



JÚLIA ARANTES LIMA

**ANÁLISE DE SISTEMAS CONSTRUTIVOS EM MADEIRA E
EM BAMBU: O ABRIGO DO PONTO DE ÔNIBUS DA UFLA.**

**LAVRAS – MG
2023**

JÚLIA ARANTES LIMA

**ANÁLISE DE SISTEMAS CONSTRUTIVOS EM MADEIRA E EM BAMBU:
O ABRIGO DO PONTO DE ÔNIBUS DA UFLA.**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. André Luiz Zangiacomo
Orientador

**LAVRAS – MG
2023**

JÚLIA ARANTES LIMA

**ANÁLISE DE SISTEMAS CONSTRUTIVOS EM MADEIRA E EM BAMBU:
O ABRIGO DO PONTO DE ÔNIBUS DA UFLA.**

**ANALYSIS OF TIMBER AND BAMBOO CONSTRUCTION SYSTEMS:
STUDY OF THE BUS STOP SHELTER OF UFLA.**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADO em 21 de julho de 2023.
Dra. Andréa Aparecida Ribeiro Corrêa UFLA
Dr. Ígor José Mendes Lemes UFLA



Prof. Dr. André Luiz Zangiacomo
Orientador

**LAVRAS – MG
2023**

RESUMO

Esta análise tem como objetivo comparar sistemas construtivos sustentáveis que empregam a madeira e o bambu. O projeto em madeira teve como base um abrigo de ônibus em bambu (intitulado “Ponto de Carona”) já executado no Campus da Universidade Federal de Lavras (UFLA). A partir do projeto em bambu fez-se o projeto arquitetônico em madeira serrada mantendo a disposição geral da estrutura. Com auxílio de programas computacionais como Ftool® e Visual Ventos®, executou-se a análise de esforços solicitantes e de deslocamentos de ambas as estruturas, além da estimativa de capacidade de sequestro de carbono, volumes, estimativa de custos e tempo de execução das estruturas. Como resultados, tem-se que as intensidades das cargas estruturais são próximas: os carregamentos sobre os pilares em madeira correspondem a 93% do carregamento dos pilares em bambu. Quanto ao volume de material, a estrutura em bambu possui um número maior de peças e, conseqüentemente, apresenta um montante também maior: o volume da estrutura em madeira corresponde a 36% do volume da estrutura em bambu. Relativamente ao sequestro de carbono, devido à diferença entre os volumes, estima-se que a estrutura em madeira armazena 32% do volume de carbono da estrutura de bambu. Quanto aos custos, o bambu apresenta um valor que corresponde a 97% dos custos da estrutura em madeira, sendo ambos projetos extremamente similares.

Palavras-chave: Estrutura de madeira. Estrutura de Bambu. Construção civil. Análise comparativa.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Composição do Bambu.....	05
Figura 2 - Abrigo de ponto de Ônibus em MLC na USP.....	12
Figura 3 - Abrigo de ponto de Ônibus de eucalipto em Maceió.....	12
Figura 4 - Abrigo de ponto de Ônibus em MLC.....	13
Figura 5A - Ponto de Carona em Bambu.....	15
Figura 5B - Vista frontal.....	15
Figura 6A - Perspectiva lateral.....	26
Figura 6B - Perspectiva frontal.....	26
Figura 7 - Concepção inicial do projeto em madeira.....	27
Figura 8 - Perspectiva em 3D.....	28
Figura 9 - Elevação lateral esquerda e elevação frontal	29
Figura 10 - Orientação das cargas de vento de sucção	34
Figura 11 - Locação dos pilares.....	34
Figura 12 - Planta baixa.....	54
Figura 13 - Vista frontal.....	54
Figura 14 - Vista lateral esquerda.....	55
Figura 15 - Tramo da cobertura.....	55
Figura 16 - Planta baixa.....	56
Figura 17 - Vista frontal.....	56
Figura 18 - Dimensões (Lateral esquerda).....	57
Figura 19 - Identificação das peças.....	57
Figura 20 - Deformações verticais em milímetros para cargas permanente, variável de manutenção e carga de vento de sucção a 90°.....	58
Figura 21 - Deformações verticais em milímetros para cargas permanente, variável de manutenção e carga de vento de sucção a 270°.....	59
Figura 22 - Deformações verticais em milímetros para carga de vento de sucção sobre a cobertura.....	60

Figura 23 - Deformações transversais em milímetros para cargas permanente, variável de manutenção e vento de sucção a 0°	61
Figura 24 - Deformações verticais em milímetros para carga de vento de sucção sobre cobertura (vista frontal).....	61
Figura 25 - Deformações verticais em milímetros para cargas permanente, variável de manutenção e carga de vento de sucção a 90°	62
Figura 26 - Deformações verticais em milímetros para cargas permanente, variável de manutenção e carga de vento de sucção a 270°	63
Figura 27 - Deformações verticais em milímetros para carga de vento de sucção sobre a cobertura.....	64
Figura 28 - Deformações transversais em milímetros para cargas permanente, variável de manutenção e vento de sucção a 0°	65
Figura 29 - Deformações verticais em milímetros para carga de vento de sucção sobre cobertura.....	65

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	01
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	03
2.1	Sistema construtivo convencional	03
2.1.1	Impactos ambientais gerados pelo sistema	03
2.1.1.1	Emissão de carbono	04
2.2	Sistema construtivo com materiais de base biológica	04
2.2.1	O bambu	05
2.2.1.1	Vantagens e desvantagens	06
2.2.2	A madeira	06
2.2.2.1	Vantagens e desvantagens	07
2.3	Algumas propriedades para madeira, bambu e aço	07
2.3.1	Das propriedades mecânicas	07
2.3.2	Quanto ao sequestro de carbono	10
2.3.3	Quanto aos impactos gerados e custo	10
2.3.3.1	Consumo de energia	11
2.4	Exemplos de utilização da madeira	12
3	MATERIAIS E MÉTODOS	14
3.1	Materiais	14
3.2	Escolha do projeto	14
3.3	Concepção inicial, Pré-dimensionamento e projeto arquitetônico em madeira ...	16
3.3.1	Cargas e pesos próprios	16
3.3.1.1	Peso próprio	16
3.3.1.2	Carga do vento	17
3.3.2	Distribuição dos carregamentos	18
3.3.3	Combinações – Cargas totais da estrutura	18
3.4	Verificações	20
3.4.1	Flexão reta simples	20
3.4.2	Compressão axial	21

3.5	Análise de deformações excessivas.....	23
3.6	Sequestro de carbono.....	25
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	26
4.1	Projeto arquitetônico.....	26
4.1.1	Projeto em bambu como construído.....	26
4.1.2	Croqui em madeira.....	26
4.1.3	Projeto arquitetônico em madeira.....	27
4.2	Cargas atuantes e combinações.....	29
4.2.1	Carregamento devido ao peso próprio.....	30
4.2.1.1	Carregamento devido a carga de vento.....	33
4.2.1.2	Cargas características.....	34
4.2.1.3	Combinações.....	37
4.3	Verificações.....	40
4.3.1	Flexão Simples reta nas terças.....	40
4.3.2	Compressão simples nos pilares.....	40
4.4	Análise dos deslocamentos excessivos.....	43
4.5	Volumes de materiais utilizados e sequestro de carbono	43
4.6	Orçamentos	46
4.7	Prazos estimados para execução da obra.....	48
5	CONCLUSÃO.....	49
	REFERÊNCIAS.....	50
	APÊNDICE A – PROJETO EM BAMBU ATUALIZADO.....	54
	APÊNDICE B – PROJETO EM MADEIRA.....	56
	APÊNDICE C – DEFORMAÇÕES EM ESTRUTURA DE MADEIRA.....	58
	APÊNDICE D – DEFORMAÇÕES EM ESTRUTURA DE BAMBU	62

1 INTRODUÇÃO

Atualmente vivencia-se uma modificação no cenário mundial onde há uma latente preocupação com os impactos ambientais gerados por indústrias diversas. Ressalte-se os gerados pela construção civil, pois trata-se de um setor causador de impactos que muitas vezes são irreversíveis. Sendo responsável por uma grande geração de resíduos e desperdícios de materiais, a exemplo das técnicas de quebras de blocos para encaixe de tubulações na alvenaria convencional. O mal planejamento no quantitativo e compra de materiais levam a excessos desnecessários, e a geração de resíduos resultantes de obras e demolições, que em sua maioria não são reutilizados ou descartados corretamente, causando impactos negativos ao ambiente. Neste sentido, a atividade de construção civil é altamente poluente; e não apenas durante o processo construtivo em si. Os impactos negativos são observados em todas as etapas, pois muitos dos materiais utilizados na construção civil são fabricados com emissão de gases e resíduos poluentes (como o gás carbônico, por exemplo). De acordo com o Relatório de Situação Global de 2020 para Edifícios e Construção, da Aliança Global para Edifícios e Construção (Global Alliance for Buildings and Construction – GlobalABC), o setor foi responsável por cerca de 38% da emissão de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera.

A resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) nº 307/2002 dispõe que se deve ter como objetivo primário a não geração de quaisquer resíduos e, como objetivo secundário, o de reutilizá-lo, reduzi-lo e reciclá-lo, cuidando que seja feito o correto descarte.

É diante desse cenário que se torna imperativo o estudo de materiais e técnicas que gerem menos impacto no setor apresentando alternativas sustentáveis que sejam viáveis.

A construção com madeira é uma técnica milenar utilizada por diversos países, contudo no Brasil este material ainda é pouco utilizado devido à carência de profissionais na área e muitas vezes pelo preconceito ou falta de informação quanto às suas propriedades.

A madeira é um material de origem biológica que pode e deve ser reposta através do reflorestamento, o que a torna uma alternativa interessante e muito menos poluente em comparação a construção convencional com materiais cerâmicos, aço e concreto. Além disso a celulose é um material com alta taxa de sequestro de carbono, sendo algumas espécies vegetais capazes de armazenar uma tonelada de CO₂ por metro cúbico de madeira (ARAÚJO,2020).

Além de seu caráter sustentável a madeira é altamente versátil, permitindo projetos diversos não apenas com peças retas, mas também peças curvas e esbeltas. É um material anisotrópico, isto é, suas propriedades mecânicas são diferentes dependendo da disposição de suas fibras, variando nas três direções espaciais (radial, tangencial e axial). Possui também baixa massa volumétrica e resistência mecânica elevada, tornando-a assim leve e resistente.

O bambu, assim como a madeira, é um material natural e utilizado na construção civil há séculos, contudo é mais popular no oriente onde é mais abundante. Destaca-se para esse material a facilidade de reposição: o bambu é um material de rápido crescimento, tendo dimensões variadas a depender de sua espécie o que permite uma grande variedade nos projetos. É um material leve e de fácil manuseio, e que também apresenta resistência mecânica elevada, sendo atualmente apelidado de “aço verde” devido à sua equiparação àquela liga na construção convencional. Assim como a madeira, o bambu é também capaz de armazenar carbono.

Além dos problemas relacionados aos impactos causados ao meio ambiente, existe também o de caráter social devido à falta de abrigos para os pontos de ônibus em diversas cidades pelo país. Em Belo Horizonte, Minas Gerais, uma matéria do jornal “O Tempo” relatou em 2022 que faltavam abrigos em 68,75% dos pontos de ônibus da capital mineira. Outros casos de precariedade neste tipo de aparelho urbano também são relatados em diversas matérias jornalísticas, como a publicada pelo site “G1” sobre São Luís, no Maranhão, também no ano de 2022, onde os passageiros denunciaram desgastes, falta de assento e proteção contra chuvas e intempéries. São muitos os relatos sobre falta de manutenção ou completa falta de abrigos propriamente ditos, deixando a população sem qualquer proteção enquanto aguarda o transporte público.

Assim, o objetivo deste trabalho é desenvolver um projeto de um abrigo de ponto de ônibus empregando a madeira na sua estrutura, e compará-lo com uma estrutura já existente em bambu construída no Campus sede da Universidade Federal de Lavras. Almeja-se também apresentar as vantagens e desvantagens da utilização da madeira no intuito de desmistificar ideias errôneas quanto a esse material bem como incentivar e popularizar seu uso e futuros estudos. A justificativa desta proposta é a necessidade imediata de se empregar alternativas menos poluentes que reduzam os impactos já causados pela construção civil, além de apresentar uma solução mais econômica e ainda assim segura para a construção de abrigos para pontos de ônibus.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico são apresentados, brevemente, estudos e pesquisas considerados relevantes para o trabalho. São mencionadas algumas diferenças entre o sistema construtivo mais convencional na construção civil (em concreto armado e alvenaria) e os sistemas não convencionais com bambu e com madeira, abordando os impactos gerados por esses sistemas, bem como dados sobre suas propriedades mecânicas, vantagens e possíveis obstáculos ao seu uso.

2.1 Sistema construtivo convencional

Entende-se por sistema construtivo convencional o sistema mais comumente utilizado no Brasil, sendo ele composto por estruturas em concreto armado e alvenaria, podendo ser alvenaria estrutural ou de vedação.

A alvenaria convencional (ou de vedação) é aquela cujas paredes não exercem função estrutural, ou seja, é necessário um esqueleto estrutural formado por lajes, vigas, pilares e fundação que recebem as cargas da estrutura e as descarreguem sob o solo. Nesse método se faz uso de blocos cerâmicos para as paredes, enquanto que a estrutura que receberá as cargas é feita em concreto armado. Já na alvenaria estrutural as paredes exercem função portante, ou seja, as paredes suportam as cargas provenientes das lajes e cobertura.

Tanto a alvenaria convencional quanto a estrutural compõem métodos construtivos que geram grandes impactos ao meio ambiente, sendo a primeira a mais utilizada, atualmente, na construção civil no Brasil. De forma geral, são desvantagens desses métodos: o desperdício de materiais, sendo que na convencional o desperdício é ainda maior; e o longo tempo de execução da obra (maior ainda na alvenaria convencional). Quanto às vantagens, destacam-se: o fácil acesso a mão de obra; e a aceitabilidade, uma vez que trata-se dos sistemas mais utilizados e consolidados no país.

2.1.1 Impactos ambientais gerados pelo sistema

Os problemas gerados pelo sistema construtivo convencional começam já na extração de matéria-prima. Apenas para a produção de concreto e argamassa são consumidos

cerca de 220 milhões de toneladas de recursos naturais no Brasil (LARUCCIA, 2014). A extração de minérios como o calcário leva a degradação da área explorada.

Os impactos negativos seguem pela poluição proveniente da produção de insumos utilizados nesse sistema, como o cimento (por exemplo), que durante sua fabricação libera elevadas quantidades de gás carbônico.

Finalmente, o grande problema dos resíduos gerados pelo sistema construtivo convencional é que são geralmente de classificação inerte, ou seja, de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) quanto a Norma Brasileira de Classificação de Resíduos Sólidos (NBR 10.004, 2004), são aqueles que não se alteram por um longo período de tempo, não se decompondo por anos e que acarretam a poluição de áreas ou mesmo de sistemas de esgotos ou bacias d'água; uma vez que muitas vezes não são descartados corretamente.

2.1.1.1 Emissão de carbono

Como exposto por Cunha (2016), dos materiais usados no sistema convencional – e levando-se em conta a produção - o aço é descrito como o maior emissor de dióxido de carbono, seguido da cal, bloco de concreto, cimento, bloco cerâmico, agregados e areia. O aço é o maior emissor devido a utilização de coque e carvão vegetal como combustível na sua fabricação. Destaca-se também outro material que é altamente poluente: o concreto, onde a produção de 1 m³ *in loco* emite cerca de 13.401,64 kg de CO₂ na atmosfera, enquanto o aço emite cerca de 1.679.171,11 kg de CO₂. (CUNHA, 2016).

2.2 Sistema construtivo com materiais de base biológica

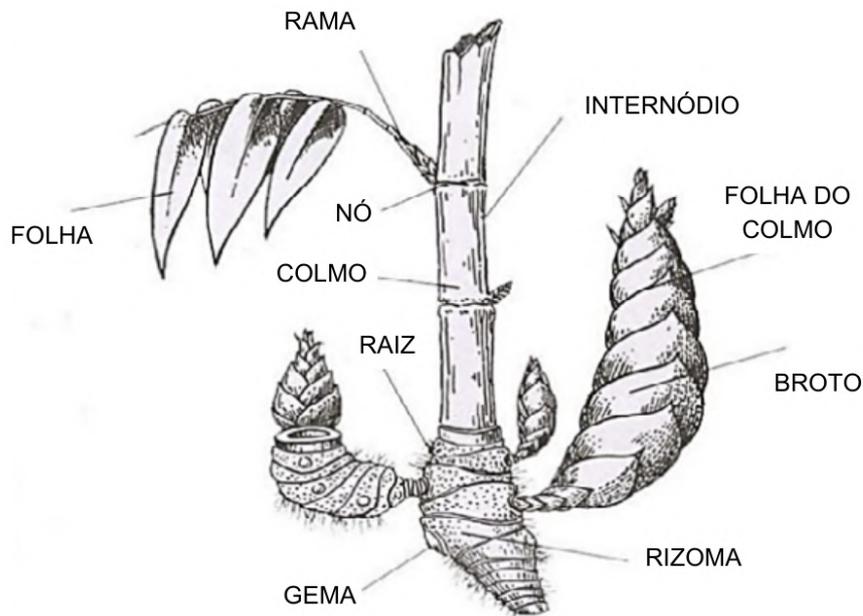
Para esta análise, priorizou-se estudos relativos à espécie de bambu *Dendrocalamus asper*, pois trata-se da espécie mais utilizada na estrutura existente que foi comparada. Priorizando também a madeira de eucalipto, gênero escolhido para a concepção do novo projeto devido a sua abundância, rápido crescimento e menor custo se comparada a outras madeiras.

Sendo também feita uma revisão de estudos comparativos entre esses materiais com o material definido como um dos mais poluentes em sua obtenção, o aço.

