

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**Escola de Engenharia**  
**Curso de Especialização em Análise e Dimensionamento de Estruturas de Concreto**  
**Armado e Aço**

Marina Ramalho Sena Camargos

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE COBERTURA CONSTITUÍDA POR BAMBU PARA**  
**HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL: um estudo de caso utilizando programa**  
**computacional**

Belo Horizonte  
2018

Marina Ramalho Sena Camargos

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE COBERTURA CONSTITUÍDA POR BAMBU PARA  
HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL: um estudo de caso utilizando programa  
computacional**

**Versão final**

Trabalho Final apresentado ao Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Especialista em Análise e Dimensionamento de Estruturas de Concreto Armado e Aço".

Orientador: Prof. Fernando Amorim de Paula

Belo Horizonte

2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
*Curso de Especialização em Análise e Dimensionamento de  
Estruturas de Concreto Armado e Aço*

**ATA DA DEFESA**

**“Análise Estrutural de Cobertura Constituída por Bambu para Habitações  
de Interesse Social: Um Estudo de Caso Utilizando Programa  
Computacional”**


**MARINA RAMALHO SENA CAMARGOS**

Trabalho Final defendido perante a banca examinadora, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de “Especialista em Análise e Dimensionamento de Estruturas de Concreto Armado e Aço”

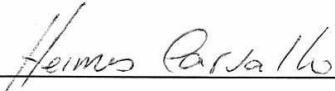
Aprovada em 03 de agosto de 2018.

Por:

Prof. Dr. Fernando Amorim de Paula  
Avaliador 1 – Orientador

  
\_\_\_\_\_  
Nota: 95 (noventa e cinco)

Prof. Dr. Hermes Carvalho  
Avaliador 2

  
\_\_\_\_\_  
Nota: 95.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, pela realização de mais um projeto e por não me deixar fraquejar diante às dificuldades.

Agradeço ao Prof. Dr. Fernando Amorim de Paula, pela orientação, disponibilidade sempre que precisei, paciência e aos ensinamento passados durante a realização deste trabalho.

Agradeço ao Prof. Dr. Luís Eustáquio Moreira pela contribuição sobre informações do material bambu que contribuíram para a realização deste projeto.

Agradeço ao meu marido Antonio que sempre me apoiou nos meus projetos acadêmicos e à minha família que sempre está ao meu lado.

## **RESUMO**

O fenômeno da autoconstrução é uma prática corrente na vida dos brasileiros. A população utiliza recursos alternativos e materiais muitas vezes inadequados para a construção de suas residências, visto que as políticas públicas, ao longo dos governos que atuaram no Brasil, não foram eficientes para atender toda a demanda existente por moradia. Neste trabalho, foi realizada a análise estrutural de uma cobertura que emprega o bambu como principal material em sua construção, além da madeira, argamassa e tela de galinheiro. Através de um estudo de caso, utilizando a modelagem em um programa computacional baseado no Método dos Elementos Finitos (Programa SAP2000) e materiais com disponibilidade nas regiões brasileiras, verificou-se o comportamento desta cobertura que possui como principal característica a possibilidade de ser construída pela própria população beneficiada. Os resultados obtidos da análise numérica com o modelo computacional desenvolvido foram utilizados para verificar o dimensionamento dos componentes estruturais por meio da NBR 7190:1997 Projeto de Estruturas de Madeira. A análise estrutural, elaborada neste estudo, surge como ferramenta para orientação de organizações que colaboram com a população carente na autoconstrução das suas moradias, visando o atendimento aos critérios de segurança.

Palavras-chave: cobertura, bambu, análise estrutural, elementos finitos.

## **ABSTRACT**

The phenomenon of self-construction is a common practice in Brazilian life. The population uses alternative resources and inappropriate materials for the construction of their residences, given that the public policies, of Brazilian governments, were not efficient to provide housing for all. In this study, the structural analysis was done for a roof that uses the bamboo as main material in its construction, besides wood, grout and chicken coop. Through a case study, doing the modeling in a computational program based on Finite Element Method (SAP2000 Program) and using materials with availability in Brazilian region, was checked the behavior of this roof that has as main characteristic the possibility of being built by the benefited population. The results of numerical analysis with the computational model developed were used to measure the dimensioning of the structural components through the NBR 7190:1997 Wood Structures Project. The structural analysis, elaborated in this study, appears as a tool to guide organizations that collaborate with the needy population in the self-construction of their residences, in order to meet the safety parameters.

Key words: roofs, bamboo, structural analysis, finite elements.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura da Cúpula Domocaña .....	10
Figura 2: Estrutura do Bambu .....	13
Figura 3: Catedral de Pereira, Colômbia .....	16
Figura 4: Casa de Bambu em Intanhagá - RJ .....	16
Figura 5: Método Geral para Análise de Sistemas Discretos – Sistema Discreto Padrão.....	18
Figura 6: Espécie de Bambu <i>Phyllostachys aurea</i> .....	20
Figura 7: Madeira <i>Manilkara</i> .....	20
Figura 8: Desenho esquemático de parábola .....	24
Figura 9: Desenho esquemático – indicativo das flechas máximas das varas de bambu .....	25
Figura 10: Seção de Madeira desenhada no SAP2000 .....	26
Figura 11: Modelo Numérico Computacional da Cobertura – SAP2000.....	28
Figura 12: Vista lateral do Modelo Numérico Computacional da Cobertura – SAP2000 .....	28
Figura 13: Diagrama Força Axial – Madeira.....	30
Figura 14: Diagrama Momento Fletor Eixo Local 3-3 – Madeira .....	30
Figura 15: Diagrama Momento Fletor Eixo Local 2-2 – Madeira .....	31
Figura 16: Diagrama Força Cortante Eixo Local 2-2 - Madeira .....	31
Figura 17: Diagrama Força Cortante Eixo Local 3-3 - Madeira .....	31
Figura 18: Momentos atuantes na seção transversal da madeira – seção com maior força axial e maior momento fletor no eixo local 3-3 .....	32
Figura 19: Momentos atuantes na seção transversal da madeira – Seção com maior momento fletor no eixo local 2-2.....	34
Figura 20: Diagrama Força Axial – Bambu .....	37
Figura 21: Diagrama Momento Fletor Eixo Local 3-3 – Bambu .....	37
Figura 22: Diagrama Momento Fletor Eixo Local 2-2 – Bambu .....	38
Figura 23: Diagrama Força Cortante Eixo Local 2-2 – Bambu .....	38
Figura 24: Diagrama Força Cortante Eixo Local 3-3 – Bambu .....	38
Figura 25: Desenho esquemático – análise não linear.....	44

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Distribuição das espécies de bambu nos biomas brasileiros .....	11
Tabela 2: Valores de Cálculo dos materiais da cobertura .....	23
Tabela 3: Cálculo das tensões normais da madeira – pontos analisados na Figura 18.....	33
Tabela 4: Cálculo das tensões normais da madeira – pontos analisados na Figura 19.....	35
Tabela 5: Cálculo das tensões transversais da madeira .....	36
Tabela 6: Esforços máximos em módulos aplicados ao Bambu .....	37
Tabela 7: Cálculo das tensões normais e transversais do bambu a 15 cm de distância da madeira .....	39
Tabela 8: Cálculo das tensões normais e transversais do bambu a 30 cm de distância da madeira .....	40
Tabela 9: Cálculo das tensões normais e transversais do bambu a 45 cm de distância da madeira .....	41
Tabela 10: Cálculo das tensões normais e transversais do bambu a 60 cm de distância da madeira .....	42



## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
1.1 Considerações Iniciais.....	9
1.2 Justificativa.....	10
2. OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	11
2.1 Objetivos Gerais.....	11
2.2 Objetivos Específicos.....	12
2.3 Estrutura do Texto.....	12
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
3.1 Bambu.....	13
3.1.1 Definição, disponibilidade e características mecânicas.....	13
3.1.2 Bambu na construção civil.....	15
3.2 Modelagem Numérica.....	16
4. ANÁLISE ESTRUTURAL DA COBERTURA.....	18
4.1 Metodologia.....	18
4.2 Parâmetros Utilizados.....	19
4.2.1 Materiais.....	19
4.2.2 Propriedades dos materiais.....	20
4.2.3 Valores de cálculo.....	22
4.2.4 Carregamento da estrutura.....	23
4.3 Modelo Numérico Computacional.....	24
4.4 Análise dos Resultados.....	28
4.4.1 Análise dos resultados nos elementos de madeira.....	30
4.4.2 Análise dos resultados nos elementos de bambu.....	36
4.5 Análise das Tensões Iniciais (Pré Tensão).....	43
5. CONCLUSÃO.....	45
REFERÊNCIA.....	46
ANEXO A – PROCEDIMENTO CONSTRUTIVO TETO DOMOCAÑA.....	48
ANEXO B – PLANILHAS DE COORDENADAS - VARAS DE BAMBU.....	52

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações Iniciais

A habitação destinada à população de baixa renda no Brasil é um dos principais desafios enfrentados atualmente pelos governos, assim como para a sociedade. Segundo a Fundação João Pinheiro (2016), o déficit habitacional brasileiro em 2014 foi estimado em 6,68 milhões de unidades.

No século XX, a industrialização proporcionou o surgimento de cortiços nas periferias e a ocupação desordenada sem um planejamento e infraestrutura básica. Além disso, a valorização dos terrenos próximos aos centros urbanos e a especulação imobiliária contribuíram para a periferização da população carente (SOUZA, 2004). Após o início deste processo de urbanização, desde o governo de Getúlio Vargas (com a construção de vilas operárias), passando pelo governo de Eurico Gaspar Dutra (com a criação da Fundação Casa Popular) e pela Ditadura Militar (com a criação do Banco Nacional de Habitação – BNH), existiram tentativas de minimizar o déficit habitacional com políticas governamentais. No entanto, as ações propostas não foram eficientes para conter o avanço da ocupação desordenada, além de não abranger todas as pessoas que necessitavam de moradia (CUNHA; ARRUDA; MEDEIROS, 2007).

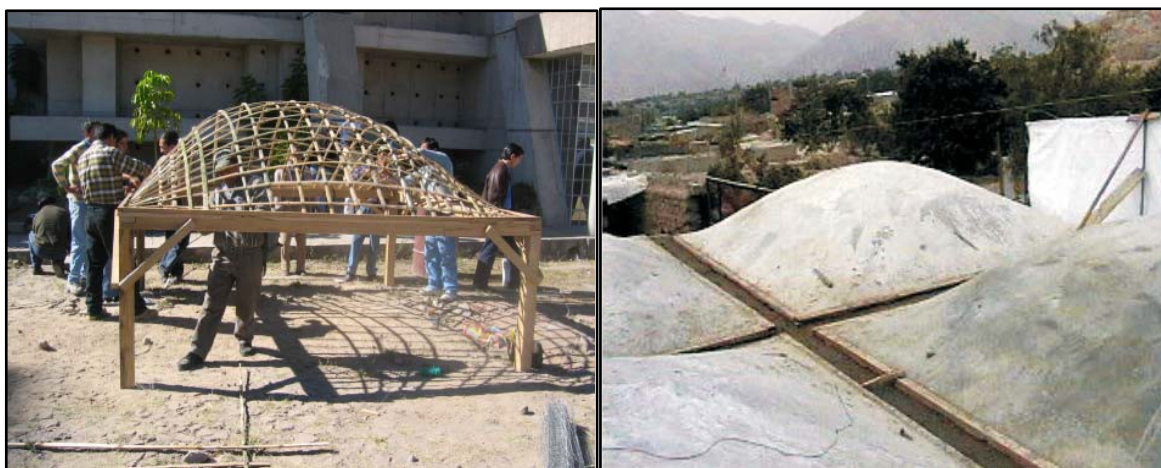
Mais recentemente, a partir do governo Lula, foi criado em 2009 o programa Minha Casa Minha Vida destinado prioritariamente às famílias com renda total de até 3 salários mínimos e com objetivo de reduzir o déficit habitacional por meio da construção de um milhão de novas habitações (FORAGI, 2012). Segundo o Ministério do Planejamento (2015), em março de 2015 2,169 milhões de famílias receberam suas moradias através do programa Minha Casa Minha Vida. No entanto, este programa também não conseguiu resolver o problema do déficit habitacional, tendo sido severamente impactado com a redução das verbas governamentais com o aprofundamento da crise financeira do país a partir de 2015.

Logo, a população brasileira utilizou recursos e alternativas próprias para a construção das suas casas, devido à ineficiência de políticas públicas que atendessem toda a demanda de moradias para as famílias carentes. Através da ajuda mútua entre as pessoas da comunidade, os chamados

mutirões, e da utilização de materiais “não convencionais” ou até mesmo impróprios, a que essa população tinha acesso, foram surgindo habitações inadequadas.

## 1.2 Justificativa

A partir do Trabalho de Conclusão de Curso denominado “Tecnologia Construtivas de Coberturas para Habitações de Interesse Social” desenvolvido por Camargos (2014), surgiu o interesse em analisar estruturalmente uma cobertura que pudesse ser construída pelos próprios moradores. A monografia citada apresentou a cobertura Domocaña (Figura 1) como uma estrutura em formato de cúpula e que emprega bambu, como material principal, madeira, argamassa e tela de galinheiro na sua construção. O método construtivo desta estrutura é apresentado no Anexo A deste trabalho.



**Figura 1:** Estrutura da Cúpula Domocaña  
**Fonte:** GÁLLIGO et. al. (2005)

A concepção da cobertura apresentada por Camargos (2014), indica que a argamassa, juntamente com a tela de galinheiro, deve ser usada tanto na face interna, quanto na face externa da cúpula, envolvendo todo o bambu e trabalhando, assim, como material composto. No entanto, a complexidade em caracterizar o material composto argamassa/bambu dificulta a utilização de uma análise numérica para a determinação dos esforços e deslocamentos a fim de verificar a segurança dessa estrutura.

Sendo assim, foi proposta uma concepção adaptada à cobertura Domocaña, procurando manter a geometria da estrutura, os tipos e dimensões dos materiais apresentados por Camargos (2014). A diferença construtiva entre a “cúpula modelo” e a cobertura estudada neste trabalho é a forma como o revestimento (tela de galinheiro e argamassa) foi empregado. No teto Domocaña, o

revestimento é feito tanto na face externa quanto interna da cúpula (embutindo as varas de bambu), já o novo modelo utilizou o revestimento apenas na face externa.

A principal motivação para a escolha do tema análise estrutural de coberturas para habitações de interesse social, escolhendo como material básico o bambu e utilizando programa computacional baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF), foi a importância social que este apresenta, uma vez que o fenômeno da autoconstrução é uma prática corrente na vida dos brasileiros.

Outro aspecto que influenciou na escolha deste tema, foi a disponibilidade do material, neste caso o bambu, nas regiões brasileiras. Judziewicz et al (1999, apud MANHÃES, 2008) aponta o Brasil como o país possuidor de maior diversidade de espécies de bambu. Na Tabela 1 é apresentada a distribuição das espécies de bambu entre os biomas brasileiros.

**Tabela 1:** Distribuição das espécies de bambu nos biomas brasileiros

<b>Bioma</b>	<b>Nº espécies</b>	<b>%</b>
Floresta Atlântica	151	65
Amazônia	60	26
Cerrado	21	9,0
<b>Total</b>	<b>232</b>	<b>100</b>

**Fonte:** FILGUEIRAS; GONÇALVES (2004, apud MANHÃES 2008)

Diante do exposto, considera-se importante a análise estrutural de coberturas voltadas para habitações de interesse social empregando o bambu como material alternativo para sua concepção. Através do estudo de caso utilizando o programa computacional fundamentado na teoria do Método dos Elementos Finitos, pretende-se verificar o comportamento dessa estrutura.

