



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL

- DOUTORADO -

**DESEMPENHO ESTRUTURAL E TÉRMICO DE PAINÉIS
MODULARES INTERTRAVADOS DE MATRIZ CIMENTÍCIA
COM REFORÇO ESTRUTURAL DE *BAMBUSA VULGARIS***

Por

José Augusto Gomes Neto

João Pessoa – PB
2021

JOSÉ AUGUSTO GOMES NETO

**DESEMPENHO ESTRUTURAL E TÉRMICO DE PAINÉIS
MODULARES INTERTRAVADOS DE MATRIZ CIMENTÍCIA
COM REFORÇO ESTRUTURAL DE *BAMBUSA VULGARIS***

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Normando Perazzo
Barbosa

João Pessoa – PB
2021

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

G633d Gomes Neto, José Augusto.

Desempenho estrutural e térmico de painéis modulares intertravados de matriz cimentícia com reforço estrutural de Bambusa Vulgaris / José Augusto Gomes Neto. - João Pessoa, 2021.
120 f. : il.

Orientação: Normando Perazzo Barbosa.
Tese (Doutorado) - UFPB/CT.

1. Construção civil - Painéis de bambu. 2. Bambusa vulgaris - Ensaios de desempenho. 3. Construção sustentável. I. Barbosa, Normando Perazzo. II. Título.

UFPB/BC

CDU 69:633.584.5(043)

**DESEMPENHO ESTRUTURAL E TÉRMICO DE PAINÉIS MODULARES
INTERTRAVADOS DE MATRIZ CIMENTÍCIA COM REFORÇO ESTRUTURAL DE
BAMBUZA VULGARIS**

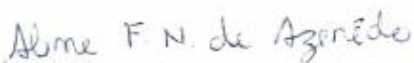
JOSÉ AUGUSTO GOMES NETO

Tese aprovada em 30 de setembro de 2021.

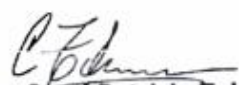
Período Letivo: 2021.2


Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa – UFPB
Orientador


Prof. Dr. Aluisio Braz de Melo – UFPB
Examinador interno


Profa. Dra. Aline Figueirêdo Nóbrega de Azerêdo – UFCG
Examinadora Interna


Prof. Dr. Khosrow Ghavami – PUC - Rio
Examinador Externo


Prof. Dr. Caori Patricia Takeuchi – UNAL
Examinadora Externa

**João Pessoa/PB
2021**

Dedico esse trabalho a meus pais, que sempre apoiaram meus estudos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado essa oportunidade e aos meus pais Bony e Irene por apoiarem minhas decisões.

Agradeço ao Professor Normando Perazzo por ter me orientado em todo esse processo de aprendizagem, sempre demonstrando paciência, sabedoria e humildade.

Agradeço aos técnicos do LABEME, Delby, Sebastião, Misso e Beto, pois sem a ajuda deles este trabalho seria muito mais difícil.

Agradeço aos meus amigos mestrando e doutorando, que me ajudaram direta ou indiretamente neste processo de desenvolvimento e aperfeiçoamento.

Agradeço ao professor Aluísio Braz por ajudar na concessão de alguns dos seus equipamentos para realização dos ensaios de desempenho.

Agradeço a professora Germana pelos conselhos e orientações para minha carreira pessoal e profissional.

Agradeço a Capes pela concessão da bolsa para o desenvolvimento deste doutorado.

Agradeço ao meu amor, Nayara, pela compreensão, companheirismo e amor de todo esse tempo de estudo.

Por fim, gostaria de agradecer a minha família Bony, Irene, João e Celiany, por terem me apoiado e me guiado no caminho do conhecimento para que este momento chegasse.

EPÍGRAFE

“Your future is created by what you do today not tomorrow”

Robert Kiyosaki

RESUMO

O processo de industrialização utilizado na produção de materiais de construção como o cimento e o aço, por exemplo, por serem grandes consumidores de energia e geradores de poluentes, afeta o meio ambiente e a vida das pessoas, tanto na zona rural como nos grandes centros urbanos. Como consequência desse processo, estudos sobre o uso da terra crua, do bambu e das fibras naturais, materiais disponíveis nas regiões tropicais da Terra, inclusive no Brasil tem ganhado destaque nos últimos anos. O bambu tem grande potencial a ser explorado na construção civil, contribuindo para a arquitetura sustentável. Entre suas vantagens está o fato de ser renovável, usar a energia solar para crescer, absorver CO₂ em vez de liberá-lo para a atmosfera e crescer mais rapidamente que a madeira.

Na região Nordeste do Brasil a espécie de bambu mais difundida é a *Bambusa vulgaris*, que por não ter colmos muito lineares não é muito usada na construção. Assim, um dos principais objetivos dessa pesquisa foi mostrar a potencialidade dessa espécie, com indicação de suas propriedades mecânicas, aplicando-a como reforço estrutural em painéis modulares pré-moldados de matriz cimentícia com adição de partículas de bambu. Como é muito frequente a fissuração nos colmos de bambu nas estruturas já em serviço, foi feito um estudo sobre a influência das fissuras na resistência à compressão. O painel desenvolvido apresenta grande capacidade de carga podendo ter uso estrutural na construção de habitações urbanas ou rurais. Ele tem 40 cm de largura por 240 cm de altura e 12 cm de espessura e consta de 4 colmos de bambu paralelos, imersos em uma matriz cimentícia com 45% de partículas de bambu triturado. Foram desenvolvidas formas metálicas com as laterais pensadas de maneira a permitir o encaixe longitudinal dos painéis entre si. Nesse estudo apresenta-se o processo de produção das partículas de bambu e o proporcionamento das misturas com o Cimento Portland. Foram moldados painéis em laboratório e realizados ensaios de desempenho estrutural e térmico. Foram realizados nos painéis os ensaios de impacto de corpo duro, impacto de corpo mole, carga suspensa, resistência à compressão e resistência à flexão. Também foi estudado o desempenho térmico em câmara de ensaio apropriada para isso. Os resultados indicam que o painel proposto apresentou comportamento adequado em todos os testes realizados, e mostram que é possível desenvolver projetos arquitetônicos com seu emprego, atendendo aos requisitos mínimos de desempenho da norma ABNT NBR 15575:2013.

Palavras-chave: Painéis de bambu. *Bambusa vulgaris*. Construção Sustentável. Ensaios de desempenho.

ABSTRACT

The industrialization process used in the production of construction materials such as cement and steel, for example, as they are large consumers of energy and generators of pollutants, affects the environment and people's lives, both in rural areas in large urban centres. As a result of this process, studies on the use of raw land, bamboo and natural fibers, materials available in the Earth's tropical regions, including Brazil, have gained prominence in recent years. Bamboo has great potential to be explored in civil construction, contributing to sustainable architecture. Among its advantages is the fact that it is renewable, uses solar energy to grow, absorbs CO₂ instead of releasing it into the atmosphere, and grows faster than wood.

In the northeast region of Brazil, the most widespread bamboo species is *Bambusa vulgaris*, which, as it does not have very linear culms, is not widely used in construction. Therefore, one of the main objectives of this research was to show the potential of this species, indicating its mechanical properties, applying it as structural reinforcement in precast modular cement matrix panels with the addition of bamboo particles. As cracking is very frequent in bamboo culms in structures already in service, a study was carried out on the influence of cracks on compressive strength. The developed panel has a large load capacity and can have structural use in the construction of urban or rural housing. It is 40 cm wide by 240 cm high and 12 cm thick and consists of 4 parallel bamboo culms, immersed in a cement matrix with 45% crushed bamboo particles. Metal formwork were developed with the sides designed in such a way as to allow the longitudinal fitting of the panels to each other. This study presents the production process of bamboo particles and the proportioning of mixtures with Portland Cement. Panels were molded in the laboratory and structural and thermal performance tests were carried out. Tests of hard body impact, soft body impact, suspended load, compressive strength and flexural strength were performed on the panels. The thermal performance in a test chamber suitable for this was also studied. The results indicate that the proposed panel presented adequate behavior in all the tests performed, and show that it is possible to develop architectural projects with its use, meeting the minimum performance requirements of the ABNT NBR 15575:2013 standard.