2.2.1 O bambu

O bambu é uma planta gramínea, herbácea e lenhosa que se destaca pelo rápido crescimento. Podendo ser do tipo entouceirante ou alastrante a depender de sua espécie. Diferente da madeira, seu caule é “oco”, sendo formado por colmos, folhas e ramificações, enquanto sua parte subterrânea constitui-se de rizoma e raiz (PADOVAN, 2010), conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Composição do Bambu



Fonte: NMBA (2004).

Na construção civil o bambu pode ser utilizado tanto na sua forma roliça em tesouras, pilares e vigas; ou como material de reforço no concreto, sendo partido em taliscas, sendo possível também associá-lo a outros materiais de construção (LOPES, 2002). Pode também ser utilizado em placas manufaturadas de paredes, forros e assoalhos (DELGADO, 2011).

Das espécies utilizadas no projeto base deste trabalho tem-se o bambu *Dendrocalamus asper*, e o *Bambusa tuldoides* (conhecido como "bambu taquara").

A espécie *Dendrocalamus asper* possui uma altura média de 20 a 40 metros, com comprimento útil para uso em estruturas de cerca de 12 metros, diâmetro médio interno de 20 centímetros e espessura das paredes entre 1 a 3 centímetros, sendo uma espécie que apresenta menos rachaduras após o processo de secagem (ROSALINO, 2017). Também é caracterizado por paredes grossas e bem resistentes à podridão.

Já a espécie *Bambusa tuldoides* é um bambu com diâmetro interno menor, sendo em média de 2 a 5 centímetros com espessura das paredes de cerca de 1 centímetro, altura média de 5 a 10 metros e comprimento útil para uso em estruturas de 4 a 5 metros (ROSALINO, 2017).

2.2.1.1 Vantagens e desvantagens

Para o bambu destacam-se como vantagens de seu uso: material de custo baixo podendo reduzir em mais de 30% o custo final da construção se comparado ao sistema convencional (DELGADO, 2011); grande abundância e rápido crescimento sem perspectiva de seu esgotamento; resistência à tração elevada e equiparável à do aço - a resistência à tração do bambu em relação seu peso próprio resulta num valor 2,77 maior que o do aço, de acordo com Murad (2007); gasto reduzido de energia na sua produção e manejo; e eficiência energética superior ao aço e ao concreto (JÚNIOR, 2010).

São as principais desvantagens: pequena durabilidade natural; é suscetível a degradação excessiva quando em contato com umidade; baixa aderência ao concreto e argamassa devido à sua natureza higroscópica, ou seja, há variação dimensional quando em contato com a água (JÚNIOR, 2010); baixo módulo de elasticidade quando comparado com o aço; material muito suscetível a ataques de fungos e insetos, sendo necessário um correto tratamento antes de seu uso.

2.2.2 A madeira

A madeira é um material produzido através do tecido formados por plantas lenhosas e sua principal função na natureza é proporcionar sustentação (SOUSA, 2022). Trata-se de um material composto por fibras que podem ser comparadas de forma análoga a pequenos

canudos dispostos no sentido longitudinal e transversal do tronco. É um material anisotrópico, e suas propriedades dependem da disposição das fibras, sendo um material leve e resistente.

Na construção civil no Brasil, a madeira é utilizada em geral como suporte, mas desempenha papéis muito variados desde estrutura para escoramento ou para a composição de andaimes, ou mesmo sendo muito utilizado nas coberturas como em caibros, ripas e terças. De forma geral, no país não é comum vê-la como material principal na construção, exceto em telhados.

Assim como o bambu a madeira pode ser utilizada de diversas formas, sendo algumas delas: a madeira roliça, madeira maciça serrada (obtida diretamente do desdobro do tronco das árvores), ou mesmo materiais fabricados como a Madeira Lamelada Colada (MLC), dentre outros.

2.2.2.1 Vantagens e desvantagens

Desatacam-se como principais vantagens da utilização da madeira na construção civil: sua alta resistência à tração e à compressão, apresentando uma vasta aplicabilidade como peça estrutural; durabilidade; propriedades de isolamento térmico; baixa densidade (acarretando a redução de massa da estrutura); seu conforto tátil e estético; e a velocidade na montagem em obra (CHAVES, 2021).

Com relação às desvantagens, destaca-se: suscetibilidade a ataques de fungos apodrecedores e de insetos xilófagos, o que pode significar gastos com tratamentos preservativos.

2.3 Algumas propriedades para madeira, bambu e aço

São destacados neste tópico algumas das propriedades de ambos os materiais principais dessa análise.

2.3.1 Das propriedades mecânicas

Para uma das espécies de bambu a ser comparada temos os seguintes dados por Carbonari et al. (2017):

Bambu *Dendrocalamus asper*: resistência à compressão média de 46,9 MPa; eficiência : 75,6 Mpa/g/cm³

Para comparação, do aço e concreto tem-se os dados, por Carbonari et al. (2017):

Aço: resistência à compressão média 400 MPa; eficiência : 60,9 Mpa/g/cm³

Concreto: resistência à compressão média 30 MPa; eficiência : 12,5 MPa/g/cm³

Já para a resistência à tração do bambu os valores médios obtidos pelos autores ficaram entre 102 MPa e 125 MPa. A relação entre a resistência à tração e suas massas específicas resultaram em valores muito superiores que a do aço: de 4 a 5 vezes maior; reforçando o conceito de que o bambu pode ser considerado um “aço vegetal”. (CARBONARI et. al., 2017).

Os mesmos autores relatam os valores médios dos módulos de elasticidade obtidos em ensaios a compressão das espécies estudadas que ficaram entre 20 GPa e 25 GPa (os valores de módulos de elasticidade obtidos por espécie estão apresentados no Quadro 1), sendo descritas como “[...] superiores aos da madeira, próximos ao do concreto, e muito menores que o aço.” (CARBONARI et. al., 2017).

Quadro 1 - Módulos de elasticidade obtidos em ensaio à compressão

Espécie de bambu	Módulo de Elasticidade (GPa)	
	Com Nó	Sem Nó
Dendrocalamus Asper	23,30±8,5%	24,80±6,7%
Bambusa Beecheyana	20,70±7,3%	19,70±5,5%
Dendrocalamus Giganteus	21,90±6,4%	21,80±7,2%

Fonte: Carbonari et.al. (2017).

Já os valores obtidos dos módulos de elasticidade à flexão ficaram entre 3,4 GPa a 5,3 GPa .

Diante dos estudos feitos, Carbonari et al. (2017) concluíram sobre o comparativo de diversas espécies de bambu e o aço:

Considerando a relação entre as resistências, tanto à compressão como à tração das espécies, e suas respectivas massas específicas, todas as espécies de bambu ensaiadas apresentaram valores superiores de eficiência em relação ao concreto e aço. (CARBONARI, et al., 2017)

Moreira (2018), em seu trabalho, apresenta as seguintes propriedades para a espécie *Bambusa tuldoides*:

- Densidade aparente a 13,5% de umidade: 0,97 g/cm³;
- Resistência à tração paralela às fibras (ft0): 156,6 MPa; módulo de elasticidade (Et0): 10,33 GPa;
- Resistência à compressão paralela às fibras (fc0): 70,6 MPa; módulo de elasticidade (Ec0): 7,6 GPa.
- Resistência à flexão (fb): 170,5 MPa, módulo de elasticidade (Eb): 15,6 GPa

Ainda por Moreira (2018), para a espécie *Dendrocalamus giganteus* (que é similar em proporções e propriedades ao *Dendrocalamus asper*), tem-se:

- Densidade aparente: 0,71 g/cm³
- Resistência média à compressão paralela às fibras (fc0) 40,75 MPa; módulo de elasticidade médio (Ec0): 21GPa.
- Coeficiente de Poisson médio: 0,3
- Resistência média à tração paralela às fibras (ft0): 137,5 MPa; módulo de elasticidade médio (Et0): 17,5 MPa

Para a madeira de eucalipto (*Corymbia citriodora*), o Instituto de Pesquisas e Tecnologias (IPT, 2023) apresenta os dados seguintes:

- Flexão - resistência (f_M):
 Madeira verde: 111,8 MPa
 Madeira a 15% de umidade: 121,4 MPa
 Limite de proporcionalidade - madeira verde: 47,2 MPa
- Compressão paralela às fibras - resistência (f_{c0}):
 Madeira verde: 51,1 MPa
 Madeira a 15% de umidade: 62,8 MPa
 Coeficiente de influência de umidade: 4,7 %
 Limite de proporcionalidade - madeira verde: 33,7 MPa
- Tração normal às fibras - madeira verde: 10,1 MPa
- Fendilhamento - madeira verde: 1,2 MPa

2.3.2 Quanto ao sequestro de carbono

Existem duas possibilidades para reduzir a concentração de dióxido de carbono atmosférico, sendo elas a tentativa de redução das emissões ou a absorção do CO₂ produzido em excesso, onde a segunda é definida como sequestro de carbono (DELGADO, 2011).

Essa absorção é feita de forma natural pelas plantas através do processo de fotossíntese. Tanto a madeira quanto o bambu são capazes de realizar o sequestro de carbono, sendo que ambas absorvem uma alta quantidade de carbono, equivalente a quase 45% de sua biomassa.

Em seu estudo, Delgado (2011) comparou o bambu, o pinus e o eucalipto (que são madeiras com rápido crescimento e baixo custo) não apenas quanto à sua taxa de absorção, mas também quanto à sua produtividade ao longo dos anos. Concluindo entre a eficiência dos três materiais e dispondo o seguinte quadro relacionando pinus, eucalipto e bambu (QUADRO 2).

Quadro 2 - Produtividade das espécies durante 15 anos (expressas em toneladas).

Ano	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Total	
Pinus																30	30
Eucalipto							40							40			80
Bambu		50		50		50		50		50		50		50			350

■ Ano sem colheita

□ Colheita

Fonte: Delgado (2011).

Diante dos dados foi concluído por Delgado (2011) que:

Mesmo que a porcentagem de carbono do pinus e do eucalipto sejam semelhantes à porcentagem de carbono armazenada pelo bambu, se as espécies forem colhidas no tempo certo de colheita e armazenadas, ao longo de 15 anos teremos armazenados cerca de 14t de carbono pelo pinus, 35t pelo eucalipto e 154t pelo bambu. (DELGADO, 2011, p. 40)

2.3.3 Quanto aos impactos gerados e custo

Na dissertação de Delgado (2011) onde foram analisados os materiais quanto à liberação de CO₂, energia consumida em sua produção, peso específico do material, consumo

de combustível durante seu transporte, custo da obra considerando casa popular de 32m² e emissão de CO₂ durante o transporte, os seguintes dados são observados no Quadro 3:

Quadro 3 - Propriedades do bambu e aço.

Parâmetro (m³)	Bambu	Aço
Liberação de CO ₂	18,72kg /m³	9420kg/m³
Energia	30MJ/m³	1500MJ/m³
Peso específico	500kgf/m³	7850kgf/m³
Custo do material em casa popular de 32m ²	R\$ 4.300,00/m³	R\$ 6.880,00/m³
Consumo de Diesel no transporte	0,635l/100km/m³	10,16l/100km/m³
Emissão de CO ₂ no transporte	1,711kg/100km/m³	27,38kg/100km/m³

Fonte: Delgado (2011).

2.3.3.1 Consumo de energia

Em sua dissertação de mestrado, Monteiro (2011) apontou que no processo de produção da madeira serrada são consumidos 89,59kWh/m³ no processo de serragem, e para efetivamente produzir um m³ de madeira serrada uma energia equivalente a 201,28 kWh. Sendo que são consumidos 2,2 m³ de tora para a produção de um m³ de peças serradas.

Como percebido por Delgado (2011), o bambu e a madeira necessitam de baixo consumo de energia para a sua produção; já para o aço resistir a uma mesma tensão que o bambu e a madeira, ele demanda 50 vezes mais energia que o bambu e aproximadamente 19 vezes mais que a madeira. Relativamente ao concreto, este consome 8 vezes mais energia que o bambu e 3 vezes mais energia que a madeira. As relações entre energia consumida para a produção de um metro cúbico por unidade de tensão de alguns materiais estruturais estão mostradas no Quadro 4.

Quadro 4 - Relação entre energia consumida para a produção de um metro cúbico de material e a tensão suportada.

Material	Bambu	Madeira	Concreto	Aço
MJ/m ³ /MPa	30	80	240	1500

Fonte: Delgado (2011).

2.4 Exemplos de utilização da madeira

Na Universidade de São Paulo (USP), em São Carlos, os alunos do Instituto de Arquitetura e Urbanismo (IAU) desenvolveram um projeto de um ponto de ônibus de madeira que foi construído no Campus da Universidade, sendo o sistema construtivo de Madeira Lamelada Colada (MLC) (Figura 2).

Figura 2 – Abrigo de ponto de Ônibus em MLC na USP.



Fonte: Fontes (2019)

Em Maceió, Alagoas, 5 abrigos de pontos de ônibus utilizando eucalipto tratado foram construídos na extensão da orla de Ponta Verde. A Figura 3 retrata um dos abrigos construídos.

Figura 3 – Abrigo de ponto de Ônibus de eucalipto em Maceió.



Fonte: Rosa (2015).

Desenvolvidos em Madeira Lamelada Colada pela Ita Construtora, foram implementadas 12 unidades do abrigo mostrado na Figura 4 em Vargem Grande Paulista.

Figura 4 – Abrigo de ponto de Ônibus em MLC.



Fonte: ITA Construtora (2012).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização desta análise são relatados neste tópico todos os materiais e metodologias utilizadas. Iniciando a partir da escolha do projeto em bambu, ao qual foi embasada a concepção inicial, seguindo para o pré-dimensionamento, projeto arquitetônico em madeira e, posteriormente, passando as estruturas para análise em software para avaliação de deformações.

3.1 Materiais

Dos materiais utilizados no projeto base têm-se os bambus das espécies *Dendrocalamus asper* e *Bambusa tuldoides* como mencionado anteriormente. Para o projeto em madeira optou-se por utilizar madeira serrada de Eucalipto, devido as boas propriedades mecânicas e disponibilidade no mercado, sendo madeira proveniente de florestas plantadas de resistência característica à flexão equivalente a 40 MPa (Dicotiledônea - D40).

3.2 Escolha do projeto

O modelo escolhido trata-se de um abrigo de ônibus (também chamada de Ponto de Carona) projetado e executado pelo Núcleo de Estudos em Materiais e Técnicas Não Convencionais na Construção Civil (NEMATENC), do qual a autora deste trabalho era membro, com o auxílio de profissionais da área e colaboradores da Universidade Federal de Lavras. O projeto foi construído em maio de 2022 no Campus Sede em Lavras (MG).

A estrutura, com cerca de 24 m² e espaço interno útil de 16,60 m³, foi escolhida para ser comparada e analisada por ser constituída em sua totalidade por bambu, exceto pela fundação (do tipo radier) e bloco sobre fundação que foi feita em alvenaria de vedação.

As principais peças estruturais que compõe o projeto, sendo elas vigas, pilares e contraventamento, foram feitas com a espécie de bambu *Dendrocalamus asper*, bem como as esteiras e ripas presentes na cobertura. Enquanto que as peças destinadas às mãos francesas e caibros foram feitas utilizando a espécie *Bambusa tuldoides*.

As Figuras 5A e 5B ilustram o modelo construído em bambu.

Figura 5A – Ponto de Carona em Bambu



Fonte: Da autora (2023)

Figura 5B – Vista frontal



Fonte: Da autora (2022)

Para execução do projeto os colmos necessários de ambas as espécies foram quantificados e colhidos em touceiras presentes na própria Universidade. A construção, como efetivamente foi executada, apresenta proporções diferentes das inicialmente projetadas pelo NEMATENC, pois algumas alterações foram necessárias durante a etapa de construção. Dessa forma, como a intenção dessa pesquisa é analisar o que factualmente foi executado, foi necessário fazer a atualização do projeto, utilizando o software REVIT® da AutoDESK®, com as dimensões construídas a partir do projeto base cedido pelo NEMATENC.

O projeto é composto por 13 pilares, sendo 3 pares de cada lado e um pilar entre os brises. Os pilares duplos frontais possuem 2,2 m de altura, os centrais 1,9 m, e os de fundo 1,6 m. As 3 vigas da cobertura possuem 6 m de comprimento, enquanto que a viga destinada ao brise possui 3,55 m e o pilar central do brise com altura de 1,45 m. Os contraventamentos são compostos por 2 peças de 2,45 m e 2 peças de 1,95 m. Todos com diâmetros externos de aproximadamente 16 cm. As 12 peças destinadas às mãos francesas possuem comprimento de 1,1 m e diâmetro médio de 6 cm.

Para a cobertura, o projeto base em bambu apresenta uma técnica feita com esteiras de bambu. Sendo uma cobertura semelhante a telha termoacústica (popularmente conhecida como “telha sanduíche”), onde se fez uma camada de esteiras de bambu, sobre ela uma manta asfáltica para impermeabilização e novamente outra camada de esteiras em bambu sobre a

manta asfáltica. A cobertura possui cerca de 6 x 4 m, com beiral frontal de 0,9 m e de fundo e laterais com 0,8 m.

Os blocos sobre a fundação elevados em alvenaria convencional antes projetados com altura mínima de 30 cm foram executadas com 45 cm para adequar à altura de banco (proporcionando um aumento na quantidade de usuários assentados) e facilidade na passagem de fios para as tomadas presentes na estrutura, com largura e comprimento de 1 x 2,33 m.

As ligações entre as peças de bambu foram feitas utilizando parafusos e grampos.

3.3 Concepção inicial, pré-dimensionamento e projeto arquitetônico em madeira

Para que a comparação fosse coerente o novo projeto foi feito adaptando o projeto em bambu para uma estrutura exequível em madeira, respeitando as dimensões esperadas do projeto presentes na estrutura original. Para isso, inicialmente foi feito um croqui com a concepção inicial do projeto, detalhando tipos de ligações esperadas entre as peças.

Para o pré-dimensionamento estimou-se as dimensões gerais da estrutura com base no projeto em bambu e nas dimensões disponíveis no comércio para peças em madeira. Diferente do bambu (cujas peças são roliças), para este novo projeto são utilizadas peças de madeira serrada de seções retangulares.

