

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ANÁLISES EXPERIMENTAIS E NUMÉRICAS EM UM PROTÓTIPO DE EMBARCAÇÃO FABRICADO COM COMPÓSITO DE FIBRA DE JUTA

CON-2016-1206

¹Universidade Federal do Pará, Rua Augusto Corrêa, 01 - Guamá. CEP 66075-110,

Resumo: A região amazônica possui uma grande diversidade de recursos naturais, em grande parte ainda não explorada adequadamente. Além dessa diversidade, pode-se associar ainda a importância da quantidade de rios navegáveis que a região oferece e que podem ser mais explorados. Este trabalho apresenta uma das etapas de um projeto que está em desenvolvimento na UFPA. Este projeto visa avaliar a viabilidade técnica e econômica do uso de compósitos de fibras naturais da Amazônia na fabricação de embarcações de pequeno porte, como as tipicamente usadas pelos ribeirinhos para transporte e pesca. O processo tradicional de fabricação destas embarcações, vindo dos conhecimentos dos índios, consiste no corte de árvores com troncos de grandes diâmetros e desbastes desses troncos, através de queima e raspagem, até a formação dos cascos das canoas. Nos dias atuais esta alternativa não seria ambientalmente correta, além de ser um processo extremamente rudimentar e demorado. Os barcos de alumínio e de fibras sintéticas constituem uma boa opção para este meio de transporte, porém são de alto custo de fabricação. Neste trabalho, serão apresentados os resultados de ensaios realizados em um protótipo construído a partir da madeira miriti, empregando uma laminação do tipo sanduiche com compósito de fibra de juta. O miriti é uma madeira com densidade bem inferior à da água, que ajudará na flutuabilidade do barco. Foram realizados ensaios numéricos e experimentais, nos quais o protótipo foi instrumentado com doze strain gages nos pontos críticos apontados pelo modelo de elementos finitos e por avaliações analíticas simplificadas. Os resultados obtidos nos ensaios de carga permitiram a validação do modelo numérico, no que diz respeito a propriedades, condições de contorno e malha utilizadas. Com o modelo numérico devidamente validado, poder-se-á realizar diversos testes em modelos de escala real para otimização das dimensões e reforços a serem utilizados.

Palavras-chave: Sustentabilidade, Compósitos verdes, Pequenas embarcações, Extensometria, Elementos finitos

1. INTRODUÇÃO

A Amazônia tem a navegação fluvial como característica de transporte específica, isso se deve a muitos fatores naturais: dimensões continentais, clima e solos inadequados para a construção de rodovias e ferrovias, tornando a construção naval uma necessidade regional. O processo tradicional de fabricação de barcos vem do conhecimento dos índios nativos brasileiros, que consiste no corte de troncos de árvores de grande diâmetro e desbaste dos mesmos através de queima e raspagem, até que o barco tome a forma desejada. Atualmente, essas habilidades podem ser vistas nas comunidades ribeirinhas, onde as pessoas tem uma habilidade nata em construção de barcos e navegação fluvial, assim como mostra a Fig. 1.



Figura 1. Ribeirinho em uma típica embarcação da região.

O interesse pelo desenvolvimento de materiais compósitos reforçados por fibras naturais tem crescido, principalmente devido a questões relacionadas com a sustentabilidade. Outra razão é a vasta gama de possibilidades de modelamento e obtenção de peças de projeto com respaldo ambiental.

Apesar de barcos de alumínio e fibras sintéticas serem uma boa opção para essa modalidade de transporte, eles possuem alto custo de fabricação. Esse fato consolida a ideia de desenvolver um barco que seja capaz de atender as necessidades dos ribeirinhos das comunidades do entorno de Belém e que possa ser obtido a baixo custo.

Um protótipo de dimensões reduzidas foi projetado para os testes iniciais e para as análises numéricas. O protótipo construído é um barco com 730 mm de comprimento, feito em uma estrutura sanduíche, com núcleo de miriti e revestimento de compósito de resina epóxi e tecido de fibra de juta. Enquanto o barco estava sendo construído, foram produzidos vários corpos de prova com as mesmas características e propriedades mecânicas do material do casco. As formas e dimensões dos corpos de prova seguiram as normas ASTM D3039 e ASTM D2344, utilizando técnicas de extensometria e correlação digital de imagens, respectivamente. Após essa caracterização, o barco foi testado utilizando extensômetros e as tensões no barco inteiro foram avaliadas.

Para a análise numérica, um barco com as mesmas dimensões e características foi projetado utilizando-se o software SolidWorks® e o modelo foi testado por meio do software de Elementos Finitos ANSYS®.

2. COMPÓSITOS VERDES

Compósitos verdes foram desenvolvidos como alternativa sustentável aos materiais à base de fibras sintéticas. Os compósitos verdes são geralmente produzidos por meio de resinas poliméricas termofixas ou termoplásticas, reforçadas por fibras naturais. Os polímeros termoplásticos de recursos naturais estão comercialmente disponíveis, enquanto que as resinas termofixas são predominantemente produzidas a partir de petróleo. Fibras de celulose têm uma importância significativa e potencial para reforçar polímeros em compósitos de baixo peso. (Dicker, 2014)

Vários estudos (Dittenber, 2012; Koronis, 2013; La Mantia, 2011; Medina, 1959) apontam um grande potencial existente na Amazônia no que diz respeito a fibras naturais, que podem ser aplicadas no desenvolvimento de compósitos verdes e serem utilizadas com propósitos estruturais. Muitas dessas fibras têm sido aplicadas no reforço de materiais compósitos a base de resinas poliméricas e tais compósitos têm sido caracterizados no laboratório de materiais compósitos da UFPA, como mostra Kuwahara (2013) e Carvalho (2014), e dentre as diversas aplicações possíveis para compósitos desenvolvidos, pode-se citar a arquitetura (Neto, 2010) e substituição de ligas metálicas na aviação (Barros, 2014). A Tabela 1 mostra algumas propriedades das principais fibras naturais estudadas.