Keywords: Bamboo panels. *Bambusa vulgaris*. Sustainable construction. Performance tests.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Processo de expansão e retração do bambu dentro da matriz cimentícia	20
Figura 2: Fluxograma de classificação de tipos de painéis de bambu.....	22
Figura 3: Pannel pré-moldado em execução desenvolvido no Instituto do Bambu	23
Figura 4: Pannel modular desenvolvido no LABEME em 2006.....	24
Figura 5: Pannel para habitação de baixo custo	24
Figura 6: Pannel modular de bambu para vedação.....	25
Figura 7: Pannel modular de bambu para vedação.....	25
Figura 8: Gabarito e Montagem dos painéis de bambu	26
Figura 9: Fixação das varas de bambu.....	27
Figura 10: Pannel finalizado com esteiras de bambu	28
Figura 11: Pannel com bambus em sua forma natural	29
Figura 12: Pannel feito com peças trançadas de bambu.....	29
Figura 13: Gabarito para produção de pannel de bambu a ser preenchido com terra	30
Figura 14: Pannel de vedação feito com bambu e terra crua.....	30
Figura 15: Detalhes construtivos do pannel do tipo <i>bahareque</i>	31
Figura 16: Edificação construída com o sistema de painéis do tipo <i>bahareque</i>	31
Figura 17: Detalhes construtivos dos painéis preenchidos com barro.....	32
Figura 18: Preenchimento da parede de bambu.....	32
Figura 19: Pannel com varas estacadas verticalmente	33
Figura 20: Pannel feito de bambus estacados nas duas direções.....	33
Figura 21: Painéis de bambu formando detalhes vazados e variados.....	34
Figura 22: Exemplos de Painéis vazados	34
Figura 23: Estrutura do pannel artesanal tensionado.....	35
Figura 24: Zoneamento Bioclimático Brasileiro	37
Figura 25: Esquema para ensaio de desempenho térmico por medição in loco	38
Figura 26: Proposta de ensaio de desempenho térmico em escala reduzida para SVVIE	38
Figura 27: Câmara térmica desenvolvida na UFPB	39
Figura 28: Planta baixa dos protótipos com indicação	39
Figura 29: Ensaios de desempenho realizados no estudo da UFPB	40
Figura 30: Ensaio realizados conforme a ABNT NBR 15575:2013	40
Figura 31: Amostras do <i>P. pubescens</i> antes do ensaio	44
Figura 32: Amostras do <i>B. vulgaris</i> antes do ensaio	44

Figura 33: Exemplo de corpo de prova para ensaio de tração paralela às fibras.....	45
Figura 34: Exemplo de corpo de prova para ensaio de cisalhamento paralela às fibras	46
Figura 35: Painel Modular Proposto.....	47
Figura 36: Forma metálica desenvolvida para os painéis modulares	48
Figura 37: Detalhe da forma, mãos francesas.....	49
Figura 38: Detalhe do encaixe macho-fêmea da forma.....	49
Figura 39: Detalhe no encaixe entre painéis.....	50
Figura 40: Fluxograma de processos para produção das partículas de bambu.....	51
Figura 41: Bambu coletados nas touceiras da UFPB	55
Figura 42: Método utilizado para o rompimento dos diafragmas	56
Figura 43: Secagem dos colmos pós-tratamento	57
Figura 44: Forma do painel modular pronto para concretagem	58
Figura 45: Painel modular durante o processo de moldagem sobre a mesa vibratória	59
Figura 46: Ensaio de flexão nos painéis	59
Figura 47: Corte em perspectiva com detalhes do ensaio à flexão.....	60
Figura 48: Esquema de fixação dos painéis para de ensaio de desempenho estrutural.....	61
Figura 49: Esquema para ensaio de carga suspensa	62
Figura 50: Esquema para ensaio de impacto de corpo duro	63
Figura 51: Esquema para ensaio de impacto de corpo mole	64
Figura 52: Representação do ensaio de desempenho térmico em câmara térmica.....	65
Figura 53: Corte mostrando o detalhe do posicionamento dos painéis	65
Figura 54: Ensaio de desempenho térmico em câmara térmica – Face exposta.....	66
Figura 55: Ensaio de desempenho térmico em câmara térmica – Face oposta	66
Figura 56: Resistencia característica do <i>P. pubescens</i>	69
Figura 57: Resistencia característica do <i>B. vulgaris</i>	69
Figura 58: Montagem do Painel Reduzido 1	75
Figura 59: Painel 1 concretado, destaque para as fissuras que surgiram.....	75
Figura 60: Fissura longitudinal em detalhe	76
Figura 61: Esquema gráfico de esforços para aparecimento de fissura.....	76
Figura 62: Fissura longitudinal em detalhe	77
Figura 63: Esquema gráfico de esforços para aparecimento de fissura.....	77
Figura 64: Comparação de faces do painel modular em escala reduzida 1	78
Figura 65: Bambus com impermeabilizante aplicado	78

Figura 66: Detalhe da fissuração no Painei 2	79
Figura 67: Detalhe na fissuração do Painei 2	79
Figura 68: Faces superior e inferior do Painei 2.....	80
Figura 69: Ensaio de flexão no painei modular	81
Figura 70: Ensaio de flexão no painei modular	81
Figura 71: Gráfico carga x deslocamento do ensaio de flexão do painei modular.....	82
Figura 72: Painei fissurado após o ensaio de flexão.....	82
Figura 73: Painei com duas cargas concentradas	83
Figura 74: Painei com carga distribuída	84
Figura 75: Dispositivo de ensaio fixado aos painéis	85
Figura 76: Tipo de bucha utilizada para fixação do dispositivo no painei	86
Figura 77: Dispositivo de carga suspensa carregado.....	86
Figura 78: Detalhe da fixação do dispositivo após 24h sob carregamento total	87
Figura 79: Dispositivos utilizados para medir o deslocamento do painei	87
Figura 80: Suporte de aplicação da carga suspensa no de protótipo EVA	88
Figura 81: Execução do ensaio de peça suspensa do protótipo com blocos solo-cimento.....	89
Figura 82: Marcação dos impactos de corpo duro no Módulo 1	90
Figura 83: Marcação dos impactos de corpo duro no Módulo 2	91
Figura 84: Detalhe dos danos causados à parede após ensaio de impacto de corpo duro	91
Figura 85: Fissuras apresentadas no Módulo 1	93
Figura 86: Fissuras apresentadas no Módulo 2	94
Figura 87: Fissuração da amarração dos blocos após ensaio de impacto de corpo mole	95
Figura 88: Fissuração da amarração dos blocos de EVA após ensaio de corpo mole.....	95
Figura 89: Imagem da ruptura final do Módulo 1	96
Figura 90: Imagem da ruptura final do Módulo 2	96
Figura 91: Gráfico Carga x Deslocamento do Módulo 1	97
Figura 92: Gráfico Carga x Deslocamento do Módulo 2	97
Figura 93: Gráfico de evolução das temperaturas no ensaio de desempenho térmico	101
Figura 94: Localização da área de construção do protótipo	118
Figura 95: Projeto do protótipo para ensaios de desempenho em perspectiva.....	118
Figura 96: Tipos de painéis para construção das paredes do protótipo	120
Figura 97: Planta baixa e cortes do protótipo proposto para ensaios de desempenho.....	120
Figura 98: Forma para painei de canto	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Ensaio experimentais: Desempenho Estrutural, ABNT NBR 15575-4 (2013)	36
Tabela 2: Ensaio Experimentais: Desempenho Térmico, ABNT NBR 15575 (2013)	37
Tabela 3: Sistemas construtivos estudados por Lorenzi (2013)	40
Tabela 4: Distribuição das amostras para o estudo de fissuração dos bambus	43
Tabela 5: Estudo para aprimoramento do traço utilizado.....	52
Tabela 6: Ensaio de caracterização dos agregados	53
Tabela 7: Traços em volume	54
Tabela 8: Consumo de materiais dos traços em kg/m ³	54
Tabela 9: Critérios e níveis para ensaio – Carga suspensa.....	61
Tabela 10: Níveis e quantidades de impacto para o ensaio de corpo duro.....	62
Tabela 11: Critérios e níveis para elementos estruturais – Impacto de corpo mole	63
Tabela 12: Tabela resumo do ensaio de compressão paralelas às fibras para o <i>P. pubescens</i> .	68
Tabela 13: Tabela resumo do ensaio de compressão paralelas às fibras para o <i>B. vulgaris</i>	68
Tabela 14: Resistências médias e característica à tração paralela às fibras.....	70
Tabela 15: Resistência média e característica ao cisalhamento paralelo às fibras	70
Tabela 16: Comparativo de resultados do ensaio de tração paralela às fibras para diferentes espécies de bambu	71
Tabela 17: Comparativo de Resistências ao Cisalhamento Paralelo às Fibras.....	72
Tabela 18: Ensaio de caracterização dos agregados	72
Tabela 19: Resultados dos traços adotados	73
Tabela 20: Densidade Aparente e Resistência à compressão dos traços testados	73
Tabela 21: Leitura do relógio comparadores no ensaio de carga suspensa	88
Tabela 22: Resultados dos impactos de corpo duro para o Módulo 1	89
Tabela 23: Resultados dos impactos de corpo duro para o Módulo 2	90
Tabela 24: Resultados de deformação do Módulo 1	92
Tabela 25: Resultados de deformação do Módulo 2	92
Tabela 26: Resistencias a compressão de paredes de diferentes sistemas construtivos	98
Tabela 27: Resultado das propriedades térmicas do painel.....	100
Tabela 28: Comparativo de parâmetros térmicos para diferentes tipos de paredes.....	101
Tabela 29: Resumo dos dados coletados no ensaio de desempenho térmico.....	102
Tabela 30: Comparativo de desempenho térmico para diferentes sistemas construtivos.....	103
Tabela 31: Características do protótipo com painéis modulares	119