3.3.1 Cargas e pesos próprios

Para o carregamento da estrutura analisam-se as cargas permanentes e variáveis atuantes. Sendo as permanentes relativas ao peso próprio da estrutura e as variáveis relativas as ações do vento (sucção ou sobrepressão) e carga devido a possível manutenção na cobertura, sendo essa igual a 1kN/m² de acordo com diretrizes normativas da NBR 6120 (ABNT, 2019). Devido a inclinação da cobertura dispensa-se a possibilidade de acúmulo de água.

3.3.1.1 Peso próprio

Para o peso próprio de estruturas lineares (vigas, contraventamentos, etc) tem-se que a carga distribuída será:

$$Pp = A \cdot \gamma \quad (1)$$

com:

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (2)$$

Onde:

A – Área da seção transversal em metros quadrados (m^2)

γ – Peso específico em Newton por metro cubico (N/m^3)

g – Aceleração da gravidade em m/s^2 , sendo utilizado $9,81m/s^2$

ρ – Massa específica média em kg/m^3 .

Para estruturas com cargas pontuais, como os pilares, tem-se que a carga devido ao peso próprio será:

$$Pp = A \cdot \gamma \cdot h \quad (3)$$

Onde h é relativo a altura em metros do pilar.

O peso próprio de estruturas distribuídas sobre uma área, como a telha da cobertura, será:

$$Pp = \gamma \cdot e \quad (4)$$

Onde e é relativo a espessura em metros do elemento.

Das densidades específicas médias de acordo com literatura, tem-se para cada material:

- Bambu Tuldoides: $\rho = 970 \text{ kg/m}^3$ (MOREIRA, 2018)
- Bambu Dendrocalamus Asper: $\rho = 710 \text{ kg/m}^3$ (MOREIRA, 2018)
- Madeira, considerando classificação D40: $\rho = 660 \text{ kg/m}^3$ pela NBR 7190 (ABNT, 2022)

3.3.1.2 Carga do vento

Para a estimativa da carga do vento foi utilizado o programa computacional Visual Ventos®, para a obtenção dos esforços resultantes, calculados pelo programa através da pressão dinâmica (q) em função da velocidade característica (V_k).

A velocidade característica é definida em função da velocidade básica (V_0) do vento da região, onde para Lavras (MG) equivale a 35 m/s de acordo com o mapa de isopleas disponível na NBR 6123 (ABNT, 1988). Sendo também em função dos parâmetros definidos

de acordo com as dimensões da estrutura, características topográficas e descrição do ambiente.

Para este projeto define-se zona de alta turbulência diante da altura da estrutura em comparação com a altura média dos edifícios da vizinhança.

3.3.2 Distribuição dos carregamentos

Dados os cálculos dos pesos próprios de cada peça, foram feitas as distribuições de cargas sobre a estrutura, sendo a soma dos carregamentos de cima para baixo, ou seja das telhas sobre as terças e posteriormente sobre os pilares. Os carregamentos foram feitos utilizando o programa computacional Ftool®, considerando as ligações rotuladas para melhor representatividade dos modelos.

3.3.3 Combinações – Cargas totais da estrutura

A partir dos carregamentos característicos da estrutura foram calculadas as combinações últimas em Estados Limites Últimos (ELU) utilizando o software Excel®, considerando situações favoráveis e desfavoráveis, de acordo com a NBR 8681 (ABNT, 2003), a fim de encontrar os valores mais críticos.

- ELU - combinação normal:

$$Sd = \sum \gamma_G \cdot F_G + \gamma_Q \cdot [F_Q + \sum \Psi_0 \cdot F_{qj}] \quad (5)$$

Onde: F_G é o carregamento permanente; F_Q é o carregamento variável.

Para permanentes: $\gamma_G = 1,3$ (desfavoráveis) e $\gamma_G = 1,0$ (favoráveis).

Para variáveis: $\gamma_Q = 1,5$ (desfavoráveis)

Ψ_0 para vento: 0,6

Ψ_0 para carga variável relativa a manutenção da cobertura: 0,5

Após análise dos valores característicos obtidos no Ftool® como descrito no tópico 3.3.2. (resultados expostos no tópico 4.2.1.3. na sequência) foram feitas as seguintes combinações para madeira:

C01 - Ação favorável com variável relativa a manutenção da cobertura como principal, sem secundária.

C02 - Ação favorável com vento de sucção a 0° como variável principal, sem secundária.

C03 - Ação favorável com vento de sucção a 90° como variável principal, sem secundária.

C04 - Ação favorável com vento de sucção a 180° como variável principal, sem secundária.

C05 - Ação favorável com vento de sobrepressão 270° como variável principal, sem secundária.

C06 - Ação desfavorável com vento de sobrepressão 0° como variável principal, e variável relativa a manutenção da cobertura como secundária.

C07 - Ação desfavorável com vento de sobrepressão 90° como variável secundária, variável relativa a manutenção da cobertura como principal.

C08 - Ação desfavorável com vento de sobrepressão 180° como variável principal, e variável relativa a manutenção da cobertura como secundária.

C09 - Ação desfavorável com vento de sobrepressão 270° como variável principal, e variável relativa a manutenção da cobertura como secundária.

Para o bambu foram feitas as seguintes combinações:

C01 – Ação favorável com variável relativa a manutenção da cobertura como principal, sem secundária

C02 - Ação favorável com vento de sucção a 0° como variável principal, sem secundária.

C03 - Ação favorável com vento de sucção a 90° como variável principal, sem secundária.

C04 - Ação favorável com vento de sucção a 180° como variável principal, sem secundária.

C05 - Ação favorável com vento de sucção a 270° como variável principal sem redução, sem secundária.

C06 - Ação favorável com vento de sobrepressão a 270° como variável principal, sem secundária.

C07 - Ação desfavorável com vento de sobrepressão a 0° como variável principal, e variável relativa a manutenção da cobertura como secundária.

C08 - Ação desfavorável com vento de sobrepressão a 90° como variável principal, e variável relativa a manutenção da cobertura como secundária.

C09 - Ação desfavorável com vento de sobrepressão a 90° como variável secundária, e variável relativa a manutenção da cobertura como principal.

C10 - Ação desfavorável com vento de sobrepressão a 180° como variável principal, e variável relativa a manutenção da cobertura como secundária.

C11 - Ação desfavorável com vento de sobrepressão a 270° como variável principal, e variável relativa a manutenção da cobertura como secundária.

3.4 Verificações

3.4.1 Flexão reta simples

Para peças fletidas como as terças em ELU, verifica-se a seguinte condição para tensões normais (tração e compressão):

$$\frac{\sigma_{M,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (6)$$

Onde a tensão é dada por:

$$\sigma_{M,d} = \frac{Md}{I} y \quad (7)$$

Md : momento fletor solicitante de cálculo;

I : momento de inércia da sessão em relação ao eixo de referência;

y : distância de interesse em relação a linha neutra (LN).

A resistência à flexão de cálculo ($f_{m,d}$) é definida por:

$$f_{m,d} = k_{mod} \frac{f_{b,k}}{\gamma_w} \quad (8)$$

Dos valores característicos tabelados retirados da NBR 7190 (ABNT, 2022) para madeira D40, tem-se:

Resistência característica à flexão: $f_{b,k} = 40$ MPa

Do coeficiente de modificação (k_{mod}) considerando madeira serrada, carregamento de longa duração e classe de umidade 2 (de acordo com a umidade da região de Lavras, MG, que se destina a estrutura):

$$k_{mod} = k_{mod 1} \cdot k_{mod 2} \quad (9)$$

$$k_{mod} = 0,7 \cdot 0,9 = 0,63$$

Do coeficiente de minoração para compressão e tração (γ_w):

$$\gamma_w = 1,4$$

3.4.2 Compressão axial

A compressão paralela às fibras ocorre em pilares e em elementos de contraventamento por exemplo. A verificação da peça é dada por:

$$\sigma_{Nc,d} \leq f_{c0,d} \quad (10)$$

O valor de cálculo da tensão axial atuante na compressão é definida:

$$\sigma_{Nc,d} = \frac{N_{c,d}}{A} \quad (11)$$

Onde $N_{c,d}$ refere-se ao valor de cálculo do esforço de compressão e A trata-se da área líquida da seção transversal da peça.

Da resistência de cálculo à compressão:

$$f_{c0,d} = k_{mod} \frac{f_{c0,k}}{\gamma_w} \quad (12)$$

Sendo a resistência característica à compressão paralela às fibras: $f_{c0,k} = 26$ MPa pela NBR 7190 (ABNT, 2022).

As peças comprimidas axialmente além de serem verificadas quanto a tensão solicitante sendo menor do que a resistência devem também serem verificadas para a estabilidade lateral a depender de sua esbeltez. Em casos onde os índices de esbeltez relativos (λ_{relx} e λ_{rely}) forem menores ou iguais a 0,3 a peça não perde estabilidade lateral por compressão e portanto não há a necessidade de verificar a estabilidade lateral. Em casos onde o índice de esbeltez relativo ultrapassa 0,3 essa verificação deve ser feita.

O raio de giração da seção é calculado para ambos eixos principais de inércia, é definido por:

$$r_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}} \quad (13)$$

$$r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} \quad (14)$$

Os índices de esbeltez de cada eixo é dado por:

$$\lambda_x = \frac{L_0}{r_x} \quad (15)$$

$$\lambda_y = \frac{L_0}{r_y} \quad (16)$$

Onde L_0 corresponde ao comprimento de flambagem da peça, calculado da seguinte forma:

$$L_0 = K_E \cdot L \quad (17)$$

Em que K_E (fator de comprimento de flambagem) é definido de acordo com o modo de flambagem e L corresponde ao comprimento da peça comprimida.

Destaca-se que independente da direção o índice de esbeltez da peça (λ) não deve ser maior do que 140.

Os índices de esbeltez relativos são calculados por:

$$\lambda_{rel,x} = \frac{\lambda_x}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c0,k}}{E_{0,05}}} \quad (18)$$

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c0,k}}{E_{0,05}}} \quad (19)$$

Com módulo de elasticidade a 0° característico ($E_{0,05}$) para madeiras D40 dado pela NBR 7190 (ABNT, 2022) sendo igual a 11 GPa.

Caso os índices relativos ultrapassem 0,3 é feita a verificação de estabilidade definida para cada direção por:

$$\frac{\sigma N_{c,d}}{k_{cx} \cdot f_{c0,d}} + \frac{\sigma M_{x,d}}{f_{m,d}} + k_M \cdot \frac{\sigma M_{y,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (20)$$

$$\frac{\sigma N_{c,d}}{k_{cy} \cdot f_{c0,d}} + k_M \cdot \frac{\sigma M_{x,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma M_{y,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (21)$$

Onde para seção retangular $k_M = 0,7$, e k_{cx} e k_{cy} são definidos:

$$k_{cx} = \frac{1}{k_x + \sqrt{(k_x)^2 - (\lambda_{rel,x})^2}} \quad (22)$$

$$k_{cy} = \frac{1}{k_y + \sqrt{(k_y)^2 - (\lambda_{rel,y})^2}} \quad (23)$$

Com k_x , k_y e β_c para madeira serrada:

$$\beta_c = 0,2$$

$$k_x = 0,5 \cdot [1 + \beta_c (\lambda_{rel,x} - 0,3) + (\lambda_{rel,x})^2] \quad (24)$$

$$k_y = 0,5 \cdot [1 + \beta_c (\lambda_{rel,y} - 0,3) + (\lambda_{rel,y})^2] \quad (25)$$

3.5 Análise de deformações excessivas

Para a análise de deformações excessivas utiliza-se Estados Limites de Serviço (ELS) para flexão.

Deslocamento instantâneo empregando combinação rara de serviço de acordo com a NBR 8681 (ABNT, 2003):

$$\delta_{inst} = \sum \delta_{inst,Gi,k} + \delta_{inst,Q1,k} + \sum \Psi_1 \cdot \delta_{inst,Qj,k} \quad (26)$$

Onde:

$\delta_{inst,Gi,k}$: valor de deslocamento instantâneo gerado por cargas permanentes.

$\delta_{inst,Q1,k}$: valor de deslocamento instantâneo gerado por carga variável ou acidental principal.

$\delta_{inst,Qj,k}$: valor de deslocamento instantâneo gerado por cargas variáveis ou acidentais secundárias.

Ψ_1 : fator redutor tabelado a depender do tipo da ação.

Para o deslocamento final (flecha final) emprega-se combinação quase permanente considerando o coeficiente de fluência da madeira:

$$\delta_{fin} = \sum \delta_{fin,Gi,k} + \sum \delta_{fin,Qj,k} \quad (27)$$

Onde:

$$\delta_{fin,G,k} = \delta_{inst,G,k} \cdot (1 - \emptyset) \quad (28)$$

$$\delta_{fin,Q,k} = \delta_{inst,Q,k} \cdot \Psi_2 \cdot (1 - \emptyset) \quad (29)$$

\emptyset : coeficiente de fluência tabelado, para madeira serrada e com classe de umidade 2 equivale a 0,8.

Ψ_2 : fator redutor tabelado a depender do tipo da ação, na estrutura em questão adota-se 0,3.

Para o cálculo do deslocamento:

$$\delta_{inst} = \frac{5 \cdot p \cdot L^4}{384 \cdot E0,m \cdot I} \quad (30)$$

Onde p : valor da carga característica (variável ou permanente);

L : o vão;

I : o momento de inércia da seção;

$E0,m$: o módulo de elasticidade médio a 0° tabelado, em que para a madeira D40 equivale a 13 GPa de acordo com a NBR 7190 (ABNT, 2022).

Requisito: $Sd,serv \leq S_{lim}$

$Sd,serv$: Valor de efeitos das solicitações, como por exemplo deslocamento calculado.

S_{lim} : Valor limite de efeitos das solicitações, logo deslocamento limite.

Os valores limites de deslocamentos são dados pelo Quadro 5 a seguir.

Quadro 5 - Valores limite de deslocamento para elementos fletidos

Tipo de viga	δ_{inst}	δ_{fin}
Vigas biapoiadas ou contínuas	L/300 a L/500	L/150 a L/300
Vigas em balanço	L/150 a L/250	L/75 a L/150

Fonte: NBR 7190 (ABNT, 2022).

Para análise de deslocamento das estruturas completas em madeira e bambu foram feitos estudos em dois planos, sendo eles frontal e lateral utilizando o Ftool® com módulos de

elasticidade e coeficientes de Poisson de cada material extraídos da NBR 7190 (ABNT, 2022) e revisão bibliográfica.

3.6 Sequestro de carbono

A estimativa de sequestro de carbono depende da massa das estruturas. Da literatura, tem-se que a madeira e o bambu tem capacidade de armazenar aproximadamente 45% de sua biomassa (DELGADO, 2011), logo, para uma estimativa:

Carbono armazenado(kg/m³) = massa seca x taxa de sequestro

Massa seca equivale a 88% da densidade a 12% de umidade e 86% da densidade a 14% de umidade, ou seja 88% de ρ e 86% de ρ respectivamente. E a taxa de sequestro de carbono da madeira e do bambu sendo aproximadamente 45% da massa seca.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico são comparados e discutidos os dois sistemas construtivos através dos resultados obtidos utilizando-se da metodologia apresentada no tópico 3.

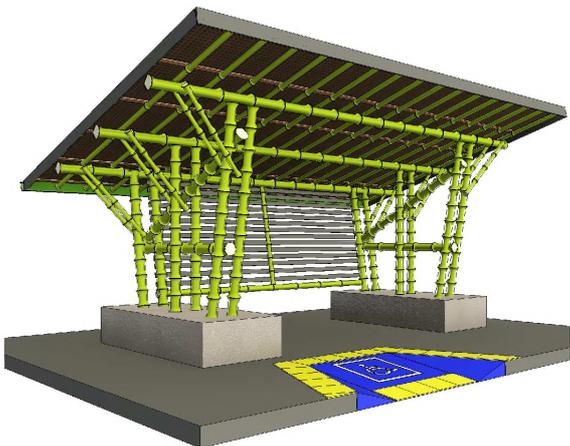
4.1 Projeto arquitetônico

Sendo uma das primeiras e mais fundamentais etapas de uma obra é no projeto arquitetônico que são definidas as locações das peças e a volumetria geral da estrutura.

4.1.1 Projeto em bambu como construído

A atualização do projeto original para a forma como foi construída como citado no tópico 3.1 encontra-se completa no Apêndice A. Para ilustração dispõe-se das perspectivas nas Figuras 6A e 6B a seguir:

Figura 6A – Perspectiva lateral



Fonte: Da autora com base em projeto existente fornecido pelo NEMATENC (2023)

Figura 6B – Perspectiva frontal

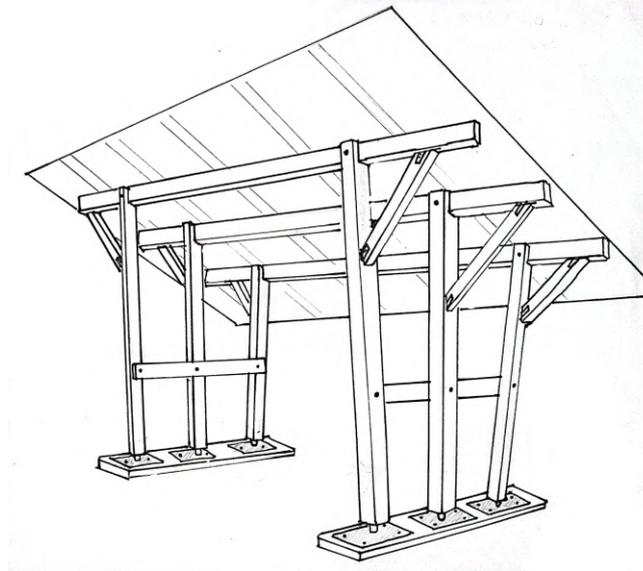


Fonte: Da autora com base em projeto existente fornecido pelo NEMATENC (2023)

4.1.2 Croqui em madeira

Para concepção inicial dispõe-se na Figura 7 a seguir o croqui para o projeto em madeira como discutido no tópico 3.2.

Figura 7 – Concepção inicial do projeto em madeira



Fonte: Da autora (2023)

4.1.3 Projeto arquitetônico em madeira

Partindo do croqui realizou-se o projeto arquitetônico em madeira, estabelecendo a disposição geral da estrutura.

Para os padrões comerciais definiu-se pilares duplos (de modo a acompanhar a estrutura original) de 5 x 16 cm cada espaçados em 5 cm entre os pares de forma a receber terças com 5 x 16 cm. As mãos francesas foram estimadas com 5 x 10 cm.

Já para os contraventamentos, com também seção de 5 x 16 cm, estimou-se um ângulo de 35° com a horizontal de forma a evitar conflito entre as ligações das mãos francesas estabelecidas a 45° e a terça frontal.

Para as ligações das peças foram propostas conexões por peças metálicas sendo elas parafusos e cantoneiras.

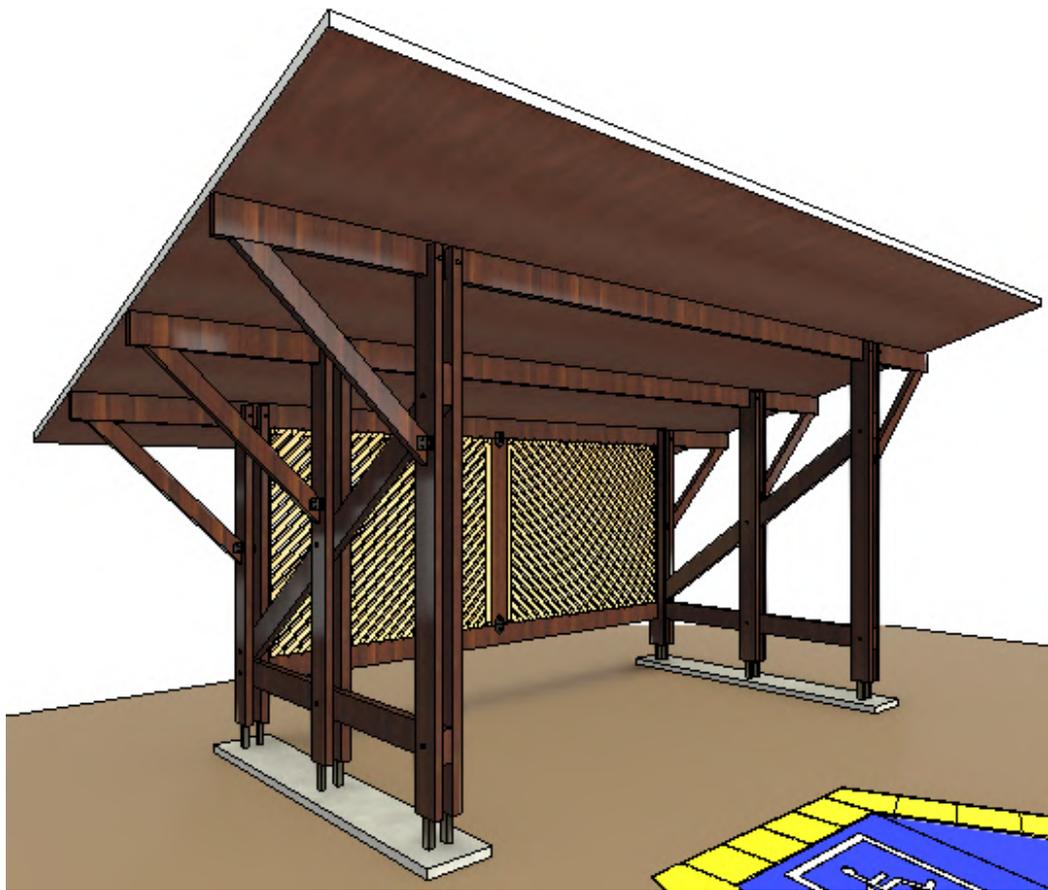
A conexão entre os pilares e a fundação, assim como no bambu, há a necessidade de elevar a madeira para evitar contato com a água e prevenir apodrecimento da peça, portanto optou-se por fixar os pilares com chapas e suporte metálico elevado a 20 cm do solo.

Com intenção de se assemelhar à estrutura base, para a cobertura do projeto em madeira foi estabelecido o uso da telha termoacústica (“telha sanduíche”) em aço trapezoidal, com núcleo em Poliestireno expandido (EPS). Sendo a telha uma placa inteiriça, podendo ter

até 12 m comprimento, e apoios espaçados até 1,7 m (de acordo com as especificações do fabricante), como os apoios em questão estão espaçados a 1,06 m exclui-se a necessidade da trama para suporte da cobertura.

O projeto completo encontra-se no Apêndice B, para ilustração dispõe-se Figura 8 constando a perspectiva em 3D do projeto.

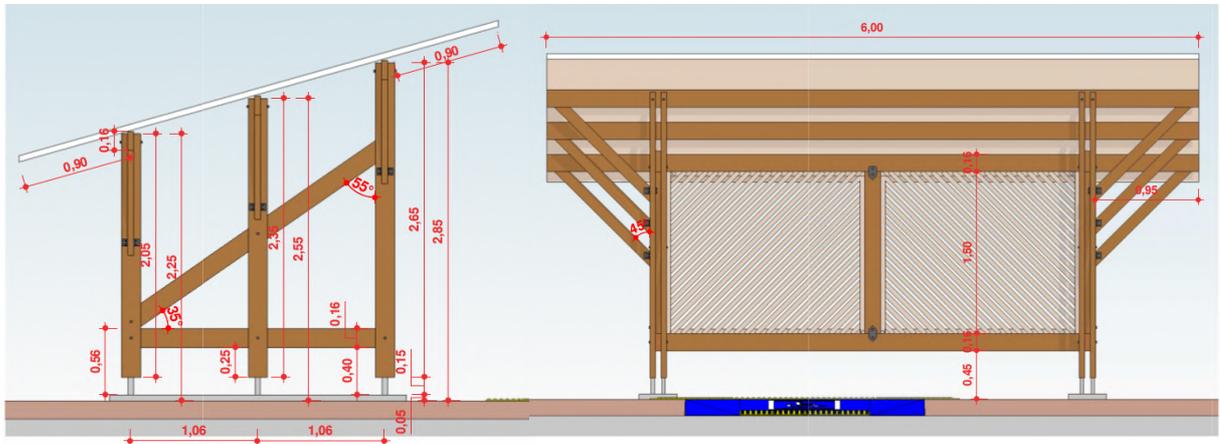
Figura 8 – Perspectiva em 3D



Fonte: Da autora (2023)

E detalhes das elevações lateral esquerda e frontal na Figura 9 a seguir:

Figura 9 – Elevação lateral esquerda e elevação frontal



Fonte: Da autora (2023)

Devido ao embasamento no projeto em bambu a área coberta também corresponde à 24 m² para o projeto em madeira, contudo, diante da não necessidade de blocos sobre a fundação e à redução no espaço de ocupação dos pilares, o espaço interno útil passou de 16,60 m³ para 20,54 m³.

Além disso outra peculiaridade observada é a redução considerável no número de peças, onde para o projeto em bambu foram utilizadas 12 peças destinadas a mãos francesas enquanto que para o projeto em madeira este valor pode ser reduzido pela metade, contabilizando apenas uma mão francesa por pilar.

Devido a escolha da cobertura houve também redução nas peças destinadas ao suporte da mesma, dispensando caibros e ripas antes utilizados no projeto em bambu.

A altura total da estrutura permaneceu a mesma do projeto em bambu chegando a cerca de 3,2 m. Contudo os pilares em madeira são 0,45 m maiores devido a remoção dos blocos de alvenaria sob a fundação.

No aspecto arquitetônico o projeto em madeira toma uma aparência mais leve devido as peças serem mais esbeltas enquanto o projeto em bambu é mais robusto por conta das peças roliças com diâmetros consideráveis.

4.2 Cargas atuantes e combinações

Neste tópico são expostos os resultados das cargas obtidos pelas metodologias descritas anteriormente.

4.2.1 Carregamento devido ao peso próprio

Dispõe-se nas Tabelas 1 e 2 os pesos próprios de cada peça destinada a nova estrutura em madeira.

Tabela 1 – Cargas Distribuídas para estrutura de madeira

Peça	Peso específico (N/m ³)	seção transversal (m)		Peso Próprio (N/m)	Peso Próprio (kN/m)	
		b	h			
Terças		0,160	0,050	51,797	0,052	
CV		0,160	0,050	51,797	0,052	
viga(brise)		0,160	0,050	51,797	0,052	
Mão francesa	6474,600	0,050	0,100	32,373	0,032	
		Espessura (m)	Carga por área (N/m ²)	Área de contribuição (m ²)	Carga linear (N/m)	Carga linear (kN/m)
Brise		0,050	323,730	0,475	152,153	0,152

Fonte: Da autora (2023).

Tabela 2 – Cargas Pontuais para estrutura de madeira

Peça	Peso específico (N/m ³)	seção transversal (m)		Altura da peça (m)	Peso Próprio (N)	Peso Próprio (kN)
		b	h			
Pilar Frontal		0,160	0,050	2,650	137,262	0,137
Pilar central	6474,600	0,160	0,050	2,350	121,722	0,122
Pilar fundo		0,160	0,050	2,050	106,183	0,106
Pilar Brise		0,160	0,050	1,500	77,695	0,078

Fonte: Da autora (2023).

Do catálogo do fabricante para o peso próprio da telha termoacústica tem-se os dados da Tabela 3.

Tabela 3 – Telha termoacústica

Material	Espessura (mm)	Massa por área (kg/m ²)	Peso Próprio (N/m ²)	Quantidade (un.)	Peso Próprio total (N/m ²)
Chapa de aço galvalume	0,430	3,770	36,984	2	73,967
EPS (Isopor) 12kg/m ³	30,000	0,360	3,532	1	3,532
TOTAL					77,499

Fonte: Da autora (2023).

Sendo a carga da telha distribuída ao longo de uma área, faz-se a linearização, na Tabela 4, definindo 3 áreas de influência que serão recebidas pelas terças, sendo o mesmo feito para a carga variável de manutenção.

Tabela 4 – Linearização cargas da cobertura para estrutura de madeira

Área de influência (m ²)	Carga permanente			Carga variável		
	Carga por área (N/m ²)	Carga distribuída (N/m)	Carga distribuída (kN/m)	Carga por área (N/m ²)	Carga distribuída (N/m)	Carga distribuída (kN/m)
7,980	77,499	103,074	0,103	1000,000	1330,000	1,330

Fonte: Da autora (2023).

Nas Tabelas 5 e 6 dispõe-se os pesos próprios de cada peça da estrutura em bambu, utilizando dos pesos específicos retirados da revisão bibliográfica.

Tabela 5 – Cargas pontuais para estrutura de bambu

Peça	Peso específico (N/m ³)	Área da seção transversal			Altura da peça (m)	Peso Próprio (N)	Peso Próprio (kN)
		Área externa (m ²)	Área interna (m ²)	Área da seção (m ²)			
Pilar Frontal	6965,100	0,020	0,011	0,009	2,200	134,790	0,135
Pilar central		0,020	0,011	0,009	1,900	116,410	0,116
Pilar fundo		0,020	0,011	0,009	1,600	98,029	0,098
Pilar Brise		0,020	0,011	0,009	1,450	88,839	0,089

Fonte: Da autora (2023).

Tabela 6 – Cargas Distribuídas para estrutura de bambu

Peça	Peso específico (N/m ³)	Área da seção transversal			Peso Próprio (N/m)	Peso Próprio (kN/m)
		Área externa (m ²)	Área interna (m ²)	Área da seção (m ²)		
Terças	6965,100	0,020	0,011	0,009	61,268	0,061
Contraventamento (diagonal)		0,020	0,011	0,009	61,268	0,061
Contraventamento (horizontal)		0,020	0,011	0,009	61,268	0,061
Viga(brise)		0,020	0,011	0,009	61,268	0,061
Mão francesa	9515,700	0,003	0,001	0,002	14,947	0,015
Caibros		0,003	0,001	0,002	14,947	0,015
		Seção transversal		Área da seção (m ²)	Peso Próprio (N/m)	Peso Próprio (kN/m)
		b (m)	h (m)			
Ripas (cobertura)	6965,100	0,060	0,020	0,001	8,358	0,008
Ripas(brise)		0,060	0,020	0,001	8,358	0,008

Fonte: Da autora (2023).

Na estrutura em bambu a cobertura é feita do próprio material, dessa forma as cargas da cobertura estão apresentadas nas Tabelas 7 e 8

Tabela 7 – Cargas por área para estrutura de bambu

Material	Peça	Peso específico (N/m ³)	Espessura (m)	Carga por área (kN/m ²)
Bambu	Esteiras	6965,100	0,020	0,139
	Ripas	6965,100	0,020	0,139
		Peso Próprio (kN/m)	Diâmetro (m)	Carga por área (kN/m ²)
Bambu	Caibros	0,015	0,060	0,249

Fonte: Da autora (2023).

Tabela 8 – Carga total da cobertura em bambu

Peça	Carga por área (kN/m ²)	Camadas (un.)	Carga total (kN/m ²)
Manta asfáltica	0,030	1	0,030
Esteiras	0,139	2	0,279
Carga total cobertura (kN/m²)			0,309

Fonte: Da autora (2023).

Feitas as linearizações das cargas da cobertura, disponibiliza-se os resultados na Tabela 9 a seguir:

Tabela 9 – Linearização cargas permanentes da cobertura para estrutura de bambu

Peças	Comprimento da face (m)	Carga permanente			Carga total (kN/m)
		Área de influência (m ²)	Carga por área (kN/m ²)	Carga distribuída (kN/m)	
Ripas		0,360	0,139	0,008	
Caibros	6,000	1,360	0,249	0,056	0,475
Cobertura		7,980	0,309	0,410	

Fonte: Da autora (2023).

Observado que a área de influência da carga variável de manutenção de 1kN/m² é a mesma tanto para estrutura de madeira quanto para a estrutura de bambu, ou seja, o valor dessa carga linearizada será o mesmo apresentado na Tabela 4 para a estrutura de bambu.

4.2.1.1 Carregamento devido a carga de vento

Dos critérios definidos para lançamento no programa, tem-se:

$$V_0 = 35 \text{ m/s}$$

Dos resultados obtidos:

Velocidade característica de vento (V_k):

$$V_k = 45,99 \text{ m/s}$$

Pressão dinâmica (q):

$$q = 1,30 \text{ kN/m}^2$$

Esforços resultantes:

Vento de sucção e sobrepessão à 0° e 180°: $\pm 4,78 \text{ kN/m}$

Vento de sucção à 90° e 270°: $-1,28 \text{ kN/m}$

Vento de sobrepessão à 90° e 270°: $5,31 \text{ kN/m}$

Para ilustração da orientação das cargas dispõe-se a Figura 10:

Tem-se das cargas características retiradas do Ftool® a partir dos pesos próprios calculados, carga variável e cargas de ventos os seguintes valores para a estrutura em madeira, mostrados na Tabela 10.

Tabela 10 – Valores característicos da estrutura em madeira descarregados sobre fundação

Lateral esquerda						
Tipo da carga	Frontais		Centrais		Traseiros	
	Pilar 1A (kN)	Pilar 1B (kN)	Pilar 2A (kN)	Pilar 2B (kN)	Pilar 3A (kN)	Pilar 3B (kN)
Carga permanente	-0,304	-0,528	-0,332	-0,561	-0,361	-0,941
Carga variável	-0,856	-3,134	-0,843	-3,147	-1,324	-2,666
Vento sucção 0°	-3,079	-1,017	-2,849	-0,353	2,749	-5,442
Vento sucção 90°	0,829	0,829	0,880	0,880	-1,709	-1,709
Vento sucção 180°	7,074	-2,978	5,840	-2,637	-0,483	3,175
Vento sucção 270°	-1,774	-1,774	-0,693	-0,693	2,466	2,466
Vento sobrepressão 0°	3,079	1,017	2,849	0,353	-2,749	5,442
Vento sobrepressão 90°	-3,437	-3,437	-3,652	-3,652	7,089	7,089
Vento sobrepressão 180°	-7,074	2,978	-5,840	2,637	0,483	-3,175
Vento sobrepressão 270°	7,358	7,358	2,873	2,873	-10,231	-10,231
lateral direita						
Tipo da carga	Frontais		Centrais		Traseiros	
	Pilar 4A (kN)	Pilar 4B (kN)	Pilar 5A (kN)	Pilar 5B (kN)	Pilar 6A (kN)	Pilar 6B (kN)
Carga permanente	-0,528	-0,304	-0,561	-0,332	-0,941	-0,361
Carga variável	-3,134	-0,856	-3,147	-0,843	-2,666	-1,324
Vento sucção 0°	-2,978	7,074	-2,637	5,840	3,175	-0,483
Vento sucção 90°	0,829	0,829	0,880	0,880	-1,709	-1,709
Vento sucção 180°	-1,017	-3,079	-0,353	-2,849	-5,442	2,749
Vento sucção 270°	-1,774	-1,774	-0,693	-0,693	2,466	2,466
Vento sobrepressão 0°	2,978	-7,074	2,637	-5,840	-3,175	0,483
Vento sobrepressão 90°	-3,437	-3,437	-3,652	-3,652	7,089	7,089
Vento sobrepressão 180°	1,017	3,079	0,353	2,849	5,442	-2,749
Vento sobrepressão 270°	7,358	7,358	2,873	2,873	-10,231	-10,231

Fonte: Da autora (2023).

E para a estrutura em bambu, os valores mostrados na Tabela 11.

Tabela 11 – Valores característicos da estrutura em bambu descarregados sobre fundação

Lateral esquerda						
Tipo da carga	Frontais		Centrais		Traseiros	
	Pilar 1A (kN)	Pilar 1B (kN)	Pilar 2A (kN)	Pilar 2B (kN)	Pilar 3A (kN)	Pilar 3B (kN)
Carga permanente	-0,463	-1,493	-0,472	-1,514	-0,323	-1,981
Carga variável	-0,672	-3,318	-0,658	-3,332	-0,658	-3,332
Vento sucção 0°	-1,373	-1,184	-1,232	-0,638	-1,051	-0,245
Vento sucção 90°	1,030	1,030	0,716	0,716	-1,746	-1,746
Vento sucção 180°	5,779	-3,223	4,525	-2,655	3,366	-2,070
Vento sucção 270°	-2,097	-2,097	-1,031	-1,031	3,128	3,128
Vento sobrepressão 0°	1,373	1,184	1,232	0,638	1,051	0,245
Vento sobrepressão 90°	-4,271	-4,271	-2,972	-2,972	7,243	7,243
Vento sobrepressão 180°	-5,779	3,223	-4,525	2,655	-3,366	2,070
Vento sobrepressão 270°	8,700	8,700	4,278	4,278	-12,978	-12,978
lateral direita						
Tipo da carga	Frontais		Centrais		Traseiros	
	Pilar 4A (kN)	Pilar 4B (kN)	Pilar 5A (kN)	Pilar 5B (kN)	Pilar 6A (kN)	Pilar 6B (kN)
Carga permanente	-1,493	-0,463	-1,514	-0,472	-1,981	-0,323
Carga variável	-3,318	-0,672	-3,332	-0,658	-3,332	-0,658
Vento sucção 0°	-3,223	5,779	-2,655	4,525	-2,070	3,366
Vento sucção 90°	1,030	1,030	0,716	0,716	-1,746	-1,746
Vento sucção 180°	-1,184	-1,373	-0,638	-1,232	-0,245	-1,051
Vento sucção 270°	-2,097	-2,097	-1,031	-1,031	3,128	3,128
Vento sobrepressão 0°	3,223	-5,779	2,655	-4,525	2,070	-3,366
Vento sobrepressão 90°	-4,271	-4,271	-2,972	-2,972	7,243	7,243
Vento sobrepressão 180°	1,184	1,373	0,638	1,232	0,245	1,051
Vento sobrepressão 270°	8,700	8,700	4,278	4,278	-12,978	-12,978

Fonte: Da autora (2023).

Percebem-se as diferenças entre as cargas características nas estruturas: no peso próprio as cargas da estrutura em bambu são maiores em intensidade devido a carga mais elevada na cobertura em comparação a cobertura definida para a estrutura em madeira, além de haver um maior número de peças.

Já os esforços resultantes vindos da carga variável de manutenção do telhado são os mesmos, se somado aos das cargas dos pilares duplos, contudo são distribuídos de formas diferentes nos pilares de cada estrutura devido ao afastamento entre os pilares de cada par, onde na madeira essa distância entre centros é de 0,10 m e na estrutura de bambu essa

distância é de 0,32 m, dessa forma os pilares da extremidade contribuem um pouco mais na madeira diminuindo a carga recebida pelos pilares internos.

A exemplo do par de pilares 1A e 1B:

- Para a estrutura de madeira:
 - Da reação no pilar 1A: -0,856 kN
 - Da reação no pilar 1B: -3,134 kN
 - Da soma: $-0,856 + (-3,134) = -3,990$ kN
- Para a estrutura de bambu:
 - Da reação no pilar 1A: -0,672 kN
 - Da reação no pilar 1B: -3,318 kN
 - Da soma: $-0,672 + (-3,318) = -3,990$ kN

4.2.1.3 Combinações

Analisando as cargas características fez-se as combinações de ações mais críticas sobre ambas as estruturas como descrito no Tópico 3.3.2., dispondo os resultados e destacando valores críticos da estrutura de madeira nas Tabelas 12 e 13, e para estrutura em bambu nas Tabelas 14 e 15.

Tabela 12 – Combinações críticas para estrutura de madeira nos pilares da lateral esquerda

Combinação	Lateral esquerda					
	Frontais		Centrais		Traseiros	
	Pilar 1A (kN)	Pilar 1B (kN)	Pilar 2A (kN)	Pilar 2B (kN)	Pilar 3A (kN)	Pilar 3B (kN)
C01	-1,588	-5,229	-1,597	-5,282	-2,347	-4,940
C02	-4,923	-2,054	-4,606	-1,091	3,763	-9,104
C03	0,940	0,716	0,988	0,759	-2,925	-3,505
C04	10,307	-4,995	8,428	-4,517	-1,086	3,822
C05	10,733	10,509	3,978	3,749	-15,708	-16,288
C06	3,581	-1,511	3,210	-2,560	-5,586	4,940
C07	-4,773	-8,481	-4,983	-8,737	3,925	1,158
C08	-11,648	1,430	-9,824	0,866	-0,738	-7,985
C09	10,000	8,000	3,246	1,220	-16,809	-18,569

Fonte: Da autora (2023).

Tabela 13 – Combinações críticas para estrutura de madeira nos pilares da lateral direita

Combinação	Lateral direita					
	Frontais		Centrais		Traseiros	
	Pilar 4A (kN)	Pilar 4B (kN)	Pilar 5A (kN)	Pilar 5B (kN)	Pilar 6A (kN)	Pilar 6B (kN)
C01	-5,229	-1,588	-5,282	-1,597	-4,940	-2,347
C02	-4,995	10,307	-4,517	8,428	3,822	-1,086
C03	0,716	0,940	0,759	0,988	-3,505	-2,925
C04	-2,054	-4,923	-1,091	-4,606	-9,104	3,763
C05	10,509	10,733	3,749	3,978	-16,288	-15,708
C06	1,430	-11,648	0,866	-9,824	-7,985	-0,738
C07	-8,481	-4,773	-8,737	-4,983	1,158	3,925
C08	-1,511	3,581	-2,560	3,210	4,940	-5,586
C09	8,000	10,000	1,220	3,246	-18,569	-16,809

Fonte: Da autora (2023).

É possível perceber que os valores acompanham a simetria do projeto, tanto no projeto em bambu quanto em madeira.

Tabela 14 – Combinações críticas para estrutura de bambu nos pilares da lateral esquerda

Combinação	Lateral esquerda					
	Frontais		Centrais		Traseiros	
	Pilar 1A (kN)	Pilar 1B (kN)	Pilar 2A (kN)	Pilar 2B (kN)	Pilar 3A (kN)	Pilar 3B (kN)
C01	-1,471	-6,470	-1,459	-6,512	-1,310	-6,979
C02	-2,523	-3,269	-2,320	-2,471	-1,900	-2,349
C03	1,082	0,052	0,602	-0,440	-2,942	-4,600
C04	8,206	-6,328	6,316	-5,497	4,726	-5,086
C05	-3,609	-4,639	-2,019	-3,061	4,369	2,711
C06	12,587	11,557	5,945	4,903	-19,790	-21,448
C07	0,954	-2,653	0,741	-3,510	0,663	-4,707
C08	-7,512	-10,836	-5,565	-8,925	9,951	5,790
C09	-5,454	-10,762	-4,275	-9,641	5,112	-1,055
C10	-9,774	0,405	-7,895	-0,485	-5,962	-1,969
C11	11,944	8,621	5,310	1,950	-20,380	-24,541

Fonte: Da autora (2023).

Tabela 15 – Combinações críticas para estrutura de bambu nos pilares da lateral direita

Combinação	Lateral direita					
	Frontais		Centrais		Traseiros	
	Pilar 4A (kN)	Pilar 4B (kN)	Pilar 5A (kN)	Pilar 5B (kN)	Pilar 6A (kN)	Pilar 6B (kN)
C01	-6,470	-1,471	-6,512	-1,459	-6,979	-1,310
C02	-6,328	8,206	-5,497	6,316	-5,086	4,726
C03	0,052	1,082	-0,440	0,602	-4,600	-2,942
C04	-3,269	-2,523	-2,471	-2,320	-2,349	-1,900
C05	-4,639	-3,609	-3,061	-2,019	2,711	4,369
C06	11,557	12,587	4,903	5,945	-21,448	-19,790
C07	0,405	-9,774	-0,485	-7,895	-1,969	-5,962
C08	-10,836	-7,512	-8,925	-5,565	5,790	9,951
C09	-10,762	-5,454	-9,641	-4,275	-1,055	5,112
C10	-2,653	0,954	-3,510	0,741	-4,707	0,663
C11	8,621	11,944	1,950	5,310	-24,541	-20,380

Fonte: Da autora (2023).

Comparando as cargas mais críticas nos dois sistemas construtivos verificam-se as relações anotadas na Tabela 16.

Tabela 16 – Comparação das cargas na fundação.

Pilares	Madeira	Bambu	Madeira/ Bambu (%)
1A	11,65	12,59	92,54
1B	10,51	11,56	90,93
2A	9,82	7,89	124,44
2B	8,74	9,64	90,62
3A	16,81	20,38	82,48
3B	18,57	24,54	75,67
4A	10,51	11,56	90,93
4B	11,65	12,59	92,54
5A	8,74	9,64	90,62
5B	9,82	7,89	124,44
6A	18,57	24,54	75,67
6B	16,81	20,38	82,48
Média			92,78

Fonte: Da autora (2023).

Feita a análise têm-se que as intensidades das cargas nos pilares da estrutura de madeira correspondem em média a 92,78% das cargas dos pilares da estrutura de bambu, este valor está relacionado não apenas aos pesos específicos dos materiais e volumes das estruturas, mas também à diferença nas alturas, além da angulação nos pilares em bambu que influenciaram os esforços resultantes nas ações das cargas de ventos. .

4.3 Verificações

São dispostos neste tópico os resultados das verificações de segurança propostas para a estrutura em madeira.

4.3.1 Flexão simples nas terças

Da verificação das terças quanto a flexão tem-se os resultados dispostos na Tabela 17.

Tabela 17 – Verificação das terças na flexão

Terças	L(m)	Cargas características (kN/m)		Cargas de cálculo (kN/m)		Dist. da LN (m) y	$\sigma_{M,d}$ (MPa)	f _{m,d} (MPa)	Condição $\sigma_{M,d} \leq f_{m,d}$
		FG	FQ	Fd	Md				
Centro	3,950	0,155	1,330	2,197	3,130	0,080	14,673	18,000	Satisfaz
Balanço	1,025	0,155	1,330	2,197	1,154	0,080	5,409	18,000	Satisfaz

Fonte: Da autora (2023).

As terças dimensionadas atendem as condições de resistência tendo sua resistência à flexão de cálculo maior do que a solicitação submetida.

4.3.2 Compressão simples nos pilares

Para a verificação da compressão dispõe-se os valores de tensão de cálculo solicitantes por pilar mostrados na Tabela 18.

Tabela 18 – Tensões de compressão de cálculo

Pilares	Área da seção (cm²)	$\sigma_{N,d}$ (kN/cm²)	$\sigma_{N,d}$ (MPa)
1A	80,00	0,15	1,46
1B	80,00	0,13	1,31
2A	80,00	0,12	1,23
2B	80,00	0,11	1,09
3A	80,00	0,21	2,10
3B	80,00	0,23	2,32
4A	80,00	0,13	1,31
4B	80,00	0,15	1,46
5A	80,00	0,11	1,09
5B	80,00	0,12	1,23
6A	80,00	0,23	2,32
6B	80,00	0,21	2,10

Fonte: Da autora (2023).

Dos raios de giração para os dois eixos e comprimentos de flambagem dispõe-se os resultados na Tabela 19.

Tabela 19 – Raios de giração e comprimentos de flambagem

Pilar	Área da seção (cm²)	Momentos de inércia (cm⁴)		Raios de giração (cm)		Comp. de flambagem (cm)
		I_x	I_y	r_x	r_y	L₀
1A	80,000	1706,667	166,667	4,619	1,443	172,250
1B	80,000	1706,667	166,667	4,619	1,443	172,250
2A	80,000	1706,667	166,667	4,619	1,443	152,750
2B	80,000	1706,667	166,667	4,619	1,443	152,750
3A	80,000	1706,667	166,667	4,619	1,443	133,250
3B	80,000	1706,667	166,667	4,619	1,443	133,250
4A	80,000	1706,667	166,667	4,619	1,443	172,250
4B	80,000	1706,667	166,667	4,619	1,443	172,250
5A	80,000	1706,667	166,667	4,619	1,443	152,750
5B	80,000	1706,667	166,667	4,619	1,443	152,750
6A	80,000	1706,667	166,667	4,619	1,443	133,250
6B	80,000	1706,667	166,667	4,619	1,443	133,250

Fonte: Da autora (2023).

Das verificações dos índices de esbeltez das peças têm-se os resultados obtidos na Tabela 20.

Tabela 20 – Verificação da esbeltez das peças

Pilar	Índice de esbeltez		Índice de esbeltez relativo		Verificação
	λ_x	λ_y	$\lambda_{rel,x}$	$\lambda_{rel,y}$	$\lambda_{rel} < 0,3$
1A	37,293	119,338	0,577	1,848	Não satisfaz
1B	37,293	119,338	0,577	1,848	Não satisfaz
2A	33,071	105,828	0,512	1,639	Não satisfaz
2B	33,071	105,828	0,512	1,639	Não satisfaz
3A	28,849	92,318	0,447	1,429	Não satisfaz
3B	28,849	92,318	0,447	1,429	Não satisfaz
4A	37,293	119,338	0,577	1,848	Não satisfaz
4B	37,293	119,338	0,577	1,848	Não satisfaz
5A	33,071	105,828	0,512	1,639	Não satisfaz
5B	33,071	105,828	0,512	1,639	Não satisfaz
6A	28,849	92,318	0,447	1,429	Não satisfaz
6B	28,849	92,318	0,447	1,429	Não satisfaz

Fonte: Da autora (2023).

Logo, dado que o índice de esbeltez relativo ultrapassa o valor de 0,3, é necessária a verificação quanto a estabilidade lateral (Tabela 21).

Tabela 21 – Verificação da estabilidade

Pilar	k_x	k_y	k_{cx}	k_{cy}	Verificação de estabilidade		Condição
					Direção X	Direção y	
1A	0,694	2,362	0,926	0,261	0,134	0,477	Satisfaz
1B	0,694	2,362	0,926	0,261	0,121	0,430	Satisfaz
2A	0,652	1,976	0,947	0,325	0,111	0,323	Satisfaz
2B	0,652	1,976	0,947	0,325	0,099	0,288	Satisfaz
3A	0,614	1,635	0,965	0,412	0,186	0,436	Satisfaz
3B	0,614	1,635	0,965	0,412	0,206	0,482	Satisfaz
4A	0,694	2,362	0,926	0,261	0,121	0,430	Satisfaz
4B	0,694	2,362	0,926	0,261	0,134	0,477	Satisfaz
5A	0,652	1,976	0,947	0,325	0,099	0,288	Satisfaz
5B	0,652	1,976	0,947	0,325	0,111	0,323	Satisfaz
6A	0,614	1,635	0,965	0,412	0,206	0,482	Satisfaz
6B	0,614	1,635	0,965	0,412	0,186	0,436	Satisfaz

Fonte: Da autora (2023).

Para ambas as direções a condição de estabilidade é observada em todas as peças, portanto os pilares atendem aos requisitos definidos pela norma.

4.4 Análise dos deslocamentos excessivos

Para a análise de deslocamentos é conferido para as terças os deslocamentos instantâneos e finais como descrito na metodologia, dispondo os resultados na Tabela 22 a seguir.

Tabela 22 – Verificação dos deslocamentos excessivos

Deslocamento instantâneo				
Trecho carregado	Deslocamentos		Flecha total	Limite
	$\delta_{inst,G,k}$ (cm)	$\delta_{inst,Q,k}$ (cm)	δ_{inst} (cm)	δ_{lim} (cm)
Vão	0,014	0,119	0,133	0,658
Balanço	0,001	0,009	0,010	0,683
Deslocamento final				
Trecho carregado	Deslocamentos		Flecha total	Limite
	$\delta_{fin,G,k}$ (cm)	$\delta_{fin,Q,k}$ (cm)	δ_{fin} (cm)	δ_{lim} (cm)
Vão	0,025	0,064	0,089	1,317
Balanço	0,002	0,005	0,006	1,367

Fonte: Da autora (2023).

Observa-se que os valores atendem ao limite tanto para deslocamentos instantâneos quanto para os deslocamentos finais.

Para avaliação dos deslocamentos da estrutura em madeira são disponibilizados no Apêndice C os resultados obtidos pelo programa computacional, observando que os valores se encontram em milímetros.

Os deslocamentos da estrutura em bambu são apresentados no Apêndice D.

Observa-se que os deslocamentos das duas estruturas assumem valores próximos uma da outra, sendo ligeiramente maiores para a estrutura em bambu devido à diferença na geometria (onde para a estrutura de madeira o detalhe do brise a 45° tem função também de travamento) e nos módulos de elasticidade dos dois materiais.

4.5 Volumes de materiais utilizados e sequestro de carbono

Da capacidade de sequestro de carbono têm-se:

Bambu *Bambusa tuldoides*:

$$\text{Carbono armazenado} = (970 \text{ kg/m}^3 \times 0,86) \times 0,45 = 375,39 \text{ kg/m}^3$$

Bambu *Dendrocalamus asper*:

$$\text{Carbono armazenado} = (710 \text{ kg/m}^3 \times 0,86) \times 0,45 = 274,77 \text{ kg/m}^3$$

Madeira, D40:

$$\text{Carbono armazenado} = (660 \text{ kg/m}^3 \times 0,88) \times 0,45 = 261,36 \text{ kg/m}^3$$

Logo, a estrutura em madeira tem capacidade estimada para sequestrar aproximadamente de 261,36 kg de carbono por metro cúbico enquanto que o bambu para a espécie *Dendrocalamus asper* e *Bambusa tuldoides* esse valor é de 274,77 kg/m³ e 375,39 kg/m³, respectivamente.

Dado que o volume total definirá a capacidade de sequestro das estruturas, têm-se os volumes apresentados nas Tabelas 23 para madeira e Tabela 24 para o bambu.

Tabela 23 – Volume da estrutura em madeira

Peças	Massa específica (kg/m ³)	Dimensões (m)			Vol. (m ³)	Quant. (un.)	Vol. total (m ³)	Massa (kg)
Pilar Frontal	660,000	0,160	0,050	2,650	0,021	4	0,085	55,968
Pilar central		0,160	0,050	2,350	0,019	4	0,075	49,632
Pilar fundo		0,160	0,050	2,050	0,016	4	0,066	43,296
Pilar Brise		0,160	0,050	1,500	0,012	1	0,012	7,920
Terças		0,160	0,050	6,000	0,048	3	0,144	95,040
CV horizontal		0,160	0,050	2,280	0,018	2	0,036	24,077
CV diagonal		0,160	0,050	2,800	0,022	2	0,045	29,568
Viga(brise)		0,160	0,050	3,800	0,030	1	0,030	20,064
Mão francesa		0,050	0,100	1,150	0,006	6	0,035	22,770
Brise		0,050	1,010	0,940	0,047	1	0,047	31,330
Total							0,575	379,665

Fonte: Da autora (2023).

Tabela 24 – Volume da estrutura em bambu

Peça	Massa específica (kg/m ³)	Área da seção transversal (m ²)	Comp. (m)	Vol. (m ³)	Quant. (un.)	Vol. total (m ³)	Massa (kg)
Terças		0,009	6,000	0,053	3	0,158	112,419
CV diagonal	710,000	0,009	2,450	0,022	2	0,043	30,603
CV horizontal		0,009	1,950	0,017	2	0,034	24,357
Viga (brise)		0,009	3,550	0,031	1	0,031	22,171
Mão francesa	970,000	0,002	1,100	0,002	12	0,021	20,112
Caibros		0,002	4,000	0,006	17	0,107	103,610
Pilar Frontal		0,009	2,200	0,019	4	0,077	54,960
Pilar central		0,009	1,900	0,017	4	0,067	47,466
Pilar fundo		0,009	1,600	0,014	4	0,056	39,971
Pilar Brise	710,000	0,009	1,450	0,013	1	0,013	9,056
Ripas (cobertura)		0,001	6,000	0,007	3	0,022	15,336
Ripas (brise)		0,001	1,700	0,002	36	0,073	52,142
Esteiras		0,012	4,000	0,048	20	0,960	681,600
Total						1,663	1213,804

Fonte: Da autora (2023).

Percebe-se, que além da influência das massas específicas, diferente da estrutura em madeira, a estrutura em bambu possui sua cobertura também no mesmo material e peças destinadas ao suporte o que acarreta num volume e massa muito superiores ao da madeira.

O volume da estrutura de madeira corresponde a 34,6% do volume da estrutura de bambu. Contudo, o volume da estrutura em bambu, desprezando sua cobertura, é de cerca de 0,703 m³ e massa de 532,2 kg, nesse sentido o volume da estrutura em madeira corresponde a 81,84% da estrutura em bambu.

Das estimativas de capacidade de sequestro, tem-se para a madeira os valores da Tabela 25.

Tabela 25 – Estimativa de armazenamento total de carbono em estrutura de madeira

Volume total por material	Carbono armazenado (kg/m ³)	Carbono total armazenado pela estrutura (kg)
Eucalipto	0,575	150,347

Fonte: Da autora (2023).

E para o bambu, os valores estão contidos na Tabela 26.

Tabela 26 – Estimativa de armazenamento total de carbono em estrutura de bambu

Volume total por material (m³)	Carbono armazenado (kg/m³)	Carbono armazenado pela estrutura (kg)
Bambu Dendrocalamus Asper	1,535	274,770
Bambu Tuldoides Munro	0,128	375,390
Total de carbono armazenado na estrutura (kg)		469,742

Fonte: Da autora (2023).

Para efeito comparativo faz-se a estimativa desprezando a cobertura (Tabela 27).

Tabela 27 – Estimativa de armazenamento total de carbono em estrutura de bambu excluindo cobertura

Volume total por material (m³)	Carbono armazenado (kg/m³)	Carbono armazenado pela estrutura (kg)
Bambu Dendrocalamus Asper	0,575	274,770
Bambu Tuldoides Munro	0,128	375,390
Total de carbono armazenado na estrutura (kg)		205,963

Fonte: Da autora (2023).

A capacidade de sequestro é regida pela quantidade de material presente na estrutura. Dessa forma, a estrutura proposta em madeira tem uma capacidade correspondente de 32% da capacidade da estrutura de bambu devido a sua cobertura única.

Contudo, desprezando a cobertura e analisando apenas estrutura, têm-se que a estrutura em madeira corresponde 73% da capacidade da estrutura em bambu. Ou seja, em favor da capacidade de armazenamento de carbono na estrutura, a cobertura em telha termoacústica poderia ser substituída por materiais com capacidades de sequestro, como telhas de madeira (a exemplo das taubilhas). Essa troca acarretaria numa carga maior sobre a estrutura o que exigiria uma nova verificação das peças, mas tal substituição tornaria as capacidades de sequestro mais próximas das capacidades da estrutura original em bambu.

4.6 Orçamentos

Como nesta pesquisa não foi avaliado o tipo de fundação para a estrutura em madeira optou-se por dispensar os custos da fundação no orçamento, avaliando apenas custos provenientes dos materiais levantados pós execução da fundação. Contudo é esperado que, diante das dimensões do projeto apresentado, uma fundação do tipo radier se apresente como uma opção viável.

Considerou-se para ambas as estruturas a mão de obra como sendo de 1 carpinteiro e 2 auxiliares, com os custos de projetos sendo iguais dado que as estruturas se assemelham.

Os custos para o bambu foram disponibilizados pelo NEMATENC com o acréscimo das despesas de mão de obra e projetos advindos de consulta ao Sistema Nacional de Pesquisas de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI). Acrescentou-se também o custo do bambu tratado, para o projeto executado no campus este custo foi excluído devido ao fato de as peças de bambu terem sido colhidas e tratadas na própria Universidade. Contudo considerando um novo projeto optou-se por acrescentar esse custo para uma melhor comparação.

Para a madeira o orçamento foi feito inteiramente utilizando o SINAPI. As Tabelas 28 e 29 contêm os valores estimados para orçamentos das estruturas dos dois materiais.

Tabela 28 – Orçamento estimado estrutura de madeira

Descrição	Custo estimado (R\$)
Projeto	3630,75
Conexões	199,62
Cobertura	3266,88
Madeira serrada tratada	1099,75
Diversos	879,18
Mão de obra	2362,01
Total	11438,19

Fonte: Da autora (2023)

Tabela 29 – Orçamento estimado estrutura de bambu

Descrição	Custo estimado (R\$)
Projeto	3630,75
Conexões	1248,84
Alvenaria sob fundação	173,09
Bambu tratado	2850,00
Diversos	879,18
Mão de obra	2362,01
Total	11143,87

Fonte: Da autora (2023)

Observa-se que o custo total da estrutura em bambu, excluindo fundação, corresponde a 97,43% do custo da estrutura em madeira também excluindo sua fundação. A diferença é observada principalmente devido a cobertura, já que para a madeira o uso da telha termoacústica agrega um valor muito elevado em comparação ao uso da cobertura em bambu.

Quanto às conexões, devido ao maior número de peças na estrutura de bambu, o custo se torna também superior à madeira.

No custo “Diversos” considerou-se custos provenientes de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs), ferramentas diversas, além de custo de tratamento superficial em verniz para ambos os materiais.

4.7 Prazos estimados para execução da obra

Quanto ao prazo de execução, a estrutura em bambu foi executada em 2 semanas, sendo a primeira concluída por completo com o levantamento da estrutura, enquanto a segunda semana foi destinada para acabamentos (como aplicação de verniz e fechamento das bases dos pilares).

Estimou-se que a estrutura em madeira leve um prazo de execução equivalente ao bambu, definidos 1 carpinteiro e 2 auxiliares para o levantamento da obra. Portanto neste sentido as estruturas podem ser executadas em prazos equivalentes.

Logo, se, para a madeira, a estrutura poderia ser levantada em cerca de dois meses (considerando prazo de confecção do projeto, serviços preliminares e levantamento da obra), para o bambu esse prazo seria o mesmo considerando peças de bambu já tratadas.

5 CONCLUSÃO

Diante dos resultados obtidos nessa análise é possível concluir que:

- Quanto ao projeto arquitetônico, a estrutura em madeira traz mais leveza e um ganho considerável no espaço útil, além de utilizar menos peças do que a estrutura em bambu.
- Quanto a intensidade das cargas sobre a estrutura observa-se que ambos sistemas construtivos se assemelham, contudo a madeira apresenta intensidades ligeiramente menores, em quase todas as cargas, do que as apresentadas no bambu.
- Quanto aos volumes e capacidade de sequestro de carbono, a estrutura de bambu supera a madeira devido a sua cobertura, contudo excluindo-a temos que as estruturas têm capacidades muito equivalentes.
- Quanto ao custo e prazos de execução, o modelo em madeira tem um custo ligeiramente superior devido a sua cobertura, e quanto aos prazos ambas as estruturas podem ser levantadas em prazos equivalentes.

As estruturas de ambos os materiais apresentam características muito semelhantes, o que acarreta resultados equivalentes. Considerando a principal finalidade como sendo a sustentabilidade observa-se que a estrutura em bambu apresenta características mais atrativas devido sua maior estimativa na capacidade de armazenamento de CO₂ do que o modelo em madeira apresentado, além de o bambu ser um material de crescimento mais rápido se comparado ao eucalipto. De forma geral a madeira apresentou resultados ligeiramente melhores, considerando uma quantidade de peças necessárias menor do que o bambu, além de ampliar o espaço do projeto devido as seções menores. Sendo ambos materiais opções viáveis e que apresentam baixo custo se comparado a estruturas que utilizam do sistema de construção convencional.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10004**: Classificação de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ARAUJO, Henrique José Borges; FTAL, Eng. **Caracterização do material madeira**. Educ. Ambient.-o Desenvol. Sustentável na Econ. Glob, p. 31-44, 2020. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/210831/1/26971.pdf>. Acesso em: 20 de abril, 2023.

BAMBU. Peça de Bambu Dendrocalamus Asper Tratado. Disponível em: <https://bambu.com.br/>. Acesso em: 25 julho. 2023.

CARBONARI, Gilberto et al. **Bambu - O aço vegetal**. Mix Sustentável, v. 3, n. 1, p. 17-25, 2017. Disponível em: <https://ojs.sites.ufsc.br/index.php/mixsustentavel/article/view/1876>. Acesso em: 23 maio. 2023.

CHAVES, Hugo. **Madeira na construção**: Vantagens e desvantagens. Neo Ipsum. 21 de jan. 2021. Disponível em: <https://neoipsum.com.br/madeira-na-construcao/>. Acesso em: 23 maio. 2023.

CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, 7.,2021, Brasília. [**Impactos ambientais ocasionados pela construção civil: uma análise das propostas de sustentabilidade no âmbito construtivo**]. Brasília, DF: Universidade Paulista, UNIP. 2021.

CUNHA, Iasminy Borba da. **Quantificação das emissões de CO₂ na construção de unidades residenciais unifamiliares com diferentes materiais**. 2016. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Disponível em: <https://repositorio.pucrs.br/dspace/handle/10923/8797>. Acesso em: 20 de abril, 2023.

DELGADO, Patrícia Santos. **O bambu como material eco-eficiente**: caracterização e estudos exploratórios de aplicações. 2011.

DIAS, Alan. **Como a madeira sequestra carbono.** Disponível em: <https://www.maisfloresta.com.br/como-a-madeira-sequestra-carbono/>. Acesso em: 20 de abril, 2023.

Diferenças entre os sistemas construtivos: Vantagens e Desvantagens. Entenda antes - O mundo da construção, 2019. Disponível em: <https://entendaantes.com.br/diferencas-entre-os-sistemas-construtivos-vantagens-e-desvantagens/> Acesso em: 20 de abril, 2023.

Emissões do setor de construção civil atingiram recordes em 2019: relatório da ONU. The United Nations Environment Programme (UNEP), 16 de dez. 2020. Disponível em: <https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/comunicado-de-imprensa/emissoes-do-setor-de-construcao-civil-atingiram>. Acesso em: 23 maio. 2023.

FONTES, Henrique. **Ponto de ônibus de madeira é construído no Campus com projeto do IAU.** Assessoria de Comunicação do IAU/USP, 12 de dez. 2019. Disponível em: <http://www.saocarlos.usp.br/ponto-de-onibus-de-madeira-e-construido-no-campus-com-projeto-do-iau/>. Acesso em: 23 maio. 2023.

G1 MA. **Passageiros denunciam situação precária em abrigos para a espera de ônibus em São Luís.** Jornal G1, Maranhão, 2 jul. 2022. Mercado. Disponível em: <https://g1.globo.com/ma/maranhao/noticia/2022/07/02/passageiros-denunciam-situacao-precaria-em-abrigos-para-a-espera-de-onibus-em-sao-luis.ghtml>. Acesso em: 23 maio. 2023.

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, v. 9, p. 107-114, 2005.

IPT. **Informações sobre madeiras:** Eucalyptus citriodora. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de SP. 2023. Disponível em: http://www.ipt.br/informacoes_madeiras/12.htm. Acesso em: 23 maio. 2023.

ITA Construtora. **Abrigo de ônibus.** 2012. Disponível em: <https://www.itaconstrutora.com.br/portfolio/abrigo-de-onibus/>. Acesso em: 23 maio. 2023.

JÚNIOR, Antônio da Silva Sobrinho. **Avaliação do efeito de parâmetros microestruturais e de processo de impregnação de fluidos em colmos de bambusa vulgaris.** 2010. 147 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2010.

LARUCCIA, Mauro Maia. **Sustentabilidade e impactos ambientais da construção civil.** Revista ENIAC pesquisa, v. 3, n. 1, p. 69-84, 2014. Disponível em: https://ojs.eniac.com.br/index.php/EniacPesquisa/article/view/124/pdf_21. Acesso em: 20 de abril, 2023.

Leroy Merlin. Manta Asfáltica Lamina Asfáltica Alumínio 2mm Rolo de 10m Sika. Disponível em: https://www.leroymerlin.com.br/manta-asfaltica-lamina-asfaltica-aluminio-2mm-rolo-de-10m-sika_90603870#caracteristicas-tecnicas. Acesso em: 23 maio. 2023.

LOPES, Wilza. **Solo-cimento Reforçado com Bambu**: Características Físico-Mecânicas. Tese de doutorado apresentada ao programa de pós graduação em engenharia agrícola da Universidade estadual de campinas. Campinas, 2002.

MARÇAL, Manuel. **Falta abrigo em 68,75% dos pontos de ônibus da capital**. Portal O Tempo, 29 de março. 2022. Disponível em: <https://www.otempo.com.br/cidades/falta-abrigo-em-68-75-dos-pontos-de-onibus-da-capital-1.2643651>. Acesso em: 23 maio. 2023.

MONTEIRO, Thiago. **Balanco energético do processamento mecânico de toras de Eucalyptus**. Universidade Federal de Lavras, 2011.

MOREIRA, Luís Eustáquio. **Resistência mecânica dos bambus**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Ufmg Departamento de Engenharia de Estruturas, 2018. Disponível em: <http://apuama.org/wp-content/uploads/2018/06/RESISTENCIA-MECANICA-DOS-BAMBUS-COM-SUM%C3%81RIO.pdf>. Acesso em: 23 maio. 2023.

MURAD, José Roberto de. **As propriedades físicas, mecânicas e meso-estrutural do bambu Guadua weberbaueri do Acre**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2007.

NMBA. National Mission on Bamboo Applications. Technology, information, Forecasting and Assessment Council (TIFAC). Partes do bambu. Ilustração. Nova Deli: Government of India, 2004. 56 p.

NUNES, Gabrielly; JÚNIOR, Antônio da Silva Sobrinho; DOS SANTOS PASTOR, Jaiane. **O uso do bambu como material estrutural na construção civil**. Revista Principia-Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB, n. 55, p. 152-164, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/view/4366>. Acesso em: 20 de abril, 2023.

PADOVAN, Roberval Bráz. **O bambu na arquitetura**: desing de conexões estruturais. Dissertação (Mestrado em Design) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, campus de Bauru, Bauru, 2010. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/89702>. Acesso em: 23 maio. 2023.

ROSA, Mayra. **Maceió ganha pontos de ônibus de madeira sustentável**. Ciclovivo. 28 de abril. 2015. Disponível em: <https://ciclovivo.com.br/arq-urb/arquitetura/maceio-ganha-pontos-de-onibus-de-madeira-sustentavel/>. Acesso em: 20 de abril, 2023.

ROSALINO, Frederico. **Módulo 1: Espécies apropriadas para construção**. Bioestrutura engenharia, Brasília-DF. 2017.

Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil. 2023. Disponível em: <https://www.caixa.gov.br/poder-publico/modernizacao-gestao/sinapi/Paginas/default.aspx>. Acesso em: 23 maio. 2023.

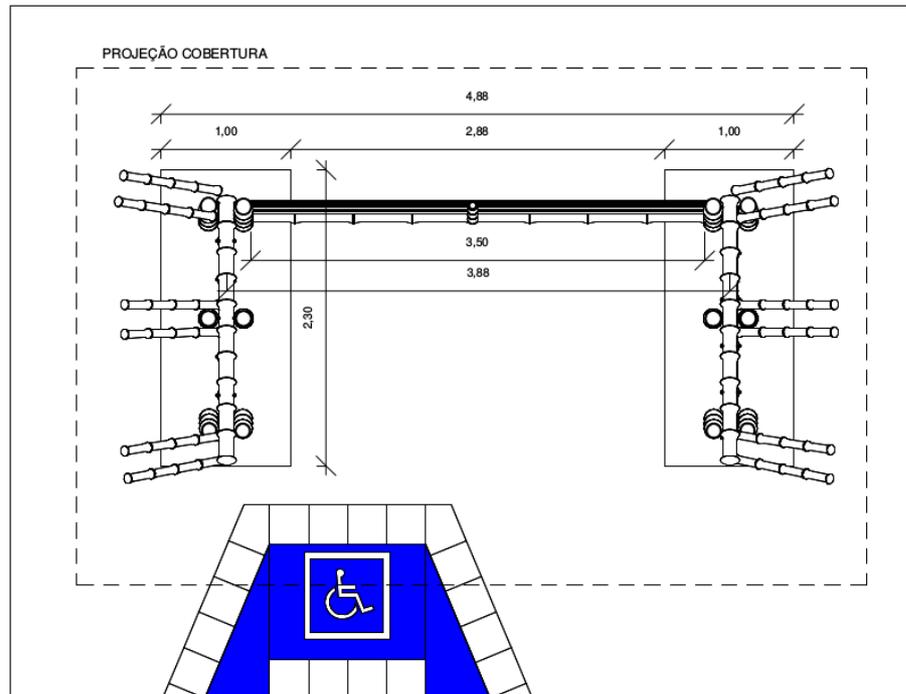
SOUSA, Priscila. **Madeira: O que é, características, conceito e definição**. Conceito.de. 20 de Julho. 2022. Disponível em: <https://conceito.de/madeira>. Acesso em: 20 de abril, 2023.

STACHERA JUNIOR, Theodozio. **Avaliação de emissões de CO₂ na construção civil**: um estudo de caso da habitação de interesse social no Paraná. Presented during XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção: A integração de cadeias produtivas com a abordagem da manufatura sustentável, 2008. Disponível em: https://www.academia.edu/download/30508131/enegep2008_tn_sto_090_554_12351.pdf. Acesso em: 23 maio. 2023.

Thermo-iso. Telhas termoacústicas de EPS. Disponível em: <https://www.thermo-iso.com.br/produtos/tr-25-1020-3/#product>. Acesso em: 23 maio. 2023.

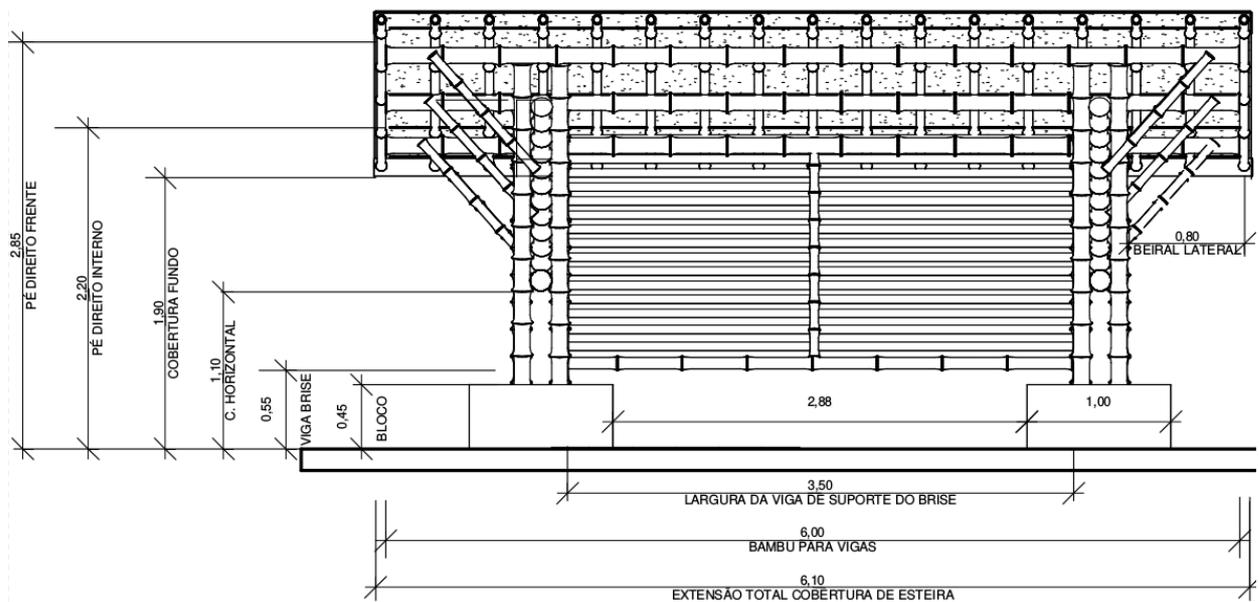
APÊNDICE A – PROJETO EM BAMBU ATUALIZADO

Figura 12 – Planta baixa



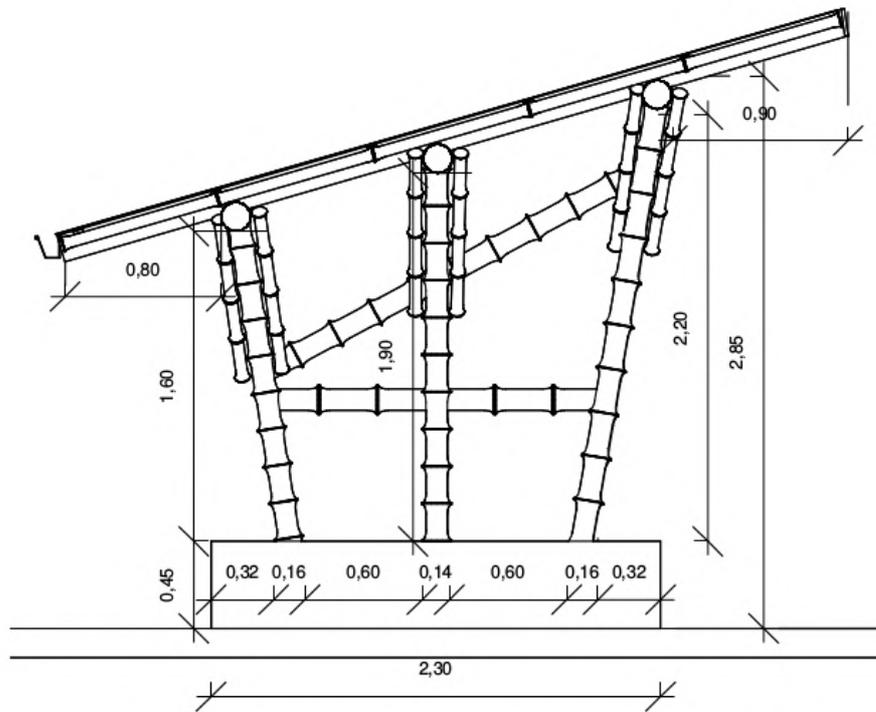
Fonte: Da autora a partir de projeto cedido pelo NEMATENC (2023).

Figura 13 – Vista frontal



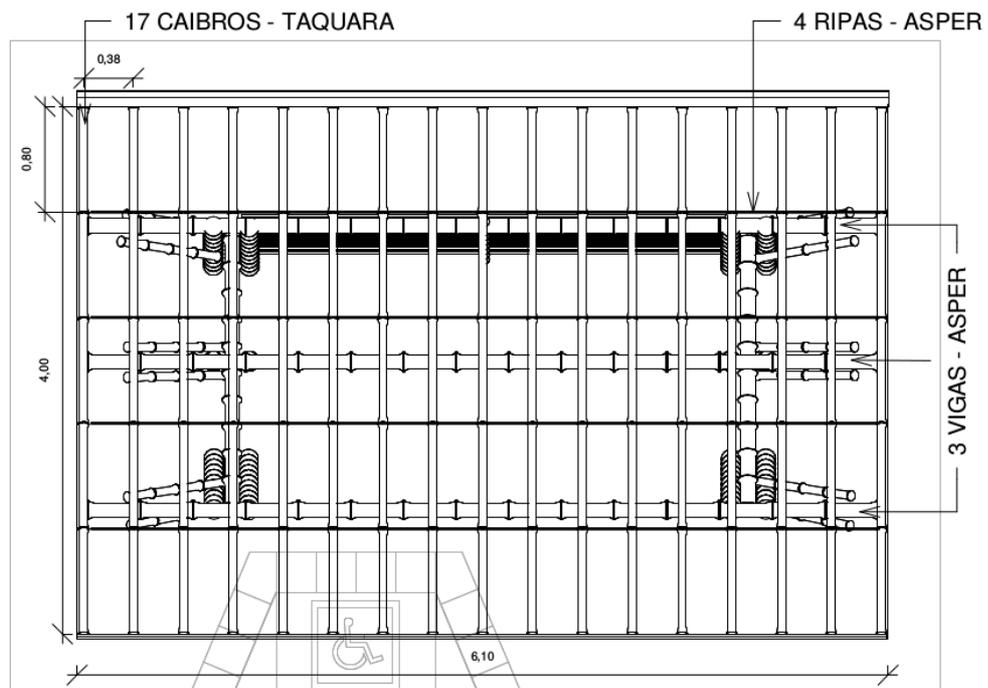
Fonte: Da autora a partir de projeto cedido pelo NEMATENC (2023).

Figura 14 – Vista lateral esquerda



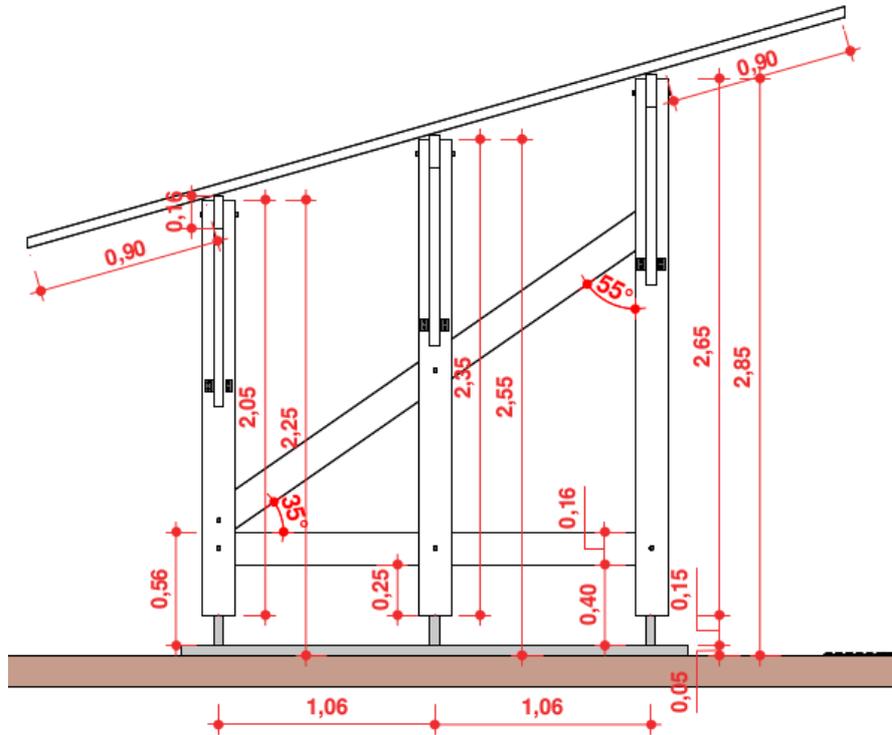
Fonte: Da autora a partir de projeto cedido pelo NEMATENC (2023).

Figura 15 – Tramo da cobertura



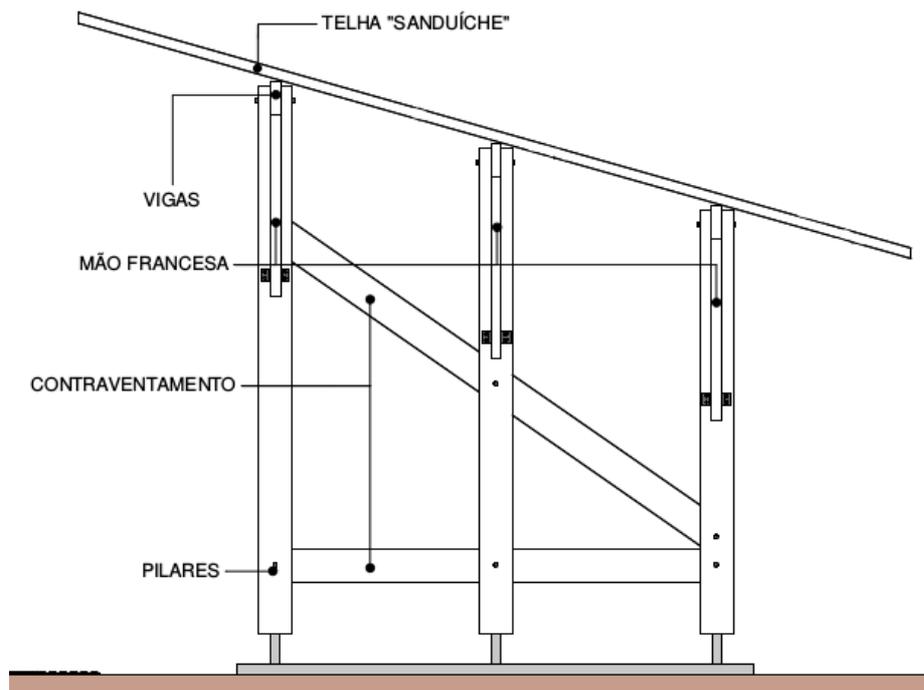
Fonte: Da autora a partir de projeto cedido pelo NEMATENC (2023).

Figura 18 – Dimensões (Lateral esquerda)



Fonte: Da autora (2023).

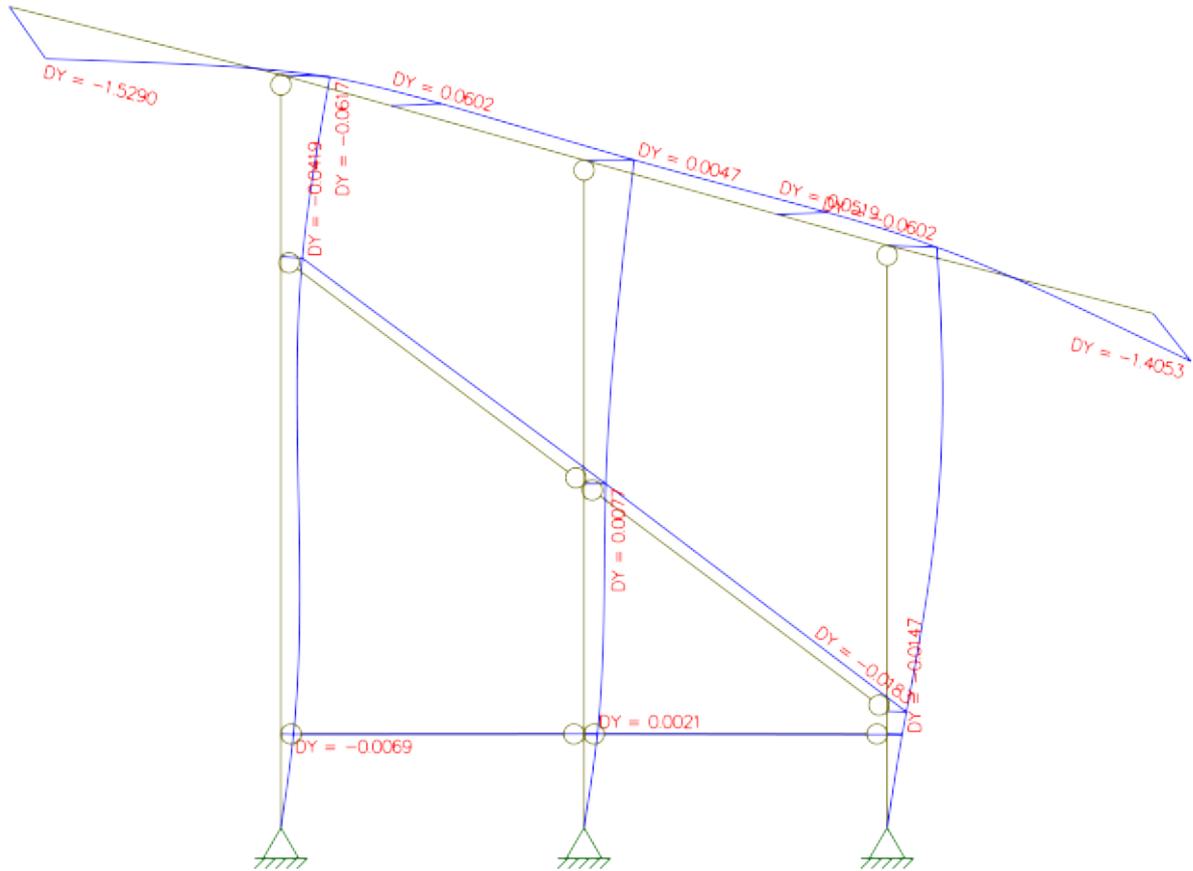
Figura 19 – Identificação das peças



Fonte: Da autora (2023).

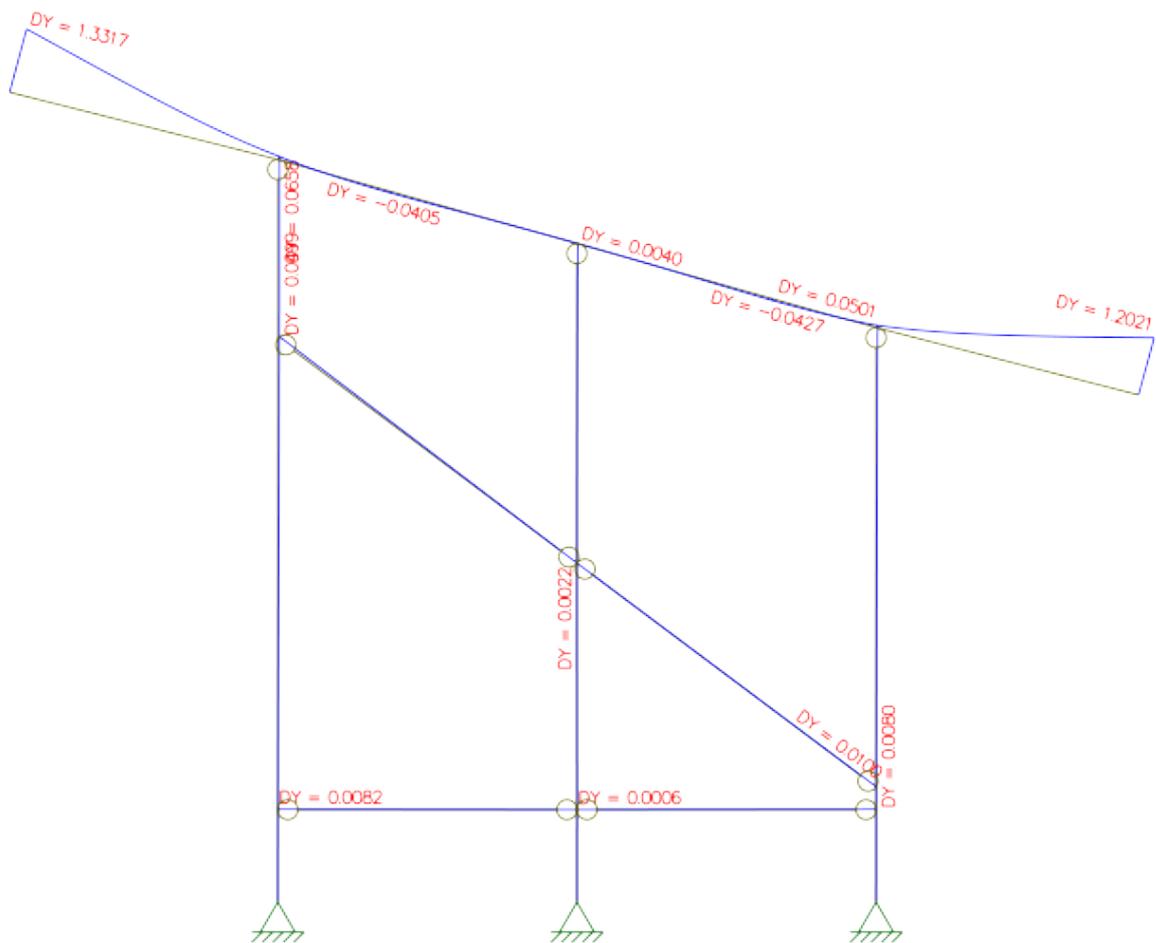
APÊNDICE C – DEFORMAÇÕES EM ESTRUTURA DE MADEIRA

Figura 20 – Deformações verticais em milímetros para cargas permanente, variável de manutenção e carga de vento de sucção a 90°



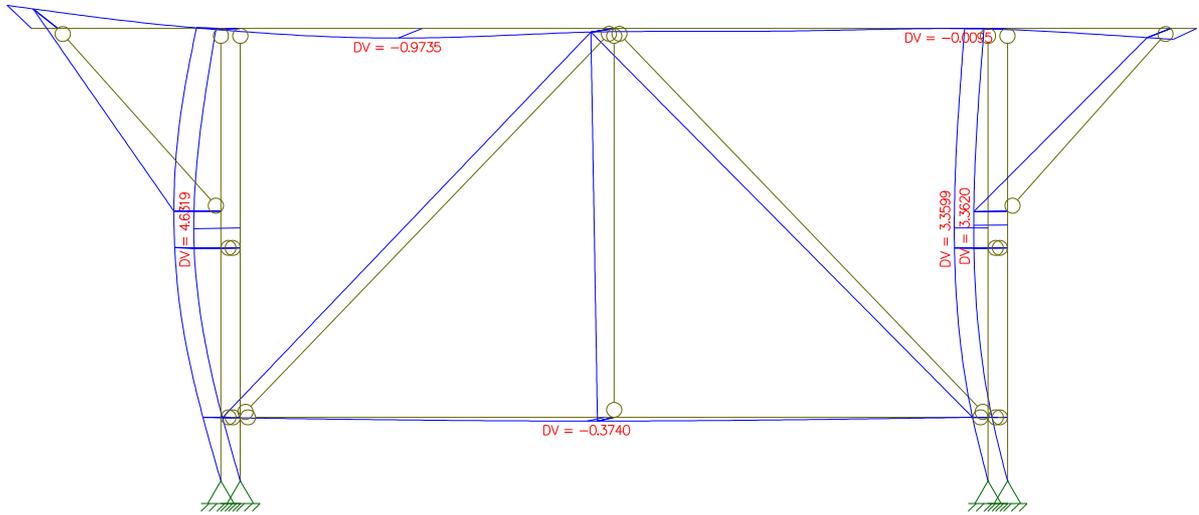
Fonte: Da autora (2023).

Figura 22 – Deformações verticais em milímetros para carga de vento de sucção sobre a cobertura



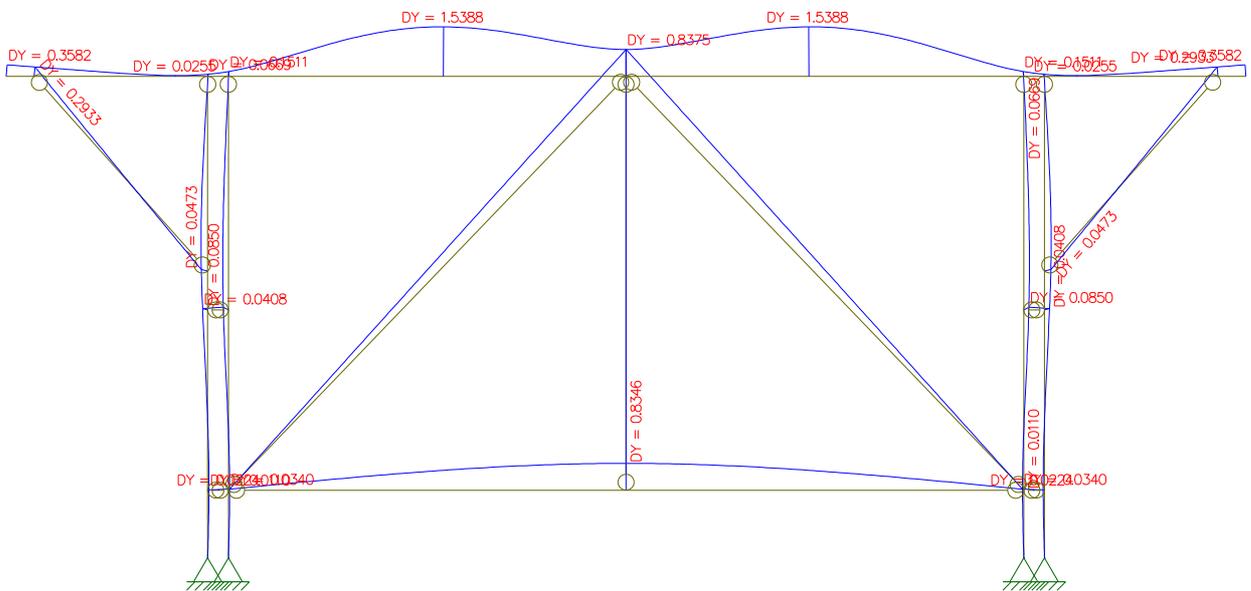
Fonte: Da autora (2023).

Figura 23 – Deformações transversais em milímetros para cargas permanente, variável de manutenção e vento de sucção a 0°



Fonte: Da autora (2023).

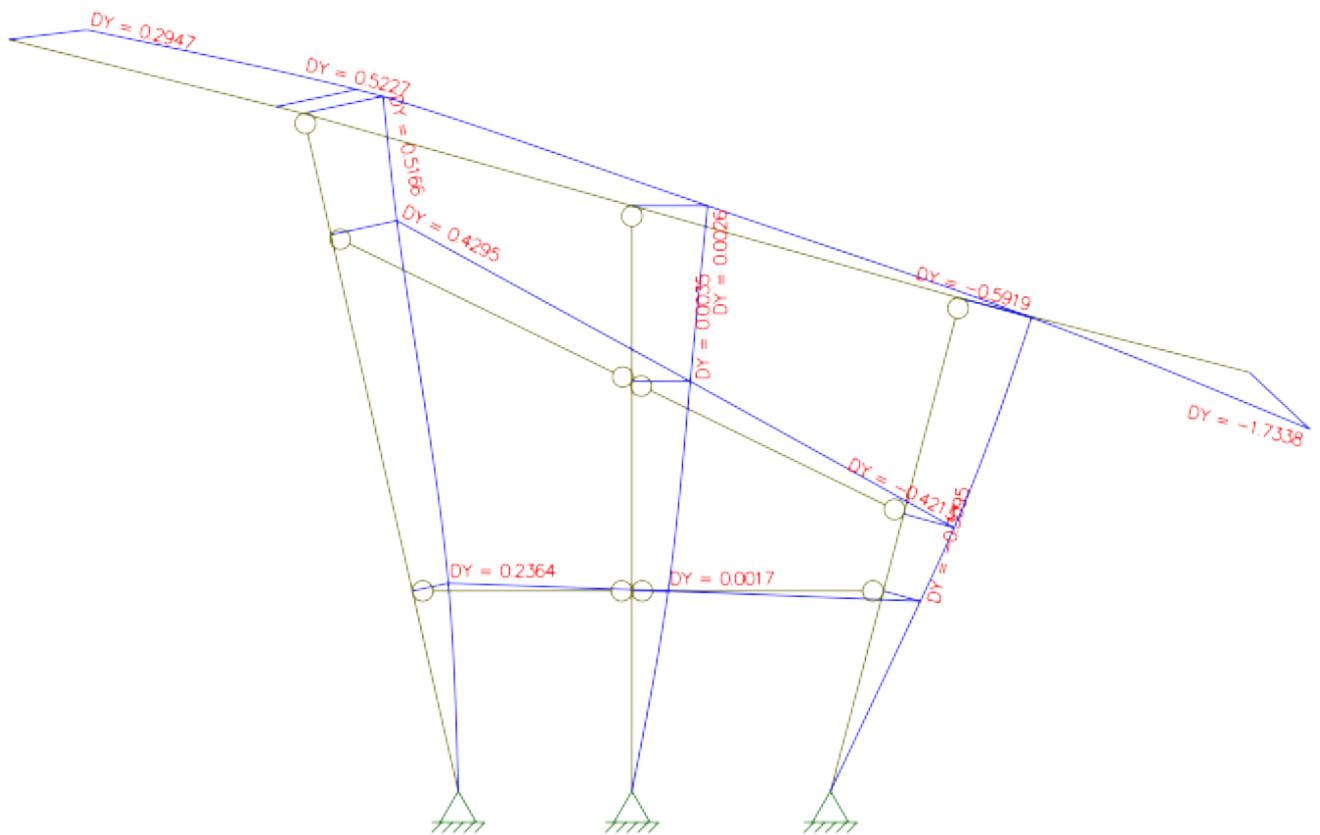
Figura 24 – Deformações verticais em milímetros para carga de vento de sucção sobre cobertura (vista frontal)



Fonte: Da autora (2023).

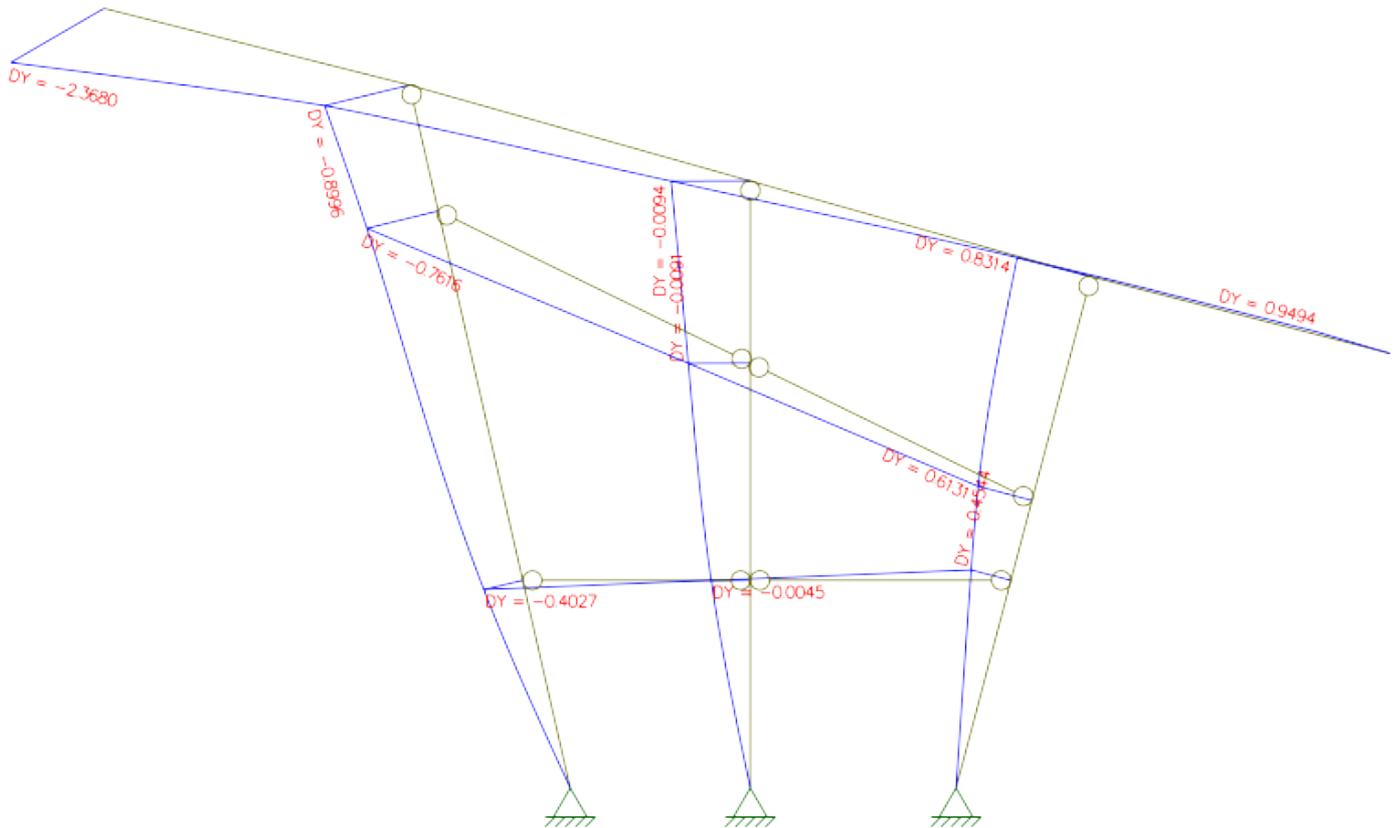
APÊNDICE D – DEFORMAÇÕES EM ESTRUTURA DE BAMBU

Figura 25 – Deformações verticais em milímetros para cargas permanente, variável de manutenção e carga de vento de sucção a 90°



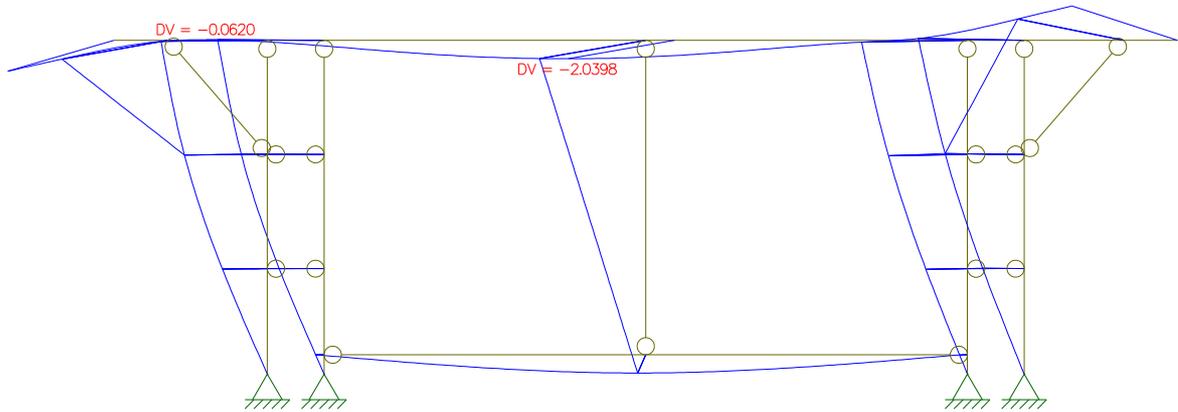
Fonte: Da autora (2023).

Figura 26– Deformações verticais em milímetros para cargas permanente, variável de manutenção e carga de vento de sucção a 270°



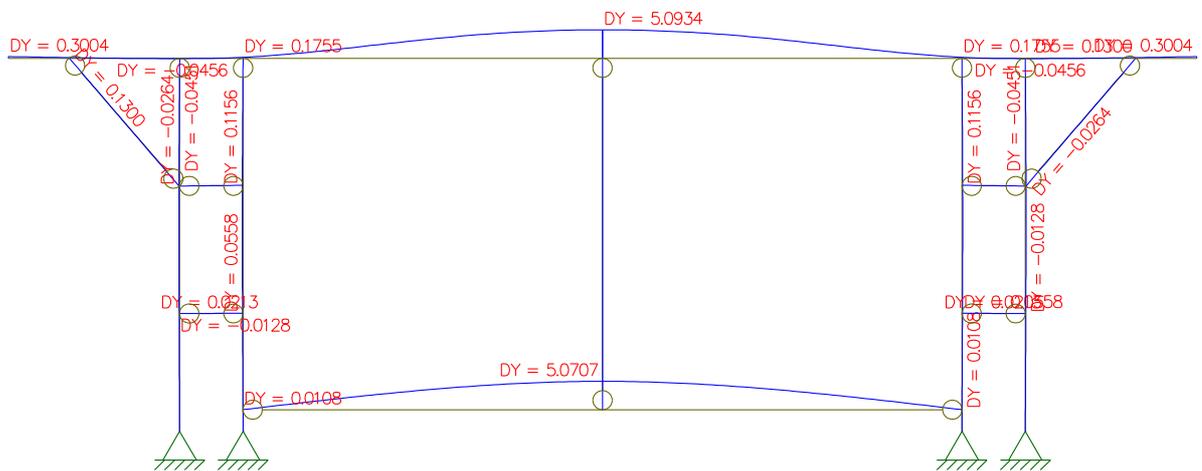
Fonte: Da autora (2023).

Figura 28 – Deformações transversais em milímetros para cargas permanente, variável de manutenção e vento de sucção a 0°



Fonte: Da autora (2023).

Figura 29 – Deformações verticais em milímetros para carga de vento de sucção sobre cobertura (vista frontal)



Fonte: Da autora (2023).