## **2. OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO DO TEXTO**

### **2.1 Objetivos Gerais**

Este trabalho tem por objetivo analisar estruturalmente, a partir da modelagem no programa computacional baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF), uma cobertura constituída por bambu, de forma a estudar o seu comportamento diante às solicitações a que estará submetida.

## **2.2 Objetivos Específicos**

- a) Definir os materiais encontrados no Brasil (espécies de bambu e madeira) que poderão ser utilizados na constituição da cobertura.
- b) Criar um modelo numérico computacional que represente de forma adequada a estrutura da cobertura Domocaña.
- c) Determinar, através de um modelo computacional utilizando elementos finitos de barra, os esforços solicitantes nos elementos estruturais, assim como os deslocamentos, a partir das cargas aplicadas.
- d) Dimensionar os elementos estruturais, usando a Norma NBR 7190:1997 Projeto de Estruturas de Madeira, com a finalidade de averiguar a segurança do modelo proposto.

## **2.3 Estrutura do Texto**

O presente estudo foi organizado em cinco capítulos, sendo o primeiro capítulo a introdução fazendo contextualização do tema e justificando a sua escolha. Em seguida, no segundo capítulo foram indicados os objetivos para o alcance dos resultados do trabalho em questão.

No terceiro capítulo foi apresentada uma revisão bibliográfica acerca do material bambu e da modelagem numérica computacional. Posteriormente, no quarto capítulo, foram apresentados a metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho, os materiais adotados e o modelo numérico computacional, além das análises estruturais realizadas para a verificação da segurança e viabilização da construção da cobertura.

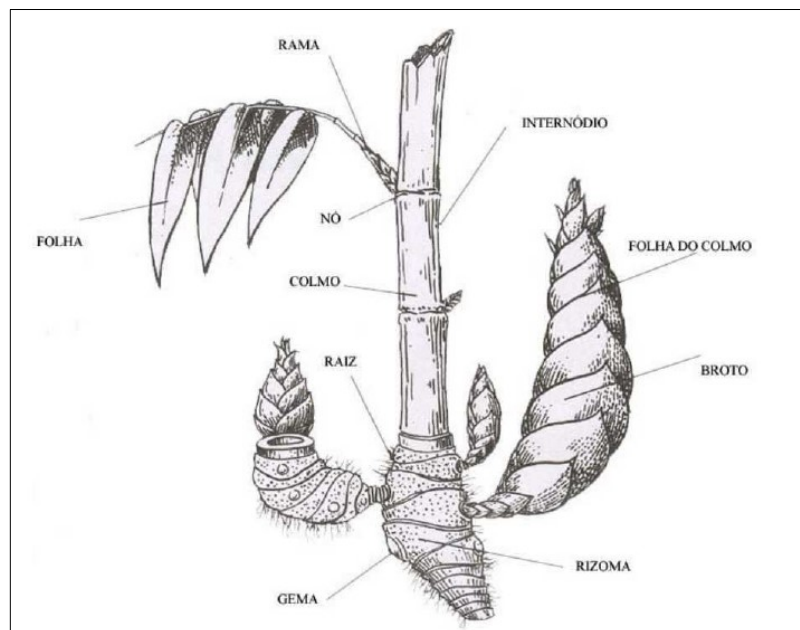
Por último, no quinto capítulo, foi feita a exposição dos resultados obtidos concluindo o trabalho e propondo sugestões para trabalhos futuros.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Bambu

##### 3.1.1 Definição, disponibilidade e características mecânicas

O Bambu é uma planta pertencente à família Gramineae ou Poaceae e sub-família Bambusoideae, sendo dividida em duas tribos: *Bambuseae* (espécies de maior porte, colmos lenhosos) e *Olyreae* (espécies de menor porte, herbáceos) (PEREIRA e BERALDO, 2007, apud OLIVEIRA, 2013). De acordo com Oliveira (2013), “bambu é uma gramínea tubo-cônica cuja base tem o diâmetro maior e que vai diminuindo ao longo do colmo em direção à extremidade superior”. Em sua estrutura, observa-se um sistema subterrâneo de rizomas (caules subterrâneos), os colmos e os galhos. A colonização de um novo território é possível a partir do crescimento e da reprodução dos rizomas que se afastam do bambu (CRUZ, 2002). Na Figura 2 é mostrado um esquema da estrutura do bambu que é comum a todas as espécies.



**Figura 2:** Estrutura do Bambu

**Fonte:** National Mission on Bamboo Applications – NMBA (2004, apud OLIVEIRA 2013)

Espécies nativas de bambus são encontradas em todos os continentes com exceção da Europa e da Antártida. No entanto, o número não é exato, uma vez que há sempre novas descobertas dessa planta e a sua grande dispersão nos continentes dificulta a definição de um quantitativo (OLIVEIRA, 2013). Sabe-se porém, que a maior concentração de espécies está nos países do sudoeste asiático e ilhas adjacentes, seguidos da América e por fim da África e Austrália que possuem menor número de espécies (LOPEZ 1978, apud CRUZ, 2002).

Filgueiras e Gonçalves (2004, apud Oliveira, 2013) aponta o Brasil como o maior detentor de diversidade de espécies de bambu dentre todos os países das Américas. De acordo com o site Bambuzeria Cruzeiro do Sul – BAMCRUS, as espécies mais comuns encontradas no Brasil são de origem asiática trazidas pelos imigrantes portugueses. Devido à boa adaptação, elas se expandiram por quase todo o território, possuindo maior incidência nos Estados do Acre, Minas Gerais, São Paulo e Rio de Janeiro. As espécies acima citadas são:

- Bambu-verde - *Bambusa vulgaris*
- Bambu-imperial - *Bambusa vulgaris* variedade *vittata*
- Bambu-comum - *Bambusa tuldooides*
- Bambu-gigante ou bambu-balde - *Dendrocalalamus giganteus*
- Bambu-chinês – *Phyllostachys*

O site ainda destaca as espécies brasileiras nativas que são denominadas de acordo com a região em que se desenvolvem. São elas:

- Cambaúba – encontrada no centro e no norte do estado de Minas Gerais e também no Triângulo Mineiro
- Cana-brava (*Anthroxanthium*) - encontrada no município de Uberaba, Minas Gerais
- Taboca (*Antrostilidium pubescens*) - encontrada em várias partes do país, recebe em Pernambuco o nome de taquara, e em várias outras regiões é conhecida como cana-brava-do-mato
- Taquara - encontrada em quase todo o território de Minas Gerais e em algumas regiões do estado de Goiás
- Taquari - pode ser encontrada em várias regiões do Brasil
- Taquaraçu - pode ser encontrada em quase todo o Brasil, mas principalmente na mata amazônica

Em se tratando de características mecânicas do bambu, Ghavami (1989, apud GHAVAMI e MARINHO, 2004) afirmam que:

As características mecânicas do bambu são influenciadas sobretudo pelos fatores: espécie, idade, tipo de solo, condições climáticas, época de colheita, teor de umidade das amostras, localização das mesmas em relação ao comprimento do colmo, presença ou ausência de nós nas amostras testadas e tipo do teste aplicado.

A disposição das fibras paralelamente ao eixo do colmo, formando um feixe, confere ao bambu uma maior resistência à tração axial do que à compressão. Já para solicitações ortogonais, tanto para as fibras ao longo do colmo (a coesão do feixe é feita pela lignina) quanto para a região dos nós (onde há interrupção do feixe de fibras), a resistência apresenta-se menor, podendo ocorrer assim, a ruptura devido ao cisalhamento (CULZONI, 1986, apud OLIVEIRA, 2013).

No entanto, mesmo apresentando menor resistência às forças cortantes, Ghavami e Hombeeck (1981, apud Oliveira, 2013) aponta os nós ao longo do colmo como os responsáveis pela rigidez das estruturas para esforços que tendem a flambar a vara de bambu lateralmente. Esta característica também é apontada por Liese (1998, apud Cruz, 2002), que atribui o maior módulo de elasticidade nos nós devido à concentração de sílica nesta região.

### **3.1.2 Bambu na construção civil**

O Bambu como material para a construção civil vem sendo utilizado há muitos séculos, principalmente pelos países asiáticos. Construções de pontes suspensas com cabos de bambu datam da era A.C. na China, o que possibilitou o desenvolvimento de elementos treliçados em estruturas como cúpulas, coberturas e andaimes. Na América Latina, a Colômbia é o país com maior emprego e incentivo à utilização deste material na construção de habitações populares (CRUZ, 2002). No Brasil, as pesquisas científicas com bambu foram impulsionadas a partir de 1979, o que aumentou a sua investigação como material de baixo custo e alternativo na construção civil, inclusive como substituto para o aço em estruturas de concreto e espaciais (GHAVAMI, 1995, apud CRUZ, 2002).

Oliveira (2013) destaca como pontos favoráveis para a utilização do bambu na construção civil a alta resistência à tração, boa resistência à compressão, leveza, flexibilidade, material alternativo ecologicamente correto, planta de rápido crescimento e alta produtividade. Por outro lado, o autor também destaca desvantagens do material em questão como necessidade de tratamentos pré-uso, inflamabilidade, grande variação de formas e resistência e baixa resistência à força cortante.

As Figuras 3 e 4 a seguir ilustram obras que utilizaram o bambu em sua construção.





**Figura 3:** Catedral de Pereira, Colômbia

**Fonte:** [www.comunidadebancodoplaneta.com.br](http://www.comunidadebancodoplaneta.com.br) (apud OLIVEIRA 2013)



**Figura 4:** Casa de Bambu em Intanhagá - RJ

**Fonte:** CRUZ (2002)

### 3.2 Modelagem Numérica

A análise da estrutura de um objeto deve ser realizada de forma que o mesmo não “falhe” diante às condições de solicitações reais a que estará submetido. Logo, para garantir o desempenho estrutural os engenheiros fundamentam-se nas Teorias da Mecânica Geral em especial no estudo da Estática. No entanto, diante dos projetos cada dia mais sofisticados e com a utilização

de materiais diversos, a maioria das estruturas práticas tornam-se complexas para serem analisadas pelos Métodos Analíticos Clássicos (ALVES FILHO, 2007).

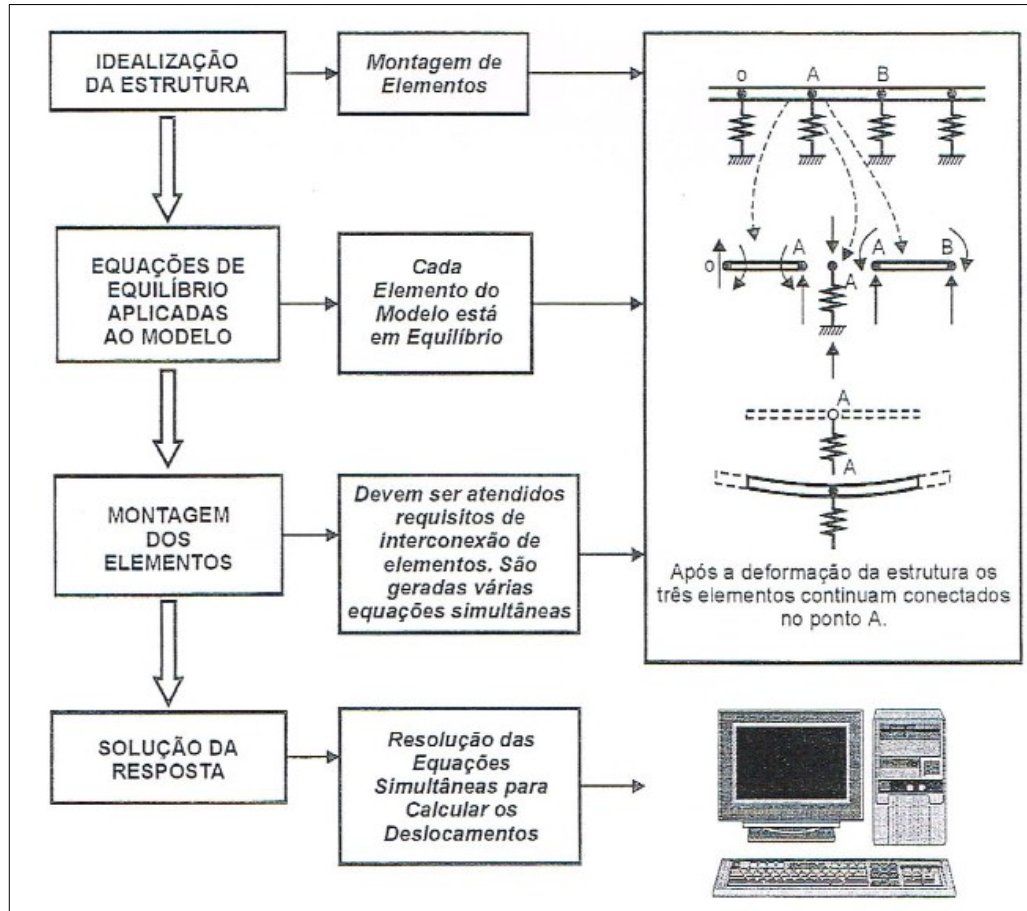
As soluções analíticas são resultados expressos por equações matemáticas que produzem os valores exatos das incógnitas desejadas em qualquer local de um corpo, sendo portanto válidos para um número infinito de pontos no objeto analisado (LOGAN, 2007). Estas soluções são de difícil obtenção e se aplicam, portanto, apenas para sistemas estruturais muito simples.

Dessa forma, os engenheiros calculistas tendem a utilizar procedimentos que resultem em respostas aproximadas para a realidade do projeto analisado e que possam ser generalizados para análise de diferentes estruturas, independentemente da sua forma ou dos carregamentos considerados. Um dos métodos mais utilizados e o escolhido para o desenvolvimento do estudo de caso deste trabalho é o Método dos Elementos Finitos.

Alves Filho (2007) define o Método dos Elementos Finitos como sendo um:

método aproximado de cálculo de sistemas contínuos, de sorte que a estrutura, o componente mecânico ou de forma geral, o corpo contínuo é subdividido em um número finito de partes (os Elementos), conectados entre si por intermédio de pontos discretos, que são chamados de Nós. A montagem de Elementos, que constitui o modelo matemático, tem seu comportamento especificado por um número finito de parâmetros.

Ao encontro da definição de Alves Filho (2007), Logan (2007) destaca que este processo de modelagem de um corpo sendo dividido em um sistema equivalente de corpos (elementos finitos) interligados em pontos comuns a dois ou mais elementos (pontos nodais) e/ou linhas de fronteira e/ou superfícies é chamado de discretização (Sistema Discreto). Além disso, o autor ressalta que no Método dos Elementos Finitos, ao invés de resolver o problema para todo o corpo em uma operação, há a formulação de equações para cada elemento finito que será combinado para a obtenção da solução de toda a estrutura. Sendo assim, se a o corpo inteiro está em equilíbrio cada elemento também estará em equilíbrio. A Figura 5 esboça como é feito o raciocínio para a análise de Sistemas Discretos.



**Figura 5:** Método Geral para Análise de Sistemas Discretos – Sistema Discreto Padrão

Fonte: ALVES FILHO (2007)

Diante do exposto, o presente trabalho utilizou o Método dos Elementos Finitos para obter respostas a respeito da cobertura analisada, empregando o uso de estrutura reticulada para a representação da estrutura real.