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	vi
EPÍGRAFE	vii
RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABELAS.....	xiii
SUMÁRIO	xiv
CAPÍTULO 1.....	17
1. INTRODUÇÃO.....	17
1.1 Objetivo Geral.....	19
1.2 Objetivos Específicos.....	19
CAPÍTULO 2.....	20
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1 O Bambu em Sistemas Construtivos de Painéis	21
2.1.1 Painéis Pré-fabricados Estruturais	22
2.1.2 Painéis Pré-fabricados de Vedação.....	25
2.1.3 Painéis Pré-fabricados com Colmos Inteiros.....	26
2.1.4 Painéis Pré-fabricados com <i>Esterillas</i> de bambu	27
2.1.5 Painéis Artesanais.....	28
2.1.6 Painéis Artesanais com Colmo Inteiro	29
2.1.7 Painéis Artesanais com Colmos Inteiros e Esteiras.....	30
2.1.8 Painéis Artesanais com Colmo Inteiro e Ripas	31
2.1.9 Painéis Artesanais com Colmo Inteiro para Cercados.....	32
2.1.10 Painéis Artesanais com Colmos Inteiros Vazados	33
2.1.11 Painéis Artesanais com Colmo Inteiro Tensionados	34
2.2 Desempenho Estrutural	35
2.3 Desempenho Térmico	36
2.4 Estudos de desempenho estrutural em protótipos	39
2.4.1 Estudo com Blocos de EVA e Terra Crua.....	39

2.4.2	Estudo desenvolvido por Nogueira <i>et al.</i> (2018).....	40
2.4.3	Estudo desenvolvido UFRS por Lorenzi (2013)	40
CAPÍTULO 3.....		42
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	42
3.1	Influência da presença de fissura na resistência característica à compressão do bambu	42
3.2	Resistências características do <i>Bambusa vulgaris</i>	45
3.3	Painéis Modulares	46
3.4	Confecção da fôrma metálica.....	47
3.5	Produção das partículas de bambu	50
3.6	Traços	52
3.6.1	Desenvolvimento inicial dos traços	52
3.6.2	Desenvolvimento dos traços com partículas de bambu.....	53
3.7	Preparação dos colmos de bambu	54
3.8	Moldagem dos painéis.....	57
3.9	Ensaio de resistência à flexão do painel.....	59
3.10	Ensaaios de desempenho estrutural.....	60
3.10.1	Ensaio de carga suspensa.....	61
3.10.2	Ensaio de impacto de corpo duro	62
3.10.3	Ensaio de impacto de corpo mole.....	63
3.10.4	Ensaio de compressão.....	64
3.11	Ensaaios de desempenho térmico	64
CAPÍTULO 4.....		67
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	67
4.1	Resistência à compressão do bambu fissurado	67
4.2	Resistências Características do <i>Bambusa vulgaris</i>	70
4.3	Agregados.....	72
4.4	Traços	73
4.4.1	Resultados dos traços iniciais	73
4.4.2	Resultados dos traços com partículas de bambu	73
4.5	Painéis modulares em escala reduzida	74

4.6	Ensaio de resistência à flexão do painel.....	80
4.6.1	Avaliação da carga de serviço	83
4.7	Ensaio de desempenho estrutural	85
4.7.1	Ensaio de carga suspensa.....	85
4.7.2	Ensaio de impacto de corpo duro	89
4.7.3	Ensaio de impacto de corpo mole.....	92
4.7.4	Ensaio de resistência à compressão	95
4.8	Ensaio de desempenho térmico	99
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	104
5.1	Sugestão para trabalhos futuros.....	106
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107
	APÊNDICE A - Memória de cálculo do ensaio de desempenho térmico	115
	APÊNDICE B – Projeto de protótipo	118

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

Com a Revolução Industrial iniciada no século XVIII foram surgindo os materiais de construção “modernos”, como aço, cimento Portland, alumínio, e tantos outros que hoje são considerados como convencionais. A produção em larga escala e maior facilidade de seu uso fez com que se difundissem rapidamente nos quatro cantos da Terra. Como consequência desse processo, houve o esquecimento de técnicas construtivas e de materiais antes utilizados nas construções, como terra crua, do bambu e das fibras naturais, materiais disponíveis nas regiões tropicais, inclusive no Brasil (BARBOSA, 2005).

Porém, hoje é consenso que os problemas ambientais que emergem das atividades de construção devem ser reduzidos. Vários materiais de construção são produzidos em altas temperaturas, tais como: aço (1700°C), Cimento Portland (1450°C) e blocos de cerâmica (900-1000°C) (MEHTA & MONTEIRO, 2014), e geram grandes quantidades de poluentes e desperdício. O uso de materiais renováveis é essencial para diminuir a taxa de exploração dos recursos minerais. O bambu tem aplicações potenciais na construção civil, podendo contribuir para a arquitetura sustentável. Entre suas vantagens está o fato de ser renovável, usar a energia solar para crescer, absorver CO₂ em vez de liberá-lo para a atmosfera e crescer mais rápido que a madeira.

Suas propriedades físico-mecânicas são adequadas para aplicações em engenharia e, ao final de seu ciclo de vida, o bambu pode ser reintegrado ao meio ambiente. A sustentabilidade do bambu foi enfatizada por Escamilla et al. (2016) e Escamilla et al. (2018). Foi demonstrado que a construção baseada em bambu tem baixo impacto ambiental em termos de emissões de CO₂. As aplicações do bambu como material de construção estão aumentando, conforme visto no trabalho de Ghavami & García (2017).

Nos trópicos, existem aproximadamente 75 gêneros e mais de 1250 espécies de bambu, variando de pequenas gramíneas (medindo alguns centímetros) a espécies gigantes com mais de 40 m de altura e 30 cm de diâmetro (LIESE & KOHL, 2015). Na realidade não se sabe o número exato de espécies, havendo autores que chegam a citar a existência de até 1600 delas.

De acordo com Ghavami (2005), o bambu possui rápido crescimento e adquire resistência mecânica máxima após poucos anos. O autor acrescentou que, diferentemente do que se acredita, o bambu não é uma árvore e sim uma grama gigante da família *Bambusoideae*. Seu colmo de forma cilíndrica é formado por fibras longitudinais paralelas embebidas numa matriz de lignina, e na direção paralela às fibras o bambu apresenta maior resistência mecânica.

Os gêneros *Bambusa* e *Dendrocalamus* possuem um valor econômico mais elevado para os usos estruturais nas regiões Sul e Sudeste da Ásia por causa da sua fácil disponibilidade local (WILLIAMS e RAO, 1994).

Um dos grandes potenciais do emprego do bambu é como material de construção, podendo ser empregado tanto em edificações urbanas como em construções rurais. (PEREIRA & BERALDO, 2016) Para tanto é preciso conhecer suas propriedades. Diversas espécies são adequadas para emprego na engenharia, porém nem sempre se dispõe de todas elas em todos os locais. No caso do Estado da Paraíba, por exemplo, só se consegue com mais facilidade colmos da espécie *Bambusa vulgaris*. Ghavami e Marinho (2001) embora tenham caracterizado várias espécies de bambus, não estudaram essa espécie. Peña (2010) realizou uma série de ensaios de caracterização da espécie *Guadua angustifolia* Kunth, com o fim de dar suporte à norma colombiana que trata do projeto de estruturas de *Guadua* (ICONTEC, 2010). Como no Brasil também se estava elaborando normas semelhantes, a caracterização do *B. vulgaris* foi feita por Gomes Neto (2017) em seu trabalho de mestrado.

Na dissertação desse autor foi desenvolvido um painel estrutural pré-moldado com colmos de bambu, que apresentaram comportamento promissor. Para uma aplicação e inserção no mercado de um sistema construtivo como esse, é necessário a realização de testes que comprovem a eficiência do mesmo. Dessa forma, nesse estudo foi feito a construção de um módulo de parede com a utilização de um painel de matriz cimentícia com reforço estrutural de bambu tomando como base o painel já desenvolvido pelo autor em sua dissertação para realização dos ensaios de desempenho estrutural e térmico, descritos e normatizados pela ABNT NBR 15575:2013.

A utilização do bambu como material de construção traz um ar de ineditismo para pesquisa, uma vez que, essa matéria prima natural só nos últimos anos que vem ganhando espaço e se destacando no mercado nacional. O uso do bambu justifica-se pela grande presença nas regiões de clima tropical, fácil cultivo e facilidade de manuseio, além de ser renovável e

absorvedor de CO₂. O sistema desenvolvido, além de ter excelentes características mecânicas, pode ser economicamente viável e ecoeficiente.

