 ± 0,61	3,7	Própria
H-0 (3 camadas externas de vidro)	136,30 ± 7,49	10,22 ± 0,24	5	Queiroz *et al*. [8]
J/F-UD3 (3 camadas externas de linho)	182,48 ± 7,13	15,91 ± 0,15	4	Própria
C1 (1 camada externas de carbono)	188,01 ± 9,10	16,22 ± 0,54	6	Queiroz *et al.* [38]

Os resultados dos compósitos híbridos de linho e juta foram comparados com estudos que utilizaram fibras sintéticas como revestimento externo, mantendo um núcleo fixo de 5 camadas de juta. A Tabela 12 mostra que os compósitos com revestimento de linho UD apresentaram desempenho comparável ou superior aos híbridos com fibras sintéticas, como vidro e carbono. Esses resultados destacam o potencial das fibras naturais de linho, especialmente na arquitetura UD, como uma alternativa sustentável às fibras sintéticas.

4.2.2 Ensaio de Flexão

4.2.2.1 Efeito do Tipo de Fibra e Arquitetura do Tecido

A Figura 40 apresenta as curvas representativas de tensão de flexão-deformação em função do tipo de fibra e da arquitetura do tecido.

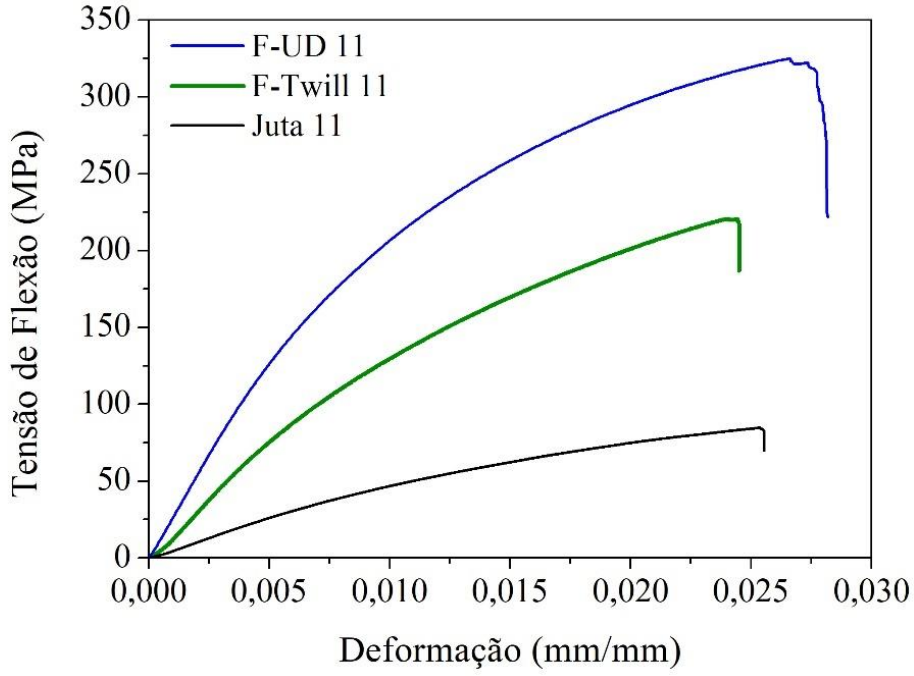


Figura 40 - Curvas representativas de tensão-deformação de flexão das amostras puras em função do tipo de fibra e arquitetura.

Pode-se observar duas zonas distintas na curva. A primeira é a porção linear da curva (até, aproximadamente, 0,0025 mm/mm), indicando que o corpo de prova está exibindo comportamento elástico, e ainda não ocorreu falha por tração. Na segunda zona, desenvolve-se uma região pseudoplástica, a partir do ponto onde a curva desvia da linearidade, indicando, provavelmente, o início da falha devido ao desenvolvimento de uma trinca no lado sob tração. Essas zonas são mais facilmente visualizadas na curva dos corpos de prova de linho UD (F-UD 11). O corpo de prova de juta puro, por outro lado, apresentou comportamento frágil e não mostrou uma transição proeminente da região elástica para a plástica.

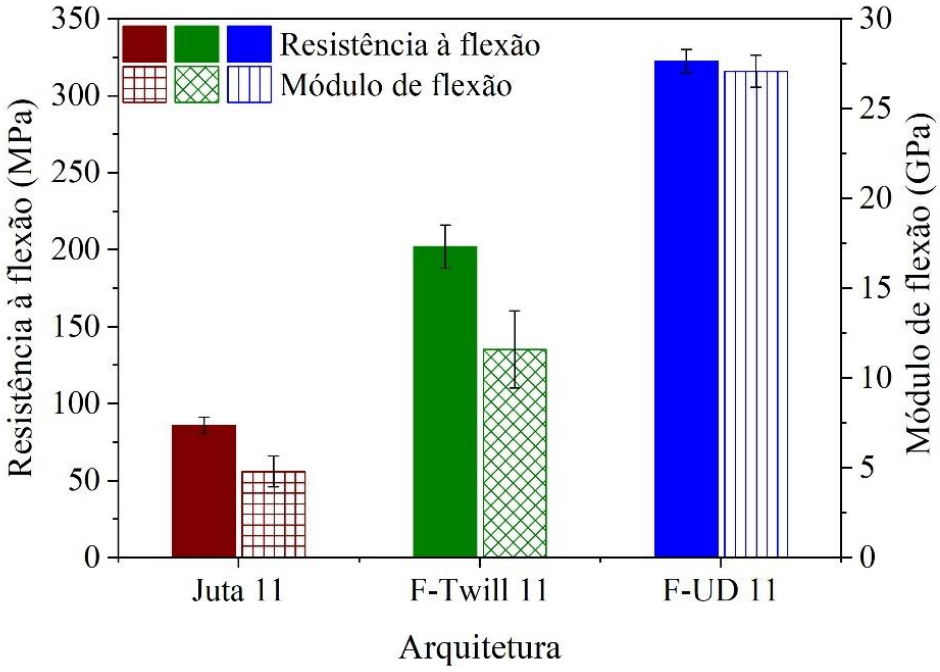


Figura 41 - Resistência à flexão e modulo de flexão das amostras puras em função do tipo de fibra e da arquitetura do tecido.

Os resultados do ensaio de flexão para os corpos de prova puros (juta, linho UD e linho *twill*) estão ilustrados na Figura 41 e na Tabela 13. No ensaio de flexão, o lado superior do corpo de prova suporta cargas compressivas, enquanto o lado inferior sofre cargas de tração. Além disso, tensões de cisalhamento estão presentes na região central da seção transversal do corpo de prova. Observa-se que a resistência à flexão varia de acordo com o tipo de fibra e a arquitetura do tecido, com os corpos de prova de compósito de linho UD puro (F-UD 11) e linho *twill* puro (F-Twill 11) exibindo a maior resistência à flexão em comparação com o corpo de prova de compósito de juta puro (Juta 11). Por exemplo, a resistência à flexão e o módulo do compósito de linho UD puro foram 73% e 82% maiores, respectivamente, do que os dos compósitos de juta pura. De forma semelhante, para o corpo de prova de linho *twill* puro, a resistência à flexão e o módulo foram 57% e 58% maiores, respectivamente, do que os dos compósitos de juta pura.

A resistência à flexão e o módulo de rigidez dos compósitos de tecido UD e *twill* seguiram a mesma tendência das propriedades de tração, com os compósitos de tecido UD apresentando a maior resistência, seguidos pelos tecidos Twill. Acredita-se que o entrelaçamento das fibras devido à arquitetura de costura do tecido, assim como nas

propriedades de tração, tenha influenciado os resultados. No corpo de prova de compósito reforçado com linho *twill*, o alinhamento dos fios devido à redução do enrugamento resulta em cisalhamento transversal dos fios, reduzindo a resistência à flexão [77]. Além disso, esse entrelaçamento pode ter aumentado os pontos concentradores de tensão, devido a um acúmulo ou falta de resina.

Adekunle *et al.* (2011) demonstraram em seu estudo que a resistência e o módulo de flexão e tração de tecidos com menos entrelaçamento foram superiores aos de tecidos com mais entrelaçamento. No estudo, os autores descobriram que os compósitos reforçados com tecido de linho bidirecional superaram aqueles com tecidos *twill* 2/2 e com trama de cesta, com o tecido de linho bidirecional apresentando as melhores propriedades, seguido pelo tecido *twill* [85].

Tabela 13 - Dados de teste de flexão em função da arquitetura.

Compósito	**Resistência à flexão (MPa)**	**Módulo de flexão (GPa)**	**Deformação (mm/mm)**
Juta 11	86,05 ± 5,20	4,81 ± 0,86	0,025 ± 0,001
F-Twill 11	202,25 ± 14,02	11,60 ± 2,16	0,029 ± 0,001
F-UD 11	322,65 ± 7,62	27,09 ± 0,90	0,028 ± 0,001

A partir da Tabela 13, pode-se observar que as deformações na ruptura não tiveram variação relevante entre as amostras puras de linho (*twill* e UD), o que pode indicar que apesar da arquitetura do tecido ser diferente, esse parâmetro não afetou o comportamento de deformação.

Os resultados obtidos para os compósitos puros de linho *twill* e UD não apenas corroboram estudos anteriores, mas também demonstram um desempenho superior em termos de resistência à flexão e módulo de flexão quando comparados com a literatura. A Tabela 14 e 15 apresentam uma comparação detalhada entre os resultados deste estudo e alguns trabalhos, destacando a superioridade dos compósitos desenvolvidos neste trabalho.

Tabela 14 - Comparação das propriedades mecânicas de flexão dos compósitos de linho twill com a literatura.

Parâmetros	**Autores/Referências**			
	Próprio	Cihan [79]	Fiore [49]	Meredith *et al.* [80]
Arquitetura	2x2 Twill			
Gramatura (g/m²)	200	200	220	300
Matriz	Epóxi			
Massa de fibra (%)	58	36,28 ± 1,50	45,6 ± 0,5	42
Método de fabricação	Moldagem por compressão	Infusão de resina	*Vacuum bagging*	*Vacuum bagging* + *autoclave*
Resistência à flexão (MPa)	202,25 ± 14,02	-	76,42 ± 3,59	57
Módulo de flexão (GPa)	11,60 ± 2,16	-	7,41 ± 0,39	2,12

Tabela 15 - Comparação das propriedades mecânicas de flexão dos compósitos de linho UD com a literatura.

Parâmetros	**Autores/Referências**			
	Próprio	Poilâne *et al.* [81]	Saadati *et al.* [82]	Moudood *et al. [83]*
Arquitetura	Unidirecional			
Gramatura (g/m²)	300	180	200	180
Matriz	Epóxi			
Massa de fibra (%)	62	60	41	50
Método de fabricação	Moldagem por compressão	Moldagem por compressão	*RTM*	Infusão à vácuo
Resistência à flexão (MPa)	322,65 ± 7,62	-	236,19 ± 4,11	219,56
Módulo de flexão (GPa)	27,09 ± 0,90	-	24,77 ± 0,71	20,31

Os resultados apresentados na Tabela 14 e 15 destacam a superioridade dos compósitos de linho *twill* e UD desenvolvidos neste estudo em relação aos trabalhos anteriores. Para os compósitos de linho *twill*, a resistência à flexão e o módulo de flexão superaram significativamente os valores reportados na literatura, demonstrando a eficácia da arquitetura do tecido e do processamento adotado. No caso dos compósitos de linho UD, os valores de resistência à flexão e módulo de flexão também foram superiores, reforçando a importância do alinhamento unidirecional das fibras para o desempenho mecânico.

4.2.2.2 Efeito da Hibridização

A Figura 42 apresenta as curvas representativas de tensão de flexão-deformação em função do tipo de fibra e da arquitetura do tecido.