## 4. ANÁLISE ESTRUTURAL DA COBERTURA

### 4.1 Metodologia

O procedimento utilizado para alcançar os objetivos propostos foi o estudo de caso. Os autores Prodanov e Freitas (2013) argumentam que:

O estudo de caso consiste em coletar e analisar informações sobre determinado indivíduo, uma família, um grupo ou uma comunidade, a fim de estudar aspectos variados de sua vida, de acordo com o assunto da pesquisa. É um tipo de pesquisa qualitativa e/ou quantitativa, entendido como uma categoria de investigação que tem como objeto o estudo de uma unidade de forma aprofundada, podendo tratar-se de um sujeito, de um grupo de pessoas, de uma comunidade etc.

A partir da cobertura apresentada por Camargos (2014), investigou-se os materiais, bambu e madeira, encontrados nas regiões brasileiras, em especial Minas Gerais, que pudessem ser adotados para a montagem do estudo de caso deste trabalho. Em seguida, foi desenvolvido um modelo numérico computacional, utilizando uma estrutura reticulada, que estivesse próximo à estrutura Domocaña, porém considerando o revestimento da argamassa apenas na face externa da cobertura. Por fim, através do emprego de um programa computacional baseado no Método dos Elementos Finitos, o Programa SAP2000, foi realizada a modelagem da estrutura e posteriormente a análise dos resultados para averiguação do desempenho da cobertura objeto deste trabalho.

As informações para definição dos parâmetros utilizados para o desenvolvimento deste estudo foram retiradas das normas brasileiras e de trabalhos acadêmicos que pudessem contribuir com dados específicos dos materiais escolhidos. O dimensionamento dos elementos estruturais da cobertura foi feito com base nos procedimentos da NBR 7190:1997 Projeto de Estruturas de Madeira. No entanto, para a definição de alguns parâmetros de cálculo do bambu, adotou-se valores usuais para dimensionamento contidos no trabalho preliminar, ainda não publicado, da Proposta de Norma Brasileira para Estrutura de Bambu, referência do documento ISO/DIS – 22156 (BERALDO, 2017).

## **4.2 Parâmetros Utilizados**

### **4.2.1 Materiais**

A escolha dos materiais para o estudo de caso foi condicionada à possibilidade de encontrá-los no Estado de Minas Gerais. Além disso, observou-se as dimensões dos elementos escolhidos para que fossem próximas às estabelecidas na cobertura apresentada por Camargos (2014). Logo, a espécie de bambu adotada foi a *Phyllostachys aurea* (Figura 6) e para a madeira usou-se o gênero *Manilkara ssp* (Figura 7), também conhecida como Maçaranduba ou Parajú, que apesar de ser cara, é o tipo de madeira mais utilizada na região para construção de coberturas.



**Figura 6:** Espécie de Bambu *Phyllostachys aurea*  
**Fonte:** ECOVILA DA MONTANHA (2017)



**Figura 7:** Madeira *Manilkara*  
**Fonte:** IMPÉRIO DAS MADEIRAS (2017)

#### 4.2.2 Propriedades dos materiais

As propriedades da espécie de bambu, *Phyllostachys aurea*, considerada para o desenvolvimento deste projeto foram retiradas da Dissertação de Mestrado denominada “Caracterização física e mecânica de colmos inteiros do bambu da espécie *Phyllostachys aurea*: Comportamento à flambagem” elaborada por Cruz (2002). Através de ensaios, a autora determinou as propriedades físicas e mecânicas que caracterizassem a espécie de bambu em questão. Os resultados dos ensaios foram apresentados em função do tipo de tratamento aplicado (secagem ao ar, secagem ao fogo e banho quente) e do tipo de amostra analisada (base com nó, base sem nó, intermediário com nó, intermediário sem nó, topo com nó e topo sem nó).

Sendo assim, para a modelagem deste trabalho, foi considerado o tipo de tratamento secagem ao ar, uma vez que a proposta da cobertura analisada é a autoconstrução e este processo mostrou-se mais fácil entre os três apresentados. Em relação ao tipo de amostra analisada foram adotados os resultados encontrados para amostras intermediárias com nó. Logo, tem-se as seguintes características:

- **Dimensões:** no modelo computacional foi adotado diâmetro exterior de 19,00 mm (3/4"), conforme indicado por Camargos (2014), e espessura de 3,00 mm, valor próximo à média encontrada por Cruz (2002).
- **Peso específico:** a autora aponta que o peso específico do bambu varia aproximadamente entre 0,5 g/cm<sup>3</sup> a 0,9 g/cm<sup>3</sup>. No trabalho foi considerado o maior valor de 0,9 g/cm<sup>3</sup>, mantendo-se a favor da segurança.
- **Resistência à tração ( $f_{t\text{máx}}$ ):** 220,34 MPa.
- **Resistência à compressão ( $f_{c\text{máx}}$ ):** 51,29 MPa.
- **Resistência ao cisalhamento transversal ( $f_{v\text{média}}$ ):** 47,13 +/- 3,85 MPa.
- **Módulo de Elasticidade (E):** foram apresentados resultados de módulo de elasticidade tanto no ensaio a tração  $E = 16,38$  GPa quanto no ensaio a compressão  $E = 22,73$  GPa. No trabalho foi considerado o valor médio, sendo  $E = 19,56$  GPa.

Na caracterização da madeira, as propriedades foram retiradas do Anexo E da NBR 7190:1997 que apresenta os valores médios usuais de resistência e rigidez de algumas madeiras nativas e de florestamento. A madeira do gênero *Manilkara ssp* possui as seguintes características:

- **Peso específico (rap):** 1.143 kg/m<sup>3</sup>
- **Resistência à compressão paralela as fibras ( $f_{c0}$ ):** 82,9 MPa
- **Resistência à tração paralela as fibras ( $f_{t0}$ ):** 138,5 MPa
- **Resistência ao cisalhamento ( $f_v$ ):** 14,9 MPa
- **Módulo de Elasticidade (E):** 22.733 MPa

### 4.2.3 Valores de cálculo

Os valores de cálculo dos módulos de elasticidade e das resistências foram definidos pelas seguintes relações:

- Módulo de elasticidade efetivo:  $E_{co,ef} = k_{mod,1} * k_{mod,2} * k_{mod,3} * E_{co,m}$  (item 6.4.9 da NBR 7190:1997).
- Valores de cálculo das resistências:  $fwd = kmod * \left( \frac{fwk}{\gamma_w} \right)$  (item 7.2.6 NBR 7190:1997).

O coeficiente de modificação  $K_{mod}$  é composto pela multiplicação dos coeficientes  $k_{mod,1}$  (indica a classe de carregamento da estrutura),  $k_{mod,2}$  (indica classe de umidade admitida),  $k_{mod,3}$  (indica qualidade da madeira empregada, para o caso da madeira, ou qualidade do colmo empregado, no caso do bambu). Já o parâmetro  $E_{com}$ , corresponde ao valor médio do módulo de elasticidade obtido por meio de ensaios.

Os coeficientes de modificação ( $k_{mod,1}$ ,  $k_{mod,2}$ ,  $k_{mod,3}$ ) e de ponderação ( $\gamma$ ) adotados para a verificação da madeira, foram retirados da tabela 12 da NBR 7190:1997. Em relação ao bambu, utilizou-se os parâmetros indicados item 8.1.2 do estudo preliminar da Proposta de Norma Brasileira para Estrutura de Bambu.

Na definição dos materiais no programa SAP2000 foi utilizado a opção de material ortotrópico o que possibilitou a inserção do módulo de elasticidade transversal com valor efetivo da madeira, mesmo não influenciando no resultado da modelagem da cobertura. De acordo com o item 6.4.9 da NBR 7190:1997, o módulo de elasticidade transversal é definido como  $G_{,ef} = \frac{E_{co,ef}}{20}$ . Este mesmo parâmetro foi aplicado para o valor do módulo de elasticidade transversal do bambu, obtendo assim para madeira  $G_{,ef} = 636.524 \text{ kN/m}^2$  e para o bambu  $G_{,ef} = 684.600 \text{ kN/m}^2$ .

A Tabela 2 resume os valores de cálculo considerados.

**Tabela 2:** Valores de Cálculo dos materiais da cobertura

<b>MADEIRA</b>			
Coficientes de Modificação (kmod)	kmod 1	kmod 2	kmod 3
	0,7	1	0,8
Módulo de Elasticidade médio (kN/m <sup>2</sup> )	22.733.000,00		
Módulo de Elasticidade efetivo (kN/m <sup>2</sup> )	12.730.480,00		
	<b>Tração (MPa)</b>	<b>Compressão (MPa)</b>	<b>Cisalhamento (MPa)</b>
Resistência Média	138,5	82,9	14,9
Resistência Característica f <sub>wk</sub> = 0,7*f <sub>m</sub> (tração e compressão) f <sub>wk</sub> = 0,54*f <sub>m</sub> (cisalhamento)	96,95	58,03	8,05
Kmod (kmod1*kmod2*kmod3)	0,56	0,56	0,56
γ <sub>w</sub>	1,8	1,4	1,8
Resistência de Cálculo	30,16	23,21	2,50
<b>BAMBU</b>			
Coficientes de Modificação (kmod)	kmod 1	kmod2	kmod3
	0,7	1	1
Módulo de Elasticidade médio (kN/m <sup>2</sup> )	19.560.000,00		
Módulo de Elasticidade efetivo (kN/m <sup>2</sup> )	13.692.000,00		
	<b>Tração (MPa)</b>	<b>Compressão (MPa)</b>	<b>Cisalhamento (MPa)</b>
Resistência Média	220,34	51,29	47,13
Resistência Característica f <sub>wk</sub> = 0,8*f <sub>m</sub> (tração e compressão) f <sub>wk</sub> = 0,7*f <sub>m</sub> (cisalhamento)	176,27	41,03	32,99
Kmod (kmod1*kmod2*kmod3)	0,7	0,7	0,7
γ <sub>w</sub>	1,4	1,4	1,8
Resistência de Cálculo	88,14	20,52	12,83

#### 4.2.4 Carregamento da estrutura

Além do peso próprio da estrutura (bambu e madeira) que foi calculado automaticamente pelo programa SAP2000, também foi considerado na contribuição da carga permanente o peso próprio do revestimento.

De acordo com a NBR 6120:1980, argamassa de cimento e areia possui peso específico aparente de 21 kN/m<sup>3</sup>. Em relação a tela de galinheiro, encontrou-se para uma tela com malha de 2", dimensões de 1,5m x 50m e rolo com 38 kg, peso de aproximadamente 0,0051 kg/m<sup>2</sup> (COMEP INDUSTRIA E COMÉRCIO LTDA., 2018). No entanto, este valor não foi considerado no cálculo por ser muito pequeno e não alterar o peso próprio do revestimento considerando apenas a argamassa.



Além da carga permanente, foi considerada também a sobrecarga. A NBR 6120:1980 aponta um valor mínimo de carga vertical para forro (sem acesso de pessoas) de  $0,5 \text{ kN/m}^2$ . Este estudo não levou em consideração os carregamentos horizontais decorrentes da ação do vento, uma vez que a cobertura analisada será utilizada em habitações de interesse social de apenas um pavimento, não apresentando assim altura significativa para esta análise.

### 4.3 Modelo Numérico Computacional

A construção do modelo computacional iniciou a partir da definição de uma geometria aproximada da cobertura apresentada por Camargos (2014). Neste trabalho foi considerado que a curvatura das varas de bambu são próximas a uma curva representada por uma função polinomial do 2º grau (Figura 8). Dessa forma, foi realizada a dedução da equação da curva para o plano XZ.

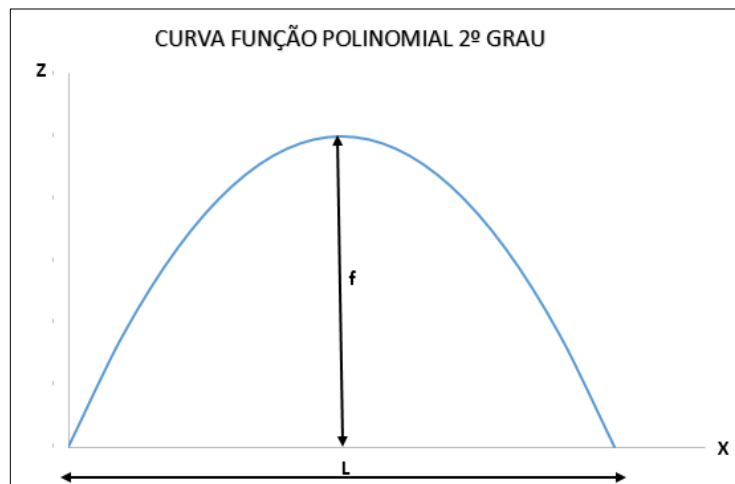


Figura 8: Desenho esquemático de parábola

Para  $z(x) = Ax^2 + Bx + C$ , tem-se que:

1. Para  $x = 0, z = 0$ , logo  $C = 0$ ;
2. Para  $x = \frac{L}{2}, \frac{dz}{dx} = 0$ . Então se  $\frac{dz}{dx} = 2Ax + B$ , tem-se  $\frac{2AL}{2} + B = 0$ , o que implica em  

$$B = -AL \quad (\text{I})$$
3. Para  $x = \frac{L}{2}, z = f$ , logo  $f = A\left(\frac{L^2}{4}\right) + B\left(\frac{L}{2}\right) \quad (\text{II})$
4. Substituindo equação (I) na equação (II), tem-se  $A = -\frac{4f}{L^2}$
5. Voltando a equação (I) e substituindo o valor de A, tem-se  $B = \frac{4f}{L}$

Logo a equação do 2º grau que representa a curva das varas do bambu no plano XZ é:

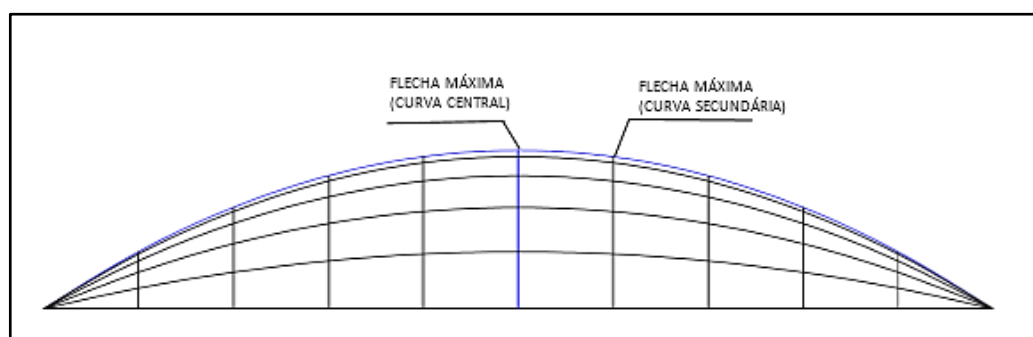
$$z(x) = -\frac{4f}{L^2}x^2 + \frac{4f}{L}x$$

Além do plano XZ, o bambu também está disposto no plano YZ, uma vez que a cobertura é formada por uma “malha” de bambu. A estrutura modelada é simétrica, então a equação que descreve as curvas das varas de bambu no plano YZ é:

$$z(y) = -\frac{4f}{L^2}y^2 + \frac{4f}{L}y$$

A partir da definição das equações, foram determinadas as dimensões da cobertura, sendo considerado o comprimento para cobrir uma área de 3m x 3m. Além disso, adotou-se um espaçamento de 15 cm entre as varas de bambu, conforme indicado por Camargos (2014), e foi considerado o conceito de nó rígido no encontro das mesmas. Outro aspecto abordado para a montagem do modelo numérico é a flecha máxima de 50 cm que a vara de bambu localizada no centro da estrutura apresenta, tanto no plano XZ como no plano YZ.