Esse trabalho contribuiu para desenvolvimento da pesquisa do bambu no Brasil, apresentando mais um sistema construtivo viável. Um dos resultados mais significativos e relevantes desse trabalho foi mostrar que é possível utilizar o bambu dentro de uma matriz cimentícia sem que ocorra grandes fissurações, o que vinha sendo testado a alguns anos sem sucesso.

1.1 Objetivo Geral

Avaliar a conformidade com a ABNT NBR 15575:2013 de um módulo de parede de painéis modulares de colmos de *Bambusa vulgaris* em matriz cimentícia.

1.2 Objetivos Específicos

- Verificar o efeito da presença de fissura na resistência à compressão de corpos de prova extraídos de colmos de bambu;
- Desenvolver sistema de fôrmas e método de produção de painéis pré-moldados otimizado;
- Desenvolver um método de montagem otimizado do módulo;
- Avaliar o desempenho estrutural do painel;
- Avaliar o comportamento térmico do painel;

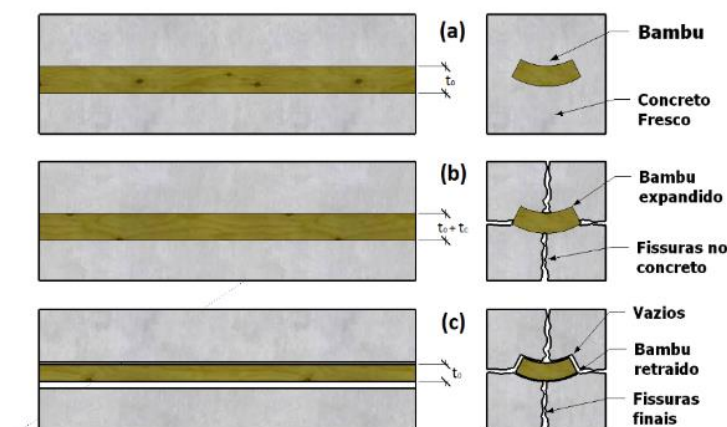
CAPÍTULO 2

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os materiais vegetais têm em comum a propriedade de apresentar variações dimensionais quando absorvem água, o que se dá com facilidade, tendo em vista sua origem biológica. Trata-se de um dos inconvenientes do uso das fibras vegetais em matrizes cimentícias, pois a interação entre a matriz e a fibra é prejudicada por esse fenômeno.

Subrahmanyam (1984) mostrou que o bambu pode absorver até 100% do seu peso seco quando imerso em água; já Mehra (1951) *apud* Moroz (2014) relatou que seria possível chegar a valores extremos de 300% de absorção. Por esse motivo Moroz (2014) ressaltou que ao utilizar o bambu sem tratamento em concreto fresco, o mesmo absorverá parte da água presente na mistura e iniciará o processo de inchamento, uma vez que o concreto em seu estado fresco dispõe de água livre e não possui resistência mecânica suficiente para suportar o aumento de volume, aparecendo então as fissuras. Após o período de cura o bambu ajustará seu teor de umidade ao ambiente o que fará com que o mesmo volte a reduzir de volume deixando vazios dentro do concreto, perdendo o contato com a matriz cimentícia. Tal processo pode ser visualizado na Figura 1.

Figura 1: Processo de expansão e retração do bambu dentro da matriz cimentícia



Fonte: Adaptado de Ghavami (2005)

Como forma de solução poder-se-ia utilizar os colmos já no seu estado saturado, para que os mesmos não absorvessem água presente na matriz cimentícia; entretanto, após o período de cura do concreto o bambu irá retraindo-se e perder a aderência com a matriz (MOROZ, 2014). Para utilização do bambu dentro da matriz cimentícia pesquisadores defendem que o bambu

deve ser tratado com materiais impermeabilizantes. Diferentes materiais já foram testados desde os materiais betuminosos até ceras naturais e sintéticas.

2.1 O Bambu em Sistemas Construtivos de Painéis

Os painéis de vedação podem ser um dos principais elementos construtivos em uma edificação. Os mesmos podem ser executados de diversas maneiras, com o emprego de tecnologias que variam de região para região, levando-se em consideração o clima, a necessidade de vedação total ou parcial da edificação ou dos ambientes, a cultura construtiva, dentre outros fatores que condicionam a escolha do tipo de painel.

Segundo Teixeira (2013), devido à grande preocupação que se tem hoje com as questões ligadas ao desequilíbrio ambiental, é cada vez maior a busca por materiais de baixos impacto ambiental e energético, capazes de reduzir o uso de materiais industrializados, os quais utilizam tecnologias que agredem o meio ambiente.

Para Ganapathy et al. (2002), o primeiro painel de bambu foi produzido na China, em 1940. Desde então, dezenas de tipos de painéis foram desenvolvidos. Todavia, do total de painéis produzidos, apenas alguns como o *Bamboo Mat Board* e o *Bamboo Strip Board* são provenientes de detalhadas investigações e produzidos em escala industrial. Entre os países produtores destacam-se a China, Índia, Tailândia, Vietnã, Costa Rica e Malásia.

Deve ser ressaltado que a grande vantagem da produção de painéis de bambu é o baixo conhecimento técnico necessário para produção dos mesmos, sendo possível a produção por comunidades dispondo apenas de conhecimentos básicos. Pode-se citar o exemplo da Colômbia onde se produzem painéis em pequenas comunidades sem a intervenção da indústria na produção dos mesmos.

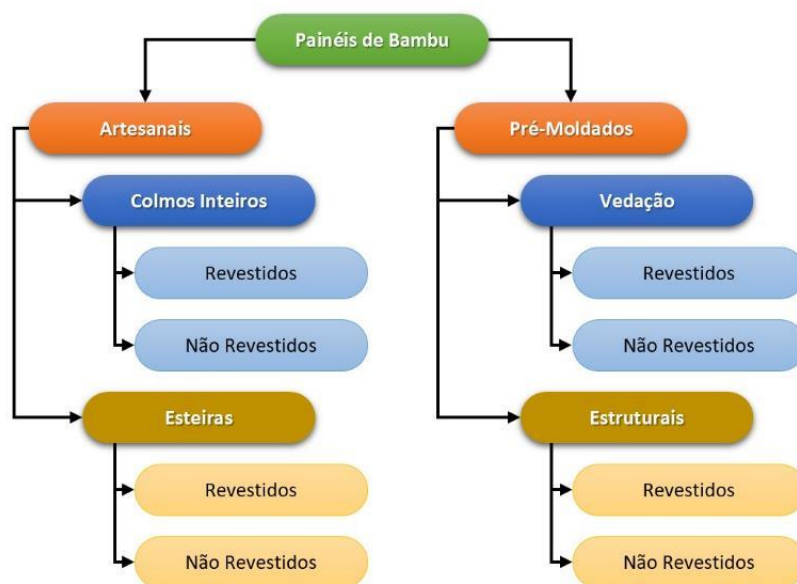
Os painéis de bambu geralmente são caracterizados em duas categorias diferentes: os artesanais e os pré-fabricados. Dentre os pré-fabricados destacam-se os painéis de vedação e os painéis de bambu estruturais ou autoportantes. Esses pré-fabricados surgem como uma importante opção frente às exigências de qualidade e produtividade no mercado. Atualmente, é buscada cada vez mais a racionalização das obras civis, na tentativa de evitar desperdícios, perda de tempo e aumento da produtividade.

Diferentes tecnologias podem ser empregadas na produção de fechamentos verticais com painéis de bambu. Desde esteiras entrelaçadas até módulos pré-fabricados com o uso de madeira e de bambu, os quais podem ser revestidos ou não, e cuja ligação pode ser feita com o

uso de fibras naturais ou sintéticas, adicionando mais um detalhe à estrutura (TEIXEIRA, 2013).

Para melhor ilustrar a classificação dos painéis de bambu foi confeccionado um fluxograma que descreve as categorias mais estudadas e desenvolvidas, conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2: Fluxograma de classificação de tipos de painéis de bambu



Fonte: Elaborado pelo autor

Destaca-se ainda que dentre os painéis revestidos podem existir inúmeras variações e combinações de revestimentos tais como: terra, gesso, cimento Portland, etc, os quais, podem ser combinados com fibras naturais ou fibras artificiais. Também podem ser empregados outros materiais como EVA, EPS, argilas expandidas, entre outros, que podem entrar na mistura como agregados leves. Já os que não possuem revestimentos podem ser diferenciados com diferentes tipos de ligações e uniões efetuadas entre os colmos.

