

Material compósito de fibra da folha do abacaxizeiro(*Ananascomosus*) para uso no ambiente construído

Pineapple leaf fibre (Ananascomosus) composite for use in the built environment

Ana Gomes Negrão 

Edna Moura Pinto 

Lucineide Balbino da Silva 

Resumo

Observa-se o crescente interesse pela sustentabilidade dos recursos naturais de nosso planeta. A arquitetura, imersa em um dos setores industriais responsáveis por grandes transformações do ambiente construído, mostra-se um canal para a incorporação racional de materiais com viés ecológico. Este artigo aborda pesquisa cujo objetivo foi o desenvolvimento de painéis compósitos de fibra da folha do abacaxizeiro e resina vegetal. O texto contempla a descrição dos procedimentos experimentais adotados e discute os resultados das caracterizações físicas – massa específica, teor de umidade e absorção de água – e mecânicas – resistências à flexão e à tração, e módulo de elasticidade em tração. O compósito foi desenvolvido com a adoção de diferentes teores de fibras, empregadas no sentido longitudinal. A fim de recomendar usos para os compósitos confeccionados, realizou-se comparação com o ANSI A208.1 – American National Standard Institute (ANSI, 2016), procedendo-se à simulação computacional, por meio da modelagem paramétrica via Rhinoceros 3D 5.12, Grasshopper 0.9.0076 e Karamba 3D 1.3.0. Os resultados experimentais indicaram um material com valores médios de massa específica entre 610 kg/m³ e 760 kg/m³, e resistência à tração entre 56,27 MPa e 81,58 MPa, direcionando sua classificação como painel compósito de partícula. A modelagem paramétrica reforçou as aplicações do produto no ambiente construído.

Palavras-chave: Ambiente construído. Fibra vegetal. PALF. Painéis compósitos. Materiais alternativos.

Abstract

The sustainability of our planet's natural resources has been a growing and pressing concern in the past few years. Architecture, as one of the industrial sectors responsible for great transformations in the built environment, is a means for the rational adoption of eco-friendly materials. This paper discusses a research project that employed an experimental procedure to produce composite materials using pineapple leaf fibre and vegetable resin. The article describes the experimental procedures adopted and the results of physical characterisation – specific gravity, moisture content and water absorption – and mechanical ones – flexural and tensile strengths, and tensile modulus of elasticity. The composite was developed with different fibre contents, used in the longitudinal direction. In order to recommend applications for the composites, a comparison was done with ANSI A208.1 (ANSI, 2016), and a computer simulation using parametric modelling with Rhinoceros 3D 5.12, Grasshopper 0.9.0076 and Karamba 3D 1.3.0. The experimental results produced a material with moisture content values between 610 kg/m³ and 760 kg/m³, and tensile strength between 56.27 MPa and 81.58 MPa, classifying of the material as a particle board. The parametric modelling reinforces the applications of the product in the built environment.

Keywords: Built environment. Vegetal fibre. PALF. Composite panel. Alternative materials.

¹Ana Gomes Negrão

¹Universidade Federal da Paraíba
João Pessoa - PB - Brasil

²Edna Moura Pinto

²Universidade Federal do Rio Grande
do Norte
Natal - RN - Brasil

³Lucineide Balbino da Silva

³Universidade Federal da Paraíba
João Pessoa - PB - Brasil

Recebido em 23/04/19

Aceito em 23/08/19

Introdução

A necessidade atual de um desenvolvimento tecnológico com menor impacto ambiental nas áreas de arquitetura, design e engenharias destaca-se em pesquisas voltadas à incorporação de matérias-primas alternativas às convencionalmente utilizadas pela indústria, como as provenientes da biomassa vegetal e das atividades agrícolas, florestais e agroalimentares, a exemplo da fibra vegetal, que pode ser adicionada a materiais plásticos para originar compósitos com diversas finalidades – como a produção do ambiente construído.

Pesquisas já desenvolvidas apontam vantagens do uso das fibras vegetais, tais como (BENÍTEZ *et al.*, 2013; KU *et al.*, 2011; PRADO; SPINACÉ, 2015):

- (a) provêm de fontes renováveis e abundantes;
- (b) são biodegradáveis;
- (c) consomem quantidade menor de dióxido de carbono (CO₂);
- (d) têm baixo custo de aquisição – em muitos casos, surgem como resíduo da agricultura;
- (e) apresentam bom desempenho mecânico – com destaque para a resistência à tração;
- (f) promovem redução do consumo energético;
- (g) causam menor desgaste nos equipamentos envolvidos em seu processamento;
- (h) são atóxicas; e
- (i) podem estimular empregos na área rural e a autoconstrução.

Um significativo gerador de fibras vegetais é a fruticultura. Pesquisa divulgada por Mendes (2013) aponta que tende a ser grande o processamento industrial de frutas em países tropicais e cita o Brasil como um produtor em potencial nesse segmento. Essa questão tem motivado discussões sobre o descarte adequado dos resíduos sólidos gerados nessa atividade – cascas, coroas, folhas, etc. (SOUSA, 2009).

Este artigo resulta de uma pesquisa realizada na região Nordeste do Brasil que teve início com um levantamento das espécies vegetais mais cultivadas pelos agricultores locais. Observou-se intensa produção do abacaxi – *Ananascomosus*. O Brasil é um dos líderes mundiais em cultivo e exportação desse fruto.

No cenário mundial, o abacaxi também é cultivado na Ásia, África, Américas – Sul, Central e Norte – e Europa, sendo um dos frutos mais consumidos mundialmente. Brasil, China, Costa Rica, Filipinas, Havaí, Índia e Tailândia são os maiores produtores (BENGOZI *et al.*, 2007).

Devido às características físicas da fibra da folha do abacaxizeiro, verificou-se a existência de estudos, nos âmbitos nacional e internacional, sobre suas propriedades físicas e mecânicas, tendo recebido as nomenclaturas de fibra da folha do abacaxizeiro (FFA) e *pineapple leaf fiber* (PALF) respectivamente.

Essas pesquisas – Mangal *et al.* (2003), Chollakup *et al.* (2010), Amornsakchai e Kengkhetkit (2014), Bhagawan, Devi e Thomas (2011) e Gomes (2015) –, apontaram bom desempenho mecânico, boa condutividade térmica e resultados satisfatórios em conjunto com materiais poliméricos – como as resinas – para uso em materiais compósitos com aplicações nas engenharias.

Destarte, outra categoria de materiais analisada na atualidade é a resina vegetal, por utilizar matéria-prima menos poluente ao meio ambiente, tanto no processo de fabricação, quanto no ciclo de vida, e menos nociva à população, como a resina bicomponente derivada do óleo de mamona, sendo a mamona – *Ricinuscommunis* – uma espécie vegetal comum no território brasileiro.

À luz dessas reflexões, a pesquisa teve como objetivo principal, confeccionar materiais compósitos com a fibra da folha do abacaxizeiro, neste trabalho também denominada de PALF, e resina vegetal, a poliuretano bicomponente derivada do óleo de mamona; e, como objetivos específicos, atender ao processo industrial, porém adaptado ao ambiente laboratorial; utilizar a fibra *in natura*; e estudar recomendações de uso do material desenvolvido no ambiente construído.

O trabalho foi motivado, inicialmente, pelo desenvolvimento de um compósito formado por matérias-primas naturais, considerando a redução dos impactos ambientais e a possibilidade de incorporação de novos materiais na arquitetura, design e engenharias. E, também, pela condição de o abacaxi ser consumido em grande escala no Brasil e no mundo, fator que enfatiza questões sociais, uma vez que o abacaxizeiro é considerado uma planta perene, e, após produzir o fruto, seu desenvolvimento é continuado através de uma

gema na base, sendo a parte da planta que contém as folhas descartada após a colheita. A extração e uso da PALF, além de minimizar os resíduos agrícolas, pode atuar como uma fonte de renda secundária aos cultivadores, pois são, em maioria, pequenos agricultores ou cooperativas.

Este artigo relata o procedimento experimental adotado para a confecção dos compósitos e discute os resultados referentes às caracterizações físicas – massa específica, teor de umidade e absorção de água – e mecânicas – flexão, tração e módulo de elasticidade. Ainda apresenta um estudo sobre recomendações de uso do material para a produção do ambiente construído, a partir de comparativo dos resultados obtidos com documento normativo norte-americano referente aos painéis compósitos de partículas; e simulação computacional, por meio da modelagem paramétrica.

Referencial teórico

Entre os compósitos estudados atualmente destacam-se aqueles que usam as fibras vegetais como agentes de reforço, cujas investigações relacionam-se com as propriedades físicas e mecânicas em função da fração volumétrica das matérias-primas e do comprimento e orientação da fibra.

Nesse contexto, observou-se que a maioria das fibras vegetais possui composição química similar à da madeira, resultando, portanto, em propriedades físico-mecânicas aproximadas. Trabalhos foram desenvolvidos com o intuito de analisar a viabilidade do uso de fibras vegetais na produção de compósitos, e, de acordo com Santiago (2007), a tendência é que essa demanda cresça devido ao aumento do custo da madeira e à redução da oferta de espécies nativas comerciais e de reflorestamento.

Quanto aos estudos analisados durante a pesquisa, foram verificadas algumas características padrão, como os ensaios físicos e mecânicos mais realizados, e a orientação e as frações volumétricas do agente de reforço.

Carvalho, Joseph e Medeiros (1999) analisaram compósitos de matriz poliéster reforçados por fibras curtas de sisal em função do comprimento, fração volumétrica e orientação das fibras. Os resultados mostraram que a resistência mecânica cresceu com o aumento do comprimento das fibras – 5 mm a 45 mm –, atingiu um limite máximo – 45 mm a 55 mm – e então decresceu – 55 mm a 75 mm. Perceberam, ainda, que a resistência dos compósitos aumentou com o teor de fibras até 50% e, a partir de então, tendeu a decrescer.

Chollakup *et al.* (2010) avaliaram a PALF considerando os efeitos de diferentes comprimentos, curtos e longos, e dos teores de fibras – 0% a 25% – para reforço em poliolefinas. Os resultados mostraram que a resistência mecânica dos compósitos aumentou quando a fração volumétrica da fibra foi aumentada. Observou-se que os compósitos contendo fibras longas eram mais fortes do que os compósitos com fibras curtas. O arranjo unidirecional proporcionou boa ligação interfacial entre a fibra e o polímero, que foi um fator importante na obtenção de compósitos com resistências mais elevadas.

Amornsakchai e Kengkhethkit (2014) investigaram compósitos de polipropileno com PP e PALF extraídos mecanicamente e cortados na dimensão de 5 mm. Quanto aos teores de PALF utilizados para confecção dos compósitos, os autores definiram 0%, 10%, 20% e 30%, sendo as amostras preparadas, em duas etapas, por fusão do PP com as PALF – alinhadas na direção longitudinal; e moldagem por compressão, seguindo de arrefecimento. Ao longo da discussão dos resultados, os autores apontaram a viabilidade e recomendação de uso da PALF como reforço em compósitos plásticos. Em relação às frações volumétricas analisadas, as amostras com teor de fibra de 30% apresentaram os maiores resultados para as caracterizações mecânicas.

Bhagawan, Devi e Thomas (2011) analisaram compósitos poliméricos de poliéster e PALF. Os teores de PALF definidos foram 0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50%, em que as amostras foram preparadas manualmente, sendo a resina de poliéster vazada sobre os tapetes de fibras e o molde curado à temperatura ambiente durante 24 h sob pressão constante de 1 MPa, e pós-curado a 50 °C por mais 24 h. Os resultados obtidos na caracterização mecânica revelaram que as amostras com teores de PALF de 40% foram as que apresentaram maiores resistências.

Gomes (2015) estudou compósitos poliméricos de epóxi e PALF, e poliéster e PALF, em que a PALF foi inserida no material com comprimento longo e orientação longitudinal. Os teores de fibras nos compósitos foram 0%, 10% e 30%. Para a produção das amostras, o material foi moldado por compressão, com o auxílio de uma prensa hidráulica com capacidade de 15 t. Segundo o autor, os maiores valores dos ensaios mecânicos foram do compósito epóxi e PALF com teor de 30%.

Conforme literatura correlata, pode-se apontar que compósitos com fibras longas, unidirecionais e maior inserção de fibras vegetais tendem a apresentar resistência mecânica mais elevada.

Materiais e procedimento experimental

As folhas dos abacaxizeiros foram coletadas no município de Mamanguape, PB, Brasil. As plantas foram de um período pós-colheita, possuíam aproximadamente 80 cm de comprimento e 1,5 ano de idade; e o fruto era do tipo pérola.

A extração da PALF obedeceu aos seguintes procedimentos: desfibramento mecânico das folhas do abacaxizeiro, utilizando a máquina desfibradeira desenvolvida por Aquino (2006), e secagem da PALF ao ar livre por um período de 48 h, como ilustrado na Figura 1. Após o processo de extração da PALF e secagem ao ar livre, realizou-se a cardagem manual para a retirada das mucilagens aderidas às fibras.

O poliuretano vegetal foi fornecido pela empresa Imperverg, localizada em Aguai, SP, Brasil – identificado pelo código AGT 1315 –, consistindo em uma resina bicomponente, denominada de resina poliuretano bicomponente derivada do óleo de mamona – formulada pela reação a frio de um pré-polímero e um polioliol.

Conforme especificações do fabricante, o polioliol foi sintetizado a partir do óleo de mamona, em que se obteve um poliéster trifuncional. Já o pré-polímero, a partir da transformação do difenilmetanodiosocianato (MDI) com ácidos graxos.

Sistematização do procedimento experimental

A sistematização do procedimento experimental foi iniciada com a definição das frações volumétricas – teores da matriz e do agente de reforço – e da orientação e comprimento das fibras, embasada em estudos sobre compósitos poliméricos com resinas termofixas e fibras vegetais, principalmente com a PALF, tais como Carvalho, Joseph e Medeiros (1999), Chollakup *et al.* (2010), Amornsakchai e Kengkhetkit (2014), Bhagawan, Devi e Thomas (2011) e Gomes (2015).

A definição dos teores dos compósitos estudados, além de basear-se nas pesquisas científicas – que indicaram melhores resistências mecânicas entre os teores de 10% e 40% de agente de reforço –, considerou a disponibilidade de matérias-primas – principalmente da PALF –, sendo definidas em, 100%(matriz)/0%(fibra); 85%(matriz)/15%(fibra); 70%(matriz)/30%(fibra) e 60%(matriz)/40%(fibra). A PALF foi utilizada com comprimento longo e orientada majoritariamente no sentido longitudinal dos compósitos, não sendo tracionada.

O cálculo da fração volumétrica entre PALF e matriz foi determinado a partir do volume dos materiais e do compósito, sendo baseado em Silva (2003). As Equações 1 e 2 foram utilizadas para esse cálculo, em que V_{ff} e V_{fm} são as frações volumétricas de fibras e de matriz respectivamente, M_f é a massa de fibras, M_m é a massa da matriz, M_{ef} e M_{em} são as massas específicas de fibra e matriz respectivamente, e V_c o volume do compósito.

$$V_{ff} = V_f/V_c, \text{ sendo } V_f = M_f/M_{ef} \quad \text{Eq. 1}$$

$$V_{fm} = V_m/V_c, \text{ sendo } V_m = M_m/M_{em} \quad \text{Eq. 2}$$

Figura 1 - Extração da PALF



A massa específica da PALF foi calculada para esta pesquisa e assumida como sendo $1,40 \text{ g/cm}^3$. Deve-se ressaltar que é um valor coerente com o obtido na literatura correlata. A do poliuretano foi de $1,05 \text{ g/cm}^3$, valor fornecido pelo fabricante.

As etapas seguintes relacionaram-se com a caracterização da PALF, a confecção dos compósitos, ensaios físicos e mecânicos com as amostras dos compósitos, e estudo de recomendações de uso do material no ambiente construído.

Caracterização da PALF

A caracterização da PALF objetivou aferir a geometria – diâmetro e comprimento –, a massa específica, o teor de umidade, a absorção de água, a resistência à tração e o módulo de elasticidade.

Determinação da geometria das fibras

Para a determinação do diâmetro da PALF foi utilizado um micrômetro com precisão de $10 \mu\text{m}$, sendo realizadas três medições ao longo do comprimento das fibras – nas extremidades e no centro –, num total de 20 fibras. Em seguida foi calculada a média aritmética dos diâmetros e depois considerada a média total.

O comprimento da PALF foi medido por meio de uma trena com precisão de $1,0 \text{ mm}$, sendo aferidas 30 fibras. Esses procedimentos foram realizados de acordo com Correia (2011).

Determinação da massa específica

A determinação da massa específica da PALF foi baseada em Correia (2011) e consistiu na secagem de uma amostra *in natura* de aproximadamente $3,0 \text{ g}$ de PALF em estufa eletrônica Ethiktechnology a $105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$. Após duas pesagens consecutivas, com intervalos de 2 h , ela não apresentou variação de massa superior a $0,1\%$. Depois disso, as amostras ficaram imersas em água destilada por um período de 24 h , para que a variação do volume fosse determinada.

O ensaio foi realizado em triplicata, à temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$, e a massa específica foi calculada pela Equação 3, em que M_{ef} é a massa específica, M_{f1} , a massa de PALF seca, e ΔV , a variação do volume da água contida no recipiente.

$$M_{ef} = M_{f1} / \Delta V \quad \text{Eq. 3}$$

Determinação do teor de umidade

A determinação do teor de umidade da PALF foi realizada de acordo com a norma D1413 – American Society for Testing and Materials (AMERICAN..., 2007b), mediante a adição, em um pesa-filtro, de uma amostra *in natura* de aproximadamente $1,0 \text{ g}$ da PALF. O sistema foi levado à estufa eletrônica Ethiktechnology a $105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ por um período de 4 h . O pesa-filtro foi transferido para um dessecador, e, em seguida, a amostra foi pesada em uma balança eletrônica Shimadzu/UX6200H. O procedimento foi repetido até ser obtida massa constante.

Esse procedimento foi realizado à temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$, e o teor de umidade foi calculado de acordo com a Equação 4, em que %umidade é o teor de umidade, M_f é a massa inicial, em gramas, da amostra das fibras, e M_{f1} , a massa, em gramas, da amostra das fibras secas.

$$\% \text{umidade} = (M_f - M_{f1}) / M_f \times 100 \quad \text{Eq. 4}$$

Determinação da absorção de água

A determinação da absorção de água da PALF consistiu na secagem de uma amostra *in natura* de aproximadamente $1,0 \text{ g}$ da PALF em estufa eletrônica Ethiktechnology a $105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$. Posteriormente, foi determinado o peso das fibras secas com uma balança eletrônica Shimadzu/UX6200H. Em seguida, foram imersas em água destilada, e realizadas verificações do peso no período de 2 h . Procedeu-se a determinações em intervalos de 24 h até o quarto dia. O excesso de água das amostras foi retirado com papel absorvente. O ponto de saturação foi determinado quando o peso da amostra atingiu um valor constante.

Esse procedimento foi realizado em triplicata, à temperatura de 25 °C, e a absorção de água (AA%), em percentual, foi calculada com a Equação 5 (PICANÇO, 2005¹ *apud* CORREIA, 2011), em que M_{fu} é a massa úmida das fibras, e M_{fi} é a massa das fibras secas em estufa, ambas em gramas.

$$AA\% = (M_{fu} - M_{fi}) / M_{fi} \times 100 \quad \text{Eq. 5}$$

Ensaio de resistência à tração da PALF

O ensaio de resistência à tração com a fibra foi realizado em uma máquina de ensaios Shimadzu, utilizando o programa Trapezium. Ocorreu conforme indicado por Bhagawan, Devi e Thomas (2011): foram realizados com velocidade de 5,0 mm/min, à temperatura de 25 °C e em triplicata.

Confecção dos compósitos

A confecção dos compósitos foi embasada pelas pesquisas científicas apresentadas por Chollakup *et al.* (2010), Amornsakchai e Kengkhetkit (2014), Bhagawan, Devi e Thomas (2011) e Silva (2003), e também por normas técnicas vigentes.

Os compósitos foram confeccionados pelo processo de moldagem por compressão em uma prensa hidráulica Marconi, com capacidade de 15 toneladas. Antes da moldagem, realizou-se a secagem da PALF por aproximadamente 12 h em uma estufa eletrônica Ethiktechnology a 70± 5 °C, para a redução da umidade absorvida.

O processo de moldagem dos compósitos objetivou uma aproximação com o ciclo de produção adotado na indústria, adaptado para o ambiente laboratorial, e foi desenvolvido com base em Maloney (1996): homogeneização ou mistura da matriz com o agente de reforço, formação do colchão constituído pelo material compósito, prensagem do colchão constituído pelo material compósito e acabamento.

Homogeneização ou mistura da matriz com o agente de reforço

Essa fase consistiu na aplicação da resina nas fibras, buscando homogeneidade de distribuição das matérias-primas, a fim de assegurar propriedades uniformes sobre toda a extensão do compósito. A PALF foi utilizada na forma *in natura*, e as moldagens ocorreram manualmente e em condições ambientes. Os comprimentos utilizados foram obtidos a partir de corte manual, com tesoura, de acordo com as dimensões dos moldes.

O poliuretano vegetal foi utilizado como aglomerante e, conforme mencionado, foi obtido a partir da mistura, em volume, do pré-polímero e do polioliol, utilizados na proporção de 1:1,5 respectivamente. Após a mistura, o tempo de trabalho (*potlife*) foi estipulado pelo fabricante em 15 min, quando a resina tendeu a entrar no ponto de gel, dificultando o manuseio do material.

Formação do colchão constituído pelo material compósito

A formação do colchão constituído pelo material compósito ocorreu a partir do depósito de camadas alternadas de PALF e do poliuretano vegetal, nas dimensões dos corpos de prova (CP) ou em chapas maiores – que, após a desmoldagem e o período de estabilização, foram cortadas nas dimensões dos CP –, indicadas pelas normas técnicas vigentes para cada ensaio realizado.

Foram utilizados três tipos de moldes metálicos, produzidos em aço, e com as medidas relacionadas ao tipo de CP a ser confeccionado: 70 mm de comprimento x 50 mm de largura x 20 mm de profundidade – massa específica e teor de umidade; chapa vazada com o formato retangular do CP com dimensões de 127 mm de comprimento x 12,7 mm de largura x 3,2 mm de espessura – ensaio de flexão; chapa vazada com formato retangular medindo 127 mm de comprimento x 100 mm de largura x 3,2 mm de espessura – ensaio de absorção de água; e chapa vazada com o formato do CP “gravata borboleta” – ensaio de tração.

¹PICANÇO, M. de S. *Compósitos cimentícios reforçados com fibras de curauá*. Rio de Janeiro, 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

Prensagem do colchão constituído pelo material compósito estudado

Considerando o processo de prensagem, Dias *et al.* (2005) colocam que na indústria é muito importante considerar o conjunto de condições sob as quais compósitos poliméricos são produzidos, como temperatura, pressão e tempo de prensagem, fase conhecida como moldagem por compressão.

A moldagem dos compósitos foi realizada com uma prensa hidráulica Marconi, com aplicação de força que variou entre 1,2 t e 3 t, definida de acordo com o tipo de molde utilizado, conforme as pesquisas científicas correlatas mencionadas. A desmoldagem do compósito foi feita após um mínimo de 24 h. Como desmoldantes, foram utilizados papel-alumínio, folhas plásticas e vaselina.

Acabamento

Após a desmoldagem, os compósitos foram acondicionados por 48 h e, em seguida, cortados, como já indicado, e/ou lixados, a fim de remover qualquer imperfeição, bem como eliminar irregularidades. A Figura 2 ilustra CP dos ensaios de tração, massa específica e teor de umidade, que foram os mesmos.

Ensaio físicos e mecânicos

Foram realizados ensaios físicos – massa específica, teor de umidade e absorção de água – e mecânicos – resistências à flexão e à tração – obedecendo às normas técnicas vigentes e sugeridas na literatura correlata. Para a realização dos ensaios físicos e mecânicos, os CP passaram por um período de estabilização mínimo de 72 h após a desmoldagem.

Determinação da massa específica e do teor de umidade

Os ensaios para a determinação da massa específica e do teor de umidade dos CP foram realizados conforme a norma D2395 (AMERICAN..., 2007a). Para tanto, foram utilizados CP com 25,4 mm de comprimento x 25,4 mm de largura x 12,7 mm de espessura. Os CP foram inicialmente pesados e levados para uma estufa eletrônica Ethiktechnology, a 103±5 °C, até obterem constância no peso, e depois pesados novamente. O ensaio foi realizado em triplicata.

Para os cálculos da massa específica e do teor de umidade foram utilizadas as Equações 6 e 7 respectivamente, em que %umidade é o teor de umidade; M_{ec} , a massa específica do compósito; M_c , a massa inicial do compósito; M_{c1} , a massa do compósito após a secagem em estufa; e V_c , o volume do compósito.

$$\% \text{umidade} = 100 \times (M_c - M_{c1}) / M_{c1} \quad \text{Eq. 6}$$

$$M_{ec} = M_{c1} / V_c \quad \text{Eq. 7}$$

Figura 2 - Corpos de prova confeccionados para o ensaio



(a) Resistência à tração

(b) Massa específica e teor de umidade

Ensaio de absorção de água - 2 h e 24 h

O ensaio de absorção de água com os CP foi realizado conforme as normas D570 (AMERICAN..., 1998). O percentual de absorção de água foi determinado após os períodos de 2 h e 24 h, utilizando CP circulares que mediam 50,8 mm de diâmetro e 3,2 mm de espessura. Para a realização do ensaio, os CP foram inicialmente pesados e imersos em água, e, posteriormente, retirados da água, secos superficialmente com papel absorvente e pesados.

O ensaio foi realizado em triplicata, à temperatura de 25 °C, e a absorção de água foi calculada de acordo com a Equação 8, em que AA% é a absorção de água; M_{cu} , a massa final dos compósitos após imersão em água; e M_c , a massa inicial dos compósitos.

$$AA\% = (M_{cu} - M_c) / M_c \times 100 \quad \text{Eq. 8}$$

Ensaio de flexão

O ensaio de flexão com os CP foi realizado conforme a norma D790-10 (AMERICAN..., 2010), em uma máquina de ensaios Shimadzu, utilizando o programa Trapezium. A dimensão do CP foi de 127,0 mm de comprimento x 12,7 mm de largura x 3,2 mm de espessura, em que a razão entre a distância dos apoios e a espessura do CP foi de 16. Os ensaios foram realizados com velocidade de 1,0 mm/min, à temperatura de 25 °C e em quintuplicata.

Ensaio de resistência à tração

O ensaio de resistência à tração com os CP foi realizado em uma máquina de ensaios Shimadzu, utilizando o programa Trapezium. Ocorreu de acordo com a norma D638 (AMERICAN..., 2002), com CP com formato análogo a uma “gravata borboleta” e espessura de 3,2 mm. Os ensaios foram realizados com velocidade de 5,0 mm/min, à temperatura de 25 °C e em quintuplicata.

Após os ensaios físicos e mecânicos, foram realizadas as análises dos resultados. Em seguida, procedeu-se ao estudo de recomendações de uso do material no ambiente construído, cujo foco foi a confecção de componentes arquitetônicos e mobiliários, considerando o documento normativo A208.1 (AMERICAN..., 2016), e simulação computacional, por meio da modelagem paramétrica, utilizando o programa Rhinoceros 3D 5.12 e os plugins Grasshopper 0.9.0076 e Karamba 3D 1.3.0.

Resultados e discussões

Caracterização da PALF

Os valores médios relacionados ao diâmetro e ao comprimento da PALF foram 75 μm e 70 cm respectivamente. Quanto aos valores médios encontrados para massa específica, teor de umidade e absorção de água, foram 1,40 g/cm³, 10% e 10% respectivamente. A Tabela 1 apresenta os valores máximos, mínimos e médios para cada propriedade analisada da PALF.

Caracterização dos compósitos

Massa específica e teor de umidade

A massa específica e o teor de umidade em um compósito de fibras são características relevantes, uma vez que tendem a influenciar sua resistência mecânica, pois se relacionam com a trabalhabilidade em situações de uso. Em painéis compósitos derivados da madeira ou de fibras vegetais, ainda norteiam a classificação desses materiais para a inserção no mercado, quanto, principalmente, ao tipo de aplicação – ex.: divisória, forro, mobiliário, piso e vedação.

Em relação ao poliuretano vegetal e aos compósitos estudados nesta pesquisa, observou-se que as médias da massa específica das amostras com frações volumétricas de 100%(matriz)/0%(fibra); 85%(matriz)/15%(fibra); 70%(matriz)/30%(fibra); e 60%(matriz)/40%(fibra) foram respectivamente 800 kg/m³, 610 kg/m³, 720 kg/m³ e 760 kg/m³, como exposto na Figura 3.

A inserção da PALF reduziu a massa específica dos compósitos, uma vez que os maiores valores encontrados foram do poliuretano. Os valores das frações volumétricas de 70%(matriz)/30%(fibra) e 60%(matriz)/40%(fibra) foram aproximados – considerando os valores médios, o teor de 30% de PALF possui massa específica 5,26% menor que o teor de 40%. Já a média da massa específica da fração

volumétrica de 85%(matriz)/15%(fibra) foi inferior que a das demais, sendo 15,27%, 19,75% e 23,75% menor que os teores de 30%, 40% e 0% respectivamente.

A Figura 3 ressalta também a discrepância entre os resultados encontrados para as amostras referentes à fração volumétrica de 85%(matriz)/15%(fibra). Considerando as especificações fornecidas pelo fabricante do poliuretano, pode-se apontar que essa diferença tende a relacionar-se com a característica da resina em incorporar ar durante o processo de moldagem e o período de cura, tornando o compósito mais aerado, uma vez que há aumento na quantidade do poliuretano e redução no teor de PALF.

Quanto ao teor de umidade, observou-se que as médias das amostras com frações volumétricas de 100%(matriz)/0%(fibra); 85%(matriz)/15%(fibra); 70%(matriz)/30%(fibra) e 60%(matriz)/40%(fibra) foram respectivamente 1,93%, 4,01%, 6,42% e 7%.

Observando os valores médios apresentados para o teor de umidade, percebe-se que o resultado do poliuretano foi inferior aos dos compósitos, sendo mínimo. Esse fato pode estar relacionado com uma das propriedades da resina utilizada, a impermeabilidade, que é comumente uma característica dos materiais poliméricos. As médias superiores foram percebidas nos compósitos com as maiores frações volumétricas – 70%(matriz)/30%(fibra) e 60%(matriz)/40%(fibra) –, que apresentaram valores aproximados entre si e discrepantes de 85%(matriz)/15%(fibra), 37,59% e 42,71% inferior que os teores de 30% e 40% de PALF respectivamente, como ilustrado na Figura 4.

Pode-se afirmar que a incorporação de PALF, independentemente da fração volumétrica, promoveu aumento no teor de umidade dos compósitos estudados. Essa questão pode estar associada à natureza hidrófila das fibras vegetais, fato que influencia na retenção de umidade no interior delas e, conseqüentemente, nos materiais em que elas atuam como agente de reforço.

Tabela 1 - Caracterizações físicas da fibra da folha do abacaxizeiro - PALF

Valores	Diâmetro (µm)	Comprimento (cm)	Massa específica (g/cm ³)	Teor de umidade (%)	Absorção de água (%)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Valor máximo	95	80	1,42	11	11	415	6.240
Valor mínimo	50	50	1,39	9	10	399	5.997
Valor médio	75	70	1,40	10	10	407	6.118

Figura 3 - Gráfico da relação entre os valores máximos e mínimos, e médias da massa específica dos compósitos

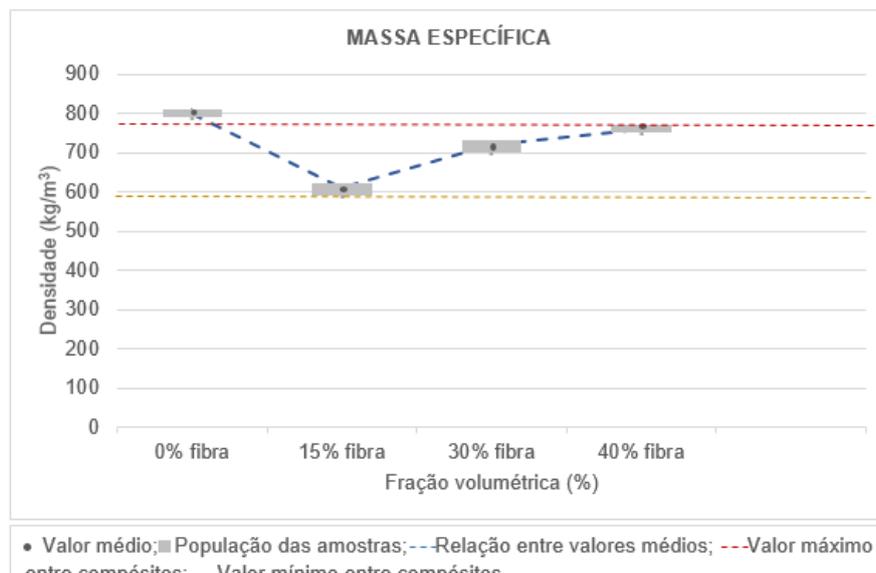
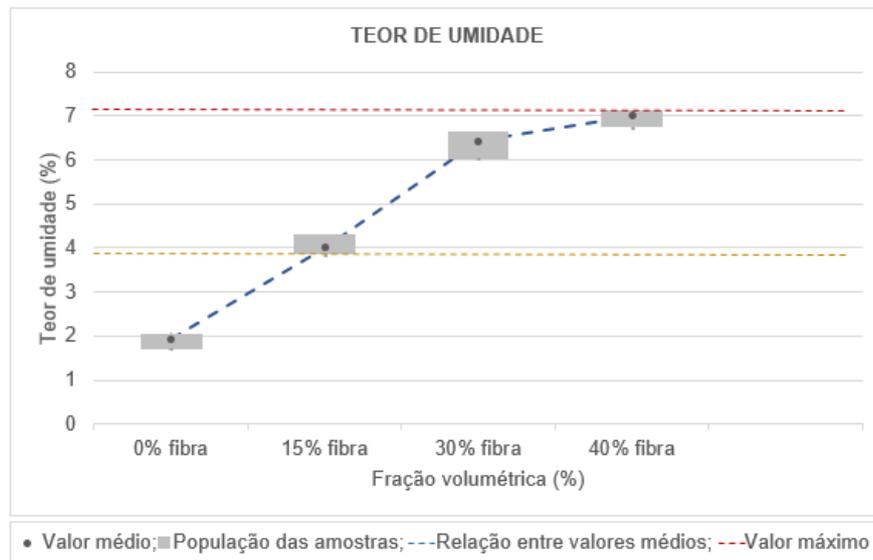


Figura 4 - Gráfico da relação entre os valores máximos e mínimos, e médias do teor de umidade nos compósitos



Absorção de água

De acordo com a D570 (AMERICAN..., 1998), o ensaio para determinação da taxa da absorção de água possui duas funções principais, referência para a proporção de água absorvida por determinado material e teste de controle sobre sua uniformidade. Também fornece indicações quanto às condições de adesão e de resistência das partículas que o constituem quando submetido à imersão em água.

Em compósitos poliméricos reforçados por fibras vegetais, a absorção de água não ocorre apenas pela superfície da fibra, embora esse seja o mecanismo principal, mas também através do lúmen, região localizada em seu centro, por efeito de capilaridade (LI; MAI; YE, 2000; SILVA, 2003). Ela possui vasos cuja função é canalizar água em seu interior, e, dessa forma, a tendência é que em um compósito com fibra longa a absorção de água seja inferior que em um compósito com fibra curta (GELLERSTED *et al.*, 1990).

Silva (2003) menciona que o nível da absorção de água relaciona-se basicamente com o percentual da fração volumétrica, portanto outro ponto importante é a qualidade da interface entre a fibra e a matriz, pois, quanto maior a adesão, menor será a absorção de água. Nesta pesquisa foram observados os percentuais de água retidos no interior das amostras pelos períodos de 2 h e 24 h, como indica a D570 (AMERICAN..., 1998).

Absorção de água - 2 h

Quanto às amostras estudadas, a absorção de água do poliuretano, assim como seu teor de umidade, após 2 h de imersão, foi mínima, aproximadamente 1%. Outra condição observada associa-se ao aumento no nível da absorção de água dos compósitos, que foi diretamente proporcional ao aumento do teor de PALF.

As médias das amostras com frações volumétricas de 100(matriz)/0%(fibra); 85%(matriz)/15%(fibra); 70%(matriz)/30%(fibra); e 60%(matriz)/40%(fibra) foram respectivamente 1,07%, 4,64, 6,28% e 6,49%, como destacado na Figura 5.

Pode-se apontar que as médias da absorção de água após 2 de imersão para os compósitos com as frações volumétricas de 70%(matriz)/30%(fibra) e 60%(matriz)/40%(fibra) foram aproximadas, sendo o valor médio do teor de 30% de PALF 3,23% inferior que o teor de 40%. Já a fração volumétrica de 85%(matriz)/15%(fibra) apresentou resultado inferior – o valor médio da absorção de água foi 26,11% e 28,50% menor que os teores de 30% e 40% de PALF respectivamente. Esse fato pode estar associado ao aumento do poliuretano e à redução do teor de fibras nessa fração volumétrica.

Absorção de água - 24 h

Em relação à absorção de água após 24 h de imersão, observou-se que os resultados do poliuretano permaneceram estáveis, aproximadamente 1%, e a condição quanto ao aumento no nível de absorção de água em relação ao aumento da fração volumétrica de PALF nos compósitos se manteve. Observou-se que

as médias da absorção de água das amostras com frações volumétricas de 100(matriz)/0%(fibra); 85%(matriz)/15%(fibra); 70%(matriz)/30%(fibra); e 60%(matriz)/40%(fibra) foram respectivamente 1,07%, 5,95%, 9,01% e 9,63%, como indicado na Figura 6.

Os valores da fração volumétrica de 85%(matriz)/15%(fibra) mantiveram-se abaixo das frações volumétricas de 70%(matriz)/30%(fibra) e 60%(matriz)/40%(fibra) – neste caso, as médias da absorção de água permaneceram próximas.

Resistência à flexão

A resistência à flexão representa a tensão máxima desenvolvida na superfície de um material quando sujeito ao dobramento. Aplica-se a materiais rígidos, isto é, àqueles que não vergam excessivamente sob a ação da carga (MANO, 1991).

Observou-se que as médias da tensão máxima suportadas pelas amostras com frações volumétricas de 100(matriz)/0%(fibra); 85%(matriz)/15%(fibra); 70%(matriz)/30%(fibra); e 60%(matriz)/40%(fibra) foram respectivamente 2,52 MPa, 61,64 MPa, 73,42 MPa e 87,40 MPa, como visto na Figura 7.

Figura 5 - Gráfico da relação entre os valores máximos e mínimos, e médias da absorção de água - 2 h - nos compósitos

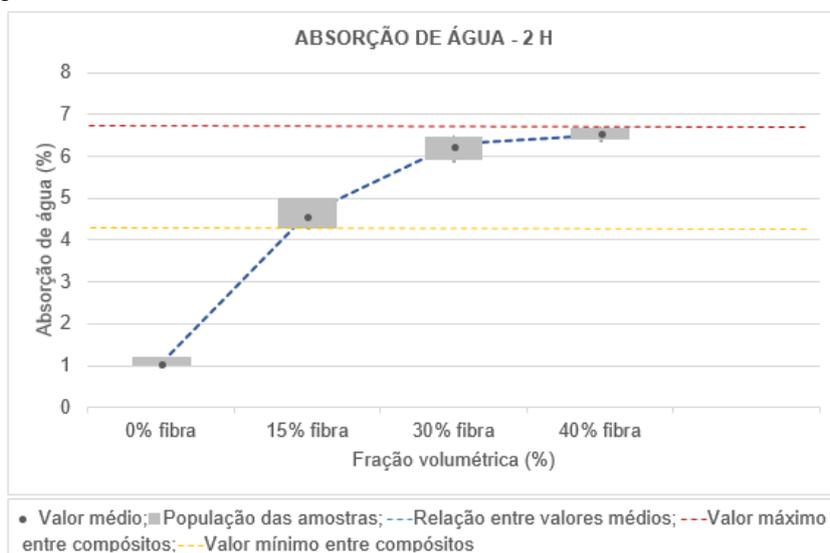


Figura 6 - Gráfico da relação entre os valores máximos e mínimos, e médias da absorção de água - 24 h - nos compósitos estudados

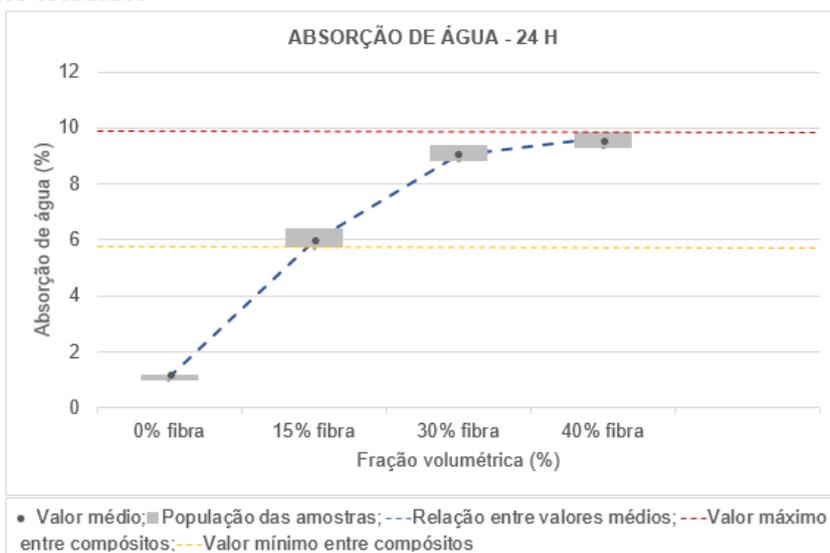
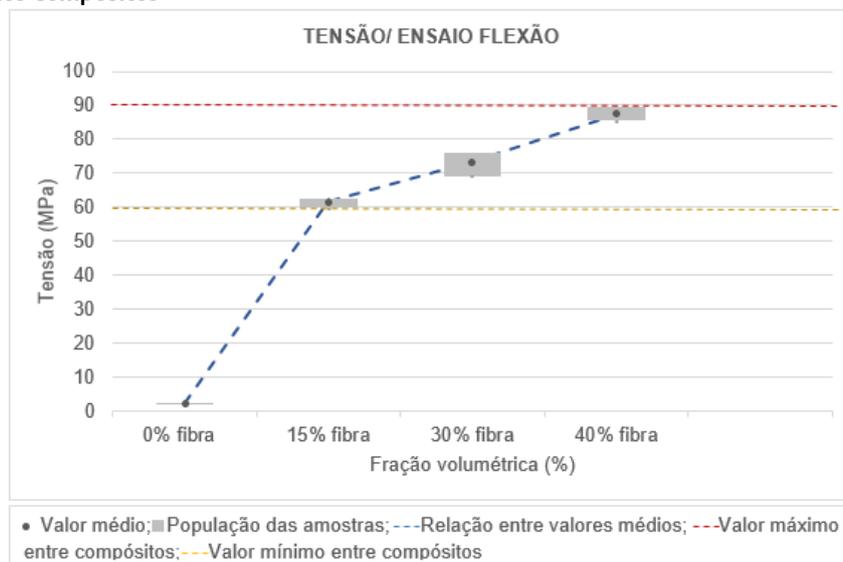


Figura 7 - Gráfico da relação entre os valores máximos e mínimos, e médias da tensão máxima suportada pelos compósitos



Os resultados encontrados ressaltam a fragilidade do poliuretano utilizado em suportar as tensões máximas dos esforços de flexão quando comparado aos compósitos estudados, evidenciando a função da PALF em potencializar a resistência desses materiais.

Ao correlacionar os valores obtidos nas determinações da massa específica, com as médias das tensões máximas suportadas, pode-se apontar que massa específica maior nos compósitos estudados é diretamente proporcional ao aumento da resistência à flexão. Esse fato também foi observado por Chen e Ma (1994).

Resistência à tração

A resistência à tração é medida considerando a quantidade de carga ou força de tração, gradativamente crescente, necessária para romper um material por alongamento (CALLISTER JUNIOR, 2003). Após submeter os CP aos esforços de tração, observou-se que as médias da tensão máxima suportada pelas frações volumétricas de 100%(matriz)/0%(fibra); 85%(matriz)/15%(fibra); 70%(matriz)/30%(fibra) e 60%(matriz)/40%(fibra) foram respectivamente 2,06 MPa, 56,27 MPa, 71,57 MPa e 81,58 MPa, conforme a Figura 8.

A fração volumétrica de 60%(matriz)/40%(fibra) obteve o melhor desempenho mecânico neste ensaio, 31,03% e 12,28% acima em relação aos teores de 15% e 30% de PALF respectivamente.

Os resultados encontrados ressaltam a fragilidade do poliuretano em suportar as tensões máximas dos esforços de tração quando comparado aos compósitos estudados. O compósito com teor de 15% de PALF apresentou fratura transversal ao direcionamento do ensaio de tração. Como consequência desse comportamento, esse compósito apresentou valor inferior de resistência à tração. Nos compósitos reforçados com 30% e 40% de PALF, ocorreu desvio da trinca longitudinalmente à direção das fibras, o que impediu o rompimento total dos CP, o que demonstra maior resistência ao tracionamento, como pode ser visto na Figura 9.

Módulo de elasticidade em tração

O módulo de elasticidade relaciona-se com as forças das ligações interatômicas, correspondendo à rigidez ou à resistência do material à deformação elástica. Quanto maior o valor, mais rígido será o material, ou menor será sua deformação elástica. Comumente, os polímeros apresentam módulos baixos.

As médias dos valores do módulo de elasticidade obtidos para as frações volumétricas de 100%(matriz)/0%(fibra); 85%(matriz)/15%(fibra); 70%(matriz)/30%(fibra) e 60%(matriz)/40%(fibra) foram respectivamente 230 MPa, 1.990 MPa, 2.360 MPa e 3.130 MPa. A Figura 10 apresenta esses valores e resalta a característica frágil do material estudado.

Figura 8 - Gráfico da relação entre os valores máximos e mínimos, e médias da tensão máxima suportada pelos compósitos

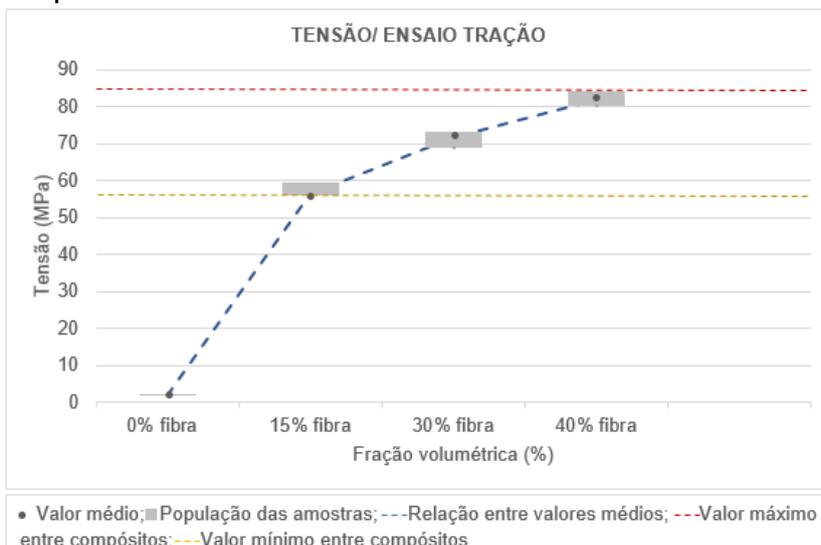
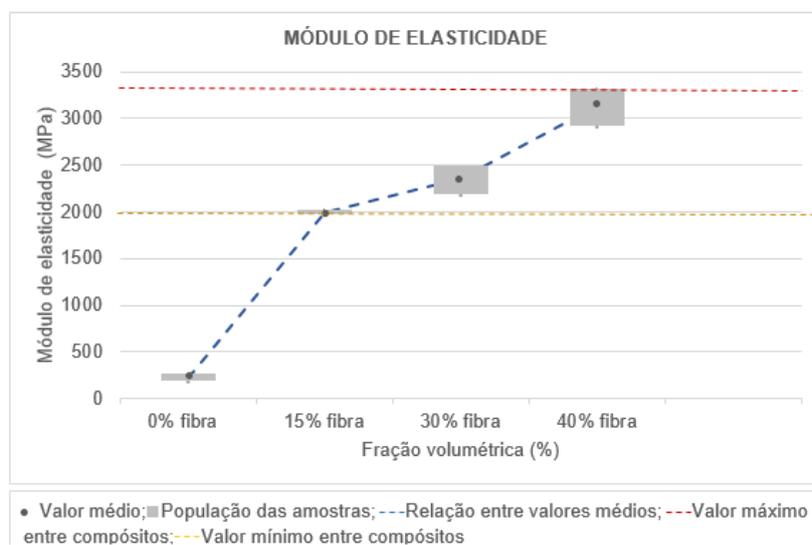


Figura 9 - Corpos de prova do ensaio de resistência à tração após rompimento: (a) 15% de PALF; (b) 30% de PALF; e (c) 40% de PALF



Figura 10 - Gráfico da relação entre os valores máximos e mínimos, e médias do módulo de elasticidade dos compósitos



Assim como a resistência à tração, pode ser verificado aumento do módulo de elasticidade em função do acréscimo da PALF na matriz de poliuretano, que promoveu maior desvio da trinca.

Ao se observarem os resultados de resistência à tração e módulo de elasticidade encontrados para as diferentes frações volumétricas estudadas nesta pesquisa, considerando que são propriedades avaliadas no documento normativo norte-americano para a avaliação de painéis compósitos, pode-se colocar que eles estão em consonância com as pesquisas correlatas relacionadas aos compósitos de PALF e matriz polimérica.

Recomendações de uso

Documento ANSI A208.1

O A208.1 (AMERICAN..., 2016) é o documento padrão da indústria norte-americana que analisa as características físicas e mecânicas dos painéis compósitos de partículas – ou painéis de partículas –, apresentando as propriedades e os requisitos necessários para sua certificação, correlacionando-os com os usos recomendados para cada caso. As principais propriedades citadas no documento são: resistência à tração; módulo de elasticidade em tração; teor de umidade; e absorção de água – 24 h. A Tabela 2 apresenta a classificação, recomendações de uso, propriedades e valores exigidos para os painéis – indicados no documento supracitado.

Uma das principais propriedades observadas durante as caracterizações de painéis compósitos para inserção no mercado é sua massa específica, que, de acordo com o documento A208.1 (AMERICAN..., 2016) deve atender aos seguintes valores: inferior a 640 kg/m^3 , baixa massa específica; igual ou superior a 640 kg/m^3 e inferior a 800 kg/m^3 , média massa específica; e igual ou superior a 800 kg/m^3 , alta massa específica.

Dessa forma, é possível afirmar que os compósitos confeccionados na pesquisa possuem baixa massa específica, compósito com fração volumétrica de 85%(resina)/15%(fibra); e média massa específica, compósitos com frações volumétricas de 70%(resina)/30%(fibra) e 60%(resina)/40%(fibra), cujos valores médios são 610 kg/m^3 , 720 kg/m^3 e 760 kg/m^3 respectivamente.

Devido a essa propriedade, observou-se a inviabilidade dos usos industriais H-1, H-2 e H-3 por todas as frações volumétricas, uma vez que apresentaram valores inferiores aos especificados na norma. O compósito com teor de 15% de PALF demonstrou apenas a recomendação de uso para enchimento de portas – LD-1 e LD-2.

Os valores médios do teor de umidade e da absorção de água estão de acordo com o A208.1 (AMERICAN..., 2016), com resultados inferiores às indicações máximas exigidas pelo documento.

Tabela 2 - Classificação, recomendações de uso, propriedades e valores exigidos para painéis compósitos de partículas, indicados no documento ANSI A208.1:2016*

Classificação	Recomendação de uso	Tração (MPa)**	Elasticidade (MPa)**	Densidade (g/cm ³)
LD-1	Enchimento de portas	2,8	500	<0,64
LD-2	Enchimento de portas	2,8	500	<0,64
M-0	Comercial	7,6	1380	0,64 a 0,80
M-1	Comercial	10	1550	0,64 a 0,80
M-S	Comercial	11	1700	0,64 a 0,80
M-2	Industrial	13	2000	0,64 a 0,80
M-3i	Industrial	16	2500	0,64 a 0,80
H-1	Industrial	14,9	2160	>0,80
H-2	Industrial	18,5	2160	>0,80
H-3	Industrial	21,1	2475	>0,80

Fonte: adaptado de ANSI (AMERICAN..., 2016).

Nota: *valores máximos para teor de umidade e absorção de água - 24 h -, 13% e 10% respectivamente; e ** Valores mínimos.

A relação, em percentual, entre os resultados dos ensaios realizados e os valores exigidos pela norma mostra o teor de umidade das amostras com teores de 15%, 30% e 40% de PALF, sendo os valores médios respectivamente 69,15%, 50,61% e 46,15% inferiores que o máximo exigido pelo A208.1 (AMERICAN..., 2016).

No que concerne ao nível de absorção de água, enquanto o teor de 15% de PALF apresentou um resultado 40,5% inferior ao máximo exigido pela norma, os teores de 30% e 40% de PALF aproximaram-se dos valores determinados por ela, sendo 9,9% e 3,7% menores respectivamente. A resistência à tração foi demasiadamente superior aos valores mínimos estipulados pelo documento. Já os módulos de elasticidade foram aproximados.

Simulação computacional

A modelagem paramétrica utilizando o Grasshopper considera os parâmetros iniciais e as mudanças incrementais a partir da intenção da simulação. Os parâmetros iniciais foram determinados pelas resistências à flexão e à tração, módulo de elasticidade e massa específica. As mudanças incrementais foram estabelecidas considerando os padrões inseridos pela indústria para componentes arquitetônicos e mobiliários, e relacionaram-se com as dimensões e as interferências externas – gravidade e inserção de carga extra. Quanto às simulações, analisou-se o desempenho nas posições vertical e horizontal – indicando a deformação máxima em cada situação de uso – considerando os componentes suportados por um apoio em cada extremidade, sem nenhum reforço adicional.

A definição das frações volumétricas analisadas para a simulação computacional ocorreu a partir da comparação entre os dados obtidos nas caracterizações físicas e mecânicas dos compósitos e o A208.1 (AMERICAN..., 2016), tendo sido definidos os teores de 30% e 40% de PALF.

Como a modelagem paramétrica permite explorar inúmeras alternativas, o conteúdo apresentado neste artigo ilustra uma amostra de possibilidades. As Tabelas 3 e 4 demonstram as situações definidas para este estudo.

Assim como nas caracterizações mecânicas, o compósito com a fração volumétrica de 60% (matriz)/40% (fibra) apresentou os melhores resultados. Em relação aos painéis simulados na horizontal, os valores não apontaram elevada diferença entre os teores de 30% e 40% de PALF, como pode ser percebido na Tabela 5, que apresenta a deformação de painéis compósitos – dimensão comercial – sob a ação da gravidade.

Tabela 3 - Componentes definidos para modelagem paramétrica - posição vertical

Componentes	Dimensões	Interferências externas
Painel (Dimensão comercial)	184cm x 275cm – e= 15mm e 28mm	Gravidade
Painel ou parte de mobiliário	80cm x 210cm – e= 15mm e 28mm	Gravidade
Painel ou parte de mobiliário	55cm x 75cm – e= 15mm e 28mm	Gravidade – Massa 10Kg e 30Kg
Painel ou parte de mobiliário	50cm x 190cm – e= 15mm e 28mm	Gravidade – Massa 10Kg e 30Kg

Tabela 4 - Componentes definidos para modelagem paramétrica - posição horizontal

Componentes	Dimensões	Interferências externas
Painel (Dimensão comercial)	184cm x 275cm – e= 12mm, 15mm, 18mm e 28mm	Gravidade
Tampo de escrivaninha 1	55cm x 120cm – e= 15mm e 28mm	Massa 5kg, 10kg e 15kg
Tampo de escrivaninha 1	55cm x 160cm – e= 15mm e 28mm	Massa 5kg, 10kg e 15kg
Tampo de mesa lateral	40cm x 40cm – e= 15mm e 28mm	Massa 5kg
Prateleira 1	25cm x 50cm – e= 15mm, 18mm e 28mm	Massa 2kg e 5kg
Prateleira 2	25cm x 100cm – e= 15mm, 18mm, e 28mm	Massa 2kg e 5kg

Tabela 5 - Deformações dos painéis horizontais com dimensão comercial (184 cm x 275 cm)

Painel (teor PALF)	Dimensão (cm)	Deformação (mm)
PALF 30	184 x 275 x 1,2	36,19
PALF 30	184 x 275 x 1,5	23,52
PALF 30	184 x 275 x 1,8	16,64
PALF 30	184 x 275 x 2,8	7,47
PALF 40	184 x 275 x 1,2	29,02
PALF 40	184 x 275 x 1,5	18,96
PALF 40	184 x 275 x 1,8	13,47
PALF 40	184 x 275 x 2,8	6,19

Os fatores que mais influenciaram na deformação do material foram o comprimento e a espessura dos componentes analisados. Quanto às espessuras, os melhores resultados referem-se ao valor de 28 mm, principalmente quando existe aumento no sentido longitudinal, como no caso das prateleiras e dos tampos de escrivaninhas, conforme apresentado na Tabela 6, que ilustra a simulação para os painéis utilizados como tampo de escrivaninhas nas dimensões de 120 cm x 5 cm x 2,8 cm e 160 cm x 55 cm x 2,8 cm, com a inserção de carga de 15 kg.

Já em produtos com menores dimensões, ou proporcionalidade entre largura e comprimento, as deformações, em função da espessura, são aproximadas, como pode ser visto na Tabela 7, que apresenta as deformações para mesa lateral, cujas dimensões são 40 cm x 40 cm e inserção de carga de 5 kg; e na Tabela 8, que apresenta os resultados da modelagem para prateleiras, com dimensões de 25 cm x 55 cm e 25 cm x 120 cm, com inserção de carga de 5 kg.

Quanto aos painéis simulados no sentido vertical, foram analisadas quatro dimensões: 1,83 cm x 275 cm – padrão comercial; 80 cm x 210 cm – divisória ou porta; 50 cm x 75 cm – lateral de escrivaninha ou armário baixo; e 55 cm x 190 cm – lateral e porta de armário. Verificou-se que as variações da espessura e dos teores de PALF tiveram pouca influência em alterações mais expressivas no desempenho mecânico dos painéis, sendo as dimensões referentes à largura e ao comprimento os aspectos mais significantes, como pode ser observado na Tabela 9, que apresenta as deformações dos painéis nas dimensões comerciais.

Por fim, deve-se apontar que, de forma geral, os resultados encontram-se em conformidade com a pesquisa de Pazetto (2009), que analisou as deformações de amostras de MDP inseridas no mercado – marca Duratex –, estando de acordo com a D1037 (AMERICAN..., 1999) e alcançando as seguintes deformações: 1,81 mm a 6,78 mm – espessura de 1,5 cm; 1,30 mm a 4,20 mm – espessura de 1,8 cm; e 2,83 mm a 8,68 mm – espessura de 2,5 cm.

A partir dos resultados da modelagem paramétrica, das análises comparativas com o documento normativo e de questões conceituais relacionadas às fibras e resinas vegetais, recomenda-se o uso no ambiente construído dos compósitos desenvolvidos na pesquisa como painéis de partículas.

Considerações finais

Considerando o procedimento experimental, deve-se apontar que foi possível sua realização em ambiente laboratorial, conforme processos industriais. As pesquisas correlatas e as normas técnicas utilizadas foram importantes para auxiliar na execução.

Quanto a PALF *in natura*, os ensaios realizados com os compósitos demonstraram a pertinência de seu uso em conjunto ao poliuretano bicomponente derivado do óleo de mamona, cujos resultados foram satisfatórios quando comparados com pesquisas correlatas e o documento A208.1 (AMERICAN..., 2016), com ênfase para a elevada resistência mecânica do material desenvolvido, que indica a boa aderência entre as matérias-primas.

A comparação dos resultados das caracterizações físicas e mecânicas com o A208.1 (AMERICAN..., 2016) demonstra o potencial de uso no ambiente construído do material compósito desenvolvido na pesquisa, tais como painéis de divisórias, revestimentos e mobiliários.

Tabela 6 - Deformações dos componentes em função da inserção de carga - tampo de mesa e escrivaninha

Painel (teor PALF)	Dimensão (cm)	Carga (Kg)	Deformação (mm)
PALF 30	120 x 55 x 2,8	15	5,54
PALF 30	160 x 55 x 2,8	15	10,88
PALF 40	120 x 55 x 2,8	15	4,71
PALF 40	160 x 55 x 2,8	15	8,96

Tabela 7 - Deformações dos componentes em função da inserção de carga - tampo de mesa lateral

Painel (teor PALF)	Dimensão (cm)	Carga (kg)	Deformação (mm)
PALF 30	40 x 40 x 1,8	5	0,74
PALF 30	40 x 40 x 2,8	5	0,41
PALF 40	40 x 40 x 1,8	5	0,67
PALF 40	40 x 40 x 2,8	5	0,39

Tabela 8 - Deformações dos componentes em função da inserção de carga - prateleiras

Painel (teor PALF)	Dimensão (cm)	Deformação (mm)	Dimensão (cm)	Deformação (mm)	Carga (kg)
PALF 30	25 x 55 x 1,5	2,34	25 x 120 x 1,5	21,87	5
PALF 30	25 x 55 x 1,8	1,67	25 x 120 x 1,8	13,82	5
PALF 30	25 x 55 x 2,8	0,84	25 x 120 x 2,8	5,11	5
PALF 40	25 x 55 x 1,5	2,02	25 x 120 x 1,5	17,38	5
PALF 40	25 x 55 x 1,8	1,48	25 x 120 x 1,8	11,17	5
PALF 40	25 x 55 x 2,8	0,78	25 x 120 x 2,8	4,35	5

Tabela 9 - Deformações dos painéis verticais (184 cm x 275 cm/80 cm x 210 cm) com efeito da gravidade

Painel (teor PALF)	Dimensão (cm)	Deformação (mm)
PALF 30	184 x 275 x 1,5	1,32
PALF 30	184 x 275 x 2,8	1,32
PALF 40	184 x 275 x 1,5	1,27
PALF 40	184 x 275 x 2,8	1,27
PALF 30	80 x 210 x 1,5	0,71
PALF 30	80 x 210 x 2,8	0,59
PALF 40	80 x 210 x 1,5	0,71
PALF 40	80 x 210 x 2,8	0,59

Para todos os teores de PALF, os resultados do ensaio de resistência à tração mostraram-se acima dos estipulados como mínimos pelo A208.1 (AMERICAN..., 2016) e aproximados das pesquisas correlatas. O teor de umidade e a absorção de água atenderam aos valores definidos pelo documento normativo – sendo inferiores que o máximo indicado no documento.

A massa específica dos compósitos variou entre 610 kg/m³ e 760 kg/m³, mostrando-se possível sua classificação como painéis compósitos, conforme o documento normativo. Os painéis confeccionados com as frações volumétricas de 70%(matriz)/30%(fibra) e de 60%(matriz)/40%(fibra) são os mais recomendados para uso na arquitetura.

A modelagem paramétrica mostrou-se coerente com os resultados das caracterizações físicas e mecânicas, e com o documento normativo internacional, ressaltando o potencial de uso do material desenvolvido.

Diante dessas questões, deve-se mencionar diferentes ambientes onde os painéis de fibra da folha do abacaxizeiro e poliuretano bicomponente derivado do óleo de mamona podem ser utilizados, a exemplo de ambientes residenciais e corporativos. Porém, os ensaios realizados permitem apenas indicações para ambientes internos.

Por fim, deve-se ressaltar que os aspectos sociais, ambientais, de inovação e de desempenho tendem a estar de acordo com as necessidades atuais para fabricação de produtos a serem incorporados pela indústria.

Referências

- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **A208.1**: mat-formed wood particleboard: specification. Gaithersburg, 2016.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D1413**: standard test method for wood preservatives by laboratory soil-block cultures. West Conshohocken, 2007b.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D2395-07**: standard test for density and specific gravity (relative density) of wood and wood-based materials. West Conshohocken, 2007a.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D570**: standard test method for water absorption of plastics. West Conshohocken, 1998.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D638**: standard test method for tensile properties of plastics. West Conshohocken, 2002.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D790**: standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. West Conshohocken, 2010.
- AMORNSAKCHAI, T.; KENGGHETKIT, N. A new approach to “Greening” plastic composites using pineapple leaf waste for performance and cost effectiveness. **Materials and Design**, v.55, p. 292-299, 2014.
- AQUINO, M. S. de. **Desenvolvimento de uma desfibreadeira para obtenção da fibra da folha do abacaxi**. Natal, 2006. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Materiais; Projetos Mecânicos; Termociências) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.
- BENGOZI, F. J. *et al.* Análise do mercado do abacaxi comercializado na CEAGESP – São Paulo. **Revista Brasileira Fruticultura**, v. 29, n. 3, p. 494-499, 2007.
- BENÍTEZ, A. N. *et al.* Treatment of banana fiber for use in the reinforcement of polymeric matrices. **Measurement**, p. 1065-1073, 2013.
- BHAGAWAN, S. S.; DEVI, L. U.; THOMAS, S. Dynamic mechanical properties of pineapple leaf fiber polyester composites. **Polymer Composites**, v. 32, n. 11, p. 1741-1750, 2011.
- CALLISTER JUNIOR, W. D. **Materials science and engineering an introduction**. 6. ed. New York: John Wiley and Sons, 2003.
- CARVALHO, L. H.; JOSEPH, K.; MEDEIROS, E. S. Compósitos de matriz poliéster reforçados por fibras curtas de sisal. **Polímeros**, v. 9, n. 4, p. 136-141, 1999.
- CHEN, C. H.; MA, C. C. M. Pultruded fibre reinforced polyurethane composites III: static mechanical, thermal, and dynamic mechanical properties. **Composites Science and Technology**, Oxford, v. 52, n. 3, p. 427-432, 1994.
- CHOLLAKUP, R. *et al.* Pineapple leaf fiber reinforced thermoplastic composites: effects of fiber length and fiber content on their characteristics. **Journal of Applied Polymer Science**, p. 1952-1960, 2010.
- CORREIA, E. **Compósitos de matriz geopolimérica reforçados com fibras vegetais de abacaxi e sisal**. João Pessoa, 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2011.
- DIAS, F. M. *et al.* Relation between the compaction rate and physical and mechanical properties of particleboards. **Materials Research**, São Carlos, v. 8, n. 3, p. 329-333, 2005.
- GELLERSTEDT, G. *et al.* The reactivity of lignina in birch kraft cooking. In: EUROPEAN WORKSHOP LIGNOCELL PULP, Hamburg, p. 224-227, 1990. **Proceedings [...]** Hamburg, 1990.

- GOMES, M. de A. **Propriedades mecânicas de compósitos poliméricos reforçados com fibras das folhas de abacaxizeiro (PALF)**. Campo dos Goytacazes, 2015. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campo do Goytacazes, 2015.
- KU, H. *et al.* A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites. **Composites**, p. 856-873, 2011.
- Li, Y.; MAI, Y.; YE, L. Sisal fiber and its composites: a review of recent developments. **Composites Science and Technology**, v. 60, p. 2037-2055, 2000.
- MALONEY, T. The Family off wood composite material. **Forest Products Journal**, v. 46, p. 19-26, 1996.
- MANGAL, R. *et al.* Thermal properties of pineapple fiber reinforced composites. **Materials Science and Engineering**, v. 339, p. 281-285, 2003.
- MANO, E.B. **Polímeros como materiais de engenharia**. São Paulo: Edgard Blucher, 1991
- MENDES, B. de A. B. **Obtenção, caracterização e aplicação de farinha das cascas de abacaxi e manga**. Bahia, 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Bahia, 2013.
- PAZETTO, V. M. F. **Efeito da espessura e do vão sobre deformação em flexão de painéis de madeira utilizados na produção de móveis**. Brasília, 2009. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, Brasília, 2009.
- PRADO, K. de S. do; SPINACÉ, M. A. da S. Characterization of fibers from pineapples crown, rice husks and cotton textile residues. **Materials Research**, v. 18, p. 530-537, 2015.
- SANTIAGO, B. Tratamento superficial da fibra do coco: estudo de caso baseado numa alternativa econômica para fabricação de materiais compósitos. **Revista Analytica**, v. 26, p. 42-45, 2007.
- SILVA, R. V. **Compósito de resina poliuretano derivada do óleo de mamona e fibras vegetais**. São Carlos, 2003. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- SOUSA, B. A. A. **Funcionalidade dos extratos fenólicos obtidos pelo cultivo semi-sólido de resíduos de abacaxi (*Ananascomosus* L.) e goiaba (*Psidiumguajava* L.)**. Natal, 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

Ana Gomes Negrão

Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo | Universidade Federal da Paraíba | Cidade Universitária, Castelo Branco | João Pessoa - PB - Brasil | CEP 58031-900 | Tel.: (83) 3216-7179 | E-mail: agnegrão@hotmail.com

Edna Moura Pinto

Departamento de Arquitetura e Urbanismo | Universidade Federal do Rio Grande do Norte | Av. Senador Salgado Filho, 3.000 | Natal - RN - Brasil | CEP 59078-970 | Tel.: (84) 3215-3721 | E-mail: emourapinto@gmail.com

Lucineide Balbino da Silva

Departamento de Engenharia de Materiais | Universidade Federal da Paraíba | Tel.: (83) 3216-7076 | E-mail: lucibalbino@yahoo.com.br

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

Fax: +55 (51) 3308-4054

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



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