De acordo com o método construtivo apresentado por Camargos (2014), após a montagem da estrutura de apoio constituída pela madeira, duas varas de bambu são fixadas no centro da cobertura, indicando a flecha máxima e servindo de guia para a fixação das demais varas. A medida que a vara é colocada afastando-se do centro da cobertura, a flecha máxima de cada curva reduz o seu valor. Este valor é encontrado a partir das coordenadas definidas pelas equações das curvas centrais, conforme exposto na Figura 9.

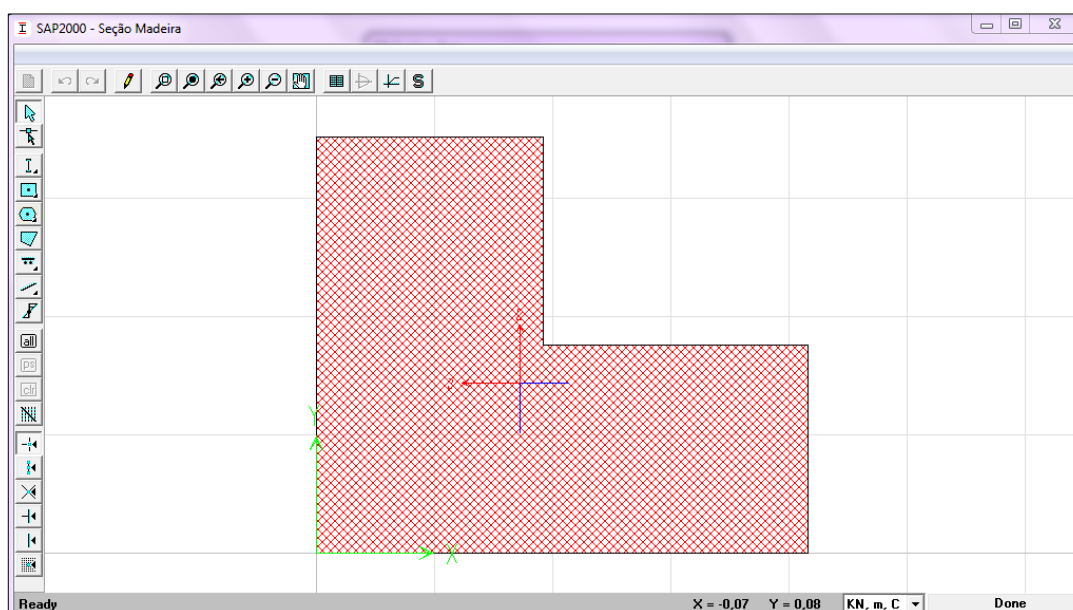


**Figura 9:** Desenho esquemático – indicativo das flechas máximas das varas de bambu

Em decorrência desse raciocínio e através do Excel, foi elaborada uma planilha (Anexo B) que apresenta todas as coordenadas das varas de bambu, obtidas a partir das coordenadas das primeiras duas varas fixadas no centro da cobertura.

Em seguida à definição das coordenadas, a cobertura foi desenhada no programa SAP2000, sendo as varas de bambu definidas como “Curved Frame”, as planilhas das coordenadas no plano XZ e YZ auxiliaram na determinação dos pontos da curva. Além do desenho, foram feitas as definições de material, seções, condições de contorno, lançamento das cargas e posteriormente a simulação da estrutura para análise.

A seção utilizada para o material do bambu foi “tubular”, denominada no SAP2000 como “Pipe section”, com diâmetro externo de 19,00 mm e parede com espessura de 3,0 mm. Já para a madeira, para o procedimento construtivo apresentado, a seção foi definida na opção “Section Designer” considerando duas peças de madeira Parajú com seções 13 cm x 5,5 cm e 6 cm x 5,5 cm, sendo a menor peça pregada sobre a peça de maior dimensão, conforme apresentado na Figura 10.



**Figura 10:** Seção de Madeira desenhada no SAP2000

O carregamento devido ao revestimento da cobertura e a sobrecarga foram lançados na estrutura considerando carga distribuída linearmente ao longo das varas de bambu. Para o cálculo desta carga, foi obtido um comprimento médio de 17 cm através do desenho da cobertura desenvolvido no programa Autocad, entres as diversas varas de bambu que compõem a cobertura. Este valor foi adotado constante para todas as curvas na determinação da área de influência para obtenção da carga aplicada em cada elemento.

Em relação ao revestimento, foi analisado um módulo de placa com dimensões de 0,17 m x 0,17 m e espessura de 2 cm, apoiado nos quatro bordos, supondo argamassa com resistência de

10 MPa. As tensões atuantes não são significativas, pois não superam 5% da resistência da argamassa. Sendo assim, adotou-se para o revestimento a espessura de 2 cm. Dessa forma, tem-se que a carga distribuída devido ao peso próprio do revestimento foi:

- $P_1 = (21 \text{ kN/m}^3 \times 0,02 \text{ m} \times 0,17/2 \text{ m}) = 0,036 \text{ kN/m}$  – curvas internas
- $P_2 = (21 \text{ kN/m}^3 \times 0,02 \text{ m} \times 0,17/2/2 \text{ m}) = 0,018 \text{ kN/m}$  – curvas externas

A carga distribuída linearmente sobre a estrutura considerando a sobrecarga foi:

- $S_1 = (0,5 \text{ kN/m}^2 \times 0,17/2 \text{ m}) = 0,043 \text{ kN/m}$  – curvas internas
- $S_2 = (0,5 \text{ kN/m}^2 \times 0,17/2/2 \text{ m}) = 0,021 \text{ kN/m}$  – curvas externas

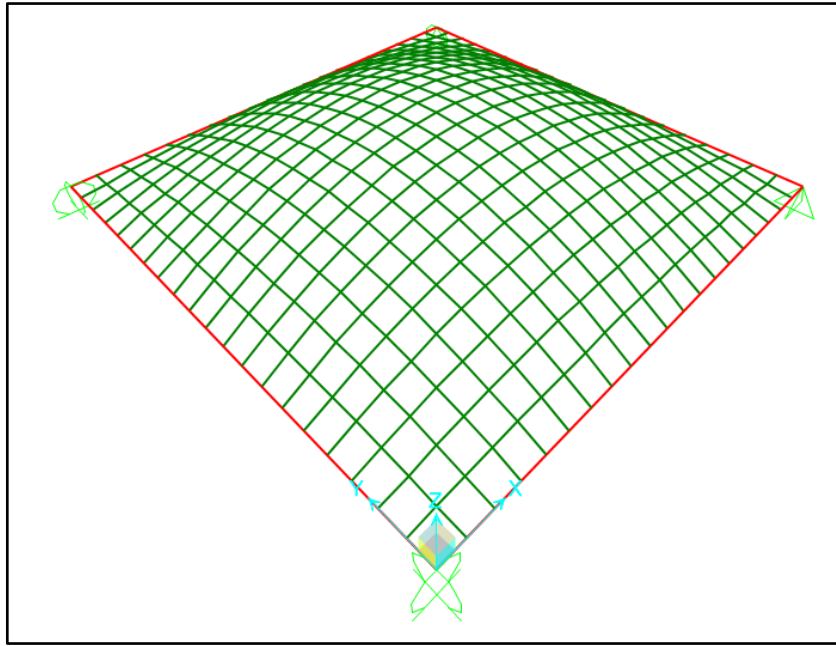
Após a definição dos carregamentos, foi realizada a combinação de ações para o conjunto de cargas aplicadas, conforme equação,  $F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{Gi} F_{Gi,k} + \gamma_Q [F_{Qi,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{0j} F_{Qj,k}]$ , apresentada no item 5.7.1 da NBR 7190:1997.

O parâmetros de cálculo das ações para os estados limites últimos foram definidos conforme o item 5.6 da NBR 7190:1997. Sendo assim, utilizou-se para as cargas permanentes o coeficiente  $\gamma_g = 1,4$  (ações permanente de grande variabilidade) e para as cargas variáveis  $\gamma_q = 1,4$ . Empregou-se apenas uma combinação última, uma vez que foi considerado como carga variável somente a sobrecarga.

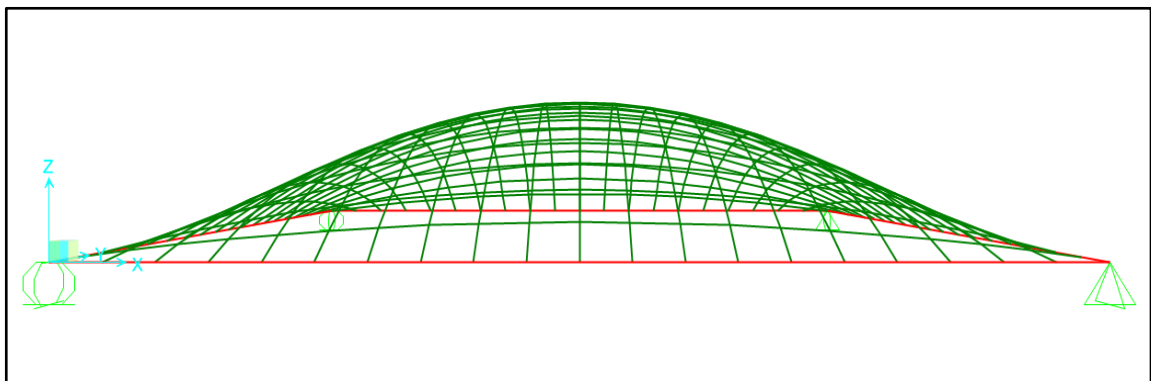
Em relação aos limites de utilização, foi considerado a combinação de longa duração,  $F_{d,uti} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \sum_{j=1}^n \psi_{2j} F_{Qj,k}$ , indicada no item 5.8.1 NBR 7190:1997. Logo, utilizou-se a carga permanente sem coeficiente de majoração e a sobrecarga foi multiplicada pelo coeficiente  $\psi_{2j} = 0,2$  conforme indicado no item 5.4.6 da referida norma.

O projeto considera que a cobertura está apoiada em quatro pontos, sendo estes os vértices de encontro entre as peças de madeira. As condições de contorno foram adotadas de maneira que a estrutura pudesse se movimentar sem causar reações no sentido do eixo da madeira e sem se desprender verticalmente do restante da habitação que vier a ser construída.

A Figura 11 e a Figura 12 demonstram a montagem final do modelo numérico computacional, sendo as linhas verdes correspondentes as varas de bambu e a linha vermelha representado as peças de madeira.



**Figura 11:** Modelo Numérico Computacional da Cobertura – SAP2000



**Figura 12:** Vista lateral do Modelo Numérico Computacional da Cobertura – SAP2000

#### 4.4 Análise dos Resultados

Após a modelagem da cobertura no programa SAP2000, obteve-se os valores das ações de cálculo atuantes nos elementos da estruturas e os deslocamentos. As solicitações normais obtidas através das combinações últimas foram analisadas por meio das relações indicadas no item 7.3 da NBR 7190:1997, sendo elas:

- **Flexotração:**

$$\text{Condição 1: } \frac{\sigma_{Nx,d}}{f_{t0,d}} + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{t0,d}} + km * \frac{\sigma_{My,d}}{f_{t0,d}} \leq 1$$

$$\text{Condição 2: } \frac{\sigma_{Nx,d}}{f_{t0,d}} + km * \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{t0,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{t0,d}} \leq 1$$

- **Flexocompressão:**

$$\text{Condição 1: } \left( \frac{\sigma_{Nc,d}}{f_{c0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{c0,d}} + km * \frac{\sigma_{My,d}}{f_{c0,d}} \leq 1$$

$$\text{Condição 2: } \left( \frac{\sigma_{Nc,d}}{f_{c0,d}} \right)^2 + km * \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{c0,d}} \leq 1$$

- **Flexão simples oblíqua:**

$$\text{Condição 1: } \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{w,d}} + km * \frac{\sigma_{My,d}}{f_{w,d}} \leq 1$$

$$\text{Condição 2: } km * \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{w,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{w,d}} \leq 1$$

O coeficiente de correção  $k_m$ , corresponde aos valores 0,5 para seções retangulares ou 1,0 para outras seções transversais. As tensões de tração,  $\sigma_t$ , atuantes na borda mais tracionada e as tensões de compressão,  $\sigma_c$ , atuantes na borda mais comprimida, foram calculadas pela expressão  $\sigma = \frac{Md}{I} * y$ , sendo:

- $I$  = momento de inércia da seção transversal
- $y$  = distância do eixo neutro a borda mais comprimida ou a borda mais tracionada.

Já as solicitações tangenciais foram calculadas pela expressão  $\tau = \frac{VQ}{It}$  disponibilizada pelo autor Hibbeler (2010) no livro Resistência dos Materiais, sendo:

- $V$  = a força de cisalhamento
- $Q$  = momento estático
- $I$  = momento de inércia da seção transversal
- $t$  = largura da seção transversal do elemento, medida no ponto onde a tensão,  $\tau$ , será determinada.

Esta relação deverá atender a inequação:  $\tau d \leq fv_{0,d}$ .

Os valores de resistências de cálculos apresentados nas expressões citadas anteriormente ( $f_{t0,d}$ ,  $f_{c0,d}$  e  $f_{v0,d}$ ) foram calculadas no procedimento apresentado no item 4.2.3 deste trabalho e demonstrados na Tabela 2.

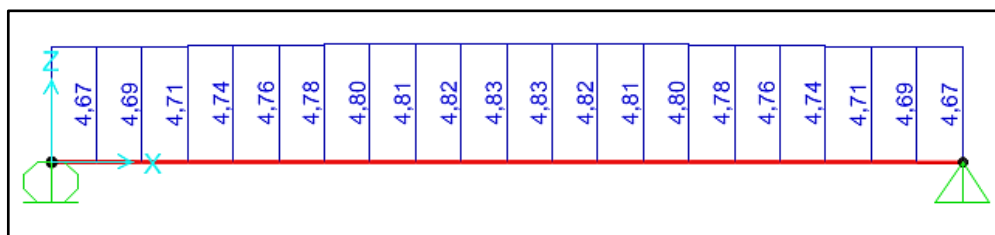
Através da combinação para o limite de utilização foram retirados os deslocamentos máximos que os materiais estão sujeitos. De acordo com o item 9.2.1 da NBR 7190:1997 a flecha efetiva  $u_{ef}$  não poderá ultrapassar  $1/200$  dos vãos.

#### 4.4.1 Análise dos resultados nos elementos de madeira

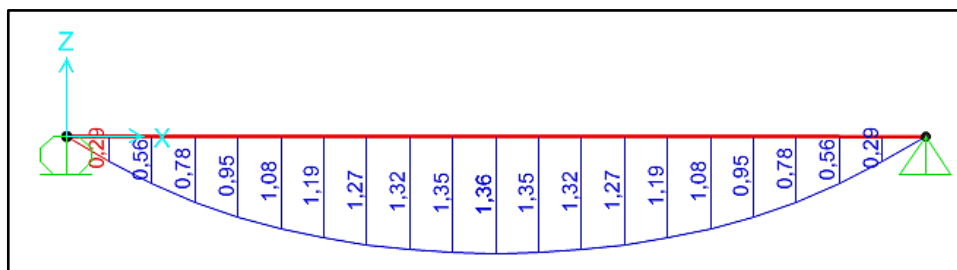
Em relação a madeira, obteve-se que as ações máximas atuantes são iguais nas quatro barras, uma vez que a estrutura é simétrica, e estão submetendo as peças à flexotração. Sendo assim, os valores máximos em módulos encontrados foram:

- Força Axial: 4,827 kN (Tração)
- Momento fletor eixo local 3-3: 1,3632 kN.m
- Momento fletor eixo local 2-2: 2,1999 kN.m
- Força Cortante eixo local 2-2: 1,961 kN
- Força Cortante eixo local 3-3: 4,669 kN

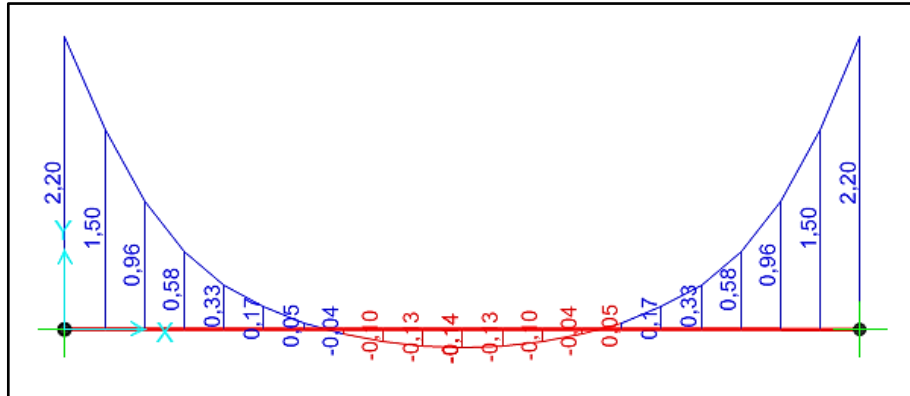
As Figuras 13 a 17 mostram os diagramas encontrados para a madeira, considerando a combinação última.



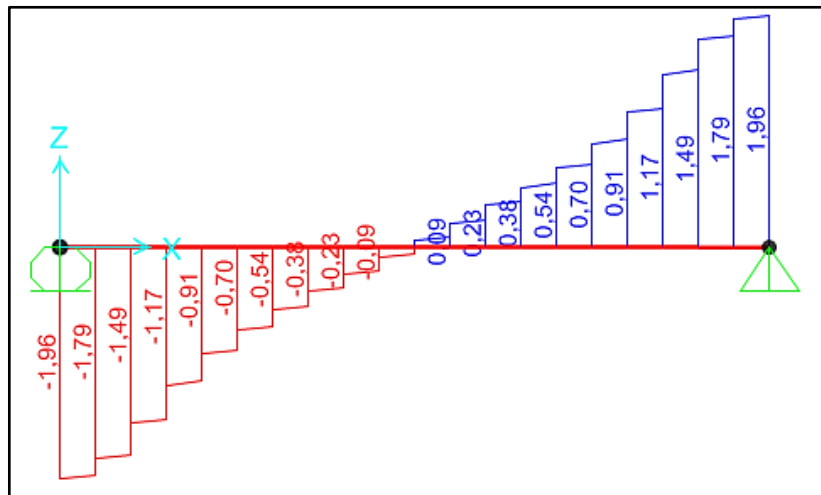
**Figura 13:** Diagrama Força Axial – Madeira



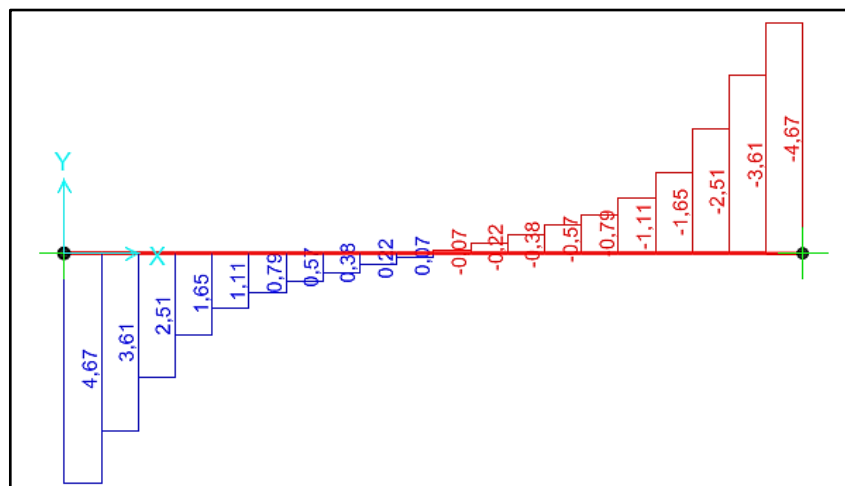
**Figura 14:** Diagrama Momento Fletor Eixo Local 3-3 – Madeira



**Figura 15:** Diagrama Momento Fletor Eixo Local 2-2 – Madeira



**Figura 16:** Diagrama Força Cortante Eixo Local 2-2 - Madeira

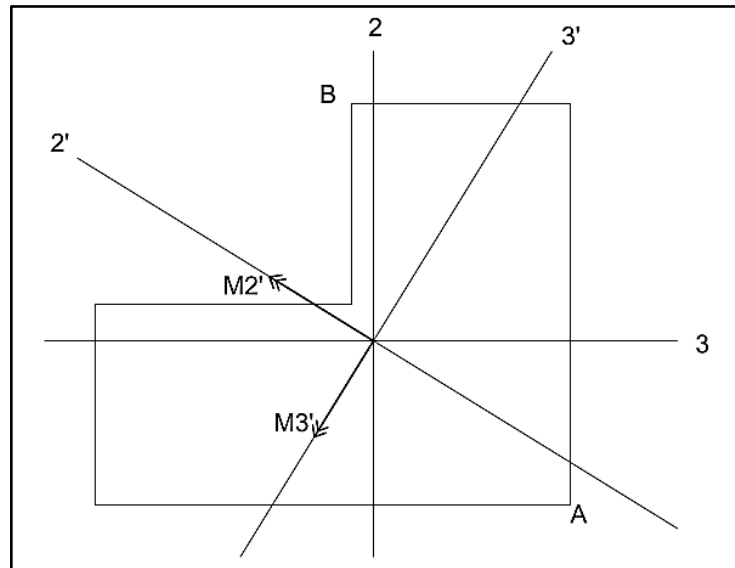


**Figura 17:** Diagrama Força Cortante Eixo Local 3-3 - Madeira

O valor do maior momento fletor no eixo local 3-3 ocorre na região central da peça de madeira, assim como a força axial máxima, já o maior momento fletor no eixo local 2-2 ocorre na extremidade da peça. Em relação a força cortante os maiores valores das ações acontecem nas extremidades da peça de madeira tanto para o eixo 3-3, quanto para o eixo 2-2.



Observa-se que a seção transversal da peça de madeira não possui simetria, sendo assim, primeiramente foram encontrados os eixos principais de inércia e os valores correspondentes das solicitações para esses eixos. A Figura 18 esboça os pontos analisados conforme orientação dos momentos atuantes nos eixos principais de inércia para a seção de maior força axial e maior momento fletor no eixo local 3-3.



**Figura 18:** Momentos atuantes na seção transversal da madeira – seção com maior força axial e maior momento fletor no eixo local 3-3

A partir dos valores máximos encontrados foram feitos os cálculos das relações apresentadas no item 4.4 deste trabalho nas seções onde essas ações ocorrem. As propriedades da seção da madeira (área, momentos de inércia, centro de gravidade) foram retiradas do programa SAP2000.

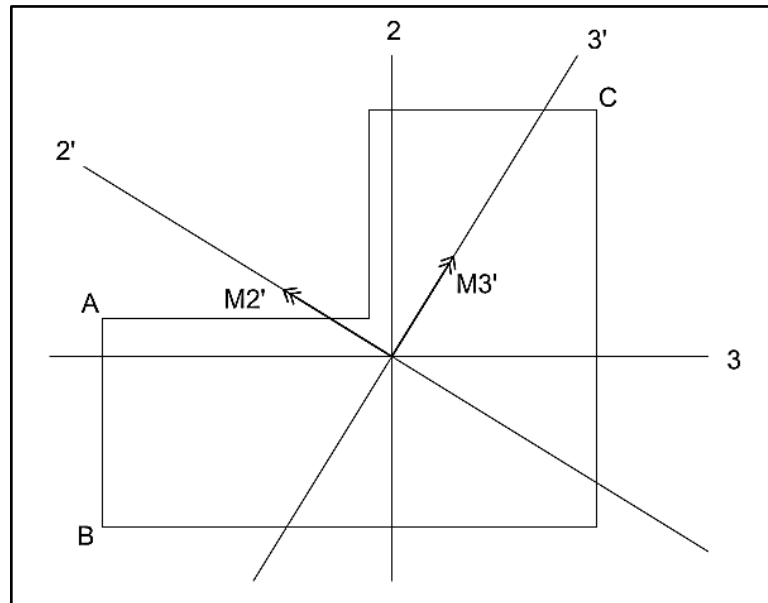
A Tabela 3 resume os dados utilizados e apresenta os resultados dos cálculos executados para as tensões normais solicitantes nos eixos principais de inércia, considerando os pontos indicados na Figura 18. No ponto A foi analisado a flexotração, uma vez que este está localizado na borda mais tracionada da seção estudada. Já no ponto B, embora a peça de madeira esteja submetida ao esforço de flexotração, foi desconsiderado o efeito da força normal de tração, por ser relativamente pequeno considerando os efeitos dos momentos atuantes, e realizada a análise da flexão simples oblíqua considerando o efeito das tensões de compressão, uma vez que este ponto situa-se na borda mais comprimida da seção avaliada.

Na Tabela 3, os efeitos de compressão são indicados com valores negativos.

**Tabela 3:** Cálculo das tensões normais da madeira – pontos analisados na Figura 18

<b>CÁLCULO DAS TENSÕES NORMAIS NA MADEIRA EIXOS PRINCIPAIS DE INÉRCIA - PONTOS FIGURA 18</b>	
<b>Propriedades da Seção</b>	
Área da seção transversal (m <sup>2</sup> )	0,0105
Momento de Inércia (eixo 3'-3') (m <sup>4</sup> )	1,65E-05
Momento de Inércia (eixo 2'-2') (m <sup>4</sup> )	6,78E-06
ycg (m)	0,0449
xcg (m)	0,0539
<b>Resistências de cálculo da madeira</b>	
Resistência à Tração de Cálculo (MPa)	30,16
Resistência à Compressão de Cálculo (MPa)	-23,21
<b>TENSÕES NORMAIS</b>	
<b>Ações atuantes</b>	<b>Seção com Maior Força Axial / Seção com Maior Momento Fletor - Eixo 3-3</b>
Força Axial (kN)	<b>4,827</b>
Momento M3'-3' (kN.m)	1,2335
Momento M2'-2' (kN.m)	0,5968
<b>Efeito da Força Normal</b>	
Tração (MPa)	0,46
<b>Efeito do Momento - EIXO 3'-3'</b>	
<b>Ponto A</b>	
yt3'-3' (m)	0,0694
$\sigma_{t3'-3',d}$ (MPa)	5,19
<b>Ponto B</b>	
yc3'-3' (m)	0,0394
$\sigma_{c3'-3',d}$ (MPa)	-2,94
<b>Efeito do Momento - EIXO 2'-2'</b>	
<b>Ponto A</b>	
yt2'-2' (m)	0,0099
$\sigma_{t2'-2',d}$ (MPa)	0,87
<b>Ponto B</b>	
yc2'-2' (m)	0,0522
$\sigma_{c2'-2',d}$ (MPa)	-4,59
<b>RESULTADOS DAS CONDIÇÕES ANALISADAS</b>	
km	1
Ponto A - Flexotração (Condição 1 = Condição 2)	<b>0,2</b>
Ponto B - Flexão Simples Oblíqua (Condição 1 = Condição 2)	<b>0,3</b>

Além da seção com maior força axial e maior momento fletor no eixo local 3-3, foi verificado também a seção com maior momento fletor no eixo local 2-2. A Figura 19 indica os pontos analisados conforme orientação dos momentos atuantes nos eixos principais de inércia desta seção.



**Figura 19:** Momentos atuantes na seção transversal da madeira – Seção com maior momento fletor no eixo local 2-2

A Tabela 4 resume os dados utilizados e apresenta os resultados dos cálculos executados para as tensões normais solicitantes nos eixos principais de inércia, considerando os pontos indicados na Figura 19. Nesta seção, os pontos A e B foram analisados pela flexotração por estarem localizados na borda mais tracionada. Já o ponto C foi analisado pela flexão simples oblíqua de compressão por está situado na borda mais comprimida e assim como ocorrido na Figura 18, foi desconsiderado nesta análise o efeito da força normal de tração, uma vez que este esforço é relativamente pequeno quando comparado aos efeitos dos momentos na seção avaliada.

Na Tabela 4, os efeitos da compressão são indicados com valores negativos.

**Tabela 4:** Cálculo das tensões normais da madeira – pontos analisados na Figura 19

<b>CÁLCULO DAS TENSÕES NORMAIS NA MADEIRA EIXOS PRINCIPAIS DE INÉRCIA - PONTOS FIGURA 19</b>	
<b>Propriedades da Seção</b>	
Área da seção transversal (m <sup>2</sup> )	0,0105
Momento de Inércia (eixo 3'-3') (m <sup>4</sup> )	1,65E-05
Momento de Inércia (eixo 2'-2') (m <sup>4</sup> )	6,78E-06
ycg (m)	0,0449
xcg (m)	0,0539
<b>Resistências de cálculo da madeira</b>	
Resistência à Tração de Cálculo (MPa)	30,16
Resistência à Compressão de Cálculo (MPa)	-23,21
<b>TENSÕES NORMAIS</b>	
<b>Ações atuantes</b>	<b>Seção com Maior Momento Fletor - Eixo 2-2</b>
Força Axial (kN)	4,669
Momento M3'-3' (kN.m)	1,1542
Momento M2'-2' (kN.m)	<b>1,8717</b>
<b>Efeito da Força Normal</b>	
Tração (MPa)	0,44
<b>Efeito do Momento - EIXO 3'-3'</b>	
<b>Ponto A</b>	
yt3'-3' (m)	0,0701
$\sigma_{t3'-3',d}$ (MPa)	4,90
<b>Ponto B</b>	
yt3'-3' (m)	0,0412
$\sigma_{t3'-3',d}$ (MPa)	2,88
<b>Ponto C</b>	
yc3'-3' (m)	0,0117
$\sigma_{c3'-3',d}$ (MPa)	-0,82
<b>Efeito do Momento - EIXO 2'-2'</b>	
<b>Ponto A</b>	
yt2'-2' (m)	0,0313
$\sigma_{t2'-2',d}$ (MPa)	8,64
<b>Ponto B</b>	
yt2'-2' (m)	0,0782
$\sigma_{t2'-2',d}$ (MPa)	21,58
<b>Ponto C</b>	
yc2'-2' (m)	0,0837
$\sigma_{c2'-2',d}$ (MPa)	-23,09
<b>RESULTADOS DAS CONDIÇÕES ANALISADAS</b>	
km	1
Ponto A - Flexotração (Condição 1 = Condição 2)	<b>0,5</b>
Ponto B - Flexotração (Condição 1 = Condição 2)	<b>0,8</b>
Ponto C - Flexão Simples Oblíqua (Condição 1 = Condição 2)	<b>1,0</b>

Em relação às tensões transversais atuantes na seção da madeira, os resultados dos cálculos foram indicados na Tabela 5 para os eixos principais de inércia. A análise foi realizada para a seção com maior força de cisalhamento atuante no eixo local 2-2, que coincide com a seção com maior força de cisalhamento atuante no eixo local 3-3. Após o cálculo da tensão de cisalhamento atuante em cada eixo, fez-se o cálculo da tensão resultante.

**Tabela 5:** Cálculo das tensões transversais da madeira

<b>CÁLCULO DAS TENSÕES TRANSVERSAIS NA MADEIRA EIXOS PRINCIPAIS DE INÉRCIA</b>		
Momento de Inércia (eixo 3'-3') (m <sup>4</sup> )	1,65E-05	
Momento de Inércia (eixo 2'-2') (m <sup>4</sup> )	6,78E-06	
Momento Estático (eixo 3'-3') (m <sup>3</sup> )	0,0001238	
Momento Estático (eixo 2'-2') (m <sup>3</sup> )	0,0001232	
<b>TENSÕES DE CISALHAMENTO</b>		
<b>Ações atuantes</b>	<b>Eixo 2'-2' (V2)</b>	<b>Eixo 3'-3' (V3)</b>
Cortante (kN)	<b>0,7815</b>	<b>5,0034</b>
Largura t na posição considerada (m)	0,0826	0,1292
<b>Tensão de Cisalhamento Atuante em cada eixo (<math>\tau</math>) (MPa)</b>	0,07	0,70
<b>Tensão de Cisalhamento Atuante em cada eixo (<math>\tau_r</math>) (MPa)</b>	<b>0,71</b>	
<b>Resistência ao Cisalhamento de Cálculo (<math>f_{v0,d}</math>) (MPa)</b>	<b>2,50</b>	

Através dos resultados expostos nas Tabela 3, 4 e 5, conclui-se que as peças de madeira resistiram aos esforços aplicados na cobertura, uma vez que as relações da flexotração (condição 1 e 2) e flexão simples oblíqua (condição 1 e 2) são valores menores ou iguais a 1 e a tensão de cisalhamento é menor que a resistência ao cisalhamento.

Em relação aos deslocamentos, os valores máximos encontrados para os estados limites de serviços foram **0,5621 cm** na direção do eixo local 2. Logo, os valores encontrados estão abaixo do permitido,  $u_{ef} = 300/200 = 1,5$  cm.

#### **4.4.2 Análise dos resultados nos elementos de bambu**

A análise feita para os elementos de bambu foi concentrada nas varas localizadas a 15 cm, 30 cm, 45 cm e 60 cm de distância das peças de madeira, pois elas estão sujeitas aos maiores esforços encontrados para este material considerando os estados limites últimos. Os resultados obtidos indicam que as principais ações submetem as varas de bambu à flexocompressão. Os valores máximos em módulos encontrados estão expostos na Tabela 6.



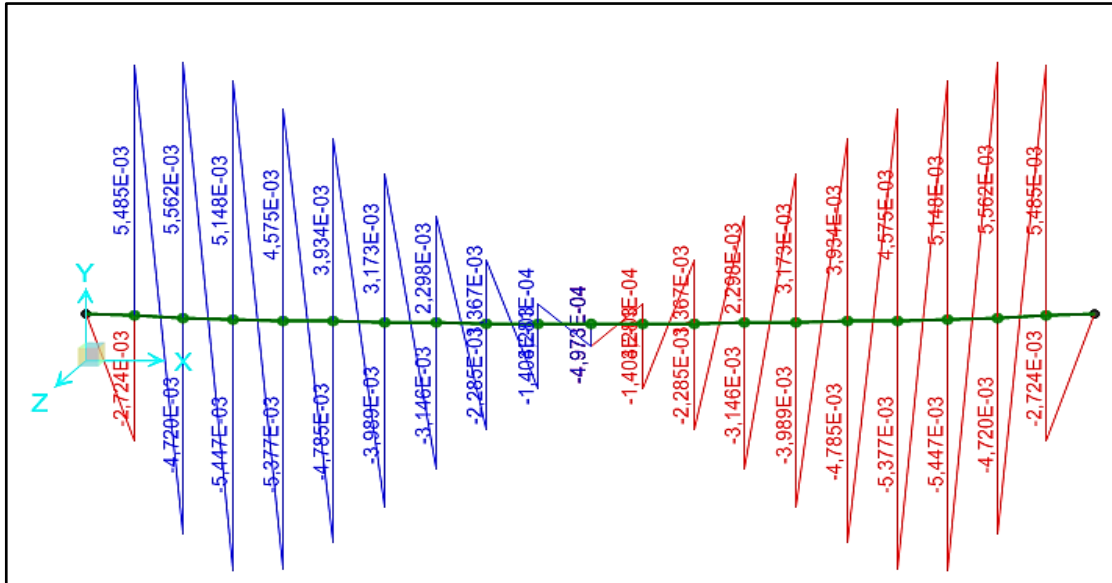


Figura 22: Diagrama Momento Fletor Eixo Local 2-2 – Bambu

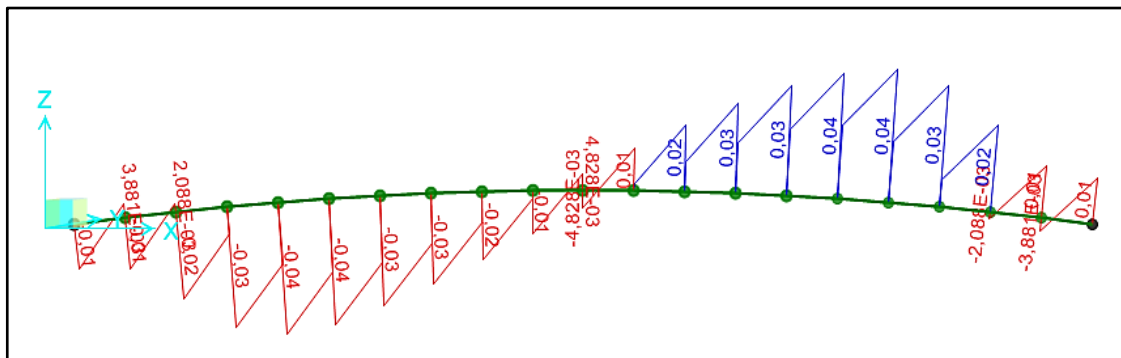


Figura 23: Diagrama Força Cortante Eixo Local 2-2 – Bambu

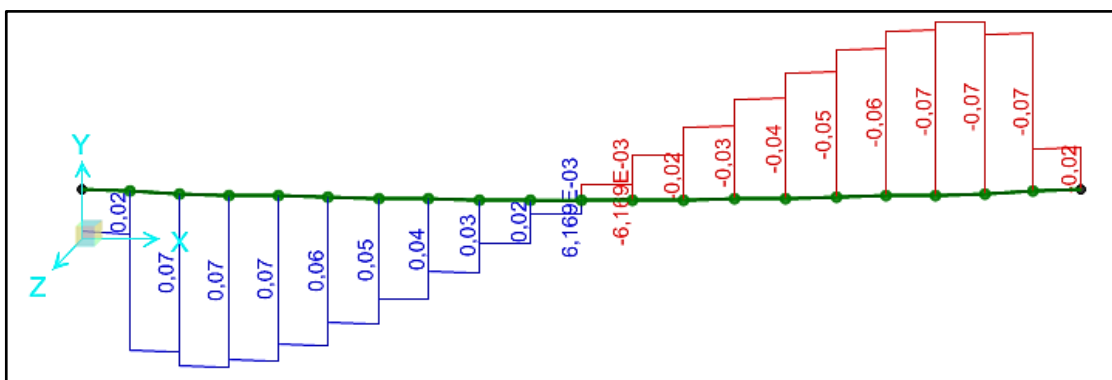


Figura 24: Diagrama Força Cortante Eixo Local 3-3 – Bambu

Assim como realizado na madeira, a partir dos valores máximos das solicitações encontradas, foram realizados os cálculos para as relações indicadas no item 4.4 deste trabalho. Os valores das propriedades da seção (área, momentos de inércia, centro de gravidade) foram retirados do programa SAP2000.

As Tabelas 7 a 10 resumem os dados utilizados e apresentam os resultados obtidos para cada relação de flexocompressão nas seções com os maiores esforços atuantes. A análise foi realizada considerando neste caso da seção circular o momento resultante das solicitações máximas, tanto para as solicitações normais quanto para as solicitações transversais. Além disso, os efeitos da compressão estão indicados com valores negativos.

**Tabela 7:** Cálculo das tensões normais e transversais do bambu a 15 cm de distância da madeira

<b>CÁLCULO DAS TENSÕES NORMAIS E TRANSVERSAIS VARA DE BAMBU A 15 CM</b>			
<b>Propriedades da Seção</b>			
Área da seção transversal (m <sup>2</sup> )	1,517E-04		
Momento de Inércia (eixo 3-3) (m <sup>4</sup> )	5,087E-09		
Momento de Inércia (eixo 2-2) (m <sup>4</sup> )	5,087E-09		
ycg (m)	0,0095		
xcg (m)	0,0095		
Momento Estático (eixo 3-3) (m <sup>3</sup> )	3,885E-07		
Momento Estático (eixo 2-2) (m <sup>3</sup> )	3,885E-07		
<b>Resistência de cálculo do bambu</b>			
Resistência à Compressão de Cálculo (MPa)	-20,52		
<b>TENSÕES NORMAIS</b>			
<b>Ações atuantes</b>	<b>Seção com Maior Força Axial</b>	<b>Seção com Maior Momento Fletor - Eixo 3-3</b>	<b>Seção com Maior Momento Fletor - Eixo 2-2</b>
Força Axial (kN)	<b>1,0660</b>	0,788	0,955
Momento M3-3 (kN.m)	0,000	<b>0,0025</b>	0,0015
Momento M2-2 (kN.m)	0,000	0,0040	<b>0,0056</b>
Momento Resultante	<b>0,000</b>	<b>0,0047</b>	<b>0,0058</b>
<b>Efeito da Força Normal</b>			
Compressão (MPa)	-7,03	-5,19	-6,30
<b>Efeito do Momento Resultante</b>			
ycr (m)	0,0095	0,0095	0,0095
$\sigma_{r,d}$ (MPa)	0,00	-8,81	-10,83
<b>Flexocompressão - Momento Resultante</b>			
km	1	1	1
Condição 1 = Condição 2	0,12	0,49	0,62
<b>TENSÕES DE CISALHAMENTO</b>			
<b>Ações atuantes</b>	<b>Seção com Maior Força de Cisalhamento no Eixo 2-2</b>	<b>Seção com Maior Força de Cisalhamento no Eixo 3-3</b>	
Cortante V2 (kN)	0,038	0,025	
Cortante V3 (kN)	0,062	0,073	
Cortante Resultante (kN)	<b>0,0727</b>	<b>0,0772</b>	
Largura t na posição considerada	0,0095	0,0095	
<b>Tensão de Cisalhamento Atuante (<math>\tau</math>) (MPa)</b>	<b>0,58</b>	<b>0,62</b>	
<b>Resistência ao Cisalhamento de Cálculo (<math>f_{v0,d}</math>) (MPa)</b>	12,83	12,83	



**Tabela 8:** Cálculo das tensões normais e transversais do bambu a 30 cm de distância da madeira

<b>CÁLCULO DAS TENSÕES NORMAIS E TRANSVERSAIS VARA DE BAMBU A 30 CM</b>			
<b>Propriedades da Seção</b>			
Área da seção transversal (m <sup>2</sup> )	1,517E-04		
Momento de Inércia (eixo 3-3) (m <sup>4</sup> )	5,087E-09		
Momento de Inércia (eixo 2-2) (m <sup>4</sup> )	5,087E-09		
ycg (m)	0,0095		
xcg (m)	0,0095		
Momento Estático (eixo 3-3) (m <sup>3</sup> )	3,885E-07		
Momento Estático (eixo 2-2) (m <sup>3</sup> )	3,885E-07		
<b>Resistência de cálculo do bambu</b>			
Resistência à Compressão de Cálculo (MPa)	-20,52		
<b>TENSÕES NORMAIS</b>			
<b>Ações atuantes</b>	<b>Seção com Maior Força Axial</b>	<b>Seção com Maior Momento Fletor - Eixo 3-3</b>	<b>Seção com Maior Momento Fletor - Eixo 2-2</b>
Força Axial (kN)	<b>1,1310</b>	1,1	1,11
Momento M3-3 (kN.m)	0,00	<b>0,0028</b>	0,0018
Momento M2-2 (kN.m)	0,00	0,0063	<b>0,0069</b>
Momento Resultante	<b>0,000</b>	<b>0,0069</b>	<b>0,0071</b>
<b>Efeito da Força Normal</b>			
Compressão (MPa)	-7,46	-7,25	-7,32
<b>Efeito do Momento Resultante</b>			
ycr (m)	0,0095	0,0095	0,0095
$\sigma_{r,d}$ (MPa)	0,00	-12,87	-13,32
<b>Flexocompressão - Momento Resultante</b>			
km	1	1	1
Condição 1 = Condição 2	0,13	0,75	0,78
<b>TENSÕES DE CISALHAMENTO</b>			
<b>Ações atuantes</b>	<b>Seção com Maior Força de Cisalhamento no Eixo 2-2</b>	<b>Seção com Maior Força de Cisalhamento no Eixo 3-3</b>	
Cortante V2 (kN)	0,041	0,025	
Cortante V3 (kN)	0,075	0,089	
Cortante Resultante (kN)	<b>0,0855</b>	<b>0,0924</b>	
Largura t na posição considerada	0,0095	0,0095	
<b>Tensão de Cisalhamento Atuante (<math>\tau</math>) (MPa)</b>	<b>0,69</b>	<b>0,74</b>	
<b>Resistência ao Cisalhamento de Cálculo (<math>f_{v0,d}</math>) (MPa)</b>	12,83	12,83	

**Tabela 9:** Cálculo das tensões normais e transversais do bambu a 45 cm de distância da madeira

<b>CÁLCULO DAS TENSÕES NORMAIS E TRANSVERSAIS VARA DE BAMBU A 45 CM</b>			
<b>Propriedades da Seção</b>			
Área da seção transversal (m <sup>2</sup> )	1,517E-04		
Momento de Inércia (eixo 3-3) (m <sup>4</sup> )	5,087E-09		
Momento de Inércia (eixo 2-2) (m <sup>4</sup> )	5,087E-09		
ycg (m)	0,0095		
xcg (m)	0,0095		
Momento Estático (eixo 3-3) (m <sup>3</sup> )	3,885E-07		
Momento Estático (eixo 2-2) (m <sup>3</sup> )	3,885E-07		
<b>Resistência de cálculo do bambu</b>			
Resistência à Compressão de Cálculo (MPa)	-20,52		
<b>TENSÕES NORMAIS</b>			
<b>Ações atuantes</b>	<b>Seção com Maior Força Axial</b>	<b>Seção com Maior Momento Fletor - Eixo 3-3</b>	<b>Seção com Maior Momento Fletor - Eixo 2-2</b>
Força Axial (kN)	<b>0,9070</b>	0,899	0,900
Momento M3-3 (kN.m)	0,000	<b>0,0028</b>	0,0018
Momento M2-2 (kN.m)	0,000	0,0066	<b>0,0071</b>
Momento Resultante	<b>0,000</b>	<b>0,0072</b>	<b>0,0073</b>
<b>Efeito da Força Normal</b>			
Compressão (MPa)	-5,98	-5,93	-5,93
<b>Efeito do Momento Resultante</b>			
ycr (m)	0,0095	0,0095	0,0095
$\sigma_{r,d}$ (MPa)	0,00	-13,39	-13,68
<b>Flexocompressão - Momento Resultante</b>			
km	1	1	1
Condição 1 = Condição 2	0,08	0,74	0,75
<b>TENSÕES DE CISALHAMENTO</b>			
<b>Ações atuantes</b>	<b>Seção com Maior Força de Cisalhamento no Eixo 2-2</b>	<b>Seção com Maior Força de Cisalhamento no Eixo 3-3</b>	
Cortante V2 (kN)	0,038	0,022	
Cortante V3 (kN)	0,078	0,0910	
Cortante Resultante (kN)	<b>0,0868</b>	<b>0,0936</b>	
Largura t na posição considerada	0,0095	0,0095	
<b>Tensão de Cisalhamento Atuante (<math>\tau</math>) (MPa)</b>	<b>0,70</b>	<b>0,75</b>	
<b>Resistência ao Cisalhamento de Cálculo (<math>f_{v0,d}</math>) (MPa)</b>	12,83	12,83	

**Tabela 10:** Cálculo das tensões normais e transversais do bambu a 60 cm de distância da madeira

<b>CÁLCULO DAS TENSÕES NORMAIS E TRANSVERSAIS VARA DE BAMBU A 60 CM</b>			
<b>Propriedades da Seção</b>			
Área da seção transversal (m <sup>2</sup> )	1,517E-04		
Momento de Inércia (eixo 3-3) (m <sup>4</sup> )	5,087E-09		
Momento de Inércia (eixo 2-2) (m <sup>4</sup> )	5,087E-09		
ycg (m)	0,0095		
xcg (m)	0,0095		
Momento Estático (eixo 3-3) (m <sup>3</sup> )	3,885E-07		
Momento Estático (eixo 2-2) (m <sup>3</sup> )	3,885E-07		
<b>Resistência de cálculo do bambu</b>			
Resistência à Compressão de Cálculo (MPa)	-20,52		
<b>TENSÕES NORMAIS</b>			
<b>Ações atuantes</b>	<b>Seção com Maior Força Axial</b>	<b>Seção com Maior Momento Fletor - Eixo 3-3</b>	<b>Seção com Maior Momento Fletor - Eixo 2-2</b>
Força Axial (kN)	<b>0,5970</b>	0,594	0,589
Momento M3-3 (kN.m)	0,0025	<b>0,0026</b>	0,0016
Momento M2-2 (kN.m)	0,0056	0,0063	<b>0,0068</b>
Momento Resultante	<b>0,0061</b>	<b>0,0068</b>	<b>0,0070</b>
<b>Efeito da Força Normal</b>			
Compressão (MPa)	-3,94	-3,92	-3,88
<b>Efeito do Momento Resultante</b>			
ycr (m)	0,0095	0,0095	0,0095
$\sigma_{r,d}$ (MPa)	-11,45	-12,73	-13,05
<b>Flexocompressão - Momento Resultante</b>			
km	1	1	1
Condição 1 = Condição 2	0,60	0,66	0,67
<b>TENSÕES DE CISALHAMENTO</b>			
<b>Ações atuantes</b>	<b>Seção com Maior Força de Cisalhamento no Eixo 2-2</b>	<b>Seção com Maior Força de Cisalhamento no Eixo 3-3</b>	
Cortante V2 (kN)	0,0340	0,0180	
Cortante V3 (kN)	0,075	0,0860	
Cortante Resultante (kN)	<b>0,0823</b>	<b>0,0879</b>	
Largura t na posição considerada	0,0095	0,0095	
<b>Tensão de Cisalhamento Atuante (<math>\tau</math>) (MPa)</b>	<b>0,66</b>	<b>0,71</b>	
<b>Resistência ao Cisalhamento de Cálculo (<math>f_{v0,d}</math>) (MPa)</b>	12,83	12,83	

Através dos resultados expostos nas Tablas 7 a 10, conclui-se que as varas de bambu resistiram aos esforços aplicados na cobertura, uma vez que as relações da flexocompressão (condição 1 e 2) são valores menores ou iguais a 1 e a tensão de cisalhamento é menor que a resistência ao cisalhamento.

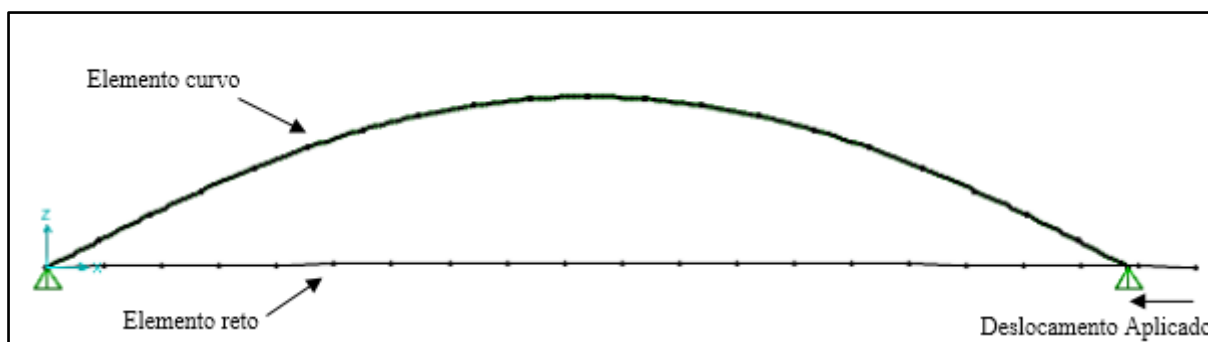
Além da compressão também deve ser verificado o índice de esbeltez ( $\lambda$ ) das varas de bambu. A relação é dada por:  $\lambda = \frac{L_0}{i_{min}}$ , sendo  $L_0$  comprimento destravado da peça e  $i_{min}$  o raio de giração mínimo da seção transversal. Adotando-se  $L_0 = 0,17$  m, uma vez que as varas estão travadas nos pontos de interseção, e  $i_{min} = 0,00579$  m, tem-se  $\lambda = 29,36 \leq 40$  (peças curtas). Logo, as verificações realizadas anteriormente são suficientes para averiguação da segurança da estrutura.

Em relação aos deslocamentos, os valores máximos encontrados para os estados limites de serviços foram **0,9891 cm** na direção do eixo local 2 (no cruzamento das barras centrais). Logo, os valores encontrados estão abaixo do permitido,  $u_{ef} = 300/200 = 1,5$  cm.

#### 4.5 Análise das Tensões Iniciais (Pré Tensão)

Os elementos de Bambu que compõem a cobertura estudada neste trabalho possuem tensões iniciais devido à geometria destes elementos. Ao dispor as varas de bambu na forma curva e também ao impedi-la de voltar a sua forma original, surgem esforços que independem do carregamento aplicado. Dessa forma, foi realizada uma análise do elemento isolado do bambu para verificar como este se comporta frente a esta deformação prévia.

A verificação para a situação descrita foi realizada através de uma análise não linear geométrica no programa SAP2000. Inicialmente foi desenhado um elemento reto, que representasse a vara de bambu antes de ser dobrada, com apoios rotulados fixos em suas extremidades. Posteriormente, aplicou-se em uma das extremidades um deslocamento suficiente para atender a flecha desejada para a vara de bambu. A Figura 25 apresenta um desenho esquemático deste procedimento.



**Figura 25:** Desenho esquemático – análise não linear

A referida análise, concentrou-se na vara de bambu situada no meio do vão. Esta vara possui um comprimento reto de 3,2089 m, pois para obter a flecha máxima de 0,50 m em um vão de 3 m foi necessário aplicar um deslocamento de 0,2089 m em uma de suas extremidades. O recurso do SAP2000 “Curved Frame” foi utilizado para que o elemento reto acompanhasse a curva da vara. Além disso, aplicou-se um pequeno deslocamento (deformação inicial) de 0,01 m no centro do vão. Vale ressaltar ainda que o deslocamento final foi implementado de forma incremental, adotando-se 100 “passos”, visando um comportamento adequado da resposta numérica linear.

No método construtivo da cobertura Domocaña, Camargos (2014) orienta que o bambu seja dobrado ainda “verde” para que o esforço à flexão não o quebre, uma vez que este estado confere menor rigidez a vara. Sendo assim, adotou-se um módulo de elasticidade variável para verificar o estado de tensão desta forma curva que a vara de bambu apresenta.

Ao realizar a análise com o módulo de elasticidade de 70% do valor utilizado inicialmente no trabalho, encontrou-se uma tensão solicitante devido à flexão do bambu de 45,19 MPa, valor este inferior a resistência de compressão média de 51,29 MPa. Já para a resistência à compressão de cálculo de 20,52 MPa, a análise não linear realizada mostrou que o módulo de elasticidade para o bambu não pode superar 30% do módulo encontrado na literatura para a espécie considerada neste trabalho.

Os resultados encontrados nesta verificação vão ao encontro das recomendações de Camargos (2014) de que o bambu deve ser dobrado verde (módulo de elasticidade menor) e com diâmetro de até 3/4” para evitar a quebra da vara na execução da cobertura.

## 5. CONCLUSÃO

Diante os resultados obtidos na análise estrutural realizada neste trabalho é possível verificar que a cobertura em estudo atendeu satisfatoriamente os critérios exigidos pela NBR 7190:1997 Projeto de Estrutura de Madeira. Além disso, o bambu apresenta-se como alternativa a ser utilizada na construção civil, principalmente no processo da autoconstrução, considerando que é um material com disponibilidade em várias regiões brasileiras.

Outro aspecto a ser observado é a importância da análise estrutural voltada às habitações de interesse social, pois a ineficiência de políticas públicas, que atendessem toda a demanda existente por moradia, condicionou a população carente à utilização de recursos “não convencionais” e até mesmo impróprios para a construção de suas casas. Dessa forma, a análise estrutural surge como ferramenta para orientação de organizações que colaboram com a população carente na autoconstrução das suas moradias, visando o atendimento aos critérios de segurança. Através deste tipo de estudo, as pessoas poderão ser auxiliadas nas construções de suas residências por meio da indicação dos materiais alternativos a serem empregados e os métodos construtivos que proporcionem bom desempenho da estrutura.

Sendo assim, sugere-se para trabalhos futuros o ensaio em laboratório, por meio de protótipos, da cobertura deste estudo como forma de comparar os resultados obtidos. Recomenda-se também o estudo da cobertura Domocaña em sua concepção original apresentada por Camargos (2014), podendo ser realizada a análise experimental com instrumentação dos elementos estruturais com medidores de deformação e deslocamento. Outra possibilidade de comparação a ser utilizada seria o emprego de programas computacionais melhorando o modelo adotado através de outras considerações para a ligação bambu-madeira ou bambu-bambu.

## REFERÊNCIA

ALVES FILHO, Avelino. **Elementos Finitos: A base da Tecnologia CAE**. 5. ed. São Paulo: Érica Ltda, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 1980.

BAMBUZEIRA Cruzeiro do Sul. Disponível em: <<http://www.bambrus.com.br>>. Acesso em: 04 de agosto 2017.

BERALDO, Antonio L. (Ed.). **Norma brasileira para estruturas de bambu**. 2017. Disponível em: <<http://apuama.org/norma-brasileira-para-estruturas-de-bambu/>>. Acesso em: 03 dez. 2017.

CAMARGOS, Marina Ramalho Sena. **Tecnologias Construtivas de Coberturas para Habitações de Interesse Social**. 2014. 58 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Produção Civil, CEFET-MG, Belo Horizonte, 2014.

COMEP INDUSTRIA E COMÉRCIO LTDA.. **TELA HEXAGONAL COMEP**. Itupeva: Comep, 2018. Disponível em: <<http://comeptelas.com.br/tela-hexagonal/>>. Acesso em: 31 maio 2018.

CRUZ, Martha Lissette Sánchez. **Caracterização física e mecânica de colmos inteiros do bambu da espécie Phyllostachys aurea: Comportamento à flambagem**. 2002. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002. Disponível em: <[http://www.nima.puc-rio.br/cursos/pdf/032\\_martha.pdf](http://www.nima.puc-rio.br/cursos/pdf/032_martha.pdf)>. Acesso em: 04 ago. 2017.

CUNHA, Egláisa Micheline Pontes; ARRUDA, Ângelo Marcos Vieira de; MEDEIROS, Yara (Org.). **Experiências em habitação de interesse social no Brasil**. Brasília: Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Habitação, 2007. 219 p. Disponível em: <<http://www.conder.ba.gov.br/ckfinder/userfiles/files/livro-experiencia-habitacaosocial.pdf>>. Acesso em: 25 maio 2017.

ECOVILA DA MONTANHA. **Introdução ao bambu**. Disponível em: <<http://ecoviladamontanha.org/introducao-ao-bambu/>>. Acesso em: 05 nov. 2017.

Fundação João Pinheiro. Centro de Estatística e Informações. **Déficit habitacional no Brasil 2013-2014** / Fundação João Pinheiro. Centro de Estatística e Informações –Belo Horizonte, 2016.92 p. Disponível em: <http://www.fjp.mg.gov.br>. Acesso em: 28 maio 2017.

FORAGI, Rafael. **Uma análise do programa Minha Casa Minha Vida**. 2012. 61 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciências Econômicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/69963/000875591.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 05 jul. 2018.

GHAVAMI, Khosrow; MARINHO, Albanise B.. Propriedades Físicas e mecânicas do Colmo inteiro do bambu da espécie *Guadua angustifolia*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 1, p.107-114, mar. 2005. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v9n1/v9n1a16.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2017.

HIBBELER, Russell Charles. **Resistência dos Materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

IMPÉRIO DAS MADEIRAS. **Catálogo Madeiras**. Disponível em: <<http://imperiodasmadeiras.com.br/plus/modulos/catalogo/listaCat.php?cdcategoriapai=1>>. Acesso em: 05 nov. 2017.

LOGAN, Daryl L. **A First Course in the Finite Element Method**. 4. ed. Platteville: Thomson, 2007

MANHÃES, Adriana Pellegrine. Caracterização da Cadeia Produtiva do Bambu no Brasil: Abordagem Preliminar. 2008. 28 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Florestal, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2008. Disponível em: <[http://www.bambusc.org.br/wpcontent/uploads/2009/05/caracterizacao\\_cadeira\\_produtiva\\_adriana\\_pellegrini\\_manhaes.pdf](http://www.bambusc.org.br/wpcontent/uploads/2009/05/caracterizacao_cadeira_produtiva_adriana_pellegrini_manhaes.pdf)>. Acesso em: 21 maio 2017.

Ministério do Planejamento (Org.). **Minha Casa Minha Vida atinge 3,857 milhões de moradias**. 2015. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/editoria/infraestrutura/2015/05/minha-casa-minha-vida-atinge-3-857-milhoes-de-moradias>>. Acesso em: 05 jul. 2018.

OLIVEIRA, Luiz Fernando Andrade de. **Conhecendo bambus e suas Potencialidades para uso na Construção Civil**. 2013. 82 f. Monografia (Especialização) - Curso de Especialização em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013. Disponível em: <<http://pos.demc.ufmg.br/novocecc/trabalhos/pg2/100.pdf>>. Acesso em: 07 ago. 2017.

PRODANOV, Cleber Cristiano; FREITAS, Ernani Cesar de. **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico**. Novo Hamburgo: Universidade Feevale, 2013. Disponível em: <[http://www.feevale.br/Comum/midias/8807f05a-14d0-4d5b-b1ad-1538f3aef538/E-book Metodologia do Trabalho Cientifico.pdf](http://www.feevale.br/Comum/midias/8807f05a-14d0-4d5b-b1ad-1538f3aef538/E-book%20Metodologia%20do%20Trabalho%20Cientifico.pdf)>. Acesso em: 14 maio 2017.

SOUZA, Adriene Pereira Cobra Costa. BAMBUNHA HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL NO BRASIL. **Cadernos de Arquitetura e Urbanismo**, Belo Horizonte, v. 11, n. 12, p.217-245, dez. 2004. Disponível em: <<http://periodicos.pucminas.br/index.php/Arquiteturaeurbanismo/article/viewFile/860/826>>. Acesso em: 21 maio 2017.



## ANEXO A – PROCEDIMENTO CONSTRUTIVO TETO DOMOCAÑA

### 3. TECNOLOGIAS CONSTRUTIVAS

Este capítulo aborda as tecnologias construtivas de coberturas selecionadas através das fichas técnicas do Programa 10x10 e compiladas pelo Coordenador Pedro Lorenzo Gállico no livro “*Um Techo para Vivir*”. Para tanto, serão apresentados os materiais necessários para construção, assim como, o método construtivo da cobertura.

#### 3.1 TETO DOMOCAÑA/ DOMOTECHO

##### 3.1.1 Descrição Geral

Esta tecnologia foi desenvolvida pela Universidade Nacional de Engenharia – Faculdade de Arquitetura, Urbanismo e Artes, localizada em Lima no Peru. Ela consiste na construção de cúpulas em que o principal material utilizado em sua estrutura são espécies de Bambu ou Cana que reduz significativamente o peso da estrutura, mantendo sua característica de resistência estrutural e sísmica, ver Figura 4 (SANDOVAL, 2008).



**Figura 4** – Estrutura da Cúpula Domocaña.  
Fonte: GÁLIGO et. al. (2005)

Além do Bambu, é utilizado tela de galinheiro na face superior e inferior da cúpula (Figura 5a) e o revestimento é executado por camadas de argamassa (cimento-areia) nas duas faces (Figura 5b), conforme mostrado na Figura 5 (GÁLIGO et. al., 2005).



**Figura 5** – Estrutura da Cúpula Domocaña.  
Fonte: BARRIONUEVO (2011)

A cúpula poderá ser executada em cima de uma mesa de madeira ou de suportes que facilitam a realização da estrutura. Os materiais e ferramentas necessários para a construção do teto Domocaña, são:

- **Materiais:** peças de madeira com seção 4”x1”;
- peças de madeira com seção 2”x2”;
- espécies de cana ou bambu com dimensões de 1/2” a 3/4”;
- tela de galinheiro de 1/2”;
- arame de construção;
- pregos de 2 1/2”;
- cimento;
- areia;
- água;
- **Ferramentas:** serra;
- tesoura para cortar metal;
- martelo;
- esquadro;
- pás;
- carrinho de mão;
- caçambas;
- colher de pedreiro;
- fita métrica (GÁLLIGO et. al., 2005; SANDOVAL, 2008).

Sandoval (2008) recomenda que a espécie de bambu ou cana seja cortada poucos dias antes da construção da cúpula (menos de uma semana), além disso, este vegetal deve estar “verde” para que os esforços de flexão não o quebre. Outro aspecto importante citado pelo autor é o armazenamento deste material na horizontal para evitar que ele se deforme.

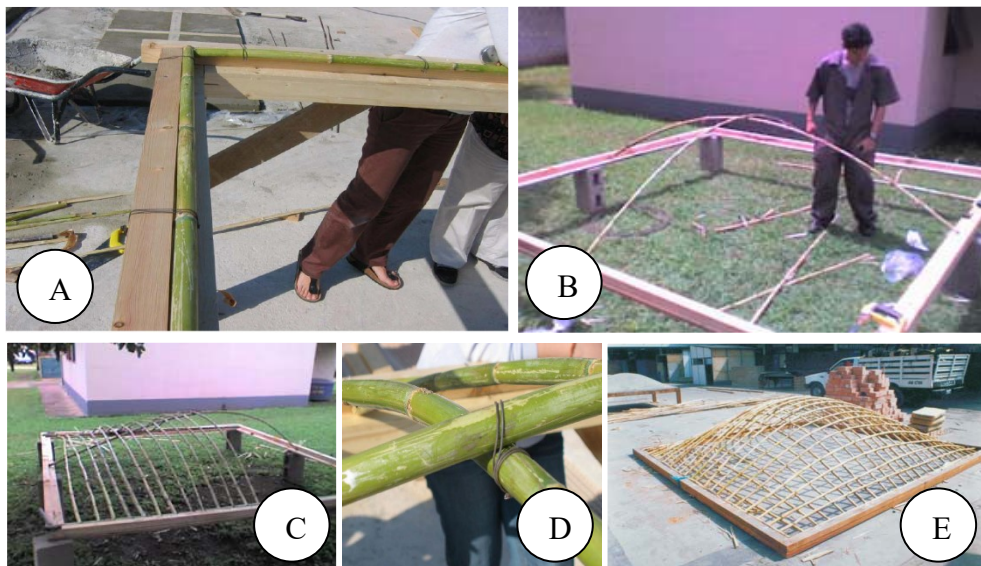
### 3.1.2 Método Construtivo

Para construção da Cúpula Domocaña, primeiramente, é preciso executar a moldura de apoio que suportará a estrutura de bambu (Figura 6a). Sendo assim, utiliza-se quatro peças de madeira com as dimensões 4”x1” e quatro com as dimensões 2”x2” (Figuras 6b e 6c). Os pregos devem ser fixados a cada 20 cm (GÁLLIGO et. al., 2005; SANDOVAL, 2008), este processo está detalhado na Figura 6.



**Figura 6** – Detalhe da estrutura de apoio da Cúpula Domocaña.  
Fontes: GÁLLIGO et. al. (2005); SANDOVAL (2008)

Após a construção do apoio, o próximo passo é a execução da estrutura de bambu, conforme mostrado na Figura 7e. Primeiramente, fixam-se quatro varas de bambu na moldura de apoio (Figura 7a). Em seguida, utiliza-se duas haste de bambu como guia, fixando-as no centro de cada lado da cúpula, sendo uma colocada na transversal e a outra longitudinalmente (Figura 7b). As varas de bambu devem ser fixadas em um sentido de cada vez com espaçamento de 15 cm entre elas (Figura 7c) e os nós de intersecção deve ser amarrados com arame (Figura 7d) (GÁLLIGO et. al., 2005; SANDOVAL, 2008).



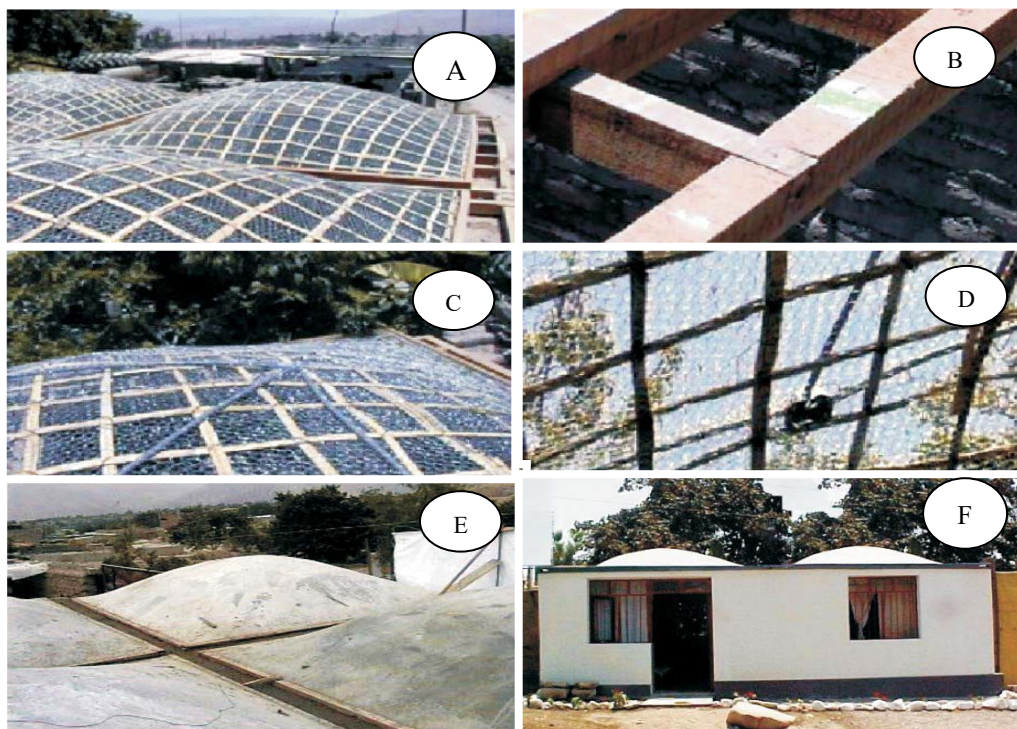
**Figura 7** – Procedimento de construção da cobertura Domocaña.  
Fontes: GÁLLIGO et. al. (2005); MAGNI (2014); SANDOVAL (2008)

Posteriormente a construção da estrutura da cúpula, coloca-se a tela de galinheiro, sendo necessário cobrir toda a sua face superior e na face inferior dispor à tela de forma perpendicular à malha esticada anteriormente (Figuras 8a e 8b). A tela deve ser amarrada com arame (GÁLLIGO et. al., 2005; SANDOVAL, 2008), conforme processo apresentado na Figura 8.



**Figura 8** – Processo de revestimento da estrutura Domocaña com tela de galinheiro.  
Fonte: SANDOVAL (2008)

Posteriormente, o revestimento da estrutura será realizado com argamassa na proporção 1:3 (cimento:areia). Este processo será executado após o transporte da estrutura até o local onde será instalada, dessa forma, a remoção será facilitada devido ao peso reduzido da cobertura (Figuras 9a e 9b). Em seguida, faz-se a instalação elétrica (Figuras 9c e 9d) e posteriormente o revestimento na parte exterior e interior da cúpula (Figura 9e) (GÁLLIGO et. al., 2005; SANDOVAL, 2008). Estas etapas e a residência finalizada (Figura 9f) são apresentadas na Figura 9.



**Figura 9** – Posicionamento das estruturas Domocañas na residência  
Fonte: GÁLLIGO et. al. (2005)

## ANEXO B – PLANILHAS DE COORDENADAS - VARAS DE BAMBU

Equação da Curva plano XZ																					
<b>y = 1,50 m</b>																					
<b>f = 0,50 m</b>																					
<b>x</b>	0,00	0,15	0,30	0,45	0,60	0,75	0,90	1,05	1,20	1,35	1,50	1,65	1,80	1,95	2,10	2,25	2,40	2,55	2,70	2,85	3,00
<b>z</b>	0,000	0,095	0,180	0,255	0,320	0,375	0,420	0,455	0,480	0,495	0,500	0,495	0,480	0,455	0,420	0,375	0,320	0,255	0,180	0,095	0,000
<b>y = 1,35 m = 1,65 m</b>																					
<b>f = 0,495 m</b>																					
<b>x</b>	0,00	0,15	0,30	0,45	0,60	0,75	0,90	1,05	1,20	1,35	1,50	1,65	1,80	1,95	2,10	2,25	2,40	2,55	2,70	2,85	3,00
<b>z</b>	0,000	0,094	0,178	0,252	0,317	0,371	0,416	0,450	0,475	0,490	0,495	0,490	0,475	0,450	0,416	0,371	0,317	0,252	0,178	0,094	0,000
<b>y = 1,20 m = 1,80 m</b>																					
<b>f = 0,48 m</b>																					
<b>x</b>	0,00	0,15	0,30	0,45	0,60	0,75	0,90	1,05	1,20	1,35	1,50	1,65	1,80	1,95	2,10	2,25	2,40	2,55	2,70	2,85	3,00
<b>z</b>	0,000	0,091	0,173	0,245	0,307	0,360	0,403	0,437	0,461	0,475	0,480	0,475	0,461	0,437	0,403	0,360	0,307	0,245	0,173	0,091	0,000
<b>y = 1,05 m = 1,95 m</b>																					
<b>f = 0,455 m</b>																					
<b>x</b>	0,00	0,15	0,30	0,45	0,60	0,75	0,90	1,05	1,20	1,35	1,50	1,65	1,80	1,95	2,10	2,25	2,40	2,55	2,70	2,85	3,00
<b>z</b>	0,000	0,086	0,164	0,232	0,291	0,341	0,382	0,414	0,437	0,450	0,455	0,450	0,437	0,414	0,382	0,341	0,291	0,232	0,164	0,086	0,000
<b>y = 0,90 m = 2,10 m</b>																					
<b>f = 0,42 m</b>																					
<b>x</b>	0,00	0,15	0,30	0,45	0,60	0,75	0,90	1,05	1,20	1,35	1,50	1,65	1,80	1,95	2,10	2,25	2,40	2,55	2,70	2,85	3,00
<b>z</b>	0,000	0,080	0,151	0,214	0,269	0,315	0,353	0,382	0,403	0,416	0,420	0,416	0,403	0,382	0,353	0,315	0,269	0,214	0,151	0,080	0,000
<b>y = 0,75 m = 2,25 m</b>																					
<b>f = 0,375 m</b>																					
<b>x</b>	0,00	0,15	0,30	0,45	0,60	0,75	0,90	1,05	1,20	1,35	1,50	1,65	1,80	1,95	2,10	2,25	2,40	2,55	2,70	2,85	3,00
<b>z</b>	0,000	0,071	0,135	0,191	0,240	0,281	0,315	0,341	0,360	0,371	0,375	0,371	0,360	0,341	0,315	0,281	0,240	0,191	0,135	0,071	0,000
<b>y = 0,60 m = 2,40 m</b>																					
<b>f = 0,32 m</b>																					
<b>x</b>	0,00	0,15	0,30	0,45	0,60	0,75	0,90	1,05	1,20	1,35	1,50	1,65	1,80	1,95	2,10	2,25	2,40	2,55	2,70	2,85	3,00
<b>z</b>	0,000	0,061	0,115	0,163	0,205	0,240	0,269	0,291	0,307	0,317	0,320	0,317	0,307	0,291	0,269	0,240	0,205	0,163	0,115	0,061	0,000

<b>y = 0,45 m = 2,55 m</b>																					
<b>f = 0,255 m</b>																					
<b>x</b>	0,00	0,15	0,30	0,45	0,60	0,75	0,90	1,05	1,20	1,35	1,50	1,65	1,80	1,95	2,10	2,25	2,40	2,55	2,70	2,85	3,00
<b>z</b>	0,000	0,048	0,092	0,130	0,163	0,191	0,214	0,232	0,245	0,252	0,255	0,252	0,245	0,232	0,214	0,191	0,163	0,130	0,092	0,048	0,000
<b>y = 0,30 m = 2,70 m</b>																					
<b>f = 0,18 m</b>																					
<b>x</b>	0,00	0,15	0,30	0,45	0,60	0,75	0,90	1,05	1,20	1,35	1,50	1,65	1,80	1,95	2,10	2,25	2,40	2,55	2,70	2,85	3,00
<b>z</b>	0,000	0,034	0,065	0,092	0,115	0,135	0,151	0,164	0,173	0,178	0,180	0,178	0,173	0,164	0,151	0,135	0,115	0,092	0,065	0,034	0,000
<b>y = 0,15 m = 2,85 m</b>																					
<b>f = 0,095 m</b>																					
<b>x</b>	0,00	0,15	0,30	0,45	0,60	0,75	0,90	1,05	1,20	1,35	1,50	1,65	1,80	1,95	2,10	2,25	2,40	2,55	2,70	2,85	3,00
<b>z</b>	0,000	0,018	0,034	0,048	0,061	0,071	0,080	0,086	0,091	0,094	0,095	0,094	0,091	0,086	0,080	0,071	0,061	0,048	0,034	0,018	0,000
<b>y = 0,0 m = 3,0 m</b>																					
<b>f = 0,0 m</b>																					
<b>x</b>	0,00	0,15	0,30	0,45	0,60	0,75	0,90	1,05	1,20	1,35	1,50	1,65	1,80	1,95	2,10	2,25	2,40	2,55	2,70	2,85	3,00
<b>z</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Por simetria, as coordenadas no plano YZ são iguais.