2.1.1 Painéis Pré-fabricados Estruturais

Um dos modelos de painéis modulares pré-fabricados foi desenvolvido pelo Instituto do Bambu, localizado na Universidade Federal de Alagoas, em Maceió. Segundo os pesquisadores Cardoso Jr. & Sartori (2004), o sistema construtivo foi desenvolvido a partir de painéis básicos modulares de bambu com as dimensões de 100 cm de altura, 50 cm de largura e 9,5 cm de espessura. O painel era formado por colmos de bambu alinhados paralelamente e protegidos por uma mistura de matriz cimentícia que continha reforço de raspas de borracha de pneu, assim

como bambu triturado. Na Figura 3, pode-se observar um painel em execução e a elaboração de uma parede com esses painéis.

Figura 3: Painel pré-moldado em execução desenvolvido no Instituto do Bambu



Fonte: Elaborado pelo autor

Nesse sistema do Instituto do Bambu, os painéis foram projetados com encaixe do tipo macho/fêmea. Pilares e vigas eram compostos por um colmo envolvido pelo compósito cimentício.

Os painéis anteriormente apresentados não atingiam a altura total da parede, apresentando descontinuidade, o que reduzia sua capacidade portante. Sobrinho Junior (2006) buscou aprimorar na Universidade Federal da Paraíba o sistema construtivo do Instituto do Bambu, utilizando um painel único. Para tal, o estudo propôs a construção de painéis com a altura da parede, porém alterando suas dimensões e removendo as peças em forma de coluna.

No estudo desenvolvido por Sobrinho Junior (2006), com a espécie *B. vulgaris*, os painéis foram confeccionados com as dimensões de 220 cm de altura, 40 cm de largura e 10 cm de espessura. Dessa forma, os painéis foram construídos utilizando quatro colmos de bambu para altura global da parede, evitando-se que houvesse um painel sobreposto a outro, o que evita a redução na resistência mecânica da parede como um todo. O concreto de preenchimento utilizado nesse estudo foi muito semelhante ao que foi utilizado no estudo prévio desenvolvido no Instituto do Bambu. Os painéis foram ensaiados à compressão (Figura 4) e apresentaram grande capacidade de carga.

Figura 4: Painel modular desenvolvido no LABEME em 2006



Fonte: Sobrinho Junior (2006)

Sobrinho Junior (2006), utilizou o processo de secagem e tratamento imunizante com óleo diesel como forma de garantir a resistência mecânica e evitar o ataque de predadores aos colmos dos bambus. Nessa estrutura considera-se que a maior parte da resistência mecânica tem origem no bambu, sendo a argamassa utilizada no painel apenas como vedação e proteção dos colmos. Entretanto, durante a pesquisa surgiram dificuldades com relação à fissuração do painel devido à expansão do bambu dentro da argamassa.

Essa foi uma das razões para que alguns pesquisadores optassem por utilizar o bambu em painéis sem o revestimento de matrizes cimentícias. Nikam (2013) desenvolveu um painel pré-moldado estrutural onde o bambu é o elemento principal para construção de moradias de baixo custo (Figura 5).

Figura 5: Painel para habitação de baixo custo



Fonte: Nikan & Attar (2013)

2.1.2 Painéis Pré-fabricados de Vedação

Para Teixeira (2006), é comum a utilização de painéis de vedação com bambus aparentes, compondo formas geométricas e desenhos variados nas fachadas das edificações. Porém, devido à sua maior exposição às intempéries, tais painéis apresentam limitada vida útil. As dimensões dos painéis foram 100 cm de largura x 100 cm de altura x 6 cm de espessura.

Em seu trabalho, Teixeira (2013) desenvolveu painéis de vedação com a estrutura de bambu e o fechamento com argamassa. As Figura 6 e Figura 7 mostram detalhes do painel desenvolvido.

Figura 6: Painel modular de bambu para vedação



Fonte: Teixeira (2013)

Figura 7: Painel modular de bambu para vedação



Fonte: Teixeira (2013)

Para esse painel a autora, utilizou duas espécies de bambu, sendo, o *Bambusa tuldooides* Munro como preenchimento e o *Phyllostachys bambusoides* como moldura do painel. O painel

passou por um tratamento de mineralização que, de acordo com Alves (1976), “consiste na preparação de uma solução de silicato de sódio, que ao ser aplicada em fibras vegetais, ajuda a eliminar o efeito da absorção de água destes materiais”. Segundo a autora, esse processo se mostrou eficiente. O painel foi chapiscado com uma mistura feita de cimento e areia, adicionada de adesivo de base acrílica. Já para a argamassa de revestimento foi utilizado uma argamassa mista de cimento e cal.

2.1.3 Painéis Pré-fabricados com Colmos Inteiros

Em Límon, Costa Rica, foi implantada uma fábrica de painéis para viabilizar a construção de 10 casas por semana. A fábrica que possui 400 m² de área coberta foi criada em 1981, dentro do *Proyecto Nacional del Bambú*, pela Fundação Nacional de Bambu, a FUNBAMBU (FUNBAMBU, 1992).

Para cada unidade habitacional eram utilizados 17 painéis que, por sua vez, necessitavam de 1200 colmos de bambus do tipo “caña-brava”. De acordo com Teixeira (2006), havia uma necessidade de a fábrica ser localizada próxima às plantações de bambu, possuir vias de acesso e ser próxima a regiões de maior demanda habitacional.

Eram utilizados gabaritos metálicos e de madeira para a produção dos painéis como um padrão; os colmos eram tratados através do método Boucherie modificado por pressão, com uma mistura de ácido bórico e bórax, e os bambu eram fixados às molduras com grampeadores pneumáticos. As Figura 8 e Figura 9 mostram algumas imagens da produção dos painéis de bambu na fábrica da FUNBAMBU.

Figura 8: Gabarito e Montagem dos painéis de bambu



Fonte: Teixeira (2006)

Figura 9: Fixação das varas de bambu



Fonte: Teixeira (2006)

De acordo com Gutiérrez (1991), as características desse painel que mais se destacam são o baixo peso que mesmo com o revestimento situava-se entre 90 e 130 kg/m³, correspondendo a de 35% de uma parede similar de blocos de concreto. Também se ressaltou sua elevada resistência mecânica, que chegou a alcançar valores da ordem de 1.500 kg/m de resistência à compressão e uma integridade estrutural, onde a fundação em radier produz uma resposta monolítica e integral, evitando fissuras por deslocamentos diferenciais.

2.1.4 Painéis Pré-fabricados com *Esterillas* de bambu

De acordo com Teixeira (2006), as *Esterillas* (em espanhol) ou Esteiras são basicamente os bambus planificado por meio de um processo de remoção dos nós e da abertura dos colmos para formarem estruturas similares a tábuas.

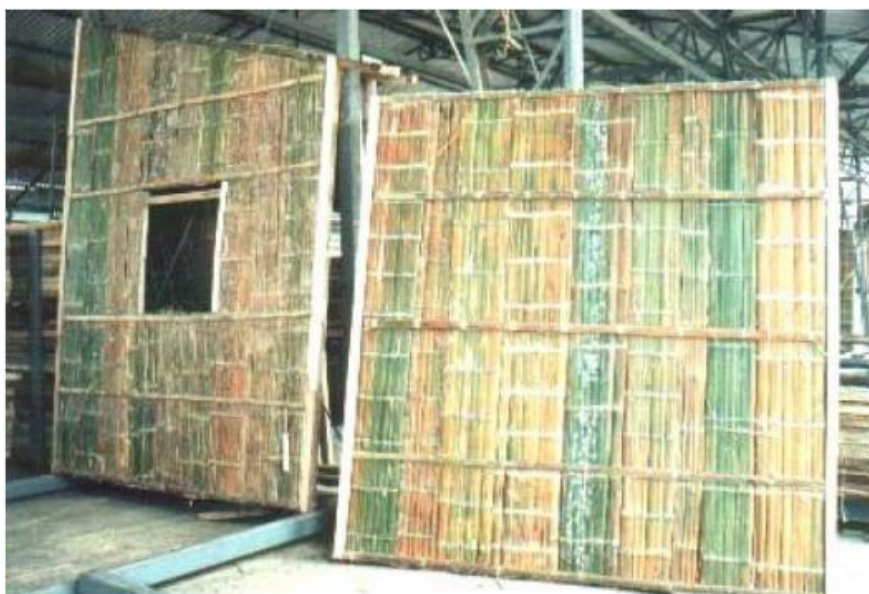
Hidalgo-López (1974) explicou que para fabricação das esteiras deve-se abrir o bambu na direção longitudinal. Tais esteiras são muito utilizadas na vedação de painéis, pisos, forros, fôrmas para concreto armado, mobiliário, dentre outros.

Geralmente são utilizadas as partes da base e do meio de colmos de 2 a 3 anos de idade. Os colmos utilizados têm entre 1 e 8 m de comprimento. Para o processo de confecção das esteiras, após os colmos serem abertos e retirados os nós, geralmente as pessoas que trabalham com isso caminham sobre as esteiras para garantir que a mesma esteja a mais plana possível. Como forma de evitar o ataque de insetos retira-se a parte branca interior dos colmos, por conter mais células parenquimáticas, ricas em amido. Porém, também podem ser utilizados outros sistemas de tratamento contra fungos e insetos como: sistemas a vácuo e pressão ou por imersão.

