


# Compósitos termorrígidos vegetais: absorção de água e retenção das propriedades mecânicas após intemperismo

*Plant-derived thermosetting composites: water absorption and mechanical properties retention after weathering*

Bernardo Zandomenico Dias 

Cristina Engel de Alvarez 

Leila Cristina Meneghetti 

Arthur Hunold Lara 

## Resumo

**B**uscando ampliar a aplicação dos compósitos termorrígidos, esta pesquisa objetiva identificar as bioresinas e biofibras mais resistentes às intempéries, contribuindo para seu uso externo. Foram levantadas pesquisas experimentais sobre compósitos com matriz sintética ou vegetal e fibras vegetais ou híbridas, com diferentes processos de moldagem, geometrias de reforço, alinhamento e tratamento das fibras e frações fibras/matriz. Buscou-se trabalhos que estudaram as resistências à tração e à flexão; a absorção de água dos compósitos em 24h de imersão e até a saturação; e sua retenção da resistência mecânica após envelhecimento. Investigou-se a influência do tipo de matriz e de fibra e de suas frações nessas propriedades. Resultados indicam que compósitos de matriz vegetal absorvem menos água em 24h, e que compósitos com linho, sisal ou cânhamo possuem a menor absorção de água na saturação e maior retenção da resistência à tração após o envelhecimento. Isto é, aparentemente esses compósitos sofrem menos danos devido às intempéries, possuindo maior potencial para uso externo. Mas, independentemente da fibra, conforme sua quantidade aumenta, diminui a retenção da resistência à flexão dos compósitos, limitando sua aplicação.

**Palavras-chave:** Biopolímero. Biofibra. Termorrígido. Durabilidade. Degradação.

## Abstract

*In order to widen the application fields of thermosetting composites, this research aims to identify the bioresins and biofibers more resistant to weathering, enabling their use outdoors. Data were collected from experimental research on composites made from synthetic or plant-derived matrix with plant or hybrid fibers, and using various molding processes, reinforcement geometries, alignment and treatment of fibers and fiber/matrix fractions. The investigation searched for researches that studied the composites tensile and flexural strengths; their water absorption in 24 hours of immersion and until saturation; and their retention of mechanical strength after aging. The effect of matrix and fiber types and their fractions on these properties was studied. Results indicate that composites with plant-derived matrix absorb less water in 24h, and that composites with flax, sisal or hemp have the lowest water absorption at saturation and the greater retention of tensile strength after aging. In other words, apparently these composites are less prone to weathering and thus have potential for outdoor use. However, regardless of the fiber type, as its content increases, the retention of flexural strength of composites decreases, limiting their usage in some applications.*

**Keywords:** Biopolymer. Biofiber. Thermoset. Durability. Degradation.

<sup>1</sup>Bernardo Zandomenico Dias

<sup>1</sup>Universidade de São Paulo  
São Paulo - SP - Brasil

<sup>2</sup>Cristina Engel de Alvarez

<sup>2</sup>Universidade Federal do Espírito Santo  
Vitória - ES - Brasil

<sup>3</sup>Leila Cristina Meneghetti

<sup>3</sup>Universidade de São Paulo  
São Paulo - SP - Brasil

<sup>4</sup>Arthur Hunold Lara

<sup>4</sup>Universidade de São Paulo  
São Paulo - SP - Brasil

Recebido em 23/09/22

Aceito em 26/09/23

## Introdução

Quando produzidos com fibras sintéticas – como fibras de vidro, aramida e carbono –, os compósitos termorrígidos podem resistir às intempéries por vários anos, alterando de forma pouco significativa as suas propriedades (Kuruvilla *et al.*, 2021). Essa característica é fundamental para que sejam amplamente empregados em mobiliário e equipamentos urbanos, bem como em componentes construtivos para áreas externas, como bancos, abrigos em pontos de ônibus (Bellini, 2008), abrigos para guarda-vidas, cabines telefônicas (Bellini, 2008), cabines de vigilantes, quiosques (Montenegro, 2005) e sombreadores em fachadas de edifícios (Miguel; Diaz, 2015). Por terem alta resistência mecânica, suportam elevadas cargas com pequena quantidade de material, tornando os seus produtos leves e de fácil transporte (BAI, 2013). Porém, a preocupação crescente com a escassez de recursos naturais e com a geração e acúmulo de resíduos nas cidades também fez aumentar o interesse pelos polímeros e fibras de origem vegetal (Al-Oqla; Salit, 2017; Ray, 2017). As fibras sintéticas são de fonte não renovável, de elevada densidade, caras (Haghdan; Smith, 2015) e podem irritar a pele quando manipuladas, o que incentivou o estudo de sua substituição por fibras naturais (Ku *et al.*, 2011).

Dentre os polímeros, alguns de amplo emprego em compósitos são o epóxi, o poliéster insaturado e o poliuretano, ou PU (Khan *et al.*, 2021; Mizi; Feng, 2017). De maior custo, mas melhores propriedades mecânicas e maior resistência química e à corrosão, a resina epóxi é muito empregada nas indústrias aeroespacial e automobilística e, apesar de ser mais resistente ao ambiente marinho do que a resina poliéster, esta domina a indústria náutica em embarcações de até cerca de 20m devido ao seu baixo custo (Bai, 2013). A resina poliéster também é muito empregada na construção civil em componentes como telhas, conexões, vigas e esquadrias, enquanto a epóxi encontra espaço em compósitos reforçados por fibras sintéticas destinados a reforçar estruturas de concreto e de alvenaria e a substituir suas barras metálicas (armaduras) (Bai, 2013). Já o PU é atualmente muito utilizado como matriz em materiais compósitos reforçados por fibras vegetais devido à sua maior compatibilidade química com esse tipo de material, tendo como aplicação peças automotivas (Jawaid; Thariq; Saba, 2019; Ray, 2017).

Ao contrário dos polímeros termorrígidos sintéticos, os de origem vegetal (chamados de bioresinas ou biopolímeros) possuem, pelo menos parcialmente, componentes de origem renovável (Auvergne *et al.*, 2014), reduzindo o consumo de polímeros de fonte não-renovável, como os produzidos a partir do petróleo (Ray, 2017), e a liberação de substâncias tóxicas ao meio ambiente, como ocorre quando estes são incinerados (Al-Oqla; Salit, 2017). Já as fibras vegetais (biofibras) também possuem origem renovável, decompõem-se facilmente no meio-ambiente (Al-Oqla; Salit, 2017; Kuruvilla *et al.*, 2021), são mais baratas quando comparadas às fibras sintéticas (Haghdan; Smith, 2015) e não irritam a pele quando manipuladas (Venkateshwaran; Elayaperumal; Sathiya, 2012). Também vale destacar que sua produção gera emprego e renda para comunidades em regiões ligadas ao cultivo de diversas espécies de plantas, como por exemplo, o caroá (Bezerra, 2014) e o sisal (Sousa, 2013) no Nordeste brasileiro; o abacaxi também no Nordeste, mas especialmente na Paraíba (Correia, 2011); e o coco na Índia (Wiedman, 2002). Há também aquelas coletadas artesanalmente em espécimes vegetais existentes na natureza, como as fibras de tururi (*Manicaria saccifera Gaertn.*), apanhadas por ribeirinhos da região amazônica (Monteiro *et al.*, 2021), mas ainda pouco conhecida no campo dos materiais compósitos (Seyam *et al.*, 2017).

As principais características técnicas das fibras vegetais aplicadas na produção de compósitos termorrígidos são a baixa densidade e a elevada resistência mecânica específica (razão da resistência mecânica do material pela sua densidade), propiciando a produção de componentes leves e resistentes mecanicamente (Kuruvilla *et al.*, 2021). Quando empregados no interior de edificações ou veículos, por exemplo, os compósitos com fibras vegetais podem substituir adequadamente seus similares com fibras sintéticas, já havendo diversas peças automotivas feitas com fibras provenientes do sisal (*Agave sisalana*), do linho (*Linum usitatissimum*) e da folha de bananeira (*Musa indica*) (Barba; Madrid; Penaloza Junior, 2020; John; Thomas, 2008; Kuruvilla *et al.*, 2021). Porém, as fibras vegetais são hidrofílicas, o que tende a reduzir a resistência mecânica e a durabilidade dos compósitos que têm contato com água ou umidade, sendo essa uma das principais preocupações e objeto de pesquisa na área atualmente (Barba; Madrid; Penaloza Junior, 2020; Haghdan; Smith, 2015; Ramesh, 2019).

Assim, por meio de análise da produção científica, esta pesquisa objetivou identificar as matrizes termorrígidas e as fibras de origem vegetal passíveis de serem utilizadas na produção de compósitos que apresentam maior capacidade de resistir às intempéries e, com isso, contribuir para sua aplicação em áreas externas.

## Metodologia

Para a realização do levantamento das publicações referentes ao assunto, foram considerados dois aspectos fundamentais: a confiabilidade da fonte e a pertinência do conteúdo em relação ao objetivo previamente definido. Assim, foram selecionadas as bases Scielo, Google Acadêmico, Scopus e Web of Science, sendo as duas últimas acessadas por meio do Portal de Periódicos da Capes (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior).

Sendo um tema relativamente recente, optou-se por não fazer um recorte temporal, descartando-se algum eventual resultado cujo conteúdo se mostrasse ultrapassado.

Ainda considerando os objetivos do trabalho, optou-se por realizar a pesquisa através de palavras chaves, sendo inicialmente realizados alguns testes aleatórios que culminaram na escolha dos seguintes termos: “biopolímero ou biocompósito e envelhecimento ou intempérie”, “compósito e polímero ou resina e envelhecimento ou intempérie”, “compósito e fibra vegetal e envelhecimento ou intempérie”, “*thermoset and natural fiber and weathering or ageing*”, “*biocomposite or biopolymer and absorption or water*”, “termorrígido e intempérie ou envelhecimento”, “*epoxy or polyester or polyurethane and weathering or ageing and mechanical*” e “*epoxy or polyester or polyurethane and composite and absorption or water*”.

Foram selecionadas especialmente publicações que relataram resultados ou processos oriundos de pesquisas científicas experimentais (artigos, dissertações e teses) sobre compósitos termorrígidos com matriz sintética ou vegetal e fibras vegetais ou híbridas (sintéticas/vegetais ou vegetais/vegetais), sendo eles produzidos com diferentes processos de moldagem, geometrias de reforço, alinhamentos e tratamentos das fibras vegetais e frações mássicas fibras/matriz (Quadro 1). Os dados obtidos foram sistematizados objetivando a posterior análise comparativa.

O levantamento buscou trabalhos que estudaram as resistências à tração e à flexão; a absorção de água dos compósitos em 24h de imersão e até a saturação; e os que realizaram ensaios de envelhecimento acelerado ou natural, buscando verificar sua capacidade de retenção das resistências mecânicas. Em síntese, objetivou-se identificar, comparativamente, a efetiva resistência à tração e à flexão dos compósitos termorrígidos após exposição às intempéries. Destaca-se que essas propriedades são fundamentais para a aplicação dos compósitos em componentes construtivos voltados para uso em áreas externas, tendo em vista as cargas mecânicas e as intempéries a que estarão submetidos.

Um recorte adicional na pesquisa foi em relação ao tipo de polímero do compósito, sendo considerados no levantamento os de matriz epóxi, poliéster insaturado e poliuretano (PU), uma vez que são muito empregados em compósitos e também já produzidos a partir de vegetais. Considerou-se compósitos reforçados com quaisquer fibras vegetais e híbridas (Quadro 1).

Quando a fração mássica fibra/matriz não foi claramente apresentada nos estudos, foi realizado o cálculo de forma aproximada a partir da Regra das Misturas, utilizando os dados fornecidos pelo próprio estudo juntamente com os oriundos da literatura, especificamente os relacionados à densidade dos polímeros e das fibras empregadas.

Foram incluídos alguns trabalhos sobre compósitos com fibras de vidro para comparação (Quadro 1). Os nomes científicos e a parte da planta de onde foram retiradas as fibras vegetais apresentadas no Quadro 1 são listadas no Quadro 2.

No levantamento inicial, foram selecionadas cerca de 70 publicações que, após os recortes e limitações estabelecidos, bem como alguns procedimentos adicionais necessários verificados durante o processo de coleta de dados, culminaram em 36 títulos efetivamente avaliados, cujos conteúdos foram sistematizados de acordo com o conteúdo de interesse, conforme a seguir detalhado.

Quadro 1 - Características dos compósitos considerados na pesquisa

Matriz		Fibra		
Vegetal – % de origem vegetal <sup>1</sup>	Sintética	Vegetal	Sintética	Híbrida
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Epóxi               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 21-30, 36-42, 40, 60 e 75</li> <li>○ Não relatado (2/9)</li> </ul> </li> <li>• Poliéster insaturado               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 0-20, 12 e 22</li> <li>○ Não relatado (2/6)</li> </ul> </li> <li>• Poliuretana               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Não relatado (5/5)</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Epóxi</li> <li>• Poliéster insaturado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abacaxi</li> <li>• Banana</li> <li>• Cânhamo<sup>2</sup></li> <li>• Coco</li> <li>• Caroá</li> <li>• Juta</li> <li>• Kenaf<sup>3</sup></li> <li>• Linho</li> <li>• Sisal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vidro</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Banana/Sisal</li> <li>• Cânhamo/Sisal</li> <li>• Kenaf/Sisal</li> <li>• Vidro/Bambu</li> </ul>
Moldagem	Geometria do reforço	Alinhamento do reforço	Tratamento das fibras	
Infusão a vácuo Laminação manual Laminação a vácuo Prensagem	Fibras curtas Fibras longas Tecidos	Aleatório Unidirecional Bidirecional	Inexistente Soluções aquosas <ul style="list-style-type: none"> <li>• 2,5 a 7% NaOH</li> <li>• 2,5% NaOH a 35-45°C</li> <li>• 7% NaOH</li> <li>• 10% NaOH</li> <li>• 2% Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> e 5% NaOH</li> </ul>	

**Nota:** <sup>1</sup>foi considerada matriz vegetal aquela com qualquer percentual de origem vegetal em sua composição. Os valores apresentados abaixo de cada tipo de matriz foram retirados ou calculados com base nos estudos levantados e dizem respeito ao percentual da massa da matriz produzido a partir de matérias-primas de origem vegetal. Exemplificando, alguns estudos levantados relataram empregar um sistema epóxi com percentual de origem vegetal entre 21 e 30%; outros de 60%; outros não relataram o percentual, e assim por diante. A fração entre parênteses refere-se ao quantitativo de estudos que não relataram o percentual de origem vegetal em relação ao total de estudos sobre a respectiva matriz.

<sup>2</sup>dois dos compósitos com fibras de cânhamo possuem 1,5%, em massa, de nanoargila em sua composição (Haq *et al.*, 2008). Os autores relatam que seu uso almejou melhorar a rigidez e as propriedades térmicas do compósito e dificultar o encontro da umidade com as fibras vegetais existentes na matriz (Haq *et al.*, 2008).

<sup>3</sup>alguns compósitos com fibras de kenaf possuem 20%, em massa, de carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) em pó em sua composição (Williams *et al.*, 2013). Os autores não relatam o motivo de seu uso, porém, o CaCO<sub>3</sub> é geralmente utilizado para reduzir a retração do compósito e controlar a viscosidade da matriz polimérica (Khan *et al.*, 2021).

Quadro 2 - Fibras vegetais dos compósitos levantados e a parte da planta de onde foram retiradas

Nome popular	Nome científico	Origem (parte da planta)
Abacaxi	<i>Ananas comosus</i>	Folha
Bambu	<i>Dendrocalamus giganteus</i>	Gramma
Banana	<i>Musa indica</i>	Folha
Cânhamo	<i>Cannabis sativa</i>	Folha
Coco	<i>Cocos nucifera</i>	Fruto
Caroá	<i>Neoglaziovia variegata</i>	Folha
Juta	<i>Corchorus capsularis</i>	Talo/caule
Kenaf	<i>Hibiscus cannabinus</i>	Talo/caule
Linho	<i>Linum usitatissimum</i>	Talo/caule
Sisal	<i>Agave sisalana</i>	Folha

## Absorção de água, envelhecimento e propriedades mecânicas: condições e normas técnicas

Foram selecionados os conteúdos das publicações que apresentaram dados sobre absorção de água após imersão em 24h e/ou até a saturação. Os períodos de envelhecimento e os agentes de degradação aos quais os compósitos foram submetidos variaram entre os estudos. No caso de envelhecimento natural, os períodos de exposição foram de 6 e 43 meses e os climas aos quais os materiais foram expostos foram distintos. No caso de envelhecimento acelerado, a exposição dos materiais variou de algumas semanas a 6 meses e incluiu

imersão em água, exposição a raios ultravioleta (UV) e a diferentes umidades relativas do ar (UR), conforme Quadro 3.

Alguns valores de absorção de água e de resistência à tração e à flexão foram extraídos de gráficos existentes nos estudos analisados quando esses não apresentaram texto ou tabelas com os valores exatos. Assim, parte dos valores marcados nos gráficos desta pesquisa são aproximações daqueles das pesquisas originais, podendo haver pequenas diferenças entre eles.

Os estudos considerados empregaram diferentes normas técnicas para a realização dos ensaios. No caso da absorção de água, por exemplo, alguns adotaram a D570, *Standard test method for water absorption of plastics* (ASTM, 2022), enquanto outros, a D5229, *Standard test method for moisture absorption properties and equilibrium conditioning of polymer matrix composite materials* (ASTM, 2020), a D2842, *Standard test method for water absorption of rigid cellular plastics* (ASTM, 2019) ou a ISO 62, *Plastics – Determination of water absorption* (ISO, 2008). Outros, ainda, explicaram os procedimentos adotados, mas não relataram o uso de nenhuma norma técnica.

Desse modo, pode haver variações nos valores das frações fibra/matriz e das propriedades analisadas entre os estudos apresentados devido ao uso de diferentes normas técnicas na condução dos ensaios. No entanto, essas pequenas possíveis variações não interferem no objetivo desta pesquisa, cujo resultado esperado é identificar tendências gerais de comportamento dos materiais analisados.

Nesta fase da pesquisa foram utilizados os dados referentes ao tipo de matriz, tipo de fibra e suas frações, buscando compreender a influência de cada uma dessas três variáveis na absorção de água em 24h e na saturação, bem como na retenção da resistência à tração e à flexão dos compósitos. Assim, os dados obtidos foram categorizados conforme essas variáveis, objetivando identificar as tendências de comportamento dos materiais.

**Quadro 3 - Processos de envelhecimento dos compósitos conforme o tipo de matriz e fibras empregados - os campos com “X” ou sombreados indicam, respectivamente, que os compósitos foram testados à tração ou à flexão após o envelhecimento**

Matriz	Natural		Acelerado																					
	Local		Imersão							Combinações														
	Porto Alegre, Brasil	Lecece, Itália	Água a 20°C	Água a 23°C	Água a 25°C	Água a 37,8°C	Água a 40°C	Água a 50°C	Água a 60°C	20% UR, 50°C	50% UR, 20°C	50% UR, 60°C	75% UR, 60°C	75% UR, 70°C	90% UR, 15°C	90% UR, 20°C	90% UR, 40°C	90% UR, 60°C	30% UR, 48°C e UV	UR <sup>1</sup> , 48°C e UV	UR <sup>1</sup> , 50°C e UV	UR <sup>1</sup> , 50/60°C e UV	100% UR, 50°C e UV	
Epóxi vegetal			X	X			X	X		X	X	X							X	X				
Poliéster vegetal																							X	
PU vegetal															X									
Epóxi sintético				X		X		X	X							X	X	X				X		X
Poliéster sintético	X			X	X			X																
<b>Fibra</b>																								
Cânhamo																					X	X		
Coco																								X
Caroá					X			X																X
Juta																								
Kenaf																								X
Linho			X	X		X	X		X		X	X	X			X	X	X						
Sisal																			X	X				
Vidro				X					X															
Cânhamo/Sisal																						X		
Kenaf/Sisal																			X					
Vidro/Bambu				X																				

Nota: <sup>1</sup>o estudo não informou o valor da umidade relativa empregada no ensaio de envelhecimento.

## Composições e condições excluídas da análise

Foram excluídas pesquisas sobre materiais com fração mássica de resina entre 0 e 30%, como aquelas sobre chapas e painéis de madeira aglomerada, nos quais o polímero atua como adesivo, interligando as cargas/fibras (ABNT, 2013, 2014), mas não possuindo a função de envolvê-las e protegê-las de agentes de degradação, como é função de uma matriz (Al-Oqla; Salit, 2017). Também foram desconsiderados os estudos que não forneceram dados suficientes para o cálculo das frações mássicas.

Foram também descartados os trabalhos cujo processo de envelhecimento destoava das condições comumente encontradas em áreas externas, isto é, desconsiderou-se, por exemplo, trabalhos cujo envelhecimento submeteu os materiais a substâncias como ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), hidróxido de sódio (NaOH ou soda cáustica) e a temperaturas do ar acima dos 60 °C. Também foi excluído um trabalho que expôs os compósitos a água marinha, pois apesar de ser uma condição presente em regiões litorâneas, não foram encontrados trabalhos semelhantes, o que poderia causar discrepâncias nas análises. Ao final, chegou-se aos 36 trabalhos utilizados na elaboração das análises, dos quais 16 tratam de absorção de água, 13 de retenção das propriedades mecânicas e 7 de ambos os temas.

Os Quadros 4 e 5 apresentam os trabalhos utilizados no levantamento de dados sobre a influência do tipo de matriz termorrígida e de fibra na absorção de água dos compósitos em 24h de imersão e até a saturação, e na sua capacidade de retenção das resistências à tração e à flexão, para posterior elaboração dos gráficos das Figuras 1 a 6 apresentadas nos resultados e discussão.

## Resultados e discussão

### Influência da matriz termorrígida e do tipo de fibra na absorção de água dos compósitos em 24h e até a saturação

A absorção de água de um compósito influencia fortemente seu envelhecimento e desempenho mecânico ao longo do tempo. Por exemplo, a redução do módulo de elasticidade e da resistência à tração dos compósitos pode ser causada pela plasticização (amolecimento) da matriz polimérica gerada pela ação da água (Scida *et al.*, 2013). Ainda, o desempenho mecânico dos compósitos é diretamente proporcional à eficiência da interação fibra/matriz, que reduz o contato das moléculas de água com as fibras vegetais (Islam; Pickering; Foreman, 2011) e sofre danos quando o compósito absorve água (Assarar *et al.*, 2011).

Quadro 4 - Referências utilizadas no levantamento de dados sobre a absorção de água dos compósitos em 24h de imersão e até a saturação

Matriz	Referências – Absorção em 24h (Figura 1)	Referências – Absorção até a saturação (Figura 2)
Epóxi sintético	Assarar <i>et al.</i> (2011), Ferreira <i>et al.</i> (2016), Li e Xue (2016), Mannberg, Nyström e Joffe (2014), Masoodi e Pillai (2012), Venkatesha, Saravanan e Anand Babu (2020) e Yan, Chouw e Jayaraman (2015)	Assarar <i>et al.</i> (2011), Ferreira <i>et al.</i> (2016), Li e Xue (2016), Mannberg, Nyström e Joffe (2014), Masoodi e Pillai (2012), Venkatesha, Saravanan e Anand Babu (2020) e Venkateshwaran <i>et al.</i> (2011)
Epóxi vegetal	Dominguez (2016), Mannberg, Nyström e Joffe (2014), Masoodi e Pillai (2012) e Thiagamani <i>et al.</i> (2019)	Di Landro e Janszen (2014), Dominguez (2016), Mannberg, Nyström e Joffe (2014), Masoodi e Pillai (2012), Thiagamani <i>et al.</i> (2019), Viretto e Galy (2018) e Yorseng <i>et al.</i> (2020)
Poliéster sintético	Ali <i>et al.</i> (2020), Paul, Kanny e Redhi (2015) e Williams <i>et al.</i> (2013)	Ali <i>et al.</i> (2020), Haq <i>et al.</i> (2008), Hosur, Maroju e Jeelani (2015), Paul, Kanny e Redhi (2015) e Williams <i>et al.</i> (2013)
Poliéster vegetal	Mannberg, Nyström e Joffe (2014), Paul, Kanny e Redhi (2015) e Williams <i>et al.</i> (2013)	Hosur, Maroju e Jeelani (2015), Mannberg <i>et al.</i> (2014), Mannberg, Nyström e Joffe (2014), Paul, Kanny e Redhi (2015) e Williams <i>et al.</i> (2013)
PU vegetal	Faria <i>et al.</i> (2020), Merlini (2011), Negrão, Pinto e Silva (2020) e Silva (2003)	Merlini (2011) e Silva (2003)

**Quadro 5 - Referências utilizadas no levantamento de dados sobre a capacidade de retenção das resistências à tração e à flexão dos compósitos**

<b>Matriz</b>	<b>Referências – Tração (Figura 4)</b>	<b>Referências – Flexão (Figura 5)</b>
Epóxi sintético	Assarar <i>et al.</i> (2011), Awad, Fellows e Saeed Mahini (2018), Islam, Pickering e Foreman (2011), Kajorncheappunngam, Gupta e Gangarao (2002), Li e Xue (2016), Scida <i>et al.</i> (2013), Shanmugam <i>et al.</i> (2015), Venkatesha, Saravanan e Anand Babu (2020) e Yan, Chouw e Jayaraman (2015)	Ferreira <i>et al.</i> (2016), Islam, Pickering e Foreman (2011), Lettieri e Frigione (2011), Shanmugam <i>et al.</i> (2015), Venkatesha, Saravanan e Anand Babu (2020) e Yan, Chouw e Jayaraman (2015)
Epóxi vegetal	Benzarti <i>et al.</i> (2018), Dominguez (2016), Senthilkumar <i>et al.</i> (2021) e Yorseng <i>et al.</i> (2020)	Dominguez (2016) e Senthilkumar <i>et al.</i> (2021)
Poliéster sintético	Calegari (2018), Nóbrega (2007) e Silva <i>et al.</i> (2018)	Calegari (2018) e Silva <i>et al.</i> (2018)
Poliéster vegetal	Bezerra (2014)	–
PU vegetal	Mosiewicki <i>et al.</i> (2012)	–

Elementos construtivos em áreas externas, como deques e componentes próximos ao solo, dificilmente ficarão imersos em água tempo suficiente para saturarem, já que são necessários dias ou semanas de imersão para isso. Nos casos comuns, esses elementos são molhados por chuvas, que geralmente escoam para áreas mais baixas ou para sistemas de drenagem. Além disso, por estarem expostos ao vento e à radiação solar, a água em contato com o material evapora em algumas horas, encurtando seu tempo de contato com as águas pluviais. Assim, os resultados de absorção de água em 24h (Figura 1) se aplicam mais adequadamente à maioria das situações construtivas. Mas, em casos específicos, como componentes de píeres ou em contato com o solo (Parente; Pinheiro, 2008), os dados de absorção até a saturação devem ser observados (Figura 2).

As retas de tendência das Figuras 1 e 2 foram iniciadas no ponto (0, 0) pois, de modo geral, a absorção de água de elementos contendo 100% de matriz polimérica é próxima de zero (Ali *et al.*, 2020; Silva, 2003). Os compósitos com maior tendência de absorção de água em 24h de imersão foram aqueles com matriz de poliéster sintético, seguida por poliéster vegetal, epóxi sintético, PU vegetal e epóxi vegetal (Figura 1a), enquanto que na saturação, foram os com matriz epóxi sintética, seguida por PU, epóxi e poliéster vegetais e poliéster sintético (Figura 2a). Assim, o tipo de polímero empregado parece possuir mais influência que sua origem (sintética ou vegetal) na absorção de água dos compósitos em 24h e até a saturação. Ressalta-se que Hosur, Maroju e Jeelani (2015) relatam absorções próximas a zero para compósitos de matriz poliéster (sintética e vegetal) com altas frações de fibras vegetais imersos até a saturação, algo incomum dentre as referências analisadas. Isso ocasionou a forte redução na tendência de absorção de água dessas matrizes, conforme pode ser observado na Figura 2a.

Os compósitos de matriz vegetal mostraram menor tendência de absorção de água em 24h e na saturação que seus correspondentes com matriz sintética, contribuindo para sua maior durabilidade. Entretanto, Masoodi e Pillai (2012) indicam maior absorção e inchamento de compósitos de epóxi vegetal que sintética devido à existência de celulose em sua composição, principal responsável pela absorção de água em elementos de origem vegetal.

A Figura 3 cruza os dados de absorção em 24h e até a saturação. Os compósitos de matriz poliéster sintética são os que, passados 24h de imersão, apresentam o menor potencial de absorção de água até saturarem, enquanto os de matriz epóxi vegetal possuem o maior potencial. Isto é, apesar de os primeiros serem os que mais absorvem água nas primeiras 24h (Figura 1a), em relação a estes valores, eles posteriormente tendem a absorver menos água que os demais compósitos. Isso parece indicar que os compósitos de matriz epóxi vegetal absorvem água mais lentamente, o que explica os baixos valores em 24h de imersão e a maior diferença entre eles e os valores na saturação (Figura 3a).

Figura 1 - Influência da matriz (a) e da fibra (b) na absorção de água em 24h

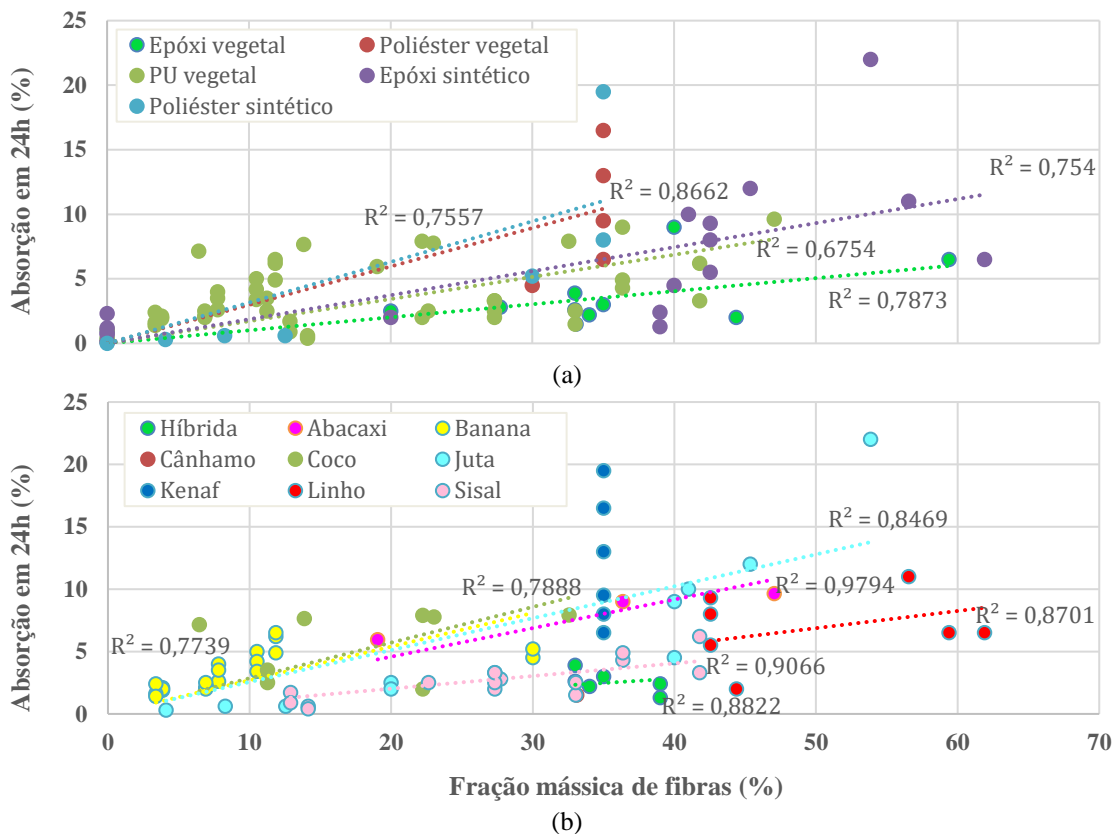
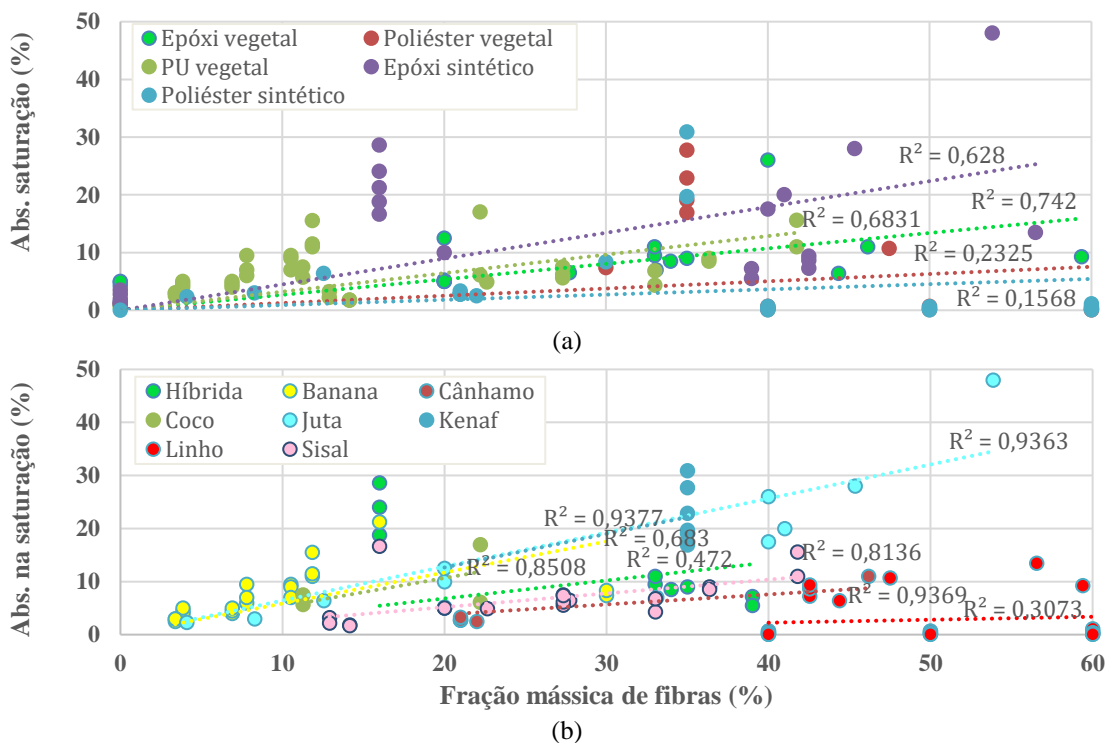


Figura 2 - Influência da matriz (a) e da fibra (b) na absorção de água até a saturação

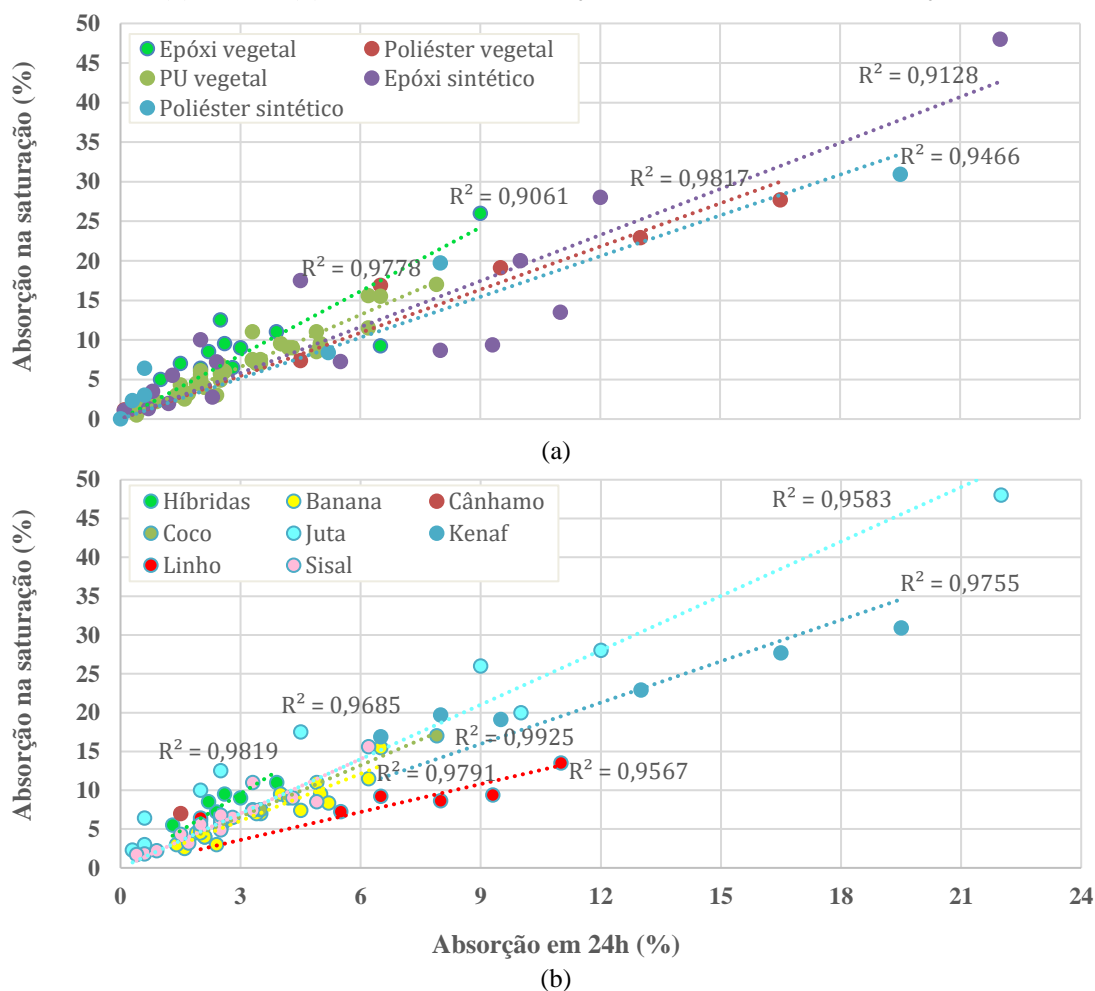




Segundo Miléo, Rocha e Gonçalves (2016), polímeros com estrutura molecular com maior capacidade de formar pontes de hidrogênio e/ou com cura incompleta possuem mais facilidade de absorver água. Porém, Cuinat-Guerraz, Dumont e Hubert (2016) relatam uma absorção de água menor e mais lenta por compósitos de PU sintético/linho quando comparados a compósitos bioepóxi/linho ao serem expostos ao ar a 90% de UR e 30 °C. Para os autores, isso ocorre devido à maior adesão fibra/matriz causada pela ligação química dos grupos hidroxila das fibras vegetais com o pré-polímero uretano, ou seja, ao se ligarem à matriz, as hidroxilas deixam de se ligar à umidade, reduzindo a capacidade da fibra vegetal de absorver água. Isso indica uma maior compatibilidade química entre o PU e as fibras vegetais, propiciando melhor adesão fibra/matriz e, conseqüentemente, melhor retenção das propriedades mecânicas e redução dos microvazios no compósito, o que também reduz sua absorção de água (Cuinat-Guerraz; Dumont; Hubert, 2016). Marrot *et al.* (2014) apontam que maiores resistências ao cisalhamento interlaminar, indicativo de melhor adesão fibra/matriz, dependem dos componentes químicos da matriz, relatando que epóxis produzidos com amidas resultam em resinas menos rígidas, influenciando a adesão com as fibras, enquanto epóxis produzidos com aminas alifáticas geram uma elevada quantidade de grupos hidroxila, que se ligam às hidroxilas das fibras vegetais, melhorando a adesão fibra/matriz. Assim, as tendências de absorção mostradas nas Figuras 1a, 2a e 3a podem ser inversamente proporcionais à quantidade de grupos hidroxila de cada tipo de matriz analisado, indicando que compósitos com menor absorção podem ter sido produzidos com tipos de matrizes que possuem mais hidroxilas, enquanto o oposto ocorreu com compósitos com maiores absorções.

As Figuras 1 e 2 também mostram que, conforme a quantidade de fibras vegetais no compósito aumenta, sua absorção de água tende a crescer, o que é consenso na literatura (Al-Oqla; Salit, 2017; John; Thomas, 2008; Ray, 2017), sendo que, conforme os dados levantados, maiores frações de fibras vegetais parecem afetar menos a absorção até a saturação de compósitos de matriz poliéster sintético do que a de compósitos com as demais matrizes (Figura 2a).

Figura 3 - Matriz (a) e fibras (b) dos compósitos: absorção em 24h versus até a saturação



Em relação às fibras, os compósitos com maior tendência de absorção de água em 24h foram os com fibras de coco, seguidos dos com fibras de banana, juta, folha do abacaxizeiro, linho, sisal e híbridas (Figura 1b). Pode-se inferir que compósitos reforçados com fibras de coco absorvem mais água que os demais num período de 24h. Já quando imersos em água por longos períodos, compósitos com juta, kenaf, banana e coco absorvem mais água que os demais (Figura 2b), podendo apresentar menor durabilidade se expostos à água.

Um dos compósitos com fibras de cânhamo teve leve redução na absorção de água até a saturação (Figura 2b) devido à inserção de nanoargila em sua composição, entretanto, em outro compósito, a nanoargila não alterou sua absorção (Haq *et al.*, 2008). Ressalta-se que dentre os compósitos com fibras híbridas há aqueles que empregaram fibras de vidro juntamente com fibras vegetais, reduzindo a absorção de água (Angrizani *et al.*, 2014; Meenakshi; Krishnamoorthy, 2018) e contribuindo para a menor tendência de absorção dessa categoria. As fibras híbridas que reforçam os compósitos apresentados nas Figura 1b e Figura 2b são compostas por cânhamo/sisal (Thiagamani *et al.*, 2019), vidro/bambu (Venkatesha; Saravanan; Anand Babu, 2020) e, somente na Figura 2b, banana/sisal (Venkateshwaran *et al.*, 2011).

A Figura 3b mostra que os compósitos com fibras híbridas, de juta, sisal, coco ou banana apresentam o maior potencial de absorção de água até saturarem, ou seja, absorvem pouca água nas primeiras 24h, mas, em relação a estes valores, tendem a absorver mais água que os compósitos reforçados com as outras fibras, demonstrando uma absorção de água mais lenta. Já os compósitos com linho e kenaf absorvem, nas primeiras 24h, parcela considerável da quantidade total de água que absorverão na saturação, absorvendo água mais rapidamente que os demais.

Maiores absorções das fibras vegetais estão fortemente relacionadas à sua morfologia, como volume e estrutura dos poros de suas paredes, ocorrendo principalmente por capilaridade pelos poros e penetrando no interior das fibras, causando o seu inchamento (Moudood *et al.*, 2019). Também estão relacionadas à sua composição, como maiores percentuais de hemicelulose e menor cristalinidade da celulose (Ferreira *et al.*, 2021), como ocorre com fibras de banana e coco (Dittenber; Gangarao, 2012; Mizi; Feng, 2017). Diferentemente, fibras de cânhamo e linho possuem altos percentuais de hemicelulose, mas celulose com baixa cristalinidade (Dittenber; Gangarao, 2012; Mizi; Feng, 2017), o que explica a menor absorção dos compósitos com elas. Esses aspectos podem esclarecer os comportamentos distintos dos compósitos mostrados nas Figuras 1b, 2b e 3b.

Há poucas pesquisas sobre a absorção de água em 24h de compósitos com fibras vegetais, principalmente daqueles que empregaram matriz poliéster, seja sintético ou vegetal, e com algumas fibras, como as de cânhamo. Também não foram encontradas pesquisas sobre a absorção até a saturação de compósitos reforçados por outras fibras vegetais.

## **Influência da matriz termorrígida e do tipo de fibra na retenção das resistências à tração e à flexão dos compósitos após envelhecimento**

A retenção da resistência mecânica de um material é sua capacidade de mantê-la após exposição à agentes de degradação, isto é, quanto menor a redução de sua resistência após o envelhecimento, maior sua capacidade de retenção (Yan; Chouw; Jayaraman, 2015). Essa é uma propriedade fundamental para materiais de uso externo, submetidos constantemente à chuva, vento, raios UV, umidade, calor, névoa salina, etc. O envelhecimento degrada a união fibra/matriz pelo surgimento de microfissuras e vazios na superfície do material e causa a erosão da matriz polimérica (Yan; Chouw; Jayaraman, 2015).

As Figura 4 e 5 apresentam a retenção das resistências à tração e à flexão dos compósitos, respectivamente. Uma vez que os processos de envelhecimento empregados pelos estudos diferem (Quadro 3), empregou-se símbolos distintos para o envelhecimento acelerado por imersão; acelerado por combinação de raios UV, umidade do ar e/ou temperatura; e envelhecimento natural.

As Figura 4a e 5a mostram que a maior parte dos compósitos submetidos a agentes de degradação perde resistência à tração e/ou à flexão, o que é confirmado por vários estudos (Bezerra, 2014; Dittenber; Gangarao, 2012; Jawaid; Thariq; Saba, 2019; Kuruvilla *et al.*, 2021; Mizi; Feng, 2017; Senthilkumar *et al.*, 2021). Porém, alguns dos compósitos ganharam resistência à tração, como já relatado por Senthilkumar *et al.* (2021). Nesse grupo estão somente os de matriz epóxi e, mais frequentemente, os de origem vegetal. Todavia, há materiais contendo 100% de matriz polimérica com ganhos próximos de 40 e 60% (Figura 4a). Benzarti *et al.* (2018) relatam que a exposição ao ar com temperaturas altas (60 °C) e umidades moderadas (50 a 75%) pode ter efeito de pós-cura na matriz termorrígida, isto é, estimulam a continuidade da polimerização da matriz, melhorando o comportamento mecânico do compósito (Bai, 2013; Bezerra, 2014). Li e Xue (2016) e Scida *et*

al. (2013) explicam que a absorção de água pelas fibras vegetais reorienta suas microfibrilas, as realinhando ao esforço de tração aplicado, aumentando a resistência do compósito. Entretanto, se a exposição ocorrer por longos períodos ou em temperaturas elevadas, a deterioração da matriz e de sua ligação com as fibras vegetais causada pelas intempéries pode sobrepor o efeito de pós-cura e a resistência do compósito pode cair (Bai, 2013; Benzarti *et al.*, 2018).

Na flexão, a maior parte dos compósitos perdeu até 60% da resistência, sendo as maiores perdas atingidas pelos compósitos de epóxi sintético. O único a ganhar resistência possuía matriz epóxi vegetal e foi imerso em água à 23 °C, sendo que, para a autora, as fibras vegetais que reforçavam o compósito incharam ao absorver água, preenchendo os vazios existentes entre elas e a matriz, o que melhorou a adesão entre ambas e elevou a resistência do compósito (Dominguez, 2016). Compósitos de epóxi e poliéster sintéticos também foram imersos em água à temperatura ambiente, porém, não retiveram suas resistências à flexão iniciais (Ferreira *et al.*, 2016; Silva *et al.*, 2018; Venkatesha; Saravanan; Anand Babu, 2020).

Yorseng *et al.* (2020) mostraram que o envelhecimento reduziu drasticamente a resistência à tração de amostras 100% bioepóxi, mas reduziu menos a dos biocompósitos, feitos com fibras de kenaf e sisal, sendo que, para os pesquisadores, isso é sinal que o bioepóxi é mais suscetível à degradação; mas, além disso, a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) dos biocompósitos aumentou, o que indica um reforço eficiente da matriz pelas fibras mesmo após o envelhecimento, contribuindo para a retenção das propriedades dos biocompósitos. De modo similar, a Figura 4a aponta uma aparente tendência dos compósitos de matriz epóxi e poliéster vegetal apresentarem maior retenção da resistência à tração conforme aumenta sua quantidade de fibras vegetais. Na flexão, os compósitos de epóxi vegetal melhoram sua capacidade de retenção com o crescimento da fração de fibras até cerca de 45%, caindo posteriormente, enquanto os de matriz sintética, seja epóxi ou poliéster, reduzem sua retenção conforme aumenta sua quantidade de fibras (Figura 5a).

Figura 4 - Influência da matriz (a) e da fibra (b) na retenção da resistência à tração

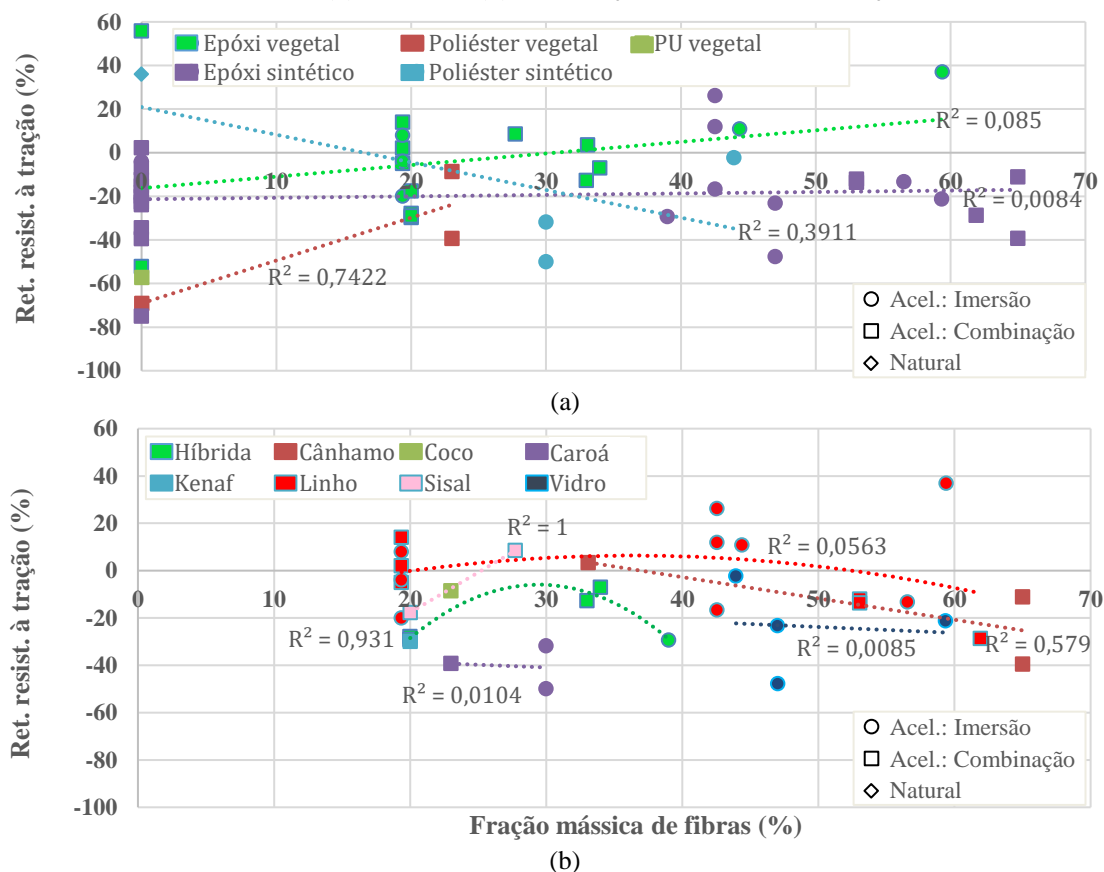
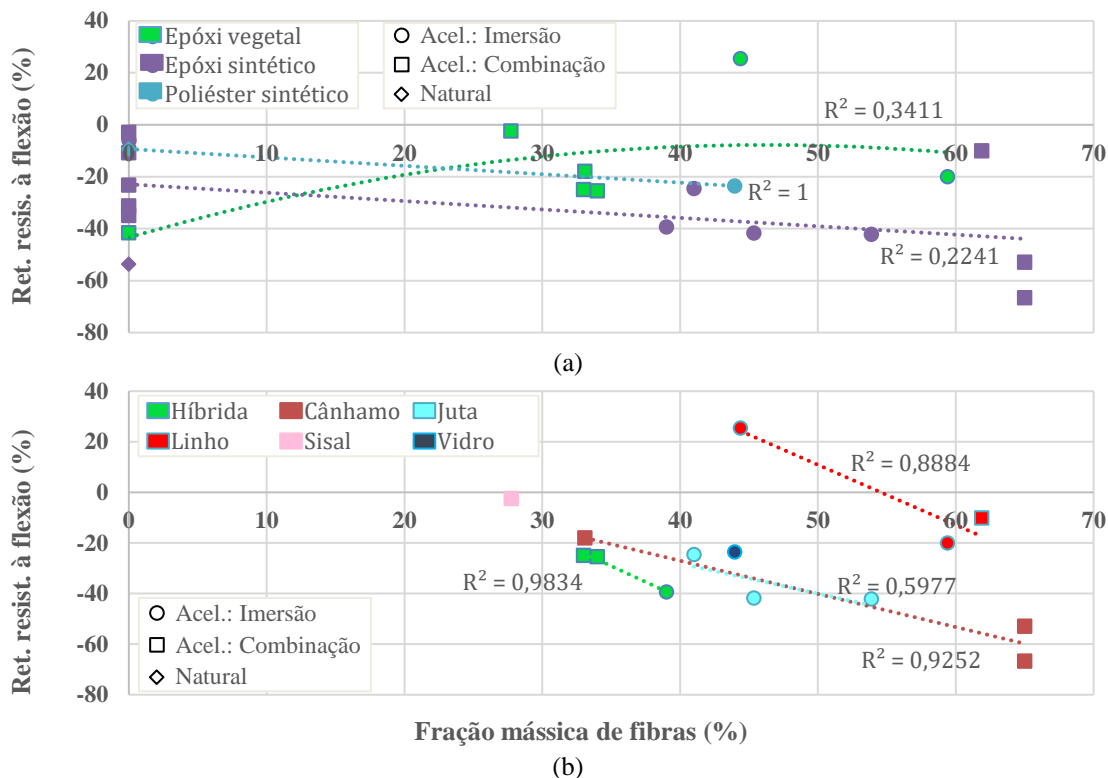


Figura 5 - Influência da matriz (a) e da fibra (b) na retenção da resistência à flexão



Nas Figuras 4 e 5, além de compósitos com fibras híbridas e vegetais, foram incluídos aqueles com fibras de vidro, visando a comparar o desempenho desses três tipos de reforço. As fibras híbridas analisadas foram: cânhamo/sisal, vidro/bambu e, somente na retenção da resistência à tração, kenaf/sisal.

Após o envelhecimento, a maior parte dos compósitos perdeu até 40% da resistência à tração. Os compósitos que ganharam resistência eram reforçados com fibras de sisal, cânhamo ou, mais frequentemente, linho (Figura 4b). Isso pode estar relacionado à menor absorção de água desses três compósitos (Figuras 1 e 2), o que reduz os danos à adesão fibra/matriz e contribui para a retenção da resistência. Isso também ajuda a explicar os compósitos com linho possuírem as maiores retenções da resistência à flexão (Figura 5b).

Os compósitos reforçados exclusivamente com fibras de vidro apresentaram perdas de resistência à tração próximas às dos reforçados com fibras híbridas ou vegetais (Figura 4b). Porém, pesquisas indicam menores perdas de resistência dos compósitos com fibras de vidro, se comparados à compósitos com fibras vegetais (Assarar *et al.*, 2011) ou híbridas (Silva *et al.*, 2018), sendo que esses estudos relatam que os danos aos compósitos ocorreram principalmente devido ao enfraquecimento da interação fibra/matriz causado pela ação da água.

Na flexão, os compósitos com fibras híbridas apresentaram perdas de resistência próximas aos reforçados exclusivamente com um tipo de fibra vegetal. Esse resultado diverge do encontrado por Silva *et al.* (2008) em estudo sobre compósitos de poliéster e fibras híbridas de vidro e curauá (*Ananas erectifolius*) que relata perda de apenas 2,2% de sua resistência à flexão após envelhecimento em água destilada por 9 meses, e de Leão (2013), que demonstra que a retenção da resistência de compósitos com fibras híbridas de vidro e licuri (*Syagrus coronata*) foi superior à dos compósitos somente com licuri. Entretanto, a Figura 5b mostra que, independentemente da fibra de reforço, conforme sua quantidade aumenta, cai a retenção da resistência à flexão dos compósitos, sendo esse fenômeno possivelmente decorrente dos danos à adesão fibra/matriz causados pelo envelhecimento e acentuado pelas maiores frações de fibras nos compósitos.

A Figura 6 cruza os dados de retenção das resistências à tração e à flexão para os estudos que apresentaram ambas as informações, demonstrando que os compósitos com matriz epóxi vegetal tiveram melhor desempenho, enquanto os de epóxi sintético não retiveram suas resistências iniciais, tanto à tração como à flexão. O envelhecimento dos compósitos da Figura 6 envolve exposição à umidade ou imersão em água que, além de reduzir a adesão fibra/matriz, pode atuar como um lubrificante, facilitando o deslizamento de uma

fibra vegetal em relação à outra (Ferreira *et al.*, 2021). Isso ajuda a explicar a acentuada redução das propriedades mecânicas de alguns compósitos.

Um fato relevante é o crescimento da absorção dos compósitos conforme a temperatura da água ou do ambiente se eleva (Benzarti *et al.*, 2018; Scida *et al.*, 2013), sendo que Benzarti *et al.* (2018) sugerem que, quando imersos em água a temperaturas elevadas, a absorção de compósitos de linho e epóxi vegetal ocorreu principalmente na matriz e nas regiões interfaciais (fibra/matriz) e não devido às fibras vegetais. Assim, o clima do local onde esses compósitos serão utilizados pode amenizar ou intensificar a absorção de água e a consequente degradação do material, como mostra a pesquisa sobre compósitos híbridos (matriz epóxi sintética e fibras de vidro e de bambu) que concluiu que suas resistências à tração e à flexão sofrem maior redução quando eles são expostos à água marinha que à água destilada (Venkatesha; Saravanan; Anand Babu, 2020).

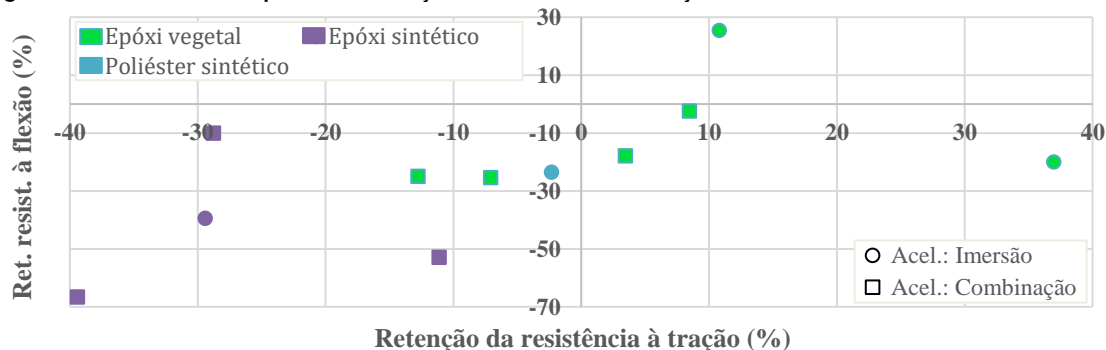
Ressalta-se que algumas correlações entre as variáveis ( $R^2$ ) mostradas nas Figuras 4 e 5 são pequenas ou que a quantidade de pesquisas encontradas é escassa, devendo-se aprofundar a investigação sobre o tema, especialmente abrangendo um espectro maior de relações fibra/matriz. Como exemplo, não foram encontrados estudos sobre retenção da resistência à flexão com compósitos com matriz vegetal PU ou poliéster. Porém, conforme discutido, possíveis explicações apontadas pela literatura para a melhor retenção das propriedades mecânicas alcançada por alguns compósitos são aumento da  $T_g$  e pós-cura da matriz; eficiência e baixa absorção de água do reforço; inchamento das fibras vegetais devido à absorção de água, causando o preenchimento dos vazios do compósito e o aumento da adesão fibra/matriz; e reorientação das fibrilas das fibras vegetais na direção do esforço mecânico aplicado ao compósito.

## Soluções em desenvolvimento

Pesquisadores já buscam meios de minimizar ou impedir a absorção de água dos compósitos termorrígidos com fibras vegetais. Há soluções em estudo que mostram resultados positivos, como a proteção superficial dos compósitos com resina PU. Calegari *et al.* (2017) mostraram que a melhor proteção dada a um corpo de prova de MDF contra a absorção de água após 24h de imersão foi o revestimento por PU, com corpos de prova absorvendo próximo a 0%, enquanto os revestidos com verniz acrílico e verniz marítimo tiveram ganho de massa de cerca de 30% e 130%; o inchamento dos materiais na espessura foi de 2,00%, 13,52% e 37,97%, respectivamente. Em estudo de Bezerra (2014), compósitos de matriz poliéster insaturado vegetal com fibras de coco ou de caroá revestidos com esmalte sintético sofreram menos danos após exposição a raios UV, umidade e temperatura que os compósitos sem revestimento.

Santos *et al.* (2014) experimentaram a estratégia de aquecimento da matriz polimérica no estudo de chapas de resíduos da espécie arbórea amazônica tauari (*Couratari oblongifolia*) aglomeradas com resina PU de óleo de mamona, mostrando que a absorção de água, o inchamento e as propriedades mecânicas das chapas após sua cura melhoraram com o aumento da temperatura de prensagem, pois reduziu a viscosidade do polímero aglomerante, facilitando sua impregnação na carga vegetal. Essa melhor impregnação reduz a área de contato entre a carga vegetal e a água e a quantidade de vazios no compósito, aumentando, também, sua resistência mecânica.

Figura 6 - Matriz dos compósitos: retenção da resistência à tração versus à flexão



Em outro estudo, Silva *et al.* (2018) hibridizaram com sisal compósitos reforçados por fibras de vidro, o que diminuiu as resistências à tração e à flexão do compósito, porém, aumentou sua leveza. Os autores sugerem a hibridização quando for importante a relação resistência/densidade e apontam que os compósitos com fibras vegetais não são adequados para usos em atmosferas úmidas pois perdem resistência mecânica por absorverem água. Esse resultado difere do relatado em estudo no qual, após saturado, um laminado híbrido de fibras de vidro e curauá foi novamente testado à flexão e seu módulo de elasticidade na flexão reduziu, mas sua resistência ficou praticamente inalterada, sendo esse comportamento atribuído à ordem adotada para as camadas de fibras, ou seja, a fibra de vidro possui absorção de água próxima a zero e seu posicionamento nas camadas externas do compósito protegeu as fibras de curauá da água e foram as mais influentes na resistência à flexão (Silva *et al.*, 2008). Os autores atribuem a redução do módulo de elasticidade na flexão à plasticização da resina poliéster devido ao elevado tempo de imersão dos compósitos.

Uma alternativa adicional para o uso dos compósitos em áreas externas é seu emprego em componentes que requerem resistência ao impacto, como relata pesquisa sobre compósitos híbridos de sisal e cânhamo de Senthilkumar *et al.* (2021) que demonstrou que com a exposição aos raios UV e à umidade, o material sofre degradação e amolecimento da matriz polimérica e perda de aderência entre ela e as fibras vegetais, piorando sua resistência à tração e à flexão, porém, melhorando sua resistência ao impacto, já que eleva sua capacidade de absorver energia oriunda de choques mecânicos.

## Conclusão

Este estudo analisou diversas pesquisas sobre compósitos termorrígidos de matriz sintética ou vegetal reforçadas por fibras vegetais ou híbridas a fim de verificar quais deles apresentam maior resistência às intempéries e, consequentemente, maior durabilidade se empregados em áreas externas. Os resultados da pesquisa indicam que:

- (a) os compósitos de matriz vegetal mostraram menor tendência de absorção de água em 24h que seus correspondentes de matriz sintética, contribuindo para sua maior durabilidade. Porém, o tipo de polímero empregado (epóxi, PU ou poliéster insaturado) parece possuir mais influência que sua origem (sintética ou vegetal) na absorção de água dos compósitos em 24h e até a saturação. Isso pode estar relacionado à quantidade de grupos hidroxila gerados a partir dos componentes químicos empregados na produção das matrizes e à sua ligação às hidroxilas das fibras vegetais, reduzindo a absorção;
- (b) compósitos de matriz epóxi vegetal absorvem água de modo mais lento, com a menor absorção em 24h de imersão dentre os compósitos estudados, o que também se explica pela maior quantidade de grupos hidroxila gerados a partir de seus componentes químicos. Isso pode favorecer seu uso em áreas externas na construção civil, já que, na maioria dos casos, o contato dos materiais construtivos com água se restringe a algumas horas;
- (c) compósitos com fibras de coco, banana e juta absorvem mais água em 24h e até a saturação que os demais, estando isso provavelmente relacionado à morfologia das fibras, como volume e estrutura dos poros de suas paredes, e à sua composição, como maiores percentuais de hemicelulose e menor cristalinidade da celulose;
- (d) compósitos de matriz vegetal epóxi e poliéster insaturado apresentam maior retenção da resistência à tração conforme maior a quantidade de fibras vegetais presentes em seu interior, porém, os dados considerados são insuficientes para serem conclusivos. Aumento da  $T_g$  e pós-cura da matriz, e eficiência do reforço e reorientação das fibrilas das fibras vegetais são possíveis explicações para isso;
- (e) alguns compósitos com fibras de sisal, cânhamo e linho ganharam resistência à tração após o envelhecimento. Isso pode estar relacionado à menor absorção de água dos compósitos com esses três tipos de fibras, o que contribui para a menor ocorrência de danos à adesão fibra/matriz durante o envelhecimento e contribui para a retenção da resistência. Isso também ajuda a explicar as maiores retenções da resistência à flexão dos compósitos com linho; e
- (f) independentemente da fibra de reforço, conforme sua quantidade aumenta, cai a retenção da resistência à flexão dos compósitos, sendo isso possivelmente decorrente dos danos à adesão fibra/matriz causados pelo envelhecimento e acentuado pelas maiores frações de fibras no compósito.

Trabalhos futuros podem se servir dos apontamentos feitos nesta pesquisa e focar em criar ou aprimorar soluções para aumentar a durabilidade daqueles compósitos que demonstraram maior resistência às intempéries, como os com matriz epóxi vegetal e fibras de cânhamo, sisal ou linho, contribuindo para que

possam ser empregados em áreas externas com maior segurança e substituam gradualmente os polímeros e fibras não-renováveis.

O Brasil possui uma vasta flora, com espécies que produzem fibras pouco conhecidas ou mesmo desconhecidas no campo dos compósitos poliméricos. Além das analisadas neste trabalho, ainda há espaço para a pesquisa e experimentação com muitas outras fibras, como as de tururi, buriti (*Mauritia flexuosa*) e embira (família *Annonaceae*). Uma maior variedade de fibras vegetais candidatas a substituir satisfatoriamente as fibras sintéticas contribui para uma maior sustentabilidade tanto reduzindo o uso de materiais não-renováveis como incentivando a produção de fibras a partir de plantas abundantes na região onde o compósito será fabricado, reduzindo custos e o impacto ambiental com transporte de materiais e estimulando a economia local.

## Referências

- ALL, J. B. *et al.* Physico-mechanical properties of unsaturated polyester resin reinforced maize cob and jute fiber composites. **Journal of Natural Fibers**, v. 19, n. 9, p. 1–13, nov. 2020.
- AL-OQLA, F. M.; SALIT, M. S. **Materials selection for natural fiber composites**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D2842**: standard test method for water absorption of rigid cellular plastics. West Conshohocken, 2019.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D5229/D5229M**: test method for moisture absorption properties and equilibrium conditioning of polymer matrix composite materials. West Conshohocken, 2020.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D570**: standard test method for water absorption of plastics. West Conshohocken, 2022.
- ANGRIZANI, C. C. *et al.* Influência da espessura nas propriedades mecânicas de compósitos híbridos interlaminares de curauá/vidro/poliéster. **Polímeros Ciência e Tecnologia**, v. 24, n. 2, p. 184–189, 2014.
- ASSARAR, M. *et al.* Influence of water ageing on mechanical properties and damage events of two reinforced composite materials: flax-fibres and glass-fibres. **Materials and Design**, v. 32, n. 2, p. 788–795, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14810-1**: painéis de partículas de média densidade: parte 1: terminologia. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15316-1**: painéis de fibras de média densidade: parte 1: terminologia. Rio de Janeiro, 2014.
- AUVERGNE, R. *et al.* Biobased thermosetting epoxy: present and future. **Chemical Reviews**, v. 114, n. 2, p. 1082–1115, jan. 2014.
- AWAD, S. A.; FELLOWS, C. M.; SAEED MAHINI, S. A comparative study of accelerated weathering of epoxy resins based on DGEBA and HDGEBA. **Journal of Polymer Research**, v. 25, n. 4, p. 103, abr. 2018.
- BAI, J. (ed.). **Advanced fibre-reinforced polymer (FRP) composites for structural applications**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2013.
- BARBA, B. J. D.; MADRID, J. F.; PENALOZA JUNIOR., D. P. A review of abaca fiber-reinforced polymer composites: different modes of preparation and their applications. **Journal of the Chilean Chemical Society**, v. 65, n. 3, p. 4919–4924, set. 2020.
- BELLINI, F. A. T. **Abrigos de ônibus em São Paulo**: análise da produção recente. São Paulo, 2008. 201 f. Dissertação (Mestrado em Design e Arquitetura) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- BENZARTI, K. *et al.* Durability of flax/bio-based epoxy composites intended for structural strengthening. **MATEC Web of Conferences**, v. 199, p. 07014, 2018.
- BEZERRA, A. F. C. **Desenvolvimento de compósito poliéster insaturado/fibras vegetais (caroá e coco)**. Campina Grande, 2014. 160 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.

- CALEGARI, E. P. **Compósitos poliméricos com casca de arroz: desenvolvimento, caracterização e possibilidades de aplicação no design de produto.** Porto Alegre, 2018. 201 f. Tese (Doutorado em Design) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.
- CALEGARI, E. P. *et al.* Experimental study on waterproofing MDF with castor oil-based vegetal polyurethane. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 3, ago. 2017.
- CORREIA, E. A. S. **Compósitos de matriz geopolimérica reforçados com fibras vegetais de abacaxi e de sisal.** João Pessoa, 2011. 113 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2011.
- CUINAT-GUERRAZ, N.; DUMONT, M.-J.; HUBERT, P. Environmental resistance of flax/bio-based epoxy and flax/polyurethane composites manufactured by resin transfer moulding. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 88, p. 140–147, set. 2016.
- DI LANDRO, L.; JANSZEN, G. Composites with hemp reinforcement and bio-based epoxy matrix. **Composites Part B: Engineering**, v. 67, p. 220–226, dez. 2014.
- DITTENBER, D. B.; GANGARAO, H. V. S. Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 43, n. 8, p. 1419–1429, ago. 2012.
- DOMINGUEZ, E. M. **Fabricación y caracterización de green composites con bioresina y tejido de fibra natural de lino mediante moldeo por transferencia de resina.** Valência, 2016. 347 f. Tese (Doutorado em Engenharia Industrial). Departamento de Engenharia Mecânica e Materiais, Universitat Politècnica de València, Valência, 2016.
- FARIA, D. L. *et al.* Production of castor oil-based polyurethane resin composites reinforced with coconut husk fibres. **Journal of Polymer Research**, v. 27, n. 9, p. 249, set. 2020.
- FERREIRA, J. M. *et al.* Mechanical properties of woven mat jute/epoxy composites. **Materials Research**, v. 19, n. 3, p. 702–710, 29 abr. 2016.
- FERREIRA, S. R. *et al.* Pull-out behavior and tensile response of natural fibers under different relative humidity levels. **Construction and Building Materials**, v. 308, p. 124823, nov. 2021.
- HAGHDAN, S.; SMITH, G. D. Natural fiber reinforced polyester composites: a literature review. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 34, n. 14, p. 1179–1190, 2015.
- HAQ, M. *et al.* Hybrid bio-based composites from blends of unsaturated polyester and soybean oil reinforced with nanoclay and natural fibers. **Composites Science and Technology**, v. 68, n. 15–16, p. 3344–3351, dez. 2008.
- HOSUR, M.; MAROJU, H.; JEELANI, S. Comparison of effects of alkali treatment on flax fibre reinforced polyester and polyester-biopolymer blend resins. **Polymers & Polymer Composites**, v. 23, n. 4, p. 229–241, 2015.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 62: plastics: determination of water absorption.** Gênova, 2008.
- ISLAM, M. S.; PICKERING, K. L.; FOREMAN, N. J. The effect of accelerated weathering on the mechanical properties of alkali treated hemp fibre/epoxy composites. **Journal of Adhesion Science and Technology**, v. 25, n. 15, p. 1947–1959, jan. 2011.
- JAWAID, M.; THARIQ, M.; SABA, N. **Durability and life prediction in biocomposites, fibre-reinforced composites and hybrid composites.** Cambridge: Elsevier, 2019.
- JOHN, M. J.; THOMAS, S. Biofibres and biocomposites. **Carbohydrate Polymers**, v. 71, n. 3, p. 343–364, 2008.
- KAJORNCHAPPUNNGAM, S.; GUPTA, R. K.; GANGARAO, H. V. S. Effect of aging environment on degradation of glass-reinforced epoxy. **Journal of Composites for Construction**, v. 6, n. 1, p. 61–69, fev. 2002.
- KHAN, A., M. R. *et al.* (ed.). **Hybrid natural fiber composites: material formulations, processing, characterization, properties, and engineering applications.** Cambridge: Woodhead Publishing, 2021.
- KU, H. *et al.* A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 42, n. 4, p. 856–873, 2011.



- KURUVILLA, J. *et al.* **Fibre reinforced composites**: constituents, compatibility, perspectives and applications. Cambridge: Woodhead Publishing, 2021.
- LEÃO, M. A. **Compósitos poliméricos a base de fibras de licuri**: efeitos da hibridização e do envelhecimento ambiental acelerado. Natal, 2013. 190 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais). Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.
- LETTIERI, M.; FRIGIONE, M. Natural and artificial weathering effects on cold-cured epoxy resins. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 119, n. 3, p. 1635–1645, fev. 2011.
- LI, Y.; XUE, B. Hydrothermal ageing mechanisms of unidirectional flax fabric reinforced epoxy composites. **Polymer Degradation and Stability**, v. 126, p. 144–158, abr. 2016.
- MANNBERG, P. *et al.* Service life assessment and moisture influence on bio-based composites. **Journal of Materials Science**, v. 49, p. 5265–5270, 2014.
- MANNBERG, P.; NYSTRÖM, B.; JOFFE, R. Service life assessment and moisture influence on bio-based thermosetting resins. **Journal of Materials Science**, v. 49, p. 3687–3693, 2014.
- MARROT, L. *et al.* Multi-scale study of the adhesion between flax fibers and biobased thermoset matrices. **Materials & Design**, v. 62, p. 47–56, out. 2014.
- MASOODI, R.; PILLAI, K. M. A study on moisture absorption and swelling in bio-based jute-epoxy composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 31, n. 5, p. 285–294, mar. 2012.
- MEENAKSHI, C. M.; KRISHNAMOORTHY, A. Preparation and mechanical characterization of flax and glass fiber reinforced polyester hybrid composite laminate by hand lay-up method. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 13, p. 26934–26940, 2018.
- MERLINI, C. **Análise experimental de compósitos de poliuretano derivado de óleo de mamona e fibras de bananeira**. Florianópolis, 2011. 102 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.
- MIGUEL, J. C.; DIAZ, M. A. N. Fiber reinforced polymer (FRP): a new material used in façades of tall buildings. In: COUNCIL ON TALL BUILDINGS AND URBAN HABITAT NEW YORK CONFERENCE, 2015, Nova York. **Anais [...]** Chicago: Council on Tall Buildings and Urban Habitat, 2015.
- MILÉO, P. C.; ROCHA, G. J. de M.; GONÇALVES, A. R. Sugarcane straw reinforced castor oil polyurethane composites: fiber characterization and analysis of composite properties. **Journal of Natural Fibers**, p. 1–12, dez. 2016.
- MIZI, F.; FENG, F. **Advanced high strength natural fibre composites in construction**. Cambridge: Elsevier, 2017.
- MONTEIRO, A. S. *et al.* Compósito de fibra de tururi: confecção e potencialidade como material sustentável. **MIX Sustentável**, v. 7, n. 4, p. 161–172, ago. 2021.
- MONTENEGRO, G. N. **A produção do mobiliário urbano em espaços públicos**: o desenho do mobiliário urbano nos projetos de reordenamento das orlas do Rio Grande do Norte. Natal, 2005. 192 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2005.
- MOSIEWICKI, M. A. *et al.* Moisture dependence of the properties of composites made from tung oil based polyurethane and wood flour. **Journal of Polymer Research**, v. 19, n. 2, p. 9776, fev. 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, abr. 2019.
- NEGRÃO, A. G.; PINTO, E. M.; SILVA, L. B. da. Material compósito de fibra da folha do abacaxizeiro (*Ananas comosus*) para uso no ambiente construído. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 3, p. 627–645, jul./set. 2020.
- NÓBREGA, M. M. S. Compósitos de matriz poliéster com fibras de caroá *Neoglaziovia variegata*: caracterização mecânica e sorção de água. Campina Grande, 2007. 123 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

- PARENTE, R. A.; PINHEIRO, L. M. Plásticos reciclados para elementos estruturais. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, v. 10, n. 47, p. 75–95, 2008.
- PAUL, V.; KANNY, K.; REDHI, G. G. Mechanical, thermal and morphological properties of a bio-based composite derived from banana plant source. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 68, p. 90–100, jan. 2015.
- RAMESH, M. Flax (*Linum usitatissimum* L.) fibre reinforced polymer composite materials: a review on preparation, properties and prospects. **Progress in Materials Science**, v. 102, n. December 2017, p. 109–166, 2019.
- RAY, D. **Biocomposites for high-performance applications**. Cambridge: Elsevier Ltd., 2017.
- SANTOS, W. L. F. *et al.* Particleboard manufactured from tauari (*Couratari oblongifolia*) wood waste using castor oil based polyurethane resin. **Materials Research**, v. 17, n. 3, p. 657–663, 2014.
- SCIDA, D. *et al.* Influence of hygrothermal ageing on the damage mechanisms of flax-fibre reinforced epoxy composite. **Composites Part B: Engineering**, v. 48, p. 51–58, maio 2013.
- SENTHILKUMAR, K. *et al.* Performance of sisal/hemp bio-based epoxy composites under accelerated weathering. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 29, n. 2, p. 624–636, fev. 2021.
- SEYAM, A.-F. M. *et al.* Effect of structural parameters on the tensile properties of multilayer 3D composites from Tururi palm tree (*Manicaria saccifera* Gaertn) fibrous material. **Composites Part B: Engineering**, v. 111, p. 17–26, fev. 2017.
- SHANMUGAM, N. *et al.* Evaluation of oil fly ash as a light stabilizer for epoxy composites: accelerated weathering study. *Polymer Degradation and Stability*, v. 112, p. 94–103, fev. 2015.
- SILVA, C. C. *et al.* Mechanical behavior and water absorption in sisal/glass hybrid composites. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 4, 6 dez. 2018.
- SILVA, R. V. **Compósito de resina poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais**. São Carlos, 2003. 139 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- SILVA, R. V. *et al.* Desenvolvimento de um compósito laminado híbrido com fibras natural e sintética. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 1, p. 154–161, mar. 2008.
- SOUSA, L. K. **Produção e caracterização mecânica de compósitos de resina poliuretana à base de óleo de mamona e fibras de rami, sisal e bucha vegetal**. Uberlândia, 2013. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.
- THIAGAMANI, S. M. K. *et al.* Investigation into mechanical, absorption and swelling behaviour of hemp/sisal fibre reinforced bioepoxy hybrid composites: effects of stacking sequences. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 140, p. 637–646, nov. 2019.
- VENKATESHA, B. K.; SARAVANAN, R.; ANAND BABU, K. Effect of moisture absorption on woven bamboo/glass fiber reinforced epoxy hybrid composites. **Materials Today: Proceedings**, v. 45, p. 216–221, 2020.
- VENKATESHWARAN, N. *et al.* Mechanical and water absorption behaviour of banana/sisal reinforced hybrid composites. **Materials and Design**, v. 32, n. 7, p. 4017–4021, 2011.
- VENKATESHWARAN, N.; ELAYAPERUMAL, A.; SATHIYA, G. K. Prediction of tensile properties of hybrid-natural fiber composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 43, n. 2, p. 793–796, 2012.
- VIRETTO, A.; GALY, J. Development of biobased epoxy matrices for the preparation of green composite materials for civil engineering applications. **Macromolecular Materials and Engineering**, v. 303, n. 5, p. 1700521, may 2018.
- WIEDMAN, G. A. **Fibra de coco e resinas de origem vegetal para produção de componentes de mobiliário e da construção civil**. São Paulo, 2002. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- WILLIAMS, T. *et al.* Effect of alkali treatment on physical properties of bio-based composites. **Polymers & Polymer Composites**, v. 21, n. 1, p. 9–19, 2013.

YAN, L.; CHOUW, N.; JAYARAMAN, K. Effect of UV and water spraying on the mechanical properties of flax fabric reinforced polymer composites used for civil engineering applications. **Materials & Design**, v. 71, p. 17–25, abr. 2015.

YORSENG, K. *et al.* Accelerated weathering studies of kenaf/sisal fiber fabric reinforced fully biobased hybrid bioepoxy composites for semi-structural applications: Morphology, thermo-mechanical, water absorption behavior and surface hydrophobicity. **Construction and Building Materials**, v. 235, p. 117464, fev. 2020.

## Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, e com apoio da Fundação Universidade Virtual do Estado de São Paulo (UNIVESP) por meio de bolsa concedida.

### **Bernardo Zandomenico Dias**

Conceitualização, Curadoria de dados, Análise de dados, Pesquisa, Metodologia, Redação do manuscrito original.

Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo | Universidade de São Paulo | Rua do Lago, 876 | São Paulo - SP - Brasil | CEP 05508-080 | Tel.: (27) 99801-5141 | E-mail: bernardozdias@usp.br

### **Cristina Engel de Alvarez**

Supervisão, Metodologia, Redação - revisão e edição.

Departamento de Arquitetura e Urbanismo | Universidade Federal do Espírito Santo | Av. Fernando Ferrari, 514, CEMUNI I, Sala 7, Goiabeiras | Vitória - ES - Brasil | CEP 29075-910 | Tel.: (27) 99979-6276 | E-mail: cristina.engel@ufes.br

### **Leila Cristina Meneghetti**

Redação - revisão e edição.

Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, Escola Politécnica | Universidade de São Paulo | Av. Prof. Almeida Prado, 83, Travessa 2, Cidade Universitária | São Paulo - SP - Brasil | CEP 05508-070 | Tel.: (11) 3091-9785 | E-mail: lmeneghetti@usp.br

### **Arthur Hunold Lara**

Supervisão, Redação - revisão e edição.

Departamento de Tecnologia da Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo | Universidade de São Paulo | Rua do Lago, 876, Cidade Universitária | São Paulo - SP - Brasil | CEP 05508-080 | Tel.: (11) 3091-4570 | E-mail: arthurlara@usp.br

Editor: **Marcelo Henrique Farias de Medeiros e Julio Cesar Molina**

### **Ambiente Construído**

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

[www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido](http://www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido)

[www.scielo.br/ac](http://www.scielo.br/ac)

E-mail: [ambienteconstruido@ufrgs.br](mailto:ambienteconstruido@ufrgs.br)



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.