

ANÁLISE DA VIABILIDADE DA SUBSTITUIÇÃO DE UM QUADRO DE BICICLETA METÁLICO POR COMPÓSITO DE FIBRAS NATURAIS DE CURAUÁ

Bruno de M. Carvalho¹
Fellipe F. Talamini²
Maicon L. S. dos Santos³
Maikson L. P. Tonatto⁴

Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria
Av. Roraima, 1000 – Camobi, Santa Maria – RS, Brasil.

bruno.carvalho@acad.ufsm.br¹, fellipe.talamini@acad.ufsm.br², mlsantos005@hotmail.com³, maik.tonatto@gmail.com⁴.

Resumo. Os materiais metálicos utilizados na confecção de quadros de bicicleta apresentam uma baixa relação entre resistência mecânica e densidade, reduzindo consideravelmente a performance dos ciclistas. Nesse viés, este resumo tem como objetivo analisar a utilização de compósitos reforçados com fibras naturais de curauá que além de ser proveniente de fontes renováveis apresenta propriedades mecânicas satisfatórias e baixa densidade possibilitando sua aplicação na construção de um quadro de bicicleta. A partir dessa temática, foi proposto um material de menor impacto ambiental para a substituição de um quadro de liga de alumínio 6061. Foram realizadas simulações utilizando o software Ftools para a determinação dos carregamentos atuantes no quadro e o software CAE Abaqus para a identificação dos pontos de maior tensão. Através destas informações foram determinadas as quantidades e orientações das lâminas do compósito a fim de atender as solicitações de uso e otimizar o desempenho do ciclista. Através do critério de falha de Tsai-Hill empregado por um script em Python, verificou-se, dentre as configurações de laminados propostos, qual a que melhor se adapta ao projeto.

Palavras chave: compósitos, fibras naturais, método dos elementos finitos.

1. INTRODUÇÃO

Os métodos de produção e a escolha de materiais de construção têm sofrido uma grande diversificação nos últimos anos. A necessidade de tal mudança existe graças a conscientização da humanidade com os impactos ambientais causados por processos e produtos. Conforme afirmado por Ganguly *et al.* [1], uma boa parte deste problema aparentemente difícil é resolvido pelo uso de materiais e processos ecologicamente corretos.

Compilho [2] alerta sobre as vantagens do emprego de fibras naturais como reforço, pela facilidade de descarte devido à natureza biodegradável, menor investimento, montagens leves e propriedades de resistência específica aceitáveis. Ganguly *et al.* [1] aponta o crescimento do mercado global para compósitos reforçados com fibras naturais.

Um dos tipos de fibras utilizados no setor automobilístico é o curauá, de nome científico *Ananas erectifolius*. A união entre a otimização de propriedades e a pegada sustentável, é a melhor forma de aplicação de compósitos de fibras naturais, conforme citado por Collotta

et al [3], a substituição de materiais padrão por compósitos, juntamente com o reprojetado dos componentes é uma maneira eficaz de também reduzir o peso dos elementos, sendo este um fator interessante em projetos como de bicicletas, onde o peso desta está diretamente ligado a performance do ciclista. Ainda Collota [3] alerta para a necessidade de definir a rigidez da estrutura que deve ser comparável a estrutura original (como o alumínio no caso dos quadros de bicicletas). Com isto, este trabalho busca o desenvolvimento de um compósito reforçado com fibras naturais, a fim de substituir a liga de alumínio 6061 empregada em um quadro de bicicleta de montanha da marca SENSE.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Além da rigidez elevada, as fibras de curauá apresentam uma baixa densidade, e como destaca Kleba [4] podem apresentar redução de peso em até 15% se comparados com materiais reforçados com fibra de vidro. Monteiro *et al.* [5] lembra que as propriedades mecânicas elevadas das fibras de curauá tornam o material atraente na

obtenção de compósitos com matrizes poliméricas. Nesse sentido, o autor ressalta ainda que a natureza microestrutural de cada fibra, composta por feixes de microfibrilas favorece na adesão à matriz.

Nesse sentido, após a escolha da fibra, busca-se uma matriz adequada e para esta análise foi considerada uma matriz de resina de poliéster do tipo isoftálica, que segundo Oliveira [6] trata-se de um tipo com melhores características mecânicas se comparadas a outros quatro tipos de resinas de poliéster. O autor lembra ainda que compósitos são laminados constituídos por um empilhamento de lâminas e nesse caso uma predefinição da orientação de cada lâmina contribui para posteriores análises micromecânicas. Essas análises são realizadas individualmente para o material de reforço e para a matriz e funcionam como uma alternativa na obtenção das propriedades mecânicas de interesse como resistência mecânica e constantes elásticas.

Segundo Tomczac *et al.* [7], Silva[8] e Rao[9], os valores das principais constantes elásticas como Módulo longitudinal (E1), Módulo transversal (E2), Módulo de cisalhamento (G12) e coeficiente de Poisson (ν_{12}) para a fibra de curauá podem ser verificados na Tabela 1. Já Brahim [10] apresenta os mesmos dados para a resina de poliéster de acordo com a Tabela 2.

Dessa forma, um compósito laminado é caracterizado pelo número, tipo, orientação e sequência de empilhamento das camadas. Para a realização desse estudo foram avaliados laminados simétricos com 8, 10 e 14 camadas com espessuras de 1 mm, 1.25 mm e 1.75 mm com ângulos entre 0° e 135° pois se verificada uma maior sollicitação de cargas nos ângulos de 45°.

3. METODOLOGIA

Utilizando o software de análise estrutural Ftools, foi possível verificar as tensões atuantes no quadro da bicicleta. A base foi o desenho esquemático do quadro fornecido pelo fabricante. Analisando o quadro como uma treliça simples, foram avaliados dois tipos de carregamentos, sendo o primeiro prevendo um caso simples em que a carga está atuante apenas sob o ponto onde ficaria o banco, como se o usuário estivesse sentado. O segundo caso simula o processo de pedalada, com os carregamentos ocorrendo tanto no pedal como também na parte frontal do quadro (onde estaria o guidão), esta distribuição de tensões segue o modelo proposto por Maestrelli e Falsini [11]. Após análise dos dois casos citados anteriormente foi determinado o segundo caso como sendo o mais crítico para o projeto ao apresentar o carregamento de maior intensidade em um único elemento, sendo assim este caso será utilizado como base para este trabalho.

A simulação foi realizada utilizando os métodos dos nós em treliças, os comprimentos dos elementos foram utilizados em milímetros e os carregamentos em Newton. O material escolhido foi o alumínio com perfil de seção transversal de tubo com 50 mm de diâmetro e 3 mm de

espessura de parede. Os apoios foram fixados na entrada do garfo dianteiro e no local de encaixe da roda traseira.

Através do software CAE Abaqus, foi realizada a análise por elementos finitos do quadro estudado. Utilizando o mesmo modelo visualizado anteriormente, esta análise teve como objetivo a identificação dos pontos de maior sollicitação do modelo, sendo os pontos onde o material deveria ser reforçado utilizando-se uma quantidade maior de lâminas, ou então uma configuração diferente de orientações que ocasionem em uma maior resistência. Devido às características do modelo, foi possível realizar uma análise de viga utilizando elementos de arame com distribuição tridimensional.

Uma vez modelado a estrutura de arame do modelo, se atribuiu as características referentes a seção transversal, sendo esta circular com 50 mm de diâmetro e 3 mm de espessura, com propriedades de material da liga de alumínio 6061. Para a simulação foram utilizados 346 nós e 348 elementos, a malha foi refinada iniciando com distância de 50 mm entre os nós e por fim chegando a 10 mm alcançando a convergência dos resultados conforme desejado.

Para a realização da análise numérica, utilizou-se como referência a maior carga atuante no elemento da treliça, sendo a carga de tração de 1970 N. Para o dimensionamento do quadro, se faz necessário a fixação de um parâmetro da seção transversal, sendo este o diâmetro do tubo, com isto, pode-se variar a espessura da parede, e assim, variar a quantidade de lâmina utilizadas no projeto. Sendo o diâmetro do tubo de 50 mm, divide-se a carga pelo perímetro do tubo chegando-se à uma das variáveis de entrada do modelo numérico, sendo o valor de 39,4 N/mm.

Para a análise micro e macro mecânica teórica das lâminas e laminados em questão, devemos desconsiderar a existência de vazios, propriedades da interface reforço-matriz, assim como assumir um comportamento linear elástico. Para o compósito reforçado com fibra de curauá, foram necessárias as informações das constantes elásticas dos materiais utilizados, sendo eles:

Tabela 1. Constantes elásticas da fibra de curauá.

Nome	Fibra de curauá
E1 [GPa]	21
E2 [GPa]	2,8
G12 [GPa]	4,47
ν_{12} [GPa]	0,25

Tabela 2. Constantes elásticas da resina poliéster.

Nome	Fibra de curauá
E [GPa]	4,3
G [GPa]	4,27
ν_{12}	0,25

Os quais tiveram suas informações cruzadas através do Mech-Gcomp, software disponibilizado pelo Grupo de Materiais Compósitos e Nanocompósitos (GCOMP) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Com uma interface intuitiva e de simples utilização, através deste chegamos rapidamente nos dados do compósito.

Após a obtenção de tais dados referentes as propriedades do material, os mesmos foram aplicados em equações que foram resolvidas com o auxílio de um método numérico computacional. Foram utilizados códigos em linguagem Python desenvolvidos utilizando o Google Colab para escrita e execução dos scripts.

Foram analisados múltiplos cálculos variando a quantidade e orientação das lâminas, buscando a melhor configuração que convergisse de forma segura e tecnicamente satisfatória a melhor relação entre resistência e peso do laminado, sendo este último diretamente ligado a quantidade de lâmina adotadas.

Sabendo a espessura da lâmina do compósito analisado, podemos calcular a espessura do tubo a partir da quantidade de camadas, a Tabela 3 ilustra as configurações escolhidas. A escolha pelos ângulos de 0° e 45° se deu pela grande solitação de cargas de tração e compressão (no sentido da fibra) e da existência de torção no quadro da bicicleta onde os ângulos de 45° agiriam. O critério de falha de Tsai-Wu foi aplicado para avaliar a eficácia da configuração de lâmina adotada, através deste foi calculada a tensão de falha da primeira camada de cada laminado e comparado com a tensão atuante no quadro.

Tabela 3. Configurações dos Compósitos.

	Nº de camadas	Espessura	Orientação
Caso 1	8	1 mm	[0/45/-45/0]s
Caso 2	10	1,25 mm	[0/45/0/-45/0]s
Caso 3	14	1,75 mm	[0/45/-45/0/135/-135/0]s

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Utilizando o software Mech-Gcomp, aliado às propriedades de cada um dos materiais conforme apresentados nas Tabelas 1 e 2, com uma fração de fibras de 30%, determinou-se as constantes elásticas do compósito, apresentadas na Tabela 4:

Tabela 4. Constantes elásticas do compósito.

Propriedade	Valor	Comentário
Densidade [kg/m ³]	124000	Rule of mixtures
E1 [GPa]	9,32	According to Kaw
E2 [GPa]	9,79	According to Kaw
G12 [GPa]	4,75	According to Kaw
G23 [GPa]	4,39	According to Kaw
v12	0,32	According to Kaw
v23	0,114	According to Kaw

Através dos cálculos numéricos em Python, aplicamos os valores destas constantes de engenharia para obtermos as matrizes de rigidez e flexibilidade de cada lâmina. Posteriormente, abastecemos com as informações de orientação e carga para encontrarmos as tensões e deformações no laminado, tanto em coordenadas globais

como locais. Com um script detalhado, chegamos em informações de tensão e deformação na parte superior, no centro e na base de cada lâmina.

Uma vez determinado a distribuição das cargas concentradas pode-se verificar as atuantes em cada elemento da treliça e assim avaliar quais elementos sofrem maior esforço para assim definir as propriedades do material, como a quantidade e orientação das lâminas. A Figura 1 apresenta as cargas atuantes no plano 2D e as tensões atuantes em cada elemento da treliça utilizada neste trabalho.

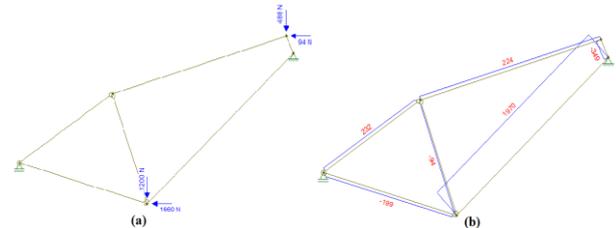


Figura 1 - Distribuição de carregamentos no quadro
Fonte: Autor (Ftools)

As Figuras 2 e 3 apresentam os resultados da simulação para a tensão de Von Mises e deslocamento respectivamente para a análise por elementos finitos.

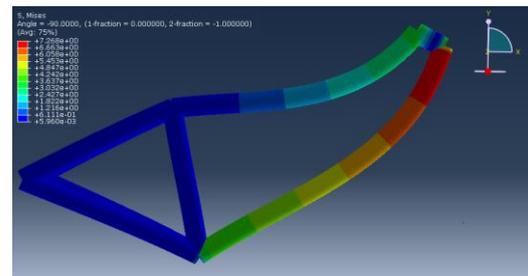


Figura 2 - Tensão de Von Mises; Fonte: Autor (CAE Abaqus)

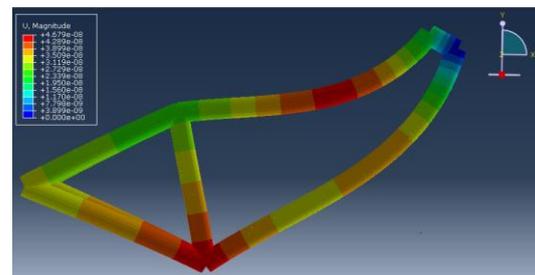


Figura 3 – Deslocamentos; Fonte: Autor (CAE Abaqus)

Conforme pode ser verificado na Figura 2, as tensões máximas de Von Mises estão situadas no tubo diagonal que faz a ligação entre o ponto do pedal e do guidão do quadro assim como verificado anteriormente através do Ftools, porém, aqui podemos verificar a mudança de intensidade quanto mais próximo ao guidão. Já a análise de

deslocamento apresenta maior intensidade no ponto de aplicação das cargas no pedal e no tubo superior que liga o banco ao guidão, apensar disto, se irá utilizar para a análise o tubo diagonal devido a maior exigência a que este está solicitado.

Por meio do método numérico se determinou as variáveis referentes a tensões e deformações locais e globais dos laminados propostos, devido a grande quantidade de dados, foi realizada a análise apenas para a parte superior da primeira camada de cada um dos casos, as Tabelas 5 e 6 apresentam as tensões e deformações locais respectivamente.

Tabela 5. Tensões locais.

	Tensões locais		
	σ_1 (N/mm)	σ_2 (N/mm)	τ_{12} (N/mm)
Caso 1	4,6144	0,2286	0
Caso 2	2,9897	0,1194	0
Caso 3	1,4939	0,0841	0

Tabela 6. Deformações locais.

	Deformações locais		
	ϵ_1 (m)	ϵ_2 (m)	γ_{12} (m)
Caso 1	4,8726e-10	-1,3508e-10	0
Caso 2	3,1668e-10	-9,0451e-11	0
Caso 3	1,5740e-10	-4,2701e-11	0

Podemos perceber pelas tabelas apresentadas que, tanto as deformações como as tensões locais para o problema analisado foram relativamente baixas, podendo ser considerado um bom indicativo. Aplicando o método de Tsai-Hill se avaliou as tensões de falha na primeira camada do laminado de cada uma das configurações propostas, sendo então comparada com a tensão atuante no tubo estudado do quadro, estes dados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Critério de falha para a primeira camada.

	Espessura (mm)	Tensão de falha (MPa)	Tensão atuante (MPa)
Caso 1	1	35,2377	12,7974
Caso 2	1,25	44,6663	10,2904
Caso 3	1,75	60,8801	7,4264

Através da aplicação do critério de falha identificamos que em todos os casos analisados o laminado irá suportar as tensões atuantes no tubo. Porém, é importante destacar que as cargas utilizadas para os cálculos são apenas aproximadas, sendo também adquiridas através do método dos nós em treliça, com isso as tensões atuantes podem ser ainda maiores se levarmos em consideração a ação de flexão e torção no quadro. Com isto, apesar de os resultados adquiridos serem realmente muito promissores, um estudo mais aprofundado se faz necessário para a comprovação de tais resultados.

5. CONCLUSÕES

Apesar da quantidade limitada de informações referentes as fibras naturais e de compósitos com este tipo de material, podemos verificar que sua utilização pode sim ser empregada para a substituição de materiais metálicos. O compósito de poliéster e fibras de curauá apresenta propriedades mecânicas realmente interessantes para o caso analisado, onde para o caso extremo (de maior carregamento), mesmo a configuração mais simples atende as demandas no projeto com uma certa folga, porém, conforme visto através da análise de elementos finitos, é necessária uma dose de reforço de laminas em determinados pontos do quadro a fim de reforçar os pontos de maior sollicitação, sendo nestes recomendado a utilização da configuração apresentada nos casos 2 e 3. Com relação ao projeto, algumas alterações poderiam dar a este uma maior confiabilidade, como a produção de lâmina mais espessas e ou a utilização de diferentes matrizes em sua constituição (também para um maior apelo sustentável), mais uma vez, este tópico exigiria maior aprofundamento nos estudos e testes no material analisado.

REFERÊNCIAS

- [1] GANGULY, A. et al. Natural fibre reinforced composites: A review based on additive manufacturing routes and biodegradability perspective. *Materials Today: Proceedings*, v. 62, p. 131–135, 2022.
- [2] R.D.S.G. COMPILHO, Natural fiber composites, CRC Press, Boca Raton, 2015.
- [3] COLLOTTA, M. et al. New design concept of a downhill mountain bike frame made of a natural composite material. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, v. 232, n. 1, p. 50–56, 2018.
- [4] Kleba, I. & Zabold, J - "Poliuretano com fibras naturais ganha espaço na indústria automotiva", *Plástico Industrial*, p.88-99, (11/2004).
- [5] MONTEIRO, S. N., LOPES, F.P.D., NASCIMENTO, D.C.O., FERREIRA, A.D.S., SATYANARAYANA, K. G., Processing and properties of continuous and aligned curaua fibers incorporated polyester composites, *J. MR&T. Journal of Materials ReserchTechnology*. 2013;2(1):2-9
Acesso em: 16 Aug 2022
- [6] OLIVEIRA, F. H.; AMICO, S. C.; HELFER, A. L.; AMICO, S. C. Mechanical behavior of unidirectional curaua fiber and glass fiber composites. *Macromolecular Symposia*, v. 319, n. 1, p. 83-92, 2012.
- [7] TOMCZAC, F.; SATYANARAYANA, KG.; SYDNSTRICKER, THD. Estudos sobre fibras lignocelulósicas do Brasil: Parte III – Morfologia e propriedades das fibras de curauá brasileiras. *Compósitos, Parte A*. 2007; 38:2227-36.
- [8] SILVA, R. V.; AQUINO, E. M. F. Curaua fiber: A New Alternative to Polymeric Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 27, pp.103-112, 2008.
- [9] RAO K. M. M., PRASA. A. V. R., RANGA BABU. M. N. V., RAO. K. M. . GUPTA A. V. S. S. K. S. Tensile properties of elephant grass fiber reinforced polyestercomposites. *Journal Materials Science*, n. 43, 2007.
- [10] BRAHIM S. B., CHEIKH R. B., Influence of fibre orientation and volume fraction on the tensile properties of unidirectional Alfa-polyester composite. *Composites Science and Technology*, n. 67, 2007.
- [11] Maestrelli, L., Falsini, A., Bicycle frame optimization by means of an advanced gradient method algorithm. 2nd European HTC Strasbourg, September 31-October 1 2008.