Uma das maiores referências na produção de habitações com esse sistema é a Fundação *Hogar de Cristo*, com sede em Guayaquil, Equador. Nessa instituição desenvolve-se desde 1970 o Projeto *Viviendas Del Hogar de Cristo* que tem como objetivo produzir habitações seguras e de baixo custo para as famílias mais necessitadas, tendo alcançado a impressionante cifra de até 2001, haviam sido construídos lares para cerca de 270.000 famílias (INBAR, 2001).

São produzidas armações em madeira sobre gabaritos metálicos e nessas armações ou quadros são fixadas com grampos, pregos ou arames as esteiras já dimensionadas. A Figura 10 mostra um painel depois de pronto. Acrescenta-se ainda que após a montagem da casa o revestimento com argamassa é feito *in loco*.

Figura 10: Painel finalizado com esteiras de bambu



Fonte: Teixeira (2006)

2.1.5 Painéis Artesanais

Como já citado no fluxograma das subdivisões dos painéis de bambu, os painéis artesanais podem ser confeccionados tanto com os colmos inteiros na forma natural, quanto com esteiras. Tais painéis são muito comuns para utilização em vedação seja para divisão de ambientes ou fachadas de edificações; os desenhos e formas de utilização do bambu podem ser os mais variados. Entretanto, a utilização desse sistema com os painéis sem revestimento quando exposto às intempéries, tem sua vida útil reduzida. Nas Figura 11 e Figura 12, apresentam-se exemplos de utilização.

Figura 11: Painel com bambus em sua forma natural



Fonte: EBIOBAMBU (2009)

Figura 12: Painel feito com peças trançadas de bambu



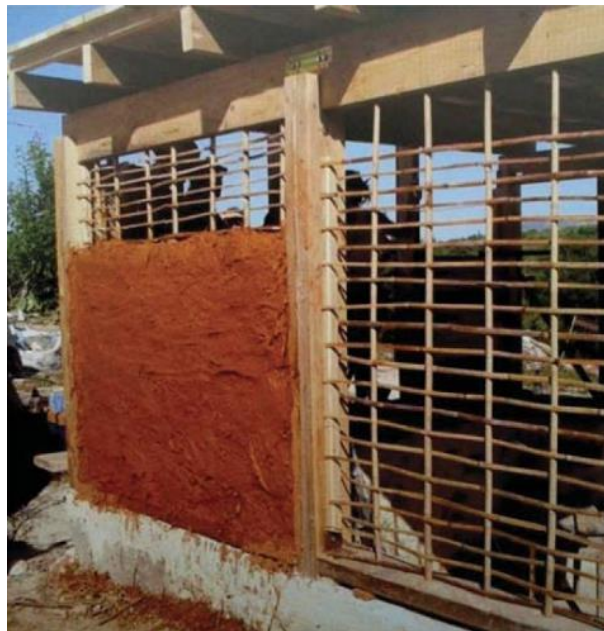
Fonte: Minke (2010)

2.1.6 Painéis Artesanais com Colmo Inteiro

De acordo com Teixeira (2013), outra forma muito utilizada são os painéis de bambu artesanais com colmos inteiros na forma natural e revestidos com terra. Tal técnica é muito utilizada em toda América Latina sendo chamada de “bareque” na Colômbia, “quincha” no Peru e no Chile, “bahareque” na Guatemala e “pau-a-pique” no Brasil. Essa técnica pode ser facilmente utilizada para construção de habitações de baixo custo, cujas paredes são construídas com bambu e preenchidas com argila. A técnica pode variar um pouco de país para país ou de acordo com o projeto, mas em princípio são seguidos os mesmos métodos em toda América Latina. Além da argila podem ser adicionadas fibras naturais ou palhas para o fechamento. A

Figura 13 e Figura 14 ilustram tais técnicas descritas.

Figura 13: Gabarito para produção de painel de bambu a ser preenchido com terra



Fonte: Minke (2010)

Figura 14: Pannel de vedação feito com bambu e terra crua

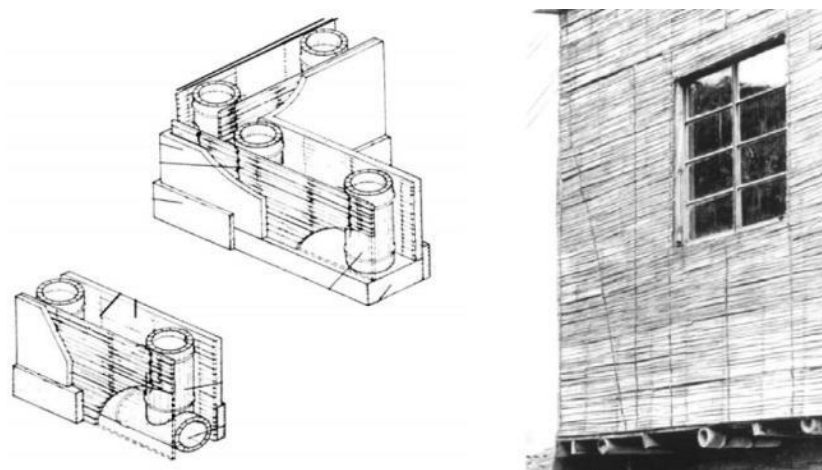


Fonte: Teixeira (2006)

2.1.7 Painéis Artesanais com Colmos Inteiros e Esteiras

Robledo (2002) afirmou que outra variação do painel tipo *bahareque*, como é conhecido na Guatemala, é a utilização de estruturas de bambu ou madeiras, revestidas de esteiras duplas, tanto na parte externa quanto interna. E por fim, os painéis são rebocados e recebem pintura e acabamentos finais. A Figura 15 mostra detalhes do projeto e a Figura 16 mostra um exemplo de edificação de quatro pavimentos construída com esse mesmo sistema por volta de 1930.

Figura 15: Detalhes construtivos do painel do tipo *bahareque*



Fonte: Hidalgo-López (2003)

Figura 16: Edificação construída com o sistema de painéis do tipo *bahareque*

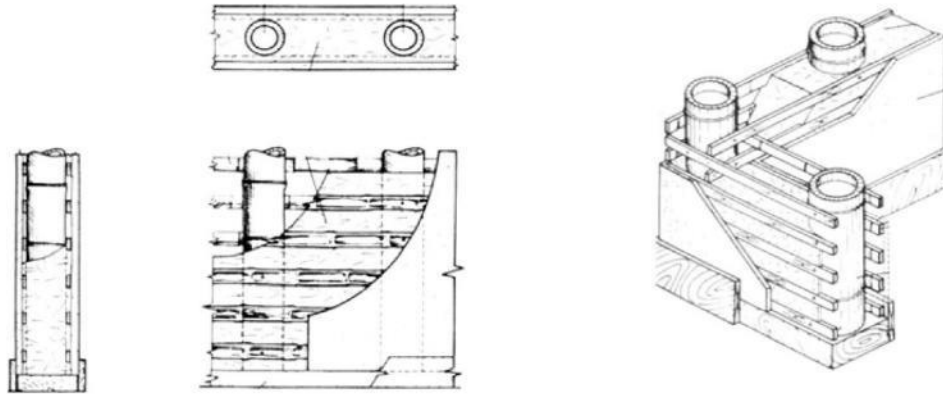


Fonte: Hidalgo-López (2003)

2.1.8 Painéis Artesanais com Colmo Inteiro e Ripas

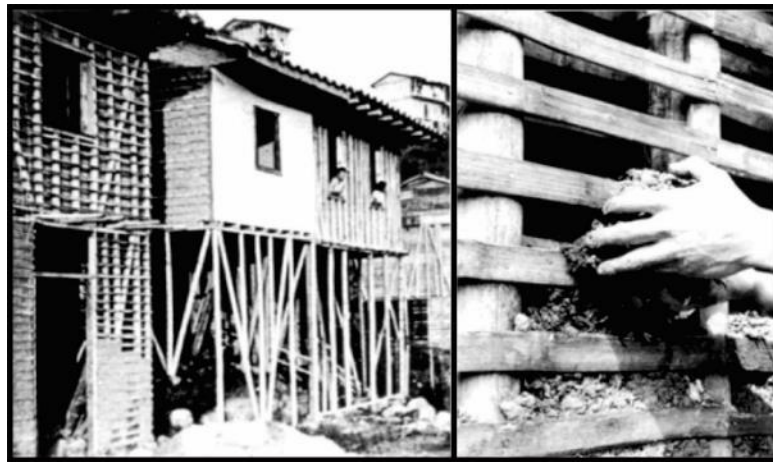
Para Teixeira (2006), as estruturas de bambu podem tanto ser apenas rebocadas como preenchidas com barro ou argila. Tais técnicas variam conforme o projeto e a região em que será construída, mas tais construções já foram identificadas em toda América Latina. Essas estruturas, são construídas com o colmo inteiro do bambu e também com ripas, as quais podem ser de madeira ou de bambu, como mostra a Figura 17. A Figura 18 mostra o preenchimento da estrutura que também pode ser feito com a adição de palhas ou fibras naturais.

