

Simulação e avaliação experimental de estruturas geodésicas de bambu reforçadas com cabos

Experimental evaluation and simulation of geodesic structures of bamboo reinforced with cables

Fabiano Ostapiv, Dr. – UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
fabianoostapiv@utfpr.edu.br

Gustavo Correa - UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
gcastro961@gmail.com

Joamilton Stahlschmidt, MSc. - UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
joamiltons@utfpr.edu.br

Gabriel Ostapiv - UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
gabrielostapiv@gmail.com

Resumo

O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento do reforço feito com cabos de nylon trançado feito em estruturas geodésicas construída com barras de bambu cilíndricas e maciças unidas com resina de poliéster com carga mineral. As cúpulas geodésicas estudadas têm a forma de meio icosaedro truncado e foram construídas com barras comerciais de bambu *Phyllostachys pubescens* com 4 mm de diâmetro e comprimento de 175 mm. O software de simulação de engenharia ANSYS foi usado para desenhar e simular a estrutura da cúpula sob carga, com e sem o reforço de cabos. O modelo geodésico, construído e testado através de carregamento vertical, mostrou resultados de deflexão no regime elástico muito semelhantes ao comportamento previsto pelo modelo computacional. Enquanto que a estrutura sem reforço apresentou grandes deformações e resistiu 14,8 vezes o seu próprio peso com comportamento linear e 23 vezes o seu próprio peso sem ruptura, a estrutura reforçada com cabos amarrados resistiu comparativamente o dobro de carga vertical final com apenas 40% da deflexão apresentada pela estrutura sem reforço, mostrando a efetividade do uso dos cabos de nylon como reforço amarrado. Tal comportamento havia sido previsto pela simulação numérica.

Palavras-chave: Estruturas geodésicas; Barras de bambu; Ensaio mecânicos; Reforço com cabos; Métodos de Elementos Finitos (MEF)

Abstract

*The objective of this work is to show the design, simulation, construction and test of reinforced cables in geodesic structure made of cylindrical and solid bamboo bars joined with polyester resin with mineral charge. The geodesic domes had the form of truncated icosahedron and was constructed with bars of bamboo *Phyllostachys pubescens* with 4 mm diameter and 175 mm length. A software of engineering simulation and 3D design called ANSYS was used to draw and to simulate the dome structure under loading. The geodesic model built and tested through vertical loading, showed*

results of deflection in the elastic regime very similar to the behavior predicted by the computational model. The structure showed great deformations and resisted 14.8 times its own weight with linear behavior and 23 time its own weight without rupture. The geodesic structure reinforced with stranded cables comparatively resisted twice the final vertical load with only 40% of the deflection presented by the structure without reinforcement, showing the effectiveness of using nylon cables as a stranded reinforcement. This behavior was predicted by numerical simulation.

Keywords: Geodesic structures; Bamboo bars; Mechanic essays; Cable reinforcement; Finite elements methods (FEM)

1. Introdução

As cúpulas podem ter grande resistência estrutural se forem usados materiais apropriados e construídas adequadamente. Elas podem cobrir grandes espaços abertos sem a necessidade do uso de suportes internos, além disso, as cúpulas podem ser muito estáveis.

As cúpulas são muito usadas desde a antiguidade na construção de habitações, cobrindo grandes espaços. Os povos originários utilizavam diversos tipos de domos e cúpulas, os índios para construir suas ocas, e os esquimós seus iglus. O arquiteto Van Lengen (2013) mostra muitas destas construções com cúpulas usando arcos feitas pelos índios da Amazônia, como mostrada na Figura 1.

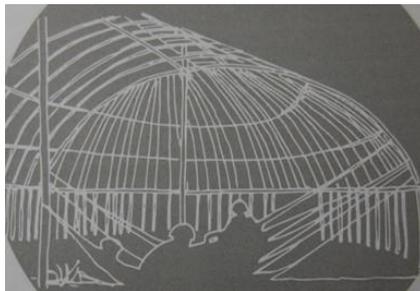


Figura 1: Desenho mostrando a estrutura de uma habitação indígena em arco. (Van Lengen, 2013)

Geodésicas são estruturas arquitetônicas formadas por triângulos ou outras formas geométricas regulares que compõem, como uma rede, de uma ou mais camadas, uma superfície espacial curva, geralmente uma semiesfera. Os domos geodésicos podem ser feitos numa ampla faixa dimensional, desde que o tamanho das barras e a frequência das formas geométricas que compõem a superfície da estrutura sejam calculadas corretamente.

As forças aplicadas no domo geodésico tendem a se distribuí igualmente por toda a estrutura. Por ser uma estrutura reticulada, muitas vezes com apenas uma camada como a mostrada na Figura 2, geodésicas estão entre as estruturas mais leves e resistentes já inventadas.

Estas estruturas aliam beleza, resistência, leveza, modularidade construtiva, design sustentável e integridade estrutural. Porém, apresentam vários desafios no seu projeto, execução e uso, entre eles, a seleção de materiais energeticamente eficientes e sustentáveis, tendo em vista todo o ciclo de vida da estrutura, bem como a repetitividade construtiva e o custo final.



Figura 2 – Cúpula geodésica, biosfera de Montreal no Parque Jean - Drapeau. Foto: Maia, R.

O bambu pode ser usado na construção de diversas estruturas de engenharia tais como casas, telhados, pontes, bicicletas e também geodésicas. Os colmos de bambu são tubos vegetais segmentados, leves, resistentes e estéticos. Assim como as madeiras, o bambu é um material tradicional e confiável que tem baixo peso específico e boa resistência ao carregamento, sendo bastante usado na construção de habitações, principalmente em regiões tropicais.

O Brasil tem a segunda maior biodiversidade de bambus no mundo. No país, o bambu é facilmente encontrado; no entanto, a planta é pouco utilizada devido a vários fatores, entre eles a ausência de políticas públicas de incentivo, o desconhecimento generalizado do seu uso e suas potencialidades e a falta de técnicas de processamento e de construção adequadas, usando este tubo vegetal, como relataram Salamon e Ostapiv (2017).

O bambu pode ser processado no local da obra com ferramentas manuais e permite o envolvimento de trabalhadores locais na construção das habitações. Apesar das dificuldades em construir com bambu, as construções que usam este material tendem a ser de baixo impacto, baratas, eficientes, rápidas, resistentes e integradas com o meio, conforme apresentado por Librelloto e Ostapiv (2019).

Segundo Ghavami e Moreira (2002), devido ao comportamento de deflexão-compressão apresentado pelos colmos de bambu, estes tubos vegetais podem ser usados em diversos tipos de estruturas geométricas, podendo suportar dentro de amplos limites, tanto a carga do vento como carregamentos verticais. Estes autores mostraram que dentro de alguns limites os colmos de bambu podem ser considerados colunas de Euler.

2. Domos Geodésicos de Bambu

O domo geodésico estudado, desenvolvido por Ostapiv *et al* (2018). Figura 3a, é uma estrutura tipo icosaedro truncado ou bola de futebol, composta por hexágonos e pentágonos, assim como a estrutura geodésica construída e ensaiada por Castro (2019). Figura 3. Nestas estruturas as barras de bambu usadas têm todas o mesmo comprimento.

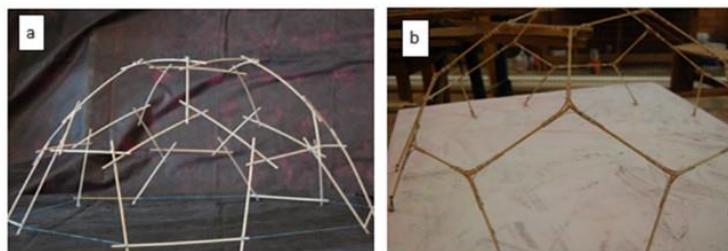


Figura 3: Domos geodésicos. (a) com varetas de bambu auto apoiadas e amarradas, Ostapiv *et al* (2018). (b) com varetas de bambu amarradas com lâminas de bambu, Castro (2019).

Nas estruturas geodésicas, as barras tendem a compartilhar uniformemente as forças de sujeição que são distribuídas de maneira mais ou menos uniforme ao longo de toda a estrutura. Isso faz com que este tipo de estrutura tenha boa resistência a terremotos, por exemplo. Além disso, estruturas com bambu maciço, como a usada na estrutura da Figura 3, têm uma excelente tenacidade, ou seja, uma boa capacidade para absorver impactos.

Levantar uma cúpula pequena pode ser bastante simples. Várias partes das cúpulas podem ser construídas no chão e depois levantadas como uma peça única, como mostraram Ostapiv *et al.* (2018). Porém, se este método funciona bem para cúpulas de até 4 m x 4 m e é muito difícil e perigoso para cúpulas geodésicas de grandes dimensões, conforme relatou Hill (2002).

Devido ao tempo de construção de uma cúpula geodésica ser muito curto, quando comparado com outras estruturas de dimensões semelhantes, o uso destas estruturas é indicado para abrigos temporários e de emergência. Domos geodésicos feitos com bambu podem ser usados de inúmeras formas tais como: espaços de exposição em feiras e escolas, acampamentos civis e militares, eventos festivos, espaços temporários para atividades rurais, abrigos para trabalhadores, materiais, animais e equipamentos, etc.

Domos geodésicos de bambu amarrados podem ser usados também como fôrmas ou estruturas auxiliares na construção de domos de concreto e aço, por exemplo. Podem também servir como andaime para deslocamento dos trabalhadores e como suporte para diversos tipos de materiais como aço, concreto, argila e tijolos, entre outros. Os domos geodésicos de concreto, monolíticos, apresentam uma proteção quase que absoluta contra vendavais, furacões e tornados.

2.1 Vantagens e desvantagens do uso de domos geodésicos:

Por serem esféricas, habitações ou produtos com esta forma apresentam alguns vantagens e desvantagens em relação às estruturas retangulares tradicionais. São estruturas versáteis e facilmente adaptáveis às diferentes necessidades do usuário. Suas principais vantagens:

- São estruturas resistentes e boas absorvedoras de vibrações;
- Possuem design único, sem cantos e colunas internas;
- São estruturas bonitas, interessantes e funcionais;
- Tem elevado valor estético e econômico numa construção, agregando valor aos telhados e a obra como um todo;
- As cúpulas geodésicas fechadas são termicamente muito eficientes.

Como as formas esféricas oferecem área superficial mínima para o volume contido por elas, a transferência de calor com o ar externo é a menor possível, pois estas trocas térmicas são diretamente proporcionais à área superficial.

As desvantagens dos domos geodésicos: um dos principais inconvenientes em relação às estruturas retangulares tradicionais é a questão da acomodação de peças, acessórios e compartimentos no seu interior, uma vez que estes são normalmente retangulares. Além disso, no caso de habitações semiesféricas;

- Janelas e portas curvas são mais caras e difíceis de serem encontradas, muitas vezes precisam ser fabricadas sob encomenda;
- Profissionais que instalam as redes hidráulicas e elétrica normalmente precisam de mais tempo para fazer o serviço que se torna mais caro;

- Sons, cheiros e luz são facilmente difundidos e experimentados em toda a estrutura o que pode causar problemas de privacidade;
- Por ser uma forma radicalmente diferente da tradicional, habitações com este formato podem ser difíceis de vender e apresentam menor valor de mercado.

2.2 Maquetes

O uso de maquetes estruturais ajuda no processo de análise, ensaio e simulação, somadas a várias outras questões técnicas práticas importantes, que podem ser usadas tanto nas fases de projeto como de execução de uma obra ou de um produto final.

Além de ilustrar o passo a passo construtivo possibilitando a análise modular e a otimização do processo, o uso de maquetes permite a realização de diversos testes mecânicos que servem, entre outros, para ajustar os parâmetros de modelamento computacional. O comportamento das estruturas em escala menor permite prever o comportamento de estruturas maiores.

Ostapiv *et al* (2019) e Castro (2019) construíram e ensaiaram maquetes de geodésicas de bambu usando barras cilíndricas maciças de bambu mossô, unidas com resina catalisada de poliéster saturada. As barras de bambu foram obtidas a partir de lotes comerciais, de 100 ou 200 unidades, de espetinhos de bambu para churrasco. As barras de bambu utilizadas na maquete têm diâmetro de 4 mm e 175 mm de comprimento. Para fazer a fixação das barras umas com as outras com os ângulos adequados, os autores utilizaram um molde de papelão auxiliar como o mostrado na Figura 4, e Tabela 1.



Figura 4: Molde de papelão na forma de cúpula, usado para construção do domo geodésico de bambu.

Tabela 1: Características do domo geodésico de barras de bambu com aresta de 175 mm.

DOMO GEODÉSICO - icosaedro truncado	
Comprimento das arestas dos polígonos da malha	175 mm
Diâmetro do domo	800 mm
Altura do domo	370 mm
Área aproximada da superfície do domo	1,5 m ²
Volume coberto pelo domo	98 L
Massa total da estrutura	142 g

2.3 Ensaio de cúpulas geodésicas de bambu

Após a construção das maquetes elas foram ensaiadas usando carregamento vertical na estrutura para verificar a resistência das estruturas construídas. Ostapiv *et al.* (2018) concluíram que domos geodésicos de bambu amarrados são resistentes, pois, em ensaios a

estrutura suportou uma carga de 38 vezes o seu peso próprio, com grande deflexão e absorção de energia sem se romper.

Nos ensaios de domos geodésicos análogos construídos por Castro (2019) e Ostapiv *et al* (2019), foram marcados como referência 5 pontos de uma plataforma plana, situados no topo da estrutura. Então foi medido o deslocamento vertical destes pontos enquanto a estrutura era carregada. Os resultados experimentais foram comparados com os dados da simulação computacional.

2.4 Simulação computacional - Análise por Elementos Finitos.

Cada vez mais é utilizado o método dos elementos finitos (MEF) para análise de problemas estruturais complexos onde, na maioria das vezes, é impossível a obtenção de uma solução analítica. O MEF é uma ferramenta altamente eficaz para a obtenção dos campos de deformações e tensões permitindo a identificação das regiões mais solicitadas de uma estrutura. A partir dos resultados da análise numérica, é possível obter um entendimento melhor do comportamento das estruturas, propor e avaliar modificações para otimizar estas estruturas. Castro e Ostapiv *et al* (2019) usaram o MEF para simular o comportamento de maquetes construídas com palitos de bambu e diferentes tipos de uniões. Para tal análise, usaram os recursos gráficos do programa ANSYS, mostrado nas Figuras 5,6 e7. Na resolução numérica obtida pelos autores foram considerados grandes deslocamentos dos nós da malha.

Para obter a solução numérica, apresentadas nas Figuras 6,7 e 8, Ostapiv *et al* (2019), discretizaram o modelo da geodésica com uma malha de 350 elementos de viga e 695 nós. As condições de contorno usadas no modelamento da geodésica foram: deslocamento e rotação nulos para os nós da base (condição de engaste) e força vertical definida e distribuída nos cinco nós do plano de topo da estrutura. No mesmo trabalho os autores obtiveram valor médio de 12 GPa para o (MOE) módulo de elasticidade das barras de bambu mossô, semelhante ao resultado obtido por Berndsen *et al* (2013). Este valor do MOE foi utilizado no software Ansys para a simulação computacional. Na Figura 5 é mostrada a estrutura inicialmente sem o carregamento e na sequência a Figura 6 mostra a mesma estrutura defletida sob a ação de uma força vertical de 34,06 N e os respectivos modelos tridimensionais gerados pelo programa computacional.

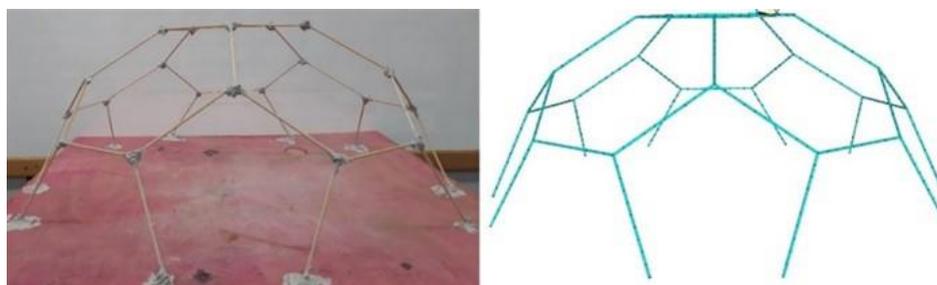


Figura 5: Estrutura geodésica de barras de bambu sem carregamento e seu modelo tridimensional.



Figura 6: Geodésica com carregamento vertical e modelo tridimensional nas mesmas condições.

Usando simulação computacional Ostapiv *et al* (2019) verificaram que as uniões entre os hexágonos da estrutura são os locais de maior concentração de tensões da estrutura com o carregamento vertical. A distribuição de tensão equivalente de von Mises e a tensão máxima de 63,4 MPa são mostradas na Figura 7.

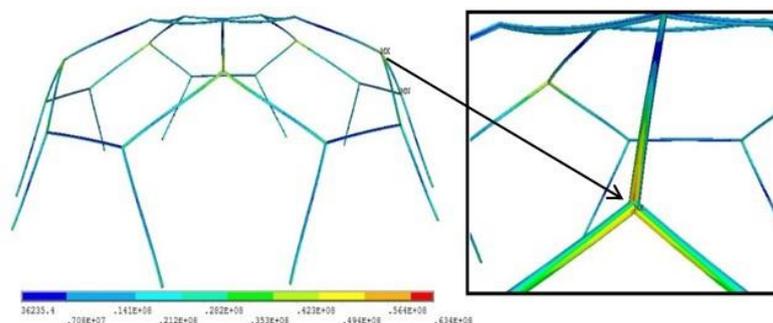


Figura 7: Distribuição de tensão equivalente de von Mises.

O gráfico 1, de força [N] versus deslocamento [mm], mostra a aderência dos resultados experimentais com os resultados da simulação computacional obtida pelos autores na estrutura geodésica de bambu sem nenhum tipo de reforço com cabos.

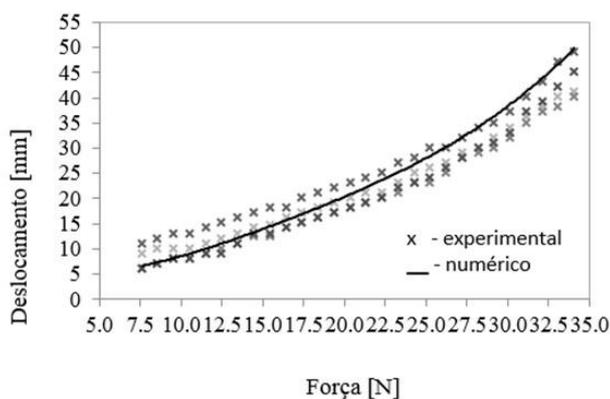


Gráfico 1: Comparação entre resultados obtidos experimentalmente e por simulação computacional da geodésica de bambu obtidas por Ostapiv *et al* (2019).

Módulo de elasticidade dos cabos de nylon:

O módulo de elasticidade (MOE) indica a rigidez de um material. Tem sua origem na energia de ligação molecular do material. Quando o material é submetido a um esforço

mecânico, o MOE é dado pela razão entre a tensão e a deformação do material dentro do limite linear-elástico

De um modo geral o nylon, que é o nome comercial para polímeros da família das poliamidas, tem excelente resistência a tração e apresenta MOE entre 2 e 4 GPa. O nylon 6.6 é uma fibra sintética, com a qual são feitos os fios trançados ou enrolados de nylon, estes fios podem apresentar valores para o MOE entre 1 e 3,8 GPa.

3. Materiais e Métodos

Repetindo o procedimento metodológico adotado por Castro (2019) e Ostapiv *et al* (2019), para o ensaio da cúpula geodésica de bambu sem reforço, foram feitas novas maquetes, usando reforços de cabos de nylon. Foi desenhada uma estrutura geodésica tridimensional com os reforços com amarração de cabos de nylon. O módulo de elasticidade dos fios de nylon foi obtido a partir do ensaio de tração de 13 corpos de prova, numa máquina universal de ensaios EMIC, no laboratório de materiais da engenharia civil da UTFPR-PB. Com os valores do módulo de elasticidade das barras de bambu e do cabo de nylon utilizado e com o desenho tridimensional da estrutura geodésica, foram feitas simulações usando o software ANSYS, de desenho e simulação para engenharia.

Os cabos de nylon usados como reforço foram amarrados em dois planos horizontais distintos da estrutura, ligando os nós (encontro de 3 barras de bambu) do centro dos hexágonos da estrutura no plano 1 e logo abaixo na base destes hexágonos, foram amarrados no plano 2, conforme mostrado na Figura 8.



Figura 8: Detalhes dos planos de amarração dos cabos de nylon na estrutura geodésica de bambu.

4. Resultados e discussões

Reforço da estrutura usando cabos:

Usando o MEF foram simuladas alternativas usando reforço com cabos de nylon amarrados na estrutura, para melhorar a rigidez e a resistência mecânica do domo geodésico.

Foram realizados ensaios de carregamento vertical para avaliar o comportamento da estrutura. Os valores médios de carregamento e deslocamento, do plano superior da estrutura ensaiada, podem ser observados na Tabela 2.

Durante o ensaio da estrutura com reforço amarrado, verificou-se que a concentração de tensão diminui nas uniões das barras de bambu evidenciando a efetividade do reforço amarrado. O resultado final mostra a redução dos efeitos do carregamento nas barras de bambu e a diminuição da deflexão da estrutura.

Tabela 2: Valores médios da deflexão da estrutura geodésica reforçada com cabos de nylon.

Carga (N)	Deflexão média do plano superior da estrutura (mm)
17,5	1,0
22,5	2,5
27,5	4,0
34,8	5,5
46,6	8,0
54,4	10,3
64,2	13,3

Na Figura 9 são mostrados os gráficos de (carregamento x deflexão) da estrutura com e sem reforço de cabos amarrados e as imagens das estruturas geodésicas no momento de máxima carga do ensaio. Nesta situação próxima do colapso, percebe-se a grande deflexão no topo da estrutura.

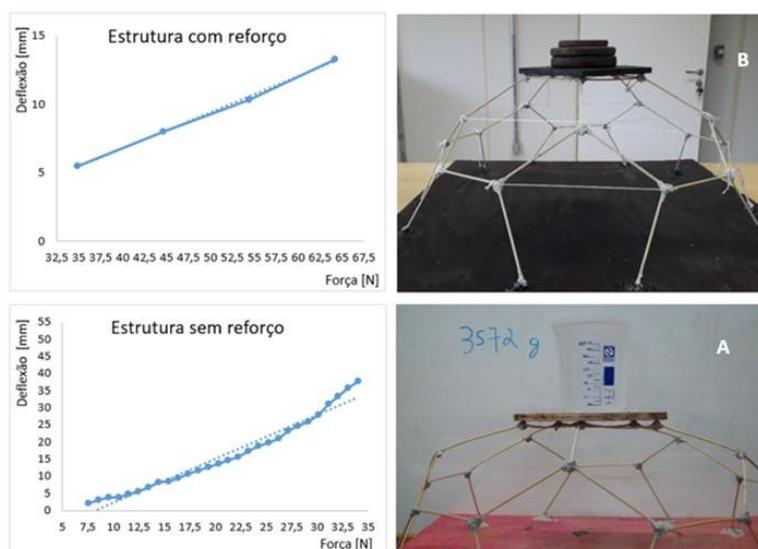


Figura 9: Curvas de carregamento vertical da estrutura. (A) sem reforço, (B) com reforço.

No Gráfico 2 são mostradas as curvas de (carregamento x deflexão) da estrutura geodésica sem reforço e reforçada com cabos amarrados. Comparando as curvas verifica-se que além de resistir ao dobro de carga, a estrutura reforçada defletiu-se muito menos. Enquanto a célula geodésica de bambu, sem reforço de cabos construída e ensaiada por Ostapiv *et al* (2019), mostrada na Figura 9a, resistiu a uma carga de 23 vezes o seu próprio peso com uma deformação vertical do topo da estrutura de 3,2 cm. Por sua vez, a geodésica análoga, reforçada com cabos de nylon amarrados, mostrada na Figura 9b e estudada neste trabalho, resistiu 4 vezes mais carga para a mesma deflexão da estrutura (1mm) e deformou-se oito vezes menos sob a mesma carga (32,5 N). Nas condições de máximo carregamento a estrutura reforçada resistiu 65 N, ou seja, 42 vezes seu peso próprio, mantendo um comportamento linear de deformação da estrutura.

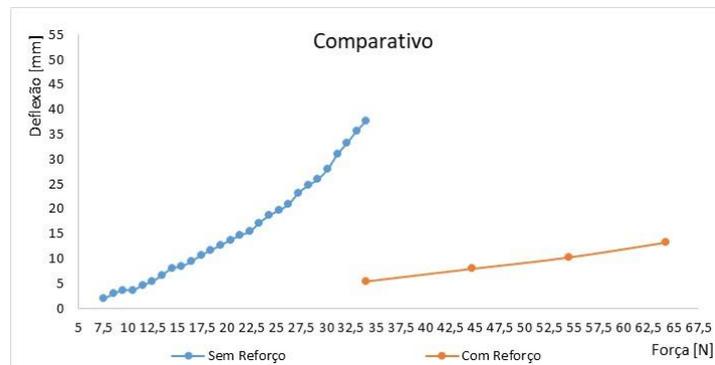


Gráfico 2: Curvas de carregamento da estrutura geodésica de barras de bambu, unidas com resina, com e sem reforço com cabos de nylon, submetidas a carregamento vertical.

Simulação da estrutura geodésica reforçada.

Após realizar os ensaios de carregamento e simular a estrutura geodésica, foi possível localizar as regiões com as maiores tensões e identificar os pontos de ruptura da estrutura. Como previsto no modelo numérico, e observado posteriormente no ensaio destrutivo, o ponto de ruptura foi localizado na conexão entre os palitos de bambu. Assim, com o objetivo de reforçar a estrutura, foram utilizados fios de nylon amarrados nas conexões para atuarem como cabos tracionados e diminuir o esforço sobre esses pontos. Na Figura 10 é mostrado o modelo numérico utilizado para a simulação computacional com o plano de amarração dos reforços.

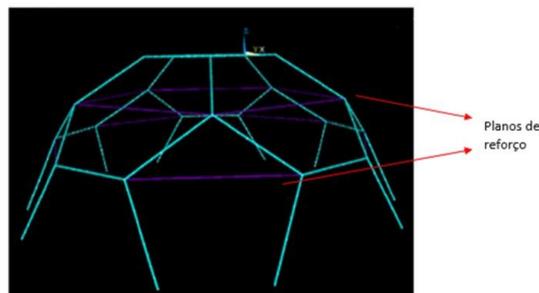


Figura 10. Maquete reforçada e respectivo modelo computacional.

Com a estrutura reforçada, foi feito o carregamento experimental utilizando anilhas, como mostrado na Figura 9b. Para cada carga, foi medido o deslocamento vertical da superfície superior em relação à base. O modelo numérico foi simulado com os mesmos carregamentos e, então, foi feita a comparação entre os resultados numéricos e experimentais.

Novamente foi utilizado o método dos elementos finitos para simular a estrutura. Os palitos de bambu foram modelados utilizando elementos de viga e os fios de nylon como elementos de barra. O módulo de elasticidade obtido experimentalmente para o fio de nylon foi de 1,25 GPa. Além disso, o fio de nylon possui um diâmetro de 1 mm. A simulação foi feita considerando que os materiais possuem comportamento linear elástico.

A Figura 11 mostra o gráfico dos resultados de deslocamento versus força. É possível observar uma grande dispersão dos resultados experimentais, devido basicamente ao grande incremento de carga a cada etapa, porém, o modelo numérico consegue se aproximar bem do comportamento médio dos resultados experimentais.

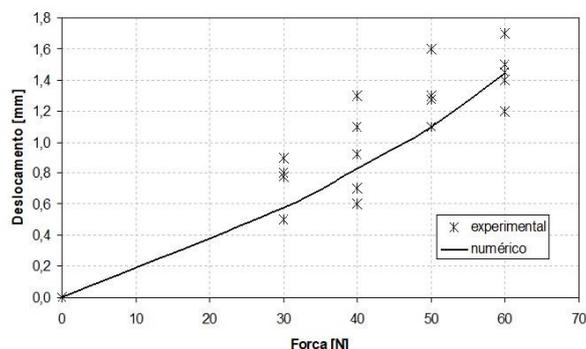


Figura 11. Deslocamento da estrutura por força de carregamento vertical.

O ensaio não destrutivo foi realizado com uma carga máxima de 60 N. O modelo foi simulado com esta carga e a distribuição da tensão equivalente de von Mises é mostrada na Figura 12. É possível observar que a tensão máxima de 24,2 MPa ocorre nos fios de nylon do plano superior (em vermelho). Desta forma, foi possível aliviar as tensões sobre as barras de bambu e nas conexões, transmitindo parte significativa desta tensão para os cabos tracionados. Com este reforço amarrado, foi possível aumentar a resistência mecânica final da estrutura e diminuir sua deflexão, sem agregar peso significativo para o conjunto.

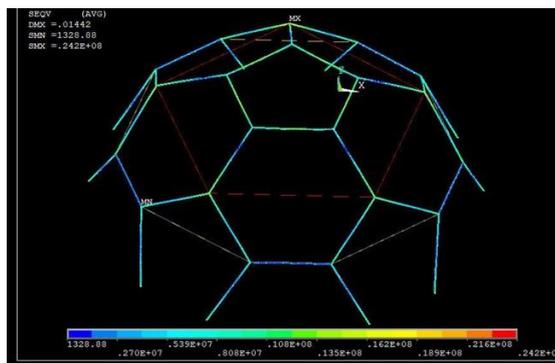


Figura 12. Distribuição de tensões de von Mises.

Com o modelo numérico validado, foi possível fazer algumas simulações para prever a carga máxima suportada pela estrutura. Assim, a estrutura foi simulada até ocorrer o colapso elástico (*snap through*). A Figura 13 mostra o gráfico de força versus deslocamento da estrutura onde é possível observar que a carga máxima suportada prevista foi de 85 N.

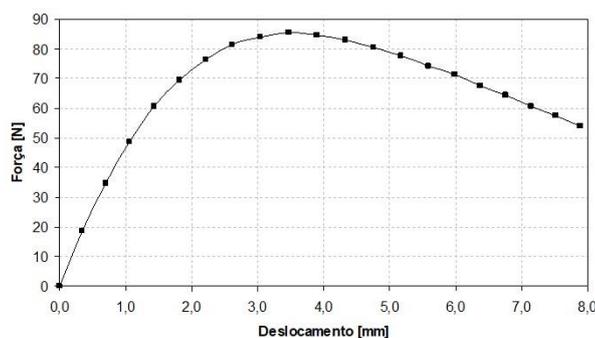


Figura 13. Força por deslocamento segundo o modelo numérico adotado.

No experimento destrutivo da estrutura geodésica, a carga máxima obtida foi em torno de 72 N. Porém, após atingir a carga máxima, diferentemente do modelo numérico, a estrutura se rompeu na região das conexões entre as barras de bambu. A Figura 14 mostra os resultados de simulação do modelo após o colapso elástico da estrutura. As maiores tensões foram agora obtidas nas barras superiores da estrutura. Essas barras também sofreram uma grande deflexão.

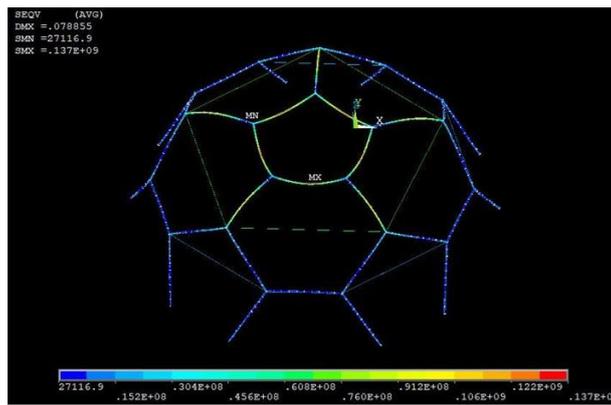


Figura 14. Colapso elástico do modelo da geodésica.

A Figura 15 mostra a estrutura instantes antes de ocorrer sua ruptura. É possível ver as grandes deflexões das barras de bambu que ocorrem especialmente na região superior da estrutura, como previsto pelo modelo computacional mostrado na Figura 14.



Figura 15: Estruturas geodésicas de bambu com reforço amarrado próximas do momento de colapso.

Devido às condições geradas pelo carregamento na estrutura, a deflexão da mesma não ocorreu de forma simétrica. Finalmente, a ruptura ocorreu simultaneamente em uma conexão entre as barras, mostrado no detalhe da Figura 16 e também em uma barra de bambu de menor densidade. É preciso ressaltar que o modelo numérico não leva em consideração as propriedades da resina usada nas conexões e por isso não é capaz de prever a falha frágil deste material.

A carga de rompimento foi de, aproximadamente 72 N. A diferença entre o valor previsto de 85 N para ruptura e o valor de 72 N encontrado no ensaio da estrutura pode ser explicado pela não seleção adequada das barras de bambu usadas na construção da estrutura. As mesmas deveriam ter sido classificadas segundo a densidade do material. Algumas destas

barras menos densas teriam menor valor de MOE, concentrando tensão no carregamento ao se deformarem mais. Outras fontes de erro podem estar relacionadas ao alinhamento do plano superior da estrutura que, devido a problemas de montagem, que apresentou erro de paralelismo em relação ao plano da base da estrutura. E as diferentes cargas iniciais aplicadas na geodésica no momento de amarração dos reforços, uma vez que o pré-tensionamento e a amarração foram realizadas manualmente.

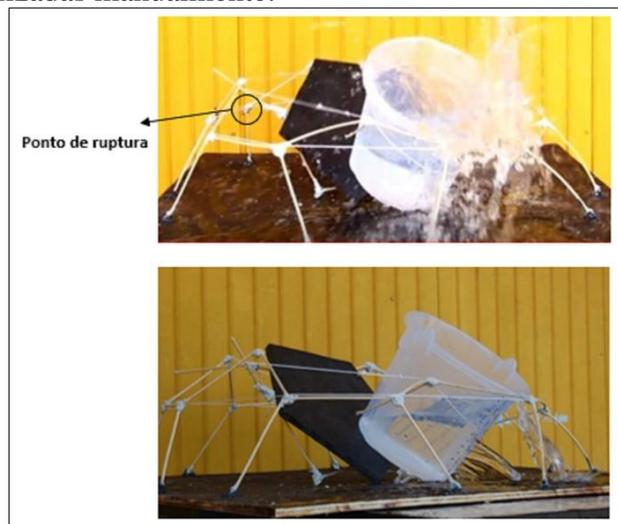


Figura 16: Colapso elástico da geodésica reforçada, rompimento da estrutura.

Um aspecto importante foi o modo com o qual as estruturas geodésicas com e sem reforço se deformaram. A estrutura sem reforço de amarração, a partir do carregamento vertical de 25 N, passou a se deformar numa taxa elevada, mostrando que a estrutura se aproxima rapidamente do ponto de colapso. Por outro lado, a estrutura reforçada com cabos amarrados de nylon, mostrou maior rigidez, maior capacidade de carga e um comportamento de deformação estrutural praticamente linear sob carregamento, característica desejável para uma estrutura, até certo limite.

5. Conclusões.

Neste trabalho, foram apresentados estudos sobre o reforço com cabos de nylon, amarrados em cúpulas geodésicas, que são estruturas espaciais leves, resistentes e que permitem cobrir grandes espaços. O resultado de vários ensaios em geodésicas de bambu, construídas em escala reduzida e as simulações numéricas destas estruturas, foram mostrados neste trabalho. A união entre as barras de bambu foi feita apenas com resina comercial chamada de “massa plástica”, solução já analisada por Ostapiv *et al* (2019), a partir da solução das uniões das barras, a construção das cúpulas geodésicas se tornou relativamente simples, podendo, no entanto, ser melhorada.

Aplicando o reforço com cabos, a estrutura geodésica construída com barras de bambu mossô, resistiu a uma carga cerca de quatro vezes mais elevada e se deformou muito menos do que a mesma estrutura sem reforço, aumentando significativamente a rigidez do conjunto, evidenciando a importância do reforço e a efetividade da solução adotada. Esta solução amplia as possibilidades de uso deste tipo de estrutura em telhados, abrigos de emergência e habitações temporárias, por exemplo.

Como discutiram Cook *et al* (1988), o uso de Métodos de Elementos Finitos MEF, permite prever o comportamento de estruturas e testar diferentes soluções de engenharia sobre estas estruturas, como foi verificado neste trabalho. No futuro, novas soluções para as geodésicas de bambu podem ser propostas e testadas usando estas importantes ferramentas para a engenharia de estruturas, a simulação computacional e sua validação pelo desenvolvimento e ensaio de modelos físicos em escala reduzida, como mostrado neste trabalho.

Referências

- BERNDSSEN, R.S., KLITZKE, R.J., BATISTA, D.C., NASCIMENTO, E.M., OSTAPIV, F. “Resistência à flexão estática e à compressão paralela do bambu-mossô (*Phyllostachys pubescens*)” Floresta, v.43, nº3, p. 485 – 494, jul./set. 2013 – Curitiba PR.
- CASTRO, G. C. “Ensaio e simulação computacional de estrutura geodésica tipo icosaedro truncado construída com barras de bambu”. 93f. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2019.
- COOK, R.D., MALKUS, D. S. PLESHA. M. E. “Concepts and Applications of Finite Element Analysis” 3ed. Madison: Editora John Wiley and Sons Ltd, 1988.
- GHAVAMI, K., MOREIRA, L.E. “Double-layer bamboo space structures”: Space Structures 4, ed: Thomas Telford Ltd, vol.1, p. 573-581. 1993.
- HIBBELER, R. C. “Resistência dos materiais”. Pearson-Prentice Hall, 5a ed. 670 p., New York, 2010.
- HILL, J.O. “Professional Dome Plans”, 3a ed. 2002.
- VAN LANGDON D. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/796023/classicos-da-arquitetura-biosfera-de-montreal-buckminster-fuller>>. Acesso em 18, Set., 2018.
- LENGEN, J.V. “Arquitetura dos índios da Amazônia” B4 Editores, 119p, São Paulo, 2013.
- LIBRELLOTO, L.I., OSTAPIV, F. (org) “Bambu caminhos para o desenvolvimento sustentável no Brasil” 1ª ed. Virtuhab, 204p. Florianópolis, 2019.
- OSTAPIV, F., SALAMON, C., STAHLSCHEMIDT, J., BETT, C. F. “Estudos iniciais para ensaios e construção de cúpulas geodésicas usando colmos de bambu”. MIX Sustentável, v.4, n.1, p. 108-116. UFSC, Florianópolis, 2018.
- OSTAPIV, F., OSTAPIV, G., CASTRO, G.C., STAHLSCHEMIDT, J., “Computational simulation and vertical loading tests in bamboo geodesic domes”. In: 25th International Congress of Mechanical Engineering - ABCM, Uberlândia, MG, out. 2019.
- ROZESTRATEN, A. S. “Apuntes acerca del papel de la representación en el proceso del proyecto de arquitectura de Paulo Mendes da Rocha”. Arquiteturarevista - Vol. 5, nº2: p.111-121. São Paulo, 2009.
- SALAMON, C., OSTAPIV, F. Planificação de Colmos de Bambu para Produção de Painéis. Mix Sustentável - Edição 05 v.3, n.1. p.73-83. UFSC, Florianópolis, 2017.
- SALCIDO, J.C.; RAHEEM, A.A.; RAVI, S. “Comparison of embodied energy and environmental impact of alternative materials used in reticulated dome construction” Building and Environment 96: The International Journal of Building Science and its Applications, Elsevier, p. 22-34. 2016.