Neste trabalho, foi empregado a estrutura sanduíche na construção do protótipo de um barco, tendo como núcleo a madeira miriti e como revestimento um compósito verde, constituído de resina epóxi e tecido de fibra de juta.

A estrutura sanduíche proporcionou grande inovação na época do seu desenvolvimento, tendo início na segunda guerra mundial. A indústria aeronáutica necessitava de estruturas mais leves e resistentes, o que levou a construção de uma estrutura com um núcleo de madeira extremamente leve oriunda da América Latina (a madeira de balsa) revestido com placas de madeira mais resistentes. Posteriormente, nos anos 50, a técnica evoluiu para uma estrutura com o núcleo de balsa e revestimento com chapas metálicas. As aplicações utilizando a estrutura sanduíche estão presentes em vários segmentos, com destaque para a indústria náutica na produção de grandes e pequenos barcos. (Marinucci, 2011)

Tabela 1. Propriedades de algumas fibras naturais. (Ashby, 2012)

Fibra	Massa específica (kg/m ³)	Módulo de elasticidade (GPa)	Limite de resistência à tração (MPa)
Juta	1440–1520	35–60	400–860
Sisal	1400–1450	10–25	550–790
Cairo	1150–1220	4–6	135–240
Algodão	1520–1560	7–12	350–800
Linho	1420–1520	75–90	750–940
Rami	1450–1550	38–44	500–680
Bambu	600–1100	11–32	140–800

3. CONSTRUÇÃO DO BARCO

O protótipo construído é um barco com 730 mm de comprimento com quatro camadas de resina epóxi reforçadas com fibra de juta. A porcentagem de resina e fibra foi de cerca de 17% e 83% respectivamente. Em projeto anterior, que serviu apenas para avaliar a metodologia de fabricação e validação do modelo numérico foi utilizada menos fibra e mais resina. No protótipo atual, com a intenção do aumento da resistência, a proporção fibra/resina cresceu.

Primeiramente, foi construído um barco utilizando-se miriti, uma madeira de baixa densidade, fácil de conformar e de cortar. Neste barco foi realizada uma laminação tipo sanduíche e foram coladas as quatro camadas do compósito de fibra de juta, duas por dentro e duas por fora do mesmo. Primeiro, foi aplicada uma camada do compósito com o tecido orientado transversalmente em relação ao barco que cobriu toda a sua extensão, posteriormente, foram adicionadas camadas (uma no fundo externo e outra no fundo interno) de tecido orientadas longitudinalmente em relação ao barco apenas nas partes interna e externa do seu fundo. O maior reforço na direção transversal e no fundo do barco foi justificado pelo modelo numérico, que apresentou tensões maiores no fundo e essas tensões estavam em sua maioria orientadas transversalmente em relação ao barco. A Figura 2 mostra o barco de miriti e o protótipo já após a laminação sanduíche e sua laminação posterior.



(a)



(b)

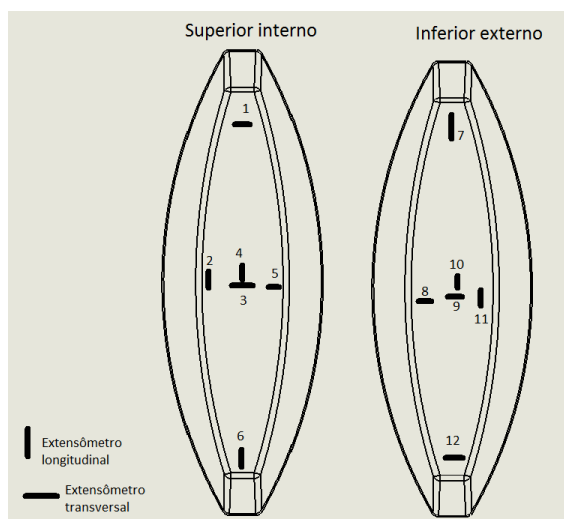
Figura 2. Etapas de fabricação do protótipo: (a) molde de miriti; e (b) finalização da cobertura do barco com compósito de fibra de juta.

Essa laminação apresentou um resultado final de boa qualidade: um bom aspecto superficial pôde ser verificado, o casco inteiro do barco mostrou ser impermeável e não houve discontinuidades na resina e nem na fibra, fazendo com que estas seguissem o desenho do barco. Além disso, o miriti, por sua baixa densidade, também contribuirá para melhorias na flutuabilidade do barco.

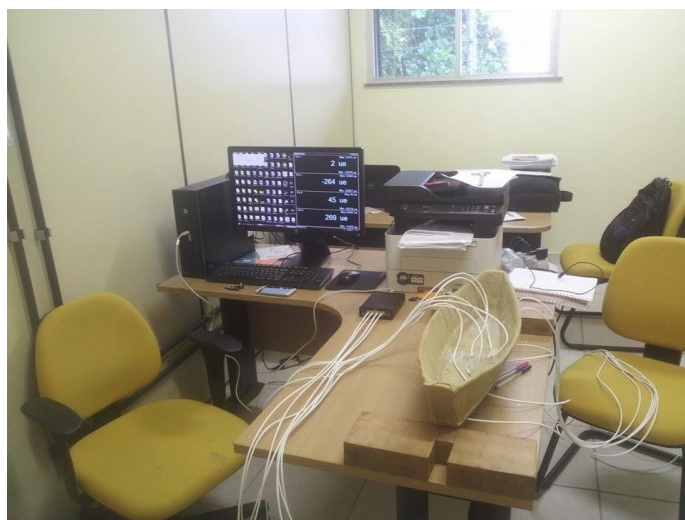
4. METODOLOGIA

No laboratório de engenharia mecânica da UFPA não existe aparato para a realização de testes de flexão, tração, compressão e torção no protótipo, que são os esforços que o barco deve ser submetido (individualmente ou simultaneamente) dependendo das condições de navegação. Portanto, um teste simples teve de ser realizado, que é o barco bi apoiado com uma carga distribuída em seu interior e também cargas pontuais.

Para validar o modelo numérico, uma simples avaliação de flexão no barco foi feita. A avaliação consistiu em apoiar o barco em seus limites longitudinais. O protótipo foi instrumentado com 12 extensômetros como mostra a Fig. 3. Uma conexão do tipo 3 fios e um quarto de ponte foi utilizada. O valor das deformações foi medido pelo aquisitor de dados VISHAY® D4 e pelos extensômetros EMEME EA-06-062AP-120 com gage factor 2,05. A Figura 3 também mostra o barco com os extensômetros instalados e o aquisitor de dados ligado.



(a)



(b)

Figura 3. Ensaio do protótipo: (a) Esquema de colagem dos extensômetros; e (b) barco instrumentado e pronto para ser ensaiado.

Após o aquisitor ser conectado ao computador e seu software ajustado, o ensaio teve início. Para carregar o barco foram utilizados uma massa de argila de 4 kg (que tinha o formato do fundo do barco) e três pesos feitos em aço, com 5 kg cada um. A Figura 4 mostra o ensaio do barco quando este recebeu os carregamentos. Primeiramente, a massa de argila foi colocada dentro do barco, as deformações foram lidas e anotadas, esse procedimento foi repetido cinco vezes para que houvesse confiabilidade nos dados. Após isso, sem retirar a massa de argila, foi colocado um dos pesos no centro do barco e novamente as deformações foram lidas e anotadas, esse procedimento também foi repetido cinco vezes. Então, os outros dois pesos foram colocados no barco conforme mostra a Fig. 4, com as deformações lidas e anotadas, o procedimento foi repetido cinco vezes. O vão em que o barco foi bi apoiado é de 594 mm.



Figura 4. Barco durante o ensaio e totalmente carregado.

4.1. Modelo Numérico

O modelo numérico foi avaliado com o software ANSYS®. Para poupar tempo e esforço computacional, um quarto do barco foi desenhado e leis de simetria foram aplicadas. Para fazer a malha, foi utilizada a ferramenta *sizing* nos corpos feitos da fibra de juta com um tamanho de elemento de 2,5 mm e para o corpo que representa o miriti foi utilizado o recurso *sizing* com um tamanho de elemento de 4 mm. A malha apresentou ao todo 3.653.205 nós e 187.981 elementos. As propriedades mecânicas da juta aplicadas no modelo foram obtidas através de testes de flexão e tração. A Tabela 2 mostra as propriedades obtidas para cada material. As propriedades do miriti foram obtidas através de testes realizados na UFPA.

Tabela 2. Propriedades dos materiais utilizados na construção do barco.

	Juta longitudinal	Juta transversal	Miriti
Ex (GPa)	3,37	5,9	0,0196
Ey (GPa)	4,7	4,7	0,0196
Ez (GPa)	6,37	3,37	0,0196
Coeficiente de Poisson	0,39	0,39	0,30
G (GPa)	3,88	3,88	-

Para as condições de carregamento foram aplicados uma carga distribuída na face inferior interna como o mesmo valor do peso da argila dentro do barco, uma força para representar o peso de aço posicionado no meio do barco e outra força para representar o peso de aço posicionado ao lado do mesmo. Além disso, foram aplicados *frictionless supports* nas faces de simetria e foi utilizado o recurso *displacement* para o eixo y no limite longitudinal inferior do barco. A Figura 5 mostra a malha e as condições de carregamento e de suporte.

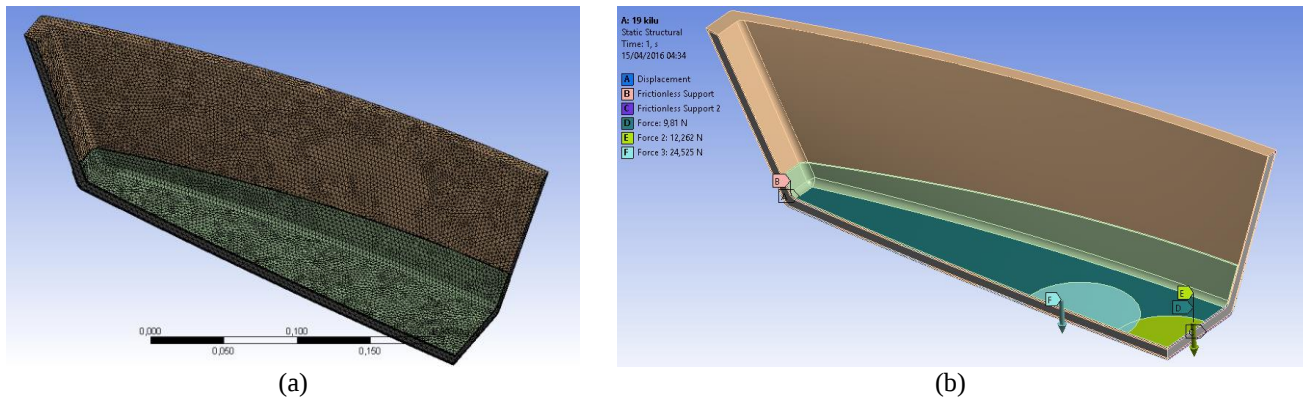
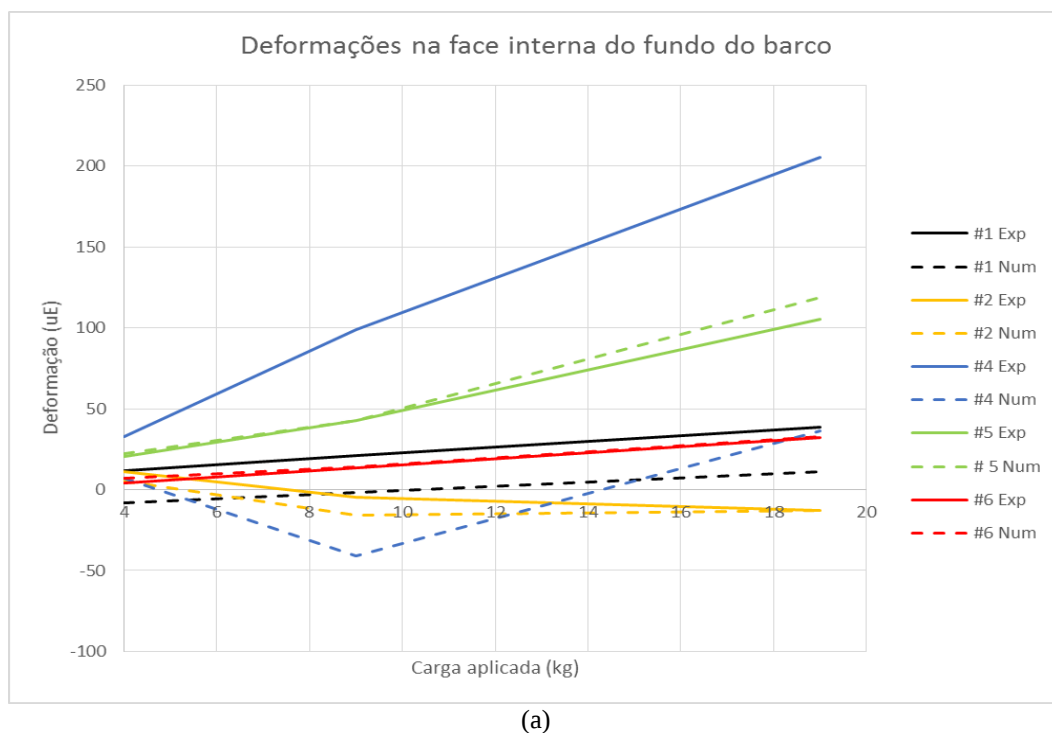


Figura 5. Modelo computacional: (a) malha; e (b) carregamentos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante os testes foi percebido que os extensômetros 3 e 7 não estavam funcionando e os mesmos foram desligados. Os demais extensômetros funcionaram de maneira estável durante todo o teste. A Figura 6 mostra os gráficos comparativos entre as deformações obtidas experimentalmente e numericamente para cada ponto onde haviam extensômetros colados, nas faces interna e externa do fundo do barco.



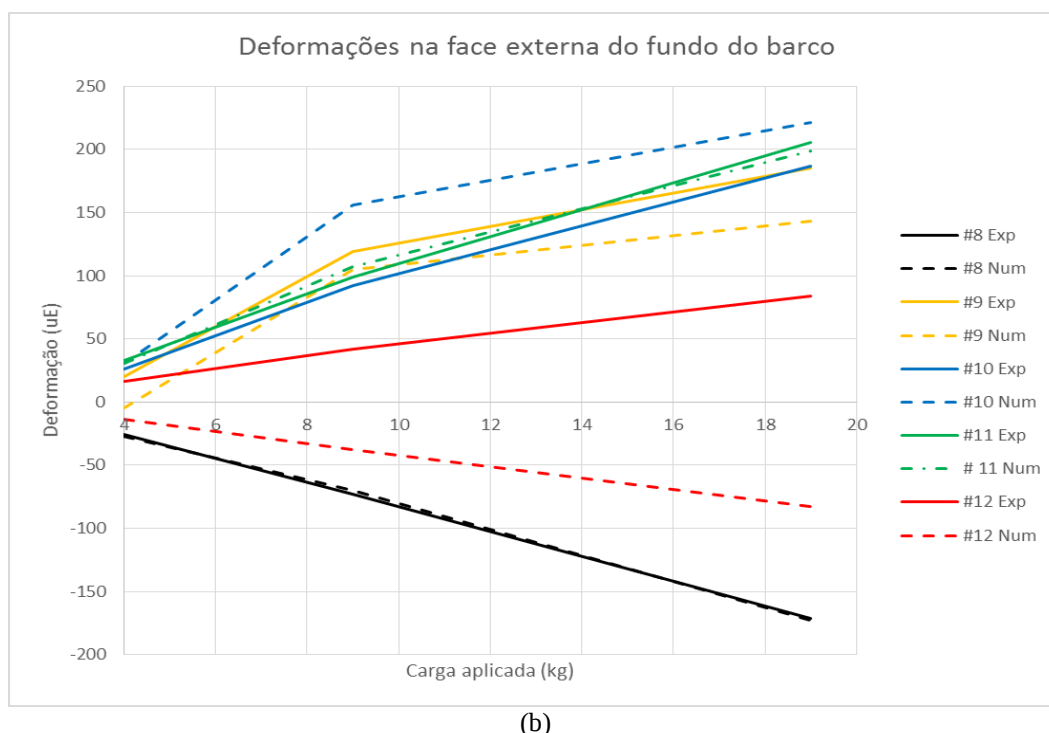


Figura 6. (a) deformações na face interna do fundo do barco; e (b) deformações na face externa do fundo do barco.

Nota-se que, para a maioria dos pontos, o modelo conseguiu reproduzir satisfatoriamente os resultados experimentais. As claras exceções foram os pontos 4 (interno) e 12 (externo). O ponto 12 mostrou magnitudes de deformação semelhantes entre os resultados experimentais e numéricos, porém com sinais contrários. Como os dados experimentais foram anotados e não gravados, não se pode descartar a hipótese de erros de registro, o que poderá ser averiguado em testes futuros. Porém, as discrepâncias ocorridas no ponto 4 deixa claro que o modelo ainda carece de ajustes. Porém, por se tratar de uma modelagem complexa, com uma geometria não trivial e envolvendo materiais não isotrópicos, esses primeiros resultados foram bastante animadores.

A Figura 7 mostra a deformação total do barco com um aumento de 50 vezes. É possível ver que o barco foi deformado principalmente em seu fundo e também na parede lateral. A lateral do barco tende a se abrir de acordo com a carga aplicada. No fundo é possível ver a deformação provocada pelos pesos de aço na parte do centro.

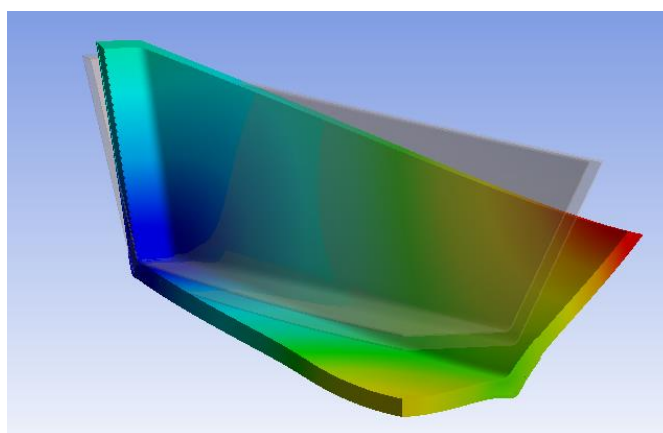
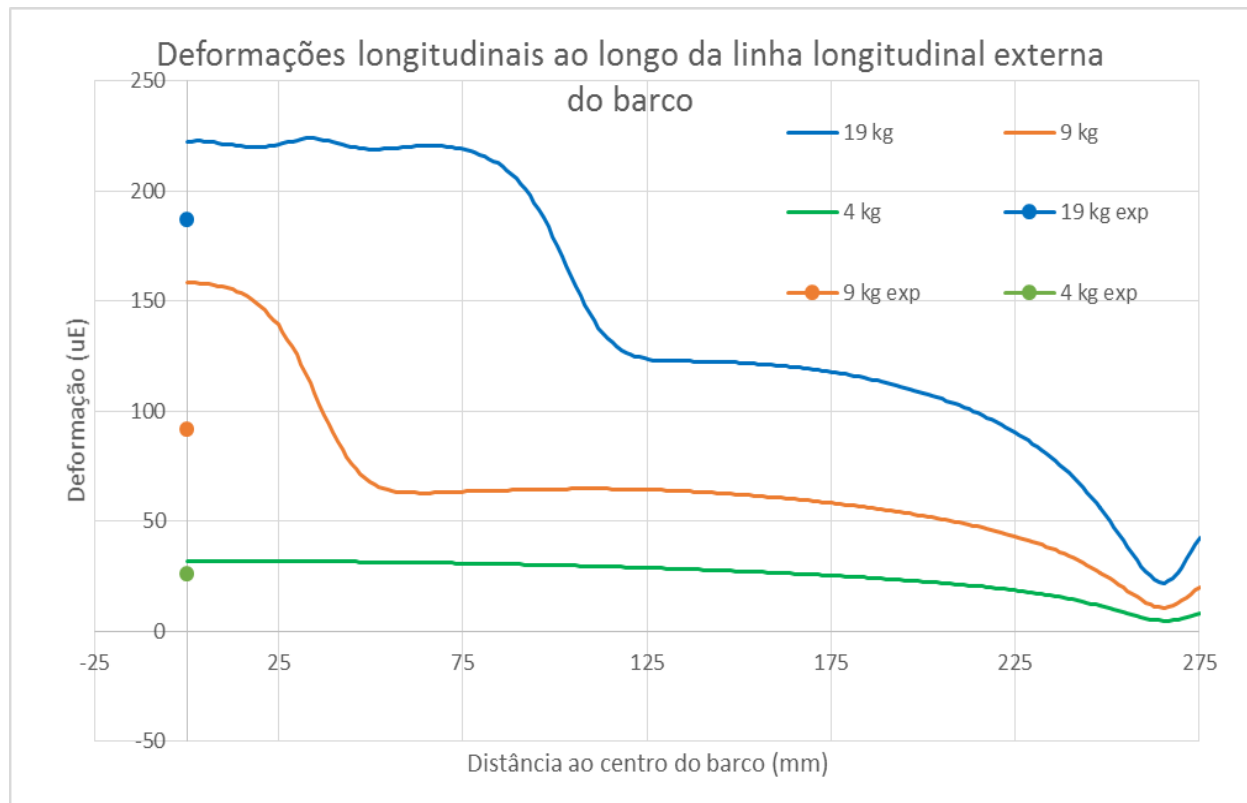


Figura 7. Deformação total no baco.

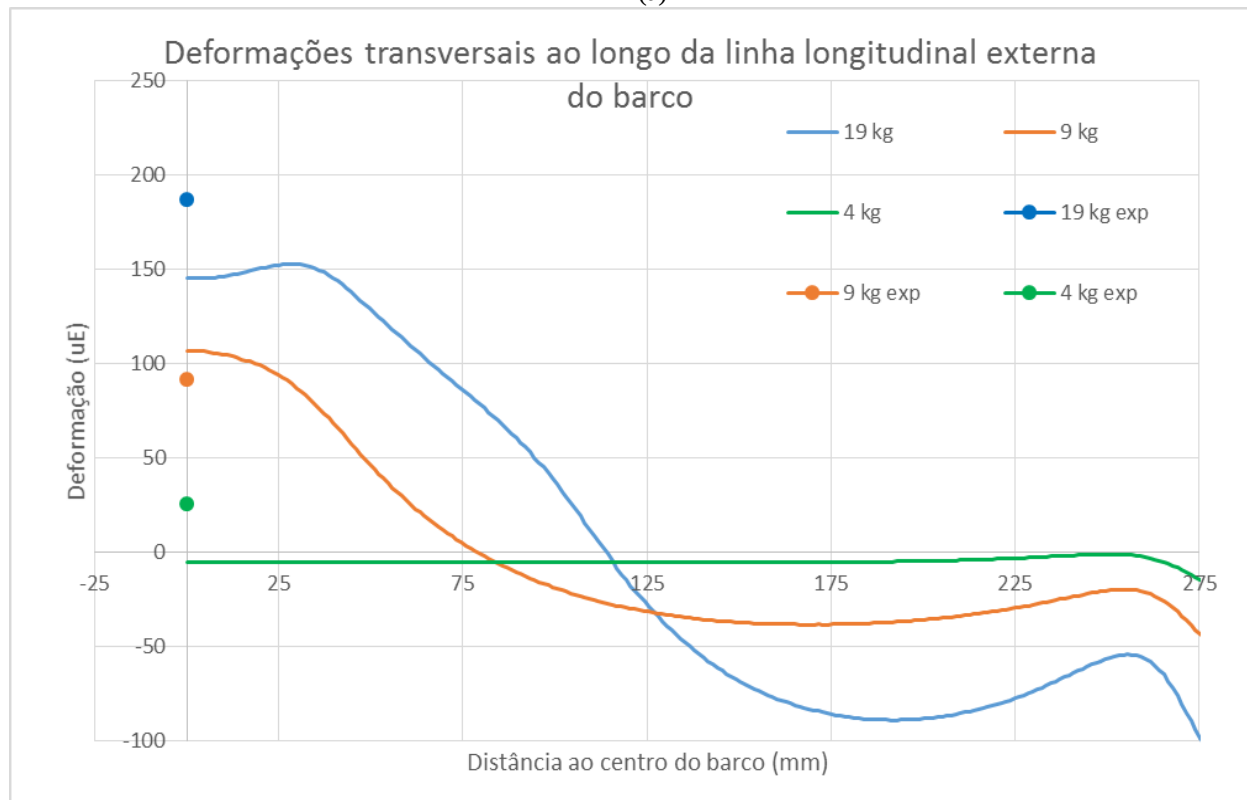
O modelo teve um comportamento relativamente linear, com as deformações mudando linearmente de acordo com a carga aplicada. A Figura 8 mostra as deformações longitudinais e transversais ao longo da linha longitudinal externa do barco. Foram usadas as deformações longitudinais e transversais externas porque estas são maiores, facilitando a análise do comportamento do barco.

Para os gráficos das deformações longitudinais nota-se que as curvas para as cargas de 19 kg e 9 kg apresentam comportamento semelhante, já a curva para a carga de 4 kg apresenta um comportamento diferente das demais. Isso era

esperado, já que a carga de 4 kg é um esforço distribuído, e as cargas de 9 e 19 kg são o esforço distribuído somado às cargas pontuais. Ainda assim, todas as curvas apresentam certa similaridade em seu final.



(a)



(b)

Figura 8. Deformações ao longo da linha longitudinal externa do barco: (a) deformações longitudinais; e (b) deformações transversais.

Para os gráficos das deformações transversais, observa-se novamente que os gráficos das deformações para as cargas de 9 e 19 kg apresentam certa similaridade, enquanto que o gráfico das deformações para a carga distribuída de 4

kg apresenta um comportamento bastante diferente. Novamente, esse comportamento pode ser explicado porque as cargas de 9 e 19 kg são o esforço distribuído dos 4 kg de argila mais as cargas pontuais dos pesos de aço de 5kg cada um.

Ao contrário do que se imaginava, já que o modelo numérico de um protótipo anterior apresentou as maiores tensões na direção transversal, as maiores tensões neste protótipo aconteceram na direção longitudinal. Mostrando assim que o barco deveria ser mais reforçado na direção longitudinal e não na transversal, como aconteceu para este protótipo. A Figura 9 mostra as tensões na direção longitudinal e transversal no fundo do barco, as unidades estão em Pascal (Pa).

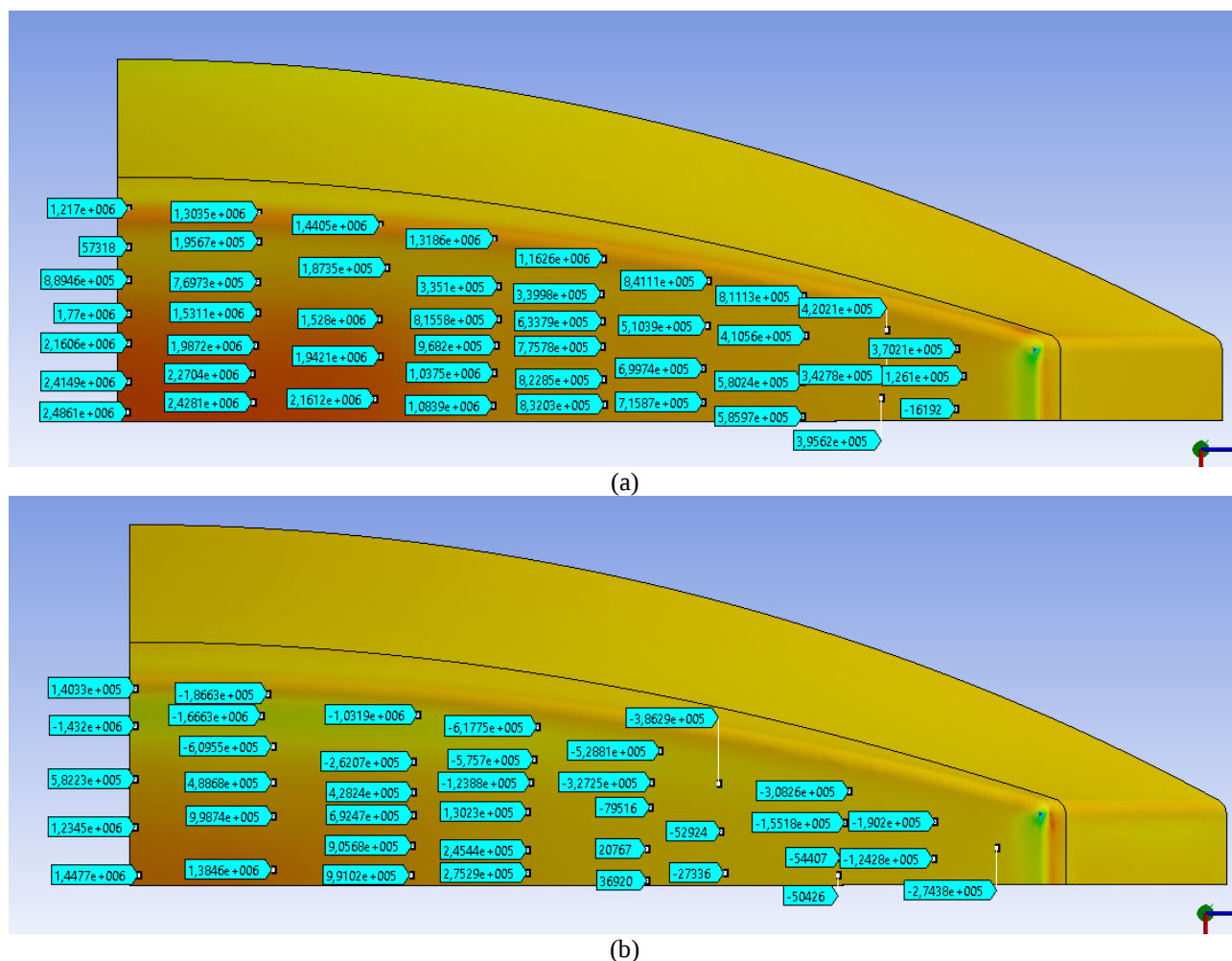


Figura 9. Tensões no fundo do barco na direção (a) longitudinal; e (b) transversal.

Com essas avaliações foi possível notar a grande resistência do barco. A carga de 19 kg, que é algo muito superior ao que o barco conseguiria carregar em água sem afundar, provocou tensões menores que 2,5 MPa, tensões estas que estão muito abaixo do limite de resistência do compósito de juta, cerca de 70 MPa (valor encontrado nos testes de caracterização do mesmo). O barco pesa apenas 945 g e mesmo assim suporta cargas de 19 kg em seu interior com extrema folga, isso mostra o potencial da aplicação da fibra de juta na fabricação de pequenas embarcações, sendo uma atraente alternativa à fibra de vidro. Essa qualidade mecânica complementa as vantagens econômicas e ambientais da fibra de juta.

6. CONCLUSÃO

Nesta investigação, um modelo de barco feito com laminação sanduíche utilizando um núcleo de miriti e revestimento de compósito de resina epóxi e fibra de juta foi submetido a ensaios de carga numéricos e experimentais, sendo este último executado com o auxílio de extensometria.

A laminação sanduíche trouxe vantagens em relação à laminação anterior, melhoras na rigidez, na impermeabilização e na flutuabilidade são algumas delas. Além disso, a laminação sanduíche se mostrou vantajosa no que diz respeito ao padrão de produtividade, pois o barco foi produzido de forma mais rápida e padronizada que o modelo anterior no qual não foi utilizada esse tipo de laminação.

Os doze extensômetros colados pelo barco forneceram uma visualização global das deformações, isso possibilitou avaliar onde o barco seria mais solicitado, e com isso saber quais partes da estrutura devem reforçadas. A gama de informações fornecida pelos doze pontos de medição alimentou o banco de dados para a futura construção de um protótipo em escala real.

Levando em consideração que o modelo computacional para o protótipo com laminação sanduíche é um modelo complexo devido às diversas camadas e sua geometria não trivial, os resultados experimentais obtidos foram satisfatórios e serviram para validar o mesmo, visto que 80% dos pontos de medição experimental apresentaram resultados compatíveis com os resultados numéricos. Isso mostra que o modelo feito no computador e o modelo real não são perfeitamente idênticos, como esperado, mas são semelhantes o suficiente para que os estudos possam ser aperfeiçoados e futuramente ser desenvolvido um modelo numérico mais refinado, associando o mesmo ao protótipo em escala real a ser construído.

7. REFERÊNCIAS

- Ashby M. F., 2012. "Materials and the environment: eco-informed material choice". Ed. Butterworth-Heinemann.
- Barros, M. A. S., 2014. "Vantagens da Aplicação de Material Compósito em Substituição as Ligas Metálicas na Aviação". Dissertação, Universidade Federal do Pará, Belém.
- Carvalho M. J. C., 2014. "Caracterização de Materiais Compósitos de Matriz Poliéster Reforçada por Fibras Vegetais Contínuas e Alinhadas". Dissertação, Universidade Federal do Pará, Belém.
- Dicker, M. P. M, Duckworth, P. F., Baker, A. B., François, G., Hazzard, M.K., Weaver, P. M., 2014. "Green Composites: A review of materials attributes and complementary applications". Composites: Part A, 280-289.
- Dittenber D. B. , GangaRao H. V. S., 2012. "Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure". Compos Part A: Appl Sci Manuf; 43:1419–29.
- Kuwahara, M., 2013. "Compósitos de Poliéster Reforçados por Fibras de Bambu e Sisal: Características Mecânicas e Aspectos Fratográficos". Dissertação, Universidade Federal do Pará, Belém.
- Koronis, G., Silva, A., Fontul, M., 2013. "Green composites: a review of adequate materials for automotive applications". Compos Part B, 44:120–7.
- La Mantia, F. P., Morreale, M., 2011. "Green composites: a brief review". Compos Part A: Appl Sci Manuf;42:579–88.
- Medina, J. C., 1959. "Plantas Fibrosas da Flora Mundial". Instituto Agrônomo de Campinas, São Paulo, Brasil.
- Marinucci, G., 2011, "Materiais Compósitos Poliméricos", Ed. Artliber, São Paulo, Brasil, p. 259.
- Neto, S. F. M., 2010. "Arquitetura e a Aplicação de Materiais Compósitos". Dissertação, Universidade Federal do Pará. Belém.

8. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF A BOAT PROTOTYPE MANUFACTURED WITH JUTE FIBER COMPOSITE

CON-2016-1206

Abstract: *The Amazon has a great diversity of natural resources, which has not been explored properly. Besides that, this diversity can be associated with the great potential of navigable rivers, which are also not explored properly. This paper presents a stage of a project that is in development at UFPA. This project aims to evaluate the technical and economic viability of using Amazon's natural fibers composites in manufacture of small-size boats such as those typically used by riverine people in activities as fishing and transportation. The traditional manufacturing process of these boats came from the Indians knowledge and consists in the cut of large diameter trunk trees and the thinning of these trunks by burning and scraping, until they got a hull's shape. Nowadays this alternative is not environmentally friendly as well as being an extremely rudimentary and time consuming process. Aluminum and synthetic fibers boats are a good option for this kind of transportation, but they are expensive to manufacture. This paper shows the results of tests on a prototype built from miriti wood, using a sandwich lamination with jute fiber composite. The miriti wood is a wood which the density is much lower than water density, which guarantees a good boat's floatage. Numerical and experimental tests were performed. The prototype was instrumented with twelve strain gages in critical points identified by the finite element model and simple analytical analysis. The results obtained in the load tests led to the validation of the numerical model, regarding the properties, boundary conditions and the mesh used. Once the numerical model is validated, other several tests could be performed on real-scale models, aiming the optimization of dimensions and reinforcements to be used.*

Keywords: *Sustainability, Green Composites, Small-size boats, finite elements*