Figura 17: Detalhes construtivos dos painéis preenchidos com barro



Fonte: Hidalgo-López (2003)

Figura 18: Preenchimento da parede de bambu



Fonte: Hidalgo-López (2003)

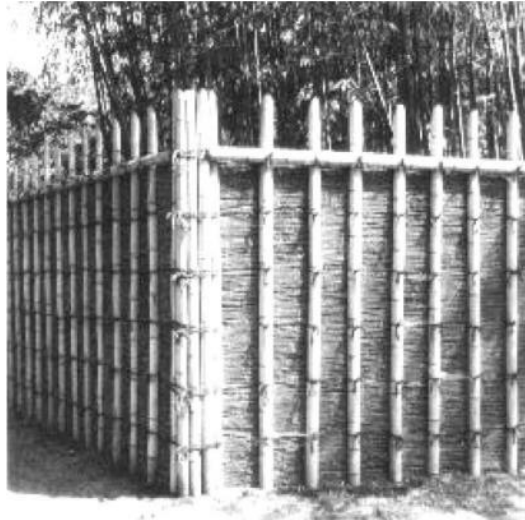
2.1.9 Painéis Artesanais com Colmo Inteiro para Cercados

Segundo Vélez (2000), o bambu muitas vezes é escolhido para construção de diferentes tipos de edificações, sejam elas de variados tipos de cercados até painéis e paredes autoportantes ou estruturais. Geralmente para esses tipos de sistemas construtivos os bambus são utilizados como fechamentos verticais que podem ser projetados e executados das mais diversas maneiras. Como já citado tais projetos podem utilizar o bambu como esteiras entrelaçadas, módulos pré-fabricados, os quais podem ou não ser rebocados, o que confere um detalhe diferencial aos sistemas confeccionados dessa forma.

O citado autor destacou que há diversas forma de utilização do bambu em elementos como paredes externas, internas ou muros. Dentre as mais variadas técnicas construtivas uma das mais simples é a parede estacada, feita com colmos de bambu. Nesse sistema os colmos são divididos dentro do espaço e formam um importante elemento construtivo de fechamento. Existem diferentes técnicas para construção de tal sistema, geralmente são posicionados colmos

verticalmente e horizontalmente ou até mesmo entrelaçados, como mostram as Figura 19 e Figura 20.

Figura 19: Pannel com varas estacadas verticalmente



Fonte: Vélez (2000)

Figura 20: Pannel feito de bambus estacados nas duas direções

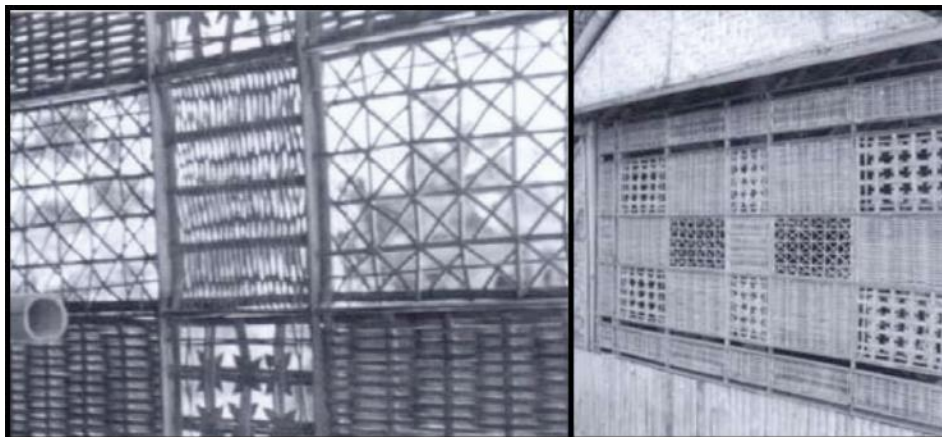


Fonte: Vélez (2000)

2.1.10 Painéis Artesanais com Colmos Inteiros Vazados

Vélez (2000) ainda citou alguns métodos adicionais de painéis de bambu vazados. O emprego de tal método resulta em estruturas de painéis de beleza singular, ricas em detalhes, que podem ser trabalhadas das mais diversas maneiras. Hidalgo-López (2003) apresentou alguns exemplos de trabalho semelhantes desenvolvidos. As Figura 21 e Figura 22 ilustram algumas dessas estruturas.

Figura 21: Painéis de bambu formando detalhes vazados e variados



Fonte: Hidalgo-López (2003)

Figura 22: Exemplos de Painéis vazados

- (a) Pavilhão do Menino Pescador, Centro Cultural O Menino e o Mar, Ubatuba – SP, Arqº Ruy Otake;
(b) Detalhe do painel de bambu trançado, utilizado como vedação.

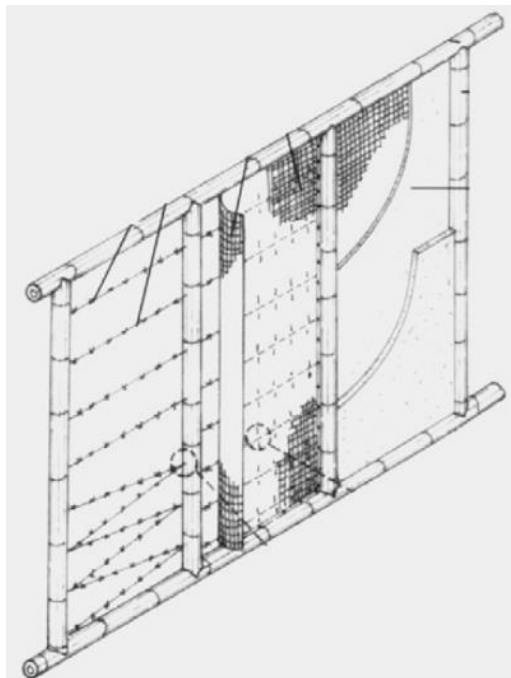


Fonte: ARCOWEB (2017)

2.1.11 Painéis Artesanais com Colmo Inteiro Tensionados

De acordo com Hidalgo-López (2003), esse sistema construtivo com bambu assemelha-se a uma moldura, onde os elementos resistentes são espaçados a cada 120 cm. Como forma de tensionamento são posicionados arames farpados fixados tanto horizontalmente quando diagonalmente entre as molduras. Os mesmos são espaçados a cada 20 cm. Após o posicionamento dos arames aplica-se uma “aniagem”, que é uma espécie de tela ou tecido grosso, feita com juta ou outra fibra vegetal. A aniagem é fixada em um dos lados do arame farpado e fixo com arame galvanizado. A Figura 23 mostra um esquema da estrutura.

Figura 23: Estrutura do painel artesanal tensionado



Fonte: Hidalgo-López (2003)

De acordo com Hidalgo-López (2003), essa técnica desenvolvida na Índia, não permitiu a obtenção de bons resultados devido à qualidade da anagem utilizada na Colômbia. Porém, após vastos estudos para desenvolver a técnica chamada de “Muro tendinoso”, realizados pela Faculdade de Arquitetura da *Universidad del Valle* (Cali, Colômbia), essa técnica foi considerada uma das melhores para construção de habitações com painéis de bambu. Em povoados com o de *Amanecer*, próximo à cidade de Armênia, Colômbia, pode-se observar a técnica utilizada na construção de diversas casas. Como acabamento final utilizou-se uma argamassa no traço em volume de 1:3 de cimento e areia para recobrir o painel.

2.2 Desempenho Estrutural

A ABNT NBR 15.575:2013 vem agregar à construção civil no Brasil trazendo parâmetros para contribuir com a regulação de desempenho para materiais utilizados neste setor. A indústria da construção brasileira está mudando seus parâmetros de qualidade. Trata-se de uma revolução conceitual sobre os requisitos mínimos de segurança para casas e edifícios residenciais. Desde julho de 2013 entrou em vigor a Norma de Desempenho de Edificações, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que estabelece exigências de conforto e segurança em imóveis residenciais. Pela primeira vez, uma norma brasileira associa a qualidade de produtos ao resultado que eles conferem ao consumidor, com instruções de como fazer essa avaliação.

Esta norma está dividida em 5 partes que tratam de diferentes sistemas construtivos. Esse trabalho enquadra-se na ABNT NBR 15.575-2:2013, que define os requisitos e critérios de avaliação para sistemas estruturais e também para ABNT NBR 15.575-4:2013, que define os requisitos e critérios de avaliação para sistemas vedações verticais internas e externas – SVVIE.

A norma de desempenho ABNT NBR 15575-4:2013 define quais os ensaios nos SVVIE devem ser realizados. Lorenzi (2013) resumiu os requisitos, critérios e ensaios necessários, como pode-se observar na Tabela 1: Ensaios experimentais: Desempenho Estrutural, ABNT NBR 15575-4 (2013) adaptada do trabalho desse autor.

Tabela 1: Ensaios experimentais: Desempenho Estrutural, ABNT NBR 15575-4 (2013)

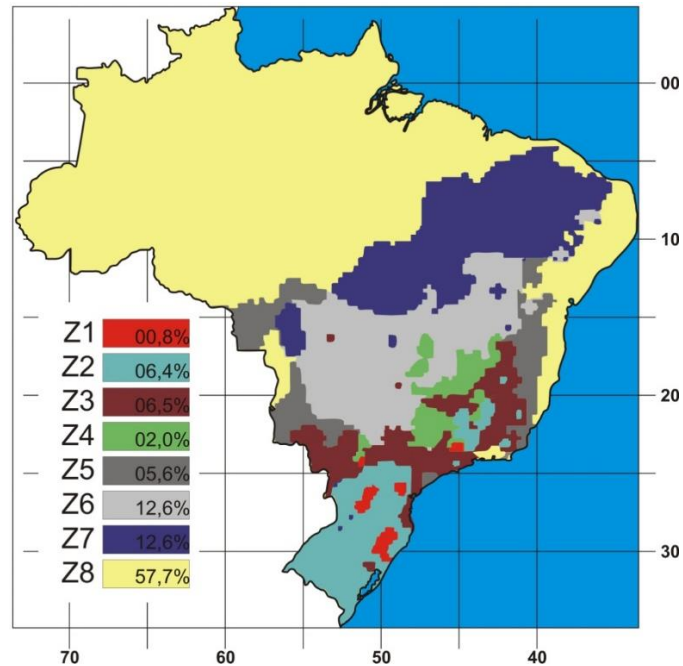
Sistema da Edificação	Requisito	Critério	Ensaios Experimentais	Norma
SVVIE	Estabilidade e resistência estrutural	Estado limite último	Ensaio técnico de estado de limite último (ELU)	ABNT NBR 15575 (2013) – Parte 4 (Anexo A da Norma)
SVVIE	Deslocamentos, fissuração e ocorrência de falhas nos SVVIE	Limitação de deslocamento, fissuração e deslocamentos	Ensaio para estado de limite de serviço (ELS)	ABNT NBR 15575 (2013) – Parte 4 (Anexo B da Norma)
SVVIE	Solicitações de cargas provenientes de peças suspensas atuantes nos SVVIE	Capacidade de suporte das cargas	Ensaio de carga suspensa	ABNT NBR 15575 (2013) – Parte 4 (Anexo A da Norma)
SVVIE	Impacto de corpo mole nos SVVIE, com ou sem função estrutural	Resistencia a impacto de corpo mole	Ensaio de impacto de corpo mole	ABNT NBR 11675 (2016)
SVVIE	Ações transmitidas por portas	Ações transmitidas por portas internos ou externas	Ensaio de corpo mole e fechamento brusco	ABNT NBR 15930 (2018) – Parte 2
SVVIE	Impacto de corpo duro incidente nos SVVIE, com ou sem função estrutural	Resistencia a impactos de corpo duro	Ensaio de impacto de corpo duro	ABNT NBR 15575 (2013) – Parte 4 (Anexo B da Norma)
SVVIE	Carga de ocupação incidente em guarda-corpos e parapeitos de janelas	Ações estáticas horizontais, estáticas verticais e de impactos incidentes em guarda-corpos e parapeitos	Ensaio de guarda-corpo de parapeito	ABNT NBR 14718 (2008) ABNT NBR 1575 (2013) e normas complementares

Fonte: Adaptado de Lorenzi (2013)

2.3 Desempenho Térmico

Para clima quente e úmido, no qual se enquadra o município de João Pessoa - PB, inserida na zona bioclimática 8 (Figura 24). As diretrizes construtivas da norma NBR 15220-3 (ABNT, 2005) direcionam ao uso de grandes aberturas sombreadas para ventilação, fechamentos opacos leves, emprego de pés direitos generosos, proteção da radiação solar e a preservação dos canais de ventilação do entorno.

Figura 24: Zoneamento Bioclimático Brasileiro



Fonte: ABNT NBR 15220-3 (2005)

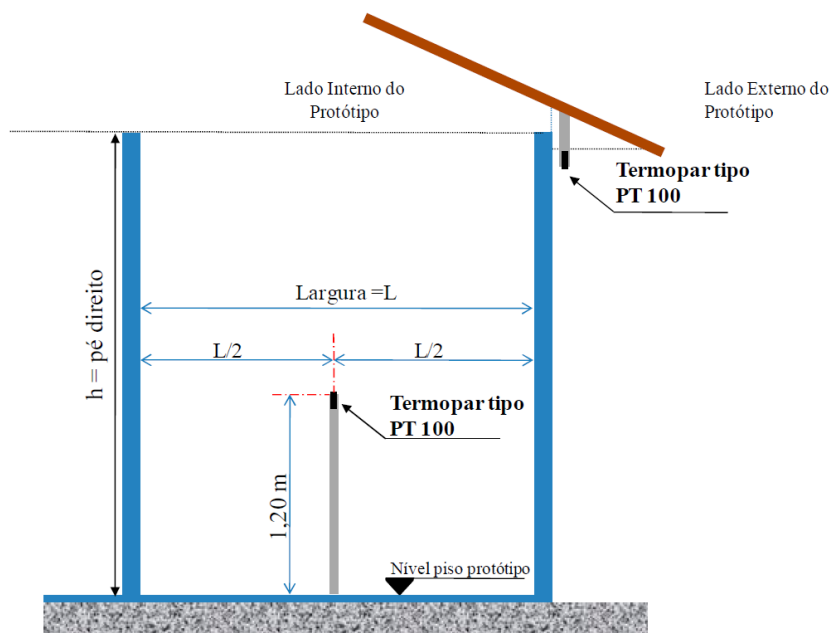
Os ensaios de desempenho térmico são realizados no protótipo em escala real com o auxílio de termômetros de bulbo seco. A Tabela 2 mostra os requisitos, critérios e ensaios descritos da norma. A Figura 25 mostra um esquema básico para determinação do desempenho térmico por medição em loco.

Tabela 2: Ensaios Experimentais: Desempenho Térmico, ABNT NBR 15575 (2013)

Sistema da Edificação	Requisito	Critério	Ensaios Experimentais	Norma
Requisitos gerais	Desempenho no verão	Valores máximos de temperatura	Ensaio por medição <i>in loco</i> em protótipo escala real	• ABNT NBR 15575 – Parte 1 (Anexo A da norma) • ABNT NBR 15575 – Parte 3 • ABNT NBR 15575 – Parte 4 • ABNT NBR 15575 – Parte 5
Requisitos gerais	Desempenho no inverno	Valores mínimos de temperatura		

Fonte: Adaptado de Lorenzi (2013)

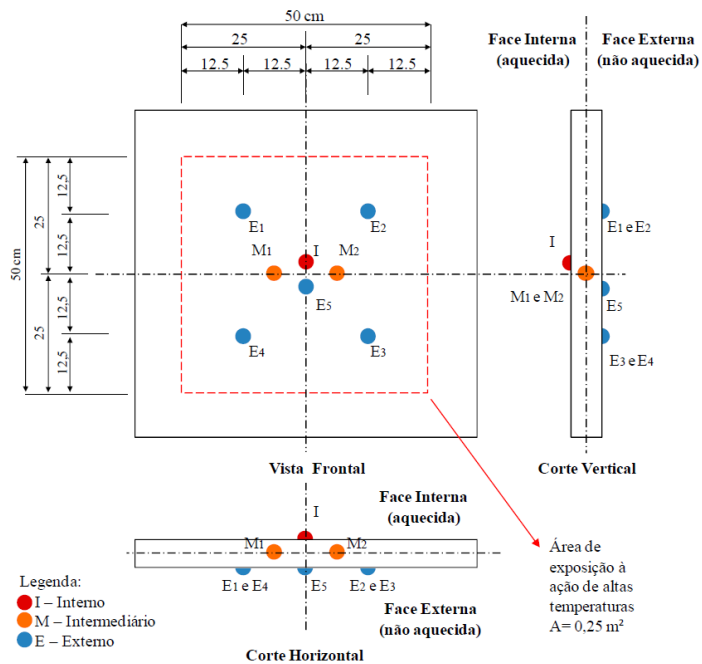
Figura 25: Esquema para ensaio de desempenho térmico por medição in loco



Fonte: Lorenzi (2013)

A Figura 26 mostra uma proposta de distribuição dos termopares para realização das medições do desempenho desse sistema construtivo. A Figura 27 mostra a câmara térmica disponