

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**MARINA NERY DA FONSÊCA ALVES**

**MODELAGEM NUMÉRICA DE UM GAZEBO DE BAMBU COM VISTAS À SUA  
ANÁLISE ESTRUTURAL**

João Pessoa, PB

2018

**MARINA NERY DA FONSÊCA ALVES**

**MODELAGEM NUMÉRICA DE UM GAZEBO DE BAMBU COM VISTAS À SUA  
ANÁLISE ESTRUTURAL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à  
Universidade Federal da Paraíba como pré-  
requisito para obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Civil.

Orientador: Profa. Dra. Andrea Brasiliano Silva

João Pessoa, PB

2018

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

A474m Alves, Marina Nery da Fonseca.

Modelagem numérica de um gazebo de bambu com vistas à sua análise estrutural / Marina Nery da Fonseca Alves.

- João Pessoa, 2018.

74 f. : il.

Orientação: Andrea Brasiliano Silva.

Monografia (Graduação) - UFPB/CT.

1. Análise dinâmica 2. Bambu 3. Sustentabilidade. I. Silva, Andrea Brasiliano. II. Título.

# FOLHA DE APROVAÇÃO

MARINA NERY DA FONSÊCA ALVES

## MODELAGEM NUMÉRICA DE UM GAZEBO DE BAMBU COM VISTAS À SUA ANÁLISE ESTRUTURAL

Trabalho de Conclusão de Curso em 14/06/2018 perante a seguinte Comissão Julgadora:

Andrea Brasiliano Silva  
Prof.<sup>a</sup>. Andrea Brasiliano Silva

Aprovada

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

Hidelbrando José Farkat Diógenes  
Prof.<sup>o</sup>. Hidelbrando José Farkat Diógenes

APROVADA

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

Germana Costa Rocha  
Prof.<sup>a</sup>. Germana Costa Rocha

APROVADA

Departamento de Arquitetura e Urbanismo

P/ ABSilva  
Prof.<sup>a</sup>. Ana Cláudia Fernandes Medeiros Braga  
Matrícula Siape: 1668619

Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil

Prof.<sup>a</sup> Andrea Brasiliano  
Vice - Coordenadora - CCGEC  
Siape 1549557

À minha mãe, Grace Nery da Fonsêca, que faz de tudo para transformar meus sonhos em realidade, dedico.

## AGRADECIMENTOS

Uma construção sólida precisa de muito empenho. É como um trabalho de conclusão como este, que não teria saído do plano das ideias sem muita força de vontade. E por isso, agradeço primeiramente a Deus por ter me dado persistência e discernimento em todos os momentos e por realizar meu sonhos de uma maneira muito melhor e mais bonita do que eu imaginei.

Agradeço também às mulheres da minha vida: Grace, Gladys e Yvette Nery da Fonsêca, que estiveram comigo me dando força, apoio e incentivo em todos os momentos.

Aos meu familiares, que me acompanharam durante essa jornada, não só servindo de arrimo em todas as ocasiões, como também me impulsionando a cada vitória para que eu chegasse sempre mais longe.

Aos meus colegas de curso, em especial Luci Maria Freitas de Lucena, que com todo carinho me guiaram e me acompanharam nesses cinco anos de curso.

Aos meus amigos queridos, que estiveram sempre do meu lado, aguentando todos os meus estresses e desânimos, com toda paciência e carinho do mundo.

À UFPB, coordenadores, professores e funcionários, que sempre estiveram à disposição de todos os alunos. Em especial aos funcionários do LABEME que me assistiram nos ensaios laboratoriais.

À minha orientadora, Andrea Brasiliano Silva, que tanto me ajudou nesse trabalho e me mostrou que desistir não é uma alternativa sustentável. Aos professores Hidelbrando Farkat Diógenes e Germana Costa Rocha, que me auxiliaram e orientaram da melhor maneira possível.

À Vanessa Ramona Macena Maciel e Heitor Abdias da Silva Pereira, cujos ensinamentos foram de fundamental importância para a elaboração deste trabalho.

Obrigada a todos, sem vocês esta estrutura não teria chegado forte até aqui.

“Semear ideias ecológicas e plantar sustentabilidade é ter a garantia de colhermos um futuro fértil e consciente.”

Sivaldo Filho

## RESUMO

Nos dias de hoje, onde há escassez de matéria-prima, poluição das reservas naturais e uma população cada vez maior, a necessidade de preservar o meio ambiente é urgente. Nesse contexto, a busca por alternativas sustentáveis, ou seja, que conservem os ecossistemas, é necessária em todos os setores e isso já vem ocorrendo na construção civil. O bambu entra como uma opção nesse novo cenário, pois é um material limpo, de alta velocidade de reprodução, de fácil manejo e rentável. Entretanto, os estudos para o seu uso estrutural ainda estão muito no começo. Desse modo, esse trabalho visa expandir as pesquisas do material no seu comportamento dinâmico, caracterizando as frequências e modo de vibração de um gazebo de bambu construído no Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba pelos alunos de arquitetura que participam da pesquisa “Tectônica e Sustentabilidade na Arquitetura”, coordenado pela professora Dra. Germana Costa Rocha.

**Palavras-chave:** Análise dinâmica. Bambu. Sustentabilidade.

## ABSTRACT

The depletion of raw materials combined with pollution of natural resources and world population growth makes clear that it is urgent to think about environmental conservation. From this angle, the search for sustainable ways, the ones that are gentle with ecosystem, are imperative and this approach has already been studied and applied in the Civil engineering field. That is where bamboo come in scene. It is a very safe option in this new scenario because it is a clean, high-speed reproduction material, easy to use and profitable. However, studies and interest for its structural use are just a new theme on the academic context. In this way, this work aims to expand the research of bamboo's dynamic behaviour, outlining the frequencies and mode of vibration of a bamboo gazebo built in Technology Center of the Federal University of Paraíba by Architecture students who joined a Tectonics and Sustainability research group, coordinated by Dr. Germana Rocha.

**Keywords:** Dynamic analysis. Bamboo. Sustainability.

## LISTA DE ILUSTRAÇÃO

|  |    |
|--|----|
| Figura 1- Barras de sustentação apenas do telhado ecológico e barras de sustentação do telhado ecológico e da placa solar..... | 16 |
| Figura 2- Barras verticais maiores .....   | 16 |
| Figura 3- Barras verticais menores.....  | 17 |
| Figura 4- Barras transversais maiores e menores.....   | 18 |
| Figura 5- Barras de sustentação do telhado de bambu .....  | 18 |
| Figura 6- Estrutura considerada na modelagem 2.....  | 20 |
| Figura 7- Esquema representativo das barras de associação- tipo 2 .....  | 20 |
| Figura 8- Esquema representativo das barras de associação- tipo 2 .....  | 21 |
| Figura 9 - As três esferas do desenvolvimento sustentável.....   | 23 |
| Figura 10- Uso de bambu na Arquitetura.....  | 24 |
| Figura 11- Uso de bambu no design de móveis. ....  | 25 |
| Figura 12- Taj Mahal .....   | 26 |
| Figura 13 - Escoramento de Bambu.....  | 27 |
| Figura 14- Casa na Indonésia construída com Bambu.....   | 27 |
| Figura 15 - Corte de bambu na bigorna.....   | 31 |
| Figura 16 - Amostras de bambu para o ensaio de densidade .....   | 31 |
| Figura 17 - Balança zerada.....  | 32 |
| Figura 18 - Corpos de prova do 1 ao 3 sendo pesados.....   | 32 |
| Figura 19 - Corpos de prova do 4 ao 6 sendo pesados.....   | 32 |
| Figura 20- Cantoneira Metálica.....  | 33 |
| Figura 21- Amostra de bambu 1 preso a cantoneira.....  | 34 |
| Figura 22- Amostra de bambu 2 preso a cantoneira.....  | 34 |
| Figura 23 - Ensaio de flexão a 4 pontos.....   | 35 |
| Figura 24 - Posicionamento dos nós- Vista Superior- Modelagens 1 e 2 .....   | 36 |
| Figura 25- Posicionamento dos nós- Vista lateral- Modelagem 1 .....  | 37 |
| Figura 26- Posicionamento dos nós- Vista lateral- Modelagem 2 .....  | 37 |
| Figura 27- Nomeação das barras- Vista superior- Modelagem 1 e 2.....   | 38 |
| Figura 28- Nomeação das barras-Vista frontal superior- Modelagem 1e 2 .....  | 39 |
| Figura 29- Nomeação das barras - Vista posterior superior- Modelagem 1 e 2 .....   | 39 |
| Figura 30 - Nomeação das barras - Vista lateral esquerda- Modelagem 1.....   | 40 |
| Figura 31- Nomeação das barras- Vista posterior- Modelagem 1.....  | 40 |
| Figura 32 - Nomeação das barras - Vista posterior esquerda- Modelagem 1 .....  | 41 |
| Figura 33 - Nomeação das barras - Vista frontal- Modelagem 2 .....   | 41 |
| Figura 34- Nomeação das barras-Vista posterior- Modelagem 2.....   | 42 |
| Figura 35 - Nomeação das barras - Vista posterior - Modelagem 2.....   | 42 |
| Figura 36 - Gazebo de bambu - Vista lateral.....   | 43 |
| Figura 37 - Projeto do Gazebo - Vista Lateral- Modelagem 1 .....   | 44 |
| Figura 39- Formato da seção transversal.....   | 49 |
| Figura 40- Geometria do COMBIN14 .....   | 50 |
| Figura 41- Apoio das barras verticais .....  | 50 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 42- Ligação entre barras verticais maiores e barras verticais menores.....              | 51 |
| Figura 43- Ligações entre barras verticais maiores e barras transversais- Vista lateral.....   | 51 |
| Figura 44 - Ligações entre barras verticais maiores e barras transversais- Vista inferior..... | 52 |
| Figura 45- Geometria do elemento BEAM4.....  | 53 |
| Figura 47- Telhado ecológico do gazebo.....  | 55 |
| Figura 48- Placa solar do gazebo.....  | 56 |
| Figura 49- Esquema das barras estruturais e não estruturadas.....                              | 57 |
| Figura 50- Telhado de bambu.....   | 58 |
| Figura 51-Módulo de elasticidades- Bambu 1.....  | 61 |
| Figura 52-- Módulo de Elasticidade do Bambu 2.....   | 62 |
| Figura 54- Modo de vibração 17.....  | 65 |
| Figura 55- Modo de vibração 20.....  | 66 |
| Figura 56- Modo de Vibração 5.....   | 68 |
| Figura 57- Modo de Vibração 8.....   | 68 |
| Figura 58- Modo de vibração 1169   |    |
| Figura 59- Modo de vibração 19.....  | 69 |
| Figura 60- Modo de vibração 24.....  | 70 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - Propriedades das barras de sustentação do telhado e placa solar ..... | 45 |
| Tabela 2 - Propriedades das barras de sustentação apenas do telhado. ....        | 45 |
| Tabela 3- Propriedades verticais maiores.....                                    | 45 |
| Tabela 4- Propriedades das barras verticais menores.....                         | 45 |
| Tabela 5- Propriedades das barras transversais maiores .....                     | 46 |
| Tabela 6 - Propriedades das barras transversais menores. ....                    | 46 |
| Tabela 7- Propriedades das barras de sustentação do telhado de Bambu.....        | 46 |
| Tabela - Propriedades das barras do tipo 2.....                                  | 48 |
| Tabela 10- Resultado do ensaio de densidade.....                                 | 54 |
| Tabela 11- Cálculo da densidade do telhado.....                                  | 55 |
| Tabela 12- Cálculo da densidade da placa solar.....                              | 56 |
| Tabela 13- Cálculo do peso total sobre as barras do telhado .....                | 57 |
| Tabela 14- Cálculo da nova densidade das barras estruturais .....                | 57 |
| Tabela 15 - Análise modal do gazebo com o telhado.....                           | 67 |

## SUMÁRIO

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                             | <b>13</b> |
| 1.1      | OBJETIVOS .....                                     | 14        |
| 1.1.1    | <i>Objetivo Geral.....</i>                          | <i>14</i> |
| 1.1.2    | <i>Objetivos Específicos.....</i>                   | <i>14</i> |
| <b>2</b> | <b>METODOLOGIA .....</b>                            | <b>15</b> |
| <b>3</b> | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>                  | <b>21</b> |
| 3.1      | SUSTENTABILIDADE .....                              | 21        |
| 3.1.1    | <i>Conceito e História.....</i>                     | <i>21</i> |
| 3.1.2    | <i>Sustentabilidade na Construção Civil.....</i>    | <i>23</i> |
| 3.1.1    | <i>Bambu.....</i>                                   | <i>24</i> |
| 3.1.1    | <i>Utilização do bambu na Construção civil.....</i> | <i>25</i> |
| 3.2      | ANÁLISE DINÂMICA .....                              | 28        |
| 3.2.1    | <i>História e Conceito.....</i>                     | <i>28</i> |
| 3.2.2    | <i>Análise modal .....</i>                          | <i>28</i> |
| 3.2.2.1  | <i>Conceito .....</i>                               | <i>28</i> |
| 3.2.2.2  | <i>Definição matemática .....</i>                   | <i>29</i> |
| <b>4</b> | <b>PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....</b>               | <b>29</b> |
| 4.1      | DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO BAMBU .....        | 29        |
| 4.1.1    | <i>Área .....</i>                                   | <i>30</i> |
| 4.1.2    | <i>Momento de inércia.....</i>                      | <i>30</i> |
| 4.1.3    | <i>Densidade .....</i>                              | <i>30</i> |
| 4.1.4    | <i>Ensaio de flexão a 4 pontos .....</i>            | <i>33</i> |
| 4.2      | LEVANTAMENTO E DESCRIÇÃO DA GEOMETRIA.....          | 35        |
| 4.2.1    | <i>Nomeação dos nós do modelo.....</i>              | <i>36</i> |
| 4.2.2    | <i>Nomeação das barras do modelo.....</i>           | <i>38</i> |
| 4.2.3    | <i>Aferição das medidas de projeto .....</i>        | <i>43</i> |
| 4.3      | FERRAMENTA COMPUTACIONAL .....                      | 44        |
| 4.3.1    | <i>Modelagem 1.....</i>                             | <i>44</i> |
| 4.3.2    | <i>Modelagem 2.....</i>                             | <i>47</i> |
| <b>5</b> | <b>MODELO NUMÉRICO .....</b>                        | <b>48</b> |
| 5.1      | MODELAGEM 1 .....                                   | 49        |
| 5.2      | MODELAGEM 2 .....                                   | 52        |
| <b>6</b> | <b>RESULTADOS.....</b>                              | <b>54</b> |
| 6.1      | PROPRIEDADES .....                                  | 54        |
| 6.1.1    | <i>Densidade .....</i>                              | <i>54</i> |
| 6.1.1.1  | <i>Telha Ecológica.....</i>                         | <i>55</i> |
| 6.1.1.2  | <i>Placa Solar .....</i>                            | <i>56</i> |

|          |                                      |           |
|----------|--------------------------------------|-----------|
| 6.1.1.3  | Telhado de bambu .....               | 56        |
| 6.1.1    | <i>Módulo de Elasticidade</i> .....  | 58        |
| 6.1.1.1  | Amostra de Bambu 1.....              | 60        |
| 6.1.1.2  | Amostra de Bambu 2.....              | 61        |
| 6.2      | ANÁLISE MODAL DO GAZEBO .....        | 62        |
| 6.2.1    | <i>Modelagem 1</i> .....             | 62        |
| 6.3      | MODELAGEM 2 .....                    | 66        |
| <b>7</b> | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>    | <b>71</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS .....</b>             | <b>72</b> |
|          | <b>BIBLIOGRAFIA CONSULTADA .....</b> | <b>73</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Nos dias de hoje, onde há escassez de matéria-prima, poluição das reservas naturais e uma população cada vez maior, a preocupação com a preservação do meio ambiente é urgente. Nesse contexto, surgiu no mundo moderno a necessidade de tecnologias inovadoras que proporcionem não só o desenvolvimento econômico, como também a proteção e manutenção dos ecossistemas. E como a engenharia civil pode contribuir com este cenário?

A construção civil incorporou a ideia de sustentabilidade para atender essas novas exigências, já que as pessoas vêm pressionando as empresas para que os danos ao meio ambiente sejam minimizados. As leis também estão ficando mais rígidas e os governos estão exigindo que as construções tenham mais cuidado como o seu entorno. O mercado imobiliário também vem percebendo que as chamadas “construções verdes” e os “empreendimentos inteligentes” conquistam mais consumidores e são muito valorizados.

Nesta conjuntura, o uso de bambu vem reaparecendo como uma alternativa. “Reaparecendo”, pois, o material já era utilizado há séculos por civilizações antigas, mas só recentemente seu uso voltou à discussão. Com tanta reflexão sobre o tema, os engenheiros e arquitetos vêm percebendo que empregar o bambu em obras traz grandes ganhos financeiros e ecológicos. Primeiro, por se tratar de um material limpo, renovável, de fácil obtenção e manejo. E segundo, por ser barato e possuir ótimas características para a engenharia e arquitetura como um todo.

Entretanto, embora a utilização de bambu nas edificações já ocorra há tanto tempo, a normatização e as pesquisas nessa área ainda são muito recentes. A análise modal para determinação das frequências e dos modos de vibração em estruturas desse tipo aparece, portanto, como um ponto de partida para os estudos nessa área.

Diante disso, esta pesquisa visou aprofundar o conhecimento sobre a importância da sustentabilidade na construção civil e analisar a dinâmica de uma estrutura específica de bambu para, a partir dessa expandir as análises neste segmento. O presente trabalho ainda visa colaborar com parâmetros para que a realidade deste estudo possa ser aplicada em estruturas maiores.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

A presente pesquisa tem como objetivo geral a análise do comportamento dinâmico de um gazebo bambu construído no Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba pelos alunos de arquitetura que participam da pesquisa “Tectônica e Sustentabilidade na Arquitetura”, coordenada pela professora Dra. Germana Costa Rocha.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Para a obtenção do objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

- i. Comparar o projeto do gazebo de bambu com a estrutura real;
- ii. Mapear as barras e nós da estrutura real;
- iii. Caracterizar os vínculos presentes na estrutura;
- iv. Realizar a análise modal da estrutura de bambu;
- v. Verificar os resultados obtidos na análise.

## 2 METODOLOGIA

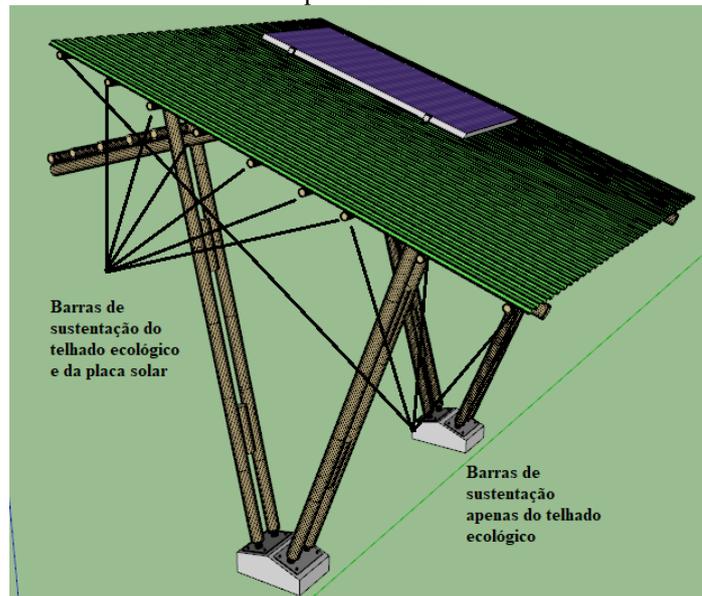
Fez-se necessário a construção de dois modelos numéricos para a representação da estrutura real, isso porque enquanto um possuía a geometria idêntica ao gazebo, o outro caracterizava-se por aproximar-se mais do esperado para o comportamento dinâmico da estrutura. Para chegar aos modelos numéricos finais foi preciso definir as hipóteses quanto às características físicas e geométricas da estrutura. Isto foi feito a partir da realização de ensaios que determinavam a densidade e módulo de elasticidade do bambu cujos resultados seriam utilizados no programa computacional. Além disso, foram definidas as condições de contorno e os tipos de elementos a serem considerados no Ansys para o modelo em questão.

Inicialmente, foram realizados os ensaios laboratoriais com o intuito de conhecer as propriedades mecânicas do material e a partir disso, fornecer informações ao programa para que este pudesse alcançar seus resultados. Em seguida, mensurou-se, *in loco*, o diâmetro e comprimento das barras com a finalidade de obter as dimensões reais para assim poder conceber a geometria mais parecida possível com o gazebo construído para modelagem 1 e para poder conceber as características específicas mais semelhante possível ao gazebo para a modelagem 2.

Por último, foi necessária uma análise profunda do comportamento da estrutura para que fossem formuladas as hipóteses acerca das condições de contorno e das configurações de seus elementos. Nesse contexto, na modelagem 1 foi idealizada uma estrutura formada por 7 tipologias diferentes de barras:

- i. Barras de sustentação do telhado ecológico e da placa solar: Encontram-se abaixo da placa solar e do telhado ecológico, suportando então a carga destes dois elementos. A Figura 1 representa essas barras.
- ii. Barras de sustentação apenas do telhado ecológico: Localizam-se exclusivamente sob o telhado ecológico, de modo que recebe apenas o peso deste. A Figura 1 também apresenta essas barras.

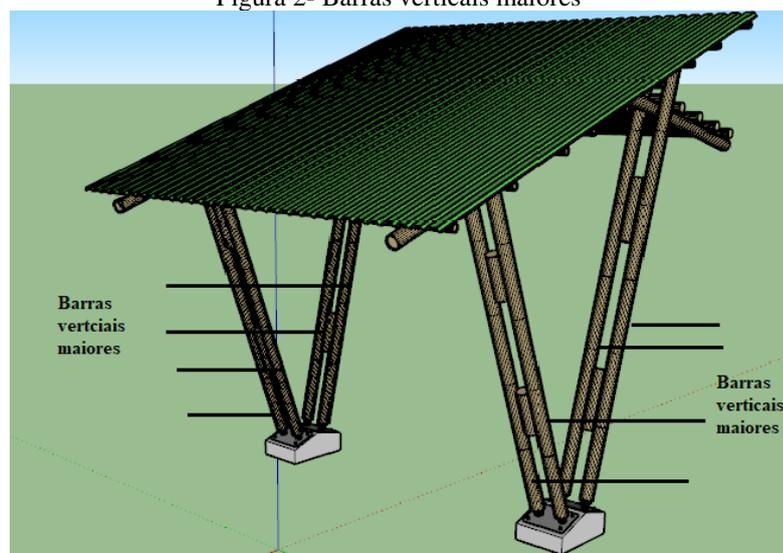
Figura 1- Barras de sustentação apenas do telhado ecológico e barras de sustentação do telhado ecológico e da placa solar



Fonte: Adaptado do modelo elaborado pela aluna de Arquitetura e Urbanismo Camilla R. C. Lima na pesquisa Tectônica e Sustentabilidade na Arquitetura DAU/CT.

- iii. Barras verticais maiores: Funcionam como os pilares do gazebo sendo responsáveis pela sua sustentação, além de conectar as barras do teto ao chão (Figura 2).

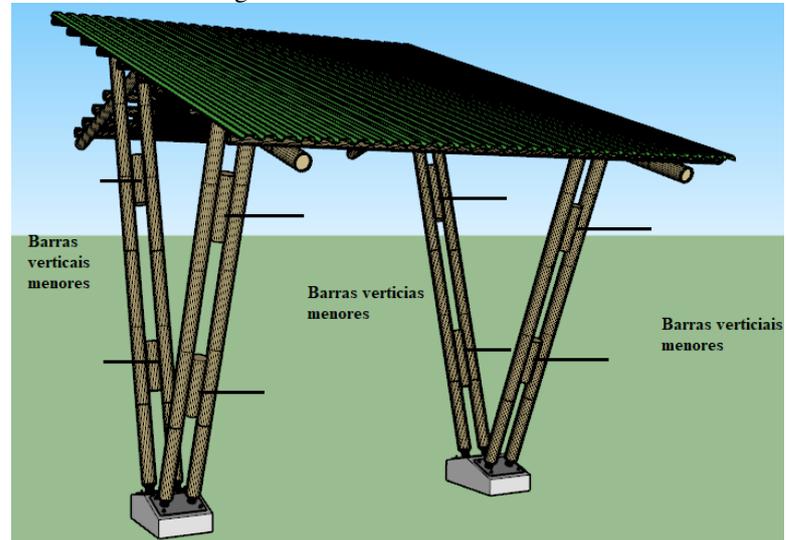
Figura 2- Barras verticais maiores



Fonte: Adaptado do modelo elaborado pela aluna de Arquitetura e Urbanismo Camilla R. C. Lima na pesquisa Tectônica e Sustentabilidade na Arquitetura DAU/CT.

- iv. Barras verticais menores: Estão ligadas as barras verticais maiores e funcionam como elemento de junção de duas barras verticais maiores, além de servir na arquitetura do gazebo (Figura 3).

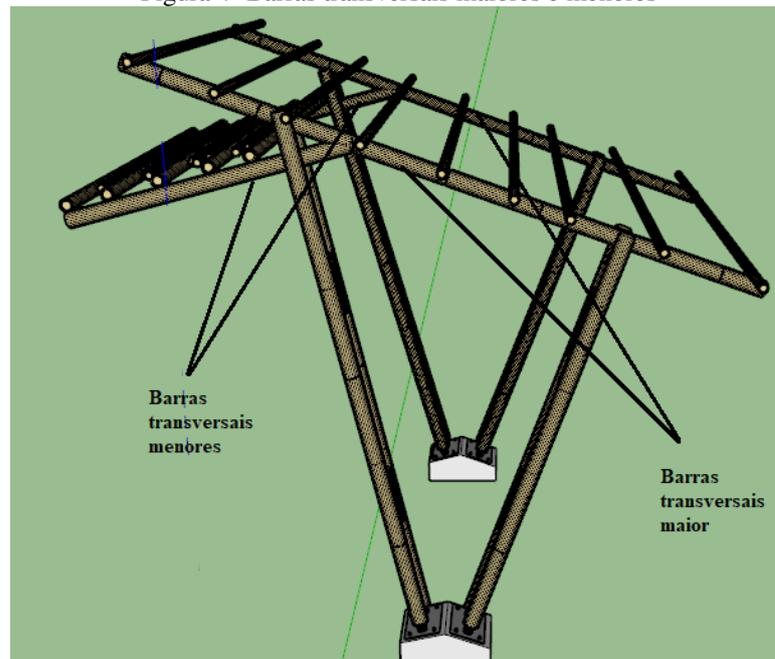
Figura 3- Barras verticais menores



Fonte: Adaptado do modelo elaborado pela aluna de Arquitetura e Urbanismo Camilla R. C. Lima na pesquisa Tectônica e Sustentabilidade na Arquitetura DAU/CT.

- v. Barras transversais maiores: Prendem as barras sob o telhado ecológico e a placa solar com as barras verticais maiores. Estas sustentam o peso das barras descritas em i e ii (Figura 4).
- vi. Barras transversais menores :Sustentam o peso das barras vii e as unem com as barras verticais maiores (Figura 4).

Figura 4- Barras transversais maiores e menores



Fonte: Adaptado do modelo elaborado pela aluna de Arquitetura e Urbanismo Camilla R. C. Lima na pesquisa Tectônica e Sustentabilidade na Arquitetura DAU/CT.

- vii. Barras de sustentação do telhado de Bambu: São barras estruturais do telhado que suportam a carga das demais (Figura 5).

Figura 5- Barras de sustentação do telhado de bambu



Fonte: Adaptado do modelo elaborado pela aluna de Arquitetura e Urbanismo Camilla R. C. Lima na pesquisa Tectônica e Sustentabilidade na Arquitetura DAU/CT.

Essas tipologias foram assim agrupadas pois possuíam as mesmas características de seção transversal e também exerciam o mesmo papel na estrutura.

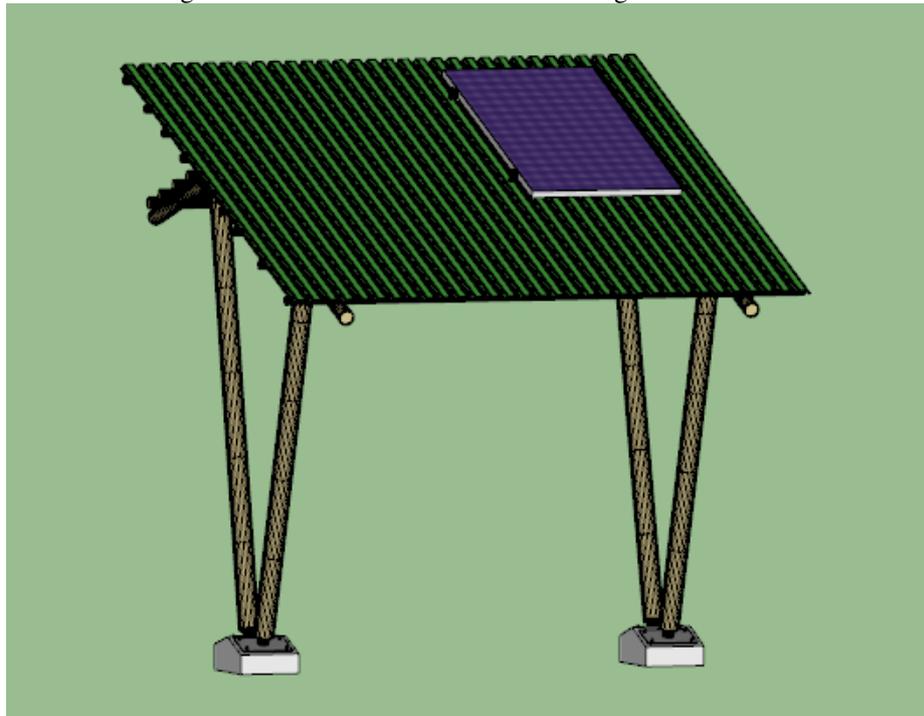
Quantos às condições de contorno foi utilizada a hipótese que as barras verticais maiores eram ligadas ao chão por apoios elásticos que restringiam apenas parcialmente as rotações. As barras maiores também são ligadas às barras menores por apoios elásticos já que estas não têm nem as rotações e nem os deslocamentos completamente impedidos. E, por último, as barras transversais menores e as barras transversais maiores também foram ligadas às barras verticais por apoios elásticos pelo motivo citado anteriormente.

Já para a modelagem 2 foram adotadas as mesmas tipologias nas barras mencionadas nos itens i,ii,v,vi e vii citados anteriormente. Entretanto, as barras iii e iv foram modificadas transformando-se em uma “única” barra na geometria, formada por pequenas barras menores como será explicado adiante. A Figura 6 representa o esquema da disposição estrutural dessa modelagem.

Como ilustrado nas figuras 2 e 3 em algumas coordenadas dos pilares havia 3 barras, sendo duas verticais maiores e uma vertical menor, e em outras localidades havia 2 barras, sendo as duas verticais maiores. Devido a esse fato, foi imprescindível dividir a barra única do arranjo em 5 pequenas barras menores, já que as características dessas barras eram diferentes, pois em algumas dessas era incorporada a composição de apenas duas barras e em outras a associação de 3 outras barras. As figuras 7 e 8 ilustram essa divisão.

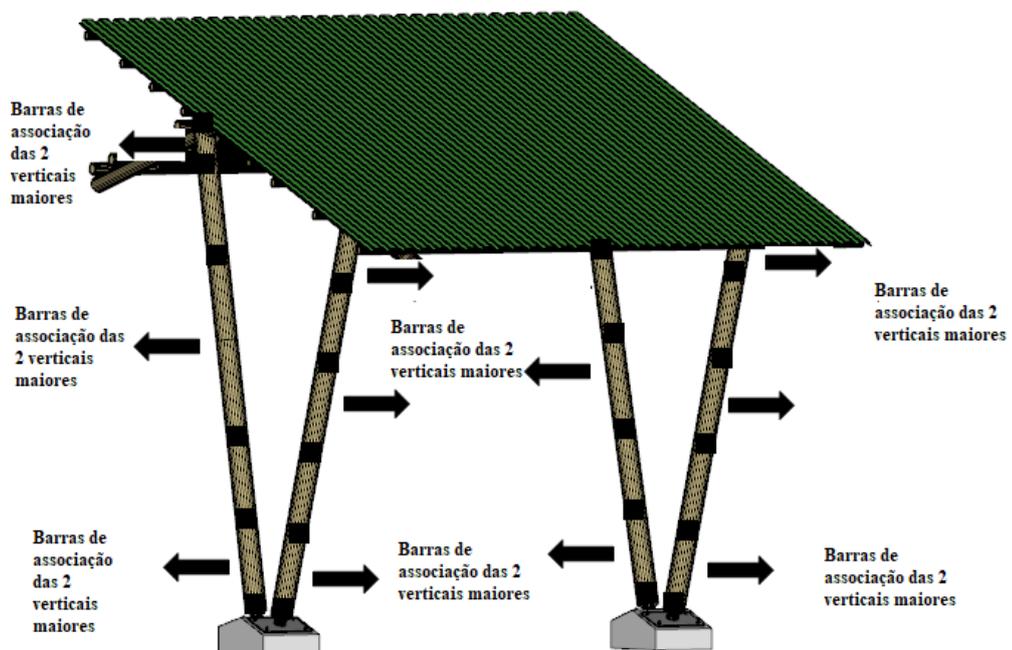
Essa modificação no esqueleto do gazebo foi necessária para que o nó de ligação das barras verticais e das transversais se transformassem em único nó e desse modo, pudessem deslocar-se conjuntamente, como de fato ocorre na prática.

Figura 6- Estrutura considerada na modelagem 2



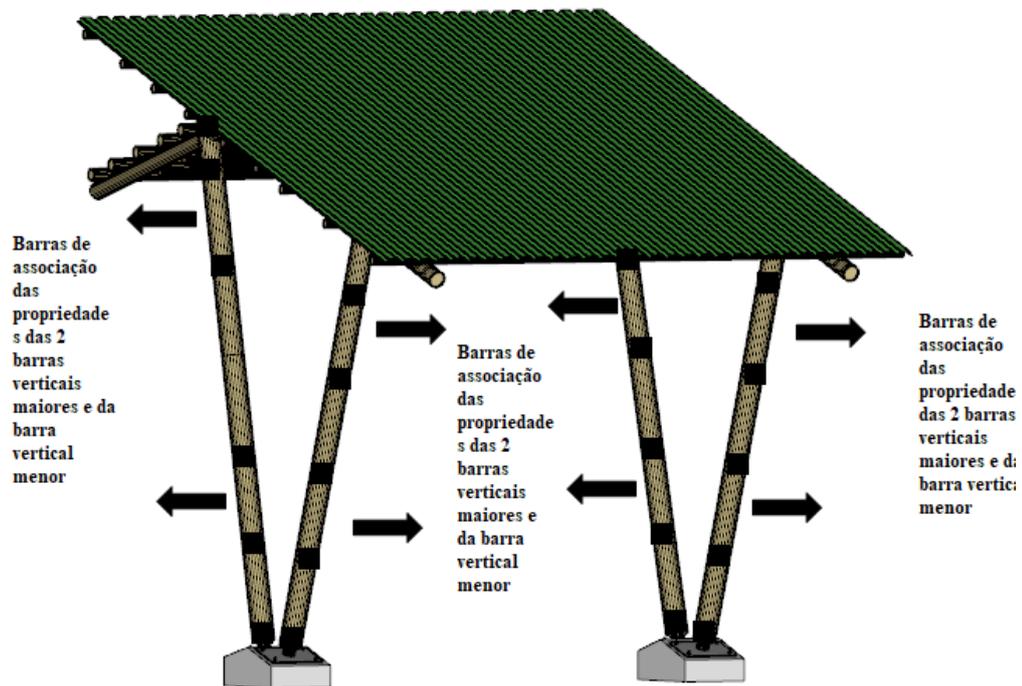
Fonte: Adaptado do modelo elaborado pela aluna de Arquitetura e Urbanismo Camilla R. C. Lima na pesquisa Tectônica e Sustentabilidade na Arquitetura DAU/CT.

Figura 7- Esquema representativo das barras de associação- tipo 2



Fonte: Adaptado do modelo elaborado pela aluna de Arquitetura e Urbanismo Camilla R. C. Lima na pesquisa Tectônica e Sustentabilidade na Arquitetura DAU/CT.

Figura 8- Esquema representativo das barras de associação- tipo 2



Fonte: Adaptado do modelo elaborado pela aluna de Arquitetura e Urbanismo Camilla R. C. Lima na pesquisa Tectônica e Sustentabilidade na Arquitetura DAU/CT.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 SUSTENTABILIDADE

##### 3.1.1 Conceito e História

De acordo com o dicionário Aurélio, a palavra sustentável deriva do latim *sustentare* e significa sustentar, manter, conservar e cuidar. Quando se aplica o termo sustentabilidade ao meio ambiente, ele passa a se referir às práticas que protegem o ecossistema.

A sustentabilidade começou a ser pensada após a Segunda Guerra Mundial, quando o mundo foi dividido em duas potências - Estados Unidos da América e União das Repúblicas Socialistas e Soviéticas - que cometeram as maiores atrocidades nos aspectos humanos e ambientais com o intuito de sair vencedor da disputa. Com a vitória americana, os Estados Unidos entraram na “Era desenvolvimentista”, com o discurso de promover crescimento industrial e impulsionar países que de uma forma ou outra foram atingidos economicamente pela Guerra.

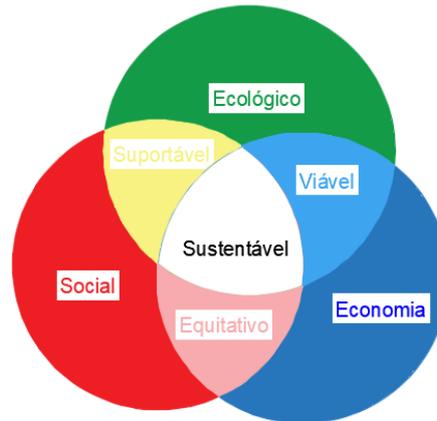
Mas só em 1972 é que foi acontecer de fato uma reunião oficial para se discutir como o desenvolvimento econômico estava impactando o mundo. Foi durante a primeira Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente, em Estocolmo, que se delimitou a Tese dos Limites do Crescimento, documento que, entre outras coisas, propôs a redução dos níveis de crescimento para promover a estabilização dos recursos naturais. Como resultado de uma maior reflexão sobre esses assuntos, em 1973 foi usado o termo “ecodesenvolvimento”. Segundo Caldas (2002), o termo defendia a ampliação das discussões sobre degradação ambiental.

Após isso, o assunto passou a ser discutido com mais frequência. Aconteceram o Relatório de Brundtland (1987), o Nosso Futuro Comum (1987), a Declaração do Rio (1992), a Agenda 21 (1992), o Rio + 10 (2002), a Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável, a Rio +20 (2012) e por último, a Cúpula de Desenvolvimento Sustentável (2015).

O desenvolvimento que procura satisfazer as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades, significa possibilitar que as pessoas, agora e no futuro, atinjam um nível satisfatório de desenvolvimento social e econômico e de realização humana e cultural, fazendo, ao mesmo tempo, um uso razoável dos recursos da terra e preservando as espécies e os habitats naturais. (Relatório Brundtlan,1987)

Essas conferências permitiram a disseminação do conceito de sustentabilidade e de desenvolvimento sustentável, e discutiram não só o aspecto ecológico, como também os pontos sociais e econômicos. Quando a sustentabilidade é relacionada à concepção ecológica, essa passa a dizer respeito ao uso racional e consciente do meio ambiente, de modo a preservá-lo. Já quando o termo toca em questões sociais, refere-se a uma maior igualdade na distribuição de renda, assim como nos direitos à moradia, saúde e educação para todos os cidadãos. Na perspectiva econômica, a sustentabilidade aborda a gestão eficiente dos recursos.

Figura 9 - As três esferas do desenvolvimento sustentável.



Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.1.2 Sustentabilidade na Construção Civil

É de consenso geral que o setor da construção civil tem papel muito importante no desenvolvimento sustentável, já que causa impactos não apenas relacionados ao consumo de matéria e energia, como também precisa lidar com o problema da geração de resíduos sólidos, líquidos e gasosos.

Os impactos gerados por construções são consideráveis. Segundo o Ministério do Meio Ambiente, estimam-se que mais de 50% dos resíduos sólidos gerados pelo conjunto das atividades humanas sejam provenientes da construção.

O Governo e os consumidores vêm cobrando uma posição mais ética das empresas com relação a minimizar esses impactos. E por isso, cada vez mais o compromisso com o meio ambiente vem ganhando espaço em projetos de engenharia civil. Para corroborar com o fato, é preciso ressaltar que no Brasil, foi criado em 2007 o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável, com o objetivo de contribuir para a geração e difusão de conhecimento e de boas práticas de sustentabilidade na construção civil.

No geral, as práticas de sustentabilidade na construção civil envolvem pontos como a busca pelos fornecedores, a escolha e a otimização de materiais, as opções de energia e a redução dos resíduos gerados, tudo em busca da preservação do ambiente.

### 3.1.1 Bambu

O bambu é uma opção sustentável de material. Ele é uma espécie do reino *Plantae*, da família *Poaceae* e da sub-família *Bambusoideae*. Ou seja, de acordo com suas divisões em taxonomia, o bambu pertence ao reino vegetal, de modo que produz oxigênio e seu próprio alimento. Além de ser da família das gramíneas cujas representantes são floríferas e monocotiledôneas.

O bambu pode ser classificado em herbáceos ou lenhosos. Os primeiros são de porte inferior e assemelham-se a arbustos, já os últimos são de grande porte e parecem com as árvores. Este vegetal é dividido em duas partes: aérea (colmos) e subterrânea (raízes e rizomas).

O bambu é ainda uma planta com ótimas características físicas, químicas e mecânicas, as quais permitem uma alta resistência tanto à tração quanto à compressão e boa durabilidade. Além disso, esse material se adequa às mais diversas altitudes (0 a 4300 m) e climas, desde temperaturas abaixo de 0 até climas tropicais. No mundo todo são encontradas aproximadamente 1.200 espécies que habitam praticamente todos os continentes do planeta. Para completar, o bambu possui seu amadurecimento e colheita numa velocidade bastante superior a das demais árvores. Desse modo, o bambu é uma alternativa sustentável, econômica e eficiente.

Por possuir tantas qualidades, o bambu é utilizado nos mais diversos setores, tais como: agricultura, arquitetura, artesanato, construção civil, design de interiores, entre outros. As figuras 10 e 11 apresentam exemplos da variedade de empregos desse material.

Figura 10- Uso de bambu na Arquitetura.



Fonte: Eduarda Córrea Arquitetura e Interiores<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup>-Disponível em < <https://www.arcoweb.com.br/finestra/tecnologia/megaporta-bambu-caixilhos-aluminio> > Acesso em 21 de maio de 2018.

Figura 11- Uso de bambu no design de móveis.

Fonte: Site Emobile<sup>2</sup>

### 3.1.1 Utilização do bambu na Construção civil

O bambu ganha destaque pois é um material ecologicamente menos agressivo ao meio ambiente do que os materiais construtivos convencionais. Mas seu uso não é novidade. Segundo Velez (2000), a utilização do bambu na construção acontece há mais de três mil anos, e provavelmente começou a ser utilizado na civilização de Valdivia, no Equador. As culturas do Oriente e da América Latina também desenvolveram o uso desse material nas edificações. Um exemplo disso é o famoso Taj Mahal, na Índia, inaugurado em 1653 e que é uma das sete maravilhas do mundo moderno. Pouca gente sabe, mas a sustentação de algumas partes utiliza o bambu como material. Porém, só por volta de 1960, com a preocupação constante em torno das questões ecológicas e econômicas é que o bambu passou a ser uma alternativa estrutural para todo o mundo.

---

<sup>2</sup> Disponível em: < <http://www.emobile.com.br/site/industria/moveis-de-bambu> > Acesso em 21 de maio de 2018.

Figura 12- Taj Mahal



Fonte: Site Wikipédia<sup>3</sup>

O bambu possui qualidades que fazem com que seja muito útil em construções: é leve, de fácil transporte e manuseio, flexível e tem boa durabilidade quando tratado adequadamente. Além disso, uma série de propriedades que o tornam aptos para seu uso na construção civil, como: baixa densidade, boa resistência à tração, compressão e flexão. Segundo Ghavammi (1992, p.11) as principais vantagens de utilização do bambu são:

- Apresenta uma baixa energia necessária para a sua produção por unidade de tensão: 30 MJ/m<sup>3</sup>/ MPa. (Isto é, 50 vezes menor que a do aço).

- Possui uma alta resistência à tração, chegando a atingir 200 N/mm<sup>2</sup>, para um baixo peso específico: 0,8 x 10<sup>-3</sup> N/mm<sup>3</sup>. O bambu apresenta o maior valor para a relação entre a resistência a tração e o peso específico, o que o torna vantajoso como material construtivo.

O emprego do bambu na construção civil é bastante variado. De acordo com Pereira (1997), o bambu da espécie *Dendrocalamus Giganteus* pode ser utilizado nas tubulações hidráulicas, já que ele produz colmos com dimensões, características físicas e mecânicas compatíveis para utilização em irrigações.

Outra utilização desse tipo de material é como reforço ao concreto. Conforme Pereira e Beraldo (2008), o “bambucreto” tem utilização em obras secundárias nas quais o concreto

---

<sup>3</sup> Disponível em: < [https://en.wikipedia.org/wiki/Taj\\_Mahal](https://en.wikipedia.org/wiki/Taj_Mahal) > Acesso em 22 de maio 18.

reforçado pelo bambu não seja submetido a grandes esforços (ou os vãos utilizados sejam inferiores a 3,5 m).

Também se torna viável a aplicação desse material em escoramentos (Figura 13), já que são rígidos e baratos, o que é tradição dos países asiáticos. Além disso, o bambu ainda é empregado na estrutura de edificações, seja em cobertas, pilares ou vigas (Figura 14).

Figura 13 - Escoramento de Bambu.



Fonte: Site Engenharia e Construções <sup>4</sup>

Figura 14- Casa na Indonésia construída com Bambu.



Fonte: Site da Geotesc<sup>5</sup>

---

<sup>4</sup> Disponível em: < <http://www.engenhariaconstrucao.com/2012/02/andaimas-de-bambu.html> >. Acesso: 22 de maio de 2018.

<sup>5</sup> Disponível em < <http://www.geotesc.com.br/site/tag/casa-de-bambu> >. Acesso em 22 de maio de 2018

## 3.2 ANÁLISE DINÂMICA

### 3.2.1 História e Conceito

A análise dinâmica consiste em examinar, nas estruturas, as respostas de ações que variam ao longo do tempo, independentemente de sua duração. Tais ações são ditas dinâmicas e podem ser exemplificadas: vento, ondas, terremotos, explosões, tráfego de veículos ou de pessoas etc.

A prática mostra que a maioria das ações tem caráter dinâmico por se tratar de grandezas vetoriais e modificar-se, ao longo do tempo, pelo menos um dos três componentes que a caracterizam: intensidade, direção ou sentido. Porém, em muitos casos, as ações dinâmicas podem ser desprezadas para efeitos de cálculo.

A dinâmica estrutural é fundamental para a engenharia atual, tendo se desenvolvido a partir de disciplinas do campo da matemática aplicada, mecânica teórica e física experimental. As primeiras teorias sobre os movimentos e forças foram as de Aristóteles (384-322 A.C.) na Idade Antiga e a do “Impetus” na Idade Média. Entretanto, foi com Galileu Galilei (1564-1642) que os estudos no campo da mecânica foram desenvolvidos através do “Princípio da Inércia” que é aceito até os dias de hoje. E, mais tarde, essas teorias foram aprimoradas por Newton (1642-1727) que criou as leis de Newton, as quais, são a base da dinâmica moderna.

### 3.2.2 Análise modal

#### 3.2.2.1 Conceito

A análise modal é a parte da análise dinâmica responsável por identificar as frequências naturais, e os correspondentes modos de vibração, assim como os coeficientes de amortecimento. As frequências naturais são características intrínsecas às estruturas, e são medidas considerando vibração livre (Clough e Penzien, 1993), e a cada uma destas correspondem os modos de vibração. As estruturas possuem diversas frequências naturais, já que podem vibrar em muitas direções. Fisicamente, é função direta da rigidez e inversa da massa da estrutura.

O amortecimento modal é a taxa responsável por dissipar a energia cinética recebida dos modos de vibração, ou seja, é a propriedade da estrutura que faz com que ela volte ao repouso após um tempo de cessada a força de aplicação. Isso pode ocorrer por meio de ruído, calor, atrito viscoso e entre outros. Os parâmetros dinâmicos são necessários para o conhecimento do comportamento da estrutura quando excitada.

### 3.2.2.2 Definição matemática

Considerando uma estrutura com  $n$  graus de liberdade, o seu movimento pode ser descrito pela segunda lei de Newton, conforme a Equação 1, para a vibração livre. Nessa equação são consideradas as forças de inércia, de amortecimento e elástica representadas pelo produto da matriz de massa  $[M]$  pelo vetor aceleração  $\{\ddot{u}\}$ , da matriz de amortecimento  $[C]$  pelo vetor velocidade  $\{\dot{u}\}$ , e da matriz de rigidez  $[K]$  pelos deslocamentos  $\{u\}$ , respectivamente. A Equação 1 representa, portanto, a equação de movimento da estrutura para vibrações livres amortecidas. Para a análise modal, ou seja, em que o interesse é apenas identificar as propriedades dinâmicas, frequências e correspondentes modos de vibração naturais, pode-se considerar o problema de vibração livre não amortecida, dado pela Equação 2.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = 0 \quad (1)$$

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = 0 \quad (2)$$

## 4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 4.1 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO BAMBU

Para realização da análise estrutural do gazebo de bambu, se faz necessário o conhecimento de uma série de propriedades acerca do material e da seção transversal, as quais permitem a modelagem estrutural no *software* para obtenção de seu comportamento modal.

As propriedades da seção transversal, tais como, área e momento de inércia foram calculadas com a ajuda do Excel. Já as propriedades do material, densidade e módulo de

elasticidade, foram obtidas com uma amostra de bambu que não foi utilizada na estrutura através de ensaios realizados no Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas (LABEME).

O bambu é um material de forma elíptica, entretanto, segundo as diretrizes para criação da Norma Brasileira para Estruturas de Bambu, o diâmetro externo médio de cada extremidade é considerado a média do maior diâmetro e do menor diâmetro tomados visualmente, de modo que, encontra-se um diâmetro único e aproxima-se para o formato de um círculo vazado.

#### **4.1.1 Área**

As áreas foram calculadas baseadas nos diâmetros internos e externos medidos no campo em cada barra. De posse desse resultado, obteve-se a média e a moda para barras caracterizadas em uma mesma tipologia e a depender da situação escolheu-se a solução mais indicada para inserir no Excel e obter o resultado.

#### **4.1.2 Momento de inércia**

Foram calculados três tipos diferentes de momento de inércia. O momento de inércia em relação ao eixo X, o momento de inércia em relação ao eixo Y e o momento polar de inércia. Por se tratar, aproximadamente, de seções com o formato de um círculo vazado, os momentos de inércia em relação aos eixos X e Y são iguais na modelagem 1. Já na modelagem 2, a barra vertical “única” da geometria representa a composição de outras barras, sendo assim o momento de inércia foi calculado pelo teorema de Steiner e é diferente para os eixos X e Y. Estes como citado anteriormente foram obtidos após a introdução de expressões específicas no Excel.

#### **4.1.3 Densidade**

O ensaio de densidade foi baseado no projeto de Normas Brasileiro para Estruturas de Bambu, o qual propõe que o corpo de prova deve ser prismático com cerca de 25 mm de largura, 25 mm de altura e espessura igual à da parede do colmo. As amostras devem ser colhidas e armazenadas em condições que garantam que o teor de umidade permaneça inalterado.

A realização do ensaio iniciou-se pela demarcação com o uso do paquímetro da amostra em pedaços menores com aproximadamente 25 mm de altura e largura. Após isso, houve a segmentação de um pedaço de bambu, com o uso da serra e da bigorna, em 6 corpos de prova. As figuras 15 e 16 ilustram este processo e os corpos de prova utilizados.

Figura 15 - Corte de bambu na bigorna.



Fonte :Nery(2018)

Figura 16 - Amostras de bambu para o ensaio de densidade



Fonte :Nery(2018)

Posteriormente, foi zerada uma balança graduada em décimo de grama e pesadas as 6 diferentes amostras. O passo seguinte foi medir com o paquímetro as dimensões exatas de cada corpo de prova e a partir dos dados de massa e volume obtidos, calcular o valor da densidade. As figuras 17, 18 e 19 demonstram esse procedimento.

Figura 17 - Balança zerada.



Fonte: Nery (2018)

Figura 18 - Corpos de prova do 1 ao 3 sendo pesados.



Fonte: Nery (2018)

Figura 19 - Corpos de prova do 4 ao 6 sendo pesados.



Fonte: Nery (2018)

O cálculo da densidade foi feito de acordo com a tipologia das barras, sendo assim foi dividido em 4 partes. Nas barras em que havia o peso do telhado ecológico, foi feita a verificação da massa do telhado e dos bambus, e dividida ao longo do volume das barras. O mesmo método foi aplicado para as demais categorias de barras, do telhado de bambu e da placa solar. A partir daí, foram determinadas as densidades que seriam referentes a cada variedade de barras tanto na modelagem 1 quanto na 2.

#### 4.1.4 Ensaio de flexão a 4 pontos

O ensaio de flexão a 4 pontos tem como objetivo determinar o módulo de elasticidade do material. Este foi realizado em duas amostras de bambus com diâmetros e características distintas. Para as duas amostras, o procedimento foi basicamente o mesmo.

Primeiramente, cortaram-se duas amostras de bambus com um comprimento de 50 cm. Em seguida, colou-se com cola cianocrilato uma cantoneira de metal com 22 cm de comprimento; após isso, para garantir a total sustentação a cantoneira foi amarrada à amostra de bambu por duas camadas de arame 18. As figuras 20, 21 e 22 ilustram o procedimento.

A cantoneira foi escolhida em formato de L para que a placa de metal não sofresse flexão enquanto o bambu recebia carga. Além disso, esta não foi parafusada à amostra para não comprometer as propriedades de resistência do material.

Figura 20- Cantoneira Metálica



Fonte: Nery (2018)

Figura 21- Amostra de bambu 1 preso a cantoneira



Fonte: Nery (2018)

Figura 22- Amostra de bambu 2 preso a cantoneira



Fonte: Nery (2018)

Para a sequência do ensaio, preparou-se o suporte inferior com um espaçamento de 40 cm de comprimento onde o bambu foi colocado ao centro ficando com 5cm de cada lado em balanço. Feito isso, colocou-se o suporte superior pressionado com a prensa hidráulica. O funcionamento da prensa hidráulica baseia-se no princípio de Pascal, em que a pressão aplicada em qualquer ponto de um fluido, fechado num recipiente, é transmitido igualmente em todas as direções.

Para finalizar, engastou-se um transdutor de deslocamento a um suporte magnético, com o emprego do nível para fixa-lo alinhadamente. Desse modo, a prensa aplicava uma carga  $P$  crescente na barra de bambu, a qual iria romper-se por tração iniciada nas fibras

inferiores. Já a ponta do transdutor em contato com a placa de metal mediria o deslocamento enquanto a carga estivesse sendo empregada. A Figura 23 demonstra essa etapa.

Figura 23 - Ensaio de flexão a 4 pontos



Fonte: Nery (2018)

#### 4.2 LEVANTAMENTO E DESCRIÇÃO DA GEOMETRIA

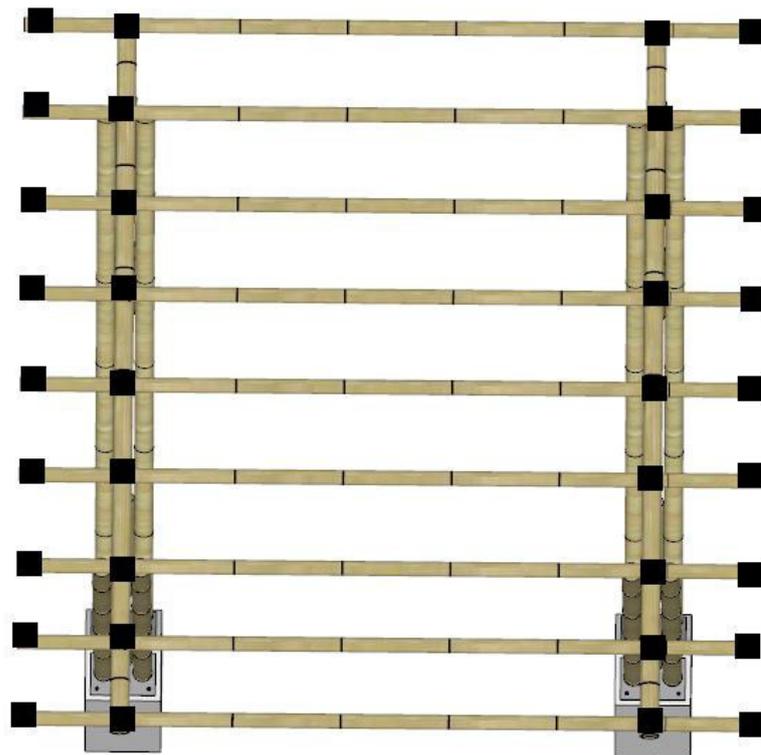
Para o desenvolvimento do trabalho foi necessária a modelagem das estruturas por meio de um *software* de análise estrutural. A fim de construir esses modelos, foi preciso determinar as propriedades dos materiais conforme item anterior, bem como suas dimensões e

geometria. Assim, após obtidas as características das seções transversais, cria-se a sua geometria. Esta é projetada, inicialmente, a partir da idealização dos nós, que podem ser representados pelas extremidades livres ou pela junção de duas ou mais barras. Após a determinação dos nós, delimitam-se as barras, que correspondem à junção de dois ou mais nós.

#### 4.2.1 Nomeação dos nós do modelo

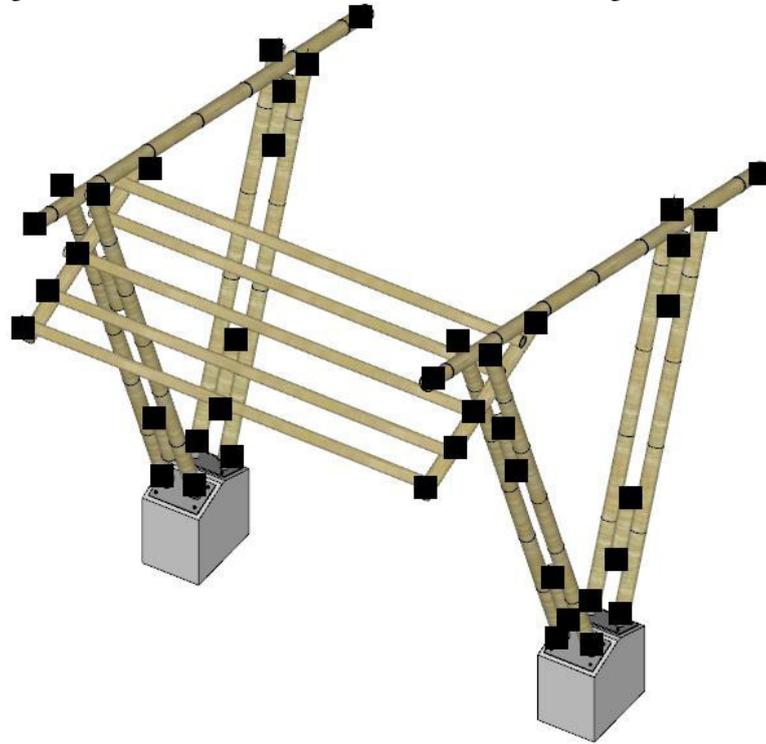
Os nós foram nomeados de acordo com a seguinte sequência: de cima para baixo e da esquerda para direita, conforme as vistas representadas nas figuras 24, 25 e 26. Destacados em preto estão os nós do modelo.

Figura 24 - Posicionamento dos nós- Vista Superior- Modelagens 1 e 2



Fonte: Adaptado do modelo elaborado pela aluna de Arquitetura e Urbanismo Camilla R. C. Lima na pesquisa Tectônica e Sustentabilidade na Arquitetura DAU/CT.

Figura 25- Posicionamento dos nós- Vista lateral- Modelagem 1



Fonte: Adaptado do modelo elaborado pela aluna de Arquitetura e Urbanismo Camilla R. C. Lima na pesquisa Tectônica e Sustentabilidade na Arquitetura DAU/CT.

Figura 26- Posicionamento dos nós- Vista lateral- Modelagem 2

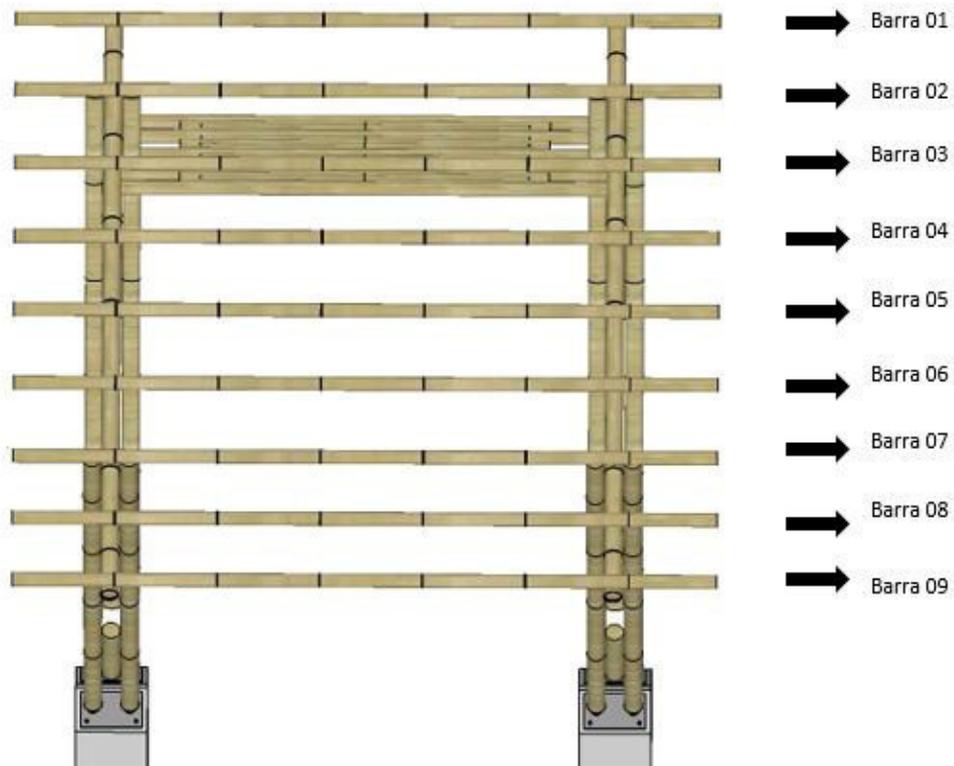


Fonte: Adaptado do modelo elaborado pela aluna de Arquitetura e Urbanismo Camilla R. C. Lima na pesquisa Tectônica e Sustentabilidade na Arquitetura DAU/CT.

#### 4.2.2 Nomeação das barras do modelo

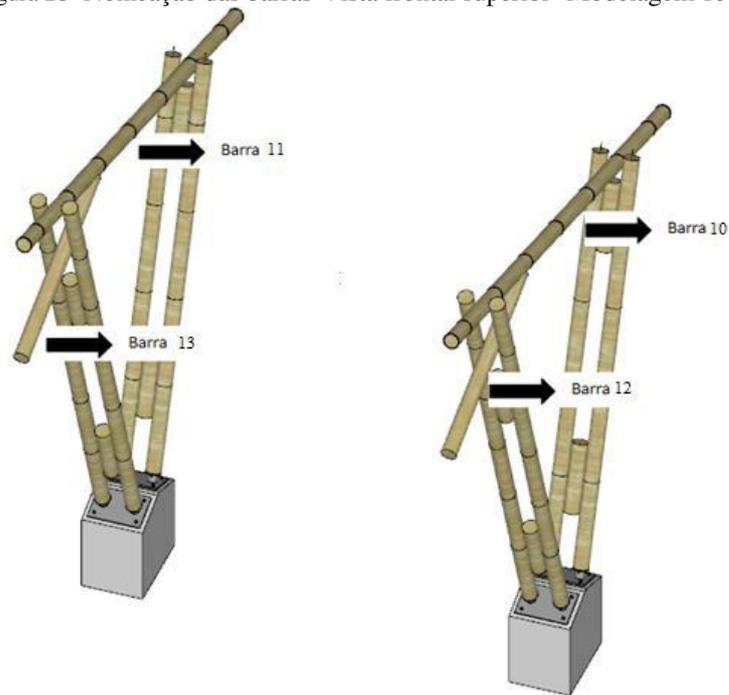
As barras são formadas por muitos nós. Cada barra apresenta não só os nós de cruzamento entre outras barras, mas também, os nós da extremidade livre, que são os que as delimitam verdadeiramente. A nomeação da barras ocorreu do mesmo modo que a dos nós, com a seguinte sequência: de cima para baixo e da esquerda para direita, de acordo com as vistas apresentadas nas figuras 27 a 35.

Figura 27- Nomeação das barras- Vista superior- Modelagem 1 e 2



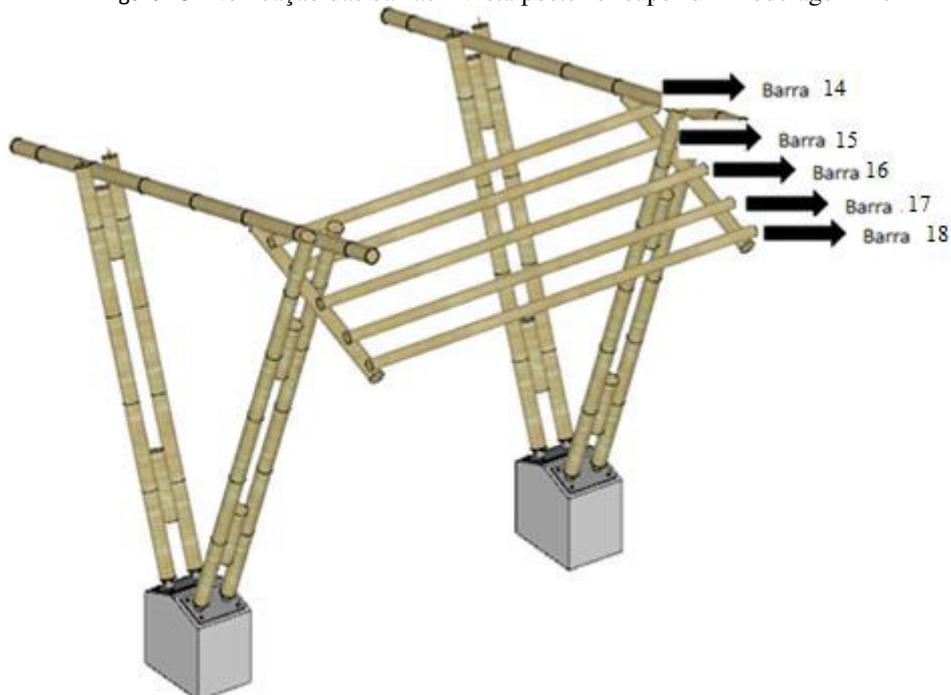
Fonte: Adaptado do modelo elaborado pela aluna de Arquitetura e Urbanismo Camilla R. C. Lima na pesquisa Tectônica e Sustentabilidade na Arquitetura DAU/CT.

Figura 28- Nomeação das barras-Vista frontal superior- Modelagem 1 e 2



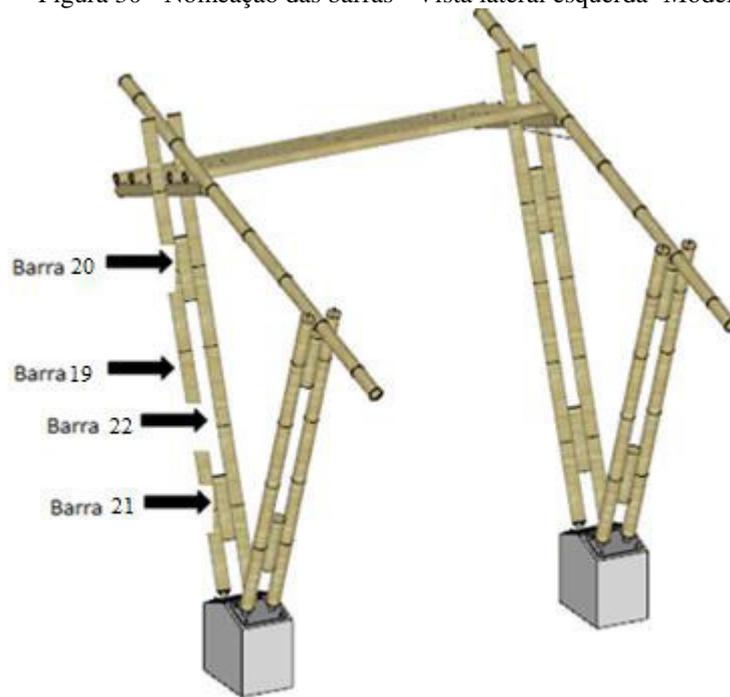
Fonte: Adaptado do modelo elaborado pela aluna de Arquitetura e Urbanismo Camilla R. C. Lima na pesquisa Tectônica e Sustentabilidade na Arquitetura DAU/CT.

Figura 29- Nomeação das barras - Vista posterior superior- Modelagem 1 e 2



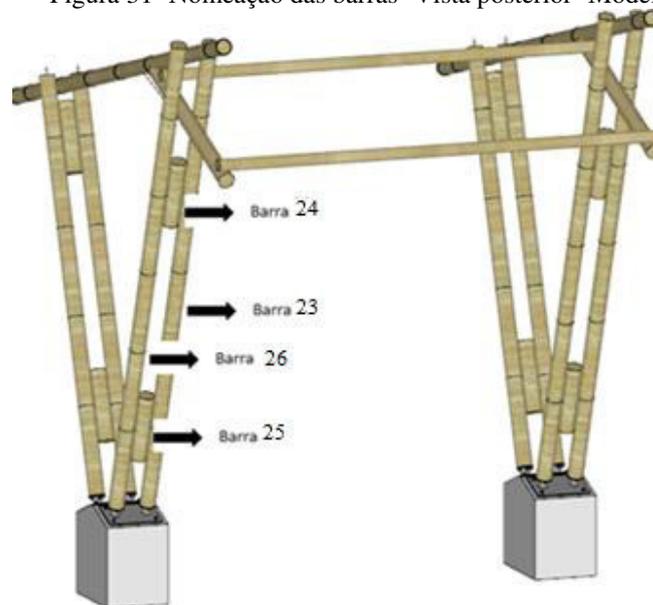
Fonte: Adaptado do modelo elaborado pela aluna de Arquitetura e Urbanismo Camilla R. C. Lima na pesquisa Tectônica e Sustentabilidade na Arquitetura DAU/CT.

Figura 30 - Nomeação das barras - Vista lateral esquerda- Modelagem 1



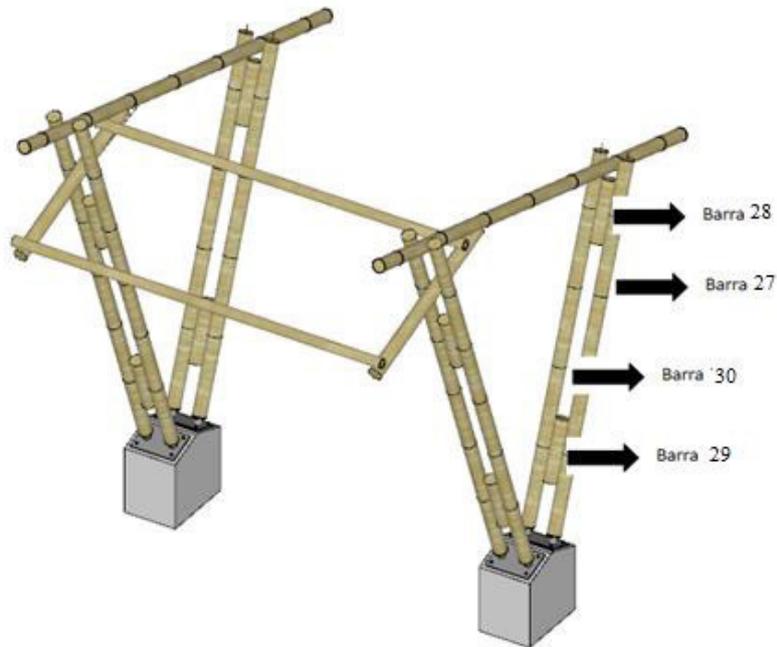
Fonte: Adaptado do modelo elaborado pela aluna de Arquitetura e Urbanismo Camilla R. C. Lima na pesquisa Tectônica e Sustentabilidade na Arquitetura DAU/CT.

Figura 31- Nomeação das barras- Vista posterior- Modelagem 1



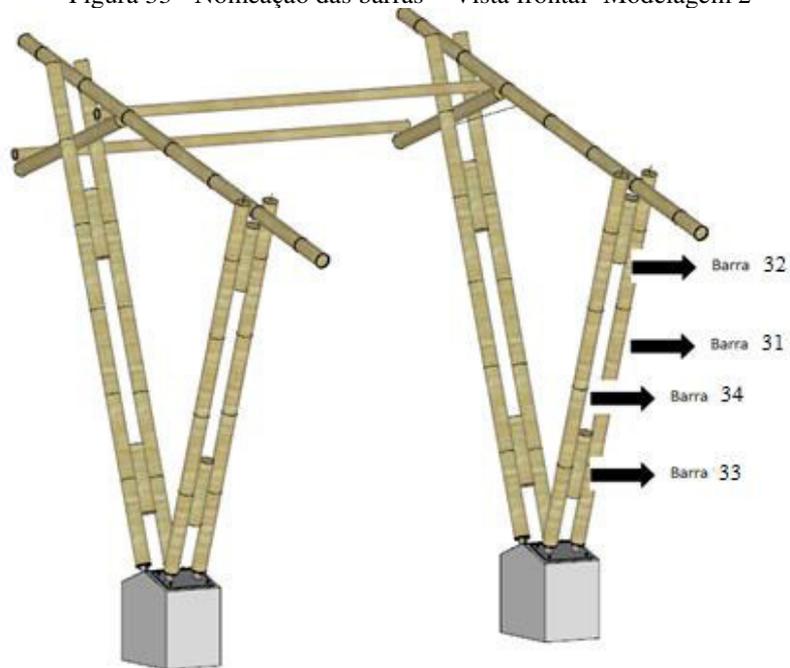
Fonte: Adaptado do modelo elaborado pela aluna de Arquitetura e Urbanismo Camilla R. C. Lima na pesquisa Tectônica e Sustentabilidade na Arquitetura DAU/CT.

Figura 32 - Nomeação das barras - Vista posterior esquerda- Modelagem 1



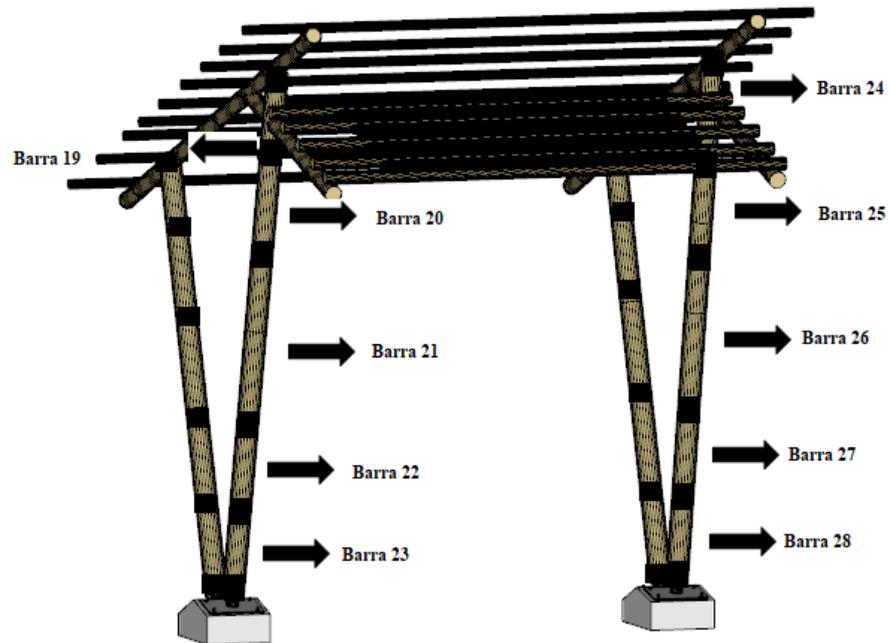
Fonte: Adaptado do modelo elaborado pela aluna de Arquitetura e Urbanismo Camilla R. C. Lima na pesquisa Tectônica e Sustentabilidade na Arquitetura DAU/CT.

Figura 33 - Nomeação das barras - Vista frontal- Modelagem 2



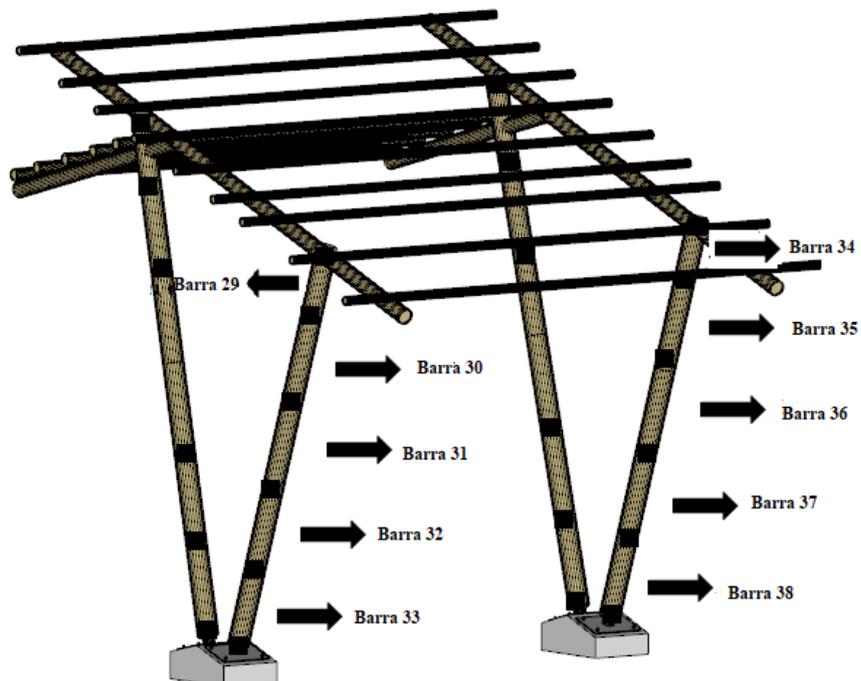
Fonte: Adaptado do modelo elaborado pela aluna de Arquitetura e Urbanismo Camilla R. C. Lima na pesquisa Tectônica e Sustentabilidade na Arquitetura DAU/CT.

Figura 34- Nomeação das barras-Vista posterior- Modelagem 2



Fonte: Adaptado do Modelo elaborado pela aluna de Arquitetura e Urbanismo Camilla R. C. Lima na pesquisa Tectônica e Sustentabilidade na Arquitetura DAU/CT.

Figura 35 - Nomeação das barras - Vista posterior - Modelagem 2



Fonte: Adaptado do Modelo elaborado pela aluna de Arquitetura e Urbanismo Camilla R. C. Lima na pesquisa Tectônica e Sustentabilidade na Arquitetura DAU/CT.

### 4.2.3 Aferição das medidas de projeto

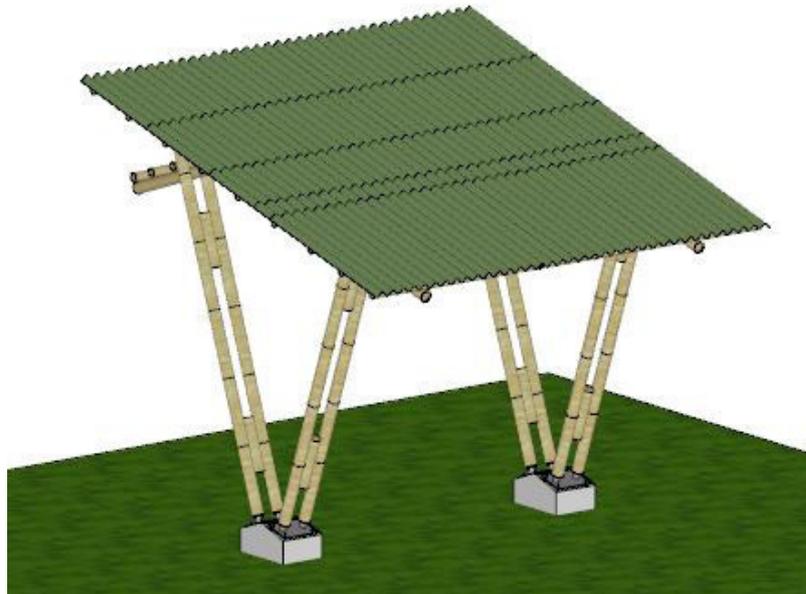
O projeto do gazebo de Bambu foi concebido pelos alunos de arquitetura e urbanismo da UFPB que fazem parte do grupo de pesquisa Tectônica e Sustentabilidade na Arquitetura, coordenado pela professora Germana Rocha do DAU/CT/UFPB. O modelo apresentado nas figuras 10 a 18 foi produzido no software *Sketchup*, o qual cria desenhos 3D no computador, e serviu como base para a construção do modelo real. Entretanto, por se tratar de um material orgânico, o bambu já apresenta seu próprio comprimento, diâmetro e espessura de parede. Além de que, necessita passar por tratamentos para que possa ser utilizado, deste modo, na maioria das vezes o projeto não coincide, em suas medidas, com a estrutura real, sendo este ajustado para a realidade de campo. Nesse contexto, tornou-se indispensável medir, *in loco*, o tamanho das barras que compõe a estrutura a fim de conseguir os resultados mais precisos possíveis. As figuras 36 e 37 apresentam uma vista lateral da estrutura real construída, e do modelo no Scketchup, respectivamente.

Figura 36 - Gazebo de bambu - Vista lateral.



Fonte: Nery (2018)

Figura 37 - Projeto do Gazebo - Vista Lateral- Modelagem 1



Fonte: Modelo elaborado pela aluna de Arquitetura e Urbanismo Camilla R. C. Lima na pesquisa Tectônica e Sustentabilidade na Arquitetura DAU/CT.

### 4.3 FERRAMENTA COMPUTACIONAL

Para desenvolver este trabalho, foi utilizado o programa computacional *Ansys Mechanical APDL (Ansys Parametric Design Language)* a fim de determinar os modos de vibração da estrutura. Este funciona de maneira que permite ao usuário escrever o seu próprio programa (código computacional), de acordo com o que precisa ser solucionado.

O programa inicia-se pelo comando que entra no pré-processador de criação de modelos. Após isso, há a caracterização do tipo, das propriedades da seção transversal e das especificidades do material em cada conjunto de barra.

#### 4.3.1 Modelagem 1

Todas as barras possuem o formato aproximado de uma barra circular vazada, entretanto foram agrupadas em 7 tipologias distintas de acordo com suas propriedades específicas:

- i. Barras de sustentação do telhado ecológico e da placa solar:

Tabela 1 - Propriedades das barras de sustentação do telhado e placa solar

| Área (m <sup>2</sup> ) | Densidade (kg/m <sup>3</sup> ) | Diâmetro externo (m)  | Diâmetro interno (m)  | Módulo de elasticidade (N/m <sup>2</sup> ) | Momento de inércia no eixo X (mm <sup>4</sup> ) | Momento de inércia no eixo Y (mm <sup>4</sup> ) |
|------------------------|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|--|---|---|
| 2,83x10 <sup>-3</sup>  | 1,95x10 <sup>3</sup>           | 5,00x10 <sup>-2</sup> | 4,00x10 <sup>-2</sup> | 1,33x10 <sup>10</sup>                      | 1,81x10 <sup>-7</sup>                           | 1,81x10 <sup>-7</sup>                           |

Fonte: Elaborada pela autora

ii. Barras de sustentação apenas do telhado ecológico:

Tabela 2 - Propriedades das barras de sustentação apenas do telhado.

| Área (m <sup>2</sup> ) | Densidade (kg/m <sup>3</sup> ) | Diâmetro externo (m)  | Diâmetro interno (m)  | Módulo de elasticidade (N/m <sup>2</sup> ) | Momento de inércia no eixo X (mm <sup>4</sup> ) | Momento de inércia no eixo Y (mm <sup>4</sup> ) |
|------------------------|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|--|---|---|
| 2,83x10 <sup>-3</sup>  | 1,22x10 <sup>3</sup>           | 5,00x10 <sup>-2</sup> | 4,00x10 <sup>-2</sup> | 1,33x10 <sup>10</sup>                      | 1,81x10 <sup>-7</sup>                           | 1,81x10 <sup>-7</sup>                           |

Fonte: Elaborada pela autora

iii. Barras verticais maiores:

Tabela 3- Propriedades verticais maiores.

| Área (m <sup>2</sup> ) | Densidade (kg/m <sup>3</sup> ) | Diâmetro externo (m)  | Diâmetro interno (m)  | Módulo de elasticidade (N/m <sup>2</sup> ) | Momento de inércia no eixo X (m <sup>4</sup> ) | Momento de inércia no eixo Y (m <sup>4</sup> ) |
|------------------------|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|--|--|--|
| 5,14x10 <sup>-3</sup>  | 6,19x10 <sup>2</sup>           | 9,00x10 <sup>-2</sup> | 7,00x10 <sup>-2</sup> | 1,33x10 <sup>10</sup>                      | 2,04x10 <sup>-6</sup>                          | 2,04x10 <sup>-6</sup>                          |

Fonte: Elaborada pela autora

iv. Barras verticais menores:

Tabela 4- Propriedades das barras verticais menores.

| Área (m <sup>2</sup> ) | Densidade (kg/m <sup>3</sup> ) | Diâmetro externo (m)  | Diâmetro interno (m)  | Módulo de elasticidade (N/m <sup>2</sup> ) | Momento de inércia no eixo X (m <sup>4</sup> ) | Momento de inércia no eixo Y (m <sup>4</sup> ) |
|------------------------|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|--|--|--|
| 3,09x10 <sup>-3</sup>  | 6,19x10 <sup>2</sup>           | 7,00x10 <sup>-2</sup> | 5,50x10 <sup>-2</sup> | 1,33x10 <sup>10</sup>                      | 7,29x10 <sup>-7</sup>                          | 7,29x10 <sup>-7</sup>                          |

Fonte: Elaborada pela autora

## v. Barras transversais maiores:

Tabela 5- Propriedades das barras transversais maiores

| Área (m <sup>2</sup> ) | Densidade (kg/m <sup>3</sup> ) | Diâmetro externo (m)  | Diâmetro interno (m)  | Módulo de elasticidade (N/m <sup>2</sup> ) | Momento de inércia no eixo X (m <sup>4</sup> ) | Momento de inércia no eixo Y (m <sup>4</sup> ) |
|------------------------|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|--|--|--|
| $3,09 \times 10^{-3}$  | $6,19 \times 10^2$             | $8,90 \times 10^{-2}$ | $7,00 \times 10^{-2}$ | $1,33 \times 10^{10}$                      | $1,9 \times 10^{-6}$                           | $1,9 \times 10^{-6}$                           |

Fonte: Elaborada pela autora

## vi. Barras transversais menores:

Tabela 6 - Propriedades das barras transversais menores.

| Área (m <sup>2</sup> ) | Densidade (kg/m <sup>3</sup> ) | Diâmetro externo (m)  | Diâmetro interno (m)  | Módulo de elasticidade (N/m <sup>2</sup> ) | Momento de inércia no eixo X (m <sup>4</sup> ) | Momento de inércia no eixo Y (m <sup>4</sup> ) |
|------------------------|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|--|--|--|
| $4,62 \times 10^{-3}$  | $6,19 \times 10^2$             | $8,50 \times 10^{-2}$ | $6,50 \times 10^{-2}$ | $1,33 \times 10^{10}$                      | $1,69 \times 10^{-6}$                          | $1,69 \times 10^{-6}$                          |

Fonte: Elaborada pela autora

## vii. Barras de sustentação do telhado de Bambu:

Tabela 7- Propriedades das barras de sustentação do telhado de Bambu

| Área (m <sup>2</sup> ) | Densidade (kg/m <sup>3</sup> ) | Diâmetro externo (m)  | Diâmetro interno (m)  | Módulo de elasticidade (N/m <sup>2</sup> ) | Momento de inércia no eixo X (m <sup>4</sup> ) | Momento de inércia no eixo Y (m <sup>4</sup> ) |
|------------------------|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|--|--|--|
| $3,09 \times 10^{-3}$  | $1,24 \times 10^3$             | $7,00 \times 10^{-2}$ | $5,50 \times 10^{-2}$ | $1,33 \times 10^{10}$                      | $7,29 \times 10^{-7}$                          | $7,29 \times 10^{-7}$                          |

Fonte: Elaborada pela autora

Após a definição dos conjuntos de barras, descrevem-se os apoios que restringem parcialmente deslocamentos ou rotações, apoios elásticos. Sua descrição é feita com uma constante experimental, a qual define o coeficiente de rigidez do apoio elástico. A hipótese do apoio elástico foi utilizada nos nós das barras verticais maiores que se ligam ao chão do

gazebo. Isso porque adotou-se a teoria de que estes só tinham uma parte parcial das rotações restritos.

Outro ponto em que foi necessário o uso de um apoio elástico foi a junção das barras verticais menores com as barras verticais maiores e na ligação entre as barras verticais maiores e as barras transversais do telhado, já que esses lugares não estavam nem totalmente livre e nem totalmente preso. A constante de rigidez usada nessas conexões, entretanto, foi um quarto do valor utilizado nas anteriormente, por se tratar, de ligações com maior liberdade. Finalizada esta etapa de caracterização, tem início a fase de mapeamento dos nós para formação das barras.

Os nós são projetados a partir das coordenadas nos eixos X, Y e Z dos seus pontos em relação a um referencial adotado inicialmente. Para isso, utilizou-se do *software Sketchup*, que continha o projeto arquitetônico modificado para as dimensões reais. Com o esboço do gazebo, foi possível medir a distância em X, Y e Z do ponto do nó até o referencial adotado. Após medir as coordenadas dos nós, unem-se os pontos na formação das barras e configuram-se as barras para adquirir as particularidades definidas no início. Para finalizar, definem-se as condições de contorno para, então, determinar a análise que se deseja fazer e o programa gera os resultados necessários a pesquisa.

### **4.3.2 Modelagem 2**

Assim como na modelagem 1, todas as barras possuem o formato aproximado de uma barra circular vazada e foram agrupadas em 7 tipologias distintas, das quais, 5 eram idênticas as da modelagem 1: i, ii, v,vi e vii. As barras iii e iv, entretanto, foram modificadas a fim de representarem melhor o comportamento do gazebo em relação a análise modal.

Desse modo, as barras verticais maiores (ii) tornaram-se as barras compostas verticais maiores (barras tipo 1), que apresenta características de união das duas barras verticais maiores presentes na modelagem 1. Sendo assim, propriedades como a área e o momento de inércia, por exemplo, dessas novas barras são agora representados como uma associação das outras duas barras.

A mesma coisa aconteceu para as barras verticais menores (iii), cujas transformações resultaram nas barras compostas verticais maiores e menores (barras tipo 2). Nessas barras

novas também foram associadas as propriedades das barras verticais maiores e da barra vertical menor. As tabelas 8 e 9 caracterizam essas novas barras.

Tabela 8- Propriedades das barras do tipo 1

| Área (m <sup>2</sup> ) | Densidade (kg/m <sup>3</sup> ) | Diâmetro externo (m)  | Diâmetro interno (m) | Módulo de elasticidade (N/m <sup>2</sup> ) | Momento de inercia no eixo X (m <sup>4</sup> ) | Momento de inércia no eixo Y (m <sup>4</sup> ) |
|------------------------|--------------------------------|-----------------------|----------------------|--|--|--|
| $6,18 \times 10^{-3}$  | $1,24 \times 10^3$             | $7,00 \times 10^{-2}$ | $5,5 \times 10^{-2}$ | $1,33 \times 10^{10}$                      | $4,08 \times 10^{-6}$                          | $2,49 \times 10^{-5}$                          |

Fonte: Elaborada pela autora

Tabela 9- Propriedades das barras do tipo 2

| Área (m <sup>2</sup> ) | Densidade (kg/m <sup>3</sup> ) | Diâmetro externo (m)   | Diâmetro interno (m)  | Módulo de elasticidade (N/m <sup>2</sup> ) | Momento de inercia no eixo X (m <sup>4</sup> ) | Momento de inércia no eixo Y (m <sup>4</sup> ) |
|------------------------|--------------------------------|------------------------|-----------------------|--|--|--|
| $1,13 \times 10^{-3}$  | $1,24 \times 10^3$             | $11,60 \times 10^{-2}$ | $8,59 \times 10^{-2}$ | $1,33 \times 10^{10}$                      | $4,81 \times 10^{-6}$                          | $7,06 \times 10^{-5}$                          |

Fonte: Elaborada pela autora

Após a definição dos conjuntos de barras, foi feito o mesmo procedimento da modelagem 1 para a criação dos nós. Em seguida, definem-se as barras que são compostas por 2 nós consecutivos e configura para que elas tenham as características definidas no início. Para concluir, é determinada as condições de contorno da modelagem 2 e após isso, propõe a análise que se deseja obter e averigua a coerências dos resultados obtidos.

## 5 MODELO NUMÉRICO

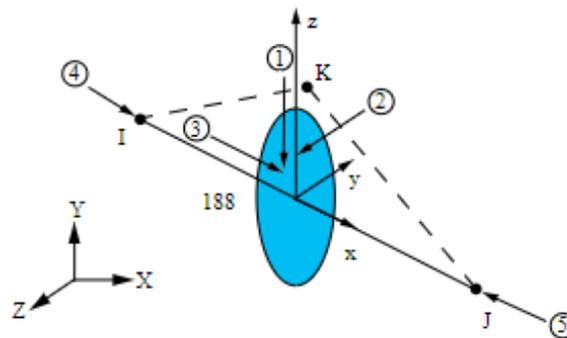
Modelo analítico utilizado para representar matematicamente a estrutura que está sendo analisada. Este modelo incorpora todas as teorias e hipóteses elaboradas para descrever o comportamento da estrutura em diversas solicitações. (MARTHA, 2010)

Na pesquisa em questão foram criados duas modelagens diferentes, na qual a primeira representava a geometria igual à do gazebo real e a segunda apresentava uma simplificação da geometria do gazebo real.

## 5.1 MODELAGEM 1

O modelo numérico 1 foi definido com o objetivo de assemelhar-se o máximo possível com a estrutura real observada no gazebo. Assim sendo, as 7 tipologias de barras foram classificadas como um elemento de viga (BEAM188) baseado na teoria do feixe de Timoshenko, que inclui efeitos de cisalhamento-deformação, fornece opções para distorção irrestrita e distorção contida de seções transversais. O elemento considerado possui ainda seis ou sete graus de liberdade em cada nó que inclui rotação e translação em relação aos eixos X,Y e Z. A viga é composta por dois nós que podem ser lineares, quadráticos ou cúbicos em 3-D.

Figura 38- Geometria do elemento BEAM18



Fonte: Ansys APDL

O formato da seção transversal das barras foi definido como um círculo vazado (CTUBE) e a depender da tipologia foi estabelecido seu diâmetro externo e interno. Ainda foi informado a área, módulo de elasticidade e densidade de acordo com a caracterização da barra.

Figura 39- Formato da seção transversal

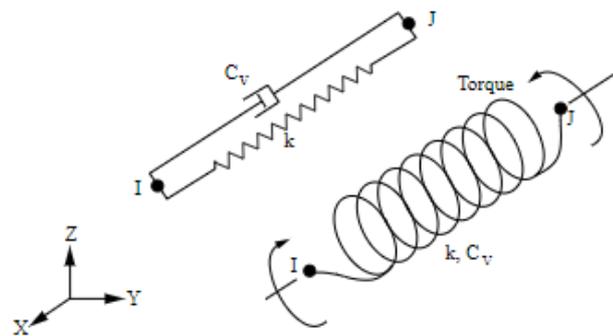


Fonte: Ansys APDL

Os nós, como já mencionado, foram introduzidos através das coordenadas geográficas nos eixos X, Y e Z. E as barras foram formadas a partir da união de 2 nós.

Foram definidos ainda os apoios elásticos (COMBIN14) que são elementos que possuem capacidade longitudinal ou de torção em aplicações 1-D, 2-D ou 3-D. A opção mola-amortecedor longitudinal é um elemento de compressão-tensão uniaxial com até três graus de liberdade em cada nó: translações nas direções nodais  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Nenhuma flexão ou torção é considerada. A opção de amortecedor de mola e torção é um elemento puramente rotacional com três graus de liberdade em cada nó: rotações em torno dos eixos nodais  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Nenhuma carga de flexão ou axial é considerada. Além do elemento amortecedor de mola não ter massa.

Figura 40- Geometria do COMBIN14



Fonte: Ansys APDL

Este elemento foi utilizado em 3 situações. A primeira delas foi nó inferior das barras verticais maiores, pois foi admitida a hipótese que as ligações ali presentes não restringiam totalmente as rotações. A constante adotada para essa situação foi de  $1 \times 10^8$  Nm/rad.

Figura 41- Apoio das barras verticais



Fonte: Nery (2018)

Outra situação, em que se tornou indispensável a utilização deste elemento foi na junção entre as barras verticais maiores e as barras verticais menores (Figura 42). As últimas foram parafusadas nas primeiras, portanto, nas ligações entre elas não havia restrição total de deslocamento ou rotação. A constante empregada aqui, entretanto, possuía um quarto do valor da constante usada nos nós inferior das barras verticais maiores, isso porquê supôs que a ligação presente aqui era muito mais flexível. Sendo assim, as constantes foram  $2,5 \times 10^8$  Nm/rad e  $2,5 \times 10^8$  N/m.

Figura 42- Ligação entre barras verticais maiores e barras verticais menores



Fonte: Nery (2018)

Houve ainda a necessidade de considerar um apoio elástico na união entre as barras transversais maiores e as barras verticais maiores, bem como entre as barras transversais menores e as barras verticais maiores. Isso ocorreu devido ao fato de que neste ponto, assim como o ilustrado pela Figuras 43 e 44, as ligações são parafusadas e por isso como dito anteriormente não é restrita por completo em termos de deslocamento e rotações. Por se tratar de uma situação semelhante ao das barras verticais maiores e menores, o valor da constante adotado foi o mesmo.

Figura 43- Ligações entre barras verticais maiores e barras transversais- Vista lateral



Fonte: Nery (2018)

Figura 44 - Ligações entre barras verticais maiores e barras transversais- Vista inferior



Fonte: Nery (2018)

Por último, foram definidas as condições de contorno. A hipótese adotada foi a de que os nós das barras verticais maiores estavam presos em todas as direções.

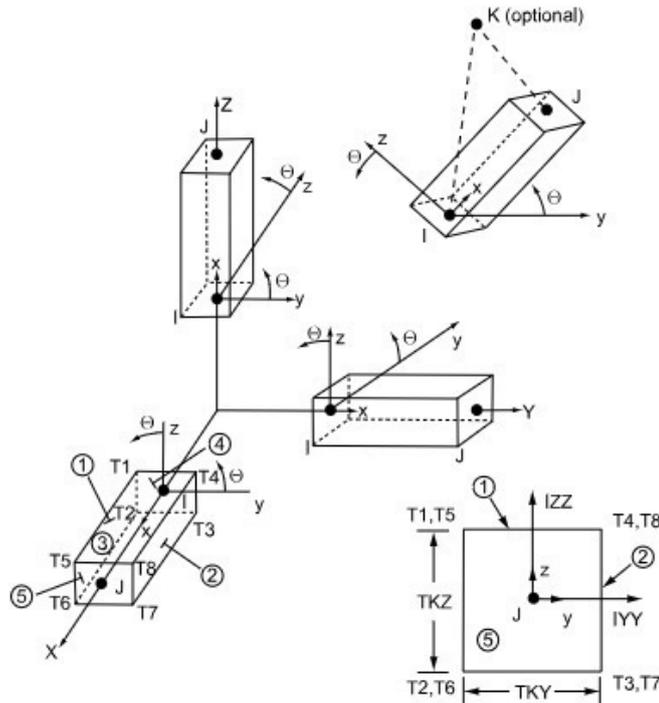
## 5.2 MODELAGEM 2

O modelo numérico 2 foi proposto para assemelhar-se o máximo possível das configurações deformadas que se esperam para o gazebo real. Assim sendo, as barras descritas neste modelo e coincidentes com a da modelagem 1 continuam caracterizadas como elementos de vigas (BEAM188) baseado na teoria do feixe de Timoshenko, como explicado no item 5.1.

A mudança dessa modelagem para a anterior encontra-se justamente nas barras verticais que agora são classificadas como um elemento de viga uniaxial (BEAM4) com capacidades de tensão, compressão, torção e flexão. O elemento possui seis graus de liberdade em cada nó: translações nas direções nodais X, Y e Z e rotações sobre os eixos nodais X, Y e Z. Além de apresentar enrijecimento por tensão e grandes capacidades de deflexão. Nessa modelagem, o uso do elemento BEAM4 se adequa melhor às barras verticais, pois este permite a indicação de características particulares da seção transversal, tais como, área e momento de inércia em relação aos eixos X e Y. A inserção das propriedades específicas da

seção é importante para a modelagem porque a barra agora é junção de outras 2 ou 3 barras dependendo da sua posição. A Figura 45 representa a geometria do elemento.

Figura 45- Geometria do elemento BEAM4



Fonte: Ansys APDL

Os nós, como mencionado, foram introduzidos através das coordenadas geográficas nos eixos X, Y e Z. E as barras foram formadas a partir da união de 2 nós. A barra vertical única na geometria da modelagem 2 foi dividida em 5 partes como mostram as figuras 7 e 8 e está representando a união das barras verticais maiores e as menores da modelagem 1. As barras 20, 22, 25, 27, 30, 32, 35 e 37 das figuras 34 e 35 são uma composição das propriedades das duas barras verticais maiores e da barra vertical menor da modelagem 1, enquanto que as barras 20, 21, 23, 24, 26, 28, 29, 31, 33, 34, 36 e 38 das figuras 34 e 35 representam a união apenas das propriedades das duas barras verticais maiores. Foi necessário a utilização da divisão nesses dois tipos de barra devido ao fato de que no lugar onde havia três barras juntas (Figura 42) proporciona a estrutura uma maior rigidez do que onde havia apenas as duas barras verticais.

Para finalizar, nessa modelagem foram incluídas as condições de contorno, que assim como na modelagem 1, a hipótese adotada foi de que os nós das barras verticais maiores estavam presos em todas as direções.

## 6 RESULTADOS

### 6.1 PROPRIEDADES

#### 6.1.1 Densidade

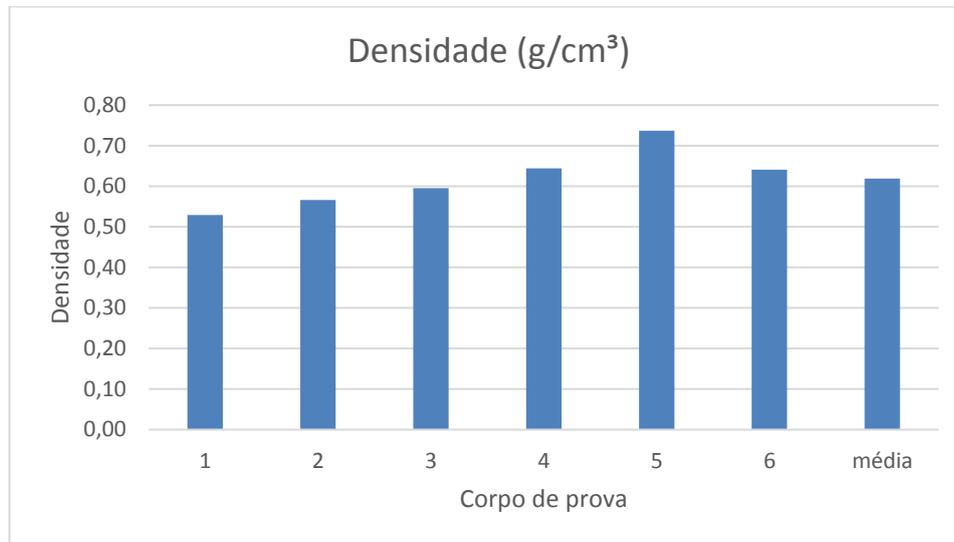
O resultado da densidade obtida pelo ensaio nos corpos de prova está escrito na tabela 10 e representado pelo gráfico da Figura 46. O projeto de Norma para Estrutura de Bambu recomenda utilizar a média aritmética dos resultados obtidos a partir das peças de teste individuais. Desse modo, a densidade utilizada para as barras do modelo estrutural foi a média das amostras.

Tabela 10- Resultado do ensaio de densidade

| Corpo de prova | Massa(g) | Largura (mm) | Altura(mm) | Espessura (mm) | Volume (cm <sup>3</sup> ) | Densidade (g/cm <sup>3</sup> ) |
|----------------|----------|--------------|------------|----------------|---------------------------|--------------------------------|
| 1              | 2,4      | 28           | 27         | 6              | 4,536                     | 0,53                           |
| 2              | 2,3      | 28           | 29         | 5              | 4,06                      | 0,57                           |
| 3              | 2        | 28           | 24         | 5              | 3,36                      | 0,60                           |
| 4              | 1,7      | 24           | 22         | 5              | 2,64                      | 0,64                           |
| 5              | 2,3      | 24           | 26         | 5              | 3,12                      | 0,74                           |
| 6              | 2        | 26           | 24         | 5              | 3,12                      | 0,64                           |
| média          | 2,12     | 26,33        | 25,33      | 5,17           | 3,47                      | 0,62                           |

Fonte: Elaborada pela autora

Figura 46- Densidade dos corpos de prova



Fonte: Elaborada pela autora

#### 6.1.1.1 Telha Ecológica

A telha ecológica utilizada foi a Onduline que segundo às informações do fabricante apresentava como dimensão de área da telha 2,00 x 0,95 m com espessura de 3 mm e peso por telha de 3,4 kg. O telhado apresenta 6 telhas de cobertura. A partir desses dados, foi possível obter a densidade do telhado. A Tabela 11 representa as informações para o cálculo da densidade e a Figura 47 ilustra o telhado ecológico do gazebo.

Tabela 11- Cálculo da densidade do telhado.

| Peso por telha (kg) | Dimensão da telha (m <sup>2</sup> ) | Quantidade de telhas | Peso total do telhado (Kg) | Espessura da telha (m) | Densidade da telha ecológica (kg/m <sup>3</sup> ) |
|---------------------|-------------------------------------|----------------------|----------------------------|------------------------|---|
| 3,4                 | 1,9                                 | 6                    | 20,4                       | 0,003                  | 596,49  |

Fonte: Elaborada pela autora

Figura 47- Telhado ecológico do gazebo.



Fonte: Nery (2018)

Feito isso, somou-se a densidade do telhado com a densidade do bambu e colocou a densidade total nas configurações do *software* nas barras que estavam sob o telhado e recebendo carga do mesmo.

#### 6.1.1.2 Placa Solar

O mesmo procedimento utilizado para a telha ecológica foi adotado para a placa solar. Conforme as especificações do fabricante, a placa solar é do tipo Isofoton Policristalino de 70W com dimensões e peso representados na Tabela 12.

Tabela 12- Cálculo da densidade da placa solar.

| <b>Peso (kg)</b> | <b>Espessura (mm)</b> | <b>Altura (mm)</b> | <b>Largura (mm)</b> | <b>Densidade (kg/m<sup>3</sup>)</b> |
|------------------|-----------------------|--------------------|---------------------|-------------------------------------|
| 10               | 25                    | 805                | 675                 | $7,36 \times 10^2$                  |

Fonte: Elaborada pela autora

A partir dessas informações, adicionou-se a densidade da telha ecológica, com a da placa solar e o dos próprios bambus que se localizavam abaixo das demais e, portanto, recebiam essa carga extra. A figura 48 retrata a placa solar e as barras que recebem o seu peso.

Figura 48- Placa solar do gazebo



Fonte: Nery (2018)

#### 6.1.1.3 Telhado de bambu

O telhado de Bambu, diferente do telhado ecológico e a placa solar, teve sua densidade calculada somando o peso das barras do telhado que não eram estruturais com o peso das barras estruturais e dividindo este valor pelo volume das barras estruturais. Para chegar no procedimento citado, primeiro foi descoberto o volume das barras que não eram estruturais e multiplicado pela densidade obtida no ensaio para a determinação do peso extra que estaria sob as barras estruturais. A Tabela 13 transcreve o processo.

Tabela 13- Cálculo do peso total sobre as barras do telhado

|                    | Qtde. | Área<br>(m <sup>2</sup> ) | Comprimento<br>(m) | Volume<br>(m <sup>3</sup> ) | Densidade<br>do bambu<br>obtida no<br>ensaio<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Peso total<br>(kg) |
|--------------------|-------|---------------------------|--------------------|-----------------------------|--|--------------------|
| Barras maiores     | 8,00  | 5,03x<br>10 <sup>-3</sup> | 1,80               | 9,05x<br>10 <sup>-3</sup>   | 6,19x10 <sup>2</sup>   | 44,79              |
| Barras menores     | 6,00  | 5,03x<br>10 <sup>-3</sup> | 1,60               | 8,04x<br>10 <sup>-3</sup>   | 6,19x10 <sup>2</sup>   | 29,86              |
| Conjunto de barras | 14,00 |                           |                    |                             |  | 74,65              |

Fonte: Elaborada pela autora

Desta forma, possuindo o valor de massa total sobre as barras estruturais, foi somado essa massa com o valor das massas das barras estruturais e dividida pelo volume das barras estruturais, chegando ao valor das novas densidades. A Tabela 14 demonstra o cálculo e as figuras 49 e 50 representam um esquema mostrando as barras estruturais e não estruturais consideradas no telhado de bambu.

Tabela 14- Cálculo da nova densidade das barras estruturais

| Volume(m <sup>3</sup> ) | Densidade<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Peso das<br>próprias<br>barras<br>(kg) | Peso das<br>barras não<br>estrutural<br>(kg) | Peso total<br>(kg)   | Nova<br>densidade<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
|-------------------------|-----------------------------------|--|--|----------------------|---|
| 3,93x10 <sup>-2</sup>   | 618,84                            | 2,43x10 <sup>-1</sup>                  | 74,65  | 9,90x10 <sup>1</sup> | 2,52x10 <sup>-3</sup>                     |

Fonte: Elaborada pela autora

Figura 49- Esquema das barras estruturais e não estruturais



Fonte: Nery (2018)

Figura 50- Telhado de bambu



Fonte: Nery (2018)

### 6.1.1 Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade, como citado anteriormente, foi calculado através de ensaios feitos no laboratório de duas amostras de bambu com características e diâmetros diferentes. No experimento foram acompanhados o valor da força aplicada e o deslocamento gerado para cada quantia. A partir destes dados, geraram-se dois gráficos de módulo de elasticidade relativos a cada uma das amostras utilizadas.

Observou-se um grande achatamento no diâmetro das amostras, de modo que suportaram uma carga maior do que a esperada. Além disso, notou-se que não houve uma ruptura brusca de nenhuma das amostras consideradas, o que leva a concluir que o material diferentemente do concreto é bastante elástico deformando-se o máximo possível até romper.

Nos ensaios de flexão, a força é sempre aplicada na região média do corpo de prova e se distribui uniformemente pelo corpo. Na fórmula para calcular o momento fletor, considera-

se a metade do valor da força e a metade do comprimento útil do corpo de prova. De acordo com a equação 3:

$$M_f = \frac{FL}{4} \quad (3)$$

Onde:

M<sub>f</sub>= Momento Fletor

F= Força

L= comprimento

Outros elementos necessários para obtenção do resultado são o momento de inércia e o módulo de resistência da seção transversal, representado convencionalmente pela letra W. O momento de inércia já foi citado e o módulo de resistência a flexão é a característica geométrica da seção de uma viga que se opõe à flexão. O valor deste é conhecido dividindo-se o valor do momento de inércia (J) pela distância da linha neutra à superfície do corpo de prova (c). Nos corpos de prova de seção circular, de materiais mais ou menos homogêneos, a distância c equivale à metade do diâmetro. Assim sendo:

$$W = \frac{J}{R} \quad (4)$$

Onde:

W= módulo de resistência da seção transversal

J= Momento de inércia

R= Raio

Agora sim, já pode-se apresentar a fórmula para o cálculo da tensão de flexão (Eq. 5):

$$TF = \frac{M_f}{W} \quad (5)$$

Após realizado o ensaio para calcular a tensão de flexão, substitui-se as variáveis da fórmula pelas medidas conhecidas. A combinação das expressões anteriores permite trabalhar

diretamente com esses valores. No caso de materiais dúcteis, considera-se a força obtida no limite de elasticidade. Assim sendo, a fórmula para o cálculo do modo de elasticidade é dada pela Eq. 6:

$$E = \frac{1}{48} \times \frac{FL^3}{fxJ} \quad (6)$$

Onde:

E= módulo de elasticidade

F=força no limite elasticidade

L= comprimento da amostra

f= flecha máxima do momento fletor

J= Momento de Inércia

#### 6.1.1.1 Amostra de Bambu 1

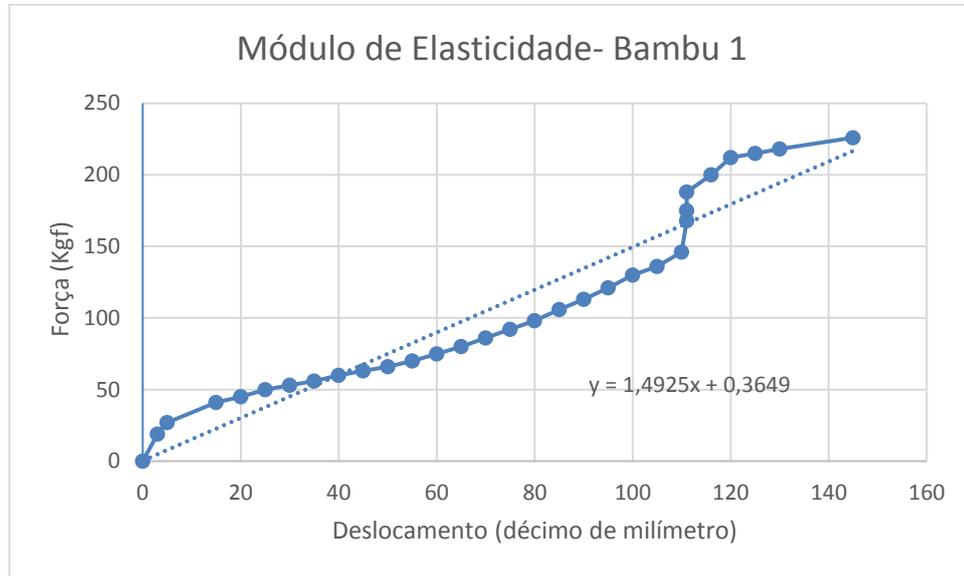
A amostra de Bambu 1 tinha diâmetro externo de 5,2cm e diâmetro interno de 4,7 cm, ou seja, era menor do que a amostra 2 e, portanto, possuía uma área de seção transversal inferior. Por essa razão, suportou uma carga mais baixa, rompendo-se com um peso de 232 Kgf.

É possível perceber ainda que o gráfico 1 (Figura 51) expressa uma constância no deslocamento do bambu entre a aplicação da força de 168 Kgf até 188 Kgf, isto decorre provavelmente de que nesse instante a resistência à compressão se dá pelo achatamento da seção transversal. Deste modo, o deslocamento do relógio transdutor mantém-se parado.

Por fim, nota-se que o gráfico 1, mostrado na Figura 51, não foi representado exatamente por uma reta, isto está atribuído ao fato de que provavelmente o bambu não tenha

comportamento exatamente linear, entretanto para efeito de cálculo é possível aproximar a curva para uma reta como mostra a Figura 51.

Figura 51-Módulo de elasticidades- Bambu 1.



Fonte: Elaborada pela autora

Com base na aproximação do gráfico e nas expressões descritas anteriormente obtém-se o módulo de elasticidade do bambu para utiliza-lo no modelo computacional. Para isso, substituí os números extraídos do ensaio na fórmula de módulo de elasticidade, com isso, temos:

$$E = \frac{1}{48} \times \frac{FL^3}{fxj} = \frac{1 \times (2,2 \times 10^3) \times (5,00 \times 10^{-1})}{48 \times (1,45 \times 10^{-2}) \times (1,19 \times 10^{-7})} = 1,33 \times 10^{10} \text{ N/m}^2 \quad (7)$$

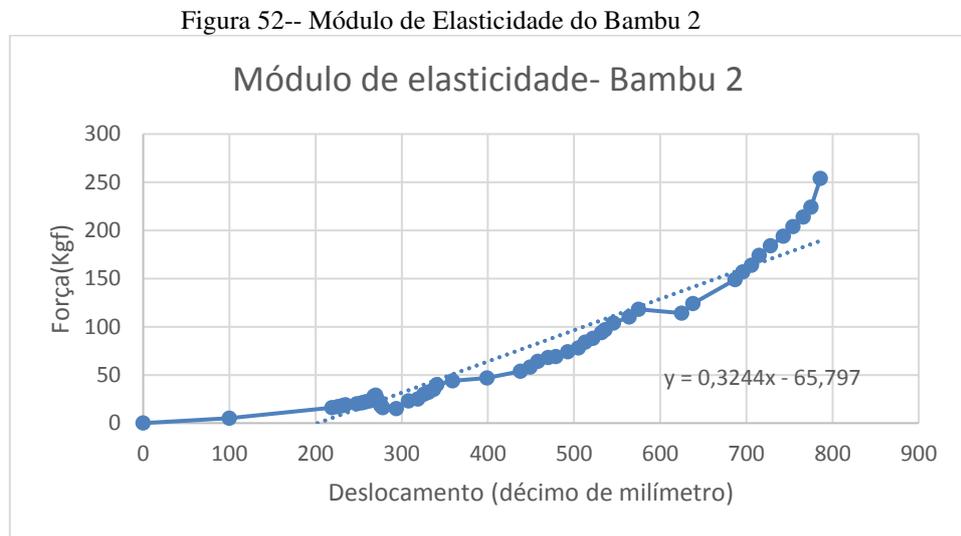
#### 6.1.1.2 Amostra de Bambu 2

A amostra de Bambu 2 possuía diâmetro maior, e consequentemente, tinha uma área de seção transversal superior a amostra anterior. Assim, suportou uma carga mais alta, rompendo-se com um peso de 790 Kgf.

Nota-se que o gráfico 2 apresentado na Figura 52 expressa um decréscimo no deslocamento do bambu entre a aplicação das forças de 272 Kgf até 294 Kgf e 575Kgf até 625Kgf, isso ocorre possivelmente, pois nesse momento houve a ruptura de alguma parte do

mesmo sem haver a ruptura do bambu por completo. Sendo assim, nesse instante ele diminuiu rapidamente o tamanho até a peça voltar a ter resistência e o deslocamento no transdutor voltar a crescer.

Finalmente, observa-se uma curva bem distante da esperada, o gráfico da Figura 52 do bambu no experimento divergiu extremamente de uma reta, isto está atribuído ao fato de erros na medição e imprecisões nos equipamentos, já que se tratou do primeiro ensaio realizado e também de que o material em questão pode não apresentar comportamento linear. Deste modo, os resultados obtidos nesse ensaio foram desprezíveis e não foram utilizados na criação do modelo estrutural.



Fonte: Elaborada pelo autor

## 6.2 ANÁLISE MODAL DO GAZEBO

Considerando o modelo computacional desenvolvido para representar a estrutura de bambu construída, foram introduzidas as propriedades medidas na seção transversal ou através de ensaios experimentais no laboratório, no *software* de análise estrutural

### 6.2.1 Modelagem 1

Ao aplicar a ferramenta de análise modal ao modelo numérico 1, que possuía geometria igual ao gazebo, foi possível identificar diferentes frequências naturais e seus respectivos modos de vibração. Diante das hipóteses adotadas na metodologia e dos n graus

de liberdade que a estrutura possui, obtiveram-se alguns resultados que estão apresentados na Tabela 15 e nas figuras 53 a 55.

Tabela 15- Análise modal do gazebo com o telhado.

| <b>Modo</b> | <b>Frequência(Hz)</b> | <b>Período(s)</b>     |
|-------------|-----------------------|-----------------------|
| 10          | 2,63                  | 0,38                  |
| 11          | 4,84                  | 0,21                  |
| 12          | 5,03                  | 0,20                  |
| 13          | 11,44                 | $0,87 \times 10^{-1}$ |
| 14          | 12,72                 | $0,78 \times 10^{-1}$ |
| 15          | 12,72                 | $0,78 \times 10^{-1}$ |
| 16          | 19,88                 | $0,50 \times 10^{-1}$ |
| 17          | 20,21                 | $0,49 \times 10^{-1}$ |
| 18          | 24,60                 | $0,41 \times 10^{-1}$ |
| 19          | 29,74                 | $0,34 \times 10^{-1}$ |
| 20          | 32,54                 | $0,31 \times 10^{-1}$ |

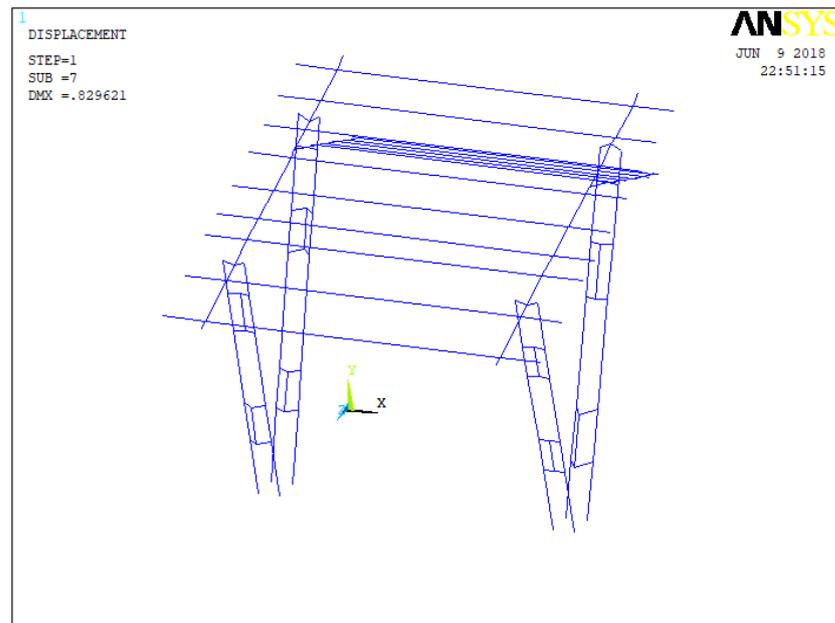
Fonte: Elaborada pelo autor

Para os nove primeiros modos de vibração identificados pelo *software*, diferentemente do esperado, as frequências naturais correspondentes foram nulas, o que equivaleriam a movimento de corpo rígido. Uma vez que as barras verticais menores foram ligadas à estrutura por meio dos apoios elásticos, estas aparecem soltas na geometria e por isso o gazebo apresentou tais frequências. Desse modo, tem-se como concluir que talvez a modelagem com geometria idêntica ao do Gazebo, em que foram considerados todos os elementos não estruturais, não represente adequadamente seu comportamento dinâmico já que na situação real as barras verticais menores estão realmente fixas à estrutura.

É possível observar um grande movimento nas barras verticais menores sem deformação, o que justificaria o aparecimento das frequências nulas, correspondentes a movimentos de corpo rígido (Figura 53). Este movimento ficou bastante visível na animação do modo de vibração correspondente, fornecida pelo *software*.

A primeira frequência natural diferente de zero identificada para o modelo 1 foi de 1,74 Hz, o que pode ser considerada uma frequência baixa e, portanto, facilmente excitada. Tal frequência correspondeu, portanto, ao décimo modo de vibração natural para a modelagem 1 adotada.

Figura 53- Modo de vibração 7

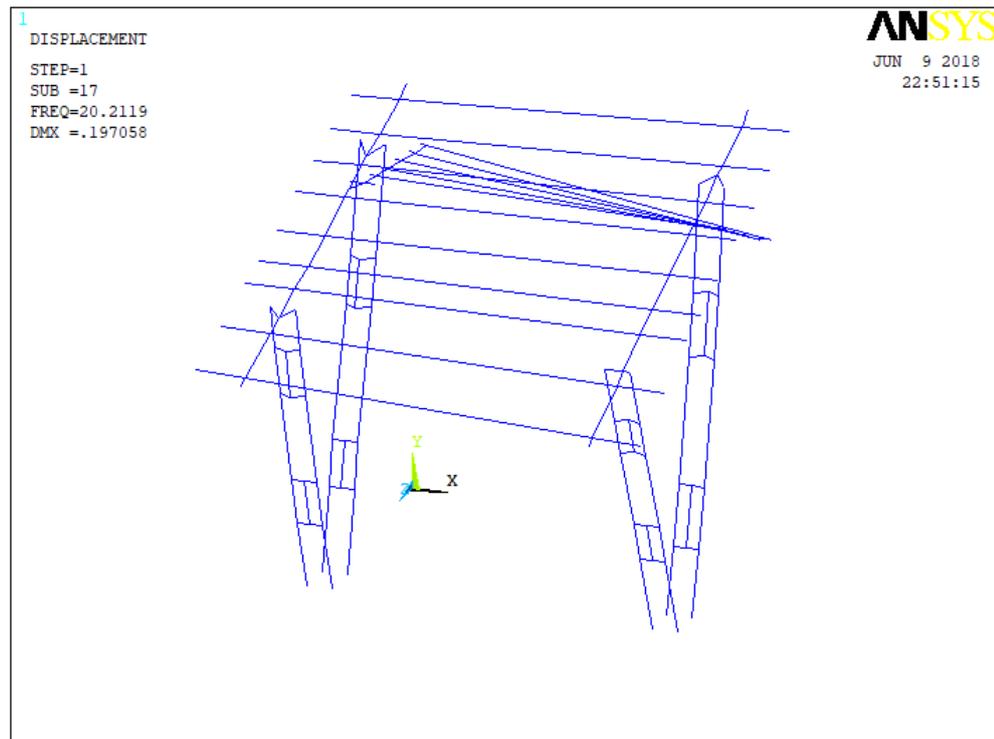


Fonte: Elaborada pelo autor

A partir da Figura 54 foi possível também notar uma grande amplitude e oscilação nas barras que compõe o telhado de bambu. Isso deve ter acontecido provavelmente porque os nós da extremidade estão livres, de modo que, apresentam maior grau de liberdade.

Pode-se observar ainda um movimento com maior amplitude para o conjunto de barras não estruturais (brise) que tinham a função estética e de controle da incidência da luz para garantir um conforto térmico aos usuários do Gazebo. Ao observar a Figura 54, este movimento parece próximo à uma flexo-torção.

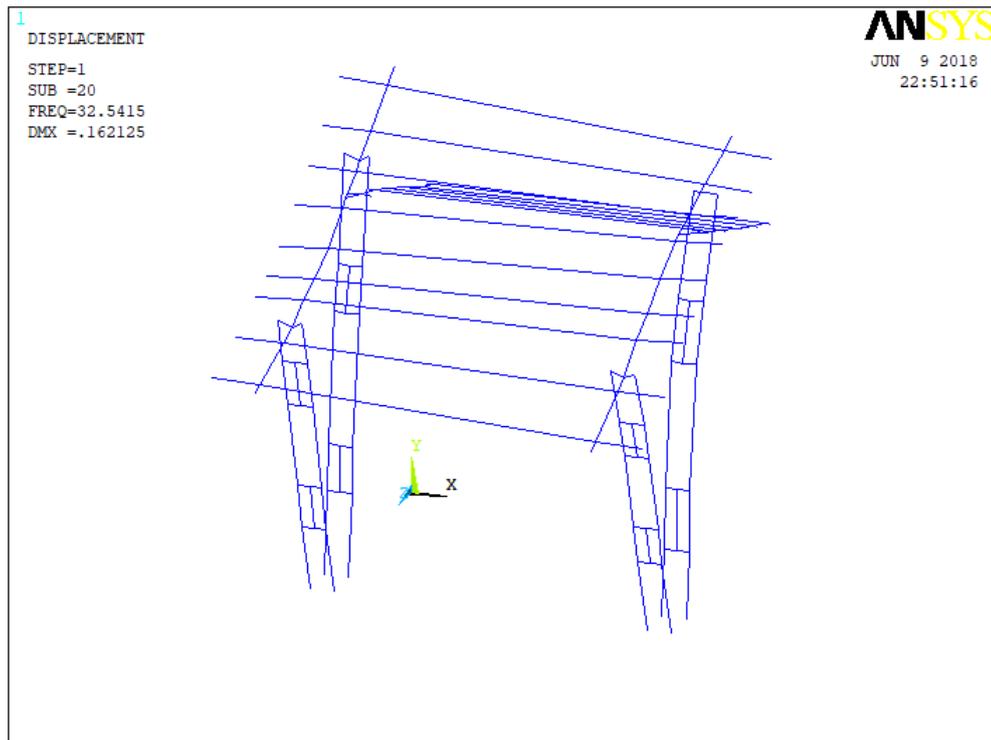
Figura 54- Modo de vibração 17



Fonte: Elaborada pelo autor

Na Figura 55 não é possível observar com muita clareza, mas para a frequência 32,54Hz, que corresponderia ao vigésimo modo de vibração da estrutura, percebeu-se um movimento de flexão dos pilares, juntamente com a flexão e torção dos elementos estruturais do telhado.

Figura 55- Modo de vibração 20



Fonte: Elaborada pelo autor

Na expectativa de representar melhor o comportamento dinâmico dessa estrutura optou-se por conceber uma segunda modelagem (modelagem 2), na qual as propriedades das barras verticais menores juntavam-se às das verticais maiores e eram unidas ao telhado de modo que a estrutura se deslocava como uma só, sem a presença de movimentos de corpo rígido.

### 6.3 MODELAGEM 2

Já ao utilizar o *software* no modelo numérico 2, que possuía geometria diferente do Gazebo, porém comportamento dinâmico semelhante ao esperado real foi possível identificar diferentes frequências naturais e correspondentes modos de vibração. A partir das hipóteses adotadas na metodologia e dos n graus de liberdade que a estrutura possui, obtiveram-se alguns resultados. A Tabela 16 indica as 20 primeiras frequências naturais de vibração identificadas.

Tabela 16 - Análise modal do gazebo com o telhado.

| Modo | Frequência(Hz) | Período(s)             |
|------|----------------|------------------------|
| 1    | 2,21           | 0,45                   |
| 2    | 3,80           | 0,26                   |
| 3    | 4,24           | 0,24                   |
| 4    | 8,61           | 0,11                   |
| 5    | 9,89           | 0,10                   |
| 6    | 9,97           | 0,10                   |
| 7    | 10,25          | $0,97 \times 10^{-1}$  |
| 8    | 13,45          | $0,74 \times 10^{-1}$  |
| 9    | 15,68          | $0,64 \times 10^{-1}$  |
| 10   | 17,27          | $0,58 \times 10^{-1}$  |
| 11   | 18,70          | $0,53 \times 10^{-1}$  |
| 12   | 19,36          | $0,52 \times 10^{-1}$  |
| 13   | 20,08          | $0,50 \times 10^{-1}$  |
| 14   | 22,06          | $0,45 \times 10^{-1}$  |
| 15   | 23,46          | $0,43 \times 10^{-1}$  |
| 16   | 27,21          | $0,37 \times 10^{-1}$  |
| 17   | 27,61          | $0,362 \times 10^{-1}$ |
| 18   | 31,22          | $0,32 \times 10^{-1}$  |
| 19   | 31,77          | $0,31 \times 10^{-1}$  |
| 20   | 35,03          | $0,28 \times 10^{-1}$  |

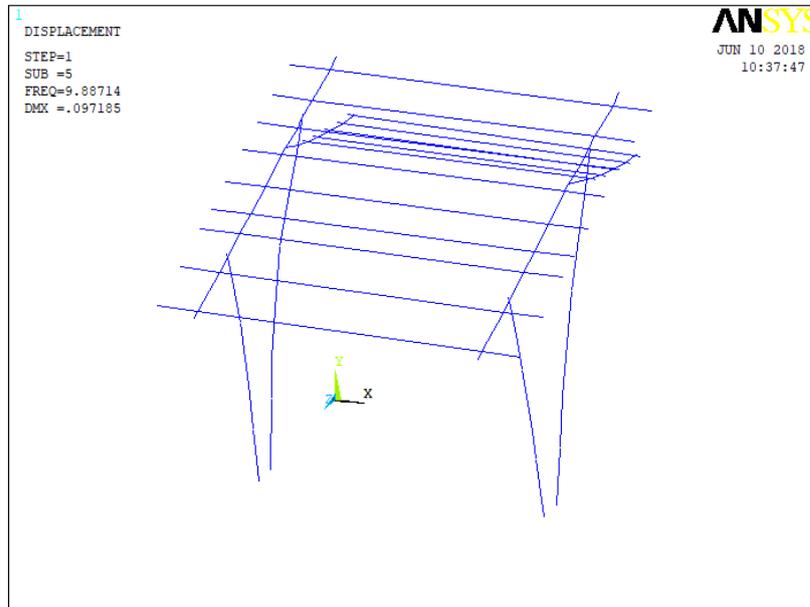
Fonte: Elaborada pela autora

Com os resultados apresentados na Tabela 16, nota-se que para a modelagem 2 o gazebo não mais apresenta frequências de corpo rígido. Nota-se ainda que houve um pequeno aumento nos valores das frequências naturais em relação àqueles identificados para a modelagem 1, o que pode indicar que a partir das considerações feitas na segunda modelagem, a estrutura passou a ser um pouco mais rígida, passando assim a ter frequências naturais um pouco maiores.

Quanto aos modos de vibração, ainda é possível reparar algumas constatações. As figuras 56 a 58 apresentam alguns dos modos de vibração identificados para a modelagem 2. É possível observar que a estrutura se movimenta como um conjunto, e não se percebem barras com movimentos de corpo rígido. A frequência de 9,887Hz, relativa ao 5º modo de vibração, parece corresponder a um modo de flexão dos pilares (no plano YZ) e também do brise (no plano XY). Já o 8º modo de vibração, associado à frequência de 13,456Hz, parece corresponder a um movimento horizontal (no plano XY) da estrutura, indicando predominantemente uma flexão dos pilares.

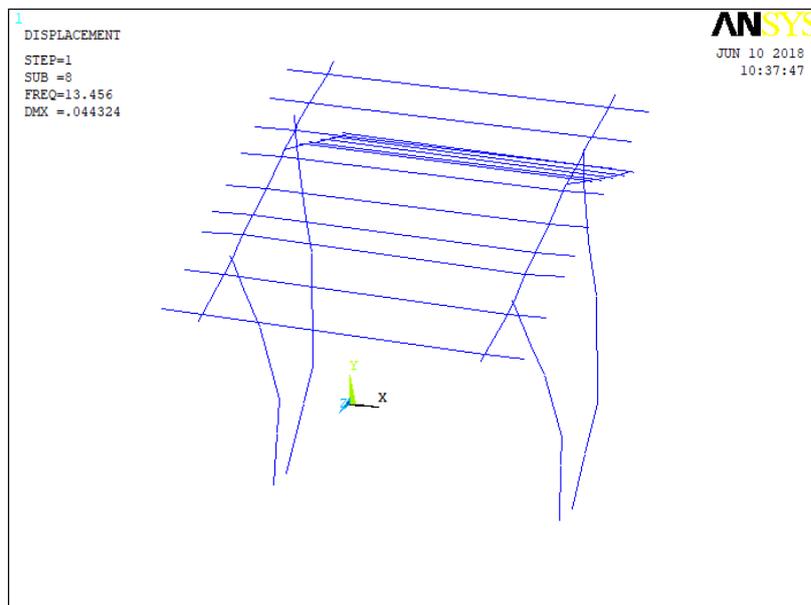
O 11º modo de vibração, correspondente à frequência de 18,697Hz, ilustrado na Figura 58, indica um movimento predominante de flexão dos pilares no plano YZ, além da flexão da estrutura do telhado e torção do brise.

Figura 56- Modo de Vibração 5



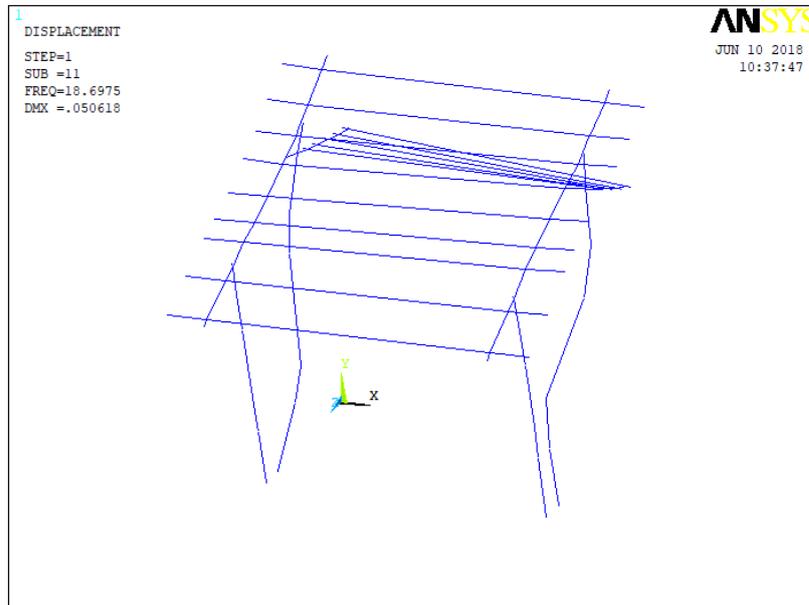
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 577- Modo de Vibração 8



Fonte: Elaborada pelo autor

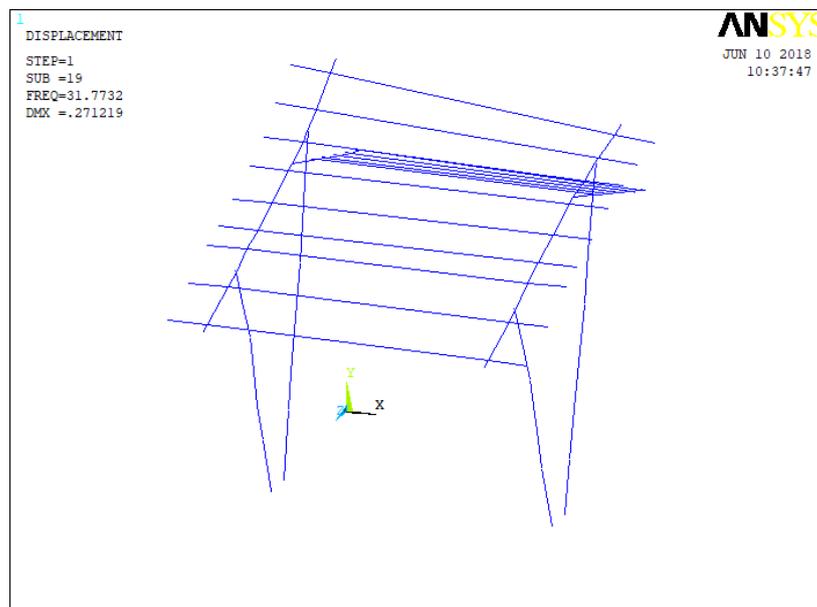
Figura 588- Modo de vibração 11



Fonte: Elaborada pelo autor

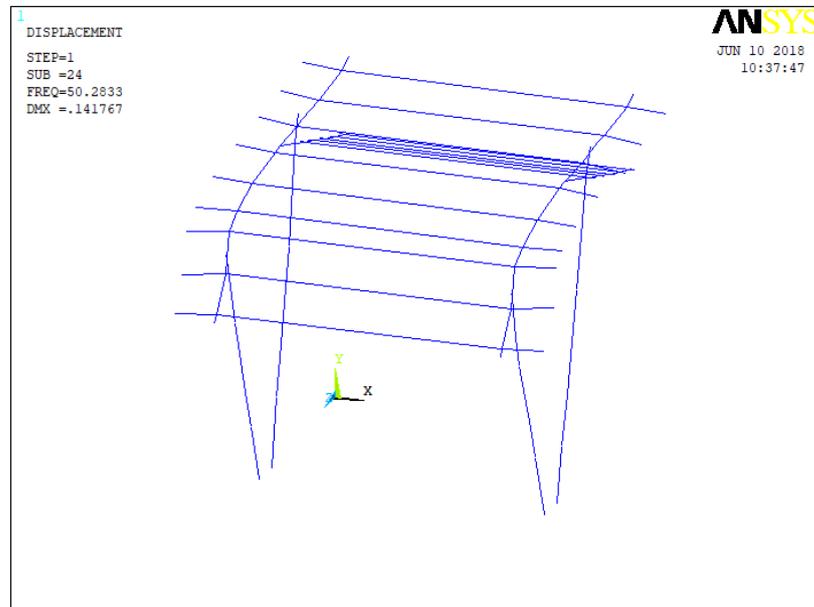
Os modos de vibração seguintes demonstram a deformação das barras sob o telhado ecológico. Sobre isso, nota-se ainda, conforme as figuras 59 e 60, que as barras que estavam suportando não só o peso da cobertura, mas também o peso da placa solar, barras 2, 3, 4, 5 e 6 da Figura 27, oscilam menos. Isso porque a frequência é inversamente proporcional à massa e estas suportam mais massa. Já na Figura 60 é apresentado o 24º modo de vibração, correspondente à frequência natural de 50,283Hz. Neste modo observa-se um movimento com amplitude maior para o telhado, principalmente no que diz respeito à flexão das barras.

Figura 59- Modo de vibração 19



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 6060- Modo de vibração 24



Fonte: Elaborada pelo autor

Diante do exposto, pode-se ter ideia de como o arranjo se comporta num aspecto geral. Entretanto, é imprescindível para validar os resultados obtidos, uma análise experimental das frequências e deslocamentos alcançados com a simulação numérica. Ainda, observa-se que muitas vezes uma simplificação na geometria além de descrever melhor as propriedades, acaba por representar de maneira mais adequada o comportamento de uma estrutura real.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho permitiu conhecer e analisar uma estrutura já existente, construída com material de bambu cujo projeto e concepção foram realizados sem nenhum tipo de cálculo estrutural e preocupação com problemas relacionados ao seu comportamento dinâmico, tal como a ressonância. Este fenômeno que é caracterizado por amplificar significativamente o movimento oscilatório quando a frequência de excitação coincide com uma das frequências naturais da estrutura, podendo leva-la ao colapso. As estruturas com baixas frequências naturais, por serem excitadas com baixas energias, podem mais facilmente atingir a ressonância.

O estudo em questão possibilita o conhecimento do comportamento dinâmico do bambu por meio da identificação de suas frequências naturais, e correspondentes modos de vibração. É importante ressaltar que é necessário um estudo mais aprofundado com relação às hipóteses adotadas para os modelos numéricos do Gazebo, incluindo uma análise experimental na qual as frequências naturais de vibração possam ser medidas *in loco*, a fim de validar os modelos, e ajustar seus parâmetros com base nos resultados experimentais.

Seria interessante também realizar uma análise dinâmica transiente em que se possam submeter os modelos a uma ação dinâmica como a do vento, por exemplo. Uma vez que a estrutura foi concebida sem aprofundamentos nos cálculos estruturais, por ser uma estrutura leve, é importante que se proceda a uma análise estática de modo a se determinar os esforços internos atuantes nos elementos estruturais, e com isso poder realizar a conferência das seções transversais adotadas.

De modo geral, pode-se concluir que as respostas obtidas neste estudo servem de ponto de partida para a compreensão de uma área ainda tão pouco explorada, mas que tanto tem a oferecer. Assim, fica registrada uma boa contribuição para o desenvolvimento dessa linha de pesquisa.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: informação e documentação – referências – elaboração. Rio de Janeiro, 2002.

BRASIL, Ministério Do Meio Ambiente. **Construção Sustentável**. Disponível em: < [mma.gov.br/cidades-sustentaveis/urbanismo-sustentavel/construcao-sustentavel](http://mma.gov.br/cidades-sustentaveis/urbanismo-sustentavel/construcao-sustentavel) >. Acesso em 21 mai. 2018.

CALDAS, S.A. **Espaço construído no semi-árido alagoano: Sustentabilidade e Preservação Ambiental em Modelos Residenciais**. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente- PRODEMA/UFAL). Maceió: PRODEMA.2002.

MARTHA, Luiz. **Análise de estruturas: conceitos e métodos básicos**. Elsevier Brasil, 2010.

PEREIRA, Marco A. dos R. **Características hidráulicas de tubos de bambu gigante ( Dendrocalamus giganteus)**. Tese de Doutorado. Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA). Universidade Estadual Paulista Júlio Mesquita, Botucatu. p.162, 1997.

PEREIRA, Marco A. R.; BERALDO, Antonio L. **Bambu de corpo e alma**. 1. ed. Bauru, SP: Canal6, 2008.

RELATÓRIO BRUNDTLAND. Disponível em: < [pt.wikipedia.org/wiki/Relatório\\_Brundtland](http://pt.wikipedia.org/wiki/Relatório_Brundtland) >. Acesso em 20 mai. 2018.

SOUZA, Andressa Martinelli de. **Os diversos usos do bambu na construção civil**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

SUSTENTÁVEL. Dicionário online Aurélio, 17 abr. 2018. Disponível em < [dicionariodoaurelio.com/sustentavel](http://dicionariodoaurelio.com/sustentavel) >. Acesso em 21 mai. 2018.

VÉLEZ, S. **Grow your own house**. Genève, Chantelaine: Vitra Design and ZERI Foundation. 2000.

**BIBLIOGRAFIA CONSULTADA**

**CORRÊA, Lásaro Roberto. Sustentabilidade na construção civil. Monografia de Especialização, UFMG, Belo Horizonte-MG, 2009.**

**MARÇAL, VITOR HUGO SILVA; AMBIENTAL, CIVIL E. Uso do bambu na construção civil. Projeto final em Engenharia Civil e Ambiental. Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília, 2008.**

**TAMAYAO, Patricia Luna. Estudo teórico experimental das propriedades dinâmicas do bambu. 2009. Tese de Mestrado. PUC-Rio.**