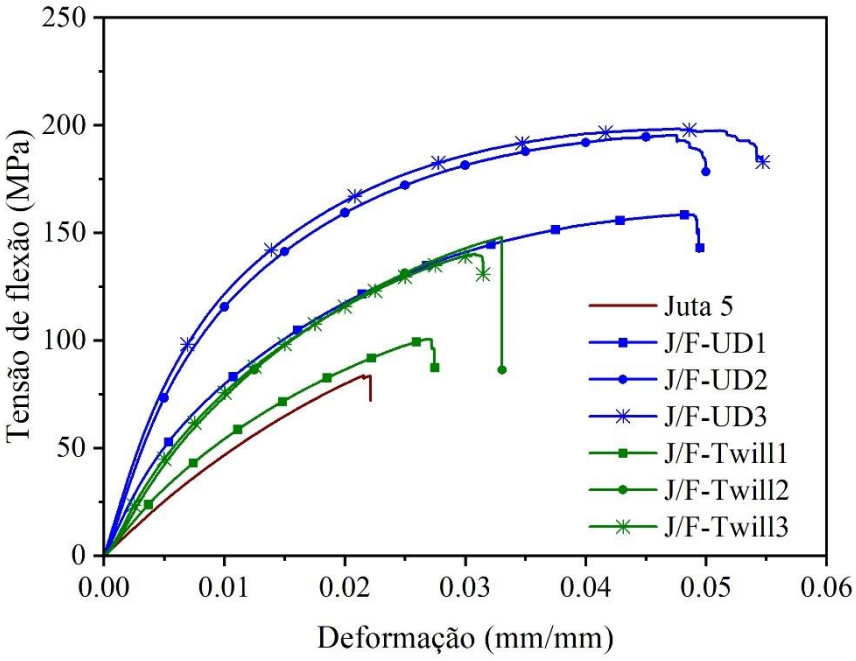
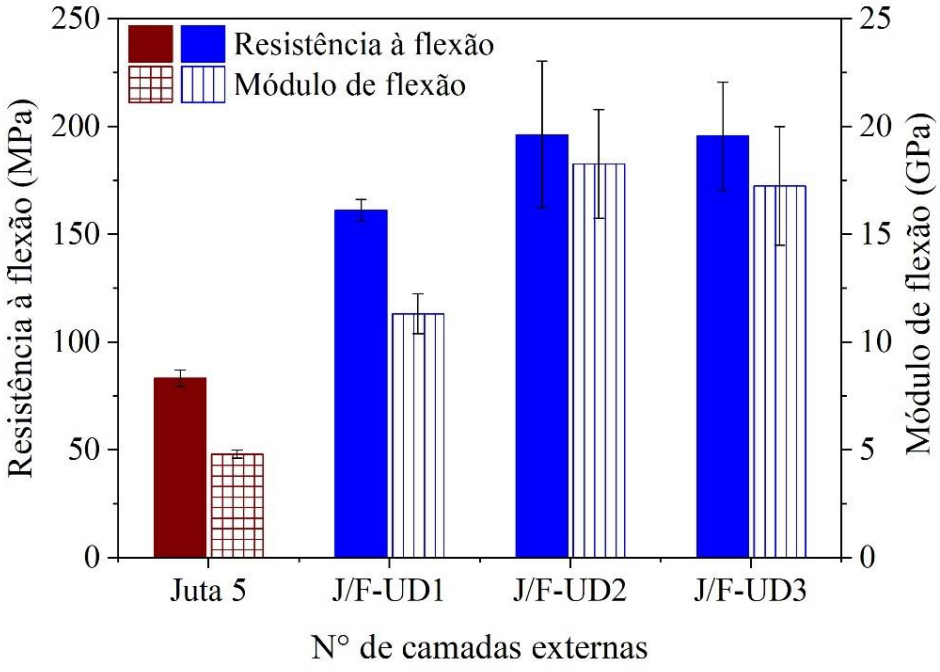
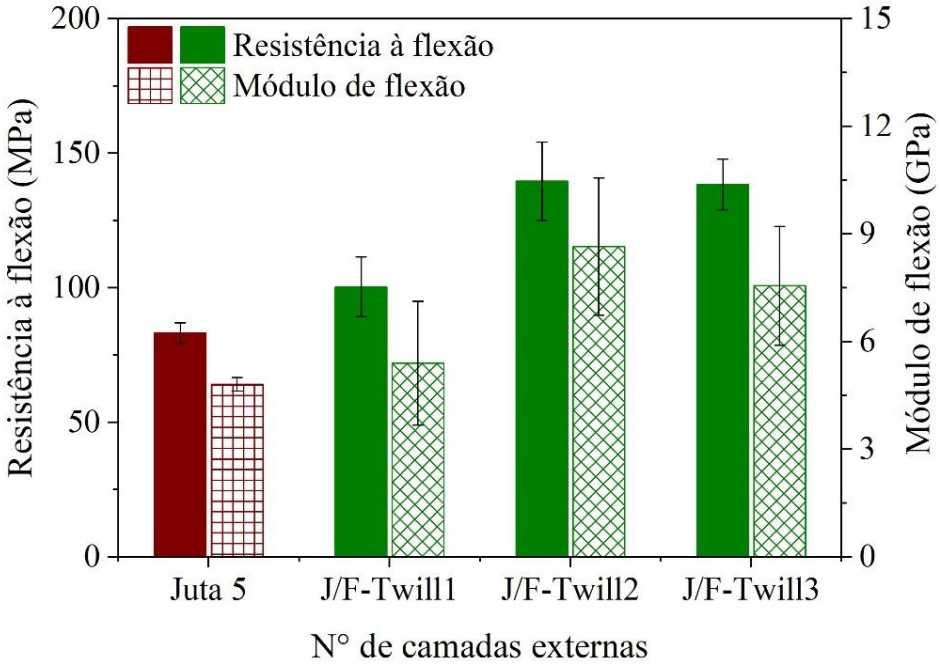


Figura 42 - Curvas representativas de tensão-deformação de flexão das amostras em função da hibridização.

Pode-se observar um comportamento mais dúctil nos corpos de prova de compósitos híbridos de linho UD/juta, mostrando maior alongamento até a falha, enquanto os compósitos híbridos de linho *twill*/juta exibiram um comportamento menos dúctil. O corpo de prova de juta puro (Juta 5), por outro lado, apresentou comportamento frágil e não mostrou uma transição proeminente da região elástica para a plástica. Observa-se nos corpos de prova híbridos reforçados com 2 e 3 camadas de linho UD que ocorre um comportamento semelhante ao longo da curva, e o mesmo pode ser observado nos corpos de prova reforçados com 2 e 3 camadas de linho *twill*, indicando uma possível semelhança no comportamento dos corpos de prova durante o ensaio até a falha.



a)



b)

Figura 43 - Resistência à flexão e módulo de flexão das amostras em função da hibridização para amostras reforçadas com (a) linho UD e (b) linho twill.

A Figura 43 (acima) e a Tabela 16 apresentam os resultados dos ensaios de flexão dos corpos de prova híbridos (juta/linho UD e juta/linho *twill*). Observa-se que a

laminação das camadas externas de linho (UD ou *twill*) afetou positivamente as propriedades de flexão dos compósitos híbridos juta/linho. Comparado à juta pura, todos os corpos de prova híbridos com fibras de linho/juta mostraram maior resistência à flexão. Por exemplo, na Figura 43 (a), nos casos de compósitos híbridos com camadas externas de linho UD, os aumentos na resistência à flexão em relação ao compósito de juta puro foram de aproximadamente 48%, 58% e 57% para J/F-UD1, J/F-UD2 e J/F-UD3, respectivamente. Na Figura 43 (b), nos casos com camadas externas de linho Twill, os aumentos foram de aproximadamente 17%, 40% e 40% para J/F-Twill1, J/F-Twill2 e J/F-Twill3, respectivamente.

Vale notar que o aumento do número de camadas de reforço de linho (UD e *twill*) de 2 para 3 no compósito híbrido resultou em um comportamento de platô na resistência à flexão, sem ganhos adicionais significativos. Identificar a razão exata para esse comportamento é complexo. No entanto, sabe-se que, durante o ensaio de flexão, a superfície superior sofre tensões compressivas, a superfície inferior sofre tensões de tração, e a parte central do corpo de prova sofre tensões de cisalhamento. O uso de múltiplas camadas de tecido em uma configuração híbrida pode aumentar a deformação por cisalhamento na interface do compósito laminado, levando à concentração de tensões. Essa concentração de tensões tende a aumentar a probabilidade de falha prematura nas camadas, o que pode contribuir para a estabilização da resistência observada nos compósitos híbridos com três camadas de linho [86]. Esse comportamento assimétrico de tensão-deformação na interface dos compósitos híbridos foi observado em outros estudos [87].

Além desse campo complexo de tensões e deformações entre camadas de materiais diferentes, outro fator interessante é que, devido à diferença de rigidez entre as camadas constituintes de linho e juta, a resposta ao estresse aplicado varia. Portanto, a adição de camadas mais resistentes de linho pode ter afetado a estrutura geral do compósito, sugerindo que pode haver um limite para o número de camadas que podem ser adicionadas sem comprometer o núcleo feito de fibras de juta – que possui menor resistência – antes das camadas externas. Além disso, os fenômenos interfaciais entre as camadas de fibras e a matriz, assim como a resistência de adesão interfacial, podem ter um impacto significativo na resistência à flexão [88].

Ademais, na Figura 43, observa-se que a rigidez dos compósitos exibiu um

comportamento semelhante ao da resistência à tração, com um aumento na rigidez à flexão em todos os casos comparados ao compósito de juta puro. Por exemplo, em a), para compósitos híbridos reforçados com fibra de linho UD, o aumento médio foi de aproximadamente 58%, 74% e 72% para J/F-UD1, J/F-UD2 e J/F-UD3, respectivamente, enquanto para amostras reforçadas com fibra de linho Twill (Figura 41 b), o aumento médio foi de aproximadamente 11%, 45% e 37% para J/F-Twill1, J/F-Twill2 e J/F-Twill3, respectivamente. Observa-se que a rigidez à flexão dos corpos de prova reforçados com 2 camadas de linho (UD e Twill) apresentou valores numericamente superiores em comparação aos reforçados com 3 camadas. No entanto, essa sobreposição nas faixas de incerteza, devido aos desvios padrão, sugere que essa diferença pode não ser estatisticamente significativa. Isso indica que a adição de uma terceira camada de linho não resulta em um incremento relevante na rigidez à flexão, caracterizando um comportamento de platô. Esse resultado demonstra que, dentro da margem de erro associada aos desvios padrão, o aumento no número de camadas não proporciona ganhos significativos, evidenciando a estabilização das propriedades mecânicas.

Tabela 16 - Dados de teste de flexão em função da hibridização.

Compósito	**Resistência à flexão (MPa)**	**Módulo de flexão (GPa)**	**Deformação (mm/mm)**
Juta 5	83,30 ± 3,81	4,81 ± 0,19	0,021 ± 0,001
J/F-UD1	161,22 ± 5,11	11,32 ± 0,93	0,049 ± 0,005
J/F-UD2	196,36 ± 21,87	18,27 ± 2,52	0,049 ± 0,002
J/F-UD3	195,55 ± 25,10	17,26 ± 2,75	0,046 ± 0,003
J/F-Twill1	100,41 ± 11,14	5,40 ± 1,72	0,030 ± 0,002
J/F-Twill2	139,63 ± 14,53	8,65 ± 1,91	0,032 ± 0,002
J/F-Twill3	138,44 ± 9,36	7,56 ± 1,66	0,030 ± 0,001

A partir da Tabela 16, pode-se observar que as maiores deformações na ruptura foram registradas nas amostras híbridas reforçadas com tecidos de linho UD. A deformação nas amostras reforçadas com linho UD foi, aproximadamente, o dobro da observada nas amostras de juta pura. Em relação à deformação, as amostras híbridas reforçadas com linho *twill* (J/F-Twill1, J/F-Twill2 e J/F-Twill3) apresentaram valores médios de 0,030 mm/mm a 0,032 mm/mm, aproximadamente 30% a 34% superiores aos 0,021 mm/mm observados na Juta 5, indicando que a adição do linho *twill* também contribui para um aumento na capacidade de deformação, embora em menor magnitude

comparado ao linho UD. Resultados semelhantes foram observados em outros estudos [54].

4.2.3 Ensaio de Impacto

O ensaio de impacto Charpy é um método consolidado para avaliar a tenacidade de materiais, medindo a energia absorvida durante a fratura sob carga dinâmica. No contexto de CRFNs, este teste é particularmente relevante para análises comparativas preliminares de resistência a impactos, uma vez que permite identificar diferenças na capacidade de absorção de energia entre compósitos similares, mas configurações (arquiteturas de tecidos, híbridos, diferentes matrizes) diferentes.

Embora o Charpy não reproduza cenários complexos de impacto real, como cargas multidirecionais ou danos progressivos, seus resultados podem oferecer informações preliminares valiosas para a seleção de materiais e otimização de parâmetros de projeto. Neste estudo, o teste foi aplicado para comparar compósitos puros (juta, linho UD e linho *twill*) e híbridos juta/linho, destacando como variações na arquitetura das fibras de linho e a hibridização influenciam diretamente o desempenho mecânico.

4.2.3.1 Efeito do Tipo de Fibra e Arquitetura do Tecido

A energia de impacto Charpy das amostras em função do tipo da arquitetura é apresentada na Figura 44. Sabe-se que a resistência ao impacto depende de diversos fatores, podendo ser destacados alguns como as propriedades das fibras individuais usadas na fabricação dos compósitos híbridos, adesão fibra-matriz, características físicas dos tecidos (diâmetro das fibras, arquitetura etc.) utilizados como reforço, entre outros [89, 90].

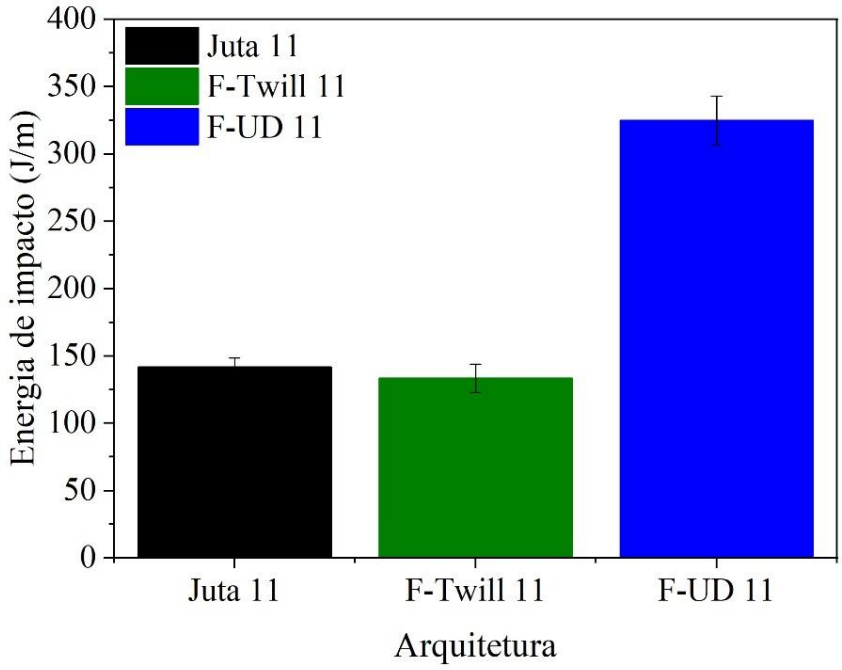


Figura 44 – Energia de impacto das amostras em função da arquitetura.

A partir da Figura 44 e da Tabela 17 é possível observar que a amostra de linho UD puro (F-UD 11) exibiu a maior resistência ao impacto, superando a resistência da amostra de juta pura (Juta 11) em aproximadamente 56%. Enquanto isso, a amostra de linho *twill* puro (F-Twill 11) mostrou uma leve redução de cerca de 6% na resistência ao impacto em comparação com a amostra de juta pura, mas essa diferença está dentro da margem de variação dos desvios padrão, sugerindo que pode não ser estatisticamente significativa.

Tabela 17 - Dados do teste de impacto para compósitos puros.

Compósito (Arquitetura)	**Energia de impacto (J/m)**
Juta 11	141,80 ± 6,58
F-Twill 11	133,33 ± 10,60
F-UD 11	324,86 ± 18,19

As propriedades individuais das fibras utilizadas na fabricação dos compósitos têm grande influência no comportamento de impacto. Por exemplo, como mostrado na Tabela 2 (Propriedades mecânicas das fibras vegetais), o linho pode apresentar resistência à tração, aproximadamente 2 a 4 vezes maior que a da juta, além de um

módulo de Young de cerca de 2 a 6 vezes maior que o da juta. Essa diferença nas propriedades mecânicas sugere que o linho pode contribuir para um melhor desempenho no impacto em comparação com a juta, como já identificado na literatura [91].

Além disso, o diâmetro das fibras desempenha um papel crucial na adesão e na interface fibra-matriz. Como visto na seção 4.1 (Análise morfológica das fibras e tecidos) o diâmetro médio das fibras de linho (13,4 ± 0,9 µm) é significativamente menor que o da juta (66 ± 13 µm) – relatado por Lima *et al.* [35], o que pode favorecer uma maior superfície de adesão com a matriz, resultando em uma transferência de carga mais eficiente. Fibras com menores diâmetros tende a oferecer uma maior área de contato entre a fibra e a matriz, melhorando a interação e, consequentemente, a resistência mecânica ao impacto do compósito [91].

A arquitetura do tecido também pode influenciar diretamente a adesão e o desempenho da interface fibra-matriz, o que, consequentemente, afeta o comportamento e a resistência ao impacto do compósito. Como foi visto anteriormente na seção 4.1 (Análise morfológica das fibras e tecidos), o tecido de linho *twill* 2x2 apresenta um alto entrelaçamento das fibras. Consequentemente, isso pode formar regiões que atuam como pontos de concentração de tensão, favorecendo a nucleação de falhas na matriz, o que pode prejudicar a resistência do compósito. Por outro lado, o UD apresenta as fibras alinhadas em uma única direção, permitindo uma distribuição mais uniforme da energia de impacto e promovendo uma maior adesão entre as fibras e a matriz devido à sua orientação. Essa configuração, juntamente com o menor diâmetro das fibras de linho, pode favorecer a formação de uma interface mais robusta e a eficiência na transferência de carga, explicando o desempenho superior do compósito com linho UD em relação ao *twill*. Ozdemir *e* Engin (2013) relataram que parâmetros do tecido, como coeficiente de entrelaçamento, ondulação, densidade do tecido, diâmetro da fibra , podem afetar as propriedades de impacto de compósitos poliméricos reforçados com fibras [92].

4.2.3.2 Efeito da Hibridização

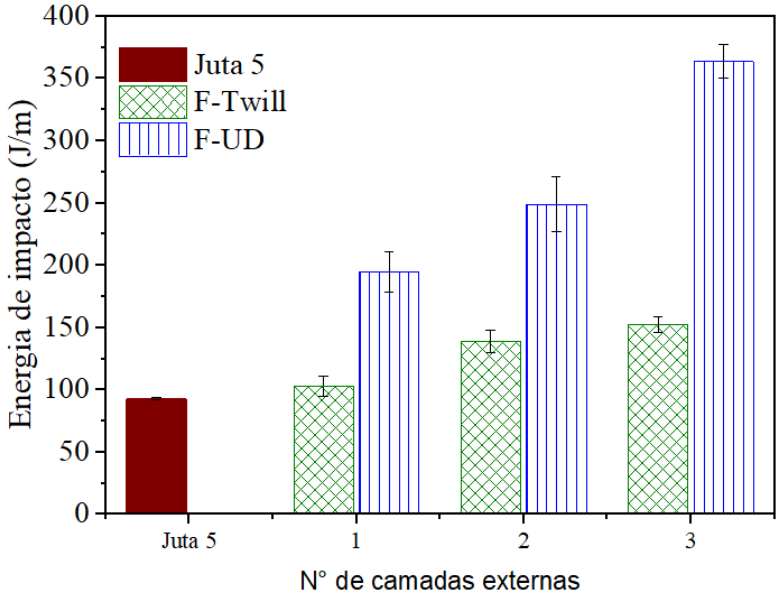


Figura 45 - Energia de impacto das amostras em função da hibridização.

Ao considerar a hibridização, observa-se na Figura 45 e na Tabela 18, que a resistência ao impacto foi significativamente melhorada para os compósitos de linho UD, enquanto para os compósitos de linho *twill*, uma variação menor é observada em comparação com os compósitos de juta pura.

Tabela 18 - Dados do teste de impacto para compósitos híbridos.

Compósito	**Energia de impacto (J/m)**
Juta 5	92,68 ± 0,91
J/F-Twill 1	103,11 ± 7,99
J/F-Twill 2	138,67 ± 9,14
J/F-Twill 3	152,00 ± 6,24
J/F-UD 1	194,86 ± 16,07
J/F-UD 2	249,04 ± 22,15
J/F-UD 3	363,61 ± 13,60

Nos compósitos híbridos, o aumento do número de camadas externas de linho UD melhorou significativamente a resistência ao impacto das amostras. Por exemplo, uma melhoria de aproximadamente 52% foi encontrada para as amostras J/F-UD1, 63% para J/F-UD2 e 75% para J/F-UD3, em comparação com o compósito de juta pura. Por outro lado, a adição de camadas externas de tecido de linho Twill resultou em um aumento na

resistência ao impacto das amostras de aproximadamente 10%, 33% e 39% para J/F-Twill1, J/F-Twill2 e J/F-Twill3, respectivamente, em comparação com a amostra de juta pura.

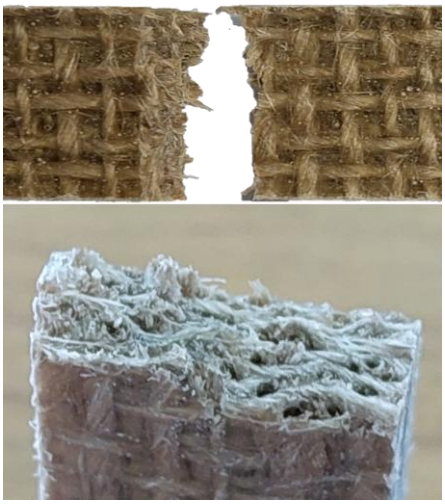
Os compósitos reforçados com tecido de linho UD apresentaram melhores propriedades de impacto do que os compósitos com linho *twill* devido principalmente a arquitetura do tecido. Como discutido na seção anterior, o alinhamento das fibras UD na mesma direção tende a maximizar a transferência de carga ao longo da direção das fibras, o que é crucial para absorver e distribuir efetivamente a energia de impacto. Nos compósitos *twill* as fibras são entrelaçadas, resultando em um caminho de dissipação menos eficiente, o que reduz a resistência geral ao impacto. Além disso, o padrão cruzado do tecido *twill* introduz mais pontos de concentração de tensão e potenciais pontos fracos nas interseções das fibras, o que pode prejudicar a absorção de energia durante o impacto, como visto na literatura [85, 92].

Vale destacar que as amostras reforçadas com 3 camadas de linho UD (J/F-UD3) apresentaram o melhor desempenho, superando não apenas o compósito de juta pura, mas também o compósito de linho UD puro em aproximadamente 11%, o compósito de linho *twill* puro e todos os compósitos híbridos de linho Twill. Adicionalmente, a amostra J/F-Twill3 superou a amostra de compósito de linho Twill puro em aproximadamente 12%. Esses resultados evidenciam a importância da escolha adequada da arquitetura do tecido em aplicações específicas de projetos, visando otimizar a configuração do compósito para maior resistência ao impacto.

Em resumo, a arquitetura do tecido tem um efeito perceptível na resistência ao impacto dos compósitos. A hibridização com fibras unidirecionais teve efeitos mais significativos na energia de impacto em todos os casos (1, 2 e 3 camadas externas), destacando-se o caso com 3 camadas, J/F-UD3, que superou o compósito de linho UD puro. Por outro lado, reforços com arquitetura de twill produziram melhorias menores na resistência ao impacto, mas ainda assim relevantes.

4.3 Análise das Fraturas – Compósitos

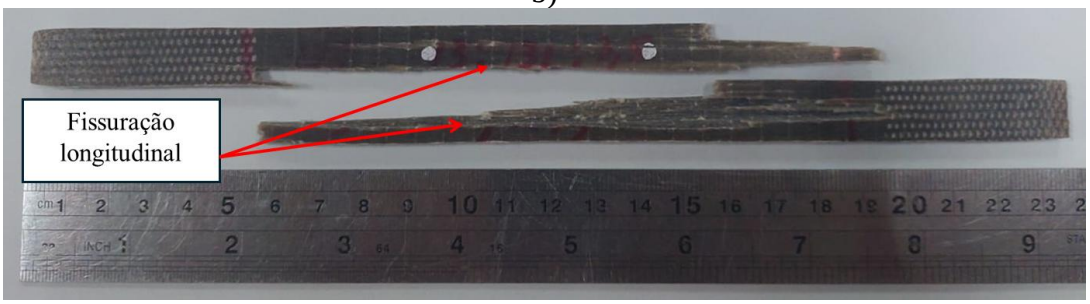
As amostras fraturadas foram examinadas visualmente após os ensaios de tração e flexão. A Figura 46 apresenta as falhas representativas em tração para os casos dos compósitos puros, ou seja, Juta, linho *twill* e linho UD. Como esperado, o compósito puro de juta (Fig. 46a) exibiu falha frágil devido à natureza frágil da fibra de juta. A amostra de linho *twill* puro aparenta exibir fratura frágil da matriz com uma quantidade expressiva de fibras fraturadas, como pode ser visto na Figura 46b. A amostra pura de linho UD (Fig. 46c) apresentou um modo de fratura já relatado na literatura [93, 94], denominado fissuração longitudinal (*splitting*). Nesse compósito de linho unidirecional, após o *splitting*, ocorreu a ruptura em dois pontos da amostra. Esse tipo de falha ocorre principalmente em materiais reforçados com fibras contínuas, quando as cargas atuam de maneira a provocar a delaminação e a separação das fibras individuais ou *bundles* dentro da matriz.



a)



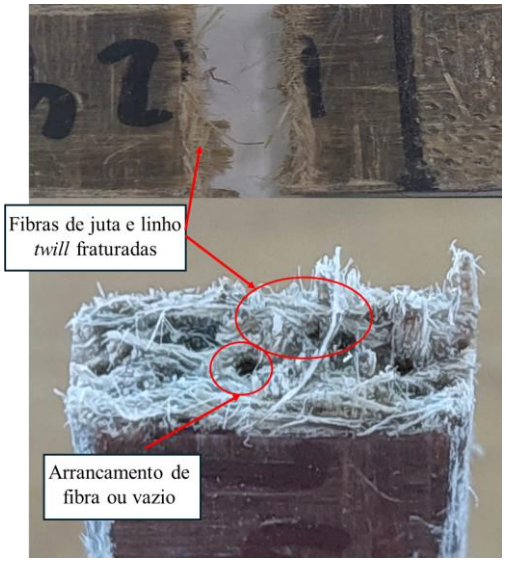
b)



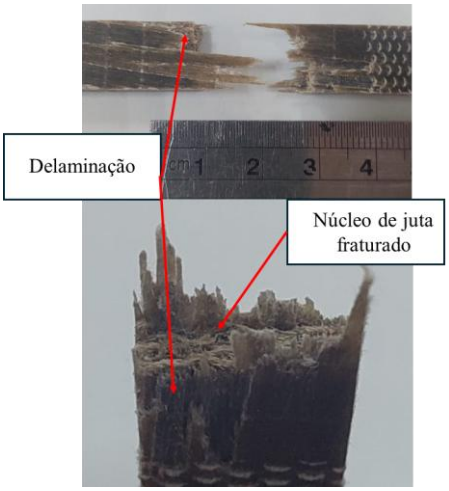
c)

Figura 46 - Modos de falha representativos para ensaios de tração: (a) Juta pura, (b) Linho *twill* puro, (c) Linho UD puro.

Em todos os compósitos híbridos, o mecanismo de falha dominante foi um colapso frágil do núcleo de fibra de juta, devido sua fragilidade já relatada nas seções anteriores. Adicionalmente, os tecidos externos de reforços apresentaram diferentes comportamentos. Por exemplo, como pode ser visto na Figura 47a, as amostras híbridas reforçadas com tecido de linho *twill* a camada de tecido de linho também apresenta algumas fibras fraturadas, assim como no compósito puro. Esse modo de falha ocorreu para todas as amostras híbridas reforçadas com linho *twill*, sendo independentemente do número de camadas externas. Por outro lado, os compósitos híbridos reforçados com fibra de linho UD apresentaram um comportamento onde o núcleo falhou primeiro, transferindo a carga para o envelope de linho UD, resultando em um ligeiro alongamento das fibras de linho unidirecional próximo ao ponto de fratura, podendo até apresentar partes com delaminação na interface entre as camadas de juta e linho, como pode ser visto na Figura 47b.



a)



b)

Figura 47 - Modos de falha representativos para ensaios de tração: (a) Híbridos reforçados com linho twill; (b) Híbridos reforçados com linho UD.

Imagens de microscópio eletrônico de varredura (MEV) foram realizadas para avaliar a superfície de fratura dos compósitos híbridos reforçados com tecido de linho *twill* e com tecido de linho unidirecional (UD). Para ilustrar, foram realizadas imagens apenas dos melhores casos híbridos para tração, ou seja, J/F-Twill3 e J/F-UD3. As observações visuais das imagens revelam características relacionadas à superfície de fratura bem como parte dos comportamentos da interface matriz-fibra, das fibras e matriz.

A Figura 48 mostras as imagens MEV para as amostras híbridas.

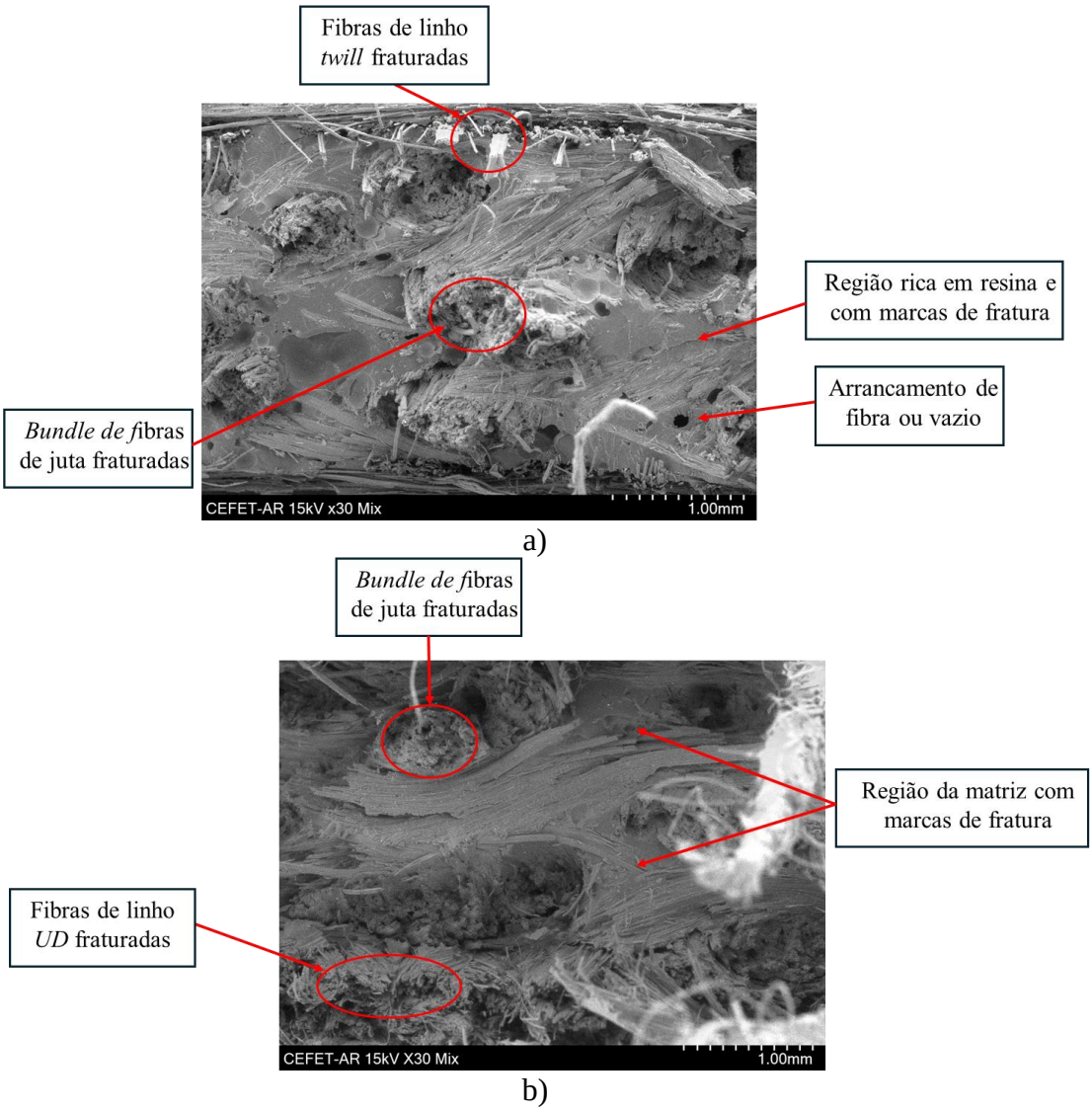


Figura 48 - Micrografias MEV das superfícies fraturadas do ensaio de tração: a) J/F-Twill3 e b) J/F-UD3.

Na Figura 48a, observa-se parte da superfície de fratura do compósito reforçado com tecido de linho *twill*, onde é possível identificar regiões ricas em resina com marcas de fratura, sugerindo que a matriz epóxi falhou fragilmente. Além disso, são visíveis alguns vazios, que podem ser provenientes do processo de fabricação (bolhas) ou do mecanismo de arrancamento de fibras (*pull-out*). O *pull-out* ocorre quando a interface fibra-matriz apresenta baixa compatibilidade, resultando no descolamento das fibras e na redução da eficiência do reforço. No entanto, destaca-se a presença de fibras fraturadas, que indicam uma forte ligação interfacial em determinadas regiões. A fratura das fibras, em vez de seu arrancamento, sugere que, apesar dos defeitos como vazios e falhas de adesão em algumas áreas, houve uma transferência eficiente de tensões entre a matriz e

as fibras em outras, levando à ruptura das próprias fibras sob carga. Esse comportamento é benéfico para o compósito como um todo, pois a fratura das fibras indica que a interface fibra-matriz foi capaz de suportar cargas significativas, promovendo uma falha mais eficiente do material. Quando as fibras se fraturam, em vez de serem arrancadas, a energia de fratura é dissipada de maneira mais eficaz, o que pode contribuir para uma maior tenacidade e resistência do compósito.

Adicionalmente, na Figura 48b, observa-se a superfície de fratura da amostra híbrida reforçada com linho unidirecional (UD), onde é possível notar uma menor região de resina aparente e um aumento significativo de fibras fraturadas, tanto do tecido de linho UD quanto da juta. A ausência de pontos de *pull-out* visíveis e a predominância de fibras fraturadas são indicativos de uma boa interface fibra-matriz, com uma transferência eficiente de tensões entre a matriz e as fibras. Esse comportamento sugere que o reforço com tecido de linho UD pode ter contribuído para uma maior resistência interfacial, evitando o descolamento das fibras e promovendo a fratura das mesmas sob carga. A presença de fibras fraturadas, em vez de arrancamentos, reforça a ideia de que a adesão entre a matriz e as fibras foi eficaz, o que está alinhado com os resultados de tração discutidos anteriormente para os compósitos híbridos. Essa característica pode explicar o melhor desempenho mecânico observado nesses casos, destacando o papel positivo do reforço com tecido UD na melhoria da resistência global do material.

Ademais, a Figura 49 apresenta os modos de falha representativos para as amostras do ensaio de flexão. Pode-se observar que todas as amostras apresentaram um modo misto de trincas por tração na face inferior, bem como trincas no núcleo visíveis na seção transversal, enquanto pouco ou nenhum encurvamento das fibras foi observado na face superior das amostras. A amostra de juta pura não apresentou curvatura significativa das fibras até a falha catastrófica, indicando, assim, baixa deformação. Em contraste, a amostra de linho UD puro apresentou a maior curvatura aparente, o que explica sua maior deformação até a falha.

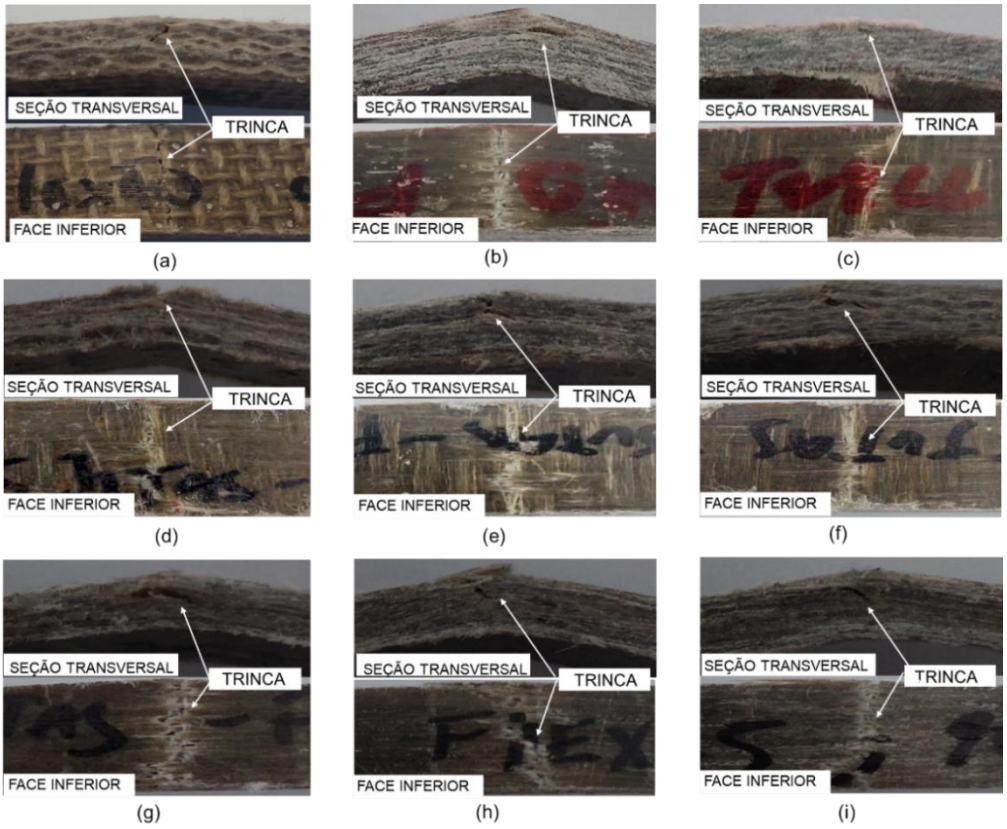
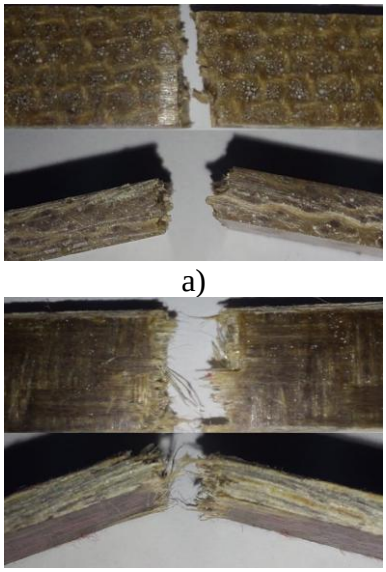


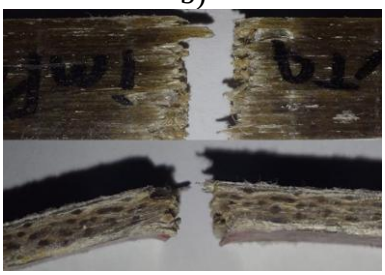
Figura 49 - Modos de falha representativos para ensaios de flexão: (a) Juta pura, (b) Linho UD puro, (c) Linho Sarja puro, (d) J/F-Sarja1, (e) J/F-Sarja2 (f) J/F-Sarja3, (g) J/F-UD1, (h) J/F-UD2, (i) J/F-UD3.

Todas as amostras submetidas a ensaio de impacto sofreram ruptura total, como pode ser visto na Figura 50.



a)

b)



c)

Figura 50 - Modos de falha representativos para ensaios de impacto nos compósitos puros: a) Juta; b) Linho *twill*; c) linho UD.

Apesar de não ter sido mostrado as macrografias com os modos de falhas representativos das amostras híbridas, todas as amostras híbridas apresentaram o mesmo comportamento de falha em impacto, ou seja, uma fratura total sem possibilidades de análise da progressão dos danos.

4.4 Caracterização Mecânica – Juntas Adesivas

4.4.1 Modos de falha das juntas

A análise da falha em juntas adesivas de compósitos é altamente complexa, pois envolve o estudo de diversos modos de falha e como esses modos são influenciados por fatores como as características das fibras usadas como reforço nos aderentes, as condições de carregamento, qualidade da adesão, entre outros. De acordo com a norma internacional ASTM D5573, os modos de falha podem ser categorizados em sete tipos: (1) falha adesiva, (2) falha coesiva, (3) falha coesiva de camada fina (TLC - *Thin-Layer Cohesive*), (4) falha por rasgo de fibra (FT - *Fiber-Tear*), (5) falha por rasgo de fibra leve (LFT - *Light-Fiber-Tear*), (6) falha por ruptura do material (SB - *Stock-Break*) e (7) falha mista, ou seja, quando dois ou mais modos de falha estão presentes [64].

Após a análise de todas as amostras fraturadas, foram identificados três principais modos de falha: falha por rasgo de fibra, falha por rasgo de fibra leve e falha por ruptura

do material. A falha por rasgo de fibra, também conhecida como delaminação, envolve uma remoção mais severa e generalizada de fibras e falhas de feixes. A falha por rasgo de fibra leve é caracterizada por uma espessa camada de adesivo em um dos lados, sem adesivo no outro, além da remoção de alguma resina superficial e algumas fibras (as vezes pequenas impressões com alguns resíduos de fibras) na interface. A falha por ruptura do material refere-se à falha total do material aderente. Modos de falha mistos são comuns em juntas com aderentes CRFNs, assim como em juntas híbridas de compósitos naturais/sintéticos, devido ao complexo estado de tensão da zona de sobreposição [60-63].

A Figura 51 apresenta os modos de falha representativos para as juntas ensaiadas. Na Figura 51a, pode-se ver que o modo de falha das juntas Juta 5 foi uma falha por ruptura do material aderente. Essa falha ocorre exatamente no final da sobreposição de uma das extremidades da junta e ocorre porque as fibras de juta e seus compósitos são mais frágeis [62]. Consequentemente, a junta de juta tem menor capacidade de rotacionar suas bordas para acomodar o aumento da tensão de arrancamento (*peel stress*) causada pela excentricidade da carga em um teste de cisalhamento por meio da tração da junta. As Figuras 51b e 51c mostram os modos de falha das juntas J/F-UD2 e J/F-UD3, onde é possível observar uma falha generalizada por rasgo de fibra leve. Para as Juntas J/F-Twill2 e J/F-Twill3 (veja Figuras 51d e 51e), pode-se observar uma falha generalizada por rasgo de fibra ou delaminação. Finalmente, é possível observar nas Figuras 50f e 50g, que os modos de falha das juntas de linho puro (ou seja, F-Twill11 e F-UD11) apresentaram falha generalizada por rasgo de fibra (delaminação) e rasgo de fibra leve, respectivamente.

De modo geral, a principal diferença nos modos de falha foi devido à arquitetura do tecido de linho, com falhas mais próximas à interface nas juntas de linho UD (pura e híbridas) e delaminação generalizada nas juntas de linho *twill* (pura e híbridas).

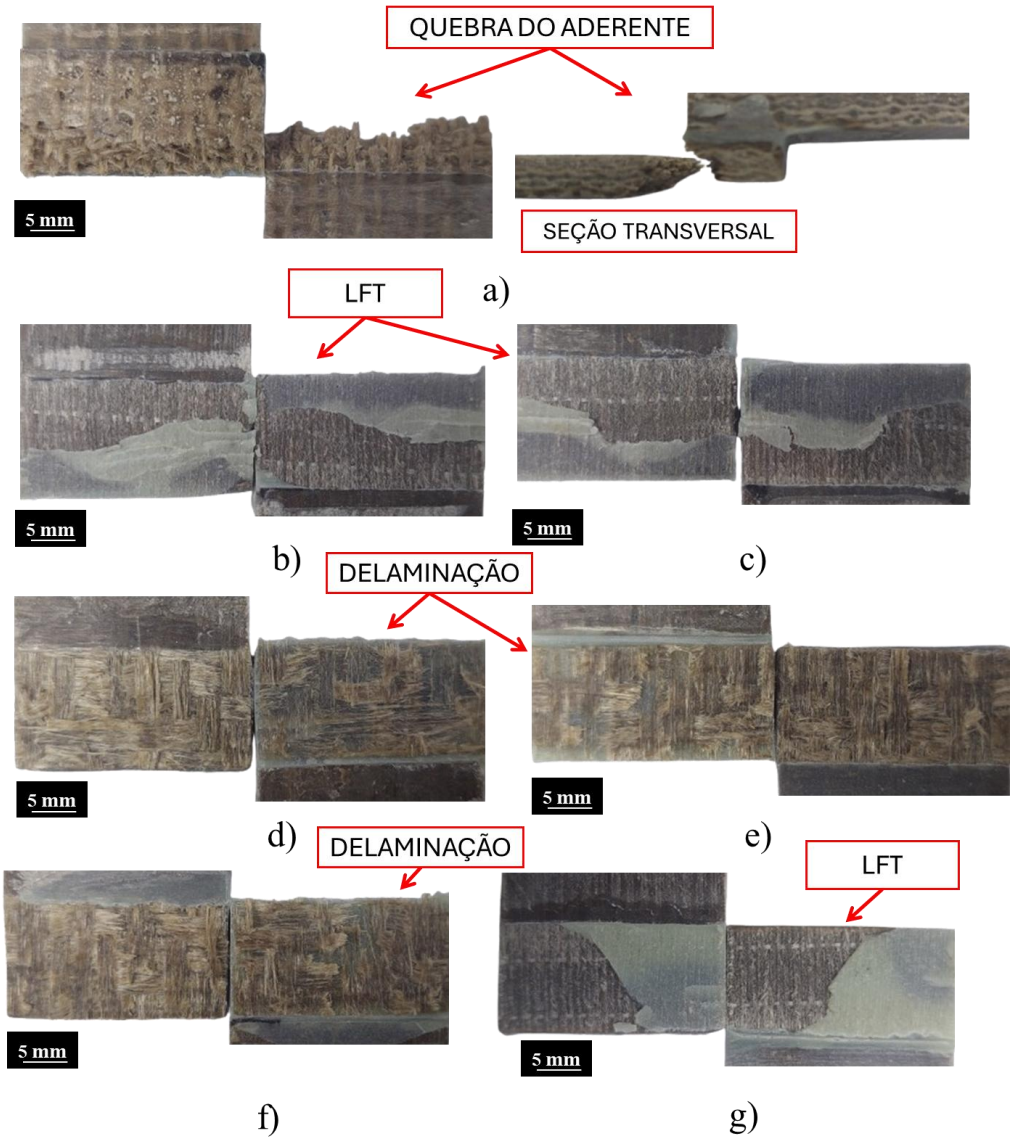


Figura 51 - Modos de falha representativos das juntas adesivas: a) Juta 5 (vista superior e lateral); b) J/F-UD2; c) J/F-UD3; d) J/F-Twill2; e) J/F-Twill3; f) F-Twill11 e g) F-UD11.

Na Figura 52, são apresentadas macrofotografias detalhadas representativas das superfícies de falha das Juntas F-Twill11 e F-UD11. Como os modos de falha foram semelhantes entre os pares (ou seja, LFT nas amostras reforçadas com linho UD e delaminação generalizada nas amostras reforçadas com linho twill), os modos de falha dessas juntas serão usados para discutir mais detalhadamente os modos de falha gerais. Na Figura 52a, a fratura da Junta F-Twill11 mostra uma delaminação severa e generalizada, com múltiplas camadas removidas e falhas em alguns feixes de fibras. Esse foi o modo de falha predominante para todas as SLJs de linho *twill*. A Figura 52b, por

outro lado, ilustra a fratura da Junta F-UD11, onde o modo de falha foi dominado por rasgo de fibra leve (LFT). Pode-se observar a remoção de resina do aderente, impressões do tecido e das fibras, juntamente com a delaminação superficial de uma fibra na camada espessa de adesivo no lado direito do aderente.

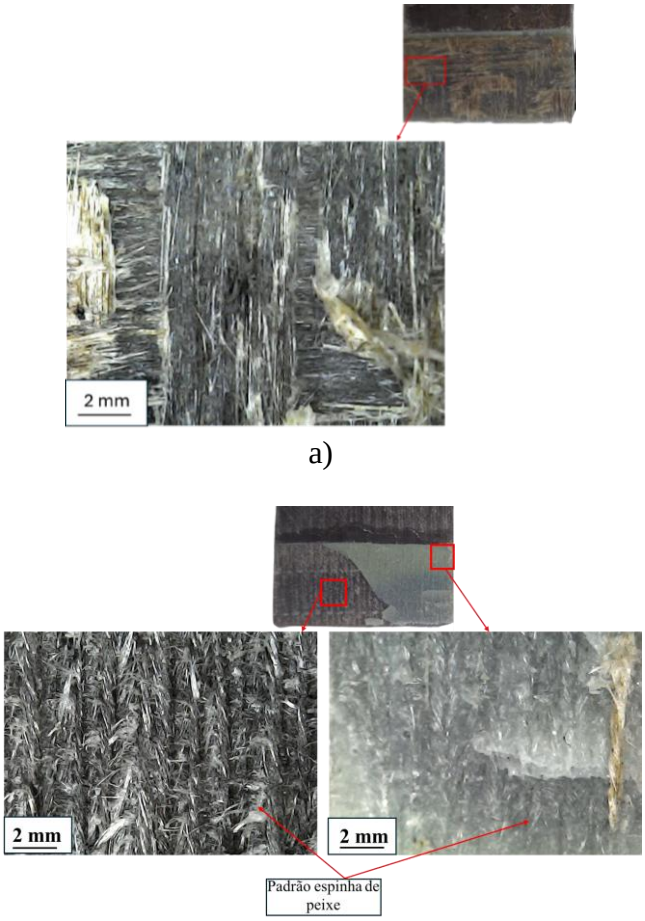


Figura 52 – Macrografias detalhadas das superfícies de falha representativas de a) F-Twill11 e b) F-UD11.

Este estudo sugere que a arquitetura dos tecidos de linho usados como reforço, UD e *Twill*, influencia o desenvolvimento de trincas e, consequentemente, o modo de falha das juntas. Por exemplo, em juntas com aderentes reforçados com fibras de linho *twill* (veja Fig. 52a), a estrutura bidirecional do tecido *twill* influenciou diretamente o comportamento de falha. Nessa configuração, as fibras do urdume, alinhadas com a direção principal da carga externa, suportaram a maior parte da tensão aplicada, enquanto as fibras da trama, orientadas a 90° em relação à carga, foram mais suscetíveis ao descolamento devido à rotação. Isso facilitou a remoção das fibras da trama devido ao

campo de tensões complexo na sobreposição, particularmente as altas tensões de arrancamento (*peel stress*) nas bordas da sobreposição. A remoção das fibras da trama da primeira camada criou zonas vulneráveis que permitiram que a trinca penetrasse entre as camadas do compósito. À medida que a trinca avançava, a interação entre as tensões de destacamento e a estrutura do tecido intensificou a propagação da delaminação de forma mais severa. O resultado foi uma delaminação generalizada, como observado em todas as juntas com aderentes de tecido de linho *twill*.

Adicionalmente, nas juntas com aderentes reforçados com linho UD (veja Fig. 52b), que apresentam um tecido compacto de fios torcidos alinhados em uma única direção, o conteúdo de resina entre os fios tende a ser reduzido, aumentando assim a área de contato efetiva entre os fios e a matriz, conforme demonstrado anteriormente na literatura por Kupski *et al.*[95]. Além disso, tecidos orientados a 0° ajudam a impedir a propagação da fissura para regiões mais profundas do substrato. Como resultado, a fissura tende a seguir o caminho de menor dissipação de energia, ocorrendo na resina ou na interface resina/fibra, conforme mostrado na literatura [96, 97]. Assim, quando a carga aplicada na junta atinge um ponto crítico de deformação plástica da resina, a fissura inicia em uma das interfaces adesivo/resina do aderente. Incapaz de penetrar mais profundamente, ela se desenvolve superficialmente dentro da resina, removendo-a quase totalmente, juntamente com algumas fibras residuais da primeira camada. Isso resulta em uma falha generalizada por LFT em todas as juntas com aderentes de linho UD. Além disso, um padrão semelhante a uma espinha de peixe é observado na camada de adesivo de um dos aderentes, resultante da impressão das fibras da primeira camada de tecido do outro aderente.

Alguns estudos demonstram como a orientação da lâmina adjacente à camada adesiva influencia a determinação do modo de falha das juntas de sobreposição simples. Por exemplo, Kupski *et al.* [95] demonstraram que a orientação da lâmina em contato com a camada adesiva pode influenciar significativamente o modo de falha em juntas de sobreposição simples. Uma lâmina de interface a 0° resultou em fratura coesiva dentro da camada adesiva ou próximo à região de contato entre o adesivo e a resina do aderente. Por outro lado, uma lâmina de interface a 90° levou à propagação da fissura para o aderente compósito, seguindo um caminho predominantemente intralaminar. Além disso, foi observado que a fissura tende a parar ao atingir a primeira lâmina a 0°, indicando que

a presença de fibras orientadas nessa direção ajuda a restringir a propagação da fissura dentro do compósito. Além disso, Sadeghi *et al.* [98] investigaram os modos de falha em juntas adesivas de compósitos E-glass/epóxi, focando no efeito do ângulo das fibras adjacente à camada adesiva semi-rígida. Os resultados experimentais e a análise numérica indicaram que o aumento do ângulo das fibras em relação a direção da aplicação do esforço de tração de 0° para 90° alterou significativamente os modos de falha. Para o ângulo de 0°, a falha ocorreu predominantemente na interface adesiva, com fratura coesiva da camada adesiva. À medida que o ângulo aumentava, a falha deslocou-se para o interior do compósito, propagando-se intralaminamente.

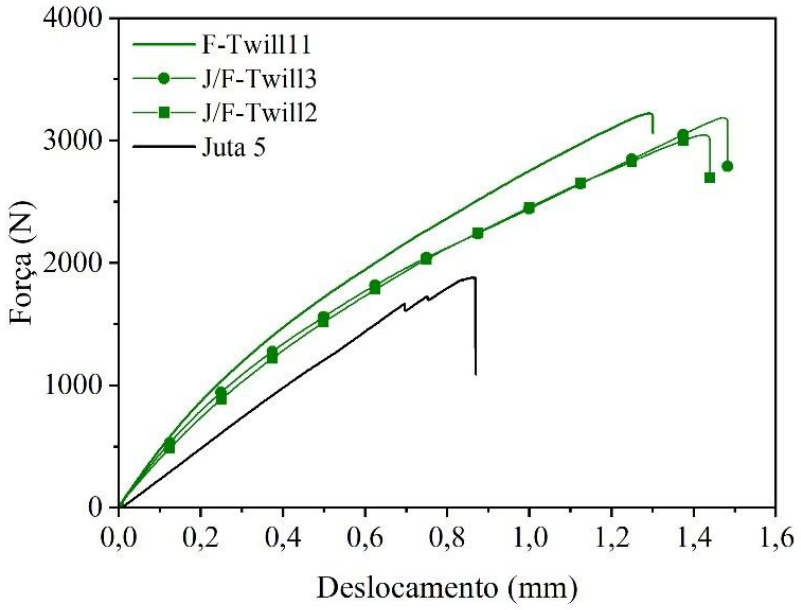
4.4.2 Influência da arquitetura do tecido e hibridização no desempenho das juntas adesivas

A Figura 53 mostra todas as curvas representativas de carga-deslocamento das juntas adesivas estudadas. Pode-se observar que o comportamento geral das juntas foi ligeiramente dúctil, com uma falha final frágil. A única exceção foi a junta de juta pura (Juta 5), devido à natureza frágil do compósito de juta e à falha por ruptura do material (veja Fig. 50a – modo de falha). Da Figura 53, pode-se notar que todas as amostras com aderentes reforçadas com linho exibem inicialmente comportamento linear até, aproximadamente, 0,2 mm de deslocamento, após o qual passa a apresentar um comportamento não linear. Isso é possivelmente devido à plasticidade e ao início do dano na camada adesiva.

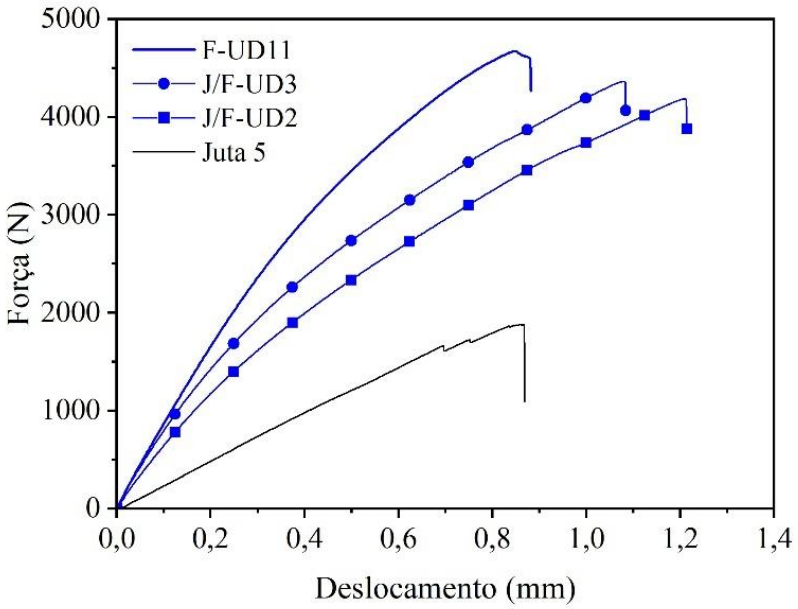
Também é evidente que a rigidez aparente da junta variou dependendo do tipo de material compósito usado como o aderente. Por exemplo, na Figura 53, é observado que a junta de juta pura (Juta 5) exibiu a menor rigidez aparente em comparação as juntas com aderentes reforçados com linho, como esperado e previamente demonstrado na literatura [62]. Pode-se observar também que a junta F-UD11 apresentou uma rigidez aparente ligeiramente maior em comparação com a junta F-Twill11.

Ao comparar as juntas híbridas de linho com suas contrapartes puras, ou seja, J/F-UD2 e J/F-UD3 com F-UD11, ou J/F-Twill2 e J/F-Twill3 com F-Twill11, nota-se que,

apesar do aumento no número de camadas externas de linho e das diferenças nas propriedades mecânicas dos aderentes, há uma semelhança na rigidez inicial e no comportamento geral da curva de carga-deslocamento. Isso indica que a hibridização resultou em um desempenho global das juntas híbridas comparável ao das juntas com aderentes de linho puro, com pouco impacto do acréscimo de camadas externas de linho. Além disso, observa-se que a arquitetura do tecido de linho foi o principal fator determinante no desempenho da junta, influenciando diretamente o modo de falha e, consequentemente, a rigidez e a carga de falha.



a)



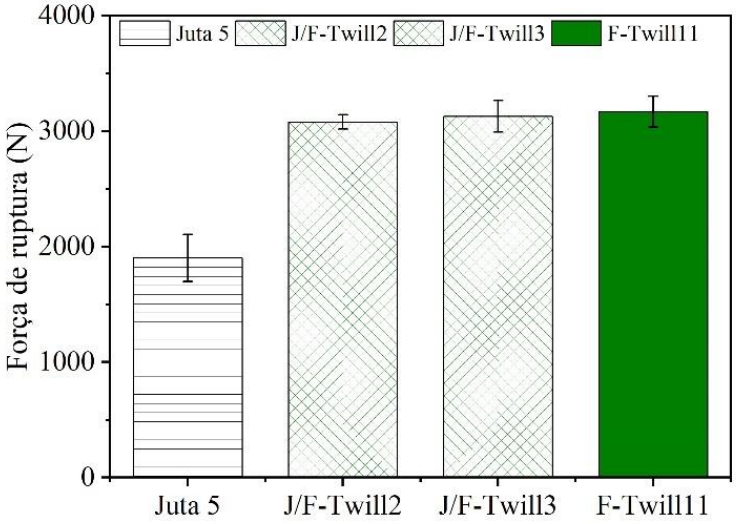
b)

Figura 53 - Curvas representativas de carga-deslocamento de todas as juntas testadas em função da arquitetura do tecido de linho: a) Linho *twill* e b) Linho UD.

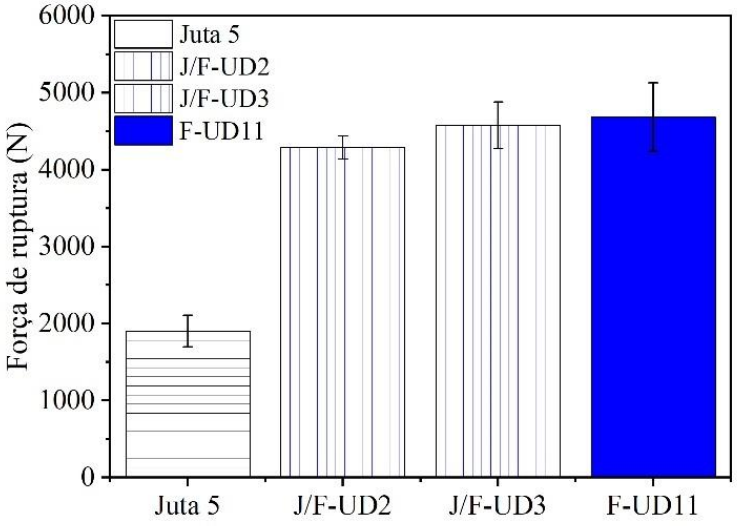
A partir da Figura 54 e da Tabela 19, podem ser observados os dados estatísticos quantitativos das juntas. Nota-se que o desempenho das juntas foi fortemente influenciado pela arquitetura dos tecidos de linho utilizados na hibridização dos aderentes de juta/linho, o que se reflete nas cargas de falha observadas. As juntas de juta pura (Juta5) apresentaram as menores cargas de falha (1902,12 N), o que pode ser atribuído à natureza mais frágil da fibra de juta, que afeta a resposta do compósito à deformação. Isso é refletido no modo de falha observado anteriormente – quebra do aderente (ver Fig. 51a). Por ser menos dúctil, o compósito de juta não consegue acomodar a rotação da borda de sobreposição devido à excentricidade do eixo de carga, resultando em falha catastrófica logo no início do deslocamento. Assim, a carga de falha tende a ser mais baixa, pois o material não possui capacidade de deformação plástica antes de romper, levando a uma falha abrupta.

Enquanto as juntas com aderentes reforçados com linho, tanto nas arquiteturas *twill* quanto UD, apresentaram cargas de falha médias superiores às de juta, devido à maior capacidade de deformação dos aderentes. A fibra de linho, em comparação com a de juta, possui melhores propriedades mecânicas, como maior flexibilidade e resistência à deformação, o que permite que a junta absorva e distribua melhor a carga aplicada. Isso

contribui para uma maior capacidade de suportar tensões antes da falha, já que o material pode acomodar a rotação e a deformação da borda de sobreposição de forma mais eficiente. Especificamente, as juntas de linho UD resistiram mais devido ao modo de falha LFT, que permitiu uma deformação mais controlada. Já as juntas de linho *twill* sofreram delaminação, apresentando resistência inferior, o que está relacionado ao modo de falha discutido na seção anterior.



a)



b)

Figura 54 - Dados quantitativos para os testes de SLJ em função da arquitetura do tecido de linho: a) Linho *twill* e b) Linho UD.

Comparando as juntas híbridas com linho *twill*, ou seja, J/F-Twill2 e J/F-Twill3, com a junta de juta pura (Juta5), observou-se uma melhoria de aproximadamente 38% e 39%, respectivamente. Por outro lado, as juntas híbridas com linho unidirecional, ou seja, J/F-UD2 e J/F-UD3, apresentaram uma melhoria mais significativa em comparação com a junta de juta pura (Juta5), com aumentos de aproximadamente 56% e 59%, respectivamente. Esse comportamento pode ser explicado pelas melhores propriedades dos substratos hibridizados com linho UD – resistência à tração e rigidez do compósito, que ajudam a minimizar a rotação das bordas da sobreposição durante a carga, bem como pela arquitetura do tecido que condicionou a falha a um modo mais controlado e menos severo (quebra leve das fibras) e retarda o início da falha por delaminação, como observado na seção anterior.

Ao comparar a junta híbrida de linho *twill* com 3 camadas (J/F-Twill3) com a de 2 camadas (J/F-Twill2), não foi observada uma variação significativa na carga média de falha (aumento de ~1,6%). Para a junta híbrida de linho unidirecional com 3 camadas (J/F-UD3) comparada à de 2 camadas (J/F-UD2), é observado um aumento ligeiramente maior de aproximadamente 6,3%, o que é desprezível quando se considera o desvio padrão. No entanto, a diferença nas cargas de falha se torna mais evidente ao comparar juntas híbridas com diferentes arquiteturas de tecido de linho (ou seja, twill vs. UD), mantendo o número de camadas o mesmo. Por exemplo, a junta híbrida de linho *twill* com 2 camadas (J/F-Twill2) apresentou uma carga de falha aproximadamente 28% menor do que a SLJ híbrida de linho unidirecional com 2 camadas (J/F-UD2), enquanto a junta de linho *twill* com 3 camadas (J/F-Twill3) teve uma carga de falha aproximadamente 32% menor do que a de linho unidirecional com 3 camadas (J/F-UD3). Portanto, a arquitetura da fibra de linho é um parâmetro que influencia o desempenho da carga média de falha das juntas híbridas, destacando a importância de considerar as características do tecido no design de compósitos estruturais, enquanto o aumento no número de camadas mostrou um impacto limitado sob essas condições específicas.

Ao comparar as juntas híbridas com suas respectivas contrapartes de junta pura, ou seja, com F-UD11 e F-Twill11, algumas semelhanças podem ser observadas. Por exemplo, as juntas híbridas com linho UD (J/F-UD2 e J/F-UD3) atingiram aproximadamente 92% e 98% do desempenho mostrado por F-UD11, respectivamente. Além disso, as juntas híbridas com linho *twill* (J/F-Twill2 e J/F-Twill3) atingiram

aproximadamente 97% e 99%, respectivamente, do desempenho da junta F-Twill11.

A semelhança estatística na carga média de falha pode ser associada aos modos de falha das juntas. Como discutido anteriormente, para ambos os modos de falha das juntas, existe uma carga crítica na qual o dano plástico se inicia na resina da superfície do aderente, fazendo com que a trinca se desenvolva, seja em direção às camadas internas dos aderentes (delaminação nas juntas de linho *twill*) ou em direção à interface resina/fibra e adesivo (juntas de linho UD). Como observado, as juntas de cada tipo de arquitetura de linho apresentaram modos de falha semelhantes entre si, demonstrando que a falha sempre começa em um mesmo patamar de carga. Portanto, mesmo que as propriedades do aderente sejam melhoradas com o aumento do número de camadas externas de linho, isso não influenciará a carga crítica necessária para o início do dano plástico na resina da superfície do aderente. Isso explica o motivo das juntas apresentarem comportamentos de falha semelhantes entre suas contrapartes, com a falha progredindo de forma previsível, independentemente das mudanças nas propriedades do aderente.

Por fim, essa semelhança no desempenho destaca a importância de considerar outros fatores, como arquitetura do material e configuração das camadas, ao selecionar projetos de juntas para aplicações específicas.

Tabela 19 - Dados quantitativos para todas as juntas testadas em função da arquitetura do tecido de linho: Linho UD e Linho Sarja.

Tipo de Junta	Carga média de falha (N)	Deslocamento médio (mm)
Juta 5	1902.12 ± 204.40	0.87 ± 0.03
J/F-Twill2	3080.27 ± 61.79	1.15 ± 0.28
J/F-Twill3	3130.36 ± 136.48	1.15 ± 0.29
F-Twill11	3168.08 ± 133.78	1.16 ± 0.28
J/F-UD2	4289.94 ± 149.51	1.13 ±0.09
J/F-UD3	4576.62 ± 304.35	1.10 ± 0.06
F-UD11	4684.54 ± 443.79	1.05 ± 0.09

Em conclusão, os testes e a análise dos dados sugerem que juntas híbridas com 2 camadas podem ser uma solução viável, equilibrando desempenho e custo. Embora não tenham atingido a carga de falha das juntas de linho unidirecionais puras (F-UD11), as juntas com 2 camadas de linho unidirecional (J/F-UD2) demonstraram um desempenho significativo, alcançando cerca de 92% da carga de falha média da junta F-UD11. Além disso, o mesmo comportamento pode ser observado nas juntas híbridas com aderentes de

linho tipo sarja (J/F-Twill2 e J/F-Twill3), que apresentaram um desempenho ainda melhor em comparação com as juntas SLJ de linho tipo sarja simples. Esses resultados demonstram a eficácia da hibridização na melhoria das propriedades das juntas.

No entanto, é importante destacar que, durante a caracterização dos substratos híbridos utilizados como aderentes, os resultados não foram tão promissores quanto os observados nas juntas. Assim, considerando fatores como custo e desempenho das juntas em si, a opção com 2 camadas pode ser uma escolha interessante, especialmente quando se busca reduzir custos sem comprometer significativamente a resistência e o desempenho das juntas em aplicações práticas.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram estudados os efeitos da hibridização a partir de reforços de linho unidirecional (UD) e sarja (*twill*) nas propriedades mecânicas de compósitos híbridos interlaminares de linho/juta. Foi investigado também a influência desses tecidos de linho no desempenho mecânico de juntas adesivas com aderentes em compósitos híbridos juta/linho.

Após fabricados, os compósitos foram caracterizados por meio de ensaios de tração, flexão e impacto. Posteriormente, foram fabricadas as juntas adesivas e submetidas a ensaio de cisalhamento por tração uniaxial. As seguintes conclusões podem ser extraídas:

- Entre os compósitos puros, o compósito de juta pura apresentou as menores propriedades mecânicas devido à menor resistência da fibra de juta, seguido pelo compósito de linho *twill* puro. Por fim, o compósito de linho UD puro exibiu as maiores propriedades mecânicas.
- Em geral, os compósitos reforçados com tecido de linho UD apresentaram as maiores melhorias nas propriedades mecânicas em comparação aos compósitos reforçados com tecido de linho *twill*. Isso se deve às propriedades superiores do tecido unidirecional.
- A hibridização de compósitos reforçados com fibra de linho (UD e *twill*) melhorou significativamente as propriedades mecânicas do compósito, como esperado. A resistência à tração mostrou uma tendência de melhoria quase linear com o aumento do número de camadas externas de linho, sendo que os maiores incrementos foram observados para os casos J/F-UD3 e J/F-Twill3, com aumentos relativos ao compósito de juta pura de aproximadamente 64% e 45%, respectivamente. O módulo de Young também mostrou uma tendência de melhoria, com os mesmos casos apresentando aumentos de aproximadamente 68% e 36%, respectivamente. No geral, os modos de falha à tração das amostras híbridas mostraram comportamento frágil, destacando uma tendência de maior alongamento nas amostras reforçadas com linho UD. Quanto às amostras de

compósitos reforçados com tecido de linho *twill*, elas exibiram comportamento de falha frágil, com fraturas ocorrendo tanto no núcleo de juta quanto nas fibras de linho.

- A resistência à flexão mostrou um aumento significativo quando os compósitos híbridos foram comparados à juta pura. No entanto, aumentar o número de camadas não resultou necessariamente em um aumento proporcional na resistência à flexão. A maior resistência à flexão observada foi nos casos J/F-UD2 e J/F-Twill2, aproximadamente 58% e 40% maior do que o compósito de juta pura, respectivamente. O módulo de flexão dos compósitos apresentou uma tendência semelhante, sendo as melhores amostras aproximadamente 74% e 45% superiores ao compósito de juta pura. Isso indica que aumentar o número de camadas além de duas camadas externas simétricas não resultou em melhorias.
- Sob condições de impacto, todos os compósitos híbridos apresentaram melhorias na energia de impacto em comparação ao compósito de juta pura. Observou-se que a amostra reforçada com 3 camadas externas de tecido de linho UD exibiu a melhor melhoria, com um aumento de 75% em relação à amostra de juta pura. Além disso, essa amostra superou a amostra de linho UD puro em aproximadamente 11%. Isso indica a possibilidade de alcançar um bom equilíbrio entre o custo do material ao usar uma fibra mais barata (juta) como substituta do linho.
- Juntas adesivas de compósitos reforçados com fibra de linho apresentaram cargas de falha mais altas em comparação com compósitos reforçados com fibra de juta, principalmente devido aos seus diferentes modos de falha (ou seja, falha por rasgo de fibra leve (LFT) para o linho e falha por quebra do feixe para a juta). O desempenho das juntas de juta e linho foi significativamente influenciado pela morfologia superficial e propriedades mecânicas dos tecidos de fibra de reforço, com o linho exibindo maior resistência e rigidez.
- A arquitetura das fibras de linho (unidirecional versus sarja) teve uma influência notável nos modos de falha da junta e na capacidade de carga. Compósitos de linho unidirecional exibiram cargas de falha mais altas e modos de falha mais controlados (LFT), enquanto compósitos de linho *twill* eram propensos à

delaminação. No entanto, a variação na carga de falha entre diferentes arquiteturas de linho (unidirecional e sarja) foi menos significativa em comparação com a influência do tipo de fibra.

- Juntas híbridas com duas camadas de reforço de linho demonstraram um equilíbrio viável entre desempenho e custo, alcançando aproximadamente 92% da carga de falha das juntas de linho unidirecional puro, enquanto aquelas com três camadas atingiram 98%. Da mesma forma, juntas híbridas com duas camadas de linho sarja atingiram aproximadamente 97% da carga de falha das juntas de linho sarja puro, enquanto aquelas com três camadas alcançaram 99%. Isso sugere que a hibridização pode ser uma estratégia eficaz para reduzir os custos dos materiais sem comprometer significativamente a resistência da junta, tornando-a adequada para aplicações práticas onde a eficiência de custos é crítica.

Esses resultados podem ser usados como base para escolha de uma arquitetura ideal para aplicações específicas. Além disso, este estudo fornece valiosas informações sobre o comportamento mecânico das juntas coladas em compósitos reforçados com fibras naturais, destacando a importância do tipo de fibra, arquitetura e hibridização na otimização do desempenho da junta.

5.1 Trabalhos Futuros

Como sugestão para trabalhos futuros, sugere-se o estudo detalhado do comportamento interfacial com a realização de ensaios específicos (ILSS e outros). Esses estudos poderão ajudar a identificar melhor as causas do comportamento do compósito a medique que se aumenta o número de camadas. Além disso, indica-se também o estudo do comportamento mecânico do compósito após a aplicação de tratamentos superficiais das fibras.

Adicionalmente, sugere-se o estudo do comportamento térmico das fibras e dos compósitos.

Ademais, sugere-se expandir o uso de técnicas microscópicas para todos as amostras de todos os ensaios realizados. Isso ajudará a entender melhor o comportamento dos compósitos quando sujeitados aos demais esforços.

Por fim, coloca-se a necessidade da realização de estudos de degradação ultravioleta, absorção de umidade e outras intempéries a fim de determinar a resistência do material e estudar a vida útil destes compósitos visando a aplicação destes materiais na indústria.

REFERÊNCIAS

1. Li, M., et al., *Recent advancements of plant-based natural fiber–reinforced composites and their applications.* Composites Part B: Engineering, 2020. **200**: p. 108254.
2. Andrew, J.J. and H.N. Dhakal, *Sustainable biobased composites for advanced applications: recent trends and future opportunities – A critical review.* Composites Part C: Open Access, 2022. **7**: p. 100220.
3. Trzepieciński, T., et al., *New Advances and Future Possibilities in Forming Technology of Hybrid Metal–Polymer Composites Used in Aerospace Applications.* Journal of Composites Science, 2021. **5**(8): p. 217.
4. Khalid, M.Y., et al., *Recent trends in recycling and reusing techniques of different plastic polymers and their composite materials.* Sustainable Materials and Technologies, 2022. **31**: p. e00382.
5. Rajak, D.K., et al., *Fiber-Reinforced Polymer Composites: Manufacturing, Properties, and Applications.* Polymers, 2019. **11**(10): p. 1667.
6. Precedence. *Composites Market Size, Share, and Trends 2024 to 2034*. 2022 [cited 2024 29/08]; July 2022]. Available from: https://www.precedenceresearch.com/composites-market.
7. Neto, J., et al., *A Review of Recent Advances in Hybrid Natural Fiber Reinforced Polymer Composites.* Journal of Renewable Materials, 2022. **10**(3): p. 561--589.
8. de Queiroz, H.F.M., et al., *The effect of multiscale hybridization on the mechanical properties of natural fiber-reinforced composites.* Journal of Applied Polymer Science, 2021. **138**(41): p. 51213.
9. Silva, L.F.M., A. Magalhaes, and M. De Moura, *Juntas Adesivas Estruturais*. 2017.
10. Bhudolia, S.K., et al., *Advances in Ultrasonic Welding of Thermoplastic Composites: A Review.* Materials, 2020. **13**(6): p. 1284.
11. Callister, W.D., *Ciência E Engenharia De Materiais - Uma Introdução*. 2020: LTC.
12. Egbo, M.K., *A fundamental review on composite materials and some of their applications in biomedical engineering.* Journal of King Saud University -

Engineering Sciences, 2021. **33**(8): p. 557-568.

13. Herakovich, C.T., *Mechanics of composites: A historical review.* Mechanics Research Communications, 2012. **41**: p. 1-20.
14. Parveez, B., et al., *Scientific Advancements in Composite Materials for Aircraft Applications: A Review.* Polymers, 2022. **14**(22): p. 5007.
15. Zhang, J., et al., *Past, present and future prospective of global carbon fibre composite developments and applications.* Composites Part B: Engineering, 2023. **250**: p. 110463.
16. Binner, J., et al., *Selection, processing, properties and applications of ultra-high temperature ceramic matrix composites, UHTCMCs – a review.* International Materials Reviews, 2020. **65**(7): p. 389-444.
17. Kangishwar, S., et al., *A comprehensive review on polymer matrix composites: material selection, fabrication, and application.* Polymer Bulletin, 2023. **80**(1): p. 47-87.
18. Daniel, I.M. and O. Ishai, *Engineering Mechanics of Composite Materials by Isaac M. Daniel and Ori Ishai*. 2005: Oxford University Press.
19. Neto, F.L. and L.C. Pardini, *Compósitos estruturais: ciência e tecnologia*. 2021: Editora Blucher.
20. Anwer, A.H., et al., *State-of-the-art advances in nanocomposite and bio-nanocomposite polymeric materials: A comprehensive review.* Advances in Colloid and Interface Science, 2023. **318**: p. 102955.
21. Ali, M.S., et al., *Nano and bio-composites and their applications: A review.* IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021. **1067**(1): p. 012093.
22. Sukanto, H., et al., *Epoxy resins thermosetting for mechanical engineering.* Open Engineering, 2021. **11**(1): p. 797-814.
23. Saba, N., et al., *Recent advances in epoxy resin, natural fiber-reinforced epoxy composites and their applications.* Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2016. **35**(6): p. 447-470.
24. Zhang, Y., et al., *Recent Development of Functional Bio-Based Epoxy Resins.* Molecules, 2024. **29**(18): p. 4428.
25. Dunne, R., et al., *A review of natural fibres, their sustainability and automotive applications.* Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2016. **35**(13): p.

1041-1050.

26. Teboho, M., et al., *Recent progress on natural fiber hybrid composites for advanced applications: A review.* eXPRESS Polymer Letters, 2018. **13**: p. 159-198.
27. Faruk, O., et al., *Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010.* Progress in Polymer Science, 2012. **37**(11): p. 1552-1596.
28. Elfaleh, I., et al., *A comprehensive review of natural fibers and their composites: An eco-friendly alternative to conventional materials.* Results in Engineering, 2023. **19**: p. 101271.
29. Sathish, M., et al., *A review on sustainable properties of plant fiber-reinforced polymer composites: characteristics and properties.* Polymer International, 2024. **n/a**(n/a).
30. Gurunathan, T., S. Mohanty, and S.K. Nayak, *A review of the recent developments in biocomposites based on natural fibres and their application perspectives.* Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2015. **77**: p. 1-25.
31. Satyanarayana, K.G., J.L. Guimarães, and F. Wypych, *Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications.* Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2007. **38**(7): p. 1694-1709.
32. Peças, P., et al., *Natural Fibre Composites and Their Applications: A Review.* Journal of Composites Science, 2018. **2**(4): p. 66.
33. Ashraf, M.A., et al., *Jute Based Bio and Hybrid Composites and Their Applications.* Fibers, 2019. **7**(9): p. 77.
34. Repon, M.R., et al., *Systematic pad dry cure technique for augmenting the flame resistance functionality of jute fabric.* Cleaner Engineering and Technology, 2022. **8**: p. 100492.
35. Lima, R.A.A., et al., *Effect of surface treatments on interfacial properties of natural intralaminar hybrid composites.* Polymer Composites, 2020. **41**(1): p. 314-325.
36. Gopinath, A., M.S. Kumar, and A. Elayaperumal, *Experimental Investigations on Mechanical Properties Of Jute Fiber Reinforced Composites with Polyester and Epoxy Resin Matrices.* Procedia Engineering, 2014. **97**: p. 2052-2063.

37. Flores, A.L.L., et al., *Effect of Chemical Treatments on the Mechanical Properties of Jute/Polyester Composites.* Materials, 2024. **17**(10): p. 2320.
38. Queiroz, H., et al., *Mechanical characterization of jute/carbon hybrid epoxy composites.* Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2024. **0**(0): p. 14644207241233947.
39. Cavalcanti, D.K.K., et al., *Mechanical characterization of intralaminar natural fibre-reinforced hybrid composites.* Composites Part B: Engineering, 2019. **175**: p. 107149.
40. Sajin, J.B., et al., *Impact of fiber length on mechanical, morphological and thermal analysis of chemical treated jute fiber polymer composites for sustainable applications.* Current Research in Green and Sustainable Chemistry, 2022. **5**: p. 100241.
41. Neto, J.S.S., et al., *Effect of chemical treatment on the thermal properties of hybrid natural fiber-reinforced composites.* Journal of Applied Polymer Science, 2019. **136**(10): p. 47154.
42. Neto, J.S.S., et al., *Effect of ultraviolet radiation and water spraying on the mechanical properties of multi-walled carbon nanotubes reinforced natural fiber and hybrid composites.* Journal of Applied Polymer Science, 2022. **139**(15): p. 51915.
43. Shahinur, S., et al., *Current Development and Future Perspective on Natural Jute Fibers and Their Biocomposites.* Polymers, 2022. **14**(7): p. 1445.
44. Goudenhooft, C., A. Bourmaud, and C. Baley, *Flax (Linum usitatissimum L.) Fibers for Composite Reinforcement: Exploring the Link Between Plant Growth, Cell Walls Development, and Fiber Properties.* Front Plant Sci, 2019. **10**: p. 411.
45. Yan, L., N. Chouw, and K. Jayaraman, *Flax fibre and its composites – A review.* Composites Part B: Engineering, 2014. **56**: p. 296-317.
46. Moudood, A., et al., *Flax fiber and its composites: An overview of water and moisture absorption impact on their performance.* Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2019. **38**(7): p. 323-339.
47. Aldroubi, S., et al., *Multi-scale investigation of morphological, physical and tensile properties of flax single fiber, yarn and unidirectional fabric.* Composites

Part B: Engineering, 2023. **259**: p. 110732.

48. Fairlie, G. and J. Njuguna, *Damping Properties of Flax/Carbon Hybrid Epoxy/Fibre-Reinforced Composites for Automotive Semi-Structural Applications.* Fibers, 2020. **8**(10): p. 64.
49. Fiore, V., A. Valenza, and G. Di Bella, *Mechanical behavior of carbon/flax hybrid composites for structural applications.* Journal of Composite Materials, 2012. **46**(17): p. 2089-2096.
50. Haramina, T., N. Hadžić, and Z. Keran, *Epoxy Resin Biocomposites Reinforced with Flax and Hemp Fibers for Marine Applications.* Journal of Marine Science and Engineering, 2023. **11**(2): p. 382.
51. Swolfs, Y., I. Verpoest, and L. Gorbatikh, *Recent advances in fibre-hybrid composites: materials selection, opportunities and applications.* International Materials Reviews, 2019. **64**(4): p. 181-215.
52. Kröger, H., et al., *Damping Properties of Hybrid Composites Made from Carbon, Vectran, Aramid and Cellulose Fibers.* Journal of Composites Science, 2022. **6**(1): p. 13.
53. Ejaz, M., et al., *Mechanical and Biodegradable Properties of Jute/Flax Reinforced PLA Composites.* Fibers and Polymers, 2020. **21**(11): p. 2635-2641.
54. Fiore, V. and L. Calabrese, *Effect of Stacking Sequence and Sodium Bicarbonate Treatment on Quasi-Static and Dynamic Mechanical Properties of Flax/Jute Epoxy-Based Composites.* Materials, 2019. **12**(9): p. 1363.
55. Billah, M.M., M.S. Rabbi, and A. Hasan, *A Review on Developments in Manufacturing Process and Mechanical Properties of Natural Fiber Composites.* Journal of Engineering Advancements, 2021. **2**(01): p. 13-23.
56. Banea, M.D., et al., *Multi-material adhesive joints for automotive industry.* Composites Part B: Engineering, 2018. **151**: p. 71-77.
57. Silva, L.F.M., A. Öchsner, and R. Adams, *Handbook of Adhesion Technology*. 2011. p. 1-7.
58. Marques, E.A.S., et al., *Introdução às Ligações Adesivas Estruturais.* 2021, Porto: Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda.
59. Banea, M.D. and L.F.M. da Silva, *Adhesively bonded joints in composite materials: An overview.* Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers,

Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2009. **223**(1): p. 1-18.

60. de Queiroz, H.F.M., et al., *Mechanical characterization of short Curauá/glass fiber-reinforced interlaminar hybrid composite adhesive joints.* Journal of Adhesion Science and Technology, 2024. **38**(9): p. 1473-1490.
61. Cavalcanti, D.K.K., H.F.M. de Queiroz, and M.D. Banea, *Performance enhancement of adhesive joints of additive manufactured parts by using different types of fibre reinforcements.* International Journal of Adhesion and Adhesives, 2023. **124**: p. 103371.
62. de Queiroz, H.F.M., et al., *Effect of hybridization and composite architecture symmetry in the bonded joint performance of jute/carbon fibre-reinforced composites.* International Journal of Adhesion and Adhesives, 2024. **133**: p. 103745.
63. de Queiroz, H.F.M., M.D. Banea, and D.K.K. Cavalcanti, *Experimental analysis of adhesively bonded joints in synthetic- and natural fibre-reinforced polymer composites.* Journal of Composite Materials, 2020. **54**(9): p. 1245-1255.
64. ASTM, *ASTM D5573-99(2019): Standard Practice for Classifying Failure Modes in Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Joints*. 2019.
65. Rudawska, A., E. Bociąga, and E. Olewnik-Kruszkowska, *The effect of primers on adhesive properties and strength of adhesive joints made with polyurethane adhesives.* Journal of Adhesion Science and Technology, 2017. **31**(3): p. 327-344.
66. Gleich, D.M., M.J.L. Van Tooren, and A. Beukers, *Analysis and evaluation of bondline thickness effects on failure load in adhesively bonded structures.* Journal of Adhesion Science and Technology, 2001. **15**(9): p. 1091-1101.
67. Lopes Fernandes, R., et al., *From thin to extra-thick adhesive layer thicknesses: Fracture of bonded joints under mode I loading conditions.* Engineering Fracture Mechanics, 2019. **218**: p. 106607.
68. ASTM, *Standard Test Method for Lap Shear Adhesion for Fiber Reinforced Plastic (FRP) Bonding*. 2014.
69. ASTM, *ASTM D3039: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. 2014.
70. ASTM, *ASTM D7264/D7264M-21: Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials* 2021.

71. ASTM, *ASTM D4812-19: Standard Test Method for Unnotched Cantilever Beam Impact Resistance of Plastics.* 2019.
72. Lee, C.H., A. Khalina, and S.H. Lee, *Importance of Interfacial Adhesion Condition on Characterization of Plant-Fiber-Reinforced Polymer Composites: A Review.* Polymers, 2021. **13**(3): p. 438.
73. Duc, F., et al., *Damping of thermoset and thermoplastic flax fibre composites.* Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2014. **64**: p. 115-123.
74. Giuliani, P.M., O. Giannini, and R. Panciroli, *Characterizing flax fiber reinforced bio-composites under monotonic and cyclic tensile loading.* Composite Structures, 2022. **280**: p. 114803.
75. Sarwar, A., et al., *Mechanical characterization of a new Kevlar/Flax/epoxy hybrid composite in a sandwich structure.* Polymer Testing, 2020. **90**: p. 106680.
76. Alipour, A. and K. Jayaraman, *Performance of Flax/Epoxy Composites Made from Fabrics of Different Structures.* Fibers, 2024. **12**(4): p. 34.
77. Sahbaz Karaduman, N., *Experimental investigation of the effect of weave type on the mechanical properties of woven hemp fabric/epoxy composites.* Journal of Composite Materials, 2022. **56**(8): p. 1255-1265.
78. Venkateshwaran, N., A. ElayaPerumal, and R.H. Arwin Raj, *Mechanical and Dynamic Mechanical Analysis of Woven Banana/Epoxy Composite.* Journal of Polymers and the Environment, 2012. **20**(2): p. 565-572.
79. Cihan, M., A.J. Sobey, and J.I.R. Blake, *Mechanical and dynamic performance of woven flax/E-glass hybrid composites.* Composites Science and Technology, 2019. **172**: p. 36-42.
80. Meredith, J., et al., *On the static and dynamic properties of flax and Cordenka epoxy composites.* Composites Science and Technology, 2013. **80**: p. 31-38.
81. Poilâne, C., et al., *Polymer reinforced by flax fibres as a viscoelastoplastic material.* Composite Structures, 2014. **112**: p. 100-112.
82. Saadati, Y., et al., *Experimental investigation of failure mechanisms and evaluation of physical/mechanical properties of unidirectional flax–epoxy composites.* Journal of Composite Materials, 2020. **54**(20): p. 2781-2801.
83. Moudood, A., et al., *Environmental effects on the durability and the mechanical performance of flax fiber/bio-epoxy composites.* Composites Part B: Engineering,

2019. **171**: p. 284-293.

84. Fiore, V., C. Sanfilippo, and L. Calabrese, *Dynamic Mechanical Behavior Analysis of Flax/Jute Fiber-Reinforced Composites under Salt-Fog Spray Environment.* Polymers (Basel), 2020. **12**(3).
85. Adekunle, K., et al., *Impact and flexural properties of flax fabrics and Lyocell fiber-reinforced bio-based thermoset.* Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2011. **30**(8): p. 685-697.
86. Bahrami, M., et al., *Hybridization Effect on Interlaminar Bond Strength, Flexural Properties, and Hardness of Carbon-Flax Fiber Thermoplastic Bio-Composites.* Polymers, 2023. **15**(24).
87. Kureemun, U., et al., *Effects of hybridization and hybrid fibre dispersion on the mechanical properties of woven flax-carbon epoxy at low carbon fibre volume fractions.* Composites Part B: Engineering, 2018. **134**: p. 28-38.
88. Woigk, W., et al., *Interface properties and their effect on the mechanical performance of flax fibre thermoplastic composites.* Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2019. **122**: p. 8-17.
89. Bozkurt, Ö.Y., A. Erkliğ, and M. Bulut, *Hybridization effects on charpy impact behavior of basalt/aramid fiber reinforced hybrid composite laminates.* Polymer Composites, 2018. **39**(2): p. 467-475.
90. Andrew, J.J., et al., *Parameters influencing the impact response of fiber-reinforced polymer matrix composite materials: A critical review.* Composite Structures, 2019. **224**: p. 111007.
91. Siddiqui, M.A.S., M.S. Rabbi, and S. Dewanjee, *Low-velocity impact response of natural fiber reinforced composites: A comprehensive review on influential parameters.* Composites Part C: Open Access, 2023. **12**: p. 100422.
92. Özdemir, H. and E. Mert, *The effects of fabric structural parameters on the tensile, bursting, and impact strengths of cellular woven fabrics.* The Journal of The Textile Institute, 2013. **104**(3): p. 330-338.
93. Habibi, M., L. Laperrière, and H. Mahi Hassanabadi, *Replacing stitching and weaving in natural fiber reinforcement manufacturing, part 1: mechanical behavior of unidirectional flax fiber composites.* Journal of Natural Fibers, 2019. **16**(7): p. 1064-1076.

94. Aslan, M., *Investigation of damage mechanism of flax fibre LPET commingled composites by acoustic emission.* Composites Part B: Engineering, 2013. **54**: p. 289-297.
95. Kupski, J., et al., *Composite layup effect on the failure mechanism of single lap bonded joints.* Composite Structures, 2019. **217**: p. 14-26.
96. Keck, S. and M. Fulland, *Effect of fibre volume fraction and fibre direction on crack paths in unidirectional flax fibre-reinforced epoxy composites under static loading.* Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2019. **101**: p. 162-168.
97. Pisharody, A.P. and D.E. Smith, *Effect of interlayer adherend inclusions on strength of composite bonded joints.* Composite Structures, 2022. **291**: p. 115531.
98. Sadeghi, A., et al., *Effect of lamina fiber orientation interfaced with semi-flexible adhesive layer on strength and failure mode of composite single-lap joints.* International Journal of Adhesion and Adhesives, 2022. **118**: p. 103232.