

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**GUSTAVO CORREA DE CASTRO**

**ENSAIO E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE ESTRUTURA GEODÉSICA TIPO ICOSAEDRO  
TRUNCADO CONSTRUÍDA COM BARRAS DE BAMBU**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PATO BRANCO**

**2019**

**GUSTAVO CORREA DE CASTRO**

**ENSAIO E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE ESTRUTURA GEODÉSICA TIPO  
ICOSAEDRO TRUNCADO CONSTRUÍDA COM BARRAS DE BAMBU**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Mecânica da Departamento Acadêmico de Engenharia Mecânica – DAMEC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Ostapiv

PATO BRANCO

2019

## FOLHA DE APROVAÇÃO

### Ensaio e Simulação Computacional de Estrutura Geodésica Tipo Icosaedro Truncado Construída Com Barras de Bambu

Gustavo Correa de Castro

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 19/06/2019 como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Mecânico, do curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Pato Branco (UTFPR-PB). O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora julgou o trabalho **APROVADO**.

---

Prof. Ms. Cicero Gallina de Aguiar  
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

---

Prof. Dr. Jean-Marc Stephane Lafay  
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

---

Prof. Dr. Fabiano Ostapiv  
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

---

Prof. Dr. Paulo Cezar Adamczuk  
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Mecânica

## DEDICATÓRIA

à minha família que me auxiliou nos momentos de dificuldades, compreensíveis pela ausência em datas importantes e pela confiança depositada.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente ao criador, por fornecer circunstâncias indispensáveis que permitem a evolução da minha vida e traz significado a mesma.

À minha mãe Magda Helena, ao meu pai Alexandre, que me ensinaram valores, sempre apoiaram em minhas escolhas e me conduzem. Com grande esforço, conseguiram proporcionar condições para que concluísse a graduação.

À minha irmã Giovana que vi crescer, se tornar um ser humano incrível e me ensina com seu modo único de ver o mundo.

Aos meus familiares, avós, tias, tios, primas e primos que me incentivam a seguir em frente com apoio moral e segurança.

Aos meus amigos de colégio, que vivenciamos inúmeras histórias de vida, me fortalecem com seus conselhos e estão dispostos a me ajudar mesmo em minha ausência pessoal.

Aos amigos criados no período de faculdade, tanto colegas de curso quanto professores. Onde foram fundamentais em muitos momentos para meu progresso, transformação e melhoria como indivíduo.

Ao meu orientador Prof. Dr. Fabiano Ostapiv, que me auxiliou com seus conhecimentos e técnicas. Além de fornecer apoio pessoal em muitas etapas do procedimento do estudo.

E por fim, A UTFPR, por fornecer condições necessárias de estudo e aperfeiçoamento de minhas técnicas profissionais.

## RESUMO

CASTRO, Gustavo Correa de. **Ensaio e simulação computacional de estrutura geodésica tipo icosaedro truncado construída com barras de bambu**. 93 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2019.

Estruturas geodésicas são importantes pois são leves, estáveis e podem vencer grandes vãos livres entre sua estrutura. Isso ocorre devido ao seu formato de cúpula, que permite uma distribuição homogênea por toda a estrutura. Tal característica dos esforços permite o menor consumo de matéria prima, o que reduz custos tanto econômicos quanto de recursos naturais. Um dos problemas encontrados ao construir estruturas geodésicas, são as uniões entre os perfis estruturais. A busca por recursos naturais permite que novos materiais sejam utilizados na engenharia, o bambu se encaixa neste contexto. O colmo de bambu é um tubo vegetal que possui boas propriedades mecânicas e físicas que permitem seu uso como material estrutural. Uma característica importante dos colmos de bambu, é que possui massa específica (densidade) baixa. Neste estudo inicialmente analisou diferentes materiais para união e seus respectivos comportamentos. Foram preparados corpos de prova e em seguida realizou-se ensaios de flexão. Chegou-se à conclusão que a melhor solução é o uso de lâminas de bambu amarradas nas uniões entre as barras de bambu. A solução se mostra positiva por: permitir a utilização de cobertura como telhados, diminuir uso de materiais industriais, reduzir impactos visuais devido à combinação de materiais e conservar as propriedades da estrutura geodésica e das barras de bambu utilizadas. A partir destas conclusões iniciais, construiu-se um molde e em seguida duas maquetes de estrutura geodésica tipo icosaedro truncado composto por hexágonos e pentágonos compostas por barras de bambu. As arestas dessas geometrias são iguais, assim os segmentos de barras de bambu têm todos o mesmo comprimento. Ensaios de carregamento vertical foram aplicados nas duas maquetes, com base nos resultados obtidos nos carregamentos, pode-se concluir: quais uniões mais sofrem com efeitos de carregamento e à medida que ocorre o carregamento, a estrutura se arranja e a partir de um determinado momento a variação de deslocamento vertical se reduz consideravelmente. Avaliando a estrutura pelo método de elementos finitos utilizando o programa ANSYS, pode-se analisar as uniões que mais sofrem com aplicação de carregamento. Evidenciando que os dados experimentais são compatíveis com a simulação computacional. Desta forma, para otimizar a estrutura o ideal é aplicar reforço nessas uniões. Os resultados obtidos ajudam a concluir que ensaios simples, tipo carregamento vertical, permitem extrair dados da realidade sem grandes investimentos, e a simulação computacional ajuda a compreender melhor o comportamento avaliado.

**Palavras-chave:** Estruturas Geodésicas. Colmos de Bambu. Maquete. Método de elementos finitos (MEF). ANSYS.

## ABSTRACT

CASTRO, Gustavo Correa de. **Trial and computational simulation of truncated icosahedron type geodesic structure constructed with bamboo bars.** 93 f. Work of Course Conclusion (Graduate in Mechanical Engineering) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2019.

Geodesic structures are important because they are light, stable and can overcome large free gaps between their structure. This is due to the shape of the dome, which allows a homogeneous distribution throughout the structure. This feature allows for lower consumption of raw material, which reduces costs both economically and natural resources. One of the problems encountered when constructing geodesic structures is the connection between structural profiles. The search for natural resources allows new materials to be used in engineering, bamboo fits in this context. The bamboo culm is a vegetable tube that has good mechanical and physical properties that allow its use as a structural material. An important characteristic of bamboo culm is that it has low specific mass (density). In this study, we analyzed different materials for union and their respective behaviors. Test specimens were prepared and then bending tests were performed. It has been concluded that the best solution is the use of blades tied to the joints between the bamboo bars. The solution is positive by: allowing roofing to be used, reducing the use of industrial materials, reducing visual impacts due to the combination of materials and conserving the properties of the geodesic structure and bamboo bars used. From these initial conclusions, a mold was built and then two models of truncated icosahedron type geodesic structure composed of hexagons and pentagons composed of bamboo bars. The edges of these geometries are the same, so the segments of bamboo bars are all the same length. Vertical loading tests were applied to the two models, based on the results obtained in the loads, it can be concluded: which unions suffer most with loading effects and as loading occurs, the structure is arranged and from a certain moment the variation of vertical displacement is considerably reduced. Evaluating the structure by the finite element method using the ANSYS program, one can analyze the unions that suffer the most with loading application. Evidencing that the experimental data are compatible with the computational simulation. In this way, to optimize the structure the ideal is to apply reinforcement in these unions. The results obtained help to conclude that simple tests, such as vertical loading, can extract data from reality without major investments, and the computational simulation helps to better understand the evaluated behavior.

**Keywords:** Geodesic Structures. Bamboo Culm. Model. Finite element method (FEM). ANSYS.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Cúpula geodésica para a feira mundial de Montreal de 1967. ....	14
Figura 2 – Junção de vários elementos estruturais. ....	16
Figura 3 – Colmos de <i>Bambusa tuldooides</i> . ....	21
Figura 4 – (A) Comportamento com a casca para cima, (B) Comportamento com a casca para baixo. ....	24
Figura 5 - <i>Phyllostachys aurea</i> . ....	25
Figura 6 – Exemplo de estrutura de treliça. ....	31
Figura 7 – Corpos de prova elaborados para os ensaios iniciais. (A) PET, (B) sisal revestido, (C) sisal e colmos de bambu como reforço. ....	33
Figura 8 – Processo de desenhos das figuras geométricas ((A) início, (B) meio e (C) fim respectivamente). ....	35
Figura 9 – Processo de corte das figuras geométricas ((A) início, (B) meio e (C) fim respectivamente). ....	36
Figura 10 – Figuras geométricas finalizadas. ....	36
Figura 11 – Sequência do passo a passo da construção do molde de papelão. ....	37
Figura 12 – Processo de fixação dos colmos de bambu sobre o molde de papelão. ....	39
Figura 13 – Recipiente contendo massa e o catalizador durante o preparo da massa plástica. ....	39
Figura 14 – Maquete 2 composta pelas barras. ....	41
Figura 15 – Lâminas retiradas do colmo de bambu da espécie <i>P. aurea</i> . ....	41
Figura 16 – Região nodal (A) durante o processo de amarração e (B) após o processo. ....	42
Figura 17 – Região do nó com o compósito. ....	43
Figura 18 – (A) suporte, (B) béquer de 100 ml, (C) béquer de dois litros, (D) paquímetro digital. ....	44
Figura 19 – Esquema finalizado para o início de aplicação de carregamento. ....	45
Figura 20 – Todos os nós da estrutura geodésica. ....	47
Figura 21 – Todas as linhas (arestas) da estrutura geodésica. ....	48
Figura 22 – Modelo discretizado. ....	49
Figura 23 – Modelo após gerar a malha. ....	49
Figura 24 – Modelo tridimensional da maquete. ....	50
Figura 25 – Modelo tridimensional da maquete com reforço. ....	51



Figura 26 – Corpos de prova após os ensaios iniciais. (A) PET, (B) Sisal revestido, (C) Sisal e colmos de bambu como reforço.....	52
Figura 27 – (A) Galhos amarrados na união entre as barras de bambu, (B) Lâminas amarradas na união entre as barras de bambu.....	53
Figura 28 – Maquete 1 finalizada para início do carregamento.....	54
Figura 29 – Maquete2 sem aplicação de massa plástica finalizada para início do primeiro carregamento. ....	55
Figura 30 – (A) União durante aplicação da massa plástica na maquete 2 e (B) maquete 2 finalizada para início do segundo carregamento. ....	56
Figura 31 – Numeração das uniões. ....	56
Figura 32 – Ângulo entre o pentágono superior e os hexágonos da estrutura geodésica.....	57
Figura 33 – Ângulos entre os hexágonos da estrutura geodésica.....	58
Figura 34 – Ângulos entre os hexágonos e os pentágonos inferiores da estrutura geodésica.....	58
Figura 35 – Ângulos entre os pentágonos inferiores e os meio hexágonos da estrutura geodésica.....	59
Figura 36 – Maquete 1 sobre efeito do carregamento vertical. ....	60
Figura 37 – Maquete 2: ensaio do carregamento 1 ao carregamento máximo. ....	61
Figura 38 – Maquete 2: ensaio do carregamento 2 ao carregamento máximo. ....	62
Figura 39 – Uniões intermediárias.....	62
Figura 40 – Curva de deslocamento durante o ensaio de carregamento 1 na maquete 2. ....	63
Figura 41 – Curva de deslocamento durante o ensaio de carregamento 2 na maquete 2. ....	64
Figura 42 – Comparação dos resultados obtidos entre os dois carregamentos na maquete 2. ....	65
Figura 43 – Modelo deformado após sofrer carregamento. ....	66
Figura 44 – Efeitos da deformação sobre as barras.....	67
Figura 45 – Comparação entre o modelo estático e sobre efeito do carregamento. .	67
Figura 46 – Tensão equivalente de von Mises. ....	68
Figura 47 – Nós intermediários. ....	68
Figura 48 – Distribuição de tensão equivalente de von Mises em foco. ....	69
Figura 49 – Distribuição de carga no modelamento tridimensional com reforço. ....	70

Figura 50 – Tensão equivalente de von Mises na maquete com reforço. ....	70
Figura 51 – Distribuição de tensão equivalente de von Mises em foco com reforço. ....	71
Figura 52 – Material PET. ....	78
Figura 53 – Material sisal. ....	79
Figura 54 – Resina de mamona utilizada no estudo. ....	81
Figura 55 – (A) Serra utilizada nos cortes das pontas, (B) Serra utilizada para se obter o ângulo de 45°. ....	82
Figura 56 – Colmo após ser cortado e lixado. ....	83
Figura 57 – Colmo com a fita adesiva após ser lixado. ....	83
Figura 58 – (A) Corpo de prova amarrado com PET, (B) Corpo de prova amarrado por com sisal. ....	84
Figura 59 – Corpo de prova utilizando colmos de bambu como reforço. ....	85
Figura 60 – Corpo de prova com o PET após o aquecimento. ....	85
Figura 61 – (A) Recipiente com a mistura dos componentes prontos, (B) Resultado após a aplicação da resina no sisal. ....	86
Figura 62 – Corpo de prova com o sisal mais a resina já seca. ....	86
Figura 63 – (A) Etapa de ajustes de posicionamento do corpo de prova, (B) Exemplo de corpo de prova pronto para o ensaio. ....	87
Figura 64 – Procedimento do ensaio de flexão com os corpos de prova. ....	88
Figura 65 – (A) Corpo de prova utilizando PET após o ensaio de flexão, (B) Corpo de prova utilizando sisal revestido com resina após o ensaio de flexão. ....	90
Figura 66 – Corpo de prova utilizando colmos de bambu como reforço e sisal após o ensaio. ....	90
Figura 67 – (A) União entre barras de bambu utilizando galhos, (B) União entre barras de bambu utilizando lâminas. ....	91

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características do molde da estrutura geodésica de aresta 175 mm.....	54
Tabela 2 – Nomenclatura dos pontos de união entre os elementos da estrutura.....	57
Tabela 3 – Resultados obtidos pelo ensaio com o colmo. ....	89

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.2 OBJETIVOS .....	17
1.2.1 Objetivo Principal .....	17
1.2.2 Objetivos Específicos .....	17
1.3 JUSTIFICATIVA .....	18
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>19</b>
2.1 ESTRUTURAS GEODÉSICAS .....	19
2.2 BAMBU.....	21
2.2.1 Características Físicas do Colmo de Bambu.....	22
2.2.2 Características Mecânicas do Colmo de Bambu .....	23
2.2.3 <i>Phyllostachys aurea</i> .....	25
2.2.4 Lâminas do Bambu .....	26
2.3 MOLDES E MAQUETES.....	27
2.4 MÉTODOS DE ELEMENTOS FINITOS .....	28
2.4.1 Aplicações de Elementos Finitos.....	30
2.4.2 Comportamento de um Elemento de Barra Única .....	30
<b>3 METODOLOGIA (MATERIAIS E MÉTODOS)</b> .....	<b>32</b>
3.1 SELEÇÃO DE MATERIAIS DE UNIÃO E ENSAIOS INICIAIS.....	32
3.2 MOLDE E MAQUETE.....	34
3.2.1 Construção do Molde .....	34
3.2.2 Construção da Maquete .....	38
3.2.2.1 Construção da maquete 1 .....	38
3.2.2.2 Construção da maquete 2 .....	40
3.3 ENSAIO DE CARREGAMENTO VERTICAL DA ESTRUTURA.....	44
3.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL .....	47
<b>4 RESULTADOS</b> .....	<b>52</b>

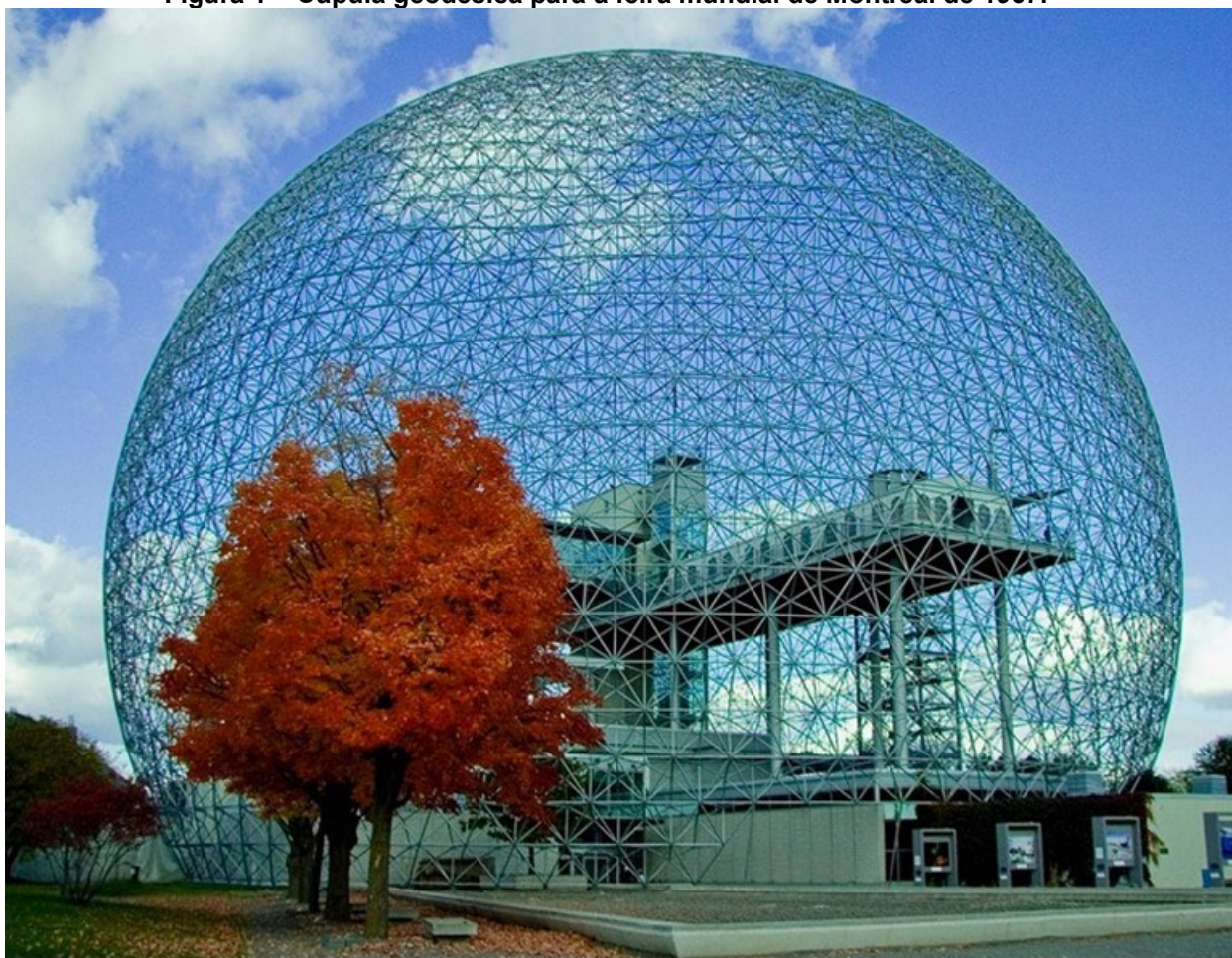
4.1 SELEÇÃO DE MATERIAIS DE UNIÃO E ENSAIOS INICIAIS.....	52
4.2 MOLDE E MAQUETE.....	54
4.3 ENSAIO DE CARREGAMENTO VERTICAL DA ESTRUTURA.....	60
4.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	66
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>72</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>74</b>
<b>APÊNDICE A – MATERIAIS UTILIZADOS NOS ENSAIOS INICIAIS.....</b>	<b>77</b>
Ensaio iniciais.....	77
Polietileno Tereftalato – PET.....	78
Sisal.....	79
Resina de Mamona.....	80
<b>APÊNDICE B – METODOS UTILIZADOS NOS ENSAIOS INICIAIS.....</b>	<b>82</b>
Preparação dos corpos de prova.....	82
Procedimentos dos ensaios iniciais.....	87
<b>APÊNDICE C – RESULTADOS OBTIDOS DOS ENSAIOS INICIAIS.....</b>	<b>89</b>
RESULTADOS DOS ENSAIOS INICIAIS.....	89
<b>ANEXO A – CARACTERÍSTICAS DA RESINA CATALISADA DE POLIESTER SATURADA.....</b>	<b>92</b>
<b>ANEXO B – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MECÂNICAS DO FIO DE NYLON..</b>	<b>93</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A cúpula geodésica como estrutura é uma concepção de Buckminster Fuller, que ocorreu durante suas pesquisas sobre o desenvolvimento de um mapa terrestre que fosse o mais próximo da realidade e que evitasse as distorções apresentadas pelos mapas tradicionais.

Buckminster Fuller concluiu que a projeção do globo em um icosaedro circunscritível à esfera poderia resultar em uma representação mais precisa e menos deformada da Terra. A partir desta ideia, criou seu giroscópio, uma grande esfera feita com barras, uma superfície geodésica da qual se pudessem ter uma visão mais adequada das relações entre continentes. Essa estrutura tornou-se em seguida, muito usada para criar diversos tipos de espaços, culminando em uma grande cúpula geodésica para a feira mundial de Montreal em 1967 (figura 1). Esta estrutura pode atingir vãos de até 300m (REBELLO, 2007).

**Figura 1 – Cúpula geodésica para a feira mundial de Montreal de 1967.**



Fonte: (LANGDON, 2016).

O domo geodésico composto por hexágonos e pentágonos é um poliedro de Arquimedes chamado icosaedro truncado. As arestas dos hexágonos e dos pentágonos são todas iguais, por isso todos os segmentos de colmo de bambu têm todos o mesmo comprimento. No entanto, como a cúpula é uma calota esférica, no terceiro e último nível haverá 5 meios hexágonos e o comprimento desta aresta de fechamento será maior (OSTAPIV et al, 2018).

A busca por recursos naturais vem crescendo ano após ano. Isso se deve ao aumento populacional e a diminuição dos recursos existentes. Uma atitude é necessária para que a população tenha condições de se auto sustentar. A utilização da planta bambu se encaixa neste contexto, pois pode ser usada na engenharia em diversas finalidades.

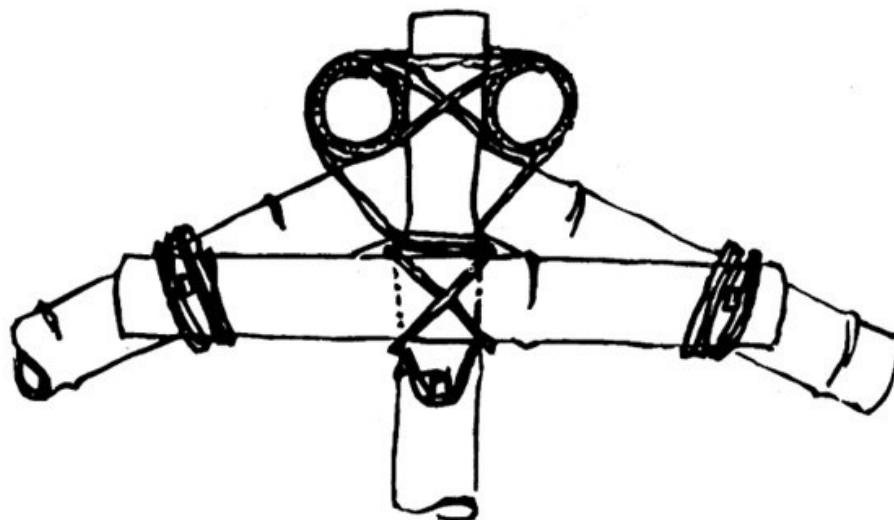
O bambu se pode considerar nativo em todos os continentes exceto Antártica e Europa. Mas, no entanto, os bambus ocupam uma ampla gama de tipos de habitat, especialmente florestas, de zonas climáticas temperadas a tropicais (LIESE; KÖHL, 2015).

Pode se dizer que o bambu é muito útil em termos de qualidades mecânicas, tais como resistência ao cisalhamento, resistência à compressão, resistência à flexão e resistência à tração. Portanto, a planta bambu é usada para fazer muitos objetos comumente usados, como cestas, gaiolas, móveis, instrumentos musicais, implementos agrícolas e de pesca e materiais de construção por exemplo (MAOYL; BANIK, 1993).

Em virtude da orientação das fibras ser paralela ao eixo do colmo, o bambu resiste mais à tração do que à compressão. O módulo de elasticidade varia em função da posição do colmo, sendo maior nos nós por apresentarem maior concentração de sílica (CRUZ, 2002).

Devido ao colmo ser oco, a junção de dois ou mais colmos se torna um problema, e diferentes tipos e métodos de junção e fixação são necessários. Na Indonésia por exemplo, normalmente a corda é usada para unir os colmos em casas de bambu. A figura 2 a seguir, mostra esta aplicação. De acordo com a experiência adquirida, o bambu é considerado altamente adequado para uso estrutural (RAO; SASTRY, 1993).

**Figura 2 – Junção de vários elementos estruturais.**



Fonte: (RAO; SASTRY, 1993).

Uma das formas de entender o comportamento de estruturas é utilizando maquetes. A maquete geralmente em escala, apresenta a construção ou aparência de um projeto e pode ser considerado como um mecanismo que se gera e representa ideias do projeto. De forma genérica, o molde relaciona-se à referência ou padrão. Algo ou modelo que sirva de espelho ao desenvolvimento de outro. As maquetes podem ser utilizadas para resolver problemas de projeto e melhorar a compreensão que se tem do produto em desenvolvimento (ROSA, 2016).

O método dos elementos finitos (MEF), baseia-se na ideia de construir um objeto complicado com blocos simples ou dividir um objeto complicado em partes menores e gerenciáveis. A aplicação dessa ideia simples pode ser encontrada em todos os lugares na vida cotidiana, assim como na engenharia (XIAOLIN; YIJUN, 2015).

Muitos fenômenos físicos na engenharia e na ciência podem ser descritos em termos de equações diferenciais parciais. Geralmente, resolver os números por métodos analíticos clássicos para formas arbitrárias é praticamente impossível. O MEF é uma abordagem numérica pela qual essas equações diferenciais parciais podem ser resolvidas aproximadamente. Geralmente, a precisão da solução aumenta à medida que o número de elementos e nós aumentam, mas o tempo de simulação e os custos, portanto, também aumentam. (FISH; BELYTSCHKO, 2007).



## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Principal

O objetivo principal deste estudo é avaliar o comportamento de uma estrutura geodésica tipo icosaedro truncado construída com barras de bambu ao aplicar carregamento vertical.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos consistem em:

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre a importância do estudo da planta bambu na engenharia de estruturas;
- Realizar estudo sobre diferentes materiais que sirva como elementos de união em estruturas geodésicas;
- Produzir e ensaiar maquetes de estrutura geodésica tipo icosaedro truncado;
- Realizar simulação computacional utilizando o programa de elementos finitos ANSYS.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

As estruturas geodésicas são importantes pois são leves, estáveis e podem vencer grandes vãos livres entre sua estrutura. Isso ocorre devido ao formato de cúpula, o que permite uma distribuição homogênea por toda a estrutura. Tal característica permite o menor consumo de matéria prima, o que reduz custos tanto econômicos quanto de recursos naturais.

Estruturas geodésicas são comumente formadas por triângulos, que juntas formam um padrão regular, formando assim uma espécie de malha. Um problema deste tipo de formação é que as uniões são compostas por vários elementos e as arestas possuem comprimentos diferentes. No entanto, uma estrutura geodésica do tipo icosaedro truncado, composta por hexágonos e pentágonos, permitem que os segmentos de barras de bambu tenham todos o mesmo comprimento e as uniões sejam compostas por apenas três elementos.

O colmo de bambu é um tubo vegetal que possui boas propriedades mecânicas e físicas que permitem seu uso como material estrutural. Uma característica importante dos colmos de bambu, é que possui massa específica (densidade) baixa.

As maquetes são importantes pois possibilitam obter domínio visual de todo o conjunto espacial e seu respectivo comportamento. Além de permitir a realização de ensaios simples, originando dados relevantes para a continuidade de estudos.

Os métodos de elementos finitos (MEF), trata-se de uma ferramenta importante para análise de problemas complexos. Muito eficaz para obtenção dos campos de deformações e tensões, permitindo a identificação das regiões mais solicitadas de uma estrutura.

Neste estudo inicialmente analisou-se diferentes materiais para união e seus respectivos comportamentos. Em seguida, produziu-se duas maquetes para análises experimentais e posteriormente realizou-se análises utilizando o programa de elementos finitos ANSYS.

Ensaio simples, tipo carregamento vertical, são importantes devido serem acessíveis e de baixo custo. O que permite extrair dados da realidade sem grandes investimentos e em praticamente qualquer local.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 ESTRUTURAS GEODÉSICAS

O sistema construtivo de uma estrutura geodésica é composto basicamente por três elementos principais: os nós, as barras e o sistema de cobertura no caso de uma estrutura fechada.

Richard Buckminster Fuller, autodidata, engenheiro, arquiteto, filósofo e inventor, propunha uma maneira de pensar que unia a arte e a ciência buscando nessa fusão um terceiro caminho que levasse os tecnólogos como os poetas e os artistas no sentido de mudar a percepção que as pessoas tinham do planeta terra.

O nome Buckminster Fuller está definitivamente associado aos *Domus Geodésicos*, tema que dedicou por grande parte da sua vida chegando a construir grande número deles. O modelo de domo, levou Fuller a propor megaestruturas onde estas leves cúpulas propostas ganhariam maiores dimensões e passariam a cobrir grandes áreas urbanas numa proposta de controle ambiental, climático e energético, trazendo ao interior dessas estruturas um microclima próprio (DINIZ, 2006).

Estruturas geodésicas são formadas por triângulos ou outras formas geométricas que juntas formam um padrão regular, formando assim uma espécie de malha. Desta forma pode-se realizar diversas combinações afim de se obter o melhor padrão para determinada aplicação.

Uma estrutura geodésica comum é o domo, ou cúpula. O qual possui característica de ter fácil montagem, ser leve e estável. Além de que as forças tendem a se distribuir igualmente por toda a estrutura do domo geodésico, o que permite que essas estruturas tenham uma boa resistência a terremotos por exemplo. Essa característica permite que o domo seja uma das formas mais resistentes por quantidade de material já inventada. Suas aplicações são diversas, desde habitações a grandes espaços que necessitam serem cobertos.

Como vantagens na construção de um domo geodésico utilizando colmos de bambu podemos citar:

- O tempo de construção relativamente curto quando comparado com outros materiais de engenharia, o que permite o uso dessas estruturas em abrigos de emergência;

- Podem ser usados em diversas aplicações, como espaços de exposição em feiras e escolas, acampamentos civis e militares, eventos festivos, espaços temporários para atividades rurais;
- Possuem *design* único, sem cantos e colunas internas;
- Tem elevado valor estético e econômico em uma construção, agregando valor aos telhados e obra como um todo.

Cúpulas fechadas são termicamente eficientes, pois formas esféricas oferecem uma área superficial mínima para o volume que tem. O que permite que se tenha uma superfície para transferência de calor com o ar externo menor possível.

Mas por serem esféricas apresentam algumas desvantagens, uma vez que as estruturas convencionais são normalmente retangulares. Desta forma podemos citar no caso de habitações:

- Como por exemplo as janelas e portas curvas, estas são mais caras e difíceis de serem encontradas, assim provavelmente terão que ser fabricadas sob encomenda;
- Os profissionais que instalam as redes hidráulicas e elétrica normalmente precisam de mais tempo para fazer o serviço que se torna mais caro;
- Sons, cheiros e luz refletida são facilmente experimentados em toda a estrutura o que pode causar um problema de privacidade.

Além dessas desvantagens, por ser uma forma radicalmente diferente do tradicional, talvez o número de pessoas que aceitem bem a estrutura será menor que o convencional. O que torna a ser difícil de vender e ter menor valor de mercado.

Há também a possibilidade de os domos geodésicos feitos de bambu servirem como suporte auxiliar na construção de domos de concreto e aço. Pode servir tanto para os trabalhadores como de base para a malha. Domos de concreto, domos monolíticos, apresentam uma proteção quase que completa contra vendavais, furacões e tornados (OSTAPIV et al, 2018).

## 2.2 BAMBU

A planta bambu é classificada na botânica como *bambuseae*, que consiste em um conjunto pertencente a extensa família das gramíneas, uma planta lenhosa e também classificada como angiosperma e monocotiledônea.

Depois da china, o Brasil é o país onde se encontra o maior número de espécies nativas de bambu, superando a Índia. Existem cerca de 1300 espécies de bambu no mundo e estudos recentes apontam 258 espécies nativas brasileiras, sendo que 67% destes só existem em território nacional. (OSTAPIV; LIBRELOTTO, 2019).

Os bambus possuem uma grande habilidade de se adaptar e diversificar dentro do habitat floresta. São conhecidos como gramíneas florestais, embora algumas espécies tenham se irradiado em lugares abertos, gramados ou arbustivos em altas altitudes como nos sistemas montanhosos (LIESE; KÖHL, 2015).

O colmo compõe a parte aérea dos bambus e da sustentação para os ramos e folhas. Como os bambus não apresentam crescimento radial, o colmo surge com diâmetro máximo na base e afunila em direção ao ápice. Assumindo assim a sua forma cônica. Os bambus são plantas de rápido crescimento, o que reflete no alongamento dos seus colmos. Na figura 3, mostra-se colmos da espécie *Bambusa tuldoides*.

**Figura 3 – Colmos de *Bambusa tuldoides*.**



Fonte: Autoria própria.

Os colmos assim como as folhas têm também a capacidade de realizar a fotossíntese. A habilidade de armazenar e conduzir a seiva bruta e elaborada constitui-se nas suas principais funções. Para tanto, possuem células que se alinham no sentido axial e que são protegidas por feixes de fibras que promovem a sua rigidez (SILVA, 2005).

Segundo Ghavami e Marinho (2005), em estudos das espécies *Guadua angustifolia*, determinou-se que o módulo de elasticidade para todo o bambu é de 12,58 GPa. Sendo que foram usadas amostras com nó ou sem nó.

### 2.2.1 Características Físicas do Colmo de Bambu

As principais propriedades físicas do bambu são: teor de umidade, densidade e estabilidade dimensional. Dependendo da aplicação desejada, pode-se analisar o isolamento térmico e o comportamento acústico (OSTAPIV; LIBRELOTTO, 2019).

O coeficiente de dilatação térmica possui valores diferentes no sentido longitudinal e transversal. No sentido longitudinal é pouco menor do que o aço e do concreto, enquanto no sentido transversal é cerca de cinco vezes maior.

A condutividade térmica do bambu para uma transmissão de calor radial é 15 % menor do que para madeira, nas mesmas condições de umidade. Para uma transmissão de calor longitudinal, a condutividade é 25 % menor (CRUZ, 2002).

Um dos problemas encontrados na literatura a respeito das características físicas e mecânicas do bambu é que em geral, não existe uma metodologia padronizada na obtenção dos dados. Na maioria das vezes não especifica se o bambu foi ensaiado na forma cilíndrica (forma natural) ou em formas de ripas (apenas as paredes), qual parte do bambu foi estudada (base, meio, ponta) a posição ao longo da parede ou ainda qual a idade do colmo. A ausência de tais especificações torna difícil uma comparação entre os dados (PEREIRA, 2012).

### 2.2.2 Características Mecânicas do Colmo de Bambu

Em virtude de sua orientação das fibras serem paralelas ao eixo do colmo, o bambu resiste mais à tração do que à compressão. O módulo de elasticidade varia em função da posição do colmo, sendo maior nos nós por apresentarem maior concentração de sílica. Por ser o nó um ponto de descontinuidade das fibras e de mudanças dimensionais, nele originam-se concentrações de tensões quando submetido a ensaio (CRUZ, 2002).

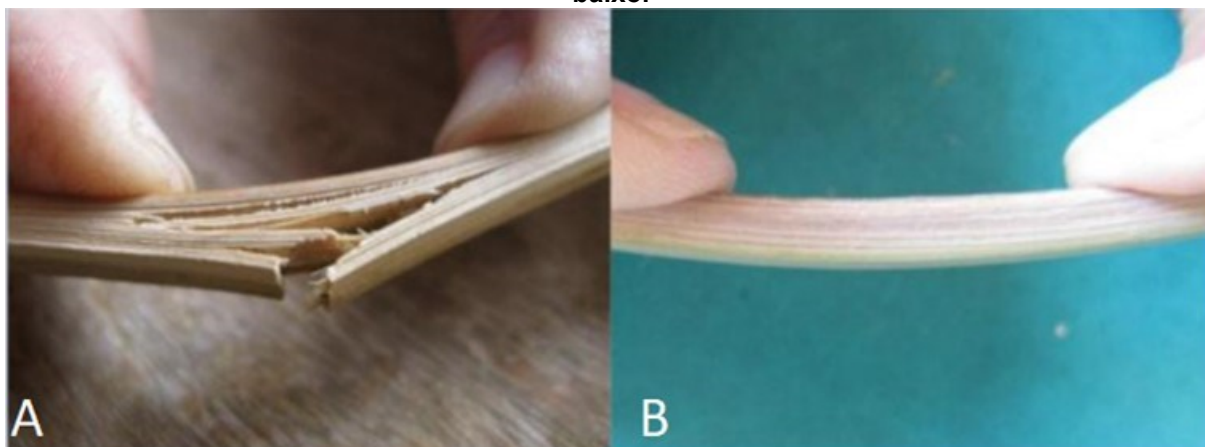
O bambu assim como a madeira, é um material heterogêneo e anisotrópico, ou seja, apresenta módulos de elasticidade que variam conforme o sentido de aplicação das cargas. Segundo Hidalgo Lopez (1974), a resistência à compressão do bambu é aproximadamente 4 vezes menor que a resistência à tração, sendo o módulo de resistência à compressão ligeiramente inferior ao módulo de resistência à tração (OLIVEIRA, 2012).

Existe um certo exagero ao denominar o bambu como “aço vegetal”, pois o módulo de elasticidade do bambu é de apenas 10 % ao correspondente no aço. Uma possibilidade de se obter a máxima resistência do bambu seria produzindo laminas das camadas externas, trançando-as, de forma a obter um cabo.

O comportamento de ripas de bambu submetidas à flexão estática varia de acordo com duas situações, posição da casca para cima ou da casca para baixo:

- Na primeira situação, observa-se que na camada externa do bambu (casca) suporta maior esforço de compressão, levando à ruptura das camadas mais externas por tração, na forma de zigue-zague, com deslocamento progressivo das fibras (figura 4A);
- Quando se comprime a região interna do colmo, submetendo a casca aos esforços de tração, o bambu se deforma acentuadamente, sem ocorrer ruptura brusca da casca, sofrendo esmagamento nas camadas internas (figura 4B).

**Figura 4 – (A) Comportamento com a casca para cima, (B) Comportamento com a casca para baixo.**



Fonte: (OSTAPIV; LIBRELOTTO, 2019).

No esforço de cisalhamento, dependendo da direção de carregamento (paralelo ou perpendicular às fibras), novamente o bambu se mostra muito sensível a ação desse tipo de solicitação, sendo menos resistente quando o esforço é aplicado na direção paralela às fibras.

Esse comportamento do bambu deve ser avaliado no momento de serem utilizados entalhes ou conexões em estruturas. Além de propiciar o surgimento de linhas de menor resistência mecânica, a abertura das tricas expõe o bambu ao ataque de organismos xilófagos (fungos, bactérias e flagelados simbiotes) (OSTAPIV; LIBRELOTTO, 2019).

Normalmente quanto maior o teor de umidade do bambu, menor será sua resistência ao cisalhamento. A resistência ao cisalhamento transversal às fibras do bambu situa-se em torno de 30% de sua resistência a flexão. Em números representam em torno de 32 MPa (variação entre 20 a 65 MPa).

A resistência ao cisalhamento longitudinal das fibras é de aproximadamente 15% de sua resistência a compressão, ou seja, por volta de 6 MPa (variação entre 4 a 10 MPa) (PEREIRA, 2012).

Segundo Cruz (2002), a resistência ao cisalhamento do bambu é da ordem de 8% da resistência a compressão e aumenta com a diminuição da parede. Com a diminuição da espessura da parede do colmo a porcentagem do tecido que proporciona resistência ao colmo aumenta, desta forma amostras retiradas do topo são mais resistentes ao cisalhamento que as amostras extraídas da parte basal do mesmo colmo.



### 2.2.3 *Phyllostachys aurea*

A espécie *Phyllostachys aurea* (Figura 5) é popularmente conhecida no Brasil como cana da Índia, vara de pescar ou bambu jardim. Sua origem é na China, mas também é encontrada no Japão, Taiwan, América Central e América do Sul. É uma das espécies mais conhecidas em todo o mundo e a que melhor tem se adaptado ao clima temperado. Sua altura varia em média de 6 a 12 m, e o diâmetro entre 2 e 7 cm. Seus colmos se apresentam verdes quando jovem se tornando amarelo-esverdeados com o passar do tempo. O comprimento dos internódios aumentam da base para o topo (OLIVEIRA, 2012)

**Figura 5 - *Phyllostachys aurea*.**



Fonte: Autoria própria.

Estudos realizados por (NETO, 2016), verificou que a densidade aferida pelo ensaio, para a vara de *P. áurea* foi de  $0,50\text{g/cm}^3$ , com desvio padrão de 11%. Em estudos realizados por Liese (1998), constata-se o peso específico, ignorando os vazios dos colmos, varia de  $0,5$  a  $0,9\text{ g/cm}^3$  ao longo da planta. Isso mostrou que, ao considerar os vazios do colmo na densidade aparente, a planta tem menores variações.

Estudos realizados por (CRUZ, 2002), obteve-se valores para a resistência à tração de valor máximo no topo do colmo atingindo um valor de 272 MPa, para as amostras secas ao ar, 277,45 MPa nas amostras secas com fogo e 335,26 MPa nas amostras tratadas com banho quente. Os corpos de prova sem nó apresentaram maior resistência que as amostras extraídas da região nodal, sendo de 167,18 MPa

para os corpos de prova secos ao ar, 104,49 MPa para as amostras secas com fogo e 165 MPa para os corpos de prova tratados com banho quente.

Neste mesmo estudo, se observou que os valores da tensão aumentam da base para o topo, atingindo o máximo de 4,64 MPa para amostras sem nó extraídas do topo dos colmos. Observa-se que nos corpos de prova sem nó a resistência ao cisalhamento é maior e mantém-se quase uniforme ao longo do colmo. Já nas regiões com nó os resultados são menores.

#### 2.2.4 Lâminas do Bambu

Os colmos de bambu podem ser utilizados em sua forma natural, tubular ou podem ser manufaturados em elementos primários de diversas formas, tais como: ripas, lâminas, partículas e nós. A obtenção destes elementos primários pode se dar a partir de processos mecânicos.

Estes elementos processados podem então ser recortados, prensados, misturados e combinados entre si com diversos materiais, tais como: plástico, fibras, arames, cimentos, resina, entre outros.

Deste modo é possível obter diferentes tipos de painéis e produtos que tem como base a matéria prima bambu. É possível produzir uma grande variedade de produtos, tais como: moveis, estruturas, pranchas de skate, bicicletas, barcos, aviões, entre outros (OSTAPIV; LIBRELOTTO, 2019).

Estudos realizados por Yu et al (2008), indicam que nas camadas externas do colmo de bambu possuem maiores módulos de ruptura em relação as camadas internas. Essa característica pode ser relacionada aos efeitos da anatomia e da estrutura do bambu.

Existem dispositivos que possuem a função de subdividir uma ripa de bambu em lâminas finas ou tiras com razoável regularidade, que posteriormente podem ser combinadas de forma trançada ou em paralelo formando painéis e produtos similares. As ripas são passadas repetidamente pelo equipamento enquanto for possível obter lâminas mais finas.

## 2.3 MOLDES E MAQUETES

O ato de modelar atribui ao estudo a experimentação da ideia do plano do papel ou na tela do computador utilizando-se de desenhos, croquis e perspectivas. E produzir uma maquete associa-se ao ato de produzir e representar espacialmente a ideia de desenvolvimento.

De forma genérica, o molde está relacionado a referência ou padrão. Algo ou modelo que sirva de espelho ao desenvolvimento de outro. No universo das ciências pode abranger tanto o sentido conceitual quanto o sentido material. Em ambos os casos está relacionado com a ação de conhecimento.

Os moldes podem ser utilizados para resolver problemas de projeto e melhorar a compreensão que se tem do produto em desenvolvimento. Assim auxilia com a geração de ideias, ensaios e verificação de requisitos de projeto.

O termo maquete inclui inúmeros sentidos, o que melhor define o termo é “representação, geralmente em escala, que apresenta a construção ou aparência de um objeto”. Acrescentando que pode ser considerado como um mecanismo que se gera e representa ideias do projeto (ROSA, 2016).

O modelo físico, serve como intermediário entre projetos complexos e a prática construtiva. Arquitetos da renascença usavam modelos físicos para descrever as formas de edifícios e suas técnicas construtivas.

A execução destes modelos através de técnicas tradicionais de produção de maquete é exaustivo e demorado processo manual de transformação entre o desenho e a representação física (VIEIRA, 2007).

Segundo Terni et al (2001), a implementação computacional da análise de estruturas permite um estudo das mais variadas técnicas construtivas. Solicitadas de diversas maneiras, podendo utilizar variados tipos de materiais.

No entanto, a máquina é apenas uma ferramenta de auxílio. A construção de moldes e maquetes permite visualizar uma série de fatores que ajudam a compreender o comportamento da estrutura estudada.

## 2.4 MÉTODOS DE ELEMENTOS FINITOS

O método dos elementos finitos (MEF), baseia-se na ideia de construir um objeto complicado com blocos simples ou dividir um objeto complicado em partes menores e gerenciáveis, ou seja, discretizar o objeto em partes menores afim de se obter resultados aproximados de sua resolução.

A aplicação dessa ideia simples pode ser encontrada em todos os lugares na vida cotidiana, assim como na engenharia. Um exemplo são brinquedos que crianças brincam usando muitas peças pequenas de montar, cada uma com uma geometria muito simples, para construir vários objetos, como trens, navios ou edifícios. Com mais e mais peças menores, esses objetos parecerão mais realistas.

Em termos matemáticos, trata-se simplesmente do uso do conceito de limite, isto é, aproximar ou representar um objeto suave com um número finito de peças simples e aumentar o número de peças para melhorar a precisão dessa representação (XIAOLIN; YIJUN, 2015).

Muitos fenômenos físicos na engenharia e na ciência podem ser descritos em termos de equações diferenciais parciais. Geralmente, resolver os números por métodos analíticos clássicos para formas arbitrárias é praticamente impossível. O método dos elementos finitos (MEF) é uma abordagem numérica pela qual essas equações diferenciais parciais podem ser resolvidas aproximadamente.

Do ponto de vista de engenharia, o método MEF é para resolver problemas de engenharia como análise de tensão, transferência de calor, fluidos e eletromagnetos por simulação computacional.

No entanto, a solução da equação diferencial parcial resultante para uma geometria complicada, como um bloco de motor, é impossível por métodos clássicos, como a separação de variáveis. Da mesma forma, a análise de tensão requer a solução de equações diferenciais parciais que são muito difíceis de resolver por métodos analíticos, exceto por formas muito simples, como retângulos, e os problemas de engenharia raramente têm formas tão simples.

A ideia básica do MEF é dividir o corpo em elementos finitos, são criados elementos simplificados conectados por nós, afim de obter uma resolução aproximada. Isso chamou a atenção para os métodos de seleção finita e o processo de fabricação da malha é chamado de geração de malha.

Geralmente, a precisão da solução aumenta à medida que o número de elementos (e nós) aumenta, mas o tempo do computador e, portanto, os custos também aumentam. Por meio da simulação de cargas extremas, como cargas graves e testes de componentes eletrônicos, é necessária uma análise não linear.

Na análise de tensão, para a maioria das análises de cargas operacionais, a análise linear é adequada, uma vez que geralmente é indesejável ter cargas operacionais que possam levar a um comportamento não linear do material.

O FEM foi desenvolvido na década de 1950, em um setor espacial. É interessante notar que durante muitos anos o FEM carecia de uma base teórica, ou seja, não havia provas matemáticas de que as soluções de elementos finitos permitissem responder.

Então, em 1965, a NASA fundou um projeto para desenvolver um grupo de programa de finalização de finalidade geral na Califórnia, liderado por Dick MacNeal. Esse programa, que veio a ser conhecido como NASTRAN, incluía uma grande variedade de recursos, como análises de tensão bidimensionais e tridimensionais, elementos de feixe e casca, para analisar estruturas complexas, como quadros aéreos e análise de vibrações e resposta dependente do tempo a cargas dinâmicas.

Mais ou menos na mesma época, John Swanson desenvolveu um programa de elementos finitos na Westinghouse Electric Corp. Uma análise geral dos reatores nucleares. Em 1969, a Swanson passou a operar um mercado chamado ANSYS. O programa tinha capacidade linear e não-linear e era amplamente adotado por muitas empresas.

Em muitos projetos industriais, o banco de dados de elementos finitos torna-se um componente-chave do desenvolvimento de produtos, pois é usado para um grande número de análises diferentes, embora em muitos casos, eles sejam adaptados para aplicações específicas (FISH; BELYTSCHKO, 2007).

### 2.4.1 Aplicações de Elementos Finitos

A seguir, será listado alguns exemplos de aplicações de elementos finitos:

- Análises de estresse e térmicas de peças industriais, como chips eletrônicos, dispositivos elétricos, válvulas, tubulações, vasos de pressão, motores automotivos e aeronaves;
- Análise sísmica de barragens, centrais elétricas, cidades e arranha-céus;
- Análise de colisão de carros, trens e aeronaves;
- Análise de fluidos de tanques de refrigerante, poluentes e contaminantes e sistemas de inventariação de ar;
- Análise eletromagnética de antenas, transistores e assinaturas de aeronaves;
- Análise de procedimentos cirúrgicos como cirurgia plástica, reconstrução mandibular, correção de escoliose e muitos outros.

Esta é uma lista muito curta que se destina apenas a dar uma ideia da amplitude de áreas de aplicação para o método. Novas áreas de aplicação estão constantemente surgindo. Uma abordagem em medicina preditiva tem como objetivo usar imagens médicas e dados de monitoramento para construir um modelo de uma parte da anatomia e fisiologia de um indivíduo (FISH; BELYTCHKO, 2007).

### 2.4.2 Comportamento de um Elemento de Barra Única

Uma estrutura de treliça, como a mostrada na figura 6, consiste em uma coleção de elementos delgados, geralmente chamados de barras. Supõe-se que os elementos da barra sejam suficientemente finos, de modo que tenham uma resistência insignificante à torção, ao dobramento e, conseqüentemente, que as forças de cisalhamento e de tração sejam eliminadas.

**Figura 6 – Exemplo de estrutura de treliça.**



Fonte: (FISH; BELYTSCHKO, 2007).

As únicas forças internas de consequência em tais elementos são as forças internas axiais, de modo que seu comportamento é semelhante ao das molas. Alguns dos elementos são selecionados horizontalmente, enquanto outros são posicionados em um ângulo arbitrário (FISH; BELYTSCHKO, 2007).

### 3 METODOLOGIA (MATERIAIS E MÉTODOS)

Para elaborar uma estrutura geodésica, pode ser usado diferentes tipos de materiais e tipos de colmos de bambu, especialmente de espécies de médio diâmetro como o *P. aurea*, facilmente encontradas em todo o mundo e também no território brasileiro. Pode ser utilizado inclusive na forma de barras ou espetinhos de bambu processados e comercializados comumente em mercados e varejos.

Este estudo será realizado com barras de bambu por se tratar de uma maquete em escala. As barras de bambu foram obtidas a partir de lotes comerciais de espetinhos de bambu para churrasco.

O estudo será realizado da seguinte forma:

- Inicialmente será realizado um estudo de seleção de materiais para os pontos de união da estrutura;
- Construção do molde;
- Construção das duas maquetes;
- Ensaio de carregamento vertical;
- Simulação computacional.

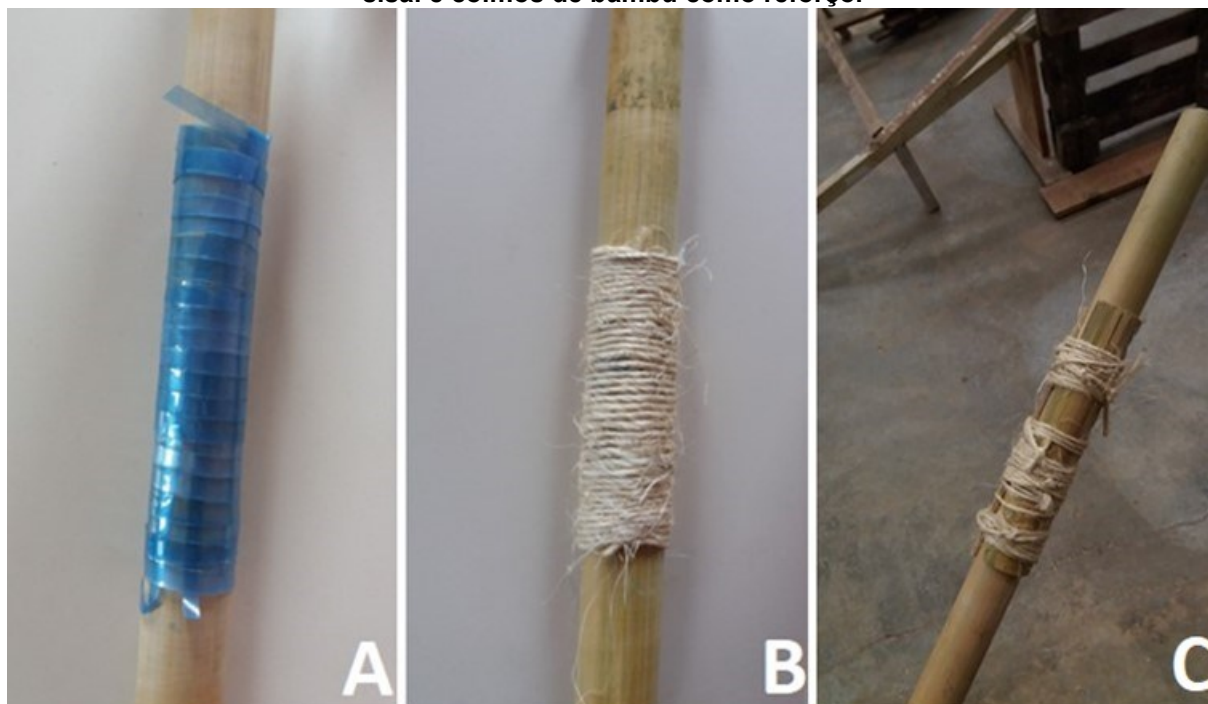
#### 3.1 SELEÇÃO DE MATERIAIS DE UNIÃO E ENSAIOS INICIAIS

A seleção de materiais foi realizada conforme apresentado no apêndice A, apêndice B e apêndice C. Consistiu-se em avaliar ensaios iniciais afim de determinar qual material apresenta melhor comportamento para a realização dos carregamentos na estrutura geodésica.

Os materiais analisados foram: PET (polietileno tereftalato) (figura 7A), sisal revestido com resina de óleo de mamona (figura 7B), amarração utilizando sisal e colmos de bambu como reforço (figura 7C). Foram elaborados corpos de prova utilizando os materiais descritos em colmos de bambu.



**Figura 7 – Corpos de prova elaborados para os ensaios iniciais. (A) PET, (B) sisal revestido, (C) sisal e colmos de bambu como reforço.**



Fonte: Autoria própria.

Os ensaios iniciais no estudo consistem em ensaios de flexão nos corpos de prova. Aplicou-se uma carga crescente na extremidade dos corpos de prova. A força aplicada na extremidade provoca uma deformação, o que permite avaliar o comportamento do ensaio.

Ao concluir os ensaios iniciais, avaliou-se em como tornar prática a solução para a estrutura geodésica do estudo. O desafio é que a maquete está em escala com aresta de 175 mm e as uniões são espaciais e possuem três barras.

Durante a revisão bibliográfica, verificou-se que lâminas retiradas do colmo de bambu apresenta-se homogêneas em suas propriedades. Desta forma, decidiu-se utilizar lâminas de bambu como reforço entre as uniões da estrutura geodésica.

## 3.2 MOLDE E MAQUETE

A estrutura geodésica estudada, ensaiada e modelada por simulação computacional neste trabalho é uma estrutura tipo icosaedro truncado, composto por hexágonos e pentágonos. Como as arestas dos hexágonos e dos pentágonos são iguais, os segmentos de barras de bambu têm todos o mesmo comprimento.

Os materiais utilizados para a construção da maquete foram barras cilíndricas maciças de bambu, cola poliéster e resina catalisada de poliéster saturada, contendo monômero de estireno e silicato de magnésio (conhecida comercialmente como massa plástica automotiva), que é um material barato e fácil de utilizar.

As barras de bambu foram obtidas a partir de lotes comerciais, de 100 ou 200 unidades, de espetinhos de bambu para churrasco. As barras de bambu utilizadas na maquete têm diâmetro de 4 mm e 175 mm de comprimento.

Neste estudo foram produzidas duas maquetes, ambas utilizando o mesmo molde para sua construção. A maquete 1 utilizou nas uniões apenas massa plástica, enquanto que a maquete 2 houve mais refinamento em sua produção, utilizou lâminas amarradas nas barras formando as uniões e aplicação de massa plástica.

Na maquete 2 se aplicou dois carregamentos, o primeiro com lâminas amarradas nas uniões e o segundo com aplicação de massa plástica. Após o primeiro carregamento vertical, para otimizar a maquete já finalizada, decidiu-se continuar com o estudo acrescentando massa plástica nas uniões. Afim de avaliar o desempenho da geodésica quando carregada novamente.

### 3.2.1 Construção do Molde

Um problema importante na construção de domos geodésicos é a fixação das barras umas com as outras com os ângulos adequados. Neste trabalho a solução adotada foi o uso de um domo de papelão como molde, para facilitar a construção da estrutura geodésica de barras de bambu.

Para produzir o molde de papelão foram utilizados:

- Papelão;
- Instrumentos de corte, como tesoura e estilete;

- Instrumentos de desenho e medição (compasso, régua, esquadro, lápis, caneta);
- Fita adesiva.

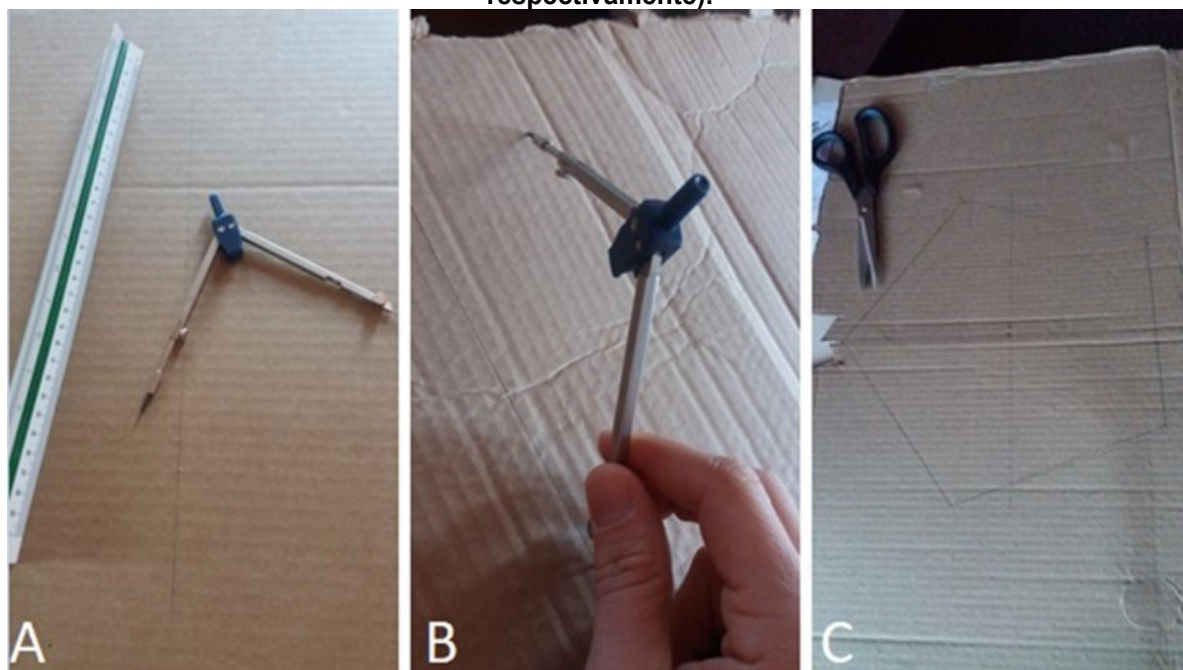
As etapas de construção do molde consistem em:

- Desenhar as figuras geométricas no papelão;
- Cortar as figuras geométricas;
- Construir o molde.

Na figura 8, mostra-se de forma simplificada o passo a passo do processo de desenho dos hexágonos, meio hexágonos e pentágonos. Utilizou-se técnicas de desenho técnico para desenhar as figuras geométricas com precisão, garantindo que as arestas contenham 175 mm.

Manuseou-se os instrumentos de desenho e medição citados, inicialmente se fez uma reta, em seguida uma circunferência e com as técnicas dividiu-se a circunferência em cinco partes ou seis partes. Formando assim as figuras geométricas desejadas. O processo foi realizado com bastante cautela afim de garantir a invariabilidade da estrutura geodésica.

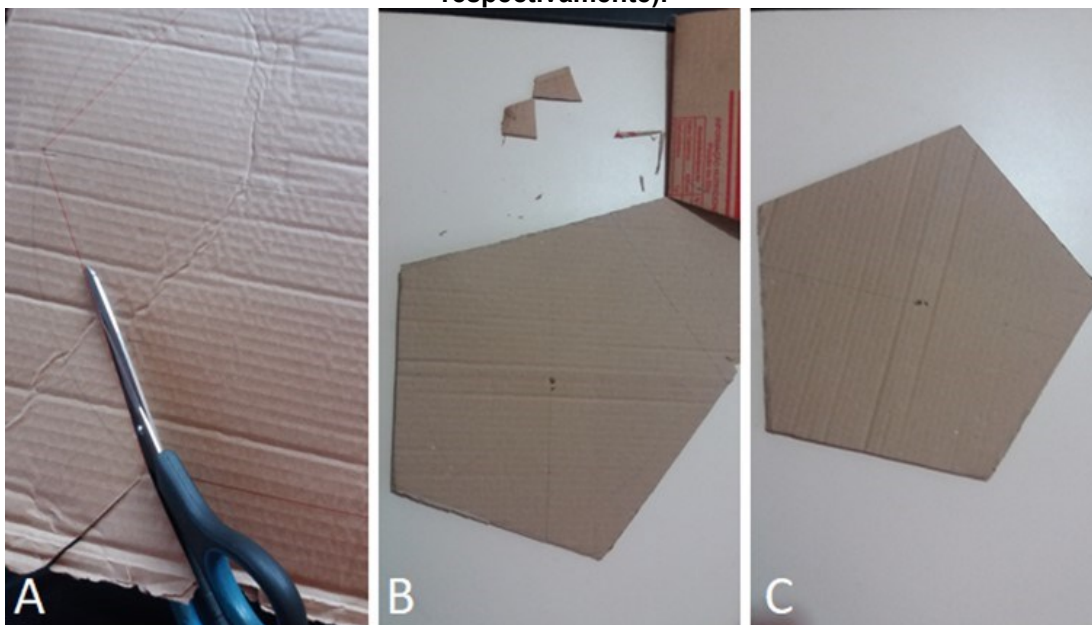
**Figura 8 – Processo de desenhos das figuras geométricas ((A) início, (B) meio e (C) fim respectivamente).**



Fonte: Autoria própria.

Na figura 9, mostra-se de forma simplificada o passo a passo do processo de corte dos hexágonos, meio hexágonos e pentágonos.

**Figura 9 – Processo de corte das figuras geométricas ((A) início, (B) meio e (C) fim respectivamente).**



Fonte: Autoria própria.

Na figura 10, mostra-se o resultado final desta etapa, os hexágonos, meio hexágonos e pentágonos de papelão finalizados após o processo. O meio hexágono se trata de um hexágono dividido ao meio, desta forma no desenho foi feito apenas o hexágono, não gerando variação na aplicação das técnicas de desenho técnico.

**Figura 10 – Figuras geométricas finalizadas.**



Fonte: Autoria própria.

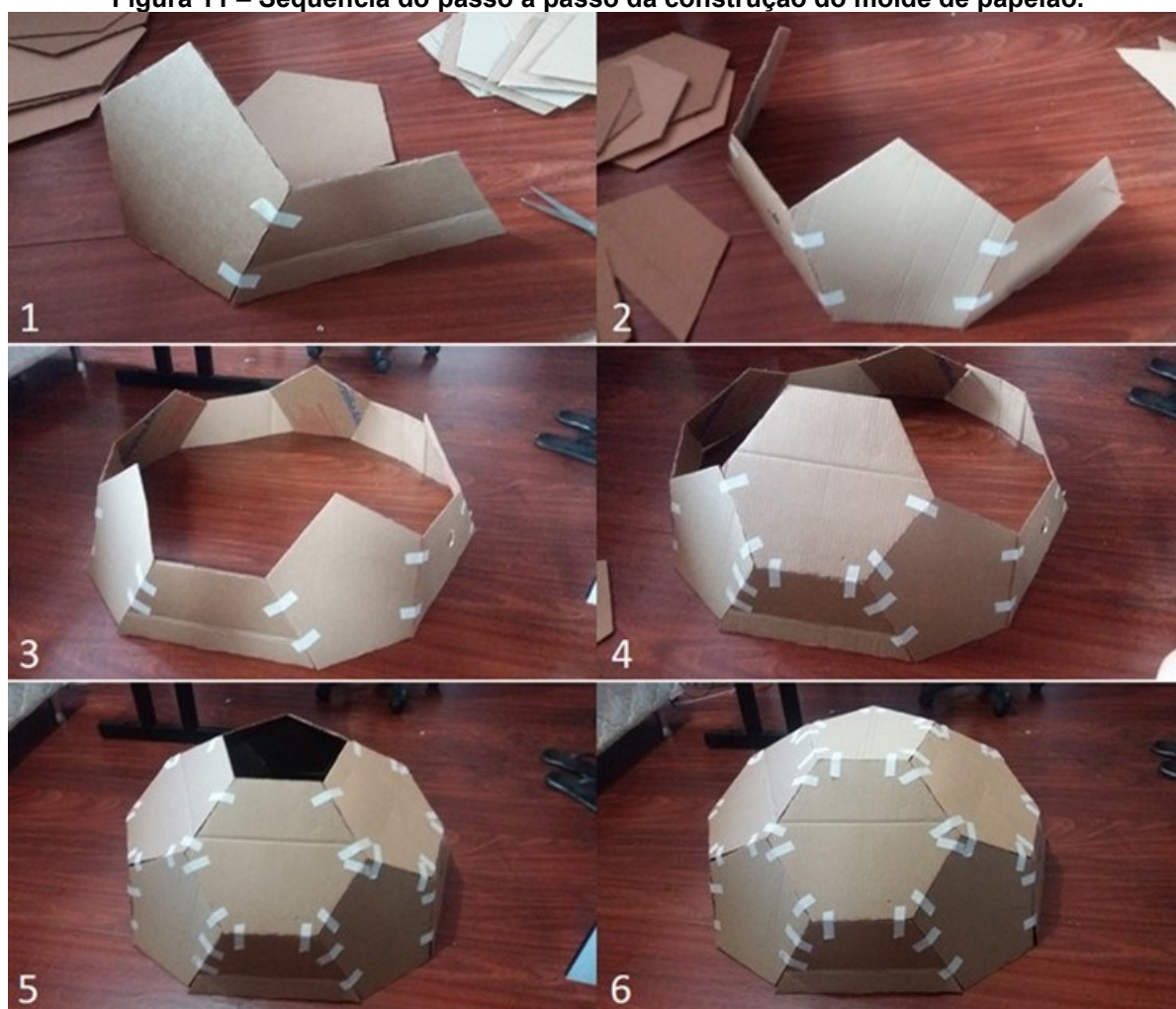
Com todas as figuras geométricas desenhadas e recortadas do papelão (5 hexágonos, 6 pentágonos e 5 meios hexágonos) como vistos na figura 10 acima, as figuras geométricas agora serão consideradas como peças.

Esta etapa consiste em fixar todas as peças com o auxílio de fita adesiva tipo crepe. Escolheu-se fita, devido ser de fácil acesso e de rápida aplicação. É um processo simples, a estrutura geodésica levanta-se naturalmente.

Durante o processo a estrutura vai se assentando a cada peça fixada, no estudo se iniciou a construção de baixo para cima. Nota-se a importância de garantir que todas as arestas sejam iguais.

Na figura 11, é possível visualizar a sequência do passo a passo da construção do molde de papelão. Onde é numerado de 1 a 6 a evolução da construção.

**Figura 11 – Sequência do passo a passo da construção do molde de papelão.**



Fonte: Autoria própria.

### 3.2.2 Construção da Maquete

Neste estudo produziu-se duas maquetes, ambas utilizando o mesmo molde para sua construção conforme a metodologia descrita. A primeira maquete utilizou nas uniões apenas massa plástica e para seguir com o estudo produziu-se a segunda maquete.

As etapas de construção da maquete 1 consistem em:

- Fixar as barras no molde;
- Aplicação de massa plástica nas uniões das barras.

As etapas de construção da maquete 2 consistem em:

- Fixar as barras no molde;
- Aplicação de cola poliéster nas uniões entre as barras;
- Retirar as lâminas dos colmos de bambu;
- Amarrar as lâminas nas uniões;
- Aplicar uma mistura de serragem com cola de poliéster nas uniões;
- Aplicar massa plástica nas uniões.

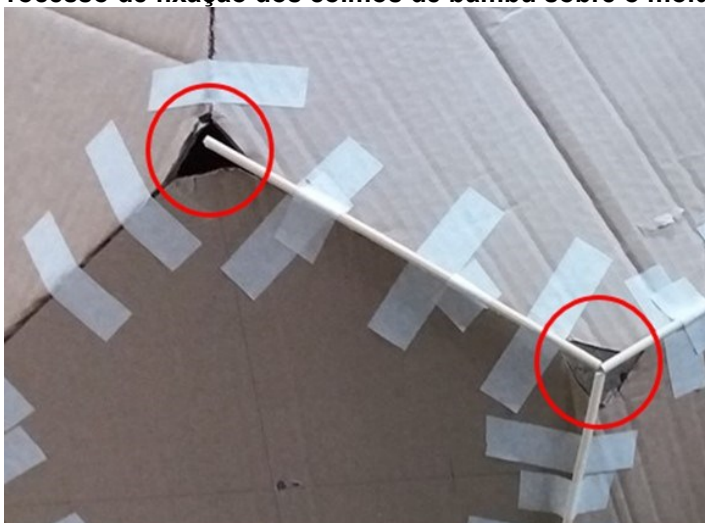
#### 3.2.2.1 Construção da maquete 1

A etapa inicial consistiu em fixar as barras de bambu sobre o molde, para tal ação utilizou-se fita adesiva, a mesma usada anteriormente na construção do molde de papelão.

O desafio desta etapa consiste em certificar que todas as barras de bambu estão regulares, tanto na região de união entre as barras quando nas arestas. O processo deve ser aplicado minuciosamente, afim de garantir que a estrutura seja uniforme e constante.

Foi necessário cortar os vértices dos hexágonos e pentágonos de papelão para criar um orifício nos pontos nodais da estrutura para permitir o manuseio da massa plástica nesta região, como pode ser visto na figura 12 a seguir, onde os círculos vermelhos indicam os cortes nos vértices.

**Figura 12 – Processo de fixação dos colmos de bambu sobre o molde de papelão.**



Fonte: Autoria própria.

Após o posicionamento e fixação das barras de bambu sobre o molde, aplicou-se massa plástica (resina catalisada de poliéster saturada, contendo monômero de estireno e silicato de magnésio) nos pontos nodais da geodésica fazendo união entre as barras de bambu. O processo se mostrou fácil e rápido.

A massa plástica (características são mostradas no Anexo A) foi preparada seguindo instruções do fabricante, onde a cada 100g de massa adiciona-se 12 gotas de catalizador em dia quente ou 20 gotas de catalizador em dia frio. É feita a mistura em recipiente até atingir o ponto ideal da massa plástica. Na figura 13 a seguir, apresenta-se o recipiente utilizado com a massa e o catalizador durante o preparo da massa plástica.

**Figura 13 – Recipiente contendo massa e o catalizador durante o preparo da massa plástica.**



Fonte1: Autoria própria.

A aplicação da massa plástica nos pontos de união das barras foi feita de acordo com a geometria da geodésica. Realizada com o auxílio de luvas, onde cada nó recebeu uma quantidade similar para preencher a união.

Após a aplicação esperou-se a massa plástica secar durante três dias. Verificou-se a maquete e alguns nós apresentaram irregulares devido a massa plástica escoar seguindo a gravidade, ou seja, escoar em direção à superfície.

Desta forma foram feitos retoques em alguns pontos que estavam irregulares. Permitindo assim uniformidade ao concluir a etapa de aplicação de massa plástica.

Após os retoques esperou-se a massa plástica secar por mais uma semana. Onde neste período a estrutura geodésica pode-se assentar bem sobre o suporte.

As etapas até o momento foram feitas com a estrutura geodésica móvel, para tornar possível os carregamentos, a geodésica foi fixa a um suporte retangular por método de amarração em pregos pré-fixados. Essa fixação foi importante para que a geodésica se firmasse e dissipasse as forças do carregamento de forma homogênea.

### 3.2.2.2 Construção da maquete 2

A etapas iniciais são similares às da construção da primeira maquete. Inicialmente, consistiu em fixar as barras de bambu sobre o molde de papelão.

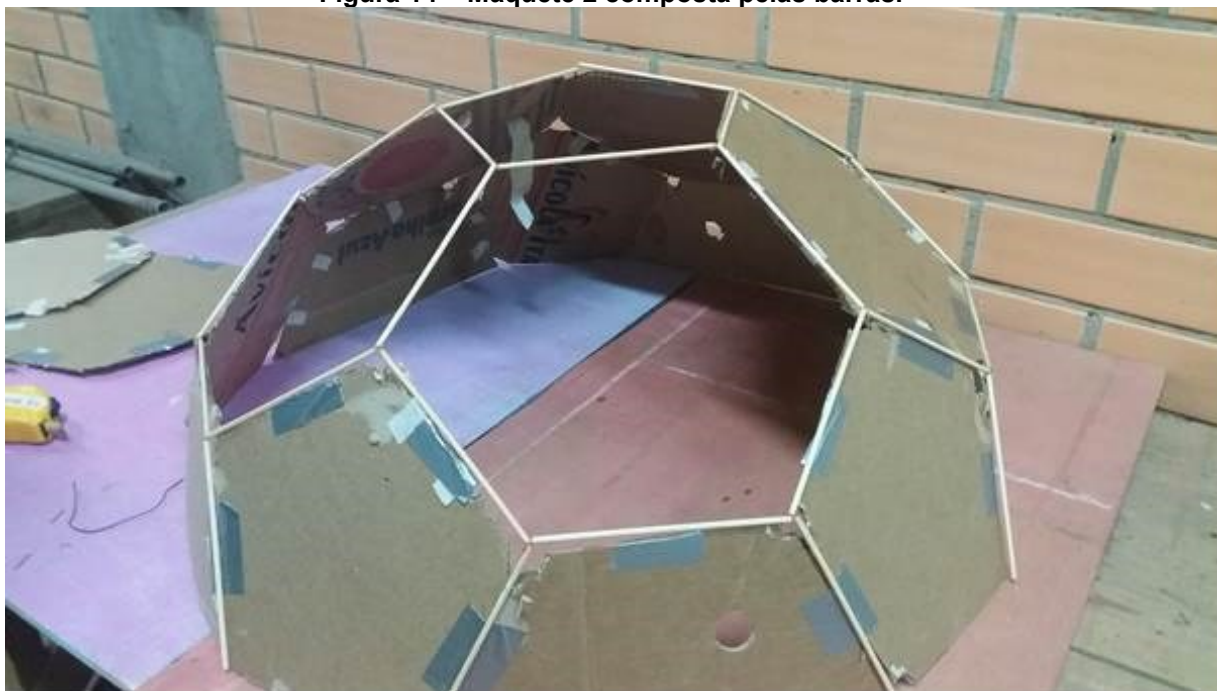
Assim como anteriormente, o desafio desta etapa consiste em certificar que todas as barras de bambu estão regulares, tanto na região de união entre as barras quando nas arestas. O processo deve ser empregado minuciosamente, afim de garantir que a estrutura seja uniforme e constante.

O recorte dos vértices dos hexágonos e pentágonos de papelão, permitiu o manuseio da cola poliéster nesta região. O objetivo de aplicar a cola poliéster é dar suporte para a fixação das lâminas retiradas dos colmos de bambu da espécie *P. aurea*. Evitando que as barras fiquem moveis durante a amarração das lâminas e assim se garanta uma uniformidade ao finalizar o processo.

Na figura 14, mostra-se a maquete 2 composta pelas barras com suas uniões fixas.



**Figura 14 – Maquete 2 composta pelas barras.**



Fonte: Autoria própria.

As lâminas foram retiradas do colmo de bambu da espécie *P. aurea* com o auxílio de uma ferramenta cortante, onde simplesmente retirou as laminas externas da parede do bambu em um processo manual. O processo deve ser feito com muito cuidado, pois a ferramenta aqui utilizada é cortante e pode haver ferimentos. Devido a isso, infelizmente essa é a técnica acessível no estudo. Na figura 15, mostra-se as lâminas já retiradas do colmo.

**Figura 15 – Lâminas retiradas do colmo de bambu da espécie *P. aurea*.**



Fonte: Autoria própria.

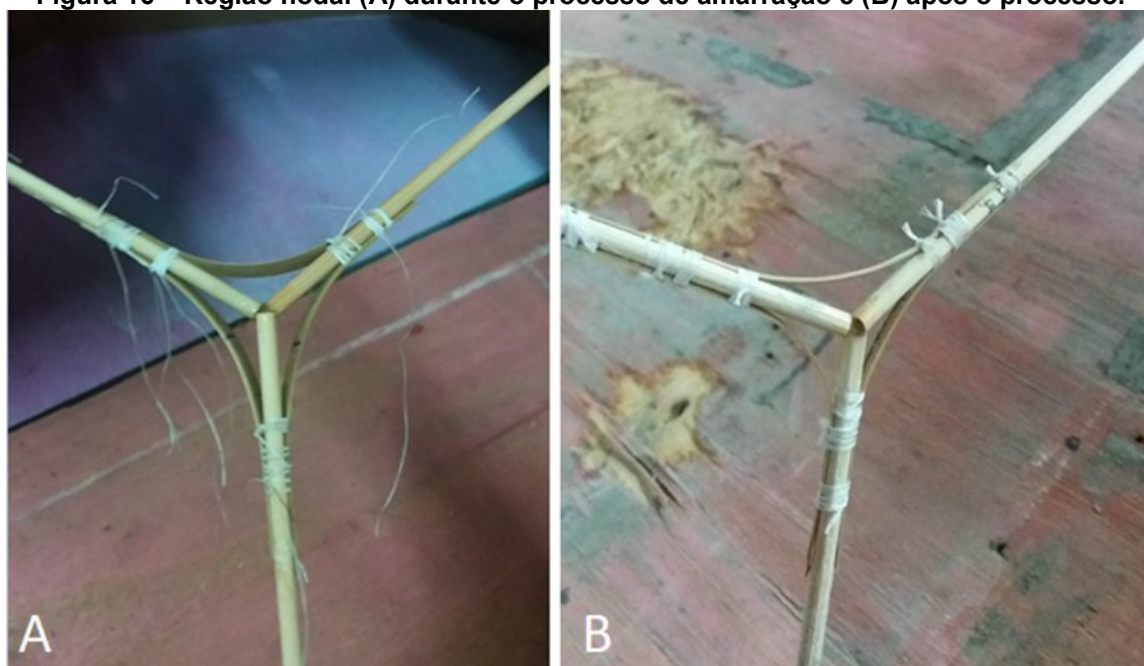
A etapa seguinte consiste no processo de amarrar as lâminas. Tal ação se mostrou árdua e minuciosa, contabilizou-se em torno de 8 horas para completar a fixação de todos os nós da geodésica, com o trabalho de duas pessoas.

Precisa de uma pessoa para segurar a lâmina no devido lugar e outra para efetuar a amarração no local desejado. Além de que são necessárias constantes regulagens nas amarrações, pois a cada nó completo a geodésica vai ficando mais solida. Desta forma, o processo se mostra difícil de ser feito sozinho, o que favorece ou exige trabalho em grupo.

Cada nó é composto por três lâminas, formando uma espécie de estrela. São necessárias três amarrações em cada colmo para dar firmeza na lâmina, o que totaliza nove amarrações por nó

Na figura 16, mostra-se a região nodal, a figura 16A apresenta o posicionamento o conjunto de três barras de bambu com as três lâminas durante o processo de amarração. A figura 16B apresenta o nó após o processo de amarração, onde pode ser visto todas as amarrações e as lâminas fixas.

**Figura 16 – Região nodal (A) durante o processo de amarração e (B) após o processo.**



Fonte: Autoria própria.

Após completar as amarrações, aplicou-se uma mistura de serragem com cola de poliéster afim de obter um composto com o propósito de melhorar a fixação dos colmos de bambu. Na figura 17, mostra-se a região do nó com o composto criado.

**Figura 17 – Região do nó com o compósito.**



Fonte: Autoria própria.

Após o primeiro carregamento vertical, para otimizar a maquete 2 já finalizada, decidiu-se continuar com o estudo acrescentando massa plástica nos nós. Afim de avaliar o desempenho da geodésica quando carregada novamente.

Nesta etapa foi preparada a massa como anteriormente na construção da primeira maquete e aplicada sobre os nós contendo as amarrações e as lâminas. O processo se mostrou fácil e rápido comparado com a etapa de amarração.

Assim como na primeira maquete, a aplicação da massa plástica nos pontos de união das barras foi realizada com o auxílio de luvas. Após a aplicação esperou-se a massa plástica secar durante três dias. Verificou-se a maquete e alguns nós apresentaram irregulares devido a massa plástica escoar seguindo a gravidade, ou seja, escoar em direção à superfície.

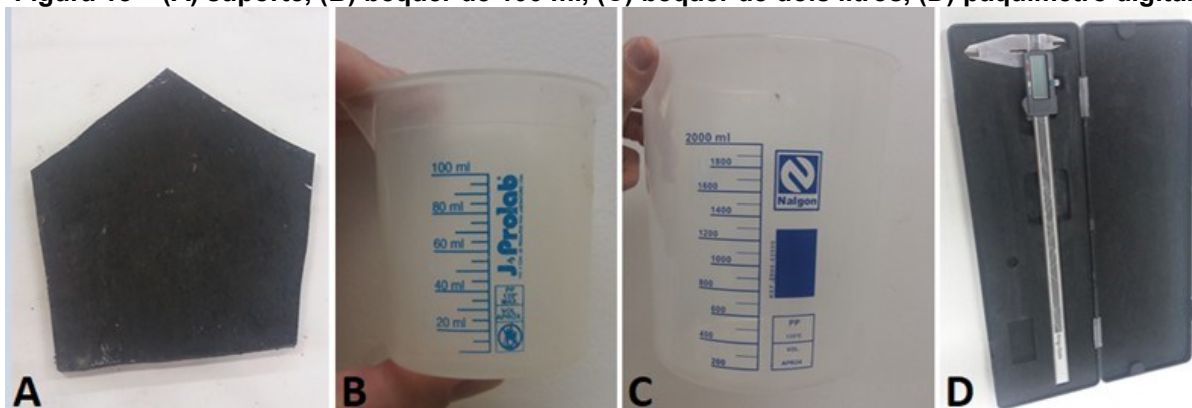
Desta forma foram feitos retoques assim como anteriormente em alguns pontos que estavam irregulares. Após os retoques esperou-se a massa plástica secar por mais uma semana.

### 3.3 ENSAIO DE CARREGAMENTO VERTICAL DA ESTRUTURA

Nas duas maquetes foram realizados ensaios de carregamento vertical sobre a estrutura geodésica. Na maquete 2, ocorreu dois ensaios, um com a maquete sem aplicação de massa plástica e outro carregamento com a maquete com massa plástica. Todos ensaios são similares em sua execução e em seus procedimentos.

Os instrumentos necessários para os ensaios são simples e de fácil acesso, tais como: plataforma plana (suporte) para o bquer de dois litros (figura 18A), bquer de 100 ml (figura 18B), bquer de dois litros (figura 18C) e paquímetro digital (figura 18D). A figura 18 a seguir, apresenta-se os instrumentos utilizados para possibilitar a análise do carregamento vertical.

**Figura 18 – (A) suporte, (B) bquer de 100 ml, (C) bquer de dois litros, (D) paquímetro digital.**



Fonte: Autoria própria.

Inicialmente posicionou-se a maquete a ser ensaiada em uma bancada devidamente nivelada. É importante assegurar que ações externas como desnivelamentos, ondulações, não comprometa os resultados obtidos.

Em seguida colocou-se o suporte para o bquer de dois litros, e por fim o bquer de dois litros. Desta forma simples e de fácil manuseio forma-se o esquema necessário para os procedimentos de aplicação de carregamento vertical.

O paquímetro digital foi utilizado para medir o deslocamento vertical da estrutura ao ser aplicado o carregamento.

A figura 19, mostra-se o esquema preparado para o ensaio, com os instrumentos necessários e a maquete para aplicação de carregamento.

**Figura 19 – Esquema finalizado para o início de aplicação de carregamento.**



Fonte: A autoria própria.

Para todos ensaios (maquete 1 e maquete 2), foram marcados como referência 5 pontos nas extremidades do suporte para medir-se o deslocamento vertical destes pontos da plataforma enquanto a estrutura sofria carregamento vertical, e desta forma, obter análises de seu comportamento.

O suporte é um pentágono, pois o topo da estrutura geodésica tipo icosaedro truncado forma-se um pentágono. O carregamento vertical foi aplicado 100 em 100 ml de água no béquer de 2 litros com o auxílio do béquer de 100 ml. Utilizou-se água por ser de fácil acesso e facilitar o cálculo de força aplicada durante o carregamento permitindo futuras análises.

Na maquete 1, O instante inicial do carregamento foi com 781g (béquer 232g, placa 549g) a uma altura de 331,2 mm. A aplicação de carregamento vertical de 100 em 100 ml iniciou-se, e então cessou ao atingir o máximo que o béquer permite.

Na maquete 2, no carregamento 1 sem a massa plástica, o instante inicial do primeiro carregamento foi com 781g (béquer 232g, placa 549g) a uma altura de 334,2 mm. A aplicação de carregamento vertical de 100 em 100 ml iniciou-se, e então cessou ao atingir um litro de água no béquer.

Determinou-se não continuar com o carregamento para que o mesmo não afetasse a estrutura no carregamento futuro. Nota-se que os dados obtidos são

suficientes para determinar a curva de comportamento do ensaio e por fim analisar os resultados. Desta forma observa-se que não é necessário chegar ao ponto catastrófico da maquete durante o estudo.

O carregamento 2 na maquete 2, seguiu o mesmo procedimento descrito no carregamento 1. A diferença é que agora a maquete 2 possui massa plástica. O instante inicial foi com 781g (béquer 232g, placa 549g) a uma altura de 336,8 mm. A aplicação de carregamento vertical de 100 em 100 ml iniciou-se, e então cessou ao atingir dois litros de água no béquer.

O béquer utilizado tem o máximo de dois litros, desta forma determinou-se não continuar com o carregamento.

### 3.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

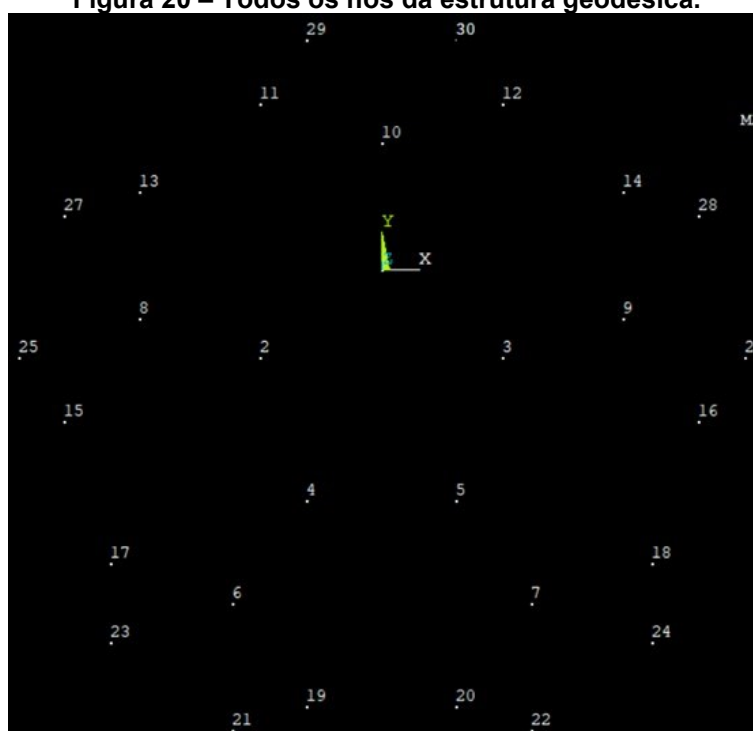
Foi utilizado o método dos elementos finitos (MEF) para simular o comportamento das maquetes construídas de barras de bambu. Para tal análise inicialmente criou-se um modelo tridimensional de acordo com as medidas da maquete produzida usando recursos gráficos do programa de elementos finitos ANSYS.

As etapas da elaboração do modelo tridimensional consistem em:

- Selecionar as condições do material a ser utilizado;
- Criar os nós;
- Criar as linhas;
- Discretizar as linhas;
- Criar a malha;
- Aplicar as condições de contorno;
- Aplicar o carregamento.

Um problema para realizar a simulação computacional é ter os pontos cartesianos corretos de todos os nós da estrutura. Para tal, fez-se uma estrutura geodésica em 3D em um programa CAD (Computer Aided Design), onde pode-se retirar os nós. A figura 20 a seguir, mostra todos os nós no ANSYS.

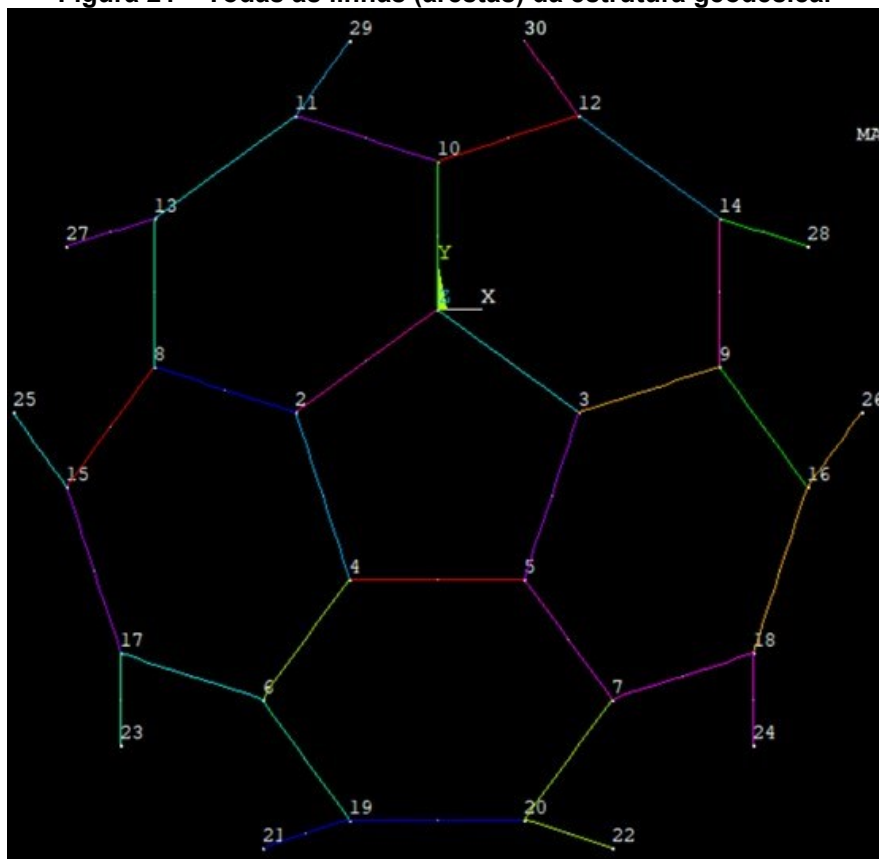
**Figura 20 – Todos os nós da estrutura geodésica.**



Fonte: Autoria própria.

A geodésica do tipo icosaedro truncado como a estudada possui 30 nós e 35 arestas, na figura 21 mostra-se todas as linhas, ou seja, todas as arestas.

Figura 21 – Todas as linhas (arestas) da estrutura geodésica.



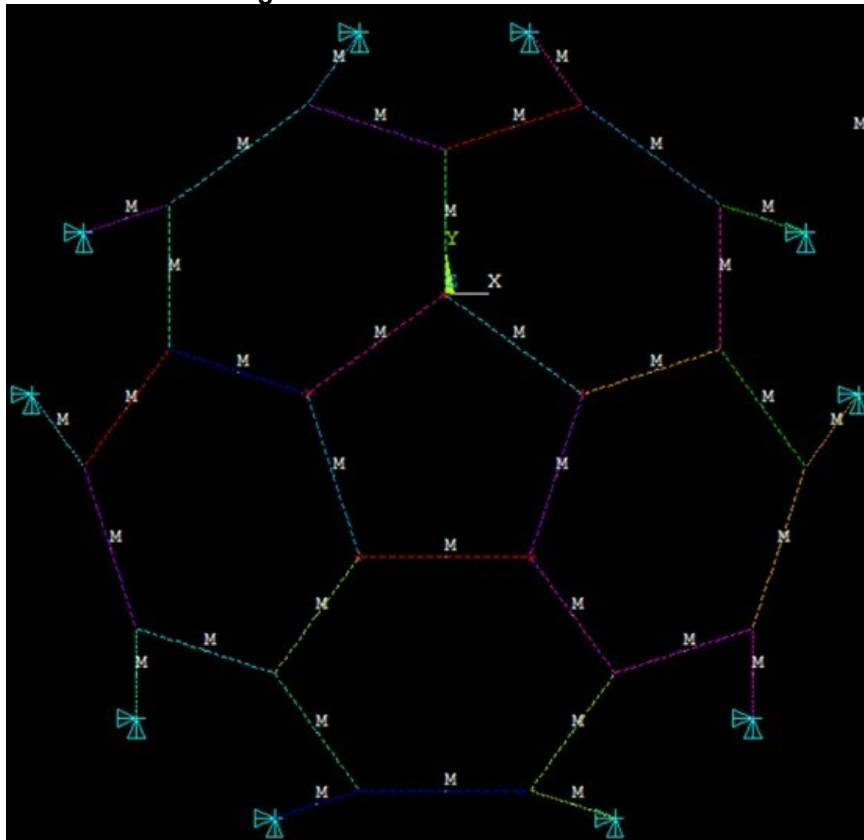
Fonte: Autoria própria.

Para obtenção da solução numérica, o modelo foi discretizado com uma malha de 350 elementos, ou seja, 10 elementos por aresta no total de 35 arestas. As condições de contorno prescritas foram de deslocamentos e rotação nulos para os nós da base (condição de engaste) e força vertical disposta sobre os cinco nós da estrutura. Foi utilizado um modelo de material isotrópico com um módulo de elasticidade de 12,58 GPa, tal valor foi retirado da literatura como descrito no referencial teórico.

Após o modelo ser discretizado (figura 22) é necessário gerar uma malha (figura 23) para que a discretização seja feita com qualidade. A geração da malha é importante para um melhor detalhamento afim de garantir que a análise seja realizada adequadamente.

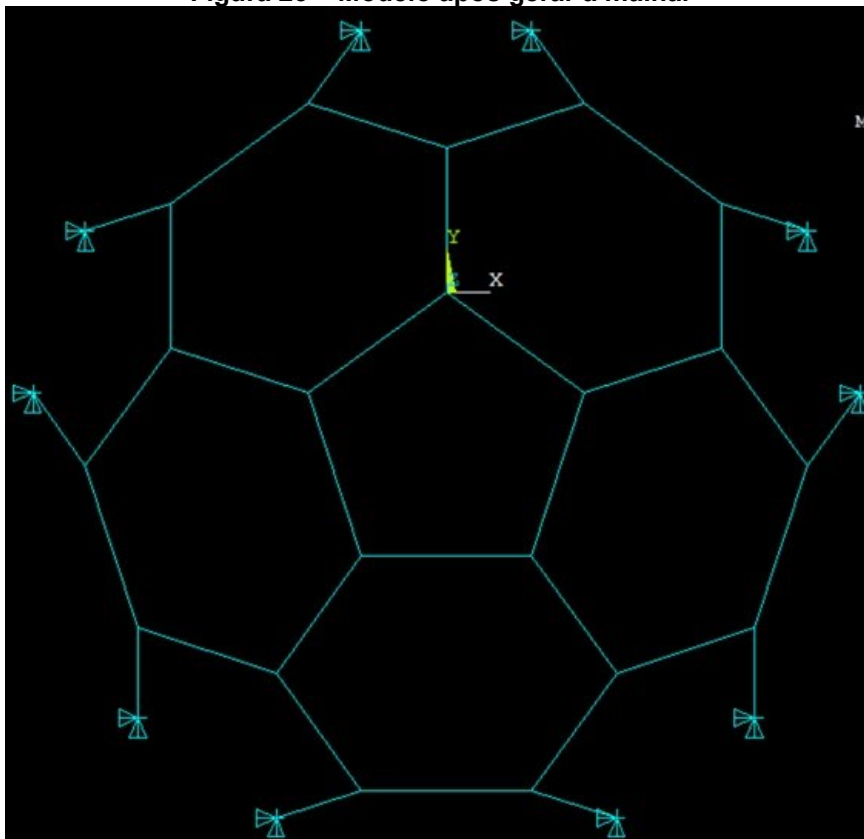


Figura 22 – Modelo discretizado.



Fonte: Autoria própria.

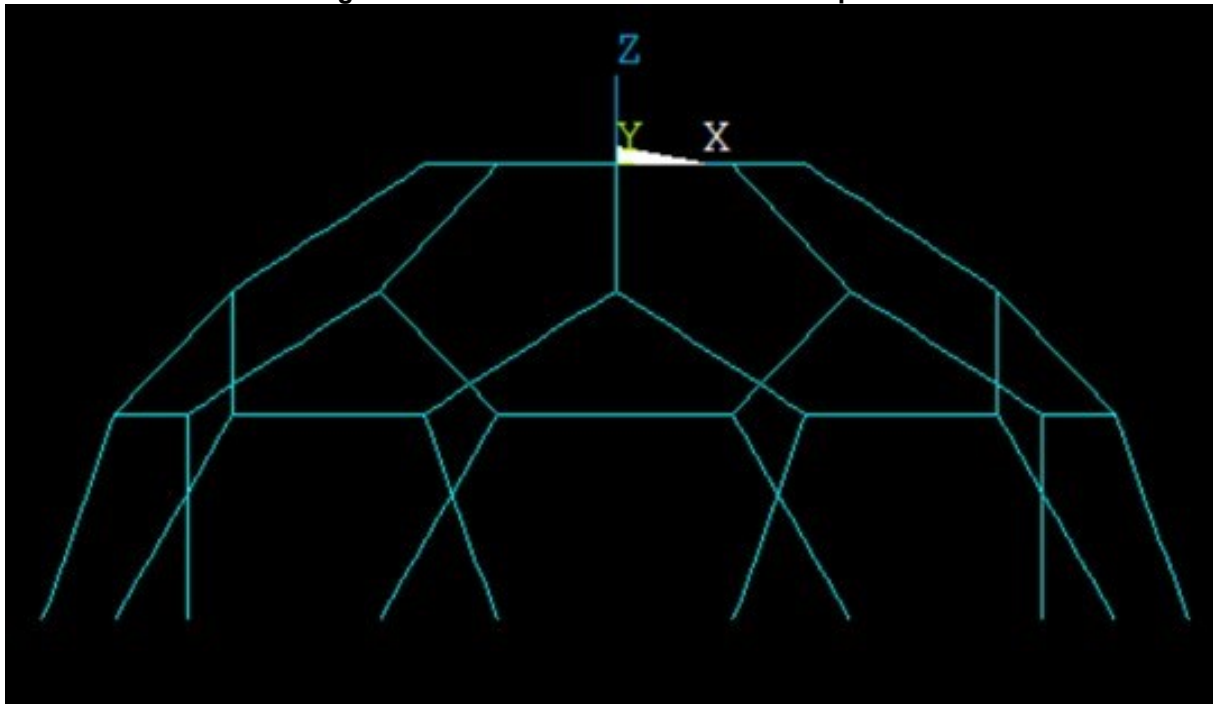
Figura 23 – Modelo após gerar a malha.



Fonte: Autoria própria.

A figura 24, mostra o modelo tridimensional da maquete, a estrutura geodésica neste estágio se encontra pronta para a simulação aplicando-se o carregamento.

Figura 24 – Modelo tridimensional da maquete.

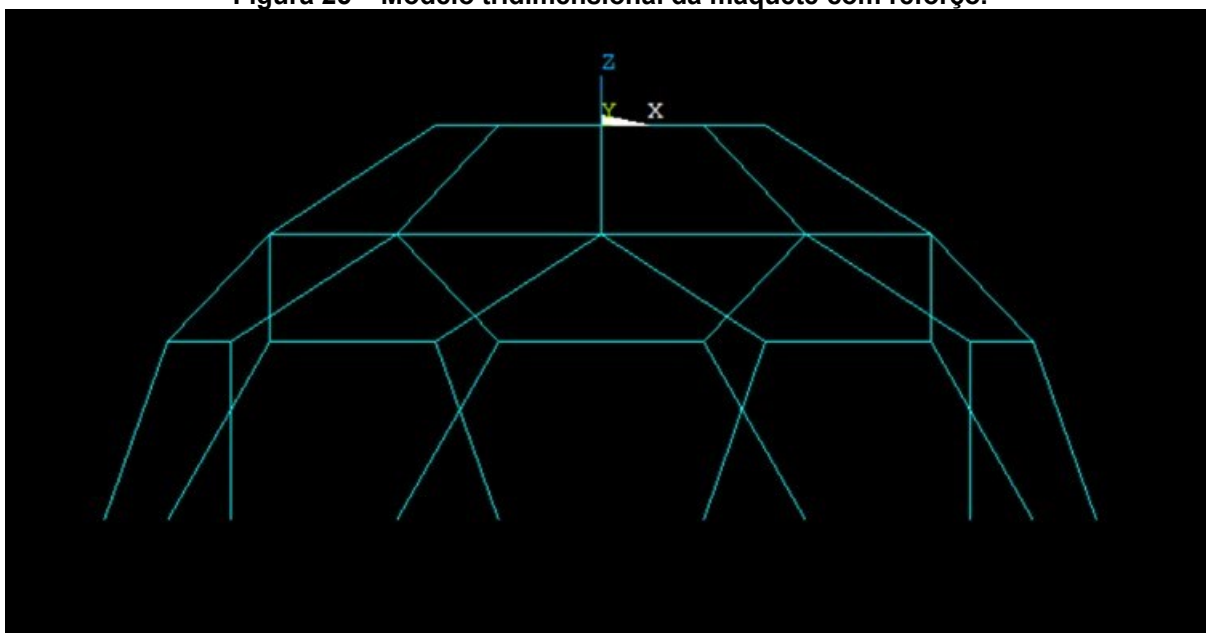


Fonte: Autoria própria.

Para otimizar a estrutura é possível aplicar reforço nesses locais. Uma solução seria amarrar esses nós entre si, utilizando por exemplo nylon como a utilizada nas amarrações.

O processo foi feito conforme o modelamento tridimensional da maquete, utilizado um modelo de material isotrópico com um módulo de elasticidade de 12,58 GPa e módulo de elasticidade do nylon adotado foi de 3 GPa conforme as características descritas no anexo B. A figura 25, mostra o modelo tridimensional da maquete com reforço.

Figura 25 – Modelo tridimensional da maquete com reforço.



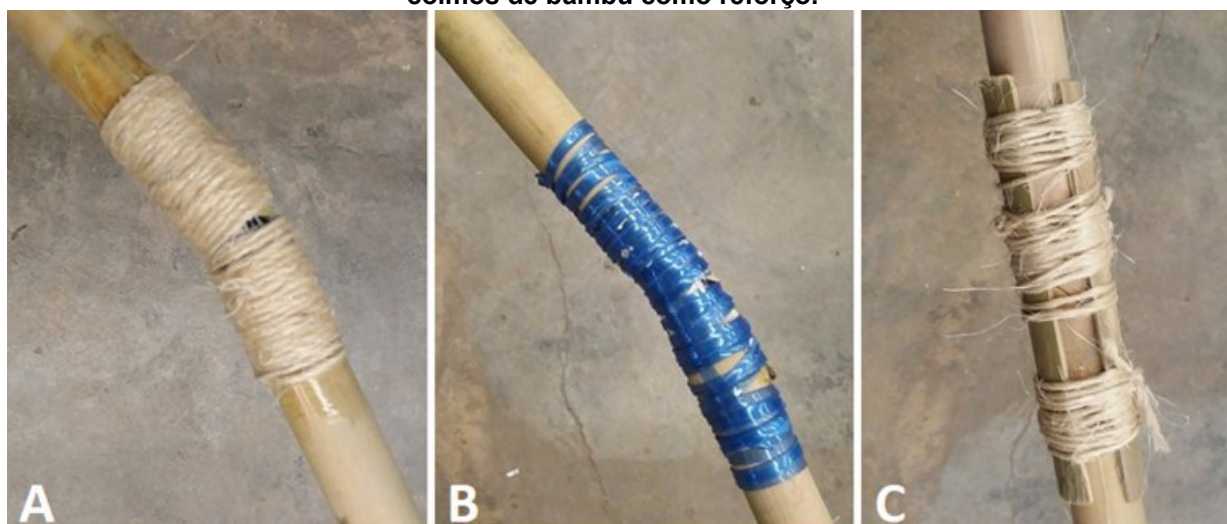
Fonte: Autoria própria.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 SELEÇÃO DE MATERIAIS DE UNIÃO E ENSAIOS INICIAIS

Inicialmente cogitou-se que o uso de resina a base de poliuretano vegetal elevaria a resistência da união e teria melhores resultados, mas na prática seu uso se mostrou de baixo valor. Na figura 26, mostra-se os corpos de prova após os ensaios iniciais. O melhor comportamento obtido foi com a amarração utilizando sisal e colmos de bambu como reforço (figura 26C).

**Figura 26 – Corpos de prova após os ensaios iniciais. (A) PET, (B) Sisal revestido, (C) Sisal e colmos de bambu como reforço.**

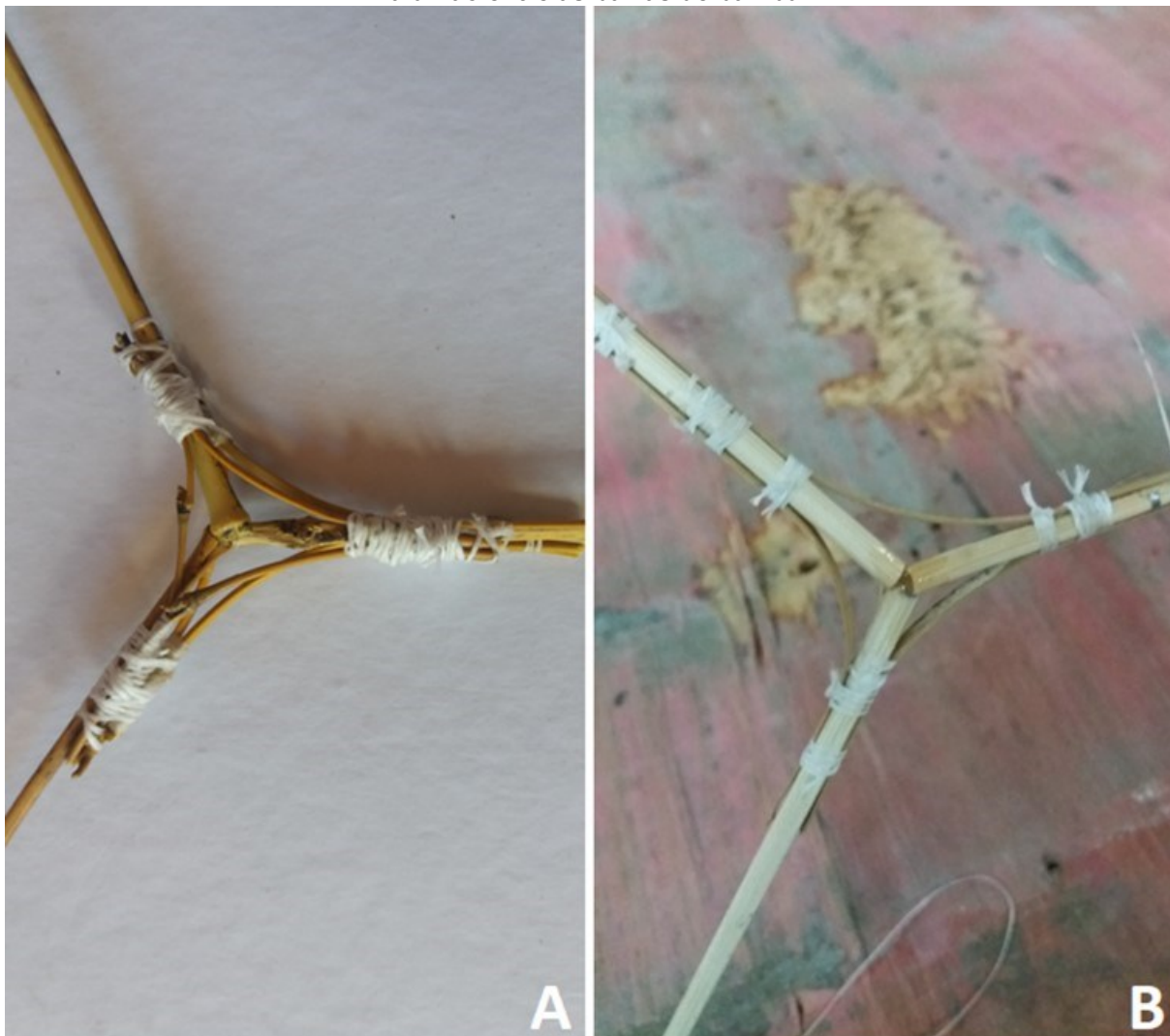


Fonte: Autoria própria.

Para solucionar o desafio das uniões espaciais, visando que a maquete estudada está em escala com arestas de 175 mm, inicialmente pensou-se em usar galhos da própria planta bambu como reforço, mas os galhos se apresentaram ser heterogêneos em diversos aspectos como diâmetro, umidade, flexibilidade, o que os torna difíceis de ser manipulados. A figura 27A, mostra os galhos amarrados na união entre as barras de bambu.

A melhor solução para a escala adotada foi a utilização de lâminas. Tais foram retiradas de colmos da espécie *P. aurea*, e amarradas nas uniões entre as barras de bambu. Na figura 27B, mostra-se as lâminas amarradas na união entre as barras de bambu.

**Figura 27 – (A) Galhos amarrados na união entre as barras de bambu, (B) Lâminas amarradas na união entre as barras de bambu.**



Fonte: Autoria própria.

Vale dizer ao leitor que os ensaios iniciais não foram quantitativos e sim qualitativos. Foram realizados apenas afim de observar o comportamento de diferentes materiais com o colmo de bambu. Evitando assim horas desnecessárias e conclusões não satisfatórias ao final do estudo.

## 4.2 MOLDE E MAQUETE

Uma propriedade que se destaca é o grande volume coberto pela estrutura geodésica de bambu. A tabela 1, mostra características do molde da estrutura geodésica de aresta 175 mm.

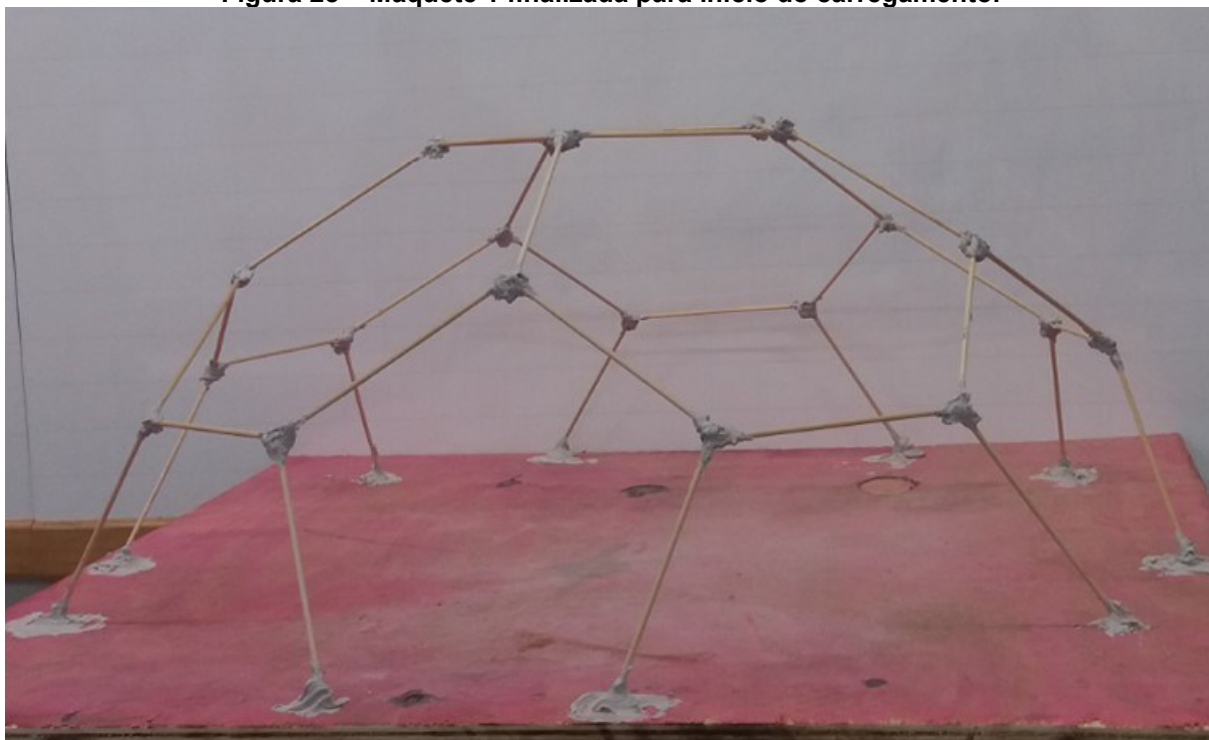
**Tabela 1 – Características do molde da estrutura geodésica de aresta 175 mm.**

Características	
Comprimento das arestas da malha	175 mm
Diâmetro	800 mm
Altura	337,81 mm
Área aproximada	1,5 m <sup>2</sup>
Volume coberto	98 cm <sup>3</sup>
Número de uniões	30 unidades
Número de arestas	35 unidades

Fonte: Autoria própria.

A figura 28, mostra-se a maquete 1 da estrutura geodésica, pronta para o primeiro ensaio de carregamento vertical.

**Figura 28 – Maquete 1 finalizada para início do carregamento.**



Fonte: Autoria própria.

A massa total da estrutura livre da maquete 1 é de 142 gramas, ou seja, se trata da massa apenas dos colmos, das amarrações e das uniões. A massa da placa não consta nesses 142 gramas.

A figura 29, mostra a maquete 2 da estrutura geodésica sem aplicação de massa plástica, pronta para o primeiro ensaio de carregamento vertical.

**Figura 29 – Maquete2 sem aplicação de massa plástica finalizada para início do primeiro carregamento.**

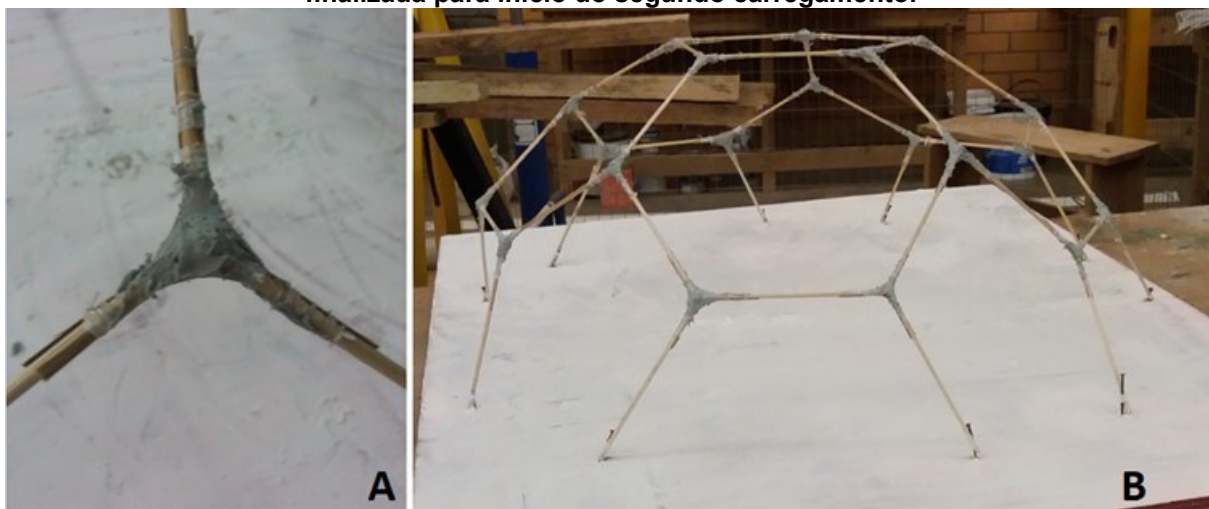


Fonte: Autoria própria.

A massa total da estrutura livre da maquete 2 sem aplicação de massa plástica é de 90 gramas, ou seja, se trata da massa apenas dos colmos, das amarrações e das uniões. A massa da placa não consta nesses 90 gramas.

A figura 30A, mostra a união durante aplicação da massa plástica na maquete 2 e na figura 30B, mostra-se a maquete 2 finalizada para o segundo carregamento. A massa total da estrutura livre é de 165 gramas, ou seja, se trata da massa apenas dos colmos, das amarrações e das uniões. A massa da placa não consta nesses 165 gramas.

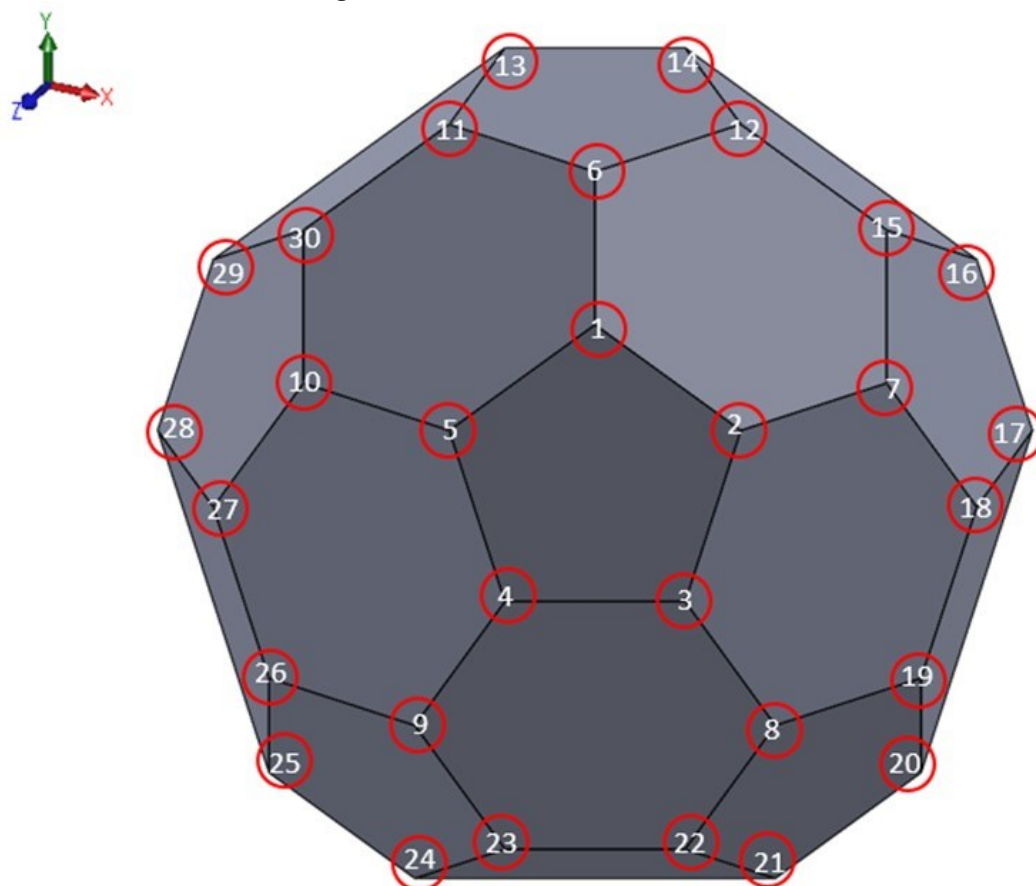
**Figura 30 – (A) União durante aplicação da massa plástica na maquete 2 e (B) maquete 2 finalizada para início do segundo carregamento.**



Fonte: Autoria própria.

A figura 31 a seguir, mostra os pontos numerados de todas as uniões. Foi utilizado um programa CAD para definir os parâmetros da estrutura geodésica tipo icosaedro truncado para o modelamento da maquete tridimensional.

**Figura 31 – Numeração das uniões.**



Fonte: Autoria própria.



Para melhor compreensão e interpretação do trabalho, será necessário dar nomes aos pontos de união. As uniões serão divididas em 3 grupos, cada grupo com sua respectiva numeração. A tabela 2 a seguir, mostra-se a nomenclatura dos grupos e os pontos de união correspondentes.

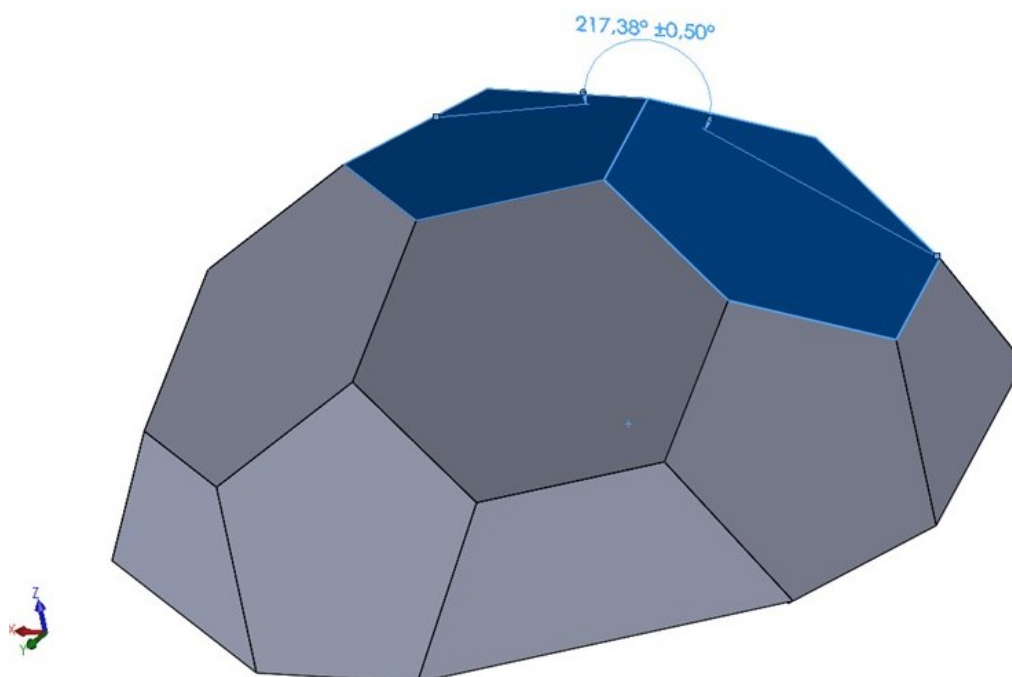
**Tabela 2 – Nomenclatura dos pontos de união entre os elementos da estrutura.**

Grupos:	Numeração correspondente:
Superior	1, 2, 3, 4 e 5
Intermediários	6, 7, 8, 9 e 10
Inferiores primários	11, 12, 15, 18, 19, 22, 23, 26, 27 e 30
Inferiores secundários	13, 14, 16, 17, 20, 21, 24, 25, 28 e 29

Fonte: Autoria própria.

Os ângulos das uniões são importantes, pois possibilitam ampliar o trabalho. Sabendo os ângulos pode-se variar e sair da escala de 175 mm. A figura 32, mostra o ângulo de  $217,38^\circ$  entre o pentágono localizado na região superior da estrutura e os hexágonos. Na figura é representado apenas um ângulo, mas todos os ângulos entre o pentágono superior e os hexágonos da geodésica são iguais.

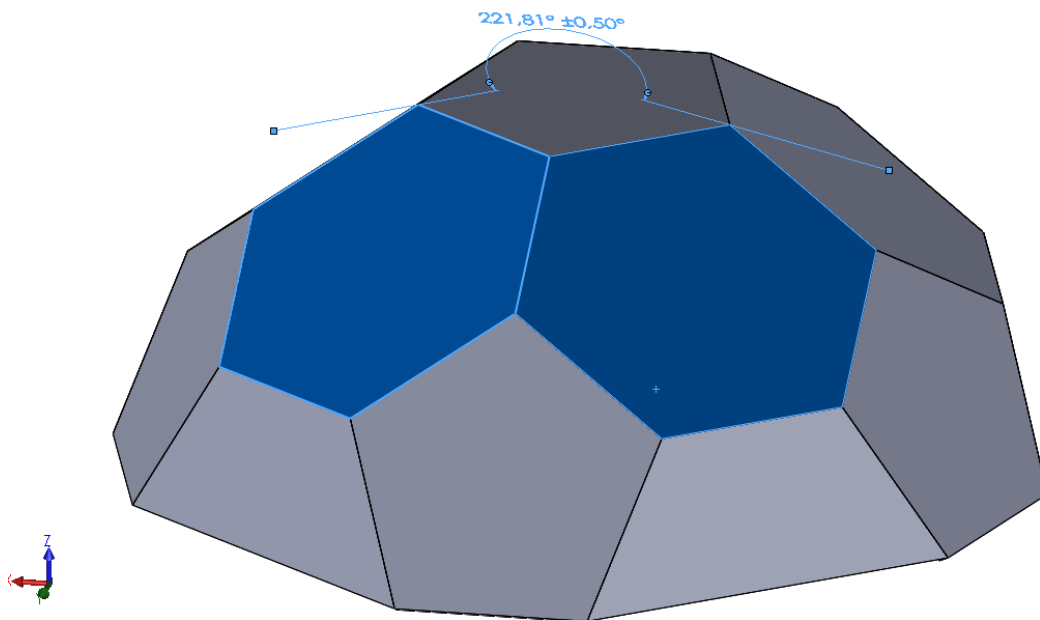
**Figura 32 – Ângulo entre o pentágono superior e os hexágonos da estrutura geodésica.**



Fonte: Autoria própria.

A figura 33 mostra o ângulo de  $221,81^\circ$  entre os hexágonos. Na figura é representado apenas um ângulo, mas todos os ângulos entre os hexágonos da geodésica são iguais.

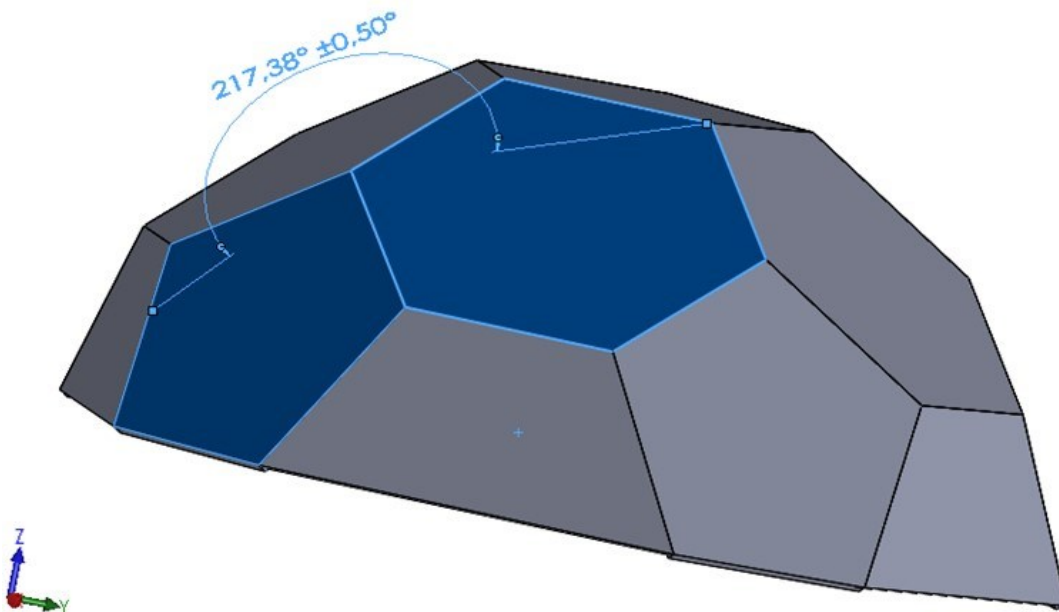
**Figura 33 – Ângulos entre os hexágonos da estrutura geodésica.**



Fonte: Autoria própria.

A figura 34 mostra o ângulo de  $217,28^\circ$  entre o hexágono e o pentágono inferior. Na figura é representado apenas um ângulo, mas todos os ângulos entre os hexágonos e os pentágonos inferiores da geodésica são iguais.

**Figura 34 – Ângulos entre os hexágonos e os pentágonos inferiores da estrutura geodésica.**



Fonte: Autoria própria.

A figura 35 mostra o ângulo de  $217,38^\circ$  entre o pentágono inferior e o meio hexágono. Na figura é representado apenas um ângulo, mas todos os ângulos entre os pentágonos inferiores e os meio hexágonos são iguais

**Figura 35 – Ângulos entre os pentágonos inferiores e os meio hexágonos da estrutura geodésica.**

A imagem mostra um modelo 3D de uma estrutura geodésica, que parece ser uma cúpula ou uma forma similar. O modelo é composto por várias faces poligonais. Duas faces adjacentes são destacadas em azul: uma face pentagonal na base inferior e uma face hexagonal (meio hexágono) na parte superior. Um ângulo entre essas duas faces é rotulado com o valor  $217,38^\circ \pm 0,50^\circ$ . À esquerda do modelo, há um pequeno sistema de coordenadas 3D com eixos X, Y e Z coloridos (verde, vermelho e azul).

Fonte: Autoria própria.

Os ângulos entre as faces das figuras geométricas refletem nos ângulos das arestas, e por consequência, reflete nos ângulos das uniões. Desta forma, pode se concluir que os ângulos entre as arestas que compõem as uniões da estrutura é de  $217,38^\circ$ . Adotando este ângulo, surge naturalmente o ângulo de  $221,81^\circ$  entre os hexágonos.

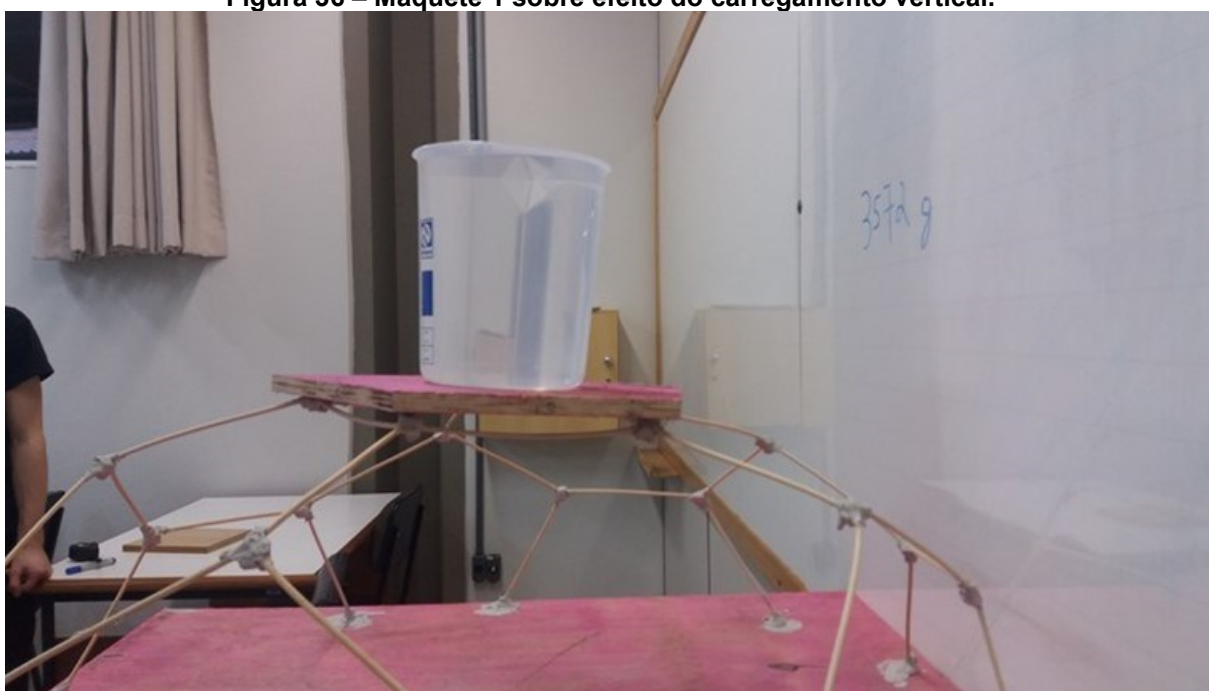
### 4.3 ENSAIO DE CARREGAMENTO VERTICAL DA ESTRUTURA

A maquete 1 foi produzida com o intuito de avaliar o comportamento da estrutura geodésica antes de utilizar a solução proposta mais refinada. Desta forma não se avaliou seu deslocamento e não se fez gráficos ou comparações de deslocamento pela força aplicada.

A mesma apresentou-se irregular ao decorrer do carregamento vertical, pois as forças se concentraram mais em uma região da maquete 1. Tal circunstância se dá devido as uniões de massa plástica não possuírem forma definida, ou seja, são irregulares pois escoam durante sua aplicação.

Desta forma a solução mostra alguns sinais negativos além da distribuição irregular, como por exemplo, não permite a utilização de coberturas, como telhados. Na figura 36, mostra a maquete 1 com o carregamento máximo, onde é possível notar uma inclinação. Indicando que a estrutura iria se romper na união em que ocorreu a inclinação.

**Figura 36 – Maquete 1 sobre efeito do carregamento vertical.**



Fonte: Autoria própria.

A figura 37 a seguir, mostra o ensaio do carregamento 1 ao carregamento máximo, onde é possível observar o comportamento da maquete 2 sem aplicação de massa plástica. A distribuição de forças se mostraram regulares, no entanto a medida

que o carregamento aumenta, a estrutura apresenta ruídos de estalo. Desta forma o carregamento cessou ao atingir um litro de água no béquer.

**Figura 37 – Maquete 2: ensaio do carregamento 1 ao carregamento máximo.**



Fonte: Autoria própria.

A estrutura sem aplicação de massa plástica apresentou insegurança ao decorrer da aplicação do carregamento. Já a estrutura com massa plástica apresenta-se mais rígida, o que evidencia que a aplicação de massa plástica trouxe resultados positivos. Em ambos ensaios não houve ruptura e nem discrepâncias entre as uniões.

A distribuição de forças se mostrou regular e ao decorrer do ensaio, nota-se que a estrutura tende a se arranjar à medida que sofre carregamento. Alguns pontos sofrem mais efeitos de deslocamentos que outros, ao final a estrutura se regula, evidenciando a distribuição de forças regulares.

A figura 38 a seguir, mostra o ensaio de carregamento 2 em execução sobre a maquete 2. É possível observar o comportamento quando a estrutura está sobre efeito do carregamento máximo.

**Figura 38 – Maquete 2: ensaio do carregamento 2 ao carregamento máximo.**



Fonte: Autoria própria.

Pode-se ver que as uniões que mais sofrem são as localizadas na região intermediária da estrutura geodésica, pois nesses pontos as barras de bambu sofreram menos deflexão. O que indica que a força aplicada foi direcionada às uniões. Na figura 39 abaixo, os círculos vermelhos indicam as uniões intermediárias.

**Figura 39 – Uniões intermediárias.**

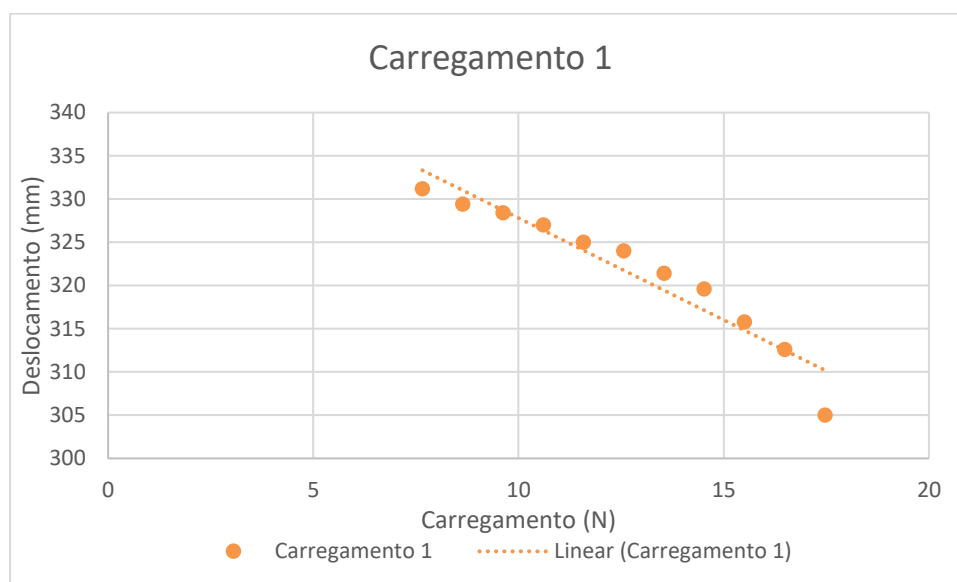


Fonte: Autoria própria.

No carregamento 1 na maquete 2, em última análise aos 17,47 N (correspondente a 1781 g), chegou-se bem próximo ao limite da estrutura, sua

variação de deslocamento foi de 26,2 mm. As barras de bambu apresentaram deflexão e a estrutura distribuiu a carga uniformemente. A figura 40, mostra a curva obtida do deslocamento ao ser aplicado o carregamento 1.

**Figura 40 – Curva de deslocamento durante o ensaio de carregamento 1 na maquete 2.**

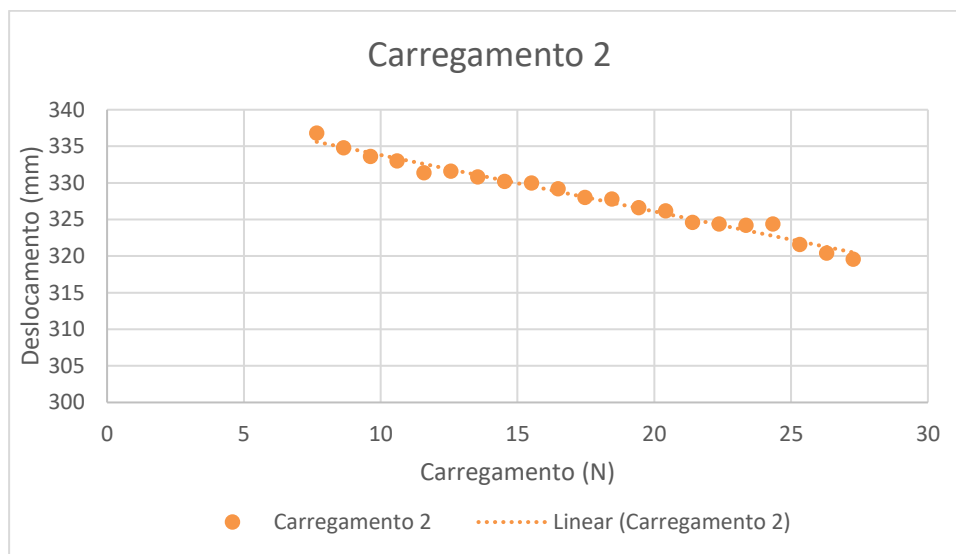


Fonte: Autoria própria.

Nota-se que o descolamento foi regular e em última análise, a variação foi muito grande. O que fez com que o ensaio fosse interrompido, em virtude de preservar a estrutura para carregamentos futuros.

No carregamento 2, na maquete 2, o ensaio foi realizado de forma similar ao carregamento 1, porém, após aplicar a massa plástica. Em última análise aos 27,27 N (correspondente aos 2781 g), a estrutura se mostrou mais segura comparado ao carregamento anterior, indicando claramente que o ensaio poderia continuar. Foi interrompido o ensaio neste momento pois atingiu-se o máximo que o béquer utilizado permite (dois litros).

A variação de deslocamento foi de 17,2 mm. A figura 41, mostra a curva obtida do deslocamento ao ser aplicado o carregamento vertical.

**Figura 41 – Curva de deslocamento durante o ensaio de carregamento 2 na maquete 2.**

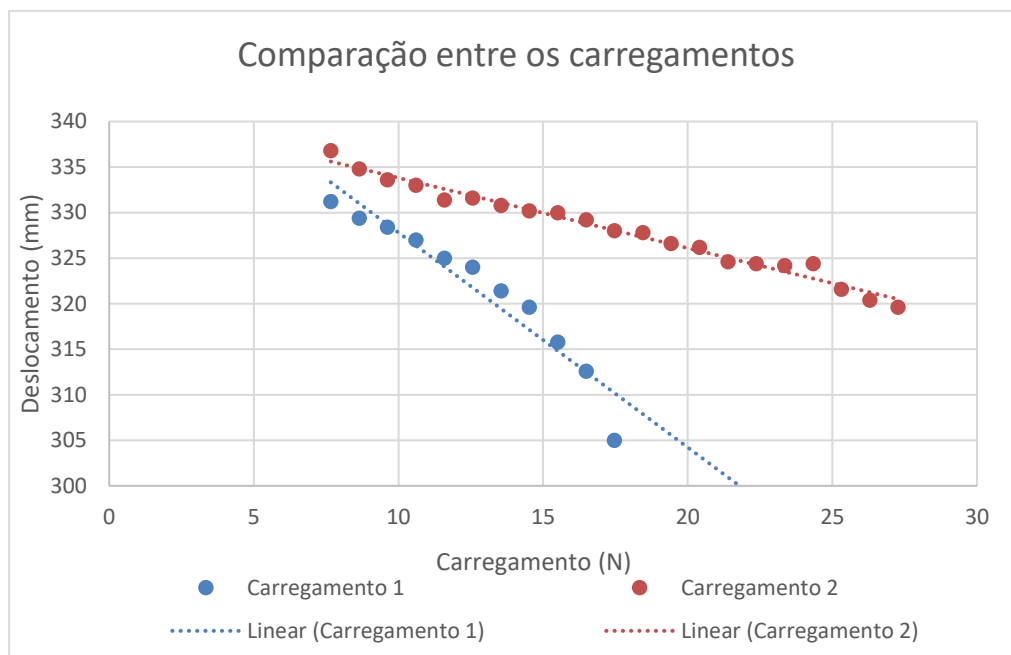
Fonte: Autoria própria.

Nota-se uma linearidade entre os pontos, pode-se observar que alguns pontos deformam mais que os outros. E após um tempo, tais pontos são compensados e assim na continuidade o deslocamento devido ao carregamento se torna equivalente entre todos os pontos distintos.

Tal comportamento torna-se evidente durante a medição de ponto a ponto, mostrando que a estrutura geodésica está sempre se adequando ao carregamento aplicado. Essa característica se mostra importante ao sistema estrutural, tornando-o confiável e regular.

A figura 42, mostra uma comparação entre os dados obtidos dos carregamentos. Onde pode-se avaliar os comportamentos ponto a ponto. Nota-se que o comportamento 2 apresentou-se mais regular e uniforme. Evidenciando que a adição de massa plástica otimizou a estrutura.



**Figura 42 – Comparação dos resultados obtidos entre os dois carregamentos na maquete 2.**

Fonte: Autoria própria.

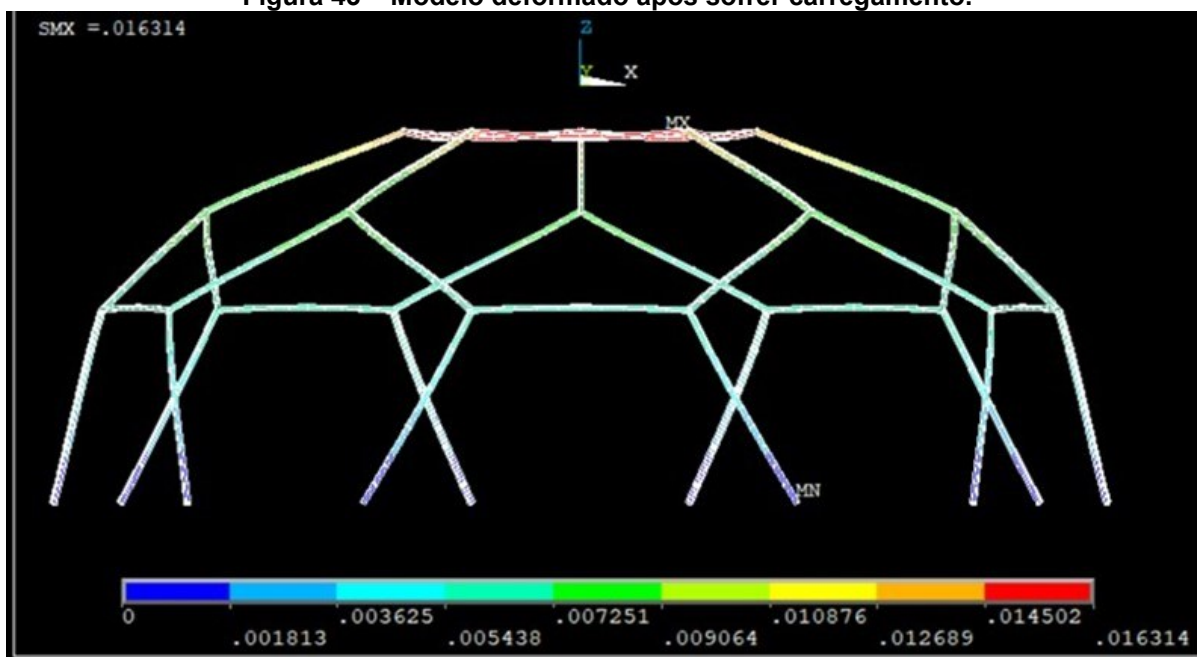
#### 4.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A resolução foi obtida através do programa de elementos finitos ANSYS considerando grandes deslocamentos. Para cada incremento de carga experimental foi feita uma simulação com a respectiva carga.

A figura 43, mostra o modelo deformado com a aplicação da força máxima de 27,27 N, correspondente ao valor máximo obtido nos ensaios de carregamento vertical. O deslocamento vertical da estrutura foi de 16,3 mm, enquanto que no ensaio de carregamento correspondente foi de 17,2 mm.

Os valores aproximados mostram que a solução com massa plástica adotada na maquete 2 é o que se aproxima melhor da simulação computacional

Figura 43 – Modelo deformado após sofrer carregamento.

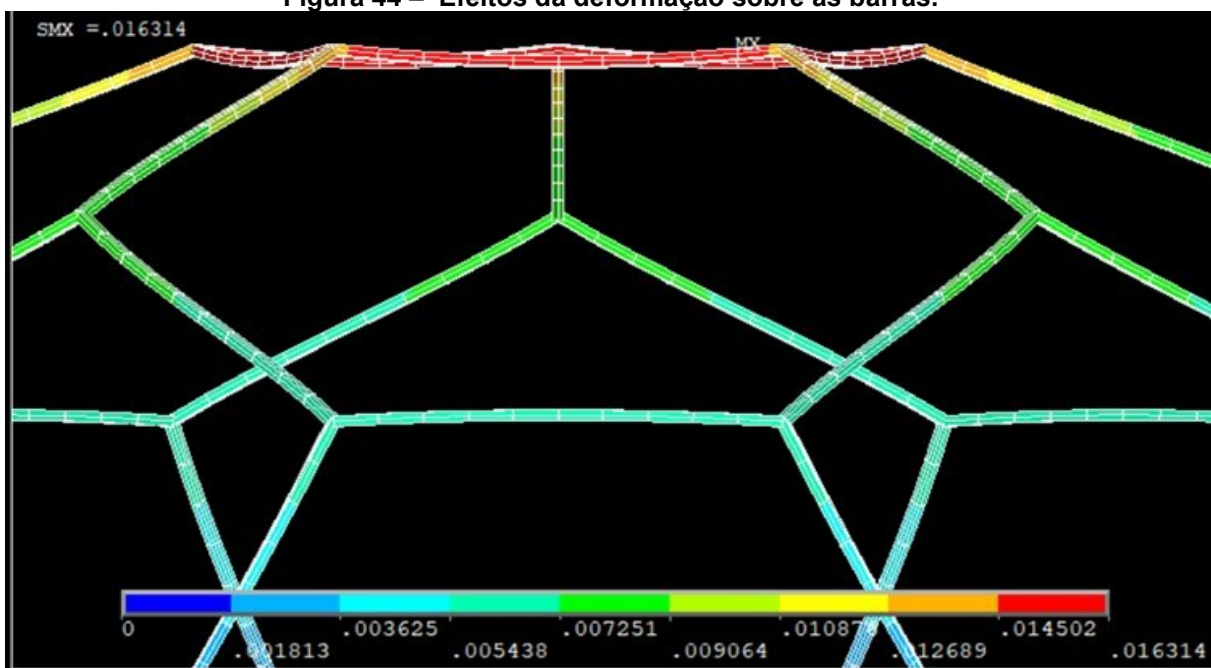


Fonte: Autoria própria.

A estrutura geodésica devido a seu formato de arco distribui de forma regular as forças de carregamento. A medida que ocorre o carregamento a estrutura se arranja e a partir de um determinado momento a variação de deslocamento se reduz consideravelmente.

A figura 44, mostra os efeitos da deformação sobre as barras. Nota-se que a parte superior da estrutura é onde ocorre maior deformação.

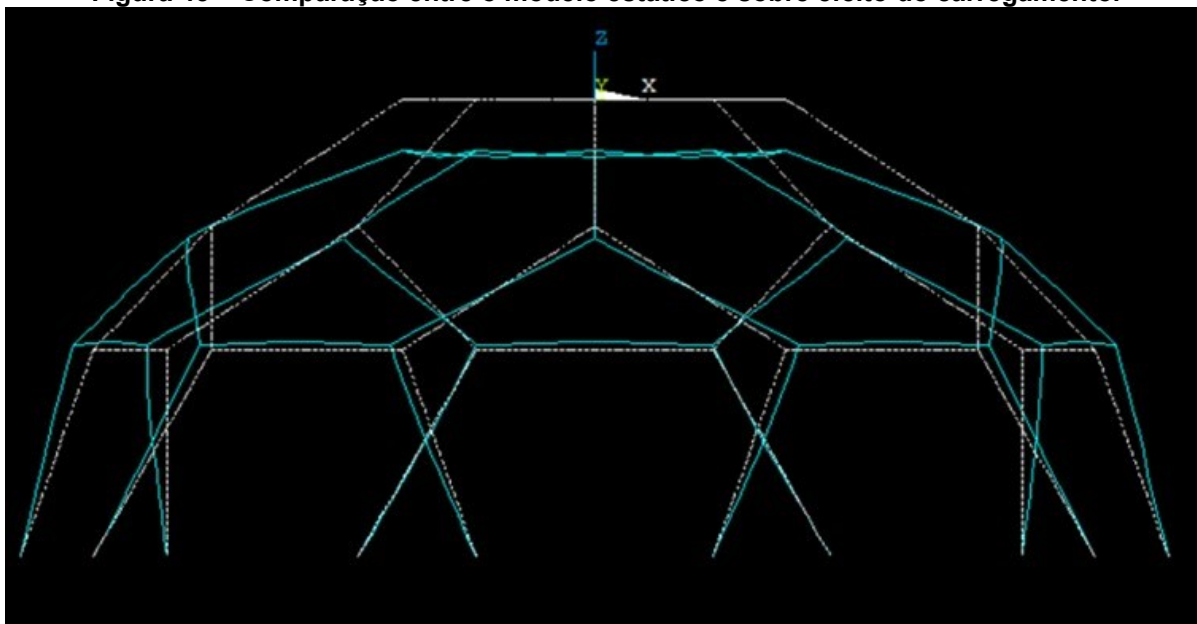
Figura 44 – Efeitos da deformação sobre as barras.



Fonte: Autoria própria.

A figura 45, mostra a relação entre o modelo da estrutura estática inicialmente e a mesma sob efeito do carregamento. Onde é possível avaliar os efeitos da deformação.

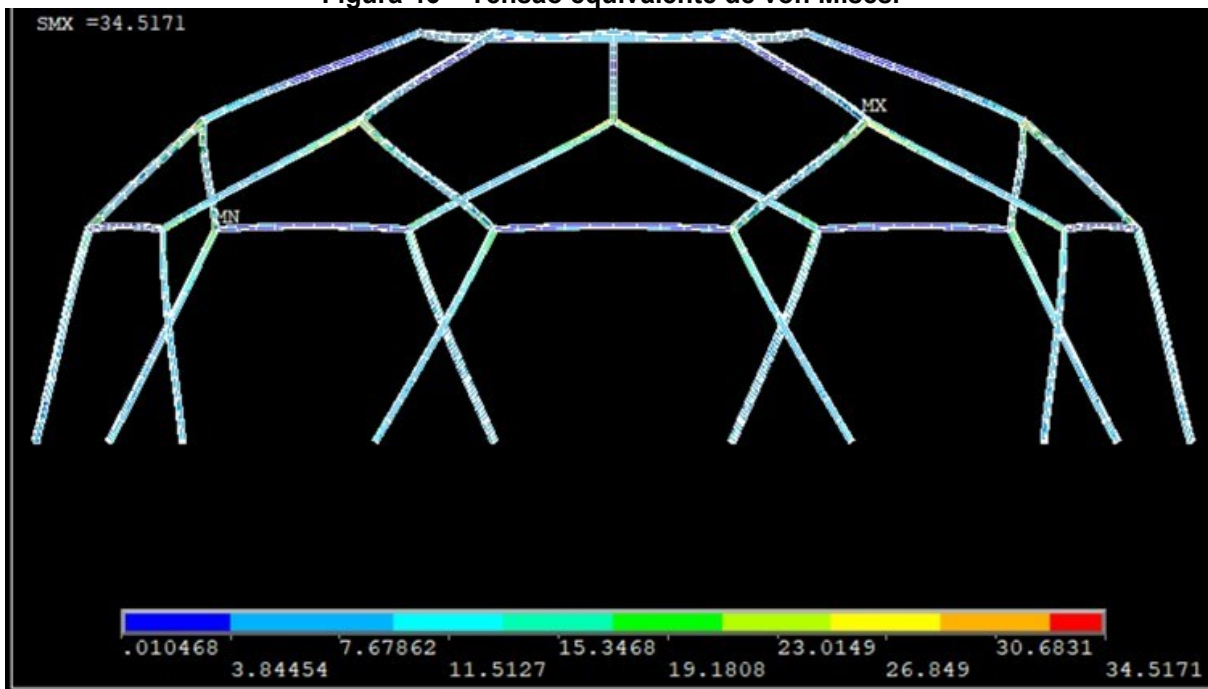
Figura 45 – Comparação entre o modelo estático e sobre efeito do carregamento.



Fonte: Autoria própria.

A distribuição de tensão equivalente de von Mises é mostrada na figura 46. A tensão máxima obtida foi de 34,51 MPa para os parâmetros adotados.

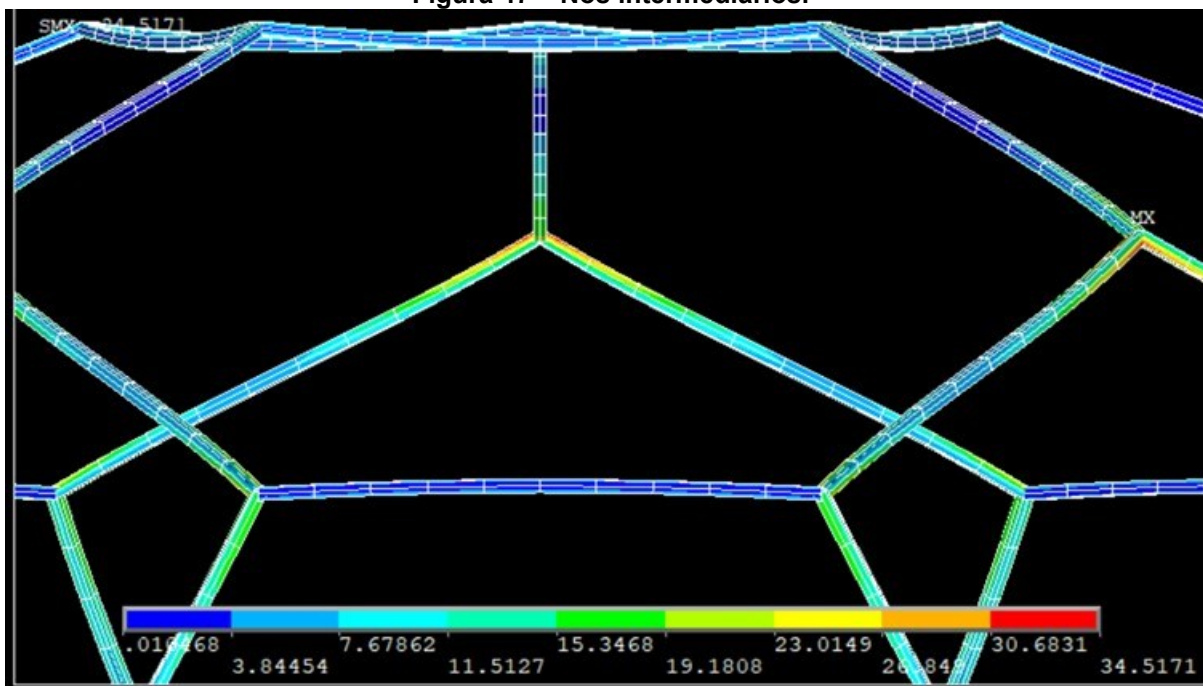
Figura 46 – Tensão equivalente de von Mises.



Fonte: Autoria própria.

O ponto de tensão máxima se localiza nas uniões dos nós intermediários. A figura 47, mostra os nós intermediários, onde pode ser analisado tal fenômeno.

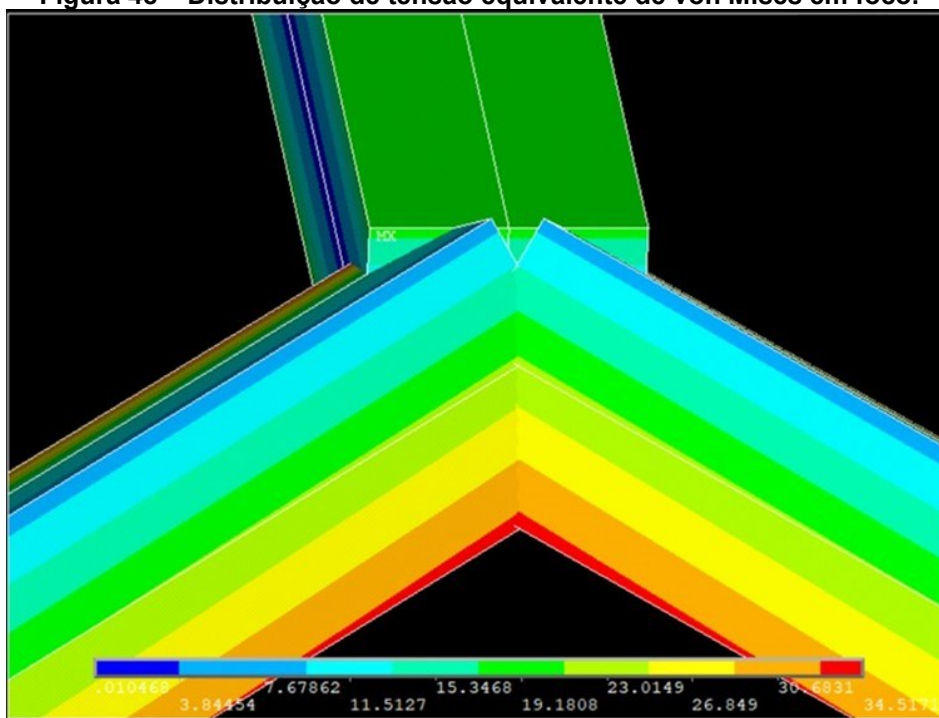
Figura 47 – Nós intermediários.



Fonte: Autoria própria.

Na figura 48, mostra em foco um desses nós intermediários, onde pode ser analisado a distribuição equivalente de tensão de von Mises.

Figura 48 – Distribuição de tensão equivalente de von Mises em foco.



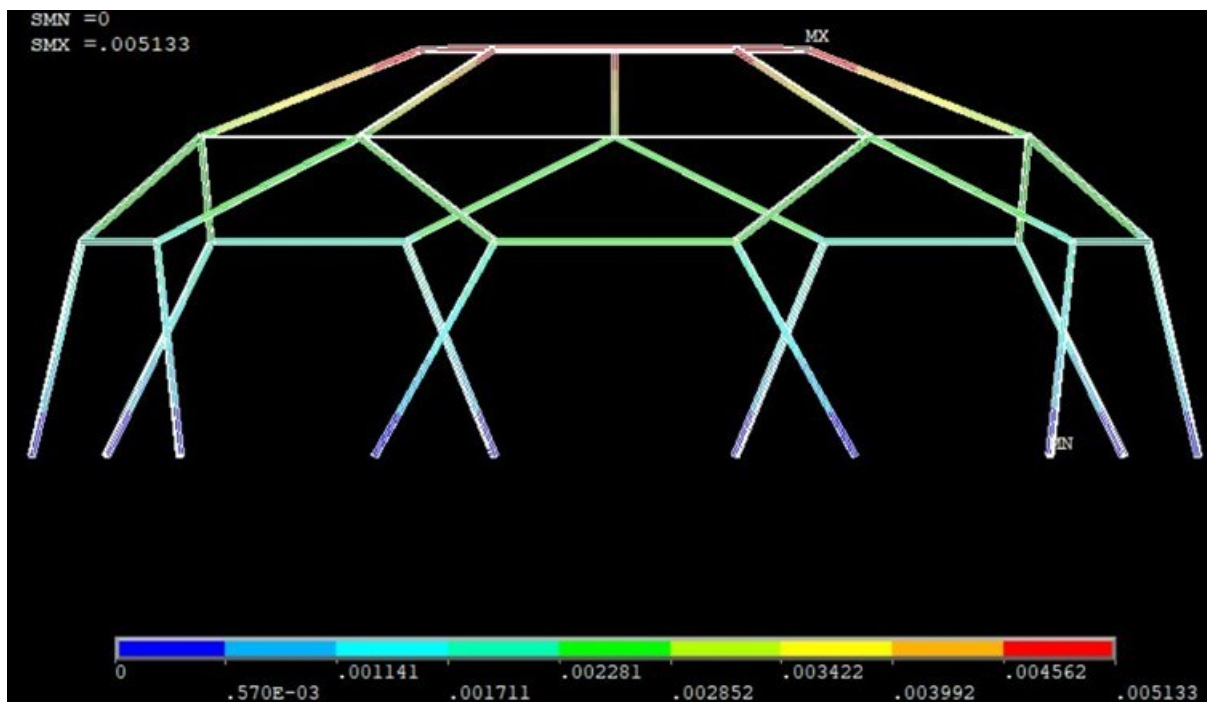
Fonte: Autoria própria.

Durante a simulação computacional é possível analisar o comportamento da estrutura mesmo sem modelar as uniões. Não foram simuladas as uniões separadamente, pois o estudo analisa a estrutura como um todo. Foram simuladas barras e a região das uniões ficaram como a junção de barra com barra.

Uma vez que o critério de falha de von Mises aponta para as uniões como região de concentração de tensões, durante o ensaio de carregamento foi possível avaliar o mesmo comportamento.

A figura 49 a seguir, mostra o modelamento da estrutura com o reforço aplicado. É possível avaliar o deslocamento da distribuição de carga sobre o modelo. O deslocamento vertical obtido foi de 5,13 mm enquanto que sem o reforço, o deslocamento foi de 16,3 mm

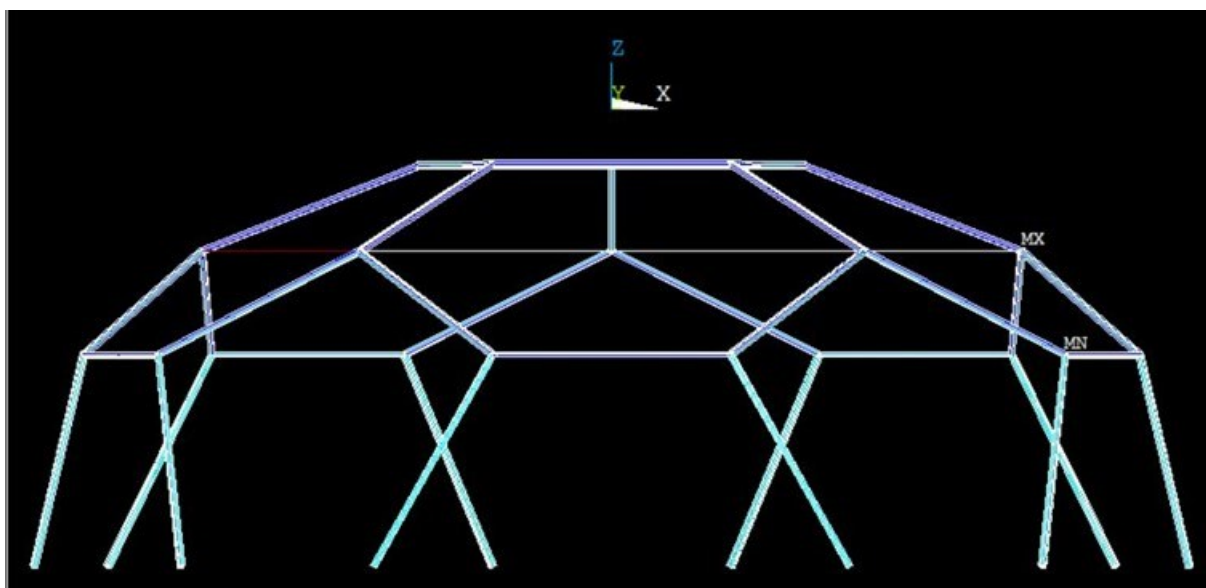
Figura 49 – Distribuição de carga no modelamento tridimensional com reforço.



Fonte: Autoria própria.

Na figura 50, mostra a distribuição de tensão equivalente de von Mises para a maquete com reforço.

Figura 50 – Tensão equivalente de von Mises na maquete com reforço.

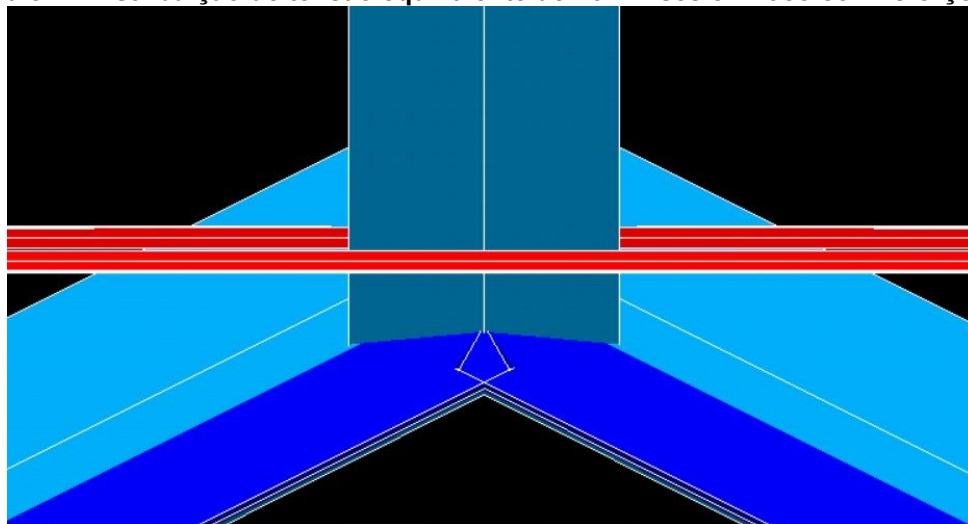


Fonte: Autoria própria.

Na figura 51, é possível ver em foco o nó intermediário com a aplicação de reforço, onde pode ser analisado a distribuição equivalente de tensão de von Mises.

É possível avaliar que as concentrações de tensão diminuem consideravelmente nas barras e passa a se concentrar no reforço.

**Figura 51 – Distribuição de tensão equivalente de von Mises em foco com reforço.**



Fonte: Autoria própria.

## 5 CONCLUSÕES

Neste trabalho pode-se avaliar o comportamento de uma estrutura geodésica do tipo icosaedro truncado construída de barras de bambu. Inicialmente foi feito um estudo, onde apresentou qual o melhor material a ser adotado para as uniões. Foram preparados corpos de prova e ensaio de flexão. Com base nas análises de comportamento, chegou-se à conclusão que a melhor solução é a utilização de lâminas de bambu amarradas nas uniões entre as barras de bambu.

A solução mostra-se positiva por permitir a utilização de cobertura como telhados, diminuir uso de materiais industriais, reduzir impactos visuais devido à combinação de materiais e conservar as propriedades da estrutura geodésica e das barras de bambu utilizadas. Essa solução foi adotada na maquete 2.

Em seguida, a metodologia adotada ilustra o desenvolvimento e evolução do estudo, inicialmente produziu-se um molde e em seguida uma maquete. Tais processos ajudaram a otimizar a estrutura geodésica, pois a cada etapa é possível avaliar critérios que surgem apenas quando o modelo assume sua forma física.

Durante o ensaio de carregamento, o primeiro comportamento observado é que as uniões intermediárias são os locais que mais sofrem com efeitos de carregamento.

Avaliando a estrutura pelo método de elementos finitos utilizando o programa ANSYS, pode-se ver que as uniões dos nós intermediários são os que mais sofrem com aplicação de carregamento. Evidenciando que os dados experimentais são compatíveis com a simulação computacional.

Com base nos resultados obtidos nos carregamentos e na simulação computacional, pode-se concluir que a estrutura geodésica devido a seu formato de cúpula, distribui de forma regular as forças de carregamento. À medida que ocorre o carregamento, a estrutura se arranja e a partir de um determinado momento a variação de deslocamento se reduz consideravelmente.

O estudo evidenciou que o ensaio de carregamento vertical de caráter experimental, é necessário para elaboração do modelo tridimensional e desta forma seguir com os procedimentos de simulação computacional.

Os resultados obtidos ajudam a concluir que ensaios simples, tipo carregamento vertical, permite extrair dados da realidade sem grandes investimentos,



e a simulação computacional ajuda a compreender melhor o comportamento avaliado. Além de permitir simular possíveis otimizações da estrutura.

O trabalho revela que o ponto crítico de uma geodésica do tipo icosaedro truncado é nas uniões intermediárias. Desta forma, para otimizar a estrutura uma solução é aplicar reforço nesses locais, amarrando as uniões entre si, utilizando por exemplo nylon como a utilizada nas amarrações.

Foi realizada simulação computacional dessa solução, e o resultado se mostrou positivo. O deslocamento sem o reforço foi de 16,3 mm, enquanto que com reforço foi de 5,13 mm. Além deste comportamento, é possível avaliar que a concentração de tensão diminui nas uniões, e o material de reforço é onde passa a concentrar tensão. Aliviando desta forma a estrutura.

Neste trabalho ficou claro que a estrutura geodésica do tipo icosaedro truncado é uma boa solução devido a simplicidade de sua forma. As uniões são feitas com três elementos e as arestas possuem o mesmo comprimento, isso facilita e otimiza o processo de construção da estrutura.

Como sugestões para trabalhos futuros há a necessidade de melhorar a simulação computacional, neste trabalho as uniões não foram modeladas. Tal aplicação, tornaria mais próximos os resultados experimentais e de simulação computacional.

Outra sugestão é aperfeiçoar as técnicas de construção utilizadas na maquete, neste trabalho as técnicas utilizadas foram manuais. Tal aplicação tornaria a estrutura mais homogênea e sólida para os procedimentos experimentais. Aproximando desta forma os resultados experimentais e de simulação computacional.

Há a possibilidade de desenvolver uniões com especificações técnicas de dimensões, materiais, ângulos e desta forma fabricar as uniões por processos de fabricação. Um método simples seria com utilização de impressora 3D.

O trabalho permite continuidade, como por exemplo propor melhores soluções para o problema das uniões entre colmos de bambu. Para que desta forma, se possa sair da escala de aresta de 175 mm para dimensões superiores. Há a necessidade de averiguar se os ângulos estão de acordo com os apresentados no programa CAD.

O trabalho se mostra um estudo constante e permite melhorias em sua metodologia e obtenção de resultados.

## REFERÊNCIAS

- CRUZ, M. L. S. **Caracterização física e mecânica de colmos inteiros do bambu da espécie *Phyllostachys aurea* : Comportamento à flambagem.** Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Área Estruturas. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. p. 134. Rio de Janeiro, RJ, 2002.
- DINIZ J. A. V. **Estruturas geodésicas - estudos retrospectivos e proposta para um espaço de educação ambiental.** Dissertação de programa de pós-Graduação do departamento de Engenharia Civil. PROPEC p. 143. Ouro Preto, SP, 2006.
- FISH, J; BELYTSCHKO, T. **A first course in finite element analysis.** Editora WILEY p. 327. England, 2007.
- GHAVAMI, K.; MARINHO, A. B. **Propriedades físicas e mecânicas do colmo inteiro do bambu da espécie *Guadua angustifolia*.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 9, n. 1, p. 107–114, 2005.
- HIDALGO-LÓPEZ, Oscar. **Bambu su cultivo e aplicaciones en : Fabricacion de papel, Construcion, Arquitectura, Ingeniería y Artesania.** Cali, Colômbia, Estudios Tecnicos Colombianos Ltda. 318p. 1974.
- JUNIOR, J. D. M. **Fibras de sisal: estudo de propriedades e modificações químicas visando aplicação em compósitos de matriz fenólica.** Tese apresentada ao Instituto de Química de São Carlos, da Universidade de São Paulo para obtenção do título de doutor em ciências (Físico-química) p. 272, 2006.
- LANGDON D. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/796023/classicos-da-arquitetura-biosfera-de-montreal-buckminster-fuller>>. Acesso em 18, Set., 2018.
- LIESE, W.; KÖHL, M. **Bamboo: The plant and its uses.** Editora Springer, ed 2015. p.356. 2015.
- MAOYL, F.; BANIK, R. L. **Bamboo production systems and their management** 1993.
- MARINHO, N. P. **Características das fibras do bambu (*dendrocalamus giganteus*) e potencial de aplicação em painéis de fibra de média densidade (MDF).** Dissertação à obtenção de título de mestre. p. 141. UTFPR, Curitiba, 2012.
- NYLON Fibras Sintéticas. Disponível em: <<http://portalvirtuhab.paginas.ufsc.br/files/2014/08/ACV-NYLON.pdf>>. Acesso em 07,

mai., 2019.

OLIVEIRA, M. F. A. **Propriedades físico-mecânicas de duas espécies de bambu termorretrificadas Bambusa tuldoides Munro E Phyllostachis aurea Rivière & C. Rivière.** p. 64, 2012.

OSTAPIV, F. **Produção e uso de materiais compósitos bambu-PET na construção civil popular.** Capítulo de: Bambus no Brasil, da Biologia à Tecnologia. 1ª ed. ICH-Instituto Ciência Hoje, pág. 494 a 510, RJ, 2017.

OSTAPIV, F.; LIBRELOTTO, L. I. **Bambu - Caminhos para o desenvolvimento sustentável no Brasil.** Capítulo de: Os principais bambus no Brasil, pág. 13 a 28; Capítulo de: Propriedades anatômicas, físicas, químicas e mecânicas do bambu e ensaios para sua determinação, pág. 43 a 69; Capítulo de: Processos de manufatura para o bambu, pág. 127 a 148. UFSC, Florianópolis, 2019.

OSTAPIV, F.; SALAMON, C.; STAHLSCHEMIDT, J.; BETT, C.F. **“Estudos iniciais para ensaios e construção de cúpulas geodésicas usando colmos de bambu”.** MIX Sustentável, v.4, n.1, p. 108-116. UFSC, Florianópolis, 2018.

PEREIRA, M. A. R. **Projeto bambu - introdução de espécies, manejo, caracterização e aplicações.** Bauru. p. 210, 2012.

Pizzani Química Industrial. Disponível em:  
<<https://www.soldaafrio.com.br/site/devcon-metalica/10240-massa-plastica-steel-5-minute-sf.html>> Acesso em 07, jun., 2019.

RAO, I. V. R.; SASTRY, C. B. **Engineering and Utilization**, 1993.

REBELLO, Y. **Bases para Projeto Estrutural na Arquitetura.** 4.ed. São Paulo, p. 288, 2007.

ROSA L. M. **A maquete e os processos projetuais: ideia e criatividade em práticas de ateliê.** Pelotas . p 272, 2016.

SILVA, B. B. R. DA. **Desenvolvimento de Adesivos de Poliuretano a Base de Óleo de Mamona.** p. 84, 2006.

SILVA, R. M. DE C. E. **O bambu no brasil e no mundo.** September, p. 45, 2005.

TERNI A. W.; BITTENCOURT R. M.; FERREIRA J. B. **O desenvolvimento de**

**experimentos para auxílio do ensino de estruturas de coberturas de madeira nos cursos de engenharia civil.** UNESP, Guarantiguetá, 2001.

VIEIRA, É. P. **Produção digital de maquetes arquitetônicas: um estudo exploratório.** Campinas, p. 112, 2007.

XIAOLIN C.;YIJUN L. **Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench.** 2ed. CRC Press, p. 390 , 2015.

YU, H. Q.; JIANG, Z. H.; HSE, C. Y.;SHUPE, T. F. **“Selected physical and mechanical properties of Moso bamboo (Phyllostachys pubescens).”** J. Trop. For. Sci., 258–263, 2008.

## APÊNDICE A – MATERIAIS UTILIZADOS NOS ENSAIOS INICIAIS

### Ensaio iniciais

Para realizar os ensaios iniciais no estudo das uniões, será utilizado colmos de bambu com os materiais escolhidos (PET, sisal revestido com a resina de óleo mamona, amarração utilizando sisal e colmos de bambu como tala). Produzindo assim corpos de prova. A importância dos ensaios iniciais será em determinar se os materiais escolhidos são justificáveis ou não.

Estes materiais foram escolhidos pois apresentam ser uma solução promissora, e os motivos que levam a deduzir que terão resultados positivos são:

- Não irá causar cisalhamento, como o que ocorre com o uso de pregos, porcas e parafusos;
- São maleáveis, o PET e o Sisal permitem uma infinidade de possibilidades de uso;
- São palpáveis, não necessita de uma habilidade elevada do operador;
- Seu preço de mercado é relativamente baixo em comparação aos demais materiais. O PET por exemplo pode ser obtido por coleta, possibilitando a reciclagem deste material;
- São leves em relação a outros materiais.

O ensaio de flexão normalmente consiste na aplicação de uma carga crescente em determinados pontos em uma barra. Neste estudo por questão de praticidade e que outros estudiosos possam reproduzir este ensaio mecânico sem problemas, o ensaio de flexão será realizado por um método simples. Se aplicará uma carga crescente na extremidade dos colmos de bambu da espécie.

Há uma grande dificuldade de obter alguma norma de ensaio mecânico para os colmos de bambu que satisfaça a situação estudada. Desta forma, para validar o estudo, será realizado um lote estatístico no próximo estágio do estudo utilizando o material que se obteve os melhores resultados nos pré-testes.

Inicialmente, será realizado um ensaio de flexão como o colmo sem nenhum material adicional, afim de se obter as propriedades mecânicas do colmo. Em seguida se realizará outro ensaio utilizando corpos de prova para observar seu

comportamento na união, que se realizará com o material PET, com o sisal revestido com a resina e ao final utilizando sisal com os colmos de bambu como reforço.

#### Polietileno Tereftalato – PET

O polietileno tereftalato – PET, se trata de um material polímero semicristalino, termoplástico, ou seja, que pode ser conformado termicamente e pode ser reciclado muitas vezes. Tais características tornam o material vital para uso como na fabricação de embalagens de bebidas por exemplo.

É um material leve, possui elevada resistência mecânica, ao impacto, boa estabilidade química. Além dessas características possui uma baixa permeabilidade aos gases, agindo assim como uma barreira. A figura 52, mostra o material PET utilizado no estudo.

**Figura 52 – Material PET.**



Fonte: Aatoria própria.

A PET chegou ao Brasil em 1988, e sua produção de embalagens segundo dados da Associação Brasileira de Embalagens PET (2013), vem crescendo ano após ano. Em 2008 por exemplo, a produção foi de 470 mil toneladas, sendo 253 mil toneladas recicladas. Já em 2012 houve um aumento da produção, para 675 mil toneladas, e recicladas 331 mil toneladas.

No entanto o volume de embalagens que acabam nas galerias de água, tais como rios, bosques, florestas, mangues, praias, oceano é imenso. Causando gravíssimos impactos ambientais, causando muito sofrimento na fauna e a flora. Além da poluição visual que se gera (OSTAPIV, 2017).

Por ser um material quimicamente estável, as embalagens PET que acabam no meio ambiente não se degradam. O tempo de degradação natural costuma variar de 400 a 800 anos. Há certas implicações que não podem ser ignoradas:

- Se as embalagens estiverem tampadas, pois desta forma elas não se compactam. Originando diversos problemas nos aterros sanitários e nos solos, inclusive nas encostas de morros;
- Se as embalagens estiverem abertas, podem reter água e virar criadouros de mosquitos vetores de doenças, acarretando sérios problemas de saúde pública.

## Sisal

O sisal é originário do México, seu nome popular deriva de uma erva nativa chamada *zizal-xiu*. Indícios revelam que o sisal foi exportado ao Brasil em meados de 1903 no estado da Bahia, e posteriormente transferido a outros estados nordestinos. Atualmente o Brasil é um dos maiores produtores mundiais de fibras de sisal, onde cerca de um milhão de pessoas dependem desta cultura para sobreviver. A figura 53, mostra o sisal utilizado no estudo.

**Figura 53 – Material sisal.**



Fonte: Autoria própria.

O cultivo da planta se destaca por ser muito simples, e é pouco exigente de maquinários e de mão de obra especializada. Os tratamentos no cultivo se resumem a capina e a erradicação dos brotos.

Em 2004 por exemplo, o Brasil já produzia cerca de 135 mil toneladas segundo o Conselho Nacional de Abastecimento (CONAB). Sendo que 95% desta produção foram extraídas de municípios pertencentes a região do semiárido da Bahia. Este dado nos aponta o quanto tem relevância esta cultura nesta região.

Ainda nos estudos realizados pela CONAB, indica que a maior parte da produção de fibra de sisal é destinada à exportação. O que ocorre tanto na forma de fibra crua quanto na forma manufaturada (JUNIOR, 2006).

## Resina de Mamona

Nos dias atuais, há vários materiais utilizados como base na obtenção de adesivos, como por exemplo, policrilato, poliacetato, silicone, poliuretano entre outros. O composto poliuretano tem se mostrado eficiente como adesivo, devido a sua estrutura polimérica que permite a obtenção de diferentes propriedades.

A mamona (*Ricinus cummunis*) é uma planta de clima tropical de grande potencial oleoquímico. O ácido ricinoléico é o maior componente do óleo de mamona, que é o constituinte mais importante da semente da mamona. Vale destacar que o óleo de mamona é bastante estável em variadas condições de pressão e temperatura.

Pode-se definir os adesivos como uma substância que é capaz de manter dois substratos unidos através do contato de suas superfícies. O termo adesivo confere uma gama de produtos, que são comumente conhecidos como colas, cimentos, pastas e selantes. (SILVA, 2006)

Vários métodos de fixação mecânica como rebites, parafusos, grampos, costuras, soldas e saturadas foram substituídos por adesivos em diversas situações. Como vantagens dos adesivos, pode-se citar:

- Maior uniformidade na distribuição da tensão;
- Redução da massa na junta;
- Resistência à vibração.

No estudo foi utilizada resina a base de poliuretano vegetal (derivado do óleo de mamona). A figura 54 a seguir mostra o produto. A resina se divide em dois



componentes, onde tem que realizar a mistura de 1 x componente A para 1,5 x componente B. Desta forma se obtém seu efeito adesivo.

Figura 54 – Resina de mamona utilizada no estudo.



Fonte: A autoria própria.

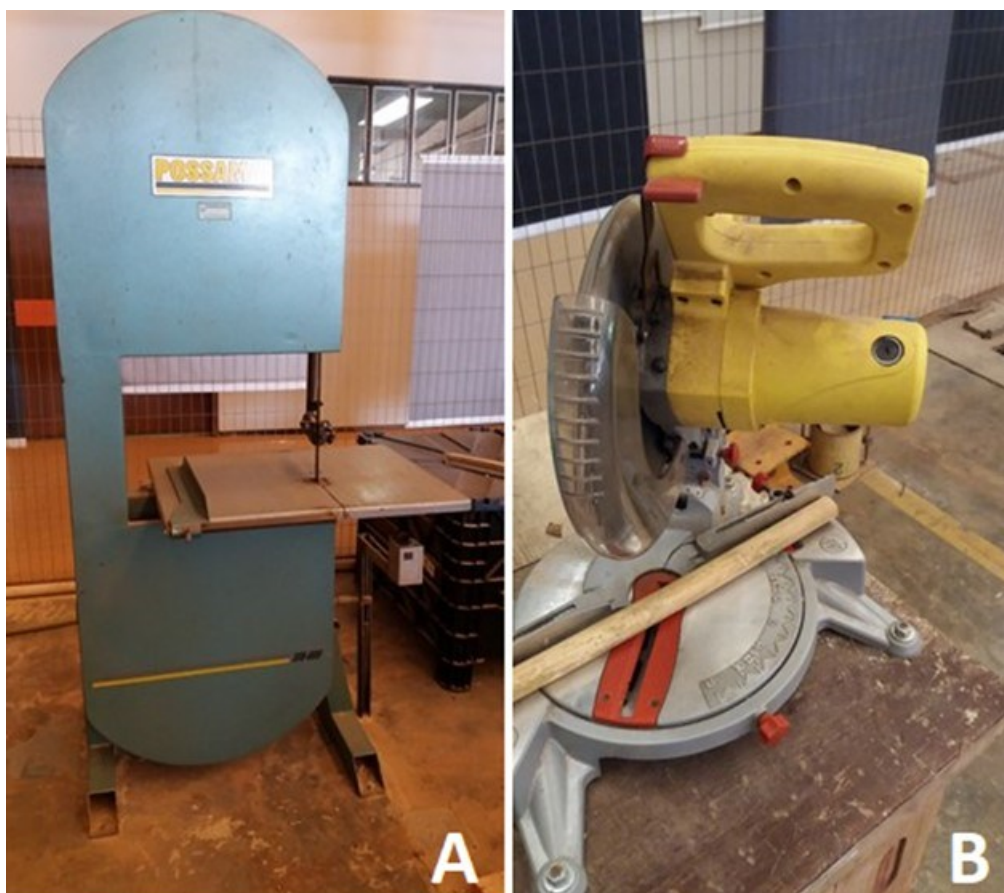
## APÊNDICE B – METODOS UTILIZADOS NOS ENSAIOS INICIAIS

### Preparação dos corpos de prova

Cada corpo de prova do colmo será selecionado procurando ser o mais uniforme possível. Para que dessa forma se obtenha resultados concisos. Evitando variações de diâmetro.

Após a seleção, o colmo será cordado nas extremidades (figura 55A) para remover imperfeições e se obter um corpo de prova mais uniforme possível. Em seguida será cortado novamente na região entre nós, para que possa realizar a união com o material escolhido. Este corte será feito um ângulo de  $45^\circ$  (figura 55B) com o intuito de ampliar sua área de contato, para que se obtenha melhores resultados. Para tal foi usado uma serra giratória que permite obter o ângulo desejado.

**Figura 55 – (A) Serra utilizada nos cortes das pontas, (B) Serra utilizada para se obter o ângulo de  $45^\circ$ .**



Fonte: Autoria própria.

Uma vez cortado, o bambu será lixado na região próxima ao corte. O lixamento irá provocar cavidades que servirão para que o material utilizado penetre melhor na região de união. Por isso a importância deste processo. O resultado pode ser observado na figura 56 a seguir.

**Figura 56 – Colmo após ser cortado e lixado.**



Fonte: Aatoria própria.

Após cada colmo ser lixado, revestiu-se a região de união com uma fita adesiva, facilitando assim o processo de amarração. Após fixar a fita, se lixou novamente tanto a região do colmo quanto a da fita. Afim de se obter a melhor penetração possível do material de união. Na figura 57 a seguir, mostra-se o resultado do processo.

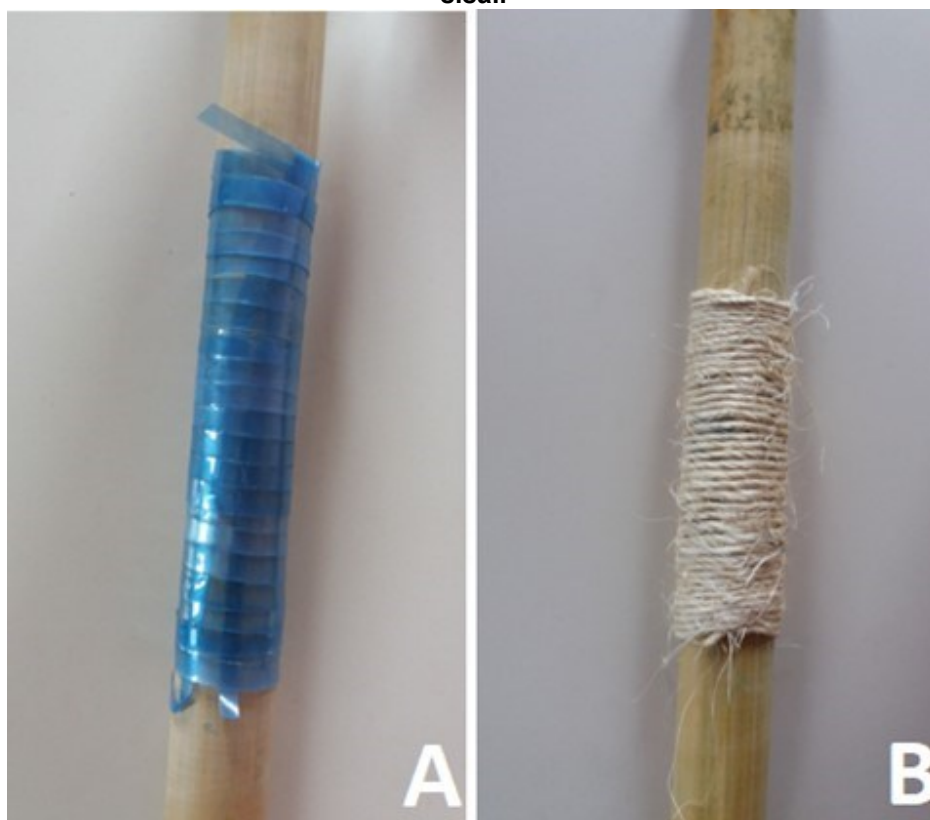
**Figura 57 – Colmo com a fita adesiva após ser lixado.**



Fonte: Aatoria própria.

Em seguida foi feita a amarração utilizando o devido material selecionado. Esta amarração pode ser realizada de forma tradicional e sem muitas técnicas, possibilita um maior número de pessoas que possa reproduzir esta ação. É importante que a amarração fique firme e uniforme. Na figura 58 a seguir, mostra o resultado da amarração tanto para o PET (figura 58A) quanto para o sisal (figura 58B).

**Figura 58 – (A) Corpo de prova amarrado com PET, (B) Corpo de prova amarrado por com sisal.**



Fonte: Autoria Própria.

Para o processo de amarração com sisal utilizando colmos de bambu como tala, não se usou a fita adesiva, pois o próprio colmo facilita a amarração. Este processo se mostrou mais fácil, pois não se necessitou de nenhuma aplicação após a amarração. Na figura 59 a seguir, mostra-se como ficou o corpo de prova.

**Figura 59 – Corpo de prova utilizando colmos de bambu como reforço.**



Fonte: Autoria própria.

Durante o processo de amarração, notou-se que o sisal é mais fácil que o PET para se manusear. Como o PET já tem um formato pré-definido, isso dificulta os movimentos, tornando imprevisível ao efetuar o processo. Em alguns casos, teve-se que retornar ao início, causando incômodo. O sisal por sua vez é muito prático em seus movimentos, o que se tornou seu manuseio mais calmo e previsível.

Para que o PET possa se fixar melhor na união, se aquecerá levemente o PET com o uso de uma fonte de calor, que pode ser um soprador por exemplo. Este breve aquecimento irá fazer com que o PET se contraria, fixando-o no colmo. Na figura 60 a seguir, mostra-se como ficou a união após o aquecimento.

**Figura 60 – Corpo de prova com o PET após o aquecimento.**

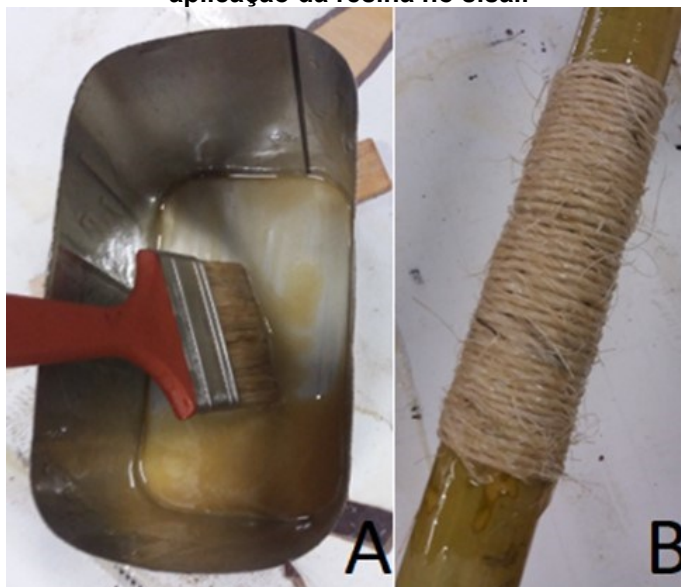


Fonte: Autoria Própria.

Após a amarração com o sisal, foi aplicada a resina. Foi feita a mistura em um recipiente e misturado utilizando um pincel. Na figura 61A, mostra-se o recipiente com a mistura pronta. A aplicação da resina foi feita com o uso de pincel, no sentido

da esquerda para a direita e sempre pressionando o sisal, para se obter o máximo de absorção da resina. O resultado pode ser visto na figura 61B.

**Figura 61 – (A) Recipiente com a mistura dos componentes prontos, (B) Resultado após a aplicação da resina no sisal.**



Fonte: Autoria própria.

Pode-se notar que a resina se mostra muito resistente e é de fácil aplicação. Um fator positivo da resina, e a ausência de cheiro, característica não observada em outras resinas. Após a aplicação da resina no sisal, se esperou por 24 horas para que se secasse. O resultado pode ser visto na figura 62.

**Figura 62 – Corpo de prova com o sisal mais a resina já seca.**

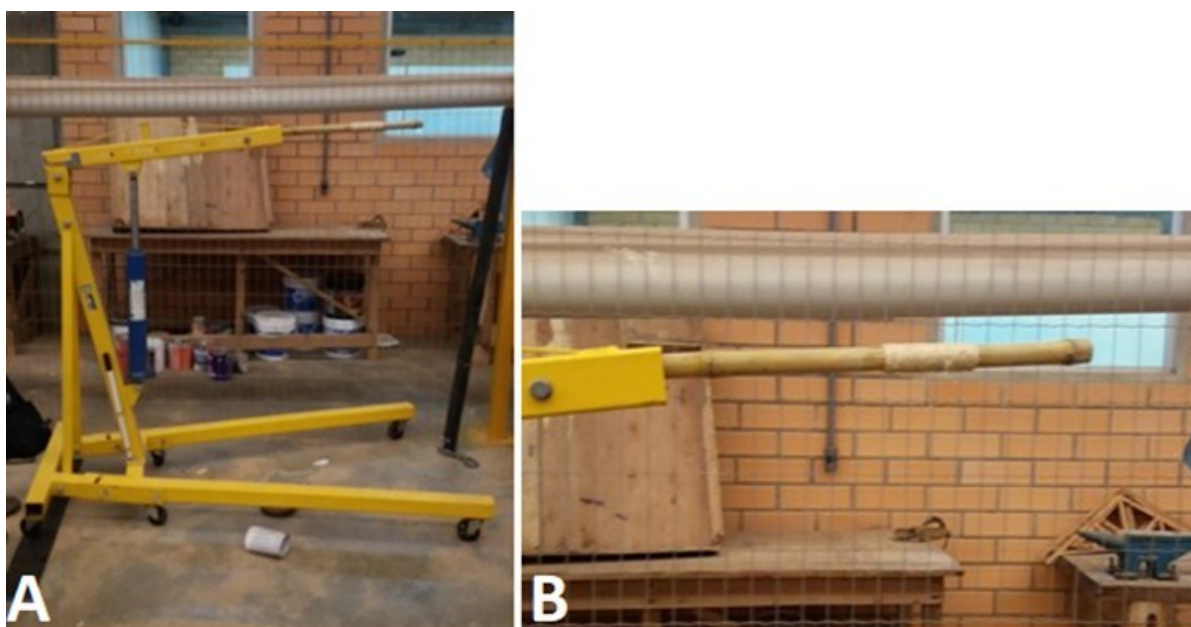


Fonte: Autoria própria.

## Procedimentos dos ensaios iniciais

Com o uso de um guincho hidráulico tipo girafa, posicionou-se o corpo de prova no local onde se coloca a lança. Desta forma, certificou-se que o corpo de prova ficasse estático na horizontal. Na figura 63A a seguir, mostra-se durante a etapa de ajustes de posicionamento do corpo de prova na girafa, e a figura 63B, mostra o corpo de prova pronto para o procedimento do ensaio.

**Figura 63 – (A) Etapa de ajustes de posicionamento do corpo de prova, (B) Exemplo de corpo de prova pronto para o ensaio.**



Fonte: Autoria própria.

Após o corpo de prova estar no devido local, adicionou-se pesos na extremidade do colmo, para que assim pudesse medir sua deformação. Utilizou-se uma corda de sisal, onde se foi adicionando os pesos e marcando suas deformações.

Esta etapa se repetiu para todos os corpos de prova produzidos. As deformações foram medidas com o uso de uma trena, pois, a função dos ensaios iniciais é avaliar o comportamento dos materiais sendo usados como agentes de união. Na figura 64 a seguir, ilustra-se o procedimento do ensaio.

Figura 64 – Procedimento do ensaio de flexão com os corpos de prova.



Fonte: Autoria própria.



## APÊNDICE C – RESULTADOS OBTIDOS DOS ENSAIOS INICIAIS

### RESULTADOS DOS ENSAIOS INICIAIS

Em primeiro analisou apenas o colmo. Os colmos de bambu possuem diversas particularidades, desta forma se necessita saber qual o melhor tipo de colmo para o estudo. Foi coletado colmos da espécie verdes e secos, utilizando a parte do topo do colmo, pois essa parte tende a ser mais uniforme. Esta análise foi importante para se terminar se o colmo utilizado seria verde ou seco. A tabela 3 a seguir, mostra os resultados obtidos.

**Tabela 3 – Resultados obtidos pelo ensaio com o colmo.**

	Seco	Verde
P(N)	Y(mm)	Y(mm)
30	6	7
60	14	17
100	23	28
135	30	41
140	32	47
200	45	61
240	54	76
280	61	83

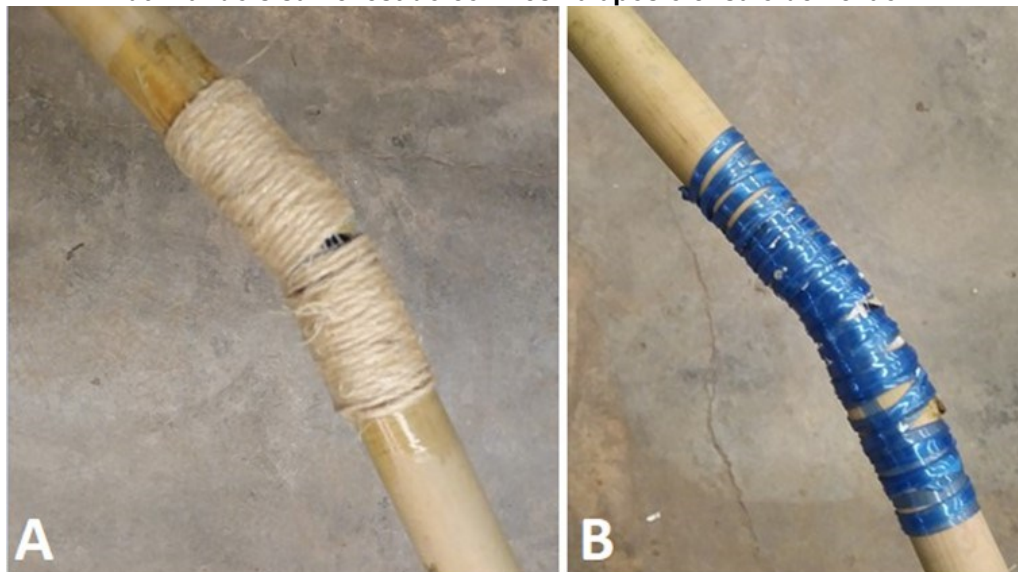
Fonte: Autoria própria.

Os resultados nos mostram que o colmo seco possui melhores propriedades, uma vez que possui um deslocamento na vertical (Y) menor em relação ao colmo verde. Desta forma para os demais estudos, será utilizado apenas os colmos secos.

Os resultados obtidos com as uniões utilizando PET não foram satisfatórios, uma vez que houve a falha com uma carga aplicada de 40 N na extremidade do corpo de prova e o colmo suportou 280 N sem ter fratura. Na figura 65A a seguir, mostra-se o corpo de prova após o ensaio.

Os resultados obtidos com as uniões utilizando sisal revestidos com resina de mamona assim como as uniões utilizando PET, não foram satisfatórios. O corpo de prova falhou com uma carga aplicada de 100 N. Na figura 65B a seguir, mostra-se o corpo de prova após o ensaio.

**Figura 65 – (A) Corpo de prova utilizando PET após o ensaio de flexão, (B) Corpo de prova utilizando sisal revestido com resina após o ensaio de flexão.**



Fonte: Autoria própria.

Os resultados obtidos com as uniões utilizando colmos de bambu como reforço se mostraram satisfatórios. O corpo de prova falhou com uma carga aplicada de 140N, não chega perto dos resultados encontrados com o colmo, mas mostra um comportamento mais otimista. Um fato que evidencia isto é que mesmo após a falha, a união suportou até 220 N sem ter maiores deformações. Na figura 66 a seguir, mostra-se o corpo de prova após o ensaio

**Figura 66 – Corpo de prova utilizando colmos de bambu como reforço e sisal após o ensaio.**



Fonte: Autoria própria.

Esses resultados mostram que o uso dos materiais PET e sisal revestidos com resina não se justificam. Pois os valores obtidos nos ensaios foram muito baixos em relação ao potencial do colmo de bambu.

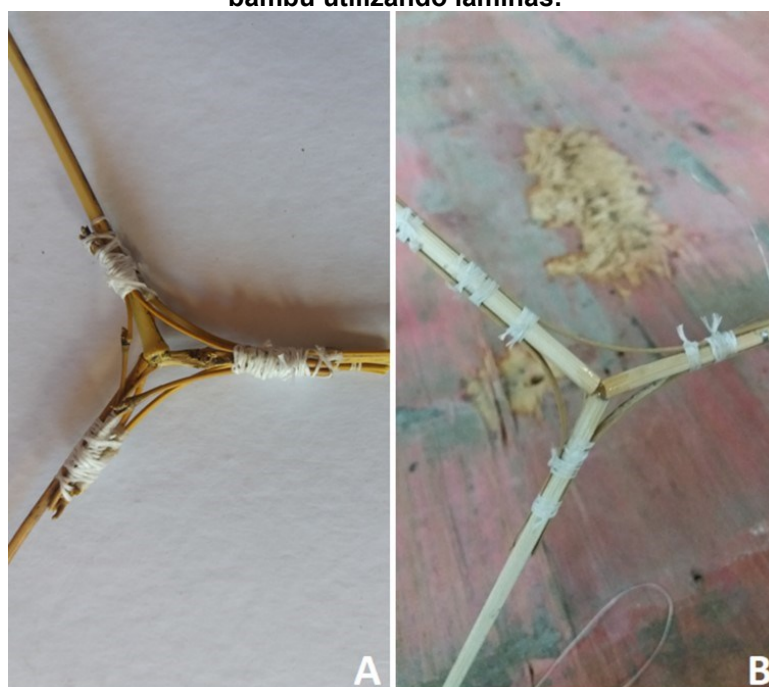
Esses resultados evidenciam a complexidade e como o problema das uniões são de grande importância para o estudo. A solução utilizando amarração de sisal com os colmos de bambu como reforço se mostram promissores, desta forma para a continuidade do estudo será utilizado esta lógica de união.

Para a continuidade do estudo, deve-se elaborar hipóteses de sistemas de amarração e reforço para a estrutura geodésica. O desafio é que as barras de bambu utilizadas para a maquete possuem 175 mm, logo a solução deve ser em escala compatível.

A primeira hipótese consiste em utilizar galhos da própria planta bambu como reforço, no entanto ao avaliar melhor a hipótese realizando corpos de prova, observou-se que os galhos apresentaram ser heterogêneos em diversos aspectos como diâmetro, umidade, flexibilidade, o que torna difíceis de manipular. A figura 67A apresenta os galhos amarrados na união entre as barras de bambu.

Durante a revisão bibliográfica, verificou-se que lâminas retiradas do colmo de bambu apresenta-se homogêneas em suas propriedades. Desta forma, decidiu-se adotar como outra hipótese utilizar lâminas de bambu como reforço na estrutura geodésica. As lâminas foram retiradas de colmos da espécie *P. aurea*, e amarradas nas uniões entre as barras de bambu. A figura 67B apresenta as lâminas amarradas na união entre as barras de bambu.

**Figura 67 – (A) União entre barras de bambu utilizando galhos, (B) União entre barras de bambu utilizando lâminas.**



Fonte 2: Autoria própria.

## ANEXO A – CARACTERÍSTICAS DA RESINA CATALISADA DE POLIÉSTER SATURADA

Características da resina catalisada de poliéster saturada (massa plástica):

Cor	Cinza Escuro
Proporção de Mistura por volume	1:1
Proporção de Mistura por peso	1,7:1
% Sólidos por Volume	100
Tempo de Trabalho a 24°C	5 minutos
Volume Específico	0,44cm <sup>3</sup> /g
Contração pós cura	0,0006 in/in
Peso Específico	1,96g/cm <sup>3</sup>
Temperatura de Resistência (úmido)	38°C
Temperatura de Resistência (seco)	93°C
Cobertura	14,5 kg/m <sup>2</sup> a 6,35mm
Dureza pós cura	85D
Resistência Dielétrica	30 volts/mil
Constante Dielétrica	35
Tensão de Cisalhamento Adesivo	2026 psi
Resistência à Compressão	10400 psi
Módulo de Elasticidade	7,5 psi x 10 <sup>5</sup> in
Coefficiente de Expansão Térmica	34[(in)/(in x °F)] x 10 <sup>-6</sup>
Resistência à Flexão	7680 psi
Condutividade Térmica	2,65[(cal x cm) / (séc x cm <sup>2</sup> x °C)] x10 <sup>-3</sup>
Tempo de Cura	1 hora
Tempo de Recobrimento Limite	15 a 30 minutos
Viscosidade da Mistura	Massa

## ANEXO B – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MECÂNICAS DO FIO DE NYLON

Propriedades físicas	Nylon 6.0
Peso específico	1,14 g/cm <sup>3</sup>
Temperatura mínima e máxima em uso contínuo	-40°C/ +100°C
Absorção de umidade até equilíbrio a 23°C (c/UR 50%)	3,0%
Absorção de água até saturação	9,0%

Propriedades mecânicas	Nylon 6.0
Tensão de escoamento à tração	80 (60) MPa
Tensão de ruptura à compressão	90 MPa
Tensão de ruptura à flexão	----
Módulo de elasticidade à tração	3000 (1800) MPa
Módulo de elasticidade à compressão	1700 MPa
Módulo de elasticidade à flexão	2400 (850) MPa
Elongação até a ruptura	60 (200) %
Resistência ao impacto	n.q n.r n.b
Dureza Rockwell	R100
Resistência à penetração de esfera	160 (80) MPa
Tensão de fluência c/1% defor. em 1000H	5 MPa
Coefficiente de atrito p/ aço refitic. E polid. c/ resina a seco	0,42 (0,38)

Fonte: Nylon fibras sintéticas.