

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA
E DE MATERIAIS

ANDRE LUIS LIMA FLORES

**CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E HIGROSCÓPICAS DE COMPÓSITOS DE
JUTA UTILIZANDO TRATAMENTO QUÍMICO E HIBRIDIZAÇÃO COM VIDRO
E CARBONO**

Porto Alegre

2023

ANDRE LUIS LIMA FLORES

**CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E HIGROSCÓPICAS DE COMPÓSITOS DE
JUTA UTILIZANDO TRATAMENTO QUÍMICO E HIBRIDIZAÇÃO COM VIDRO
E CARBONO**

Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Orientador: Prof. Sandro Campos Amico (UFRGS)
Coorientador: Prof. Rafael de Avila Delucis (UFPEL)

Porto Alegre

2023

Orientador: Prof. Dr. Sandro Campos Amico (PPGE3M/UFRGS)

Coorientador: Prof. Dr. Rafael de Avila Delucis (PGCEM/UFPEL)

Banca Examinadora:

Prof. Profa. Dra. Daiane Romanzini

Curso de Engenharia Química (Campus Feliz)/IFRS

Prof. Dr. Alcides Lopes Leão

Faculdade de Ciências Agrônômicas (Campus de Botucatu)/UNESP

Profa. Dra. Amanda Dantas de Oliveira

Centro de Desenvolvimento Tecnológico/UFPEL

Prof. Dr. Rodrigo de Lemos Peroni

Coordenador do PPGE3M

AGRADECIMENTOS

Agradeço a meus pais por incentivar e priorizar a educação e os estudos desde sempre, a companheira Daiane Hain pelo apoio em muitos momentos desta jornada.

A todos os colegas de jornada no doutorado da UFRGS pela troca de conhecimento, principalmente do GCOMP, LAPOL e GMAP. À Fundação Luiz Englert e às empresas que ajudaram e participaram no desenvolvimento e na produção do tecido unidirecional de Juta: Castanhal companhia têxtil, SENAI CETIQT e PBS Têxtil.

Um agradecimento especial aos meus orientadores por proporcionarem recursos suficientes desde o desenvolvimento e escolha da matéria prima até a conclusão dos estudos, e a banca examinadora por sugerir e direcionar caminhos promissores.

À UFRB/CETENS, por acreditar no potencial dessa pesquisa.

A todos que, de alguma forma, auxiliaram na elaboração desse trabalho.

PUBLICAÇÕES RELACIONADAS

Artigos completos publicados em periódicos

FLORES, A.; ALBERTIN, A.; DELUCIS, R. A.; AMICO, S. C. Mechanical and hygroscopic characteristics of unidirectional jute/glass and jute/carbon hybrid laminates. **Journal of Natural Fibers**, doi: 10.1080/15440478.2023.2178586

Artigos completos submetidos em periódicos

FLORES, A.; LAVORATTI, A.; DELUCIS, R. A.; AMICO, S. C. Effect of chemical treatments on the mechanical properties of jute/polyester composites.

FLORES, A.; YVAZ, A.; ACOSTA, A.P.; DELUCIS, R. A.; AMICO, S. C. Mechanical properties of open-hole unidirectional laminates: hybridization of jute unidirectional fabrics with glass fiber fabrics.

Trabalhos completos publicados em anais de congressos

FLORES, A. L. L.; DA SILVA, A. A. X.; DELUCIS, R. A.; AMICO, S.C. Acoustical properties of polyester/jute/glass hybrid composites. In: 5th Brazilian Conference on Composite Materials (BCCM 5), 2021, São Carlos/SP. p. 1-7.

CASTRO, D. P.; FLORES, A. L. L.; DRAGO, V. A.; LAVORATTI, A.; AMICO, S. C. Mechanical properties of jute fiber fabric/polyester resin composites produced by resin transfer molding. In: 5th Brazilian Conference on Composite Materials (BCCM 5), 2021, São Carlos/SP. p. 1-5.

RESUMO

Este estudo se dedica à investigação de compósitos laminados de fibra natural para a aplicação em instrumentos musicais, explorando a combinação de juta com fibras sintéticas como o vidro e o carbono em compósitos com resina de poliéster. A pesquisa ainda aborda três tratamentos químicos distintos aplicados aos tecidos de juta: hidróxido de sódio, peróxido de hidrogênio e ácido peracético. Os compósitos foram obtidos por infusão a vácuo e RTM. Os resultados mostraram que esses tratamentos promovem aumentos significativos em diferentes propriedades mecânicas dos compósitos laminados, tornando-os mais adequados para aplicações musicais. Ainda assim, uma vez que tais tratamentos implicam em operações unitárias adicionais, optou-se por descontinua-los das etapas subsequentes do trabalho. Além disso, com base em resultados obtidos para nove sequências diferentes de empilhamento, a hibridização dos compósitos naturais com fibras de vidro e carbono possibilitou personalizar as propriedades mecânicas dos laminados. Além disso, os resultados indicam que a hibridização gera laminados com propriedades intermediárias, possibilitando ajustes de resistência, rigidez e absorção de água para atender a diversas necessidades musicais. A análise microscópica revelou uma elevada presença de vazios nas regiões de interação das fibras de juta e da resina. Também, a variação da espessura dos laminados foi influenciada pelo número de interfaces híbridas, com laminados de menor espessura sendo obtidos para os laminados bi componentes de vidro ou carbono. Laminados unidirecionais furados demonstraram perdas de propriedades em tração e flexão em relação aos laminados não furados, exceto a rigidez em flexão. Verificou-se que uso de compósito laminado híbrido juta/vidro em violões oferece uma excelente escolha para músicos que buscam qualidade sonora e aparência atraente. Com propriedades mecânicas superiores aos materiais atualmente difundidos no mercado, esses violões podem ser utilizados por músicos de diferentes níveis de habilidade.

Palavras-chave: resina poliéster, hidróxido de sódio, RTM, infusão a vácuo, compósitos híbridos, fibras naturais, laminados unidirecionais.

ABSTRACT

This study is dedicated to the investigation of laminated natural fiber composites for application in musical instruments, exploring the combination of jute with synthetic fibers such as glass and carbon in composites with polyester resin. The research also addresses three distinct chemical treatments applied to jute fabrics: sodium hydroxide, hydrogen peroxide, and peracetic acid. The composites were obtained through vacuum infusion and RTM (Resin Transfer Molding). The results showed that these treatments promote significant increases in different mechanical properties of laminated composites, making them more suitable for musical applications. Nevertheless, since such treatments involve additional unit operations, it was decided to discontinue them from the subsequent stages of the work. Additionally, based on results obtained for nine different stacking sequences, the hybridization of natural composites with glass and carbon fibers allowed for the customization of the mechanical properties of laminates. Furthermore, the results indicate that hybridization produces laminates with intermediate properties, enabling adjustments in strength, stiffness, and water absorption to meet various musical needs. Microscopic analysis revealed a high presence of voids in the interaction regions of jute fibers and resin. Also, the variation in laminate thickness was influenced by the number of hybrid interfaces, with thinner laminates obtained for the glass or carbon bi-component laminates. Drilled unidirectional laminates showed property losses in tension and flexure compared to undrilled laminates, except for flexural stiffness. It was found that the use of jute/glass hybrid laminated composite in guitars offers an excellent choice for musicians seeking sound quality and attractive appearance. With superior mechanical properties compared to materials currently available in the market, these guitars can be used by musicians of varying skill levels.

Keywords: polyester resin, sodium hydroxide, RTM, vacuum infusion, hybrid composites, natural fibers, unidirectional laminates.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Celulose, hemicelulose e lignina encontradas na parede celular de uma planta.....	22
Figura 2: Fotografias de uma plantação de juta (a) e das fibras sendo manipuladas por um trabalhador da região norte do Brasil (b).....	24
Figura 3: Imagem representativa das principais configurações de tecidos: plano ou <i>plain weave</i> (a), sarja ou <i>twill weave</i> (b) e cetim ou <i>satín weave</i> (c).	27
Figura 4: Modelo computadorizado (a) e fotografia (b) de um protótipo de ukelele com tampos em compósito de matriz epóxi com fibras de linho.	34
Figura 5: Violino com tampo frontal em compósito de tecido de fibras de carbono: fotografias do processamento (a) e do produto acabado (b).	35
Figura 6: Harpa (a) e piano (b) parcialmente confeccionados com compósitos.	36
Figura 7: Ilustração dos laminados bi-componente e tri-componente (híbridos) produzidos por infusão a vácuo.	41
Figura 8: Ilustração dos laminados bi-componente e tri-componente (híbridos) furados produzidos por infusão a vácuo.	42
Figura 9: Fotografias da fabricação dos violões compósitos.....	46
Figura 10: Propriedades das resinas baseadas em poliéster.	47
Figura 11: Espectros FTIR das fibras de juta com diferentes tratamentos.....	48
Figura 12: Micrografias de MEV de fibras de juta: a) juta pura; b) tratada com NaOH; c) tratada com peróxido de hidrogênio e d) tratada com ácido peracético (400 ×).	49
Figura 13: Densidade dos compósitos de juta/poliéster.	50
Figura 14: Resultados de absorção de água dos compósitos até a saturação.	51
Figura 15: Resistência e módulo em flexão dos compósitos juta/poliéster.....	52
Figura 16: Propriedades em tração dos compósitos de juta/poliéster.....	53
Figura 17: Resistência <i>short beam</i> dos compósitos juta/poliéster.....	54
Figura 18: Micrografias de MEV dos compósitos com: a) fibra de juta pura; b) fibra de juta tratada com NaOH; c) fibra de juta tratada com peróxido de hidrogênio e d) fibra de juta tratada com ácido peracético (200×).	55
Figura 19: Módulo de elasticidade dinâmico avaliado por Sonelastic® da resina poliéster e dos laminados bi-componentes.....	56
Figura 20: Absorção de água dos laminados bi-componentes e híbridos juta/vidro e juta/carbono.	59
Figura 21: Mapa C-scan dos laminados bi-componentes e híbridos de juta/vidro.....	60

Figura 22: Propriedades de flexão dos laminados bi-componentes e híbridos juta/vidro.	60
Figura 23: Propriedades de tração dos laminados bi-componentes e híbridos juta/vidro.	61
Figura 24: Resistência <i>short beam</i> dos laminados bi-componentes e híbridos juta/vidro.....	63
Figura 25: Mapa C-scan dos laminados bi-componentes e híbridos juta/carbono.....	63
Figura 26: Propriedades de flexão dos laminados bi-componentes e híbridos juta/carbono....	64
Figura 27: Propriedades de tração dos laminados bi-componentes e híbridos juta/carbono....	65
Figura 28: Resistência <i>short beam</i> dos laminados bi-componentes e híbridos juta/carbono...	66
Figura 29: Imagens de MEV das superfícies fraturadas dos laminados: (a) J ₅ , (b) JCJCJ e (c) JC ₃ J.	67
Figura 30: Resistência à tração (A), módulo de elasticidade em tração (B), curvas representativas de tração (C) e deformação na ruptura (D) dos laminados (letras diferentes acima das barras representam diferenças significativas).....	68
Figura 31: Fotografias dos principais modos de falha encontrados após os testes de tração...	70
Figura 32: Resistência à flexão (A) e módulo de flexão (B) dos laminados (letras diferentes acima das barras representam diferenças significativas).....	71
Figura 33: Fotografias dos principais modos de falha encontrados após os testes de flexão...	72
Figura 34: Fotografias dos quatro violões confeccionados. Em que: as legendas de cada imagem são coincidentes com a nomenclatura usada para os violões na metodologia.....	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades de algumas fibras sintéticas.	21
Tabela 2: Conteúdo, em % de peso, dos principais componentes de fibras naturais.	21
Tabela 3: Propriedades de algumas fibras vegetais de diferentes origens.....	23
Tabela 4: Propriedades físicas e químicas da fibra de juta.....	25
Tabela 5: Fração mássica e densidade dos laminados bi-componentes e híbridos juta/vidro e juta/carbono.....	57

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2 OBJETIVOS.....	19
2.1 Objetivo geral.....	19
2.2 Objetivos específicos.....	19
3 REVISÃO DA LITERATURA.....	20
3.1 Reforços fibrosos em compósitos.....	20
3.1.1 Fibras naturais.....	21
3.1.2 Fibra de juta.....	24
3.1.3 Tratamento de fibras naturais.....	25
3.1.4 Tecidos de reforço.....	26
3.2 Moldagem Líquida de Compósitos.....	27
3.3 Compósitos híbridos natural/sintético.....	29
3.4 Compósitos laminados com furos.....	30
3.5 Compósitos em instrumentos musicais.....	32
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
4.1 Fibras de juta e tratamentos químicos.....	37
4.2 Resina poliéster isoftálica insaturada.....	37
4.3 Moldagem dos compósitos por RTM.....	38
4.4 Moldagem dos compósitos híbridos por infusão a vácuo.....	39
4.5 Caracterização dos compósitos.....	42
4.6 Fabricação de violões em compósitos.....	44
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47
5.1 Características da resina poliéster.....	47
5.2 Características dos compósitos moldados por RTM.....	47
5.3 Compósitos bi-componentes moldados por infusão a vácuo.....	56
5.4 Compósitos híbridos moldados por infusão a vácuo.....	57
5.4.1 Densidade dos laminados de juta/vidro e juta/carbono.....	57
5.4.2 Laminados juta/vidro.....	59
5.4.3 Laminados juta/carbono.....	63
5.5 Laminados open-hole.....	67

5.6 Violões em compósito	73
6. CONCLUSÕES	75
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	77
8. REFERÊNCIAS	78

1. INTRODUÇÃO

A juta é uma planta natural originária da Ásia, mas que se adaptou fenotipicamente de modo adequado para crescer nos solos úmidos do norte do Brasil, especialmente em encostas íngremes de rios, tais como Amazonas e Solimões, onde essas plantações cobrem cerca de 15 cidades. Toda a cadeia de produção emprega cerca de 20 mil trabalhadores e os principais produtos finais de juta incluem fios, tecidos e sacos, especialmente para embalar café. É claro que a proposição de novas aplicações capazes de aumentar o valor das fibras de juta pode favorecer as pessoas socialmente deprimidas, que exploram esta planta em países subdesenvolvidos.

Essa fibra pertence à família *Tiliaceae* e tem cerca de 40 espécies de juta. Os principais constituintes da fibra de juta são 61-73% de celulose, 13,6-23% de hemicelulose e 12-16% de lignina, juntamente com pequenas quantidades de pectina, gorduras e ceras geralmente presentes na superfície das fibras. As fibras de juta também têm uma densidade de $1,5 \text{ g.cm}^{-3}$ e um módulo de Young de 15-30 GPa (CHANDEKAR et al., 2020; KAPATEL, 2021).

A fibra de juta é uma das fibras naturais mais utilizadas em compósitos. Assim como outras fibras naturais, as fibras de juta são vantajosas em relação às sintéticas, especialmente a fibra de vidro, devido às boas propriedades mecânicas específicas, alta flexibilidade, renovabilidade, reciclabilidade, biodegradabilidade, baixa toxicidade, pegada de carbono neutra e baixas condutividades térmicas e acústicas (LATIF et al., 2019; MOHAN; KANNY, 2012). De fato, o uso benéfico de fibras naturais em compósitos tem sido explorado com sucesso em diferentes setores, incluindo construção naval, automotiva e civil (ALMEIDA et al., 2013; ANGRIZANI et al., 2017; ZAH et al., 2007).

Uma das desvantagens do uso de fibras naturais é sua incompatibilidade com matrizes poliméricas e sua heterogeneidade, juntamente com sua alta absorção de umidade, o que apresenta um desafio para a fabricação de compósitos com propriedades padronizadas para aplicações em instrumentos musicais (AMIANDAMHEN; MEINCKEN; TYHODA, 2020a). Além disso, as fibras naturais são compostas de lignina, pectina, ceras e alguma sujeira residual em sua superfície, todos os quais podem dificultar a molhabilidade dessas fibras durante processos de moldagem líquida, juntamente com adesão fraca na interface fibra / matriz, dificultando a transferência de

tensão e, portanto, diminuindo o desempenho mecânico desses compósitos (SOOD; DWIVEDI, 2018).

Com o objetivo de melhorar a adesão na interface dos compósitos de fibras naturais, podem ser adotadas várias abordagens. Os tratamentos químicos em fibras naturais têm sido uma forma eficaz de limpar e melhorar a superfície das fibras, aumentando a adesão na interface por meio da alteração da rugosidade da superfície ou mesmo removendo parcialmente alguns compostos de baixa massa molar presentes na superfície das fibras (SOOD; DWIVEDI, 2018). Vários tratamentos químicos foram relatados na literatura, sendo os mais utilizados a mercerização, ou seja, um tratamento alcalino geralmente realizado com hidróxido de sódio (NaOH), peróxido de hidrogênio e alguns tratamentos ácidos (ALHIJAZI et al., 2020). Singh, Singh e Dhawan (2020) utilizaram fibras de juta tecidas tratadas com hidróxido de sódio e relataram um aumento na resistência à tração e flexão dos compósitos resultantes.

Buscando uma abordagem mais sustentável, fibras naturais ainda podem substituir fibras sintéticas mantendo propriedades mecânicas satisfatórias comparáveis a algumas espécies de madeira e possuindo maior resistência ao envelhecimento em ambientes hidrotérmicos (AHMED; ADAMOPOULOS, 2018). Em compósitos híbridos, nos quais diferentes fibras são utilizadas simultaneamente, as fibras naturais também podem ser vantajosas, trazendo características diferentes para os produtos finais. Embora muitas combinações de fibras naturais já tenham sido estudadas (ARULMURUGAN et al., 2020; SIAKENG et al., 2020; SIDDIKA; MANSURA; HASAN, 2013), fibras sintéticas são incomparáveis na resolução de deficiências conhecidas das fibras vegetais, como sazonalidade, propriedades mecânicas limitadas, alta absorção de água e baixa afinidade química com matrizes poliméricas hidrofóbicas (ALMEIDA et al., 2013; YASIR et al., 2021).

Entre as fibras sintéticas, vidro, carbono e aramida se destacam claramente em termos de desempenho e uso (KC et al., 2018; SABA; TAHIR; JAWAID, 2014). A hibridização de fibras naturais e de vidro-E pode alcançar alta resistência mecânica e baixo custo (DA SILVA et al., 2020). Estudos anteriores citaram que teores balanceados de fibras naturais e de vidro podem resultar em compósitos com alto desempenho em termos de impacto em baixa e alta velocidade (PRABHU et al., 2019; YASIR et al., 2021). Em um outro trabalho, Angrizani et al. (2017) prepararam laminados de curauá/vidro usando diferentes sequências de empilhamento e relataram interessantes propriedades dinâmico-mecânicas, dureza Barcol e térmicas, enquanto Fiore et

al.(2018)avaliaram o comportamento mecânico de laminados de linho/vidro usando três sequências de empilhamento. Alguns outros estudos lidaram com as propriedades de fadiga de híbridos de cânhamo/vidro(NG; LIM, 2018)e desempenho de envelhecimento hidrotérmico de híbridos de linho/vidro (CALABRESE et al., 2018), entre outras características. No entanto, existem várias lacunas na literatura em relação às propriedades mecânicas de laminados de fibras naturais/vidro, especialmente os unidirecionais.

ParaMochane et al. (2019), embora a hibridização de compósitos à base de fibras naturais com fibras de carbono possa ser relativamente cara, ela aumenta a condutividade elétrica, condutividade térmica, resistência mecânica e estabilidade térmica, além de diminuir a absorção de umidade. De acordo com Lee et al. (2016), também é possível obter ganhos previsíveis e ajustáveis no modo de frequência natural e na taxa de radiação sonora. A partir da literatura disponível, fica claro que este tipo de hibridização carece de mais estudos.

No caso de laminados híbridos, quando as fibras naturais estão nas camadas externas, elas trazem atributos estéticos interessantes, que podem ser importantes em diversas aplicações, tais como instrumentos musicais. Esses laminados podem ser processados por diferentes técnicas de moldagem líquida (DA SILVA et al., 2020), incluindo a infusão a vácuo, também chamada de VARTM (*Vacuum Assisted Resin Transfer Molding*), especialmente quando não há necessidade de alta produtividade ou um molde rígido de dois lados, que é caro(YENILMEZ; SENAN; MURAT SOZER, 2009).

Enquanto numerosos estudos têm investigado as propriedades mecânicas de laminados híbridos incorporando fibras de vidro, o foco em laminados com furos permanece relativamente limitado. Laminados com furos simulam cenários do mundo real onde são necessários furos ou recortes para aplicações práticas, como fixação ou integração de componentes (ZHENG et al., 2023). A presença de furos criados intencionalmente impacta significativamente a integridade estrutural e as capacidades de suporte de carga dos laminados. O impacto de furos em propriedades dos materiais pode ser extremamente desafiador e difícil de prever, especialmente no que diz respeito a propriedades mecânicas.

Instrumentos musicais têm sido tradicionalmente feitos de madeira. Em instrumentos de corda, por exemplo, a madeira é o principal material da caixa de ressonância, que é responsável por amplificar as vibrações das cordas em energia

sonora. A combinação de propriedades mecânicas e acústicas torna a madeira um material sólido para a produção de instrumentos musicais. Além disso, as propriedades acústicas dos instrumentos musicais são altamente dependentes do seu teor de umidade, e o processo de secagem da madeira deve ser realizado em etapas controladas para obter as características adequadas para a produção dos instrumentos. Essas etapas variam para cada espécie de madeira, o que torna a atividade custosa e, como tal, o preço dos instrumentos musicais aumenta significativamente (AHMED; ADAMOPOULOS, 2018; DAMODARAN; LESSARD; SURESH BABU, 2015a).

Recentemente, os compósitos reforçados por fibras têm sido usados como alternativa à madeira para as placas de som de instrumentos musicais, especialmente em instrumentos de corda. De fato, os compósitos de fibras naturais também têm o potencial de substituir as madeiras em instrumentos musicais. Atualmente, as florestas com madeiras de alta qualidade, como as necessárias para instrumentos, têm sido consumidas por atividades extrativas intensas, com consequente aumento de custo e menor disponibilidade. Em comparação à madeira, os compósitos baseados em fibras naturais têm atributos estéticos similares, além de maior resistência ao envelhecimento em condições hidrotérmicas críticas e propriedades ajustáveis. Nesse contexto, estudos recentes relataram potenciais vantagens relacionadas à funcionalidade, som e custo de instrumentos compósitos processados com fibras naturais (AHMED; ADAMOPOULOS, 2018; DAMODARAN; LESSARD; SURESH BABU, 2015b). Isso é feito como uma tentativa de reduzir o impacto ambiental da colheita de madeira (DAMODARAN; LESSARD; SURESH BABU, 2015a).

O uso de compósitos reforçados com fibras em instrumentos musicais tem sido relatado para violoncelos e outras peças, como arcos, braços, caixas de ressonância e outras, devido às semelhanças no comportamento ortotrópico entre algumas espécies de madeira utilizadas em instrumentos musicais e os compósitos poliméricos (PHILLIPS; LESSARD, 2012). Os compósitos reforçados por fibras são uma classe de materiais que possuem algumas características importantes para a fabricação de instrumentos musicais, como baixa densidade e alto módulo elástico específico. De acordo com Ono et al. (2002), juntamente com a baixa fricção na direção longitudinal, a qualidade do som também é impactada pelo módulo de cisalhamento, que governa essa propriedade em altas frequências. Alta anisotropia é desejável para os compósitos, de modo que uma resposta adequada a diferentes frequências possa ser obtida (ONO, 1996; ONO; MIYAKOSHI; WATANABE, 2002). Damodaran et al. (2015a) relatam a construção de

um violino feito com fibra de carbono. Nesse estudo, as características vibracionais para as placas de som feitas de compósitos foram comparáveis às da madeira de abeto.

A literatura sobre compósitos para instrumentos musicais é abundante, mas existem muito poucos estudos sobre o uso de compósitos de fibras naturais para essa aplicação. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é produzir compósitos de tecido de fibras de juta por moldagem por transferência de resina (RTM) e infusão a vácuo e avaliar o efeito de diferentes tratamentos químicos nas fibras de juta, hibridização com fibras de vidro e de carbono, e furos abertos em propriedades mecânicas e higroscópicas dos compósitos resultantes. Com base em suas propriedades, tais compósitos ainda serão selecionados e usados para a fabricação de violões.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar os efeitos de tratamentos químicos, de hibridização com tecidos de fibras de vidro e de carbono, e de furos abertos, em compósitos laminados baseados em fibras de juta, fabricados por RTM e infusão a vácuo.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar o efeito de tratamentos químicos aplicados às fibras de juta em características mecânicas e higroscópicas de compósitos moldados por RTM;
- Avaliar o efeito de hibridizações com tecidos de fibras de vidro ou de carbono em propriedades mecânicas e higroscópicas de compósitos moldados por infusão a vácuo;
- Avaliar o efeito de furos abertos em propriedades mecânicas de compósitos moldados por infusão a vácuo;
- Verificar a possibilidade de obtenção de violões usando laminados escolhidos no presente estudo.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Reforços fibrosos em compósitos

Compósito é um material deliberadamente obtido a partir dois ou mais diferentes componentes, em que, via de regra, um reforço (chamado de fase dispersa) está imerso em uma matriz (chamada de fase contínua)(Concise Encyclopedia of Composite Materials, 1994). Dentre as matrizes existentes, embora sejam possíveis materiais metálicos e cerâmicos, os polímeros são muito mais aplicados. As principais funções da matriz são manter o posicionamento do reforço, transferir tensões mecânicas para o reforço, além de proteger o reforço de intempéries. Além disso, a interação entre reforço e matriz possui papel importante para uma série de propriedades tecnológicas de compósitos(Concise Encyclopedia of Composite Materials, 1994).

De outro lado, os reforços de compósitos poliméricos são responsáveis por sua identidade visto que condicionam a aplicabilidade nos mais diversos ramos. Afora as dificuldades de processamento inerentes a cada tipo de reforço, é possível equacionar as propriedades passíveis de serem obtidas mediante alterações na geometria, orientação, tipo e quantidade (em volume ou em massa) do reforço. Além das propriedades atuais, também o desempenho a médio e longo prazo avaliado em ensaios de durabilidade pode ser predito em função de características do reforço(YANG et al., 2012).

Além dos compósitos chamados estruturais (como laminados e sanduíches), os reforços são comumente classificados em: partículas e fibras. As fibras possuem a geometria de filamentos finos e, em detrimento da maioria das partículas, e são preferíveis do ponto de vista mecânico, térmico e acústico. Do ponto de vista mecânico, favorecem a resistência e a rigidez do compósito devido ao mecanismo de transferência de tensões pela interface. Quanto aos aspectos térmico e acústico, seu formato tubular lhe confere menores condutividades térmica e acústica, as quais impactam positivamente essas propriedades dos compósitos.

Ainda sobre fibras, suas principais classificações ocorrem em função da geometria e da composição. Geometricamente, ou seja, em relação às dimensões, há nanofibras (diâmetro abaixo de 100 nm) e microfibras (diâmetro entre 10 e 200 µm), e estas podem ser curtas (em geral, comprimento entre 5 e 50 mm) e longas (comprimento acima de 50 mm até contínuas)(CRUZ-GONZÁLEZ et al., 2021; OMRAN et al., 2021). Quanto à composição, as fibras podem ser divididas em

sintéticas orgânicas e inorgânicas, e naturais. Na classe das orgânicas estão as fibras poliméricas sintéticas, como a poliaramida e o polietileno. Dentre as inorgânicas, os destaques são as fibras de carbono, de vidro e de basalto. A Tabela 1 abaixo mostra propriedades de fibras segundo seu tipo.

Tabela 1: Propriedades de algumas fibras sintéticas.

Fibra	Resistência em tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Densidade (g/cm³)
Vidro-E	1800	69 - 73	2,50
Carbono HM	2400	380	1,95
Carbono HS	3400	230	1,75
Kevlar 49	3000	130	1,45

Fonte: Shubhra; Alam; Quaiyyum (2013).

3.1.1 Fibras naturais

Os primeiros relatos do uso de fibras naturais para aplicações de engenharia datam de ≈ 8000 a.C. Atualmente, linho, juta, sisal e cânhamo podem ser consideradas as fibras naturais mais importantes economicamente. A estrutura das fibras naturais é afetada pelas condições climáticas, teor de umidade, idade das plantas e também por sua composição química, que por sua vez está fortemente ligada às suas propriedades (ORNAGHI et al., 2012; ORNAGHI JR; ZATTERA; AMICO, 2014). A composição determina a utilização da fibra, variando de planta para planta e até em diferentes partes da mesma planta. A água é o principal componente de uma planta viva, mas, em base seca, todas as fibras são basicamente formadas por três constituintes principais: celulose, hemicelulose e lignina.

A Tabela 2 apresenta a composição de diferentes fibras. E a Figura 1 mostra uma imagem ilustrativa de uma fibra vegetal com seus principais componentes.

Tabela 2: Conteúdo, em% de peso, dos principais componentes de fibras naturais.

Fibra	Celulose	Hemiceluloses	Lignina
Linho	71-78	18,6-20,6	2,2
Cânhamo	70,2-74,4	17,9-22,4	3,7-5,7
Juta	61-71,5	13,6-20,4	12-13
Sisal	67-78	10-14	8-11

Fonte: Gurunathan; Mohanty; Nayak (2015)

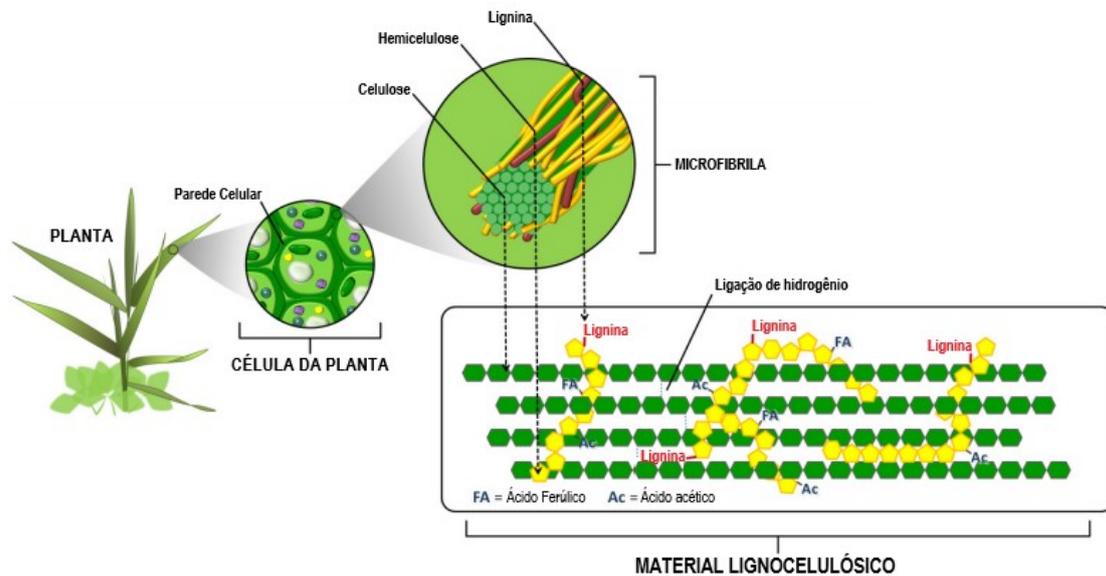


Figura 1: Celulose, hemicelulose e lignina encontradas na parede celular de uma planta.

Fonte: Adaptado de Ribeiro et al. (2016).

As propriedades das fibras naturais e seus compósitos são fortemente influenciadas pelas características das fibras, incluindo composição química, cristalinidade, propriedades físicas, dimensões celulares, ângulo microfibrilar, defeitos, entre outros. A maioria das propriedades varia significativamente, justificado pelas diferenças na estrutura da fibra devido às condições ambientais variáveis durante o crescimento e até mesmo às condições de processamento, que podem levar à degradação mecânica e química de fibras danificadas. Uma alta razão de aspecto (comprimento/largura) também é importante para compósitos, pois fornece uma indicação de resistência, uma propriedade particularmente crucial ao selecionar uma fibra para uma aplicação específica. A Tabela 3 mostra algumas propriedades mecânicas das fibras vegetais.

Em se tratando de compósitos com fibras naturais, é importante levar em conta a baixa estabilidade térmica desses reforços, que resulta na exclusão de alguns processamentos, além de limitar o uso dos compósitos para aplicações em baixas temperaturas. A cerca de 100 °C, certas fibras já emitem substâncias voláteis que podem afetar adversamente as propriedades do compósito. Contudo, ainda substâncias voláteis de baixa massa molar sejam emitidas, existem relatos sobre o processamento de

compósitos com fibras naturais em temperaturas próximas a 200 °C desde que o tempo de permanência nessa condição seja curto (JAWAID; ABDUL KHALIL, 2011).

Tabela 3: Propriedades de algumas fibras vegetais de diferentes origens.

Fibra	Densidade (g/cm³)	Resistência em tração (MPa)	Resistência específica (MPa/(g/cm³))	Módulo de elasticidade (GPa)	Módulo específico (GPa/(g/cm³))	Deformação na ruptura (%)
Banana	1,35	7215	534,5	29	22	2
Bambo	0,6-1,1	575	383	27	18	-
Coco	1,2	140,5	122	6	5,2	27,5
Algodão	1,21	500	323	8	5,25	7
Linho	1,38	700	482,5	60	41	2,3
Cânhamo	1,35	530	360	45	30,5	3
Juta	1,23	325	230	37,5	26,5	2,5
Kapok	-	93,3	300	4	12,9	1,2
Kenaf	1,2	743	246-993	41	18-50	-
Abacaxi	-	1020	708,5	71	49,5	0,8
Rami	1,44	925	590	23	15	3,7
Sisal	1,20	460	317,5	15,5	6-15	-

Em que: nd significa não determinado.

Fonte: Gurunathan; Mohanty; Nayak (2015); Latif et al. (2019b)

Além disso, a absorção de água em fibras naturais é uma característica intrínseca desses materiais devido à sua composição porosa (CÉLINO et al., 2014). Em relação à massa de fibras secas, os ganhos de massa possíveis após a saturação das fibras em água podem variar muito de fibra para fibra, sendo comuns ganhos em massa entre 15 e 300% (MOUDOOD et al., 2019). Essa capacidade de absorver água é influenciada por fatores como a estrutura celular das fibras e sua densidade. Tal característica pode ainda prejudicar propriedades físicas e mecânicas dessas fibras, como a resistência à tração e a rigidez. Portanto, entender e controlar a absorção de água é essencial ao utilizar fibras naturais em aplicações que envolvem exposição a condições úmidas, o que requer considerações cuidadosas de design e, em alguns casos, tratamentos químicos para reduzir a higroscopicidade das fibras naturais e melhorar sua durabilidade em ambientes úmidos.

3.1.2 Fibra de juta

Dentre as fibras naturais com potencial de aplicação, destaca-se a juta (Figura 2), também conhecida como malva. Embora existam algumas espécies como *Corchorus Capillaries* L. e *Corchorus Uhtoruis* L., a planta *Urena lobata* L. é a espécie mais difundida no Brasil. Essa fibra é cultivada em solos úmidos da região norte do Brasil, especialmente na várzea dos rios Amazonas e Solimões, abrangendo cerca de 15 municípios nos estados do Amazonas e Pará. Vale ressaltar que a juta é a única atividade agrícola com potencial econômico efetivamente adaptada às condições edafoclimáticas das várzeas amazônicas, o que se configura em um valor social inestimável. A produção média é de 1800 kg/ha, sendo que, a cada ano, sementes dessa fibra são plantadas em agosto/setembro e são colhidas entre janeiro e julho do ano seguinte.



Figura 2: Fotografias de uma plantação de juta (a) e das fibras sendo manipuladas por um trabalhador da região norte do Brasil (b).

Segundo números do Sindicato das Indústrias de Fiação e Tecelagem do Amazonas (SIFTAM) e do Instituto de Fomento à Produção de Fibras Vegetais da Amazônia (IFIBRAM), a produção anual da juta vem caindo nos últimos 10 anos, de um total 10 mil toneladas para cerca de 4 mil em 2017 (ARAÚJO; PEREIRA, 2017). Ainda assim, segundo essas instituições, em 2018, a cadeia produtiva da juta ainda

engloba cerca de 20 mil trabalhadores, incluindo produtores, intermediários, trabalhos da indústria, entre outros. A Figura 2 mostrada acima também foi obtida em documentos publicados pelos sindicatos supracitados. As propriedades da fibra de juta, apresentadas na Tabela 4, são suficientes para diversas aplicações. Os principais produtos finais obtidos pelos trabalhadores locais incluem fios, tecidos, embalagens (sacos), especialmente para embalar café.

Tabela 4: Propriedades físicas e químicas da fibra de juta.

Propriedade	Valor
Tamanho de lúmen (mm)	13
Comprimento da fibra (mm)	120–900
Teor de celulose (%)	59–70
Teor de hemicelulose (%)	21–24
Teor de lignina (%)	12–14
Densidade (g/cm ³)	1,5
Absorção de umidade (%)	12
Resistência em tração (kN/mm ²)	780
Deformação na ruptura (%)	1,0–1,9
Módulo de Young (GPa)	15–30
Módulo específico (aprox.)	32

Fonte: Kapatel (2019).

3.1.3 Tratamento de fibras naturais

As principais desvantagens relacionadas a uma disseminação mais ampla das fibras naturais em produtos comerciais estão principalmente relacionadas à alta absorção de umidade e à heterogeneidade de sua microestrutura, o que leva a uma variação bastante elevada em suas propriedades. Além disso, fibras hidrofílicas e matrizes hidrofóbicas possuem uma incompatibilidade inerente, que é uma limitação fundamental e dificulta o mecanismo de transferência de tensão da matriz para o reforço (AMIANDAMHEN; MEINCKEN; TYHODA, 2020b).

Além disso, a pectina e as ceras podem cobrir a parede celular da fibra e alguns de seus grupos funcionais reativos, impedindo o umedecimento superficial da fibra com a matriz em processamentos de compósitos por moldagem líquida (TANASĂ et al.,

2020). Uma vez que alguns grupos químicos importantes da parede celular da fibra são inacessíveis, uma fraca ligação adesiva é formada, prejudicando também o acoplamento reforço/matriz por intertravamento mecânico.

O tratamento de fibras é, de fato, o caminho preferencial para a superação desses problemas. Abordagens químicas, físicas e biológicas são utilizadas para melhorar a interface fibra/matriz. Por exemplo, métodos biológicos que utilizam bactérias são capazes de induzir mecanismos enzimáticos na parede celular da fibra, levando ao aumento da adesão interfacial fibra/matriz. E métodos físicos, como calandragem, plasma a frio e Corona, embora não modifiquem os componentes estruturais das fibras, alteram a superfície da fibra, levando a uma melhor interface com a matriz. Mesmo assim, os tratamentos químicos são de longe os mais difundidos e eficientes para tratar fibras naturais.

Diversos agentes têm sido empregados em tratamentos químicos, como álcalis, silanos, anidrido acético e peróxidos. A literatura atribui a esses tratamentos alterações na estrutura cristalina e a remoção de compostos amorfos e de baixo peso molecular, como as hemiceluloses, da superfície das fibras (JAYAMANI et al., 2014; PRABHU et al., 2019; YUE; HAN; WU, 2013). O tratamento alcalino, conhecido como mercerização, é o mais comum. Embora várias soluções alcalinas tenham sido investigadas, o hidróxido de sódio (NaOH) se destaca como a escolha principal devido à sua acessibilidade, facilidade de preparo e eficácia na indução dos efeitos desejados. De acordo com da Silva et al., (2013), o NaOH também pode ser combinado com o borohidreto de sódio (NaBH₄), que atua como agente redutor para o grupo final (aldeído) presente na cadeia de polissacarídeos livres C-1 em pH elevados durante esse tratamento, aumentando a resistência interfacial do compósito.

3.1.4 Tecidos de reforço

As principais formas de comercialização das fibras são bobinas (rovings), i.e. fios de filamentos contínuos, mantas, tecidos e fibras curtas. Os tecidos são produzidos em teares, de modo que as mechas de fibras se entrecruzem em posições perpendiculares, alternadas superiores e inferiores, obedecendo a um determinado padrão. Assim, é possível posicionar estrategicamente as fibras em diferentes direções, resultando no urdume (fios que são posicionados longitudinalmente) e na trama (fios que correm transversalmente ao urdume) (SHAMEY; SAWATWARAKUL, 2014).

Embora os compósitos feitos de tecidos naturais, quando comparados aos compósitos fabricados em fibras de vidro e de carbono, sejam inferiores quanto às principais propriedades de engenharia, têm sido considerados para algumas aplicações tradicionais atribuídas às madeiras, incluindo a fabricação de instrumentos musicais(KHALID et al., 2021).

À fora os não-tecidos (*non-woven fabrics*), conhecidos como mantas, que são camadas de fibras curtas aleatoriamente posicionadas, os tecidos planos são formados por conjuntos de fios, as quais são entrecruzadas entre si. Numa mesma direção, chamada de direção da trama, um conjunto de fibras lateralmente unidas formamfios, que são dotados de comprimentos contínuos ao longo do tecido. Perpendicularmente (na direção do urdume), outros conjuntos de fios são posicionados formando ângulos retos com os fios da trama. Os tecidos podem ser classificados em função da posição de cruzamento entre cada fio de trama com cada fio de urdume uma vez que o fio de trama pode perpassar o fio de urdume por cima ou por baixo e vice-versa. As situações de entrelaçamento mais conhecidas dão origem aos seguintes tecidos: *plain weave*, *twill weave* e *satín weave* (Figura 3). Além disso, é possível que os fios do urdume sejam reduzidos ao nível mínimo necessário para manter a direção dos fios da trama e, com isso, os tecidos produzidos são chamados de unidirecionais.

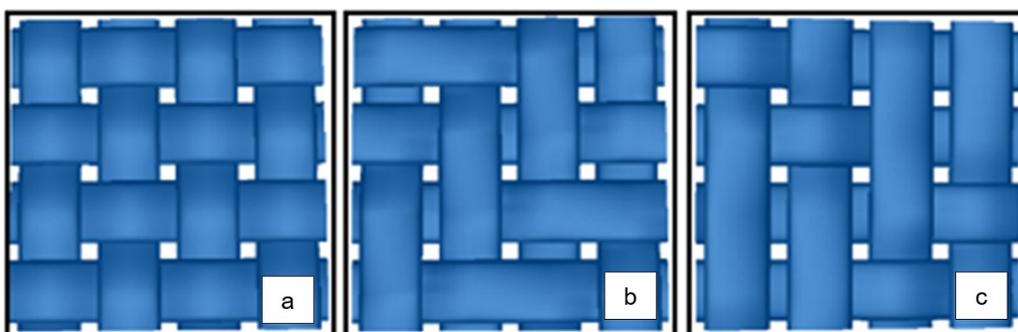


Figura 3: Imagem representativa das principais configurações de tecidos: plano ou *plain weave* (a), sarja ou *twill weave* (b) e cetim ou *satín weave* (c).

Fonte: Adaptado de Rouf; Denton; French (2017).

3.2 Moldagem Líquida de Compósitos

A moldagem líquida de compósitos (*Liquid Composite Molding*) representa uma gama de processamentos que possibilita a fabricação de compósitos de formatos e

composições complexas e de média até alta performance. A característica compartilhada por esses métodos de processamento é a introdução de uma resina polimérica fluida em um molde fechado através da aplicação de um gradiente de pressão. Assim, o reforço é impregnado e, posteriormente, a resina é curada e o compósito pode ser desmoldado.

Algumas vantagens da moldagem líquida sobre outras técnicas incluem: aplicação a uma variada gama de componentes, potencial para incorporação de fibras que são pré-dispostas na orientação necessária de modo a atender as necessidades estruturais de projeto do componente, moldes geralmente de baixo custo que resultam em um menor investimento inicial, sistemas controlados de bombeamento de resina, permitindo um melhor controle da formulação, molde fechado e selado, permitindo ótimo controle de dimensões e bom acabamento superficial, além do controle da emissão de voláteis, que tem importância crescente por questões de segurança e preservação do meio-ambiente.

O método de infusão a vácuo às vezes chamado de VARTM (*Vacuum Assisted Resin Transfer Molding*) é um processo de fabricação de composto de molde fechado, em que apenas um lado do molde é rígido (CORREIA et al., 2005), enquanto o outro lado é fechado por um filme plástico chamado de bolsa de vácuo, o que resulta em uma grande diminuição de custo inicial. Vácuo é aplicado para compactar o material de reforço e o meio de distribuição de resina, além de criar o gradiente de pressão necessário para conduzir a resina através dos poros do reforço. O vácuo aplicado precisa ser controlado a fim de que não ocorram variações na espessura do compósito. Esse processo é usado principalmente para peças em que os níveis de produtividade requeridos não são altos ou quando não é viável a produção com moldes maciços nos dois lados, uma vez que o posicionamento dos materiais e da bolsa de vácuo é considerado um processo laborioso (YENILMEZ; SENAN; MURAT SOZER, 2009).

Durante o processo de infusão a vácuo, o vácuo é aplicado para comprimir o material de reforço e o meio de distribuição de resina, criando um gradiente de pressão que conduz a resina através dos poros de reforço. Isso resulta em uma distribuição uniforme da resina, o que melhora a qualidade e as propriedades mecânicas do compósito (ARRABIYEH et al., 2021; HINDERSMANN, 2019).

As desvantagens mais importantes da infusão a vácuo são: (i) variação da espessura da peça devido à pressão de compactação não uniforme; e (ii) capacidade limitada de atingir um alta teor de fibra. Mesmo após a injeção ser concluída, a espessura da peça ainda pode variar devido ao relaxamento da fibra durante o estágio de

descompactação, redistribuição da resina na pré-forma devido ao processo de equilíbrio das pressões internas antes da gelificação da resina ou encolhimento da resina durante a cura (CORREIA et al., 2005; YENILMEZ; SENAN; MURAT SOZER, 2009). Apesar dessas desvantagens, a infusão a vácuo é amplamente utilizada na indústria de compósitos para produzir peças de alta qualidade com uma redução significativa no custo inicial em comparação com outros métodos de moldagem fechada.

O processo RTM é similar, porém o reforço é enclausurado por dois moldes rígidos (CORREIA et al., 2005). De acordo com Isoldi et al., (2012), compósitos de baixo a médio volume de vazios podem ser produzidos com alta versatilidade de formas e propriedades. O processo consiste em duas etapas principais, em que, na primeira, uma resina termorrígida incorporada com o devido agente de cura é injetada na cavidade do molde, permeando o reforço, chamada de pré-forma. Na segunda etapa, a mistura geralmente é submetida a um aquecimento que reticula e endurece a resina ao redor do reforço (GARAY et al., 2011; ORNAGHI et al., 2010).

Existe ainda a moldagem conhecida como RTM-Light ou L-RTM. Segundo Garay; Souza; Amico, (2016), o L-RTM é uma variante do RTM tradicional em que os lados do molde são semi-rígidos e perifericamente travados por meio do vácuo empregado. Se trata de um processo de moldagem eficiente, que combina vácuo e pressão positiva para produzir compósitos empregando uma quantidade menor de consumíveis do que a infusão e menor tempo de injeção do que o RTM tradicional, o que implica em benefícios ambientais e econômicos (DELUCIS et al., 2021).

3.3 Compósitos híbridos natural/sintético

Os compósitos híbridos poliméricos são sistemas em que um material de reforço é incorporado em uma mistura de diferentes matrizes (blendas), ou com dois ou mais materiais de reforço em uma única matriz ou uma combinação destas (JAWAID; ABDUL KHALIL, 2011). Contudo, compósitos híbridos com diferentes fibras incorporadas em uma mesma matriz são claramente mais importantes atualmente.

De acordo com Siakeng et al. (2020), a hibridização de fibras é vantajosa em relação a compósitos convencionais sempre que há interesse em aliar características positivas de diferentes fibras. Nesse sentido, a hibridização de fibras naturais com sintéticas é interessante a fim de conjugar as elevadas propriedades das fibras sintéticas com o baixo custo das fibras naturais. Além disso, uma vez que existe uma grande gama

de fibras naturais, a possibilidade de escolha da fibra pode contornar problemas relacionados a sua sazonalidade. Para Shih et al., (2014), a manufatura de compósitos híbridos biodegradáveis reforçados com fibras naturais e sintéticas pode reduzir a dependência por fibras sintéticas, gerando impactos positivos econômicos e ambientais.

Similarmente ao que acontece em compósitos com uma fibra natural única, em compósitos híbridos se destacam os trabalhos na literatura concernentes ao tratamento químico de fibras naturais (RAMESH; PRASAD; NARAYANA, 2020). Atualmente, compósitos híbridos com fibras naturais e sintéticas são utilizados em produtos, como pisos de carga de veículos, forros do teto, encostos de bancos, coberturas superiores do painel de instrumentos, joelheiras e forros do porta-malas (JAWAID; ABDUL KHALIL, 2011). Segundo Lee; Wang (2006) e Panthapulakkal; Sain (2007), a incorporação de fibras sintéticas, como o vidro resulta em aumento considerável na estabilidade térmica de compósitos com fibras naturais, como comprovado no estudo com compósitos híbridos vidro/bambu e vidro/cânhamo, respectivamente.

3.4 Compósitos laminados com furos

Os compósitos laminados com furos (*open-hole laminates*) são normalmente materiais avançados e amplamente utilizados em aplicações que requerem alta resistência e rigidez (ALMEIDA; BITTRICH; SPICKENHEUER, 2020; SHI; TONG, 2022). Eles simulam cenários reais, onde furos ou recortes são necessários para a fixação de componentes ou outras finalidades práticas. Essa configuração é comum em estruturas aeroespaciais, automotivas e em muitos outros setores industriais.

A presença de furos em compósitos laminados é uma característica crítica que afeta significativamente as suas propriedades mecânicas e comportamento estrutural. Dessa forma, muitos estudos têm se concentrado em avaliar o impacto dos furos na integridade e nas capacidades de carga desses materiais (ALMEIDA; BITTRICH; SPICKENHEUER, 2020; CHUAQUI et al., 2021).

Os furos em laminados podem levar a concentração de tensões nas regiões circundantes, aumentando o risco de falhas por fratura ou delaminação (CAO et al., 2022; LIU et al., 2023). A presença de tensões concentradas pode diminuir a resistência em compressão (HIGUCHI et al., 2021; TAKAMOTO et al., 2021), tração (GALOS, 2020; ZHANG; ZHENG; WU, 2019) e flexão (REINER et al., 2023; SUN et al., 2021) dos compósitos, reduzindo sua capacidade de suportar cargas mecânicas.

Sun et al. (2021) aplicaram testes experimentais integrados e modelagem computacional para investigar os mecanismos de falha de compósitos laminados de polímero reforçado com fibra de carbono (CFRP) com furos. Os mecanismos de falha dos laminados CFRP de *cross-ply* com furos sob carregamento de flexão foram estudados sistematicamente utilizando análises experimentais e computacionais em múltiplas escalas. Os resultados mostraram que a iniciação e propagação da delaminação, a falha das camadas laminadas, bem como as curvas de carga-deslocamento previstas pelas análises computacionais estão em bom acordo com o observado experimentalmente.

Wang; Hang (2022) desenvolveram um modelo em escala múltipla baseado na teoria de falha de micro-mecânica, modificado para considerar estruturas internas complexas, incluindo um padrão de arranjo aleatório de fibras e interface com o método de clusterização. Eles relataram que, para o padrão de distribuição aleatória de fibras, o aumento percentual na resistência à compressão prevista é de 6%, valor muito maior do que o obtido para o padrão de distribuição de diamante das fibras.

Esses estudos oferecem importantes contribuições para o entendimento do comportamento mecânico de laminados compósitos com furos, permitindo o aprimoramento das técnicas de otimização e projeto desses materiais em diversas aplicações. A combinação de abordagens experimentais e modelagem numérica tem se mostrado eficaz na investigação dos mecanismos de falha e no desenvolvimento de modelos precisos, o que fortalece a confiabilidade e a aplicabilidade desses compósitos na indústria.

Os compósitos laminados *open-hole* apresentam desafios significativos em termos de projeto e otimização, uma vez que a presença de furos pode levar a comportamentos não-lineares e falhas inesperadas. Portanto, o desenvolvimento de modelos precisos e aprofundados é essencial para garantir o desempenho adequado desses materiais em aplicações práticas. Para minimizar os efeitos adversos dos furos, técnicas de reforço, como uso de pino e preenchimento de furos, têm sido investigadas. O reforço pode ajudar a redistribuir as tensões e aumentar a resistência das regiões próximas ao furo. Para Almeida; Bittrich; Spickenheuer, (2020), outra estratégia eficaz para aumentar a resistência, visando evitar a quebra de fibras e a delaminação, é orientar as fibras seguindo um caminho pré-definido ao redor do furo. De acordo com esses autores, medições ópticas via DIC (*Digital Image Correlation*) e previsões numéricas evidenciaram que não há concentração de deformação ao redor do furo próximo à falha

final para cupons com caminho de fibra otimizado. O mecanismo de reforço aliviou as concentrações de tensão, redistribuindo uniformemente o estresse ao redor do furo.

3.5 Compósitos em instrumentos musicais

Em instrumentos musicais tradicionais, a qualidade é dependente das propriedades da madeira escolhida e da construção harmônica. A escolha da madeira mais adequada a um determinado instrumento (seja de sopro, corda ou percussão) depende de seu desempenho acústico, além de sua estabilidade dimensional, retidão da grã, dureza, flexibilidade e plasticidade (BUCUR, 2016). A grã, também chamada de desenho ou veio da madeira, é um termo usado no ramo ciência da madeira para referir a direção preferencial das fibras, que pode ser visualizada macroscopicamente. A maior parte das madeiras utilizadas para esse propósito são folhosas cultivadas em climas tropicais (SPROSSMANN; ZAUER; WAGENFÜHR, 2017). Além disso, as propriedades acústicas da madeira são intensamente dependentes do seu teor de umidade de equilíbrio e, para a obtenção de peças de madeira adequadas à produção de instrumentos musicais, o processo de secagem deve ser realizado em condições controladas que variam de acordo com a espécie de madeira (ONO; ISOMURA, 2004). Por esses e outros motivos, os instrumentos musicais têm sido encontrados a preços cada vez maiores (AHMED; ADAMOPOULOS, 2018).

Por exemplo, a madeira de pau-ferro (*Libidibia ferrea* Mart. ex Tul.) é usada em escalas localizadas no braço de guitarras por sua alta densidade, grã imperceptível, contraste elegante e, mais importante, superioridade como transmissor de som. O jacarandá (*Jacaranda mimosifolia* D. Don.) e o mogno (*Swietenia macrophylla* King.) brasileiros são usados em violinos, fundo e costelas de violões por sua alta densidade e baixo amortecimento. Já a madeira de pau-brasil (*Caesalpinia echinata* Lam.) é utilizada em arcos de instrumentos de corda por sua excelente flexibilidade e resistência. Madeiras como o ébano africano (*Diospyros crassiflora* Hiern.), jacarandá (*Jacaranda mimosifolia* D. Don.), pau-preto (*Dalbergia melanoxylon* Guill.) e granadilho (*Brya ebenus* L.) são também usadas em flauta, clarinetes, flautins e oboés por sua alta estabilidade dimensional, alta densidade e estrutura anatômica refinada (BUCUR, 2006, 2016). Entretanto, muitas dessas folhosas foram exploradas sem o devido planejamento e, atualmente, não podem ser comercializadas por restrições

impostas pela Convenção sobre o Comércio Internacional das Espécies da Fauna e da Flora Silvestres Ameaçadas de Extinção (CITES).

Embora existam instrumentos feitos em compósitos desde a década de 70, os estudos científicos mais robustos quanto à substituição de madeira por compósitos datam do início da década de 2000. Isso pois, antes de se tornar um nicho de pesquisas científicas, a fabricação de instrumentos musicais sempre foi considerada uma arte (SHARMA; SHUKLA; RAO, 2011). Ono; Miyakoshi; Watanabe, (2002) produziram espumas de poliuretano reforçadas com fibra de carbono unidirecional e compararam à madeira de abeto Sitka (*Picea sitchensis*). Os compósitos foram inferiores à madeira sólida em relação ao módulo transversal, o qual foi condicionado pela densidade da espuma. Os mesmos autores publicaram depois um artigo sobre laminados de espumas compósito, utilizando a anisotropia das placas para garantir propriedades semelhantes em todas as direções (ONO; ISOMURA, 2004).

Atualmente, instrumentos em compósitos são comumente encontrados no mercado, desde violoncelos a bandolins (PHILLIPS; LESSARD, 2012). Outros exemplos são arcos, braços, tampos e palhetas de instrumentos de corda (PHILLIPS; LESSARD, 2012). De acordo com Phillips; Lessard, (2012), o uso de compósitos é estratégico como placas usadas para tampos de instrumentos de cordas devido à semelhança que pode ser obtida em comportamento ortotrópico com a madeira sólida natural. Atualmente, é consenso que os materiais mais adequados à fabricação de violinos e guitarras devem possuir baixa densidade, elevado módulo de elasticidade específico e baixa fricção interna na direção longitudinal (DAMODARAN et al., 2015; ONO, 1996). Para Ono; Miyakoshi; Watanabe, (2002), além da direção longitudinal, a qualidade do som é significativamente impactada pelo módulo de cisalhamento, que governa essa característica em altas frequências. Conforme recomendações de Phillips; Lessard (2012), o design de compósitos para a substituição de madeira deve prever a manutenção do peso específico original da madeira a fim de não prejudicar a eficiência de radiação do instrumento. Além disso, é desejável um alto nível de anisotropia para que o compósito possa responder adequadamente em diferentes níveis de frequência (ONO, 1996).

Os compósitos poliméricos incorporados com fibras vegetais têm sido prospectados para a substituição de madeiras folhosas também na área de confecção de instrumentos musicais (Figura 4). Tais compósitos conferem padrões estéticos similares

à madeira, além de possuir maior resistência ao envelhecimento em situações hidrotérmicas críticas e propriedades ajustáveis (AHMED; ADAMOPOULOS, 2018).

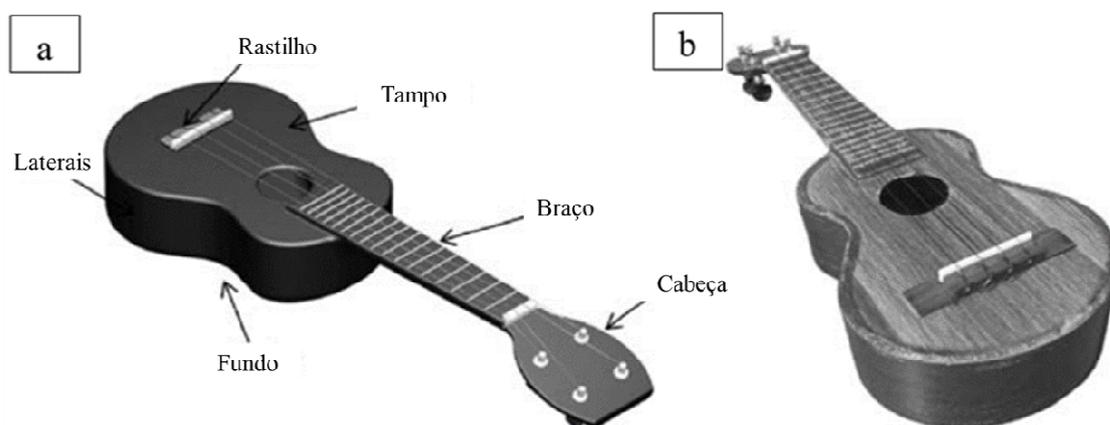


Figura 4: Modelo computadorizado (a) e fotografia (b) de um protótipo de ukelele com tampos em compósito de matriz epóxi com fibras de linho.

Fonte: Adaptado de Phillips; Lessard (2012).

De acordo com Phillips; Lessard (2012), as fibras naturais provenientes dos caules das plantas (*bast fibers*) são preferíveis devido ao seu comportamento mais similar ao da madeira sólida. Esses autores reforçaram uma matriz de epóxi com fibras de linho e utilizaram essas placas processadas por laminação manual como faces de painéis sanduíches cujo núcleo foi composto de madeira de balsa. Os compósitos apresentaram níveis de rigidez similar e resistência consideravelmente menor que os feitos em fibras de vidroporém com propriedades mecânicas e dinâmico-mecânicas superiores às da madeira de abeto Sitka (*Picea sitchensis*).

A tecnologia dos materiais compósitos está em evolução constante, e novos protótipos vêm surgindo para suprir as necessidades. A Figura 5 apresenta um projeto na área de instrumentos musicais a partir de materiais de alto desempenho do laboratório de estruturas e compósitos da Universidade McGill, Canadá. Luthiers, que são os profissionais da construção de instrumentos de cordas, envolvidos no projeto relataram que o som do instrumento é vívido. E as características vibracionais obtidas por técnicas numéricas e análise modal para tampos frontais de laminados de CFRP e madeira de abeto foram comparáveis (DAMODARAN et al., 2015).

Em uma harpa fabricada por um luthier australiano (Figura 6a), placas de cedro vermelho foram coladas a lâminas de CFRP e as partes curvas foram moldadas em

CRPF e laminados de pinus marítimo. Os suportes das cordas foram confeccionados em alumínio e, nas saídas de som, pequenas peças foram confeccionadas com compósitos com cristais monoclinicos de mica. O som emitido pela harpa foi relatado ser limpo e alto em todas as cordas (BUCUR, 2016).

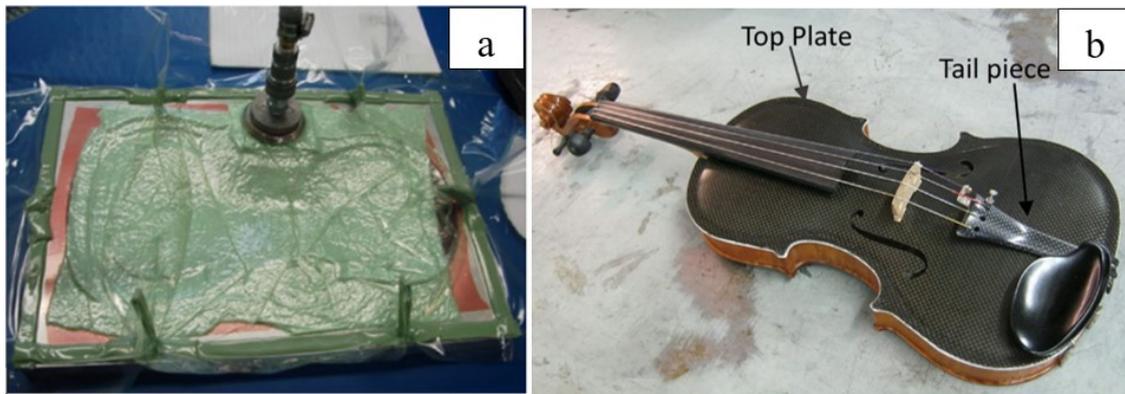


Figura 5: Violino com tampo frontal em compósito de tecido de fibras de carbono: fotografias do processamento (a) e do produto acabado (b).

Fonte: Adaptado de Damodaran et al. (2015).

O piano de cauda mostrado na Figura 6b possui uma caixa de ressonância em laminado de CFRP de 2 mm de espessura, o que resultou em uma redução de 400% no peso do instrumento. Também, a ponte superior (*Agraffe*) e as hastes tubulares com diâmetro de 4,5-6,3 mm, posicionadas na extremidade do martelo, foram fabricadas em CFRP. Devido às novas hastes, reportou-se uma maior eficiência da transmissão de energia acústica entre os componentes do instrumento (BUCUR, 2016).

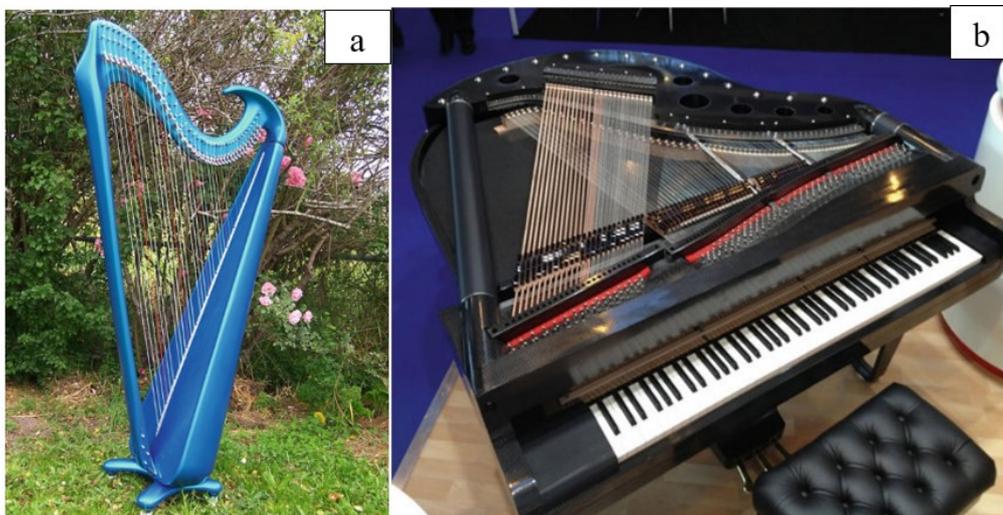


Figura 6: Harpa (a) e piano (b) parcialmente confeccionados com compósitos.

Fonte: Adaptado de Bucur (2016).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Fibras de juta e tratamentos químicos

Fios e tecidos de juta foram adquiridos da empresa Castanhal Companhia têxtil, que possui uma sede no interior do estado do Pará, além de filiais em São Paulo/SP e Manacapuru/AM. Essa empresa atua no ramo das fibras de juta desde 1966 e, atualmente, fornece comercialmente diversos produtos, desde fios, até cordas, tecidos e sacos. Os feixes possuem diâmetro próximo de 0,3 mm e os tecidos são unidirecionais. Além disso, os feixes de fibras, na verdade, foram enviados à empresa PBS têxtil localizada em Nova Odessa/SP, a qual fabricou os tecidos unidirecionais de juta exclusivamente para a presente pesquisa. Conforme o fornecedor, os fios de juta são majoritariamente (85%) compostos de celulose e possuem uma resistência em tração de 90 kPa. Já os tecidos possuem uma gramatura de 239 g/m². Os teores de lignina insolúvel em ácido, lignina solúvel em ácido, extrativos solúveis em etanol/tolueno, cinzas e holocelulose (o restante para totalizar 100%) foram de 9,10%±0,68%, 1,91%±0,42%, 2,75%±0,13%, 0,296%±0,05% e 86,01%±1,05%, respectivamente. Para a obtenção desses valores, os métodos descritos em Delucis et al. (2018) foram utilizados também no presente estudo.

Os tecidos foram submetidos a três diferentes tratamentos químicos, utilizando soluções aquosas previamente preparadas de 99% de hidróxido de sódio (NaOH), 30% de peróxido de hidrogênio (H₂O₂) e 99% de ácido paracético (C₂H₄O₃). Em todos os casos, as soluções de tratamento aquosas tiveram concentrações fixas de 5% de resina. Os tecidos foram tratados por imersão por 10 min à temperatura ambiente (20-25 °C), seguida de agitação mecânica por 2 min e posteriormente lavados com água destilada até alcançarem pH neutro e secos em estufa com circulação forçada de ar a 50 °C por 2 h. A quantidade de solução usada no banho de imersão não foi contabilizada. Essa etapa serviu para a eliminação de impurezas oriundas do manuseio dos tecidos e preparação para os tratamentos.

4.2 Resina poliéster isoftálica insaturada

A resina de poliéster isoftálica insaturada foi escolhida devido ao seu bom acabamento superficial, boas propriedades mecânicas e baixo custo. O iniciador

utilizado foi o Butanox 50 na proporção de 1,5%. Entretanto, essa resina não apresentou um tempo de gel adequado ao molhamento e cura dos compósitos bicomponentes moldados por infusão a vácuo com fibras de vidro (G₅) e de carbono (C₅), por isso, esses compósitos foram moldados com uma resina poliéster aditivada com 3% de estireno. Os níveis aproximados de tempo de gel da resina poliéster foram de 12 min sem estireno e 20 min com estireno.

Para caracterizar as resinas, corpos de prova do tipo gravatinha (tipo IV) foram moldados por vazamento (*casting*) usando moldes de silicone, sendo que a desmoldagem ocorreu após 24 h de repouso da resina sobre o molde. Uma pós-cura a 60 °C por 12 h foi realizada, seguindo as recomendações do fabricante da resina. A massa específica da resina foi determinada de acordo com o procedimento descrito na norma ASTM D792, usando água destilada (massa específica de 1000 kg/m³). A resina curada foi ensaiada em tração em uma máquina universal de ensaios mecânicos modelo 3382 da marca Instron dotada de extensômetro e uma célula de carga de 5 kN. Foi utilizada a velocidade de 2 mm.min⁻¹, conforme a ASTM D638.

4.3 Moldagem dos compósitos por RTM

Para definir o número de camadas a ser usadas, foi feita a compressão de 8, 7, 6 e 5 camadas de tecido seco com 0,1 MPa e 5 foi o número máximo de camadas, tal que a espessura do conjunto de tecidos não ultrapassasse 2,5 mm, que é a espessura da cavidade do molde utilizado para a moldagem dos compósitos por transferência de resina (RTM).

Quanto ao processo de moldagem por RTM, foi utilizado um molde de aço de dimensões (300× 300)mm. O tampo superior do molde foi confeccionado em vidro temperado com espessura de 10 mm. Esse molde foi internamente revestido com desmoldante semi-permanente (marca Chem-Trend) e acoplado a um compressor de ar, que, em sua outra extremidade, foi acoplado a um vaso de pressão. Os tecidos foram cortados, secos (a 50 °C por 2 h), pesados e posicionados no interior do molde de acordo com a sequência de empilhamento desejada em cada laminado. A pressão de fechamento foi ajustada pelo nível de torque imposto aos parafusos de vedação do molde, sendo de aproximadamente 10 N·m. Essa pressão de fechamento do molde originou uma fração volumétrica de (V_f) de aproximadamente 24-27%.

A resina, manualmente misturada ao catalisador em temperatura ambiente por 3 min, foi então colocada no interior do vaso de pressão e forçada a permear internamente o molde pela diferença de pressão de 140 kPa aplicada pelo compressor de ar. O duto de entrada da resina foi posicionado no centro do molde, e a saída ocorreu a partir de quatro outlets posicionados nos cantos. O preenchimento do molde em cada moldagem teve uma duração aproximada de 40 min. Os compósitos foram curados à temperatura ambiente por 24 h e pós-curados a 60 °C por 4 h utilizando a estufa supramencionada.

4.4 Moldagem dos compósitos híbridos por infusão a vácuo

O processamento por infusão a vácuo foi escolhido para ser utilizado na continuidade do estudo devido aos níveis de V_f e teor de vazios que pode proporcionar aos compósitos, mais adequados do que os obtidos pelo RTM disponível. O preparo da resina, do catalisador e dos tecidos de juta seguiram os procedimentos já descritos para as moldagens por RTM. Tecidos unidirecionais de fibra de vidro E (VEW130) e de carbono com gramaturas de 450 g/m² e 368 g/m² foram usados para produzir laminados, também de 5 camadas, que apresentaram espessuras finais de 1,9 e 2,5 mm, respectivamente.

Para a moldagem, uma superfície metálica polida foi previamente preparada com 3 demãos de cera de carnaúba, sendo que cada demão demandou um tempo de repouso de 10 min para secagem. Após, mangueiras de silicone foram posicionadas para atuar como entrada e saída de resina. Espirodutos plásticos foram cortados com as dimensões da região de injeção (300 mm × 300 mm) para garantir uma frente de fluxo homogênea. Todos esses consumíveis do processamento foram fixados com o auxílio de fita selante *tacky-tape*, a qual também foi utilizada para limitar o fluxo da resina à região em que os tecidos seriam posicionados. Após o empilhamento dos tecidos, foram posicionadas camadas subsequentes de *peel ply*, malha de fluxo (nos primeiros 50 mm da região de injeção da resina) e a bolsa de vácuo. Após a montagem de todo o sistema, foi aplicado um vácuo de -100 kN/m² a fim de verificar possíveis vazamentos do sistema e, sempre que algum vazamento foi detectado, a fita *tacky-tape* foi utilizada para os devidos reparos.

No procedimento, a mangueira de entrada foi conectada a um Becker de 2 L no qual a resina polimérica foi depositada e a mangueira de saída foi conectada a um vaso de pressão, o qual também estava conectado, em sua outra extremidade, a um

compressor de ar. Em seguida, os dutos de entrada e saída foram abertos e um vácuo de -100 kN/m^2 foi acionado para forçar a resina a permear entre os tecidos e posteriormente seu excesso ser recolhido no vaso de pressão.

Após o completo molhamento dos tecidos, o orifício de entrada foi interrompido. O vácuo permaneceu aplicado por mais 18 h para maximizar a eliminação do ar confinado entre os tecidos e evitar alterações na espessura dos laminados atribuídas ao relaxamento das fibras durante a fase de descompactação, garantindo a redistribuição de resina devido à pressão interna remanescente antes do início de sua gelificação.

Para minimizar o descarte de consumíveis e o impacto ambiental associado, alguns desses materiais foram reaproveitados, tais como mangueiras, espirodutos, além de conexões e válvulas. Após seu desligamento, a bomba de vácuo foi desconectada do sistema para evitar o deslocamento do óleo da bomba para o vaso de pressão devido à diferença de pressão remanescente. Os compósitos foram deixados curar à temperatura ambiente por 24 h e pós-curados a $60 \text{ }^\circ\text{C}$ por 4 h utilizando a estufa mencionada.

Foram produzidos compósitos unidirecionais bicomponentes com tecidos de juta, vidro ou carbono. Também foram definidas diferentes sequências de empilhamento para a moldagem de laminados híbridos juta/vidro ou juta/carbono (Figura 13). Em todos os casos, os tecidos de juta foram posicionados nas faces dos laminados a fim de garantir os atributos estéticos associados a essas fibras naturais que são de interesse para instrumentos musicais. Dessa forma, foram produzidos os laminados híbridos: J_2GJ_2 , $JGJGJ$, JG_3J , J_2CJ_2 , $JCJ CJ$ e JC_3J , em que J, G e C representam tecidos de juta, vidro e carbono, respectivamente. A fim de obter corpos-de-prova nas dimensões requeridas por cada ensaio de caracterização, foi utilizada uma fresadora CNC Router marca Lexno, modelo SPL 2015 e fresa com diâmetro de 3 mm modelo JC870 da marca SECO.

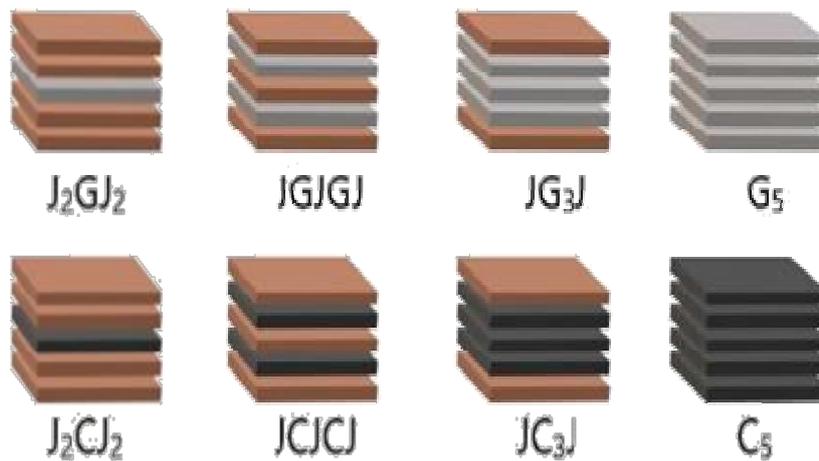


Figura 7: Ilustração dos laminados bi-componente e tri-componente (híbridos) produzidos por infusão a vácuo.

Algumas sequências de empilhamento de laminados híbridos com fibras de vidro (*c.a.* JG₃J e JGJGJ) foram furadas (Figura 8) a fim de verificar as perdas decorrentes dessa intervenção. Além disso, os compósitos bi-componentes J₅ e G₅ também foram furados para fins de comparação. De acordo com a norma ASTM D5766, um furo com diâmetro de 6,5 mm foi perfurado utilizando uma furadeira de bancada FORTGPRO-FG009. Esta norma estabelece procedimentos específicos para medir a capacidade de um laminado compósito resistir a forças de tração aplicadas em áreas onde orifícios foram previamente usinados ou perfurados.

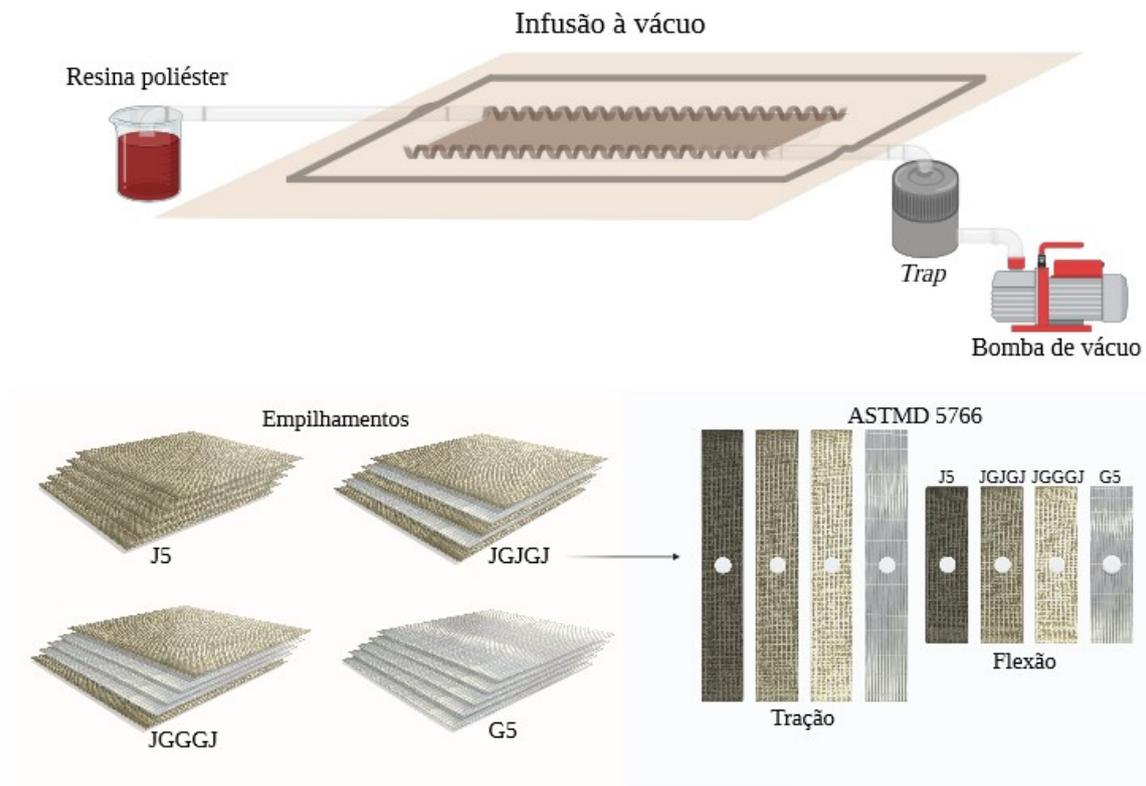


Figura 8: Ilustração dos laminados bi-componente e tri-componente (híbridos) furados produzidos por infusão a vácuo.

4.5 Caracterização dos compósitos

A fração mássica de fibras (W_f) foi definida como a razão entre a massa de fibras e a massa final do compósito. O volume de fibras (V_f) foi determinado de acordo com a norma ASTM D3171. A densidade teórica (ρ_T) dos compósitos foi determinada com base nas massas adicionadas de fibras e resina e o volume da cavidade do molde. A densidade aparente (ρ_A) foi posteriormente medida utilizando paquímetro digital e balança analítica.

A homogeneidade dos laminados moldados por RTM e infusão a vácuo foi avaliada utilizando a técnica não-destrutiva conhecida como avaliação por ultrassom C-Scan afim de detectar defeitos oriundos do processo de fabricação. Esse sistema se baseia no princípio da reflexão ultrassônica em uma interface de impedância incompatível (PATIL; MALLIKARJUNA REDDY, 2020). Para tal, a superfície dos compósitos recém moldados com $300\text{mm} \times 300\text{mm}$ foi levemente umedecida utilizando água com detergente a fim potencializar a detecção do sinal ultrassonor, já que o equipamento utilizado (modelo Raptor, marca NDT Systems) funciona no modo

pulso/eco (pulse/echo) do tipo pulso bi-polar, em que o mesmo transdutor que emite a onda ultrassônica que se propaga pelo compósito realiza a detecção posterior do sinal. O equipamento utilizado é dotado de um transdutor de 0,5'' de diâmetro ajustado para uma frequência de 2,25 MHz e ganho de 24-28 dB. As imagens ultrassônicas obtidas foram processadas usando o software RapWin. As leituras foram realizadas em relação ao eixo Y a um índice de scan de 2,61 mm. Os resultados obtidos consistiram de imagens representativas dos compósitos, em que o padrão de cores representa a intensidade do sinal sonoro captado.

O módulo de elasticidade dinâmico (E) foi determinado utilizando o método não-destrutivo de caracterização de excitação por impulso descrito na norma ASTM E-1876. Nessa técnica, a amostra é submetida a um estímulo de natureza mecânica realizado por um excitador e o microfone do equipamento capta a resposta acústica emitida pelo corpo de prova, que não sofre dano algum. Com isso, constantes elásticas são calculadas em função da frequência natural da vibração incidente por meio de transformadas de Fourier (ALMEIDA et al., 2013). Amostras com dimensões de 100 mm × 15 mm × 3 mm foram avaliadas à temperatura ambiente (~ 20-25 °C) com o equipamento Sonelatic ajustado para o modo torcional. Tal técnica não foi aplicada aos compósitos híbridos por indicação do fornecedor do equipamento.

Ensaio de tração foram realizados de acordo com a norma ASTM D3039 em sete amostras por grupo, com dimensões de 170 mm × 25 mm × 3 mm. O ensaio foi realizado a uma velocidade constante de 2 mm.min⁻¹ até a ruptura. As deformações longitudinais e transversais foram obtidas utilizando vídeo extensômetro acoplado a uma máquina universal de ensaios mecânicos modelo Instron 3382 dotada de uma célula de carga de 5 kN e garras pneumáticas.

Ensaio de flexão de três pontos foram realizados em sete amostras por grupo, de acordo com a norma ASTM D7264. As amostras foram cortadas nas dimensões de 127 mm × 12,7 mm e foram ensaiadas a uma velocidade constante de 1 mm/min até atingirem uma deflexão de 5% em relação ao comprimento, mantendo-se uma relação span:espessura de 16:1 e utilizando-se a mesma máquina universal de ensaios mecânicos.

Ensaio de resistência *short beam*, anteriormente conhecido por cisalhamento interlaminar ou flexão de três pontos em viga curta, foram conduzidos pelo método descrito na norma ASTM D2344. Para tal, seis amostras por grupo com dimensões de

18 mm × 6 mm × 3 mm foram ensaiadas até a ruptura a uma velocidade de 1 mm/mim, com a mesma máquina universal de ensaios.

A microscopia eletrônica de varredura foi realizada para obter informações detalhadas sobre a estrutura e a superfície desses materiais. Para tal, foi usado um equipamento Zeiss EVO MA10 ajustado com uma tensão de aceleração de 10 kV.

Os dados numéricos obtidos foram separados em grupos com base nos fatores em estudo e testados quanto à normalidade e homogeneidade de variâncias, utilizando os testes de Shapiro-Wilk e Levene, respectivamente. Para comparar os grupos estudados, análises de variância simples (*One-Way* ANOVA) foram realizadas, seguidas de testes de médias LSD de Fischer, mantendo-se um nível de significância de 5% em todos os casos.

4.6 Fabricação de violões em compósitos

Primeiramente, é importante ressaltar que a fabricação de violões é uma arte complexa que requer uma combinação de habilidades técnicas e conhecimentos teóricos. Assim, experiência profissional na fabricação de violões é fundamental para o sucesso dessa atividade. Um fabricante experiente tem um conhecimento profundo sobre a seleção e o processamento de materiais para as diferentes partes do violão. Além disso, um fabricante experiente sabe como lidar com problemas comuns de fabricação, como garantir a estabilidade do braço do violão, o posicionamento correto do cavalete e a obtenção de uma boa ressonância sonora do instrumento. Por fim, a experiência também é importante na criação de uma relação de confiança entre o fabricante e o músico. Um fabricante experiente e bem-conceituado é mais propenso a criar violões de alta qualidade que sejam valorizados e respeitados por músicos profissionais e amadores.

Para os quatro violões clássicos construídos com o advento do presente estudo, os conhecimentos referentes aos laminados híbridos e as técnicas de processamento dos laminados foram levados em consideração de uma forma subjetiva, baseada na experiência do fabricante dos violões, tal como é praxe neste tipo de nicho. Diferentes seqüências de empilhamento e processamentos, portanto, foram implementados nas diferentes partes do violão. De forma resumida, o violão A teve uma caixa de ressonância em laminado JGG produzido por infusão a vácuo, enquanto o seu tampo foi manufaturado por compressão a quente usando o laminado JGJGJ. Já o violão B foi

fabricado usando uma caixa de ressonância produzida por laminação manual usando a sequência de empilhamento JGJGJ e o tampo harmônico foi produzido por infusão a vácuo usando o laminado JGJGJ. Por fim, ambas as caixas de ressonância e tampos harmônicos dos violões C e D foram fabricados por infusão a vácuo e compressão a quente, respectivamente. Ambos esses violões tiveram caixas em laminado GJGJG. Já o tampo do violão C foi fabricado em laminado GJGJG, enquanto essa parte do violão D foi em laminado J₅. Os parâmetros de processamento aplicados nesses violões, em todos os casos, foram iguais aos já descritos nesta tese em seções anteriores.

A fabricação do violão clássico escolhido começou com a confecção do molde, em mantas de fibras de vidro que reforçaram uma matriz de resina poliéster e endurecedor (*gel coating*) (Figura 9a). Tal molde foi projetado e executado para a forma e dimensões de um violão do tipo Antônio Marques, cuja identificação não era conhecida, incluindo o corpo, o braço, o cutaway e outros detalhes. Esse tipo de violão é o mais usual formato clássico atualmente. Esse violão teve sua escala e cavalete desmontados e seu corpo por revestido com sucessivas camadas de agente desmoldante (cera de carnaúba). Após, camadas sucessivas de gel coating, fibras curtas de vidro e a resina poliéster já mencionada foram usadas em um processo de laminação manual. Esse molde foi usado como uma base para aplicar as camadas de laminado compósito.

Após, começou-se a preparação do laminado compósito. Para tal, os tecidos de fibras de vidro e juta foram cortados em tiras estreitas, largas, curtas e longas, a depender da região do violão escolhida. Então, as sucessivas camadas de laminas foram empilhadas no molde do violão, seguindo a forma do molde, conforme a sequência de empilhamento previamente escolhida. Posteriormente, o molde foi posto em um vácuo para garantir que as camadas ficassem juntas firmemente. Quando o laminado compósito estava seco, o violão foi retirado do molde com cuidado. Algumas partes pequenas sobraram em relação às dimensões finais do violão, então técnicas de corte (tais como fresamento, lixamento e corte) foram aplicadas para arrematar o violão. A maior parte das operações de corte foi realizada em uma serra fita e os acabamentos finais foram realizados por lixamento manual. O acabamento final de um violão fabricado como teste foi realizado mediante a aplicação pintura e verniz, mas o resultado não foi bom, então tal violão foi descartado. Portanto, os quatro violões que seguiram em estudo não foram revestidos. Por fim, as cordas (65-66 cm de comprimento) e outros acessórios necessários foram instalados, o cavalete e a escala, que foram fabricados usando duas camadas de tecido de fibras de carbono.



Figura 9: Fotografias da fabricação dos violões compósitos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Características da resina poliéster

É pertinente lembrar que a resina sem estireno não apresentou um tempo de gel adequado ao molhamento e cura dos compósitos bicomponentes moldados por infusão a vácuo com fibras de vidro (G₅) e de carbono (C₅) e, por isso, esses compósitos foram moldados com uma resina poliéster aditivada com 3% de estireno. A densidade, a resistência à tração e o coeficiente de Poisson dos poliésteres e dos poliésteres/estirenos curados foram considerados estatisticamente semelhantes (Figura 10). No entanto, o módulo de elasticidade do poliéster sem estireno foi maior do que o do outro. Conforme mencionado por Sanchez; Zavaglia; Felisberti, (2000), a presença de estireno em resinas de poliéster insaturadas pode afetar as propriedades mecânicas e térmicas devido a mudanças na densidade de reticulação, o que também depende do teor de estireno e da miscibilidade do estireno na resina de poliéster.

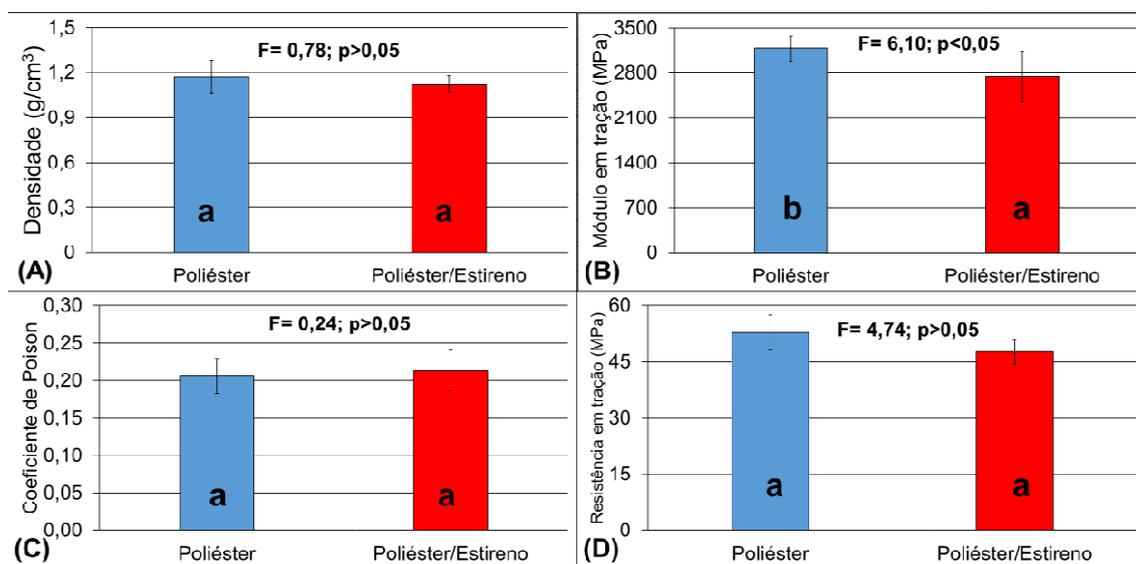


Figura 10: Propriedades das resinas baseadas em poliéster.

5.2 Características dos compósitos moldados por RTM

A Figura 11 mostra os resultados de FTIR para os tecidos de juta puros e quimicamente tratados. A banda em 3340 cm⁻¹ está relacionada à presença de grupos hidroxila livres na estrutura lignocelulósica das fibras (LAVORATTI et al., 2017).

Esses grupos podem estar presentes na celulose e hemiceluloses. O pico em 1770 cm^{-1} está associado à vibração de estiramento da ligação $\text{C}=\text{O}$ em hemiceluloses ou lignina (JO; CHAKRABORTY, 2015). O pico 1450 cm^{-1} está relacionado às vibrações de C-H (ORRABALIS et al., 2019), enquanto o pico em 1030 cm^{-1} está associado à vibração de estiramento de O-C-O presentes na celulose e hemiceluloses, e as vibrações de estiramento de C-O e C-C (CUEBAS et al., 2020).

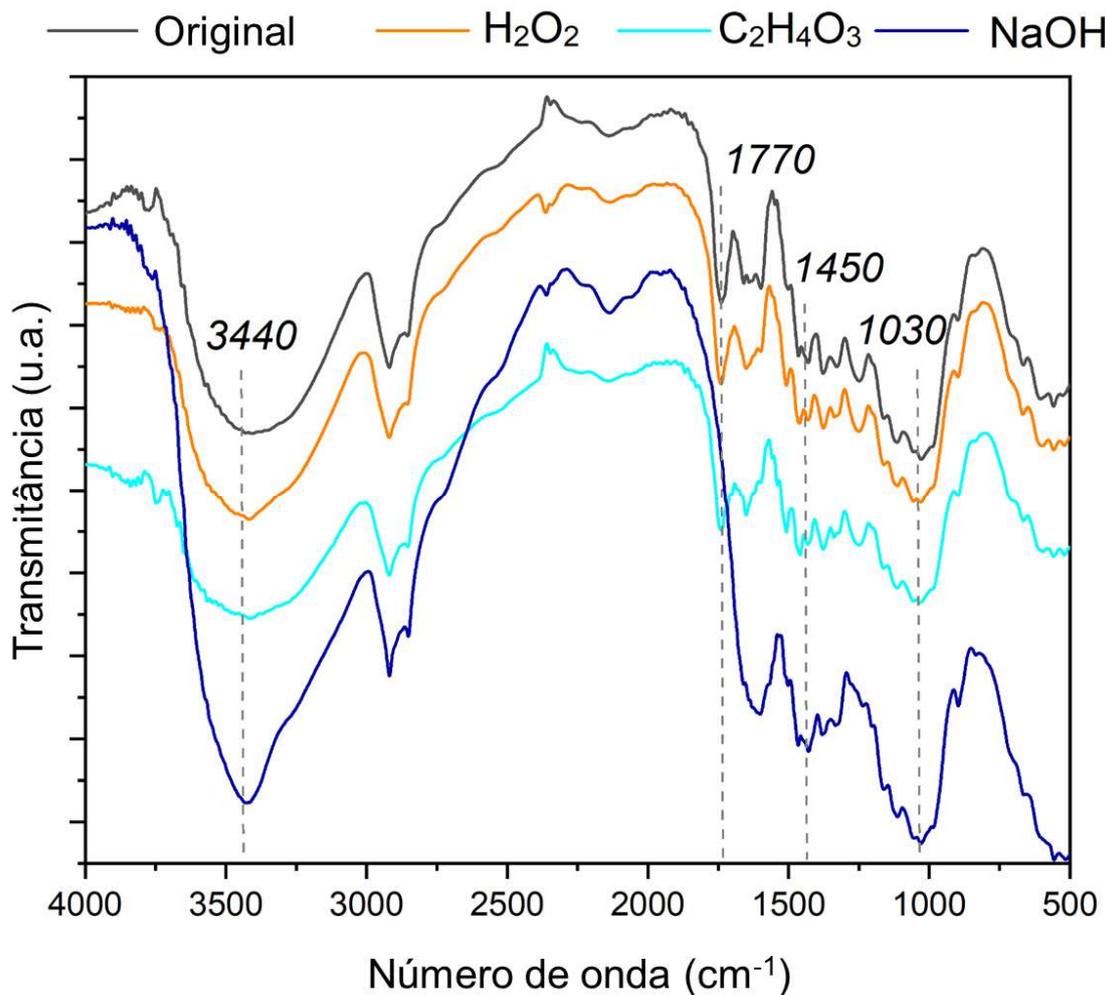


Figura 11: Espectros FTIR das fibras de juta com diferentes tratamentos.

Para a fibra tratada com NaOH , o pico em 1770 cm^{-1} não está presente, o que sugere que parte da lignina foi removida da superfície dessas fibras de juta, atestando a eficiência do tratamento alcalino. Jo e Chakraborty, (2015) relataram o mesmo comportamento ao tratar fibras de juta com solução alcalina suave. Os autores

descobriram ainda que o tratamento alcalino foi capaz de remover estruturas fracamente ligadas pertencentes a hemiceluloses e lignina da superfície de suas fibras de juta.

Micrografias de MEV das fibras de juta são apresentadas na Figura 12. A partir dessas micrografias, é possível notar que ocorreu um ligeiro aumento na rugosidade da superfície após o tratamento, provavelmente devido à remoção de ceras, óleos e sujeiras da superfície das fibras. Além disso, as fibras de juta mostradas na Figura 12a parecem estar agrupadas e não separadas umas das outras como as fibras após os tratamentos químicos empregados neste estudo. Isso poderia contribuir para a melhoria da razão de aspecto das fibras - ou seja, a relação entre o comprimento e o diâmetro. Com uma concentração ótima de um tratamento químico, o diâmetro da fibra é reduzido, resultando em uma melhor adesão devido ao aumento da razão de aspecto (GHOLAMPOUR; OZBAKKALOGLU, 2020). Portanto, embora não tenham ocorrido mudanças significativas na composição química da superfície das fibras de acordo com os resultados do FTIR, as mudanças na morfologia da superfície da fibra podem ser suficientes para produzir compósitos com melhor desempenho mecânico.

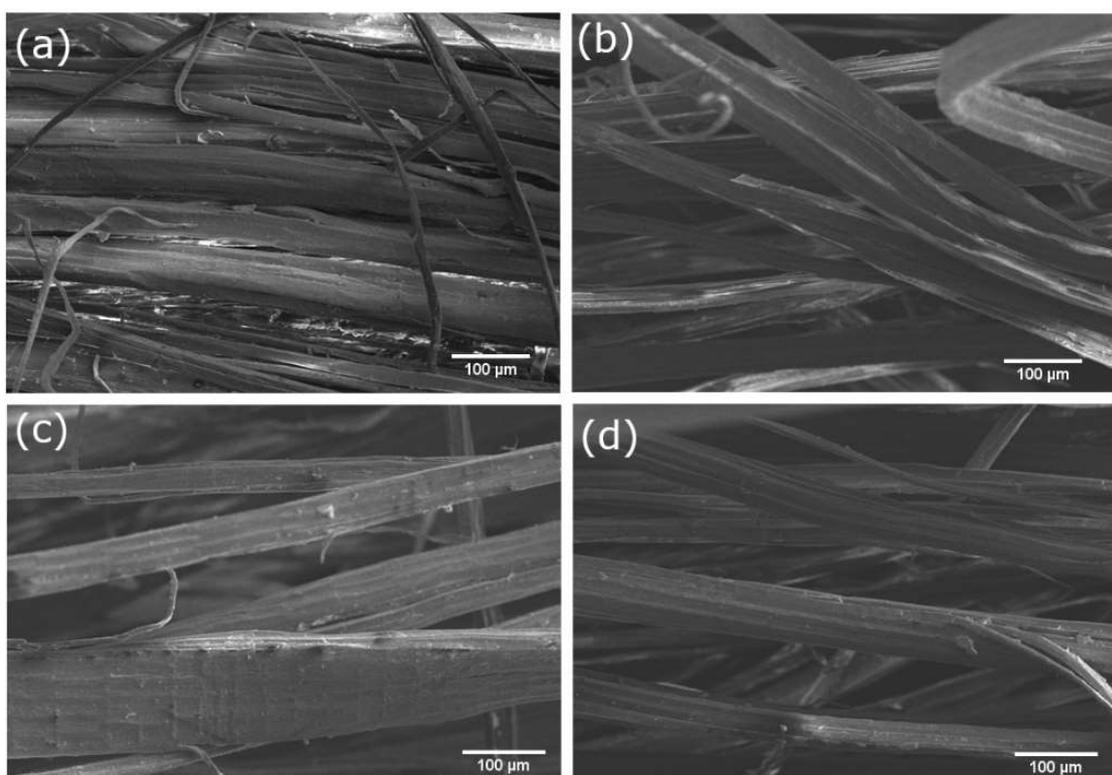


Figura 12: Micrografias de MEV de fibras de juta: a) juta pura; b) tratada com NaOH; c) tratada com peróxido de hidrogênio e d) tratada com ácido peracético (400 ×).

A Figura 13 mostra a densidade medida pelo método de Arquimedes. Não foi observada diferença significativa dentro dos desvios-padrões para os valores encontrados para cada compósito, e todos estavam próximos a $1,2 \text{ g.cm}^{-3}$. Outros compósitos de fibra de juta com resina de poliéster encontrados na literatura também foram observados na faixa de $1,1\text{-}1,2 \text{ g.cm}^{-3}$ de densidade (RIBEIRO et al., 2022).

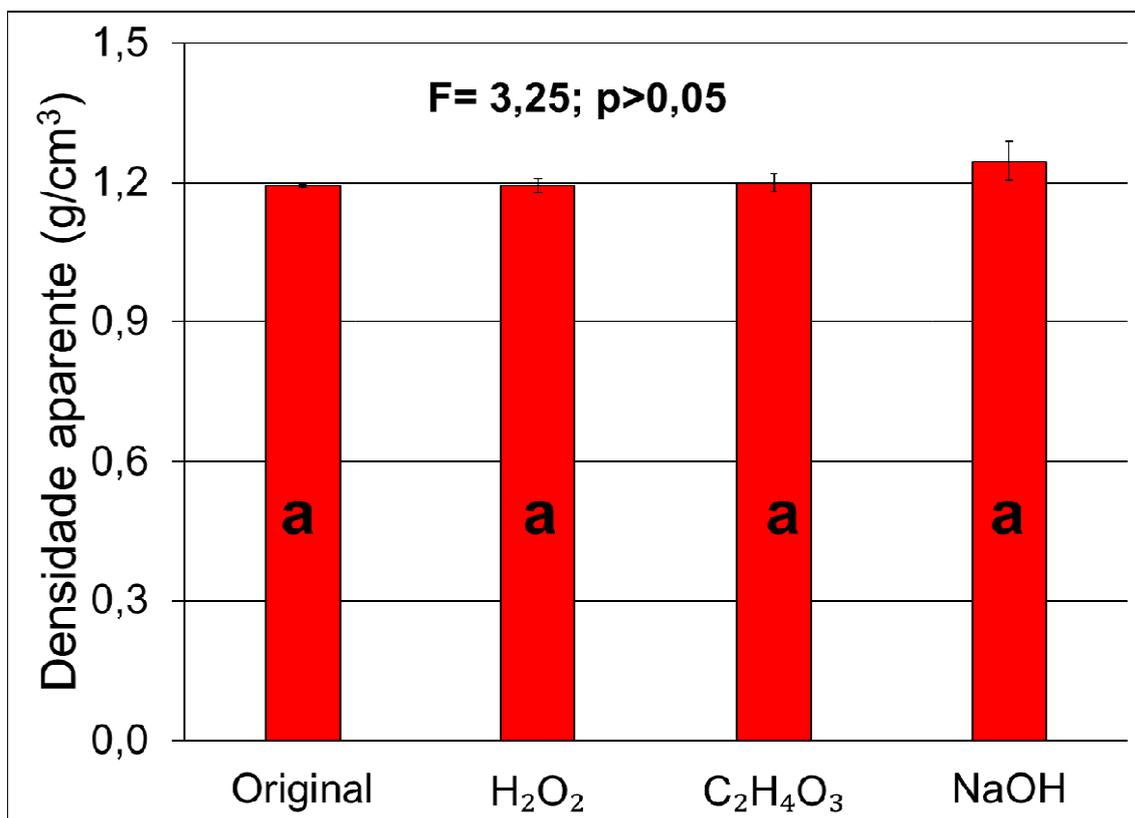


Figura 13: Densidade dos compósitos de juta/poliéster.

A absorção de água dos compósitos também foi medida e é mostrada na Figura 14. Curiosamente, os compósitos de NaOH apresentaram a maior absorção de água na saturação, enquanto nos outros tratamentos - incluindo as fibras originais - a absorção de água foi menor. Como visto nos resultados do FTIR, a intensidade da banda em 3440 cm^{-1}

¹ aumentou significativamente. Essa banda está relacionada a grupos OH- na superfície das fibras devido à celulose exposta ou à água livre. Assim, é possível que com mais grupos OH- expostos na superfície, a absorção de água tenha aumentado. Essa tendência é relatada para fibras naturais em comparação com fibras sintéticas (ROMANZINI et al., 2013). Os autores explicam que os grupos OH- expostos podem levar a uma maior hidrofiliabilidade. Por outro lado, os compósitos tratados com peróxido de hidrogênio e

ácido peracético apresentaram a menor absorção de água. Embora nenhuma mudança tenha sido vista nos espectros de FTIR para ambos os tratamentos, micrografias de MEV mostraram que alguma aspereza foi introduzida na superfície das fibras, o que poderia ter levado a uma maior adesão e, portanto, menor absorção de água.

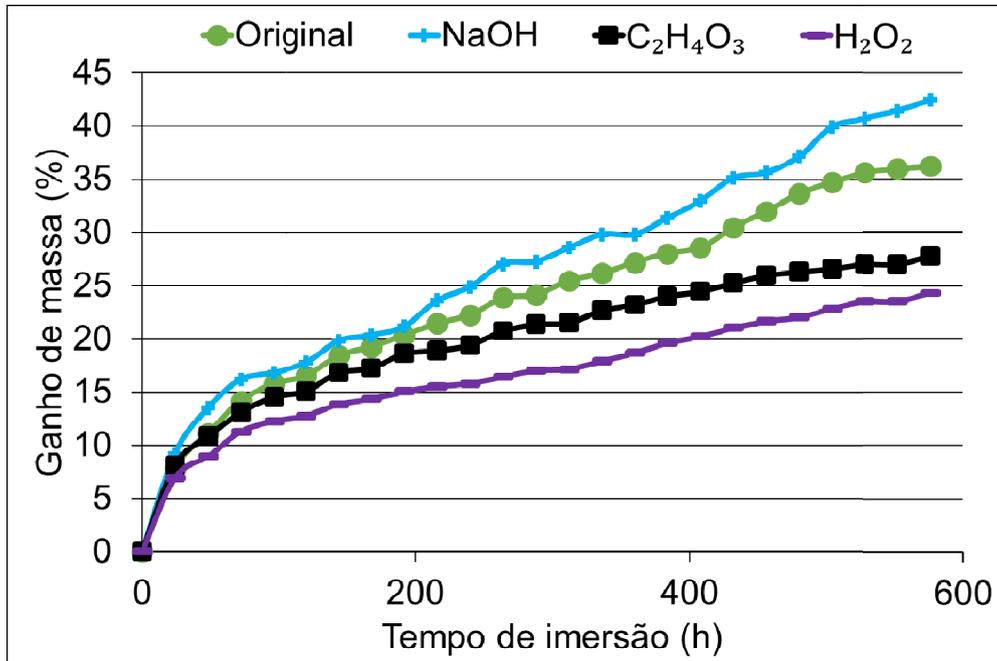


Figura 14: Resultados de absorção de água dos compósitos até a saturação.

A Figura 15 mostra o efeito dos tratamentos nas fibras na resistência à flexão dos compósitos. Todos os tratamentos mostraram ser eficazes em aumentar a resistência à flexão e o módulo dos compósitos, com o peróxido de hidrogênio sendo especialmente eficaz. Isso está de acordo com os resultados de absorção de água encontrados, o que poderia indicar melhor adesão na interface fibra/matriz e, portanto, transferência de tensão aumentada na interface, levando a melhores propriedades de flexão.

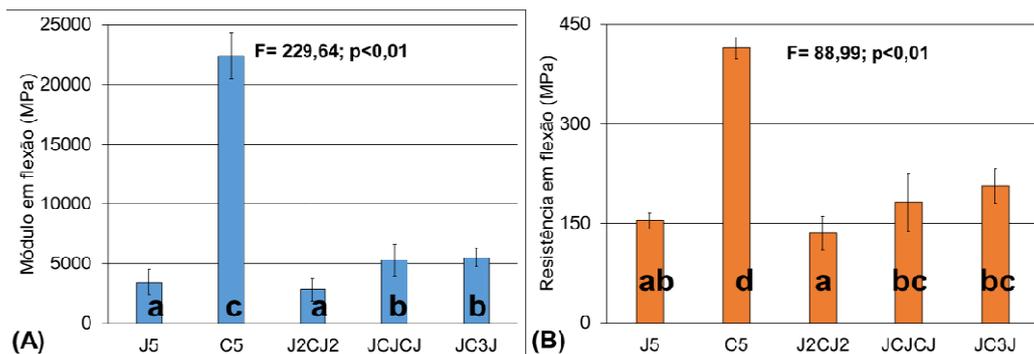


Figura 15: Resistência e módulo em flexão dos compósitos juta/poliéster.

Para as fibras mercerizadas, apesar de algumas mudanças na composição química superficial evidenciadas pelos resultados de FTIR, as mudanças não foram tão pronunciadas quanto quando os outros tratamentos foram utilizados, embora tenha sido encontrada uma melhoria em relação às fibras originais. Outro papel importante dos tratamentos químicos em fibras naturais é remover os componentes mais externos indesejáveis de sua estrutura - ou seja, ceras, óleos e sujeira da superfície das fibras - enquanto aumenta a rugosidade superficial e, assim, promove aderência por meio de intertravamento mecânico. No entanto, diferentes fibras e até diferentes espécies da mesma fibra natural respondem de maneira diferente a uma variedade de tratamentos químicos. Lavoratti et al. (2017) estudaram a mercerização de fibras de buriti e rami usando diferentes concentrações de solução de NaOH e descobriram que, embora a resistência à flexão das fibras de rami aumentasse com a mercerização, uma concentração muito alta poderia degradar a fibra e diminuir as propriedades mecânicas dos compósitos. Enquanto isso, para fibras com um teor mais alto de lignina, como as fibras de buriti, por exemplo, a mercerização pode ser realizada em concentrações mais elevadas e ainda representar apenas uma pequena mudança no desempenho mecânico resultante dos compósitos (LAVORATTI et al., 2017; ORNAGHI JÚNIOR et al., 2016).

Os resultados para a resistência à tração, módulo e razão de Poisson dos compósitos são apresentados na Figura 16. O módulo de tração foi aumentado quando fibras de juta tratadas quimicamente foram usadas. Quando os tratamentos com H₂O₂ e ácido peracético foram usados, foi observado um aumento na rigidez dos compósitos, e a resistência à tração foi comparável aos compósitos tratados com NaOH. Esses resultados podem indicar que a adesão fibra/matriz foi efetiva até a formação de danos mecânicos permanentes nos compósitos. Sever et al. (2012) estudaram as propriedades de compósitos de tecido de juta/poliéster tratados com hidróxido de sódio e observaram um aumento marginal na resistência à tração para as fibras tratadas em comparação com as não tratadas. Os autores relataram um aumento nessa propriedade apenas quando outros tratamentos foram usados em conjunto com o tratamento alcalino e atribuíram esse comportamento à hidrofobicidade adicionada promovida por tratamentos adicionais, aumentando a compatibilidade das fibras com a matriz.

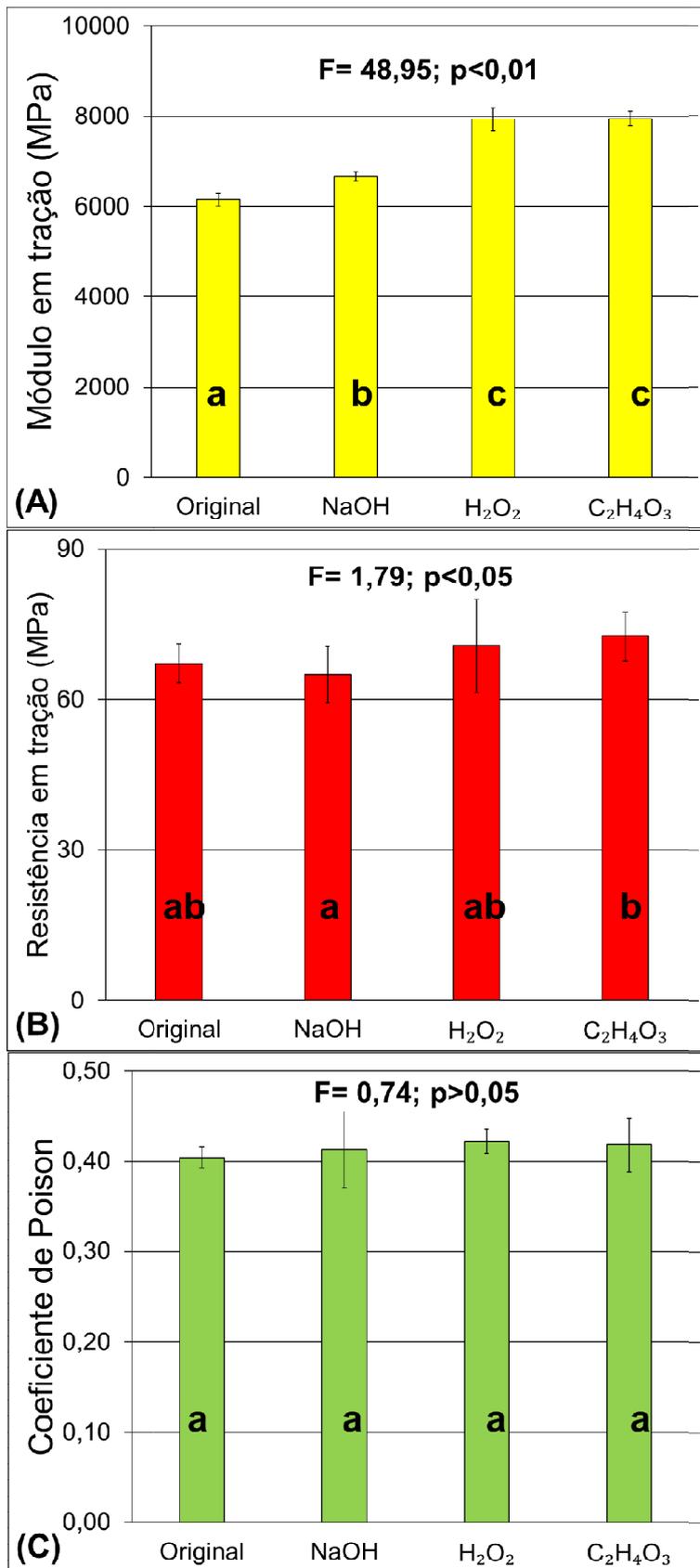


Figura16: Propriedades em tração dos compósitos de juta/poliéster.

A resistência *short beam* é apresentada na Figura 17. Foi possível observar que todos os tratamentos foram igualmente eficazes em aumentar a resistência *short beam* dos compósitos em comparação com os compósitos de fibra de juta pura. Além disso, não houve diferença estatística significativa entre os compósitos de fibra tratada, o que pode indicar que mesmo um pequeno ganho em adesão foi suficiente para aumentar a resistência *short beam* dos compósitos. Da Silva et al., (2013) também relataram um aumento nesta propriedade ao tratar fibras de sisal e curauá. Os autores observaram que a otimização do tratamento, variando o tempo, a temperatura e a concentração das soluções, pode melhorar a superfície das fibras e, conseqüentemente, aprimorar as propriedades dos compósitos resultantes.

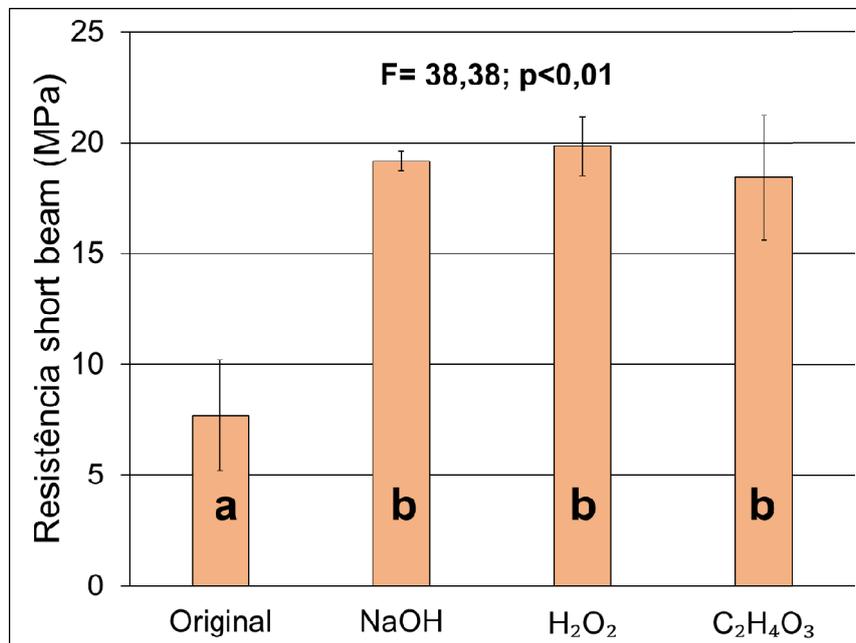


Figura 17: Resistência *short beam* dos compósitos juta/políester.

De maneira geral, os tratamentos químicos resultaram em respostas mecânicas variadas, embora significativas em alguns casos, como o módulo de flexão e a resistência *short beam* em comparação com o compósito de fibra de juta não tratado. Além disso, nenhum tratamento químico promoveu um aumento universal em todas as propriedades avaliadas neste estudo. É importante notar que, embora os tratamentos químicos possam melhorar a adesão na interface fibra/matriz por meio da remoção de impurezas ou aumento da rugosidade superficial das fibras, como alguns autores relatam (SOOD; DWIVEDI, 2018), a efetividade de tais tratamentos depende da concentração da solução, tempo e se um ou mais tratamentos foram usados em combinação uns com os

outros. Além disso, como as fibras naturais têm composições variadas dependendo da colheita ou da espécie, os tratamentos químicos não respondem de forma universalmente igual nos estudos disponíveis na literatura.

Micrografias de MEV dos compósitos são apresentadas na Figura 18. Em todas as micrografias é possível observar alguma aglomeração das fibras, o que pode ter prejudicado algumas propriedades mecânicas neste estudo. As Figuras 18a e 18b, que representam os compósitos de fibras de juta pura e tratadas com NaOH, mostram alguns pontos de delaminação das fibras, que estão relacionados com a baixa adesão na interface (SENTHILKUMAR et al., 2019). Os vestígios de fibras arrancadas são mais evidentes para as fibras não tratadas e isso corrobora os resultados de resistência mecânica encontrados aqui. Os compósitos de fibra de juta não tratados também apresentam alguns pontos de baixa adesão, provavelmente devido à falta de rugosidade na superfície, conforme visto na Figura 18a. As Figuras 18c e 18d, que mostram os compósitos com fibras de juta tratadas com peróxido de hidrogênio e ácido peracético, apresentam menos pontos de puxamento de fibra e alguns lugares onde ocorreu a ruptura da fibra, o que é um sinal de boa adesão (COSTA et al., 2019) e, portanto, um desempenho mecânico aprimorado.

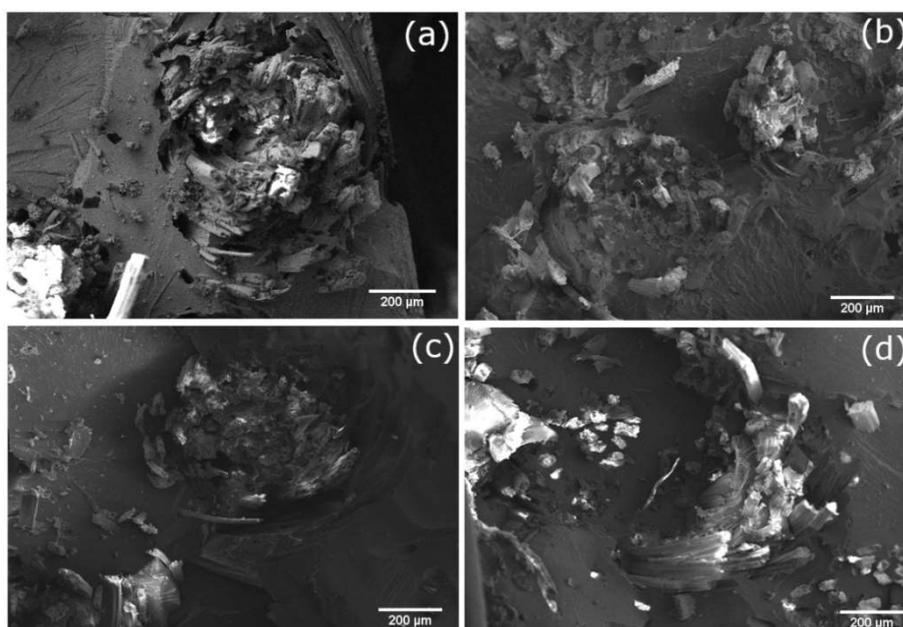


Figura 18: Micrografias de MEV dos compósitos com: a) fibra de juta pura; b) fibra de juta tratada com NaOH; c) fibra de juta tratada com peróxido de hidrogênio e d) fibra de juta tratada com ácido peracético (200×).

5.3 Compósitos bi-componentes moldados por infusão a vácuo

As constantes elásticas determinadas pela técnica de excitação por impulso revelaram alguns resultados já esperados, como a superioridade do compósito C₅, seguida de G₅ em todos os casos (Figura 19). De acordo com Hariharan et al. (2005), em comparação a fibras sintéticas, devido à sua natureza heterogênea, as fibras naturais apresentam capacidade reduzida de suportar os carregamentos transferidos pela matriz. No caso das fibras de vidro, suas propriedades mecânicas são devidas à sua estrutura cristalina, que consiste em longas cadeias de sílica altamente organizadas. Já as fibras de carbono são majoritariamente compostas por átomos de carbono altamente empacotados, o que explica suas excelentes propriedades mecânicas. Já as fibras de juta, embora possuam longas cadeias de celulose interligadas por fortes ligações primárias covalentes, são também compostas por ligações secundárias do tipo pontes de hidrogênio e interações de Van der Waals, presentes em todos os seus compostos estruturais, incluindo a celulose, a lignina e as hemiceluloses.

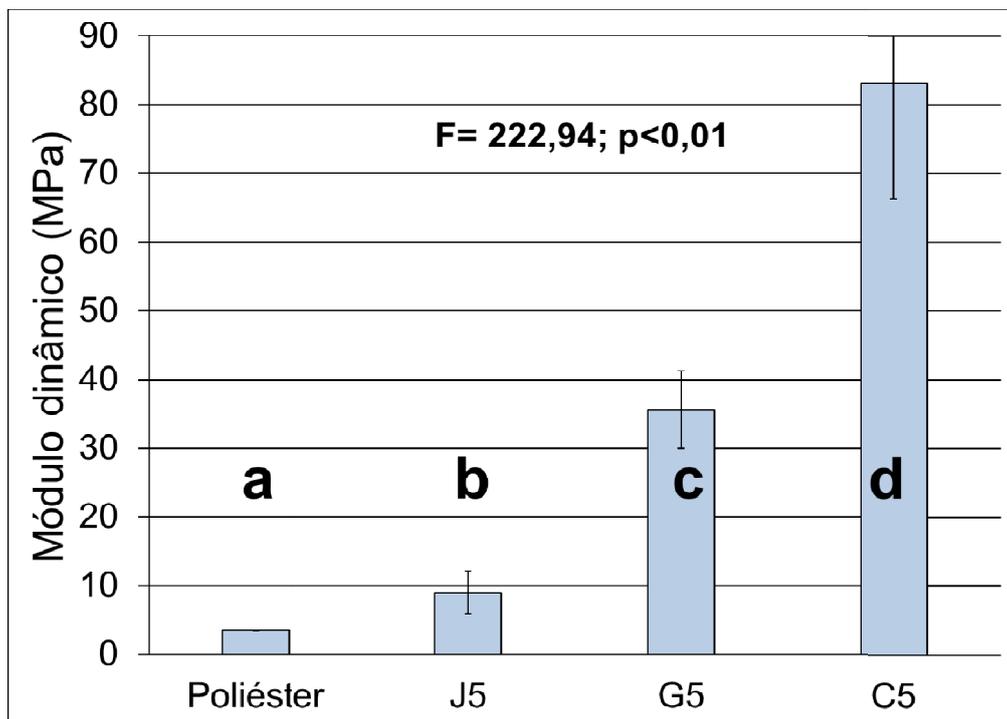


Figura 19: Módulo de elasticidade dinâmico avaliado por Sonelastic® da resina poliéster e dos laminados bi-componentes.

5.4 Compósitos híbridos moldados por infusão a vácuo

5.4.1 Densidade dos laminados de juta/vidro e juta/carbono

Como esperado, quanto maior o número de tecidos de vidro, maior a fração mássica e a densidade dos compósitos (Tabela 5). Assim, os maiores valores foram obtidos para o laminado de fibras de vidro puro, G₅, seguido por JG₃J e JGJGJ. Essas características foram influenciadas pela diferente densidade superficial dos tecidos usados, que foi muito maior para o tecido de fibras de vidro (450 g.m⁻²) do que para o tecido de juta (239 g.m⁻²). Esses resultados estão em concordância com estudos anteriores sobre laminados híbridos de fibras naturais/vidro (CAVALCANTI et al., 2019; GUPTA; DEEP, 2019). A compressibilidade de tecidos distintos, afetando a espessura final, também pode ter influenciado o teor de fibras final (GUPTA; DEEP, 2019).

Tabela 5: Fração mássica e densidade dos laminados bi-componentes e híbridos juta/vidro e juta/carbono.

	Fração mássica (%)	Densidade (kg/m ³)
J ₅	39,08	1,194 ^{±0,003}
J ₂ GJ ₂	41,14	1,237 ^{±0,053}
JGJGJ	48,90	1,232 ^{±0,008}
JG ₃ J	51,68	1,455 ^{±0,007}
G ₅	70,74	1,735 ^{±0,038}
J ₂ CJ ₂	45,75	1,178 ^{±0,006}
JCJJC	48,61	1,153 ^{±0,020}
JC ₃ J	55,89	1,351 ^{±0,103}
C ₅	67,04	1,507 ^{±0,073}

Da mesma forma, quanto maior o número de camadas de juta, menor o teor de fibras e a densidade nos compósitos híbridos de juta/carbono (Tabela 5). Dentre os compósitos baseados em carbono, aquele de carbono puro, C₅, apresentou os maiores valores. Esses resultados são principalmente atribuídos às diferenças na densidade superficial ou gramatura dos tecidos (239 e 368 g.m⁻² para juta e carbono, respectivamente) e à compactação mais favorável do tecido.

Em relação ao comportamento higroscópico dos laminados, os laminados de fibras de vidro e de carbono de bi-componentes superaram o laminado de juta em termos de desempenho. Os perfis de absorção de água mostrados na Figura 20 também indicam que, em geral, a saturação de água é alcançada após cerca de 600 h de exposição à água. Além disso, a região da interface entre diferentes tecidos adjacentes parece ter aumentado o preenchimento de água e, por causa disso, os laminados J₂GJ₂, JGJGJ, J₂CJ₂ e JCJCJ apresentaram o pior desempenho. Nesse sentido, JG₃J e JC₃J se destacaram em termos de desempenho higroscópico entre os híbridos, o que pode ser atribuído à presença de três camadas de carbono, que absorvem menos água, e também ao bloco de camadas médias bem ligadas. Para comparação, os laminados C₅ e G₅ também foram avaliados após selar as superfícies cortadas das amostras. Como esperado, a absorção de água reduziu significativamente para 2,5% e 7,5%, respectivamente, sendo compatível com os valores relatados por Abd El-baky and Attia (2019) e Sathiyamoorthy and Senthilkumar (2020).

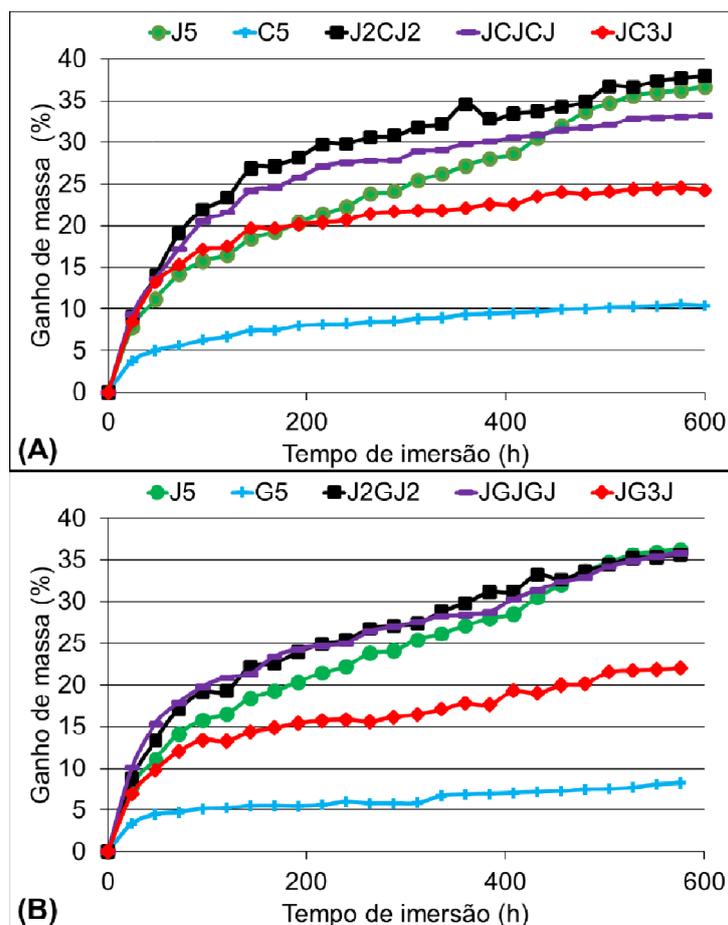


Figura 20: Absorção de água dos laminados bi-componentes e híbridos juta/vidro e juta/carbono.

Kamangar and Shokrieh (2020) explicaram que, além das próprias características higroscópicas da matriz e das fibras, a região de interface entre eles também desempenha um papel importante na absorção de água. Esses autores relataram que a absorção de água em laminados envolve vários mecanismos, incluindo difusividade efetiva, concentração total máxima de umidade e espessura de cada camada. De acordo com Mamalis, Floreani, and Brádaigh (2021), a plastificação da matriz, a diminuição da temperatura de transição vítrea, a formação precoce de pontes de fibras, o enfraquecimento da matriz e a diminuição da tenacidade à fratura são as principais perdas de propriedades devido ao envelhecimento higroscópico de compósitos poliméricos. Por exemplo, He et al. (2022) relataram uma diminuição na resistência à compressão, tração e cisalhamento no plano de 28,5%, 7,2% e 16,6%, respectivamente, para um compósito de tecido de fibra de vidro E/vinil éster após 90 dias de imersão em água destilada.

5.4.2 Laminados juta/vidro

As imagens de ultrassom representam mapas de sinais sonoros capturados ao longo do perfil transversal das placas. A Figura 21 mostra as imagens para os laminados de juta e juta/vidro, e as zonas ricas em fibras aparecem como sinais mais amplificados, com tonalidades claras de verde e azul. As regiões ricas em resina aparecem como tonalidades mais escuras de azul, ou seja, uma diminuição da impedância do sinal capturado. As imagens sugerem homogeneidade aceitável em cada placa considerando os tipos de tecidos usados e, em alguns casos, o efeito da presença da malha de fluxo na fabricação. Essa boa homogeneidade refletiu nos baixos desvios-padrão obtidos para as propriedades mecânicas médias. De fato, o sinal de ultrassom em laminados infundidos a vácuo é geralmente atenuado perto das regiões onde a malha de fluxo e as mangueiras de entrada e saída de resina são colocadas, como em Nunes et al. (2019).

Conforme esperado, o compósito de vidro puro apresentou maiores propriedades em flexão (Figura 22) e tração (Figura 23). Esses resultados são justificados pelas características dos compósitos, sejam eles de bi-componentes ou híbridos, como propriedades e conteúdo das fibras e adesão interfacial, que favoreceram

aqueles com mais tecidos de vidro. De fato, o compósito G₅ apresentou o maior módulo e resistência à tração, que diminuiu à medida que o número de tecidos de juta aumentou, ou seja, JG₃J, JGJGJ, J₂GJ₂ e J₅. O compósito G₅ apresentou valores médios de módulo e resistência à tração de 158-323% e 163-370% mais altos, respectivamente, do que os outros compósitos. De fato, o compósito J₅ apresentou os valores mais baixos em todos os casos mostrados nas Figuras 21 e 22, exceto a razão de Poisson, com a tendência oposta. Uma razão de Poisson mais baixa para compósitos com tecidos sintéticos em comparação com aqueles com fibras naturais é amplamente relatada na literatura (XU et al., 2019).

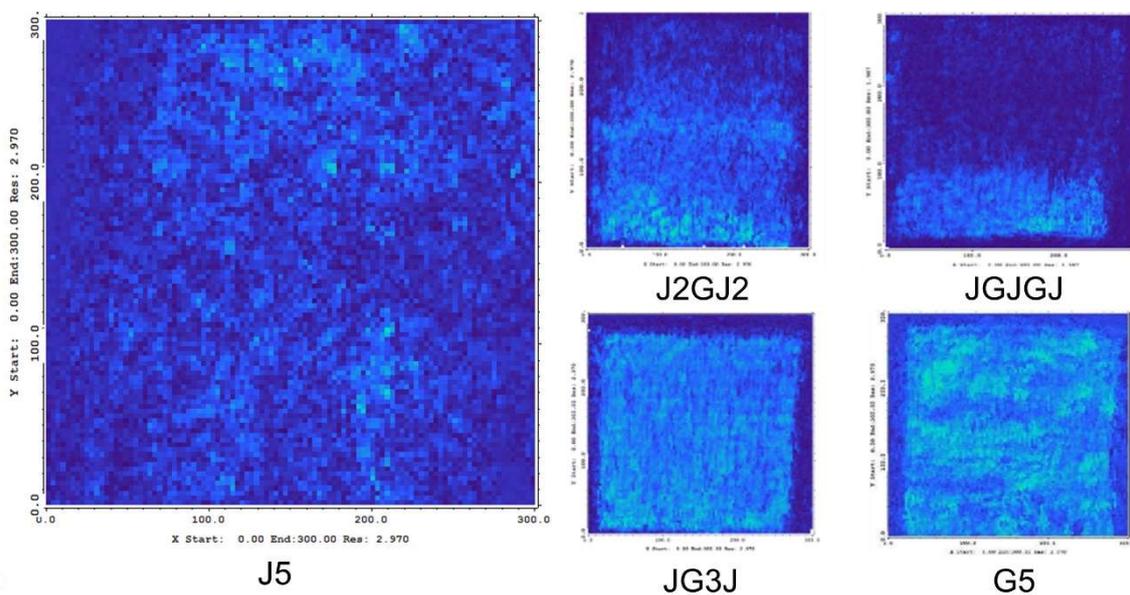


Figura 21: Mapa C-scan dos laminados bi-componentes e híbridos de juta/vidro.

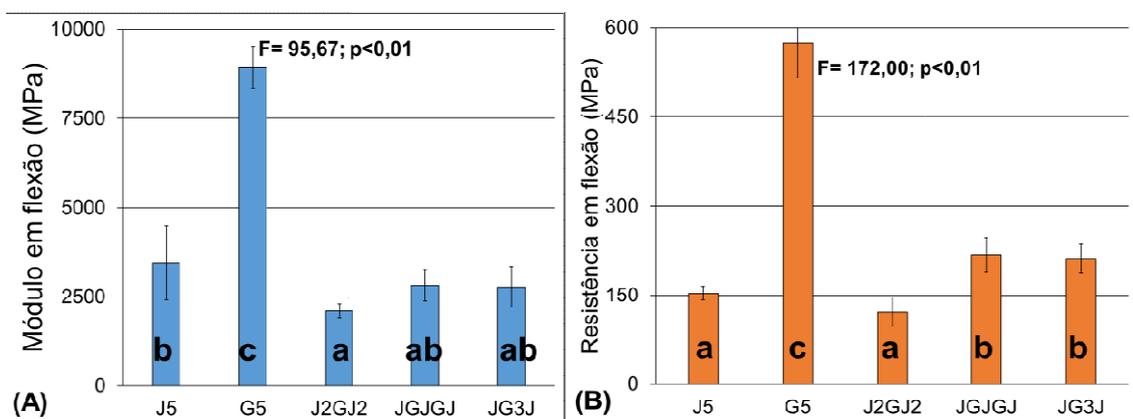


Figura 22: Propriedades de flexão dos laminados bi-componentes e híbridos juta/vidro.

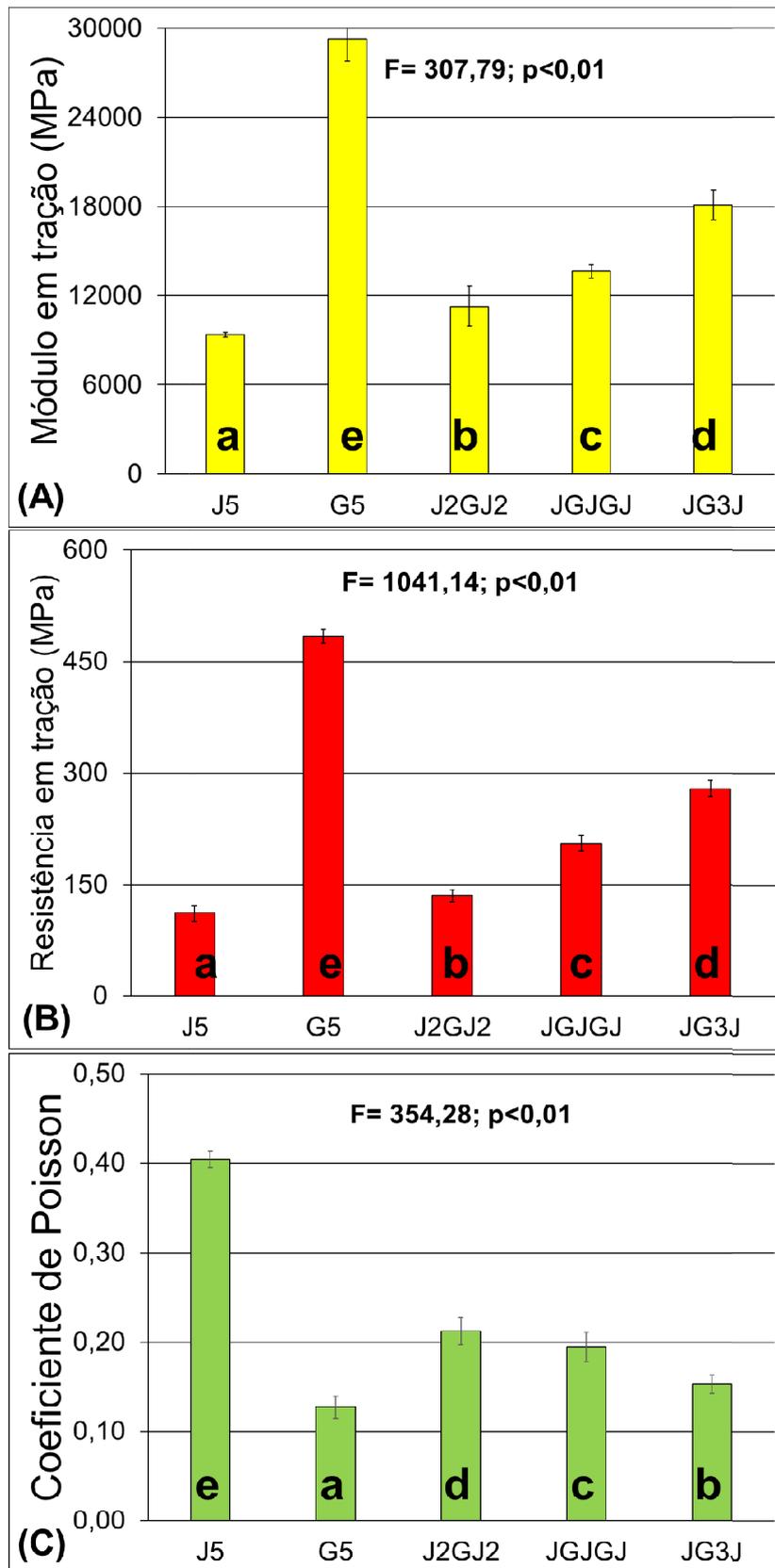


Figura 23: Propriedades de tração dos laminados bi-componentes e híbridos juta/vidro.

Quando um laminado está sob tensão uniaxial, níveis semelhantes de deformação são desenvolvidos em todas as camadas e isso justifica por que foram encontradas apenas pequenas diferenças nas propriedades de tração ao comparar laminados híbridos que diferiam apenas nas sequências de empilhamento (o mesmo número de camadas de cada fibra) (SERNA MORENO; HORTA MUÑOZ, 2022). Os autores também afirmaram que as propriedades de tração de laminados (módulo de elasticidade e resistência) cujas camadas superficiais são de fibras naturais podem ser reduzidas devido a danos dos dispositivos de fixação.

A importância de ter fibras rígidas e fortes como camadas externas foi relatada experimentalmente por Xu et al. (2019), que estudaram laminados de juta/vidro e linho/vidro. Isso também é claramente visto nos resultados de flexão deste trabalho (Figura 22), ou seja, como a juta pura e todos os laminados híbridos tinham camadas de juta como as camadas externas, suas propriedades foram mais próximas. De fato, a carga de flexão causa um campo combinado de tensões de tal forma que as camadas da linha neutra para cima são comprimidas e da linha neutra para baixo são tracionadas. Neste trabalho, as fibras de juta foram mantidas sempre como as camadas externas por razões estéticas, ou seja, a aparência de madeira foi valorizada para sua aplicação em instrumentos musicais.

O laminado de vidro puro apresentou uma resistência *short beam* muito maior (90%) do que a juta pura, como mostrado na Figura 24. Entre os híbridos, o compósito J₂GJ₂ apresentou resistência *short beam* 25-29% mais baixa do que os compósitos JGJGJ e JG₃J. Portanto, mais camadas de vidro foram benéficas para esta propriedade, mas talvez o mais importante seja o fato de que a juta próxima às superfícies reduziu a resistência medida. Em seu estudo sobre laminados híbridos com fibras de óleo de palma e fibras de vidro, Rayyaan et al. (2020) relataram que uma adesão interfacial pobre entre fibras naturais e epóxi levou a falhas concentradas nesta interface, ao contrário do caso da forte adesão vidro-epóxi, cujas falhas foram principalmente coesivas nas fibras.

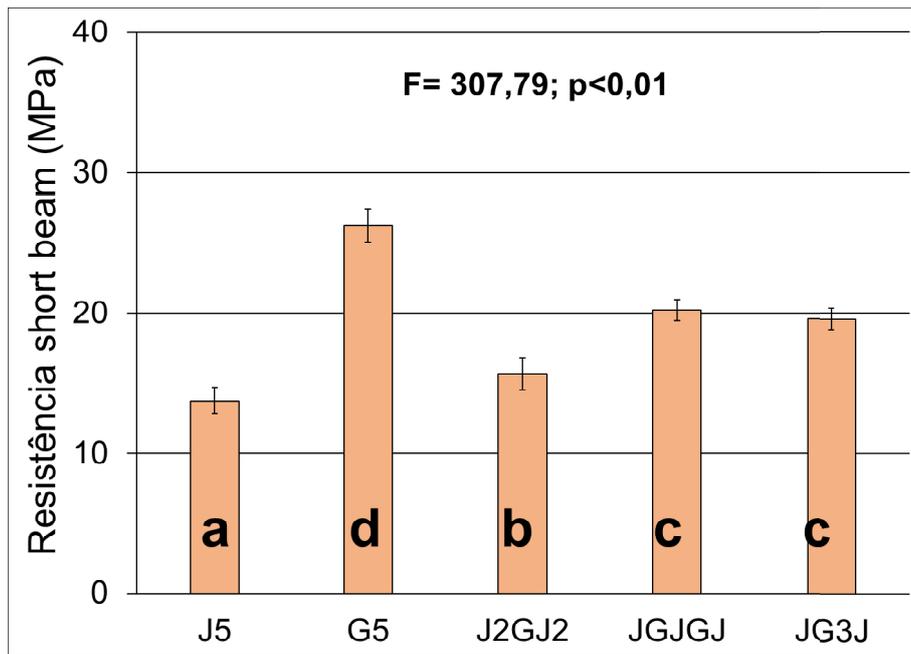


Figura24: Resistência *short beam* dos laminados bi-componentes e híbridos juta/vidro.

5.4.3 Laminados juta/carbono

Para os laminados com fibras de carbono, o mapa de cores indicou uma distribuição fibra/matriz menos homogênea (Figura 25). As tonalidades verdes exibidas pelo C₅ e JC₃J podem ser justificadas pela permeação geralmente mais difícil do tecido de carbono unidirecional mais apertado, o que exigiu a adição de 5% de estireno à resina para obter a completa infiltração no tempo de gel disponível.

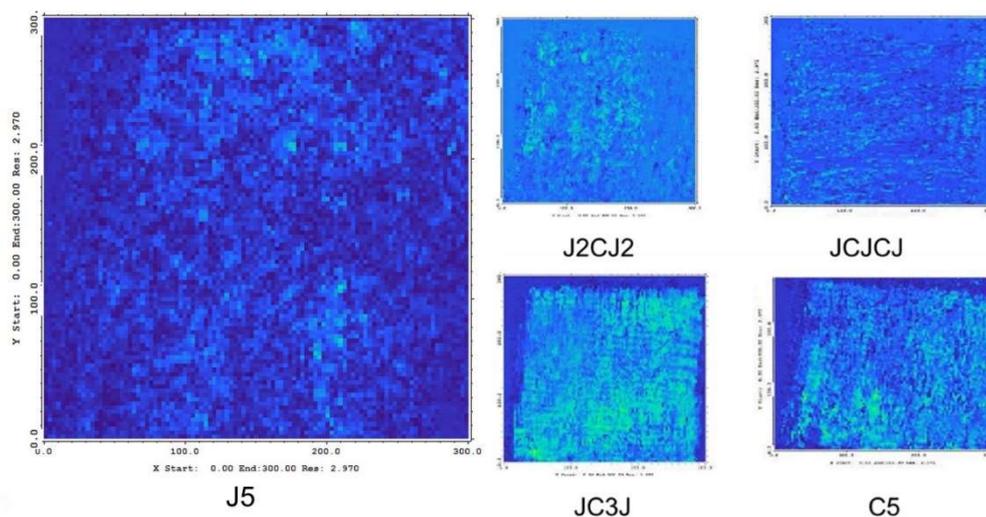


Figura 25: Mapa C-scan dos laminados bi-componentes e híbridos juta/carbono.

As tendências nas propriedades para os laminados com camadas de fibras de carbono sob flexão (Figura 26) e tração (Figura 27) foram semelhantes às das camadas de fibras de vidro. O carbono puro (C5) apresentou a maior rigidez e resistência para ambas as cargas. Entre os laminados híbridos juta/carbono, o JC₃J apresentou claramente a maior rigidez e resistência à tração, seguido por JCJCJ e J₂CJ₂. As diferenças percentuais foram de 30-60% e 24-41% para rigidez e resistência à tração, respectivamente. Essa tendência também ocorreu nas propriedades de flexão (Figura 26), embora as diferenças fossem menos significativas, porque a fibra mais forte e rígida (ou seja, o carbono) sempre ficava nas camadas internas dos híbridos. Esses resultados podem ser justificados satisfatoriamente pelo número de camadas de carbono e pelo tipo de carga envolvida.

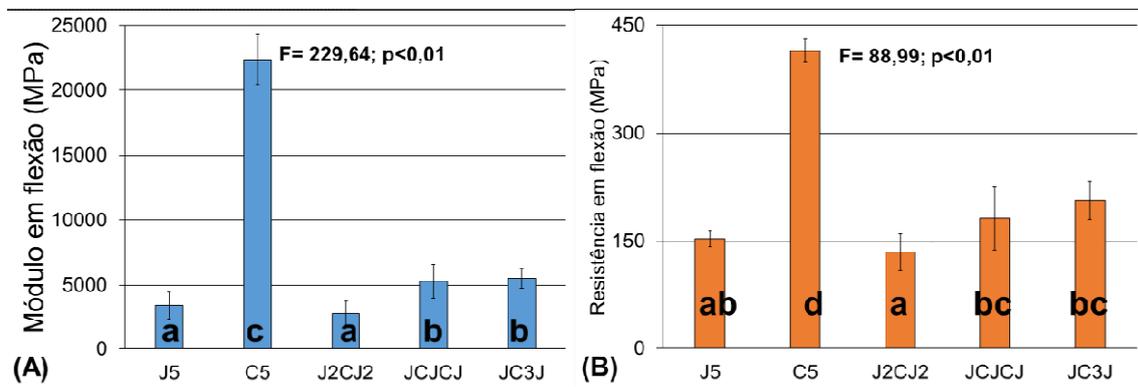


Figura 26: Propriedades de flexão dos laminados bi-componentes e híbridos juta/carbono.

Sujon, Habib, and Abedin (2020) estudaram laminados de juta/carbono/epóxi com diferentes sequências de empilhamento e orientações de fibras fabricados por um processo similar, infusão de resina assistida por vácuo (VARI). O laminado com dez camadas unidirecionais (seis camadas de juta e quatro camadas internas de carbono, ou seja, J₃C₄J₃) apresentou resistências à tração e flexão de 571 MPa e 170 MPa, respectivamente. O laminado híbrido JC₃J relacionado neste trabalho apresentou resistência à tração similar (556 MPa) e resistência à flexão mais elevada (204 MPa), mesmo com uma resina de menor desempenho (poliéster). Isso também está de acordo com o fato de que as fibras são dominantes nessas propriedades mecânicas.

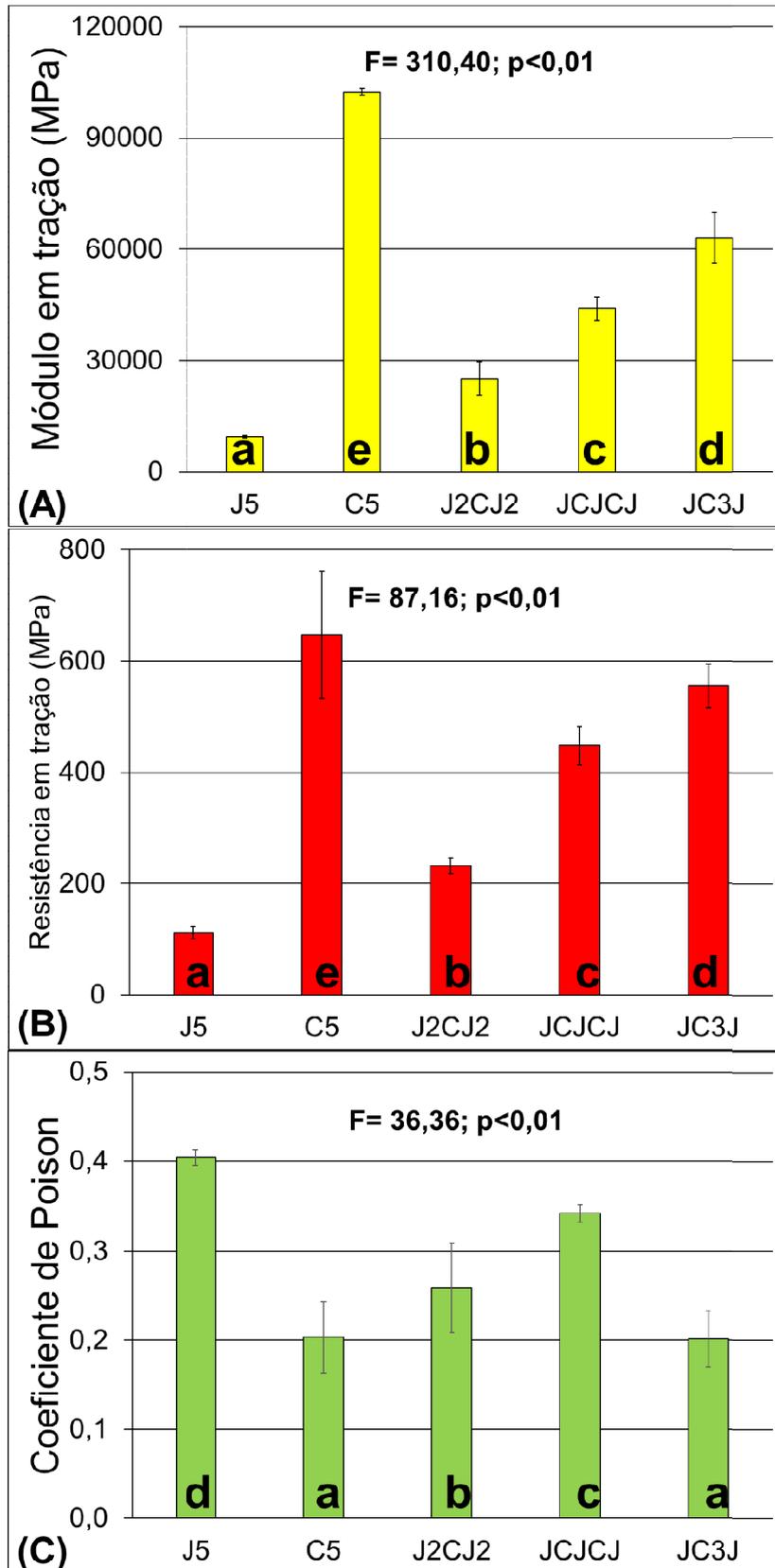


Figura 27: Propriedades de tração dos laminados bi-componentes e híbridos juta/carbono.

Quanto à resistência *short beam*, J₅ e os laminados híbridos apresentaram valores similares, sendo inferiores ao compósito C₅ (Figura 28), sendo que o compósito J₅ foi 21% menor que o C₅. Nesse caso, não foram identificadas diferenças estatisticamente significativas entre a juta e todos os híbridos. Segundo Suriani et al. (2021), Quando tensões interlaminares são aplicadas a laminados cujas fibras estão todas ao longo do plano, tanto a fase da matriz quanto a interface fibra/matriz são responsáveis por suportar a carga e podem falhar por delaminação.

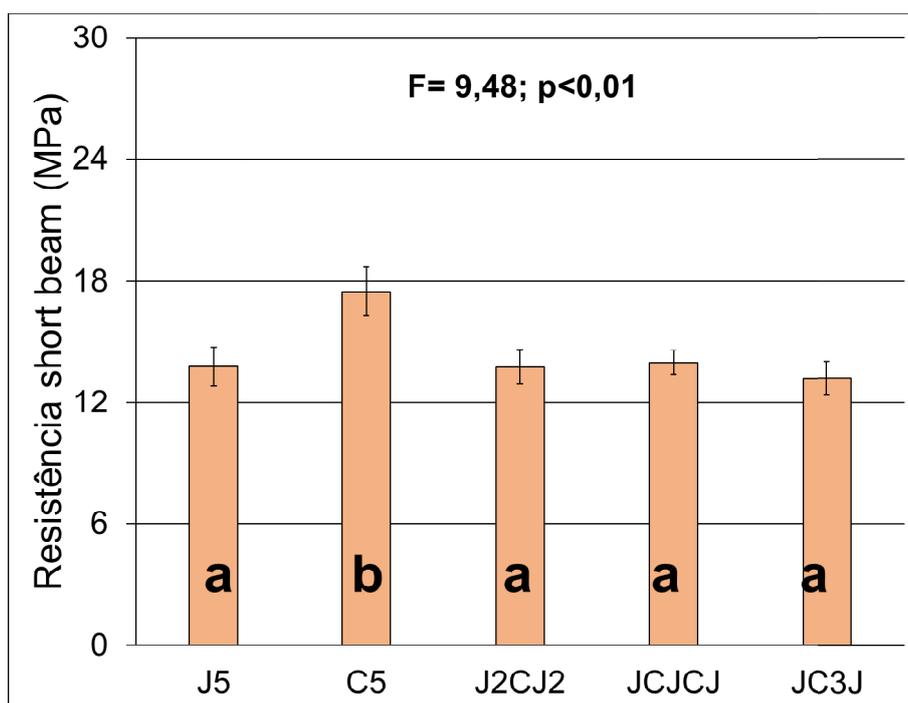


Figura 28: Resistência *short beam* dos laminados bi-componentes e híbridos juta/carbono.

A fratura das amostras tracionadas foi analisada por MEV para revelar diferentes mecanismos de danos que ocorreram nos compósitos. No caso do compósito J₅ mostrado na Figura 29a, a falha ocorreu principalmente devido à falha de interface com despreendimento das fibras, que ocorre quando a energia armazenada dentro de cada fibra individual de ponteamto atinge um valor crítico abaixo da resistência da fibra, mas acima da força adesiva da fibra-matriz. Além disso, foram encontradas algumas falhas por delaminação nas regiões intercamadas (Figura 29b). Finalmente, os compósitos reforçados com três laminados intermediários apresentaram algumas fraturas relacionadas às fibras, como mostrado na Figura 29c.

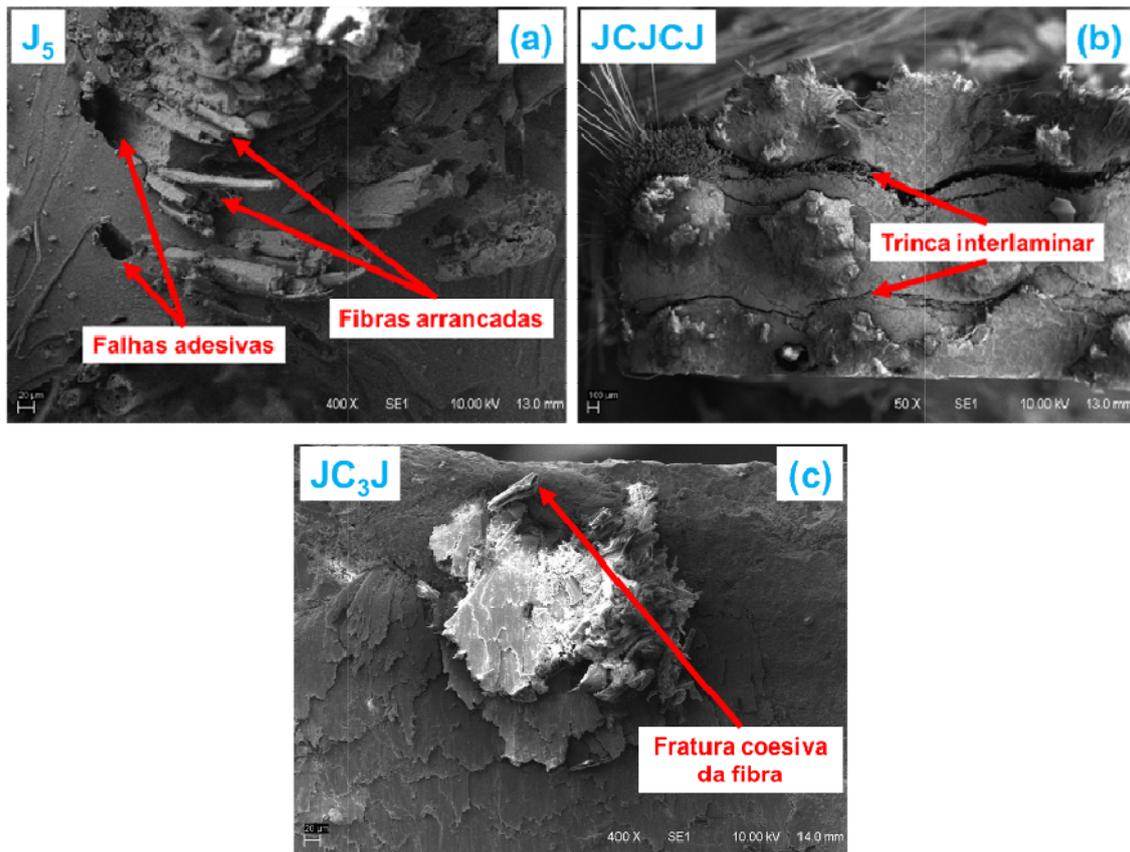


Figura 29: Imagens de MEV das superfícies fraturadas dos laminados: (a) J₅, (b) JCJCJ e (c) JC₃J.

5.5 Laminados *open-hole*

Em relação às amostras não perfuradas, os laminados baseados em tecido de juta bi-componente perfurados demonstraram valores relativamente mais baixos de resistência à tração e módulo de elasticidade em comparação com os laminados de tecido de vidro, como mostrado na Figura 30. Essas diferenças podem ser atribuídas às variações inerentes nas propriedades mecânicas entre as fibras de juta e vidro. De acordo com um estudo realizado por Gurunathan; Mohanty; Nayak, (2015), os valores típicos de resistência à tração para fibras de vidro variam de 2000 MPa a 3500 MPa, enquanto as fibras de juta exibem valores mais baixos, variando de 180 MPa a 770 MPa. Os laminados híbridos mostraram uma melhoria na resistência à tração em comparação com os laminados de tecido de juta bi-componente, indicando o efeito de reforço obtido por meio da hibridização com fibras de vidro. Além disso, a sequência de empilhamento dos laminados híbridos também influenciou suas propriedades de tração, com a sequência JG₃J exibindo valores de resistência mais elevados em comparação com a

sequência JGJGJ. Esse resultado pode ser adequadamente justificado ao se considerar o número de camadas de vidro empilhadas, conforme explicado anteriormente.

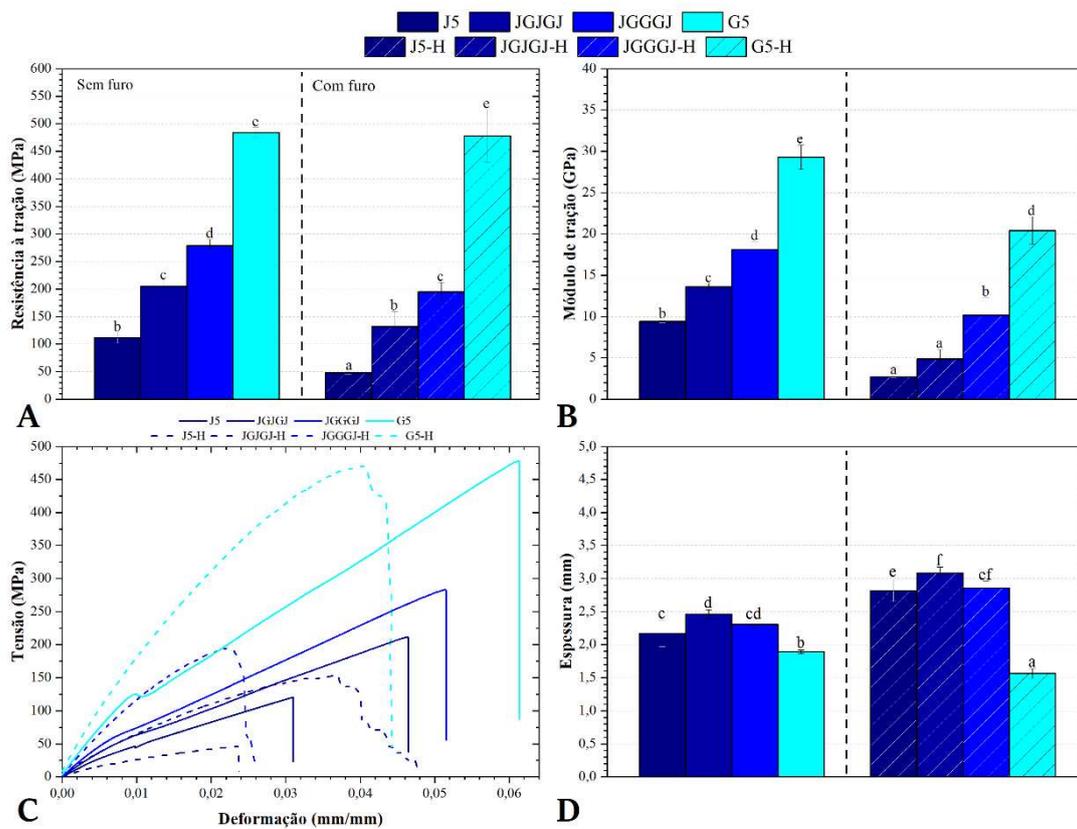


Figura 30: Resistência à tração (A), módulo de elasticidade em tração (B), curvas representativas de tração (C) e deformação na ruptura (D) dos laminados (letras diferentes acima das barras representam diferenças significativas).

Os laminados com furos apresentaram um padrão semelhante ao comparar suas propriedades de tração com as dos laminados não perfurados. O laminado G₅-H exibiu as maiores propriedades, enquanto o laminado J₅-H mostrou os menores valores. No entanto, a presença do furo resultou em perdas nas propriedades de tração de todos os laminados, exceto para a resistência à tração do laminado G₅-H, que manteve os valores originais observados no laminado não perfurado (aproximadamente G₅). As reduções na resistência à tração variaram de 31 a 54%, enquanto reduções na faixa de 41-78% foram observadas para o módulo de elasticidade. Essas reduções podem ser atribuídas à perda de área transversal causada pelo furo, que corresponde a aproximadamente 25% da área total. Os furos em laminados, conforme afirmado em Sun et al., (2020), podem atuar como concentrações de tensão, iniciando fissuras em suas bordas. Eles também podem servir como locais preferenciais para delaminação ou descolamento entre camadas

adjacentes, promovendo a propagação de fissuras de delaminação e resultando em falha prematura e redução de resistência (ÖZASLAN et al., 2021; SENTHIL et al., 2013).

Em relação à rigidez, as reduções no módulo de elasticidade são comumente atribuídas à descontinuidade das fibras e à ruptura da matriz causadas pela presença de furos, o que leva a uma redução na transferência efetiva de carga entre fibras adjacentes. Além disso, as tensões de cisalhamento interlaminar geradas pelos furos podem induzir delaminação ou descolamento interlaminar (GUPTA; PAL; RAY, 2023; KHAN et al., 2023; LIU et al., 2021).

A análise dos modos de falha durante os testes de tração revelou importantes observações sobre o comportamento dos laminados, conforme mostrado na Figura 31. Os laminados de tecido de juta bi-componente exibiram falha coesiva na matriz. Essa área de fratura sob tensão foi descrita em Calabrese et al., (2020) como caracterizada por descolamento localizado das fibras da matriz, acompanhado por fissuras de tensão, descolamento de camadas locais e enfraquecimento das fibras. Esses efeitos podem ser atribuídos à deterioração da adesão fibra-matriz, amolecimento da matriz e redução das propriedades de tração das fibras naturais (GOBI KANNAN; WU; CHENG, 2014; HABIBI; LAPERRIÈRE, 2020).

Alguns laminados G_5 exibiram fissuras de fratura ao longo da direção de carga na região do compósito imediatamente atrás do furo, conforme mostrado na Figura 31. Esses danos locais podem ser atribuídos à ocorrência do fenômeno de danos nas juntas, particularmente no modo de cisalhamento, que atua em conjunto com o modo de tração, resultando em uma redução na resistência mecânica da junta.

A literatura descreveu minuciosamente a ocorrência desse modo de falha em laminados com furos. Em resumo, embora a fratura dominada por tração predomine, esse tipo de fratura pode ser caracterizado como um modo de fratura por clivagem incipiente (CALABRESE et al., 2020; SUN et al., 2020; XIAO et al., 2017). Quando submetida a cargas de tração, a falha de tração da matriz frequentemente se inicia na borda do furo e se estende ao longo da direção longitudinal, formando regiões de danos lineares. Essas regiões se propagam rapidamente ao longo da direção transversal. Posteriormente, a falha de tração das fibras ocorre na borda do furo, predominantemente se estendendo ao longo da direção transversal, com um menor número de extensões nas direções $\pm 45^\circ$. Em contraste, a falha compressiva da matriz e das fibras ocorre em estágios posteriores, envolvendo um número relativamente pequeno de pontos de falha localizados próximos à borda do furo, perpendicular à direção de carregamento.



Figura 31: Fotografias dos principais modos de falha encontrados após os testes de tração.

Os laminados híbridos apresentaram uma combinação de modos de falha interfacial e coesiva, indicando uma melhoria na transferência de carga entre as fibras de juta e de vidro. Sob condições de carga de tração, pode ser induzido um estado local de tensão compressiva próximo ao furo, que é crítico para o crescimento da delaminação. Além disso, o início da delaminação ocorre no plano de apoio durante a falha da junta, seguindo o modo de falha por apoio (SURIANI et al., 2021).

Os testes de flexão forneceram informações sobre o comportamento de flexão dos laminados, conforme mostrado na Figura 32. Os laminados de tecido de juta consistentemente demonstraram menor resistência à flexão e rigidez em comparação com os laminados de tecido de vidro. Esse resultado está alinhado com as propriedades de tração previamente observadas mais baixas do laminado J₅. Além disso, as curvas de força versus deflexão indicam que os níveis de força entre os laminados não foram significativamente diferentes, sugerindo que as propriedades de flexão superiores do

laminado G₅ podem ser atribuídas ao seu perfil mais fino. Resultados semelhantes foram relatados por Acosta et al., (2023).

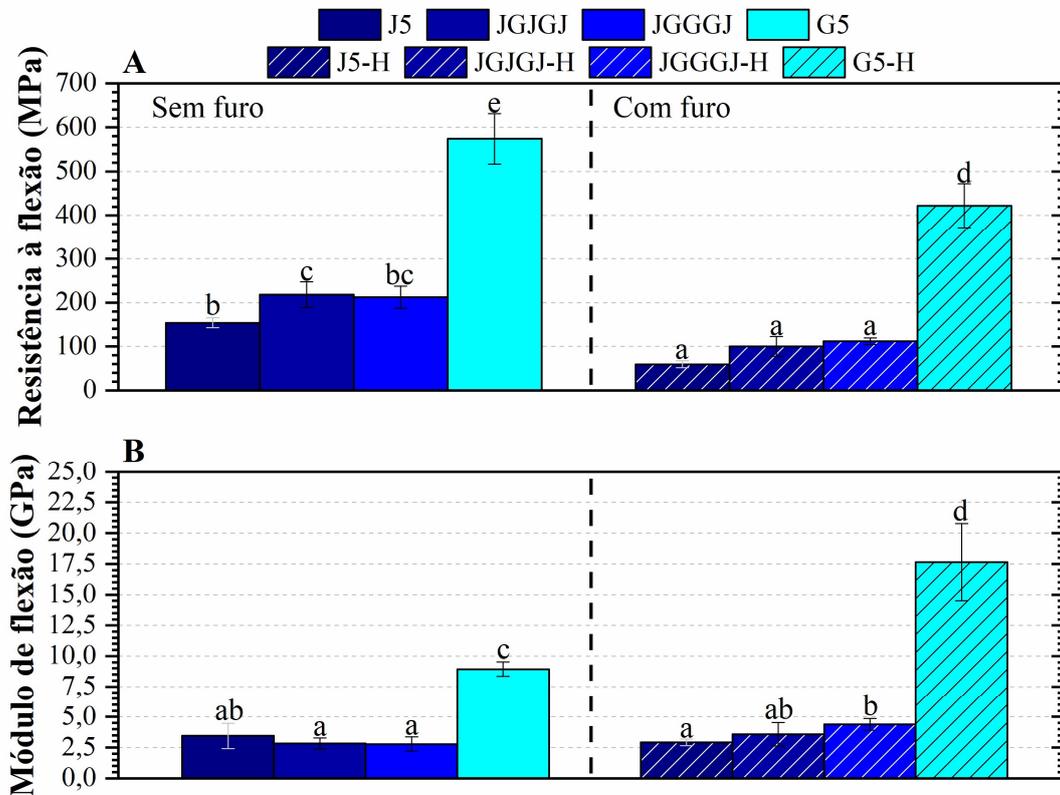


Figura 32: Resistência à flexão (A) e módulo de flexão (B) dos laminados (letras diferentes acima das barras representam diferenças significativas).

Em comparação com as amostras não perfuradas, os laminados com furos apresentaram uma diminuição na resistência à flexão, enquanto mantiveram um módulo de flexão similar em todos os casos. Essa diminuição nas propriedades de flexão pode ser atribuída à presença de concentrações de tensão ao redor das bordas do furo, que podem exceder o limite de resistência do material compósito. Como resultado, fissuras podem se iniciar e propagar mais cedo, levando a uma redução na resistência (ÖZASLAN et al., 2021). Os laminados híbridos demonstraram uma melhoria na resistência à flexão, superando a do laminado J₅-H. A sequência de empilhamento dos laminados híbridos não influenciou suas propriedades de flexão, pois todas as sequências apresentaram médias semelhantes para resistência e rigidez. No entanto, a rigidez dos laminados híbridos não superou a do laminado J₅, indicando a influência significativa das camadas de face nessa propriedade. Essa observação está em consonância com os resultados relatados na literatura (GUPTA; PAL; RAY, 2023;

SAJID et al., 2023). De acordo com Dias et al., (2022), em laminados híbridos, a configuração ideal para alcançar um bom desempenho de flexão é posicionar as mantas de vidro nas faces, já que as tensões de falha por flexão ocorrem principalmente nessas regiões.

A análise dos modos de falha por flexão nos laminados estudados revelou uma ocorrência consistente de falha na face compressiva (Figura 33). Esse fenômeno pode ser atribuído a vários fatores relacionados à configuração do laminado e ao comportamento do material, incluindo a concentração de tensão compressiva relacionada à ação do furo como uma concentração de tensão, que é tipicamente mais alta na face compressiva próxima ao furo (JUMAHAT et al., 2010; ZIMMERMANN; WANG, 2020). Essa concentração de tensão compressiva pode exceder a resistência compressiva do material, levando à iniciação localizada da falha nessa região. Além disso, de acordo com Gupta; Pal; Ray, (2023), a face compressiva de laminados típicos sob cargas de flexão sofre forças compressivas que podem induzir o encurvamento e o dobramento das fibras. O encurvamento ocorre quando as fibras desviam de seu caminho original, enquanto o dobramento refere-se à flexão ou dobra das fibras. Ambos os fenômenos enfraquecem a capacidade de suporte de carga das fibras, tornando a face compressiva mais propensa à falha.

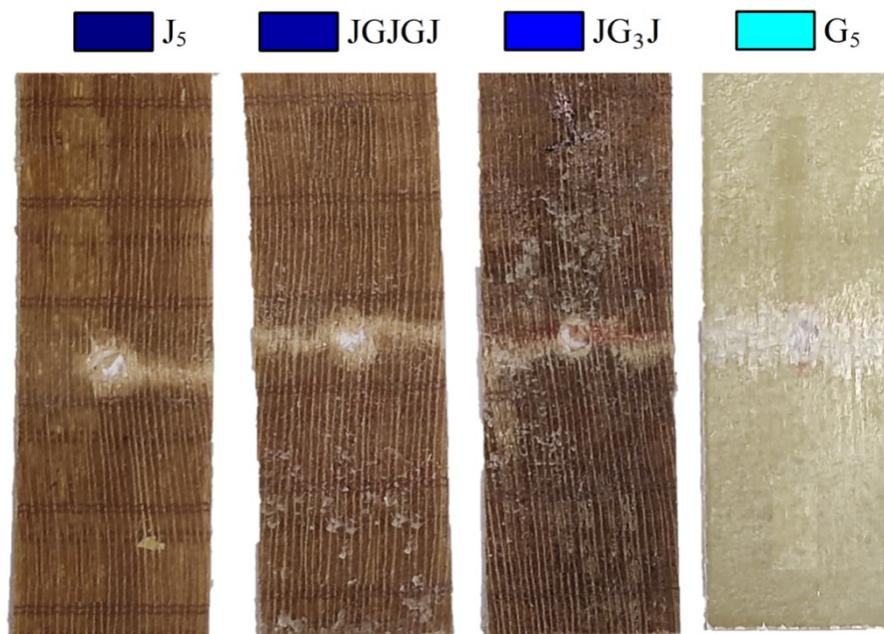


Figura 33: Fotografias dos principais modos de falha encontrados após os testes de flexão.

5.6 Violões em compósito

Os violões produzidos em compósitos laminados híbridos juta/vidro apresentaram um aspecto visual excelente (mostrado na Figura 34), graças ao cuidadoso processo de fabricação empregado. A exceção, em termos de acabamento, foi o violão B. Esse acabamento piorado pode ser atribuído ao processamento utilizado em sua caixa harmônica, de modo que é possível indicar que a laminação manual não foi considerada um processamento adequado para essa aplicação. A julgar pelas características dos laminados utilizados, é possível indicar ainda que o aspecto atraente dos violões fabricados é durável e sua robustez é alta, de modo que o manuseio desses violões não deve ser problemático em termos de perdas de propriedades mecânicas.

Além disso, os violões compósitos são altamente resistentes à umidade, o que significa que eles são menos suscetíveis a deformações e rachaduras causadas por variações de temperatura e umidade. Os violões compósitos também são muito mais resistentes a impactos e choques do que os violões convencionais de madeira. Isso os torna ideais para músicos que viajam frequentemente e precisam de um instrumento resistente e confiável.

A fotografias mostradas ainda indicam que os violões compósitos possuem aparências únicas e atraentes, com uma textura suave e um acabamento brilhante. A combinação das fibras de juta e vidro deu aos violões uma aparência natural, com tons e texturas que variam de acordo com as camadas superficiais usadas.

Numa comparação entre os violões para além do aspecto estético, o violão A apresentou o menor peso e o som mais agudo. Já o violão B foi o instrumento mais pesado e seu som foi considerado o mais grave. Por fim, os violões C e D apresentam níveis de peso e tonalidades de som similares entre si e intermediários em relação aos violões A e B. Tais violões, ao serem manuseados, emitiram sonoridades similares a de violões tradicionais confeccionados em madeira.

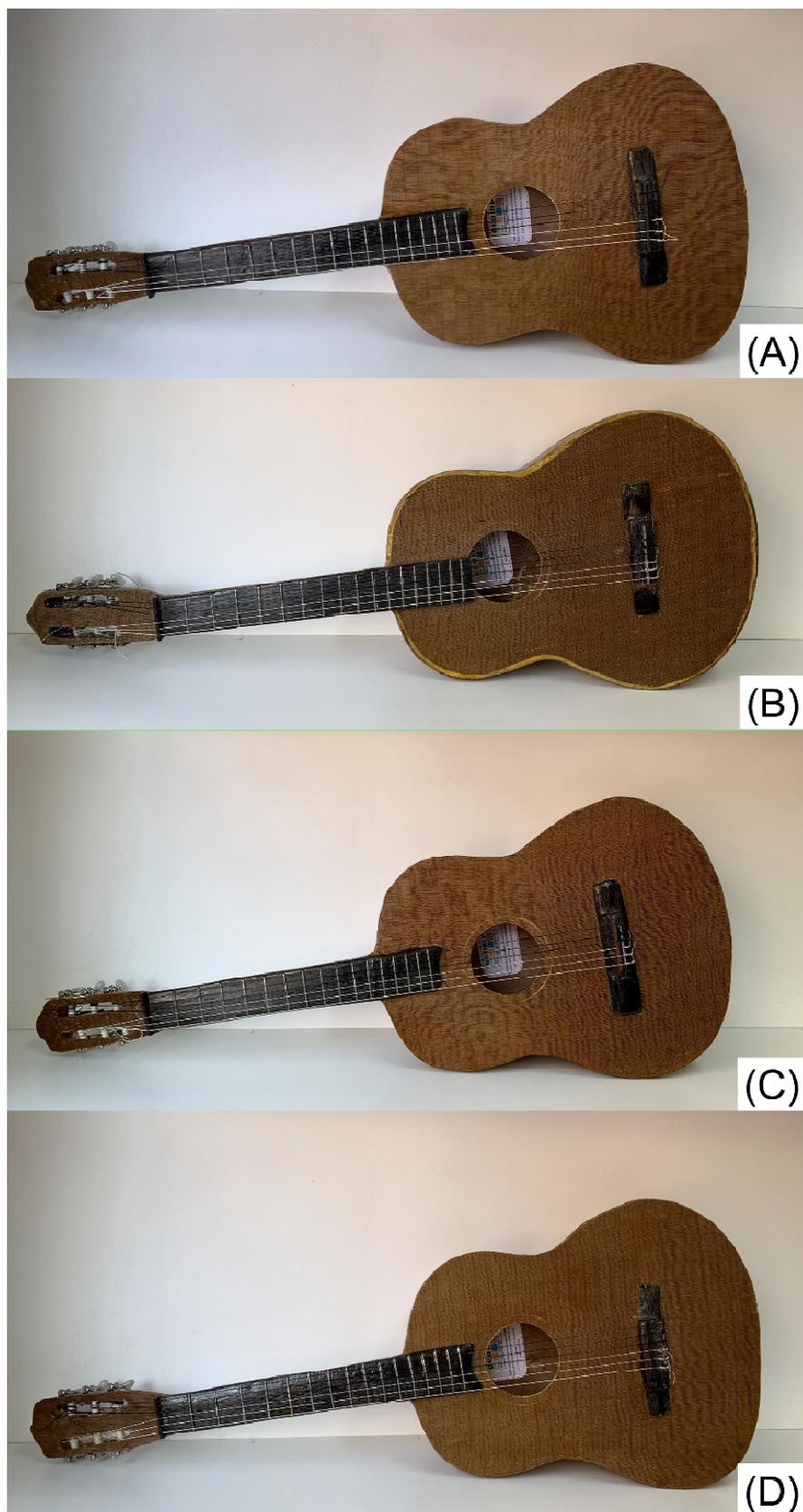


Figura 34: Fotografias dos quatro violões confeccionados. Em que: as legendas de cada imagem são coincidentes com a nomenclatura usada para os violões na metodologia.

6. CONCLUSÕES

No presente trabalho, compósitos bi-componentes e híbridos foram produzidos com sucesso utilizando tecidos de fibras de juta (não-tratados ou quimicamente tratados), de vidro e de carbono. Também, duas diferentes técnicas de processamento (RTM e infusão) e dois diferentes teores de fibra foram estudados. Para os compósitos moldados por RTM, o teor de fibras foi o principal fator influente nas propriedades. Dentre os tratamentos químicos, a solução de H_2O_2 , seguida da solução de $C_2H_4O_3$, deram origem a compósitos mais qualificados do ponto de vista mecânico. Porém, como o tratamento químico de fibras naturais envolve uma série de operações unitárias adicionais, optou-se por não mais tratar fibras na continuidade do trabalho.

O processamento por infusão a vácuo se mostrou amplamente superior ao RTM em termos de comportamento estrutural dos compósitos bi-componentes produzidos e, por esse motivo, foi selecionado para o processamento dos compósitos híbridos. Além disso, a técnica de excitação por impulso originou a predição de um módulo de elasticidade aderente aos resultados obtidos por meio de ensaios destrutivos, o que não se confirmou para o módulo de cisalhamento. As imagens por ultrassom indicaram uma boa homogeneidade dos compósitos moldados por infusão a vácuo, o que se refletiu nos baixos desvios verificados para as propriedades mecânicas avaliadas.

Do ponto de vista mecânico, os compósitos híbridos apresentaram propriedades em geral intermediárias, seja na comparação entre os bi-componentes de juta e de vidro ou os de juta e de carbono. Dentre as sequências de empilhamento estudadas, o número de camadas compostas por fibras sintéticas foi o principal fator envolvido, de modo que JG_3J e JC_3J foram superiores, seguidos por $JGJGJ$ e $JCJ CJ$ e, por último, J_2GJ_2 e J_2CJ_2 . Em vista da aplicação desses compósitos com base em suas propriedades mecânicas, será importante ajustar as sequências de empilhamento para que o máximo de fibras de juta sejam inseridas mas ainda dentro do nível de rigidez e resistência requeridas.

No contexto da hibridização das fibras unidirecionais de juta com tecidos de fibra de vidro em laminados unidirecionais com furos abertos, várias observações foram feitas em relação às suas propriedades mecânicas. A inclusão das fibras de juta contribuiu para a formação de vazios nas regiões interfaciais dos laminados. A variação na espessura foi influenciada pelo número de interfaces híbridas, resultando em espessuras de laminados variáveis. Os laminados de tecido de juta bi-componente apresentaram valores de resistência à tração e módulo de tração inferiores em

comparação com os laminados de tecido de vidro. A presença de furos abertos resultou em propriedades de tração reduzidas para todos os laminados, exceto para o laminado G5-H, que manteve sua resistência. Além disso, a resistência à flexão dos laminados com furos abertos diminuiu, enquanto o módulo de flexão permaneceu similar em todos os casos. Essas descobertas oferecem insights sobre o comportamento mecânico dos laminados unidirecionais com furos abertos, o que pode ser útil para o design e a otimização de estruturas compostas que incorporam tecidos de juta e fibra de vidro.

Portanto, os resultados desta pesquisa fornecem informações valiosas para a seleção e otimização de compósitos para a fabricação de instrumentos musicais, especialmente painéis. Os resultados também mostram que a combinação de fibras naturais e sintéticas pode ser uma estratégia eficaz para a obtenção de compósitos com propriedades mecânicas adequadas e absorção de água controlada.

Os violões compósitos são uma excelente escolha para músicos que valorizam tanto a aparência quanto a qualidade sonora de seus instrumentos. Com uma aparência atraente e uma resistência superior, esses violões são uma escolha excepcional para músicos de todos os níveis de habilidade. Entretanto, o processo de laminação manual não é indicado para a fabricação dos mesmos, de modo que a infusão a vácuo é o processamento preferível. Além disso, o timbre dos violões também poderia ser ajustado em função da escolha dos laminados a serem posicionados nas diferentes partes dos violões.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Investigação de outros tratamentos químicos: Considerando que os tratamentos químicos estudados mostraram melhorias nas propriedades mecânicas dos compósitos de juta, é interessante explorar outros tratamentos químicos para avaliar seu efeito nas propriedades dos compósitos. Diferentes concentrações, tempos de imersão e combinações de tratamentos podem ser investigados.

Estudo do efeito do tratamento químico nas propriedades de tração: Uma vez que os tratamentos químicos analisados não promoveram mudanças significativas nas propriedades de tração dos compósitos, uma sugestão seria investigar outros tratamentos químicos ou combinações de tratamentos que possam melhorar essas propriedades.

Análise de outros processos de fabricação: Embora o estudo tenha comparado os processos de moldagem por RTM e infusão a vácuo, existem outros métodos de fabricação de compósitos, como laminação manual ou autoclave, que podem ser explorados para avaliar sua influência nas propriedades mecânicas e higroscópicas dos compósitos de juta.

Análise da durabilidade dos compósitos: Para a aplicação de compósitos em instrumentos musicais, é fundamental avaliar sua durabilidade ao longo do tempo. Estudos de envelhecimento acelerado, exposição a condições ambientais e testes de fadiga podem ser realizados para avaliar a estabilidade das propriedades dos compósitos ao longo do tempo.

Exploração de outras aplicações para compósitos de juta: Além de instrumentos musicais, os compósitos de juta podem ser utilizados em uma variedade de outras aplicações, incluindo aquelas que demandem propriedades de impacto de baixa e alta velocidade. Pesquisas adicionais podem se concentrar em explorar e identificar outras áreas onde esses compósitos possam ser aplicados com vantagens específicas, levando em consideração suas propriedades mecânicas, higroscópicas e custo-benefício.

8. REFERÊNCIAS

- ABD EL-BAKY, M.; ATTIA, M. Water absorption effect on the in-plane shear properties of jute–glass–carbon-reinforced composites using Iosipescu test. **Journal of Composite Materials**, v. 53, n. 21, p. 3033–3045, set. 2019.
- ACOSTA, A. P. et al. Wood and wood-jute laminates manufactured by vacuum infusion. **Journal of Building Engineering**, v. 64, n. July 2022, p. 105619, 2023.
- AHMED, S. A.; ADAMOPOULOS, S. Acoustic properties of modified wood under different humid conditions and their relevance for musical instruments. **Applied Acoustics**, v. 140, n. October 2017, p. 92–99, 2018.
- ALHIJAZI, M. et al. Recent Developments in Luffa Natural Fiber Composites: Review. **Sustainability**, v. 12, n. 18, p. 7683, 17 set. 2020.
- ALMEIDA, J. H. S. et al. Hybridization effect on the mechanical properties of curaua/glass fiber composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 55, p. 492–497, 2013.
- ALMEIDA, J. H. S.; BITTRICH, L.; SPICKENHEUER, A. Improving the open-hole tension characteristics with variable-axial composite laminates: Optimization, progressive damage modeling and experimental observations. **Composites Science and Technology**, v. 185, n. October 2019, 2020.
- AMIANDAMHEN, S. O.; MEINCKEN, M.; TYHODA, L. Natural Fibre Modification and Its Influence on Fibre-matrix Interfacial Properties in Biocomposite Materials. **Fibers and Polymers**, v. 21, n. 4, p. 677–689, 2020a.
- AMIANDAMHEN, S. O.; MEINCKEN, M.; TYHODA, L. Natural Fibre Modification and Its Influence on Fibre-matrix Interfacial Properties in Biocomposite Materials. **Fibers and Polymers**, v. 21, n. 4, p. 677–689, 23 abr. 2020b.
- ANGRIZANI, C. C. et al. Thermal and Mechanical Investigation of Interlaminar Glass/Curaua Hybrid Polymer Composites. **Journal of Natural Fibers**, v. 14, n. 2, p. 271–277, 2017.
- ARAÚJO, K. DA S.; PEREIRA, H. DOS S. Políticas públicas e as fibras naturais: a experiência recente da cadeia produtiva da malva e juta amazônica. **Revista de Ciências Agrárias - Amazon Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 60, n. 1, p. 60–69, 2017.
- ARRABIYEH, P. A. et al. An overview on current manufacturing technologies: Processing continuous rovings impregnated with thermoset resin. **Polymer**

Composites, v. 42, n. 11, p. 5630–5655, nov. 2021.

ARULMURUGAN, M. et al. Effect of barium sulphate on mechanical, DMA and thermal behaviour of woven aloevera/flax hybrid composites. **Bulletin of Materials Science**, v. 43, n. 1, p. 58, dez. 2020.

BUCUR, V. **Acoustics of Wood**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006.

BUCUR, V. **Handbook of Materials for String Musical Instruments**. Cham: Springer International Publishing, 2016.

CALABRESE, L. et al. Experimental assessment of the improved properties during aging of flax/glass hybrid composite laminates for marine applications. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 47203, p. 47203, dez. 2018.

CALABRESE, L. et al. Pinned hybrid glass-flax composite laminates aged in salt-fog environment: Mechanical durability. **Polymers**, v. 12, n. 1, p. 1–14, 2020.

CAO, Z. et al. Research on buckling characteristics and placement processability of variable stiffness open-hole laminates. **Composites Part C: Open Access**, v. 7, p. 100233, 2022.

CAVALCANTI, D. K. K. et al. Mechanical characterization of intralaminar natural fibre-reinforced hybrid composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 175, n. May, p. 107149, out. 2019.

CÉLINO, A. et al. Qualitative and quantitative assessment of water sorption in natural fibres using ATR-FTIR spectroscopy. **Carbohydrate Polymers**, v. 101, p. 163–170, jan. 2014.

CHANDEKAR, H. et al. Effect of chemical treatment on mechanical properties and water diffusion characteristics of jute-polypropylene composites. **Polymer Composites**, v. 41, n. 4, p. 1447–1461, abr. 2020.

CHUAQUI, T. R. C. et al. Effects of ply angle and blocking on open-hole tensile strength of composite laminates: A design and certification perspective. **Composites Part B: Engineering**, v. 207, n. June 2020, p. 108582, 2021.

Concise Encyclopedia of Composite Materials. [s.l.] Elsevier, 1994.

CORREIA, N. C. et al. Analysis of the vacuum infusion moulding process: I. Analytical formulation. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 36, n. 12, p. 1645–1656, 2005.

COSTA, U. O. et al. Effect of Graphene Oxide Coating on Natural Fiber Composite for Multilayered Ballistic Armor. **Polymers**, v. 11, n. 8, p. 1356, 16 ago. 2019.

CRUZ-GONZÁLEZ, O. L. et al. Effective behavior of long and short fiber-reinforced

viscoelastic composites. **Applications in Engineering Science**, v. 6, n. February, 2021.

CUEBAS, L. et al. The incorporation of untreated and alkali-treated banana fiber in SEBS composites. **Polímeros**, v. 30, n. 4, 2020.

DA SILVA, A. A. X. et al. In-plane Permeability and Mechanical Properties of R-Glass/Aramid Hybrid Composites. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 29, n. 7, p. 4484–4492, 2020.

DA SILVA, L. V. et al. Short beam strength of curaua, sisal, glass and hybrid composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 32, n. 3, p. 197–206, 2013.

DAMODARAN, A. et al. Application of composite materials to the chenda, an Indian percussion instrument. **Applied Acoustics**, v. 88, p. 1–5, 2015.

DAMODARAN, A.; LESSARD, L.; SURESH BABU, A. An overview of fibre-reinforced composites for musical instrument soundboards. **Acoustics Australia**, v. 43, n. 1, p. 117–122, 2015a.

DAMODARAN, A.; LESSARD, L.; SURESH BABU, A. An Overview of Fibre-Reinforced Composites for Musical Instrument Soundboards. **Acoustics Australia**, v. 43, n. 1, p. 117–122, 4 abr. 2015b.

DELUCIS, R. DE A. et al. Forest-based resources as fillers in biobased polyurethane foams. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 135, n. 3, 15 jan. 2018.

DELUCIS, R. DE A. et al. In situ L-RTM manufacturing of sandwich panels with PET foam core reinforced by polymeric pins. **Journal of Sandwich Structures and Materials**, v. 23, n. 1, p. 241–254, 2021.

DIAS, T. DA C. et al. Experimental Investigation on the Mechanical and Physical Properties of Glass/Jute Hybrid Laminates. **Polymers**, v. 14, n. 21, p. 4742, 2022.

FIORE, V. et al. Bearing strength and failure behavior of pinned hybrid glass- fl ax composite laminates. **Polymer Testing**, v. 69, n. February, p. 310–319, 2018.

GALOS, J. Thin-ply composite laminates: a review. **Composite Structures**, v. 236, n. January, 2020.

GARAY, A. C. et al. Influence of calcium carbonate on RTM and RTM light processing and properties of molded composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 30, n. 14, p. 1213–1221, 2011.

GARAY, A. C.; SOUZA, J. A.; AMICO, S. C. Evaluation of mechanical properties of sandwich structures with polyethylene terephthalate and polyvinyl chloride core. **Journal of Sandwich Structures and Materials**, v. 18, n. 2, p. 229–241, 2016.

GHOLAMPOUR, A.; OZBAKKALOGLU, T. A review of natural fiber composites: properties, modification and processing techniques, characterization, applications. **Journal of Materials Science**, v. 55, n. 3, p. 829–892, 16 jan. 2020.

GOBI KANNAN, T.; WU, C. M.; CHENG, K. B. Influence of laminate lay-up, hole size and coupling agent on the open hole tensile properties of flax yarn reinforced polypropylene laminates. **Composites Part B: Engineering**, v. 57, p. 80–85, fev. 2014.

GUPTA, M.; DEEP, V. Effect of water absorption and stacking sequences on the properties of hybrid sisal/glass fibre reinforced polyester composite. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications**, v. 233, n. 10, p. 2045–2056, out. 2019.

GUPTA, S.; PAL, S.; RAY, B. C. An overview of mechanical properties and failure mechanism of FRP laminates with hole/cutout . **Journal of Applied Polymer Science**, n. September 2022, p. 1–20, 2023.

GURUNATHAN, T.; MOHANTY, S.; NAYAK, S. K. A review of the recent developments in biocomposites based on natural fibres and their application perspectives. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 77, p. 1–25, 2015.

HABIBI, M.; LAPERRIÈRE, L. Digital image correlation and acoustic emission for damage analysis during tensile loading of open-hole flax laminates. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 228, p. 106921, abr. 2020.

HARIHARAN, A. B. A.; KHALIL, H. P. S. A. Lignocellulose-based hybrid bilayer laminate composite: Part I - Studies on tensile and impact behavior of oil palm fiber-glass fiber-reinforced epoxy resin. **Journal of Composite Materials**, v. 39, n. 8, p. 663–684, 2005.

HE, W. et al. Experimental Investigation on Hygroscopic Aging of Glass Fiber Reinforced Vinylester Resin Composites. **Polymers**, v. 14, n. 18, p. 3828, set. 2022.

HIGUCHI, R. et al. Experimental and numerical study on progressive damage and failure in composite laminates during open-hole compression tests. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 145, n. September 2020, p. 106300, 2021.

HINDERSMANN, A. Confusion about infusion: An overview of infusion processes. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 126, p. 105583, nov. 2019.

ISOLDI, L. A. et al. Three-dimensional numerical modeling of RTM and LRTM processes. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and**

Engineering, v. 34, n. 2, p. 105–111, 2012.

JAWAID, M.; ABDUL KHALIL, H. P. S. Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: A review. **Carbohydrate Polymers**, v. 86, n. 1, p. 1–18, 2011.

JAYAMANI, E. et al. Investigation of fiber surface treatment on mechanical, acoustical and thermal properties of betelnut fiber polyester composites. **Procedia Engineering**, v. 97, p. 545–554, 2014.

JO, B.-W.; CHAKRABORTY, S. A mild alkali treated jute fibre controlling the hydration behaviour of greener cement paste. **Scientific Reports**, v. 5, n. 1, p. 7837, 16 jan. 2015.

JUMAHAT, A. et al. Fracture mechanisms and failure analysis of carbon fibre/toughened epoxy composites subjected to compressive loading. **Composite Structures**, v. 92, n. 2, p. 295–305, jan. 2010.

KAMANGAR, M. A.; SHOKRIEH, M. M. A novel model for quantification of the moisture absorption of polymeric laminated composites. **Polymer Testing**, v. 91, p. 106772, nov. 2020.

KAPATEL, P. M. Investigation of Green Composite: Preparation and Characterization of Alkali-Treated Jute Fabric-reinforced Polymer Matrix Composites. **Journal of Natural Fibers**, v. 0, n. 0, p. 1–10, 2019.

KAPATEL, P. M. Investigation of Green Composite: Preparation and Characterization of Alkali-Treated Jute Fabric-reinforced Polymer Matrix Composites. **Journal of Natural Fibers**, v. 18, n. 4, p. 510–519, 2021.

KC, B. et al. Thermal and Dimensional Stability of Injection-Molded Sisal-Glass Fiber Hybrid PP Biocomposites. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 26, n. 3, p. 1279–1289, 2018.

KHALID, M. Y. et al. Natural fiber reinforced composites: Sustainable materials for emerging applications. **Results in Engineering**, v. 11, p. 100263, set. 2021.

KHAN, M. K. A. et al. Enhanced Open-Hole Strength and Toughness of Sandwich Carbon-Kevlar Woven Composite Laminates. **Polymers**, v. 15, n. 10, p. 1–15, 2023.

LATIF, R. et al. Surface treatments of plant fibers and their effects on mechanical properties of fiber-reinforced composites: A review. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 38, n. 1, p. 15–30, 2019.

LAVORATTI, A. et al. Influence of Fibre Treatment on the Characteristics of Buriti and Ramie Polyester Composites. **Polymers and Polymer Composites**, v. 25, n. 4, p. 247–256, 1 maio 2017.

LEE, S.-H.; WANG, S. Biodegradable polymers/bamboo fiber biocomposite with bio-based coupling agent. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 37, n. 1, p. 80–91, jan. 2006.

LEE, S. K. et al. Effect of fiber orientation on acoustic and vibration response of a carbon fiber/epoxy composite plate: Natural vibration mode and sound radiation. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 117, p. 162–173, 2016.

LIU, D. et al. Numerical study on failure behavior of open-hole composite laminates based on LaRC criterion and extended finite element method. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 35, n. 3, p. 1037–1047, 2021.

LIU, J. et al. Experimental study of notched tensile strength of large open-hole carbon fiber reinforced polymer laminates at low temperature. **Composites Communications**, v. 39, n. December 2022, p. 101546, 2023.

MAMALIS, D.; FLOREANI, C.; Ó BRÁDAIGH, C. M. Influence of hygrothermal ageing on the mechanical properties of unidirectional carbon fibre reinforced powder epoxy composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 225, p. 109281, nov. 2021.

MOCHANE, M. J. et al. Recent progress on natural fiber hybrid composites for advanced applications: A review. **Express Polymer Letters**, v. 13, n. 2, p. 159–198, 2019.

MOHAN, T. P.; KANNY, K. Chemical treatment of sisal fiber using alkali and clay method. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 43, n. 11, p. 1989–1998, nov. 2012.

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**, v. 38, n. 7, p. 323–339, 11 abr. 2019.

NG, D. S. L. F.; LIM, S. M. L. K. T. Fatigue Life Behaviour of Glass / Kenaf Woven-Ply Polymer Hybrid Biocomposites. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 26, n. 2, p. 499–507, 2018.

NUNES, S. G. et al. The effect of thickness on vacuum infusion processing of aramid/epoxy composites for ballistic application. **Journal of Composite Materials**, v. 53, n. 3, p. 383–391, fev. 2019.

OMRAN, A. A. B. et al. Micro-and nanocellulose in polymer composite materials: A review. **Polymers**, v. 13, n. 2, p. 1–30, 2021.

ONO, T. Frequency responses of wood for musical instruments in relation to the vibrational properties. **Journal of the Acoustical Society of Japan (E) (English**

translation of Nippon Onkyo Gakkaishi), v. 17, n. 4, p. 183–193, 1996.

ONO, T.; ISOMURA, D. Acoustic characteristics of carbon fiber-reinforced synthetic wood for musical instrument soundboards. **Acoustical Science and Technology**, v. 25, n. 6, p. 475–477, 2004.

ONO, T.; MIYAKOSHI, S.; WATANABE, U. Acoustic characteristics of unidirectionally fiber-reinforced polyurethane foam composites for musical instrument soundboards. **Acoustical Science and Technology**, v. 23, n. 3, p. 135–142, 2002.

ORNAGHI, H. L. et al. Mechanical and dynamic mechanical analysis of hybrid composites molded by resin transfer molding. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 118, n. 2, p. n/a-n/a, out. 2010.

ORNAGHI, H. L. J. et al. Dynamic Mechanical Properties of Curaua Composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 116, n. 5, p. 2658–2667, 2012.

ORNAGHI JR, H. L.; ZATTERA, A. J.; AMICO, S. C. Thermal behavior and the compensation effect of vegetal fibers. **Cellulose**, v. 21, n. 1, p. 189–201, fev. 2014.

ORNAGHI JÚNIOR, H. L. et al. Chemical composition, tensile properties and structural characterization of buriti fiber. **Cellulose Chemistry and Technology**, v. 50, n. 1, p. 15–22, 2016.

ORRABALIS, C. et al. Characterization of Nanocellulose Obtained from *Cereus Forbesii* (a South American cactus). **Materials Research**, v. 22, n. 6, 2019.

ÖZASLAN, E. et al. Damage mode identification of open hole composite laminates based on acoustic emission and digital image correlation methods. **Composite Structures**, v. 274, n. February, 2021.

PANTHAPULAKKAL, S.; SAIN, M. Injection-molded short hemp fiber/glass fiber-reinforced polypropylene hybrid composites—Mechanical, water absorption and thermal properties. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 103, n. 4, p. 2432–2441, fev. 2007.

PATIL, S.; MALLIKARJUNA REDDY, D. Impact damage assessment in carbon fiber reinforced composite using vibration-based new damage index and ultrasonic C-scanning method. **Structures**, v. 28, n. July, p. 638–650, 2020.

PHILLIPS, S.; LESSARD, L. Application of natural fiber composites to musical instrument top plates. **Journal of Composite Materials**, v. 46, n. 2, p. 145–154, 2012.

PRABHU, L. et al. Mechanical, chemical and acoustical behavior of sisal - Tea waste - Glass fiber reinforced epoxy based hybrid polymer composites. **Materials Today: Proceedings**, v. 16, p. 653–660, 2019.

RAMESH, P.; PRASAD, B. D.; NARAYANA, K. L. Effect of MMT Clay on Mechanical, Thermal and Barrier Properties of Treated Aloe Vera Fiber/ PLA-Hybrid Biocomposites. **Silicon**, v. 12, n. 7, p. 1751–1760, 2020.

RAYYAAN, R. et al. Fibre architecture modification to improve the tensile properties of flax-reinforced composites. **Journal of Composite Materials**, v. 54, n. 3, p. 379–395, 2020.

REINER, J. et al. Damage resistance and open-hole strength of thin veneer laminates: Adopting design and testing principles from fibre-reinforced polymers. **Engineering Failure Analysis**, v. 143, n. PA, p. 106880, 2023.

RIBEIRO, G. O. et al. Mining the rumen for fibrolytic feed enzymes. **Animal Frontiers**, v. 6, n. 2, p. 20–26, abr. 2016.

RIBEIRO, M. M. et al. Comparison of Young's Modulus of Continuous and Aligned Lignocellulosic Jute and Mallow Fibers Reinforced Polyester Composites Determined Both Experimentally and from Theoretical Prediction Models. **Polymers**, v. 14, n. 3, p. 401, 20 jan. 2022.

ROMANZINI, D. et al. Influence of fiber content on the mechanical and dynamic mechanical properties of glass/ramie polymer composites. **Materials & Design**, v. 47, p. 9–15, maio 2013.

ROUF, K.; DENTON, N. L.; FRENCH, R. M. Effect of fabric weaves on the dynamic response of two-dimensional woven fabric composites. **Journal of Materials Science**, v. 52, n. 17, p. 10581–10591, set. 2017.

SABA, N.; TAHIR, P. M.; JAWAID, M. A review on potentiality of nano filler/natural fiber filled polymer hybrid composites. **Polymers**, v. 6, n. 8, p. 2247–2273, 2014.

SAJID, Z. et al. Analytical Method for the Optimization of the Open-Hole and Filled-Hole Laminates at the Preliminary Design Stage. **Materials**, v. 16, n. 6, p. 2213, 2023.

SANCHEZ, E. M. S.; ZAVAGLIA, C. A. C.; FELISBERTI, M. I. Unsaturated polyester resins: Influence of the styrene concentration on the miscibility and mechanical properties. **Polymer**, v. 41, n. 2, p. 765–769, 2000.

SATHIYAMOORTHY, M.; SENTHILKUMAR, S. Mechanical, thermal, and water absorption behaviour of jute/carbon reinforced hybrid composites. **Sādhanā**, v. 45, n. 1, p. 278, dez. 2020.

SENTHIL, K. et al. Defects in composite structures: Its effects and prediction methods – A comprehensive review. **Composite Structures**, v. 106, p. 139–149, dez. 2013.

SENTHILKUMAR, K. et al. Evaluation of mechanical and free vibration properties of

the pineapple leaf fibre reinforced polyester composites. **Construction and Building Materials**, v. 195, p. 423–431, jan. 2019.

SERNA MORENO, M. C.; HORTA MUÑOZ, S. Pseudo-ductile effects in $\pm 45^\circ$ angle-ply CFRP laminates under uniaxial loading: Compression and cyclic tensile test. **Composites Part B: Engineering**, v. 233, p. 109631, mar. 2022.

SEVER, K. et al. Surface treatments of jute fabric: The influence of surface characteristics on jute fabrics and mechanical properties of jute/polyester composites. **Industrial Crops and Products**, v. 35, n. 1, p. 22–30, jan. 2012.

SHAMEY, R.; SAWATWARAKUL, W. Innovative critical solutions in the dyeing of protein textile materials. **Textile Progress**, v. 46, n. 4, p. 323–450, 2 out. 2014.

SHARMA, S. K.; SHUKLA, S. R.; RAO, R. V. Performance evaluation of musical instruments using computer controlled test setup. **Journal of the Indian Academy of Wood Science**, v. 8, n. 2, p. 158–160, 2011.

SHI, J.; TONG, M. Multi-Scale Nonlinear Progressive Damage and Failure Analysis for Open-Hole Composite Laminates. **Aerospace**, v. 9, n. 2, 2022.

SHIH, Y. F. et al. Pineapple leaf/recycled disposable chopstick hybrid fiber-reinforced biodegradable composites. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 45, n. 4, p. 2039–2046, 2014.

SHUBHRA, Q. T.; ALAM, A.; QUAIYYUM, M. Mechanical properties of polypropylene composites. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, v. 26, n. 3, p. 362–391, abr. 2013.

SIKENG, R. et al. Alkali treated coir/pineapple leaf fibres reinforced PLA hybrid composites: Evaluation of mechanical, morphological, thermal and physical properties. **Express Polymer Letters**, v. 14, n. 8, p. 717–730, 2020.

SIDDIKA, S.; MANSURA, F.; HASAN, M. Physico-mechanical properties of jute-coir fiber reinforced hybrid polypropylene composites. **International Journal of Chemical, Materials Science and Engineering**, v. 7, n. 1, p. 41–45, 2013.

SINGH, J. I. P.; SINGH, S.; DHAWAN, V. Effect of alkali treatment on mechanical properties of jute fiber-reinforced partially biodegradable green composites using epoxy resin matrix. **Polymers and Polymer Composites**, v. 28, n. 6, p. 388–397, 9 jul. 2020.

SOOD, M.; DWIVEDI, G. Effect of fiber treatment on flexural properties of natural fiber reinforced composites: A review. **Egyptian Journal of Petroleum**, v. 27, n. 4, p. 775–783, dez. 2018.

SPROSSMANN, R.; ZAUER, M.; WAGENFÜHR, A. Characterization of acoustic and

mechanical properties of common tropical woods used in classical guitars. **Results in Physics**, v. 7, p. 1737–1742, 2017.

SUJON, M. A. S.; HABIB, M. A.; ABEDIN, M. Z. Experimental investigation of the mechanical and water absorption properties on fiber stacking sequence and orientation of jute/carbon epoxy hybrid composites. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 5, p. 10970–10981, set. 2020.

SUN, J. et al. Strain rate effects on dynamic tensile properties of open-hole composite laminates. **Composites Communications**, v. 19, n. April, p. 226–232, 2020.

SUN, Q. et al. A combined experimental and computational analysis of failure mechanisms in open-hole cross-ply laminates under flexural loading. **Composites Part B: Engineering**, v. 215, n. March, p. 108803, 2021.

SURIANI, M. J. et al. Delamination and Manufacturing Defects in Natural Fiber-Reinforced Hybrid Composite: A Review. **Polymers**, v. 13, n. 8, p. 1323, abr. 2021.

TAKAMOTO, K. et al. Experimental and numerical studies of the open-hole compressive strength of thin-ply CFRP laminates. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 145, n. February, p. 106365, 2021.

TANASĂ, F. et al. Modified hemp fibers intended for fiber-reinforced polymer composites used in structural applications—A review. I. Methods of modification. **Polymer Composites**, v. 41, n. 1, p. 5–31, 10 jan. 2020.

WANG, M.; HANG, X. Modified Micro-Mechanics Based Multiscale Model for Damage Analysis of Open-Hole Composite Laminates under Compression. **Materials**, v. 15, n. 15, 2022.

XIAO, M. et al. Tensile failure analysis and residual strength prediction of CFRP laminates with open hole. **Composites Part B: Engineering**, v. 126, p. 49–59, out. 2017.

XU, D. et al. Analysis of the hybrid composite materials reinforced with natural fibers considering digital image correlation (DIC) measurements. **Mechanics of Materials**, v. 135, n. May, p. 46–56, 2019.

YANG, Y. et al. Recycling of composite materials. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 51, p. 53–68, jan. 2012.

YASIR, M. et al. Results in Engineering Tensile strength evaluation of glass / jute fibers reinforced composites: An experimental and numerical approach. **Results in Engineering**, v. 10, n. December 2020, p. 100232, 2021.

YENILMEZ, B.; SENAN, M.; MURAT SOZER, E. Variation of part thickness and

compaction pressure in vacuum infusion process. **Composites Science and Technology**, v. 69, n. 11–12, p. 1710–1719, 2009.

YUE, Y.; HAN, G.; WU, Q. Transitional properties of cotton fibers from cellulose I to cellulose II structure. **BioResources**, v. 8, n. 4, p. 6460–6471, 2013.

ZAH, R. et al. Curauá fibers in the automobile industry - a sustainability assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 15, n. 11–12, p. 1032–1040, 2007.

ZHANG, D.; ZHENG, X.; WU, T. Damage characteristics of open-hole laminated composites subjected to longitudinal loads. **Composite Structures**, v. 230, n. January, p. 111474, 2019.

ZHENG, K. et al. Experimental and numerical studies on the tensile behaviors of thin-ply and thick-ply open-hole laminates. **Thin-Walled Structures**, v. 186, p. 110649, maio 2023.

ZIMMERMANN, N.; WANG, P. H. A review of failure modes and fracture analysis of aircraft composite materials. **Engineering Failure Analysis**, v. 115, p. 104692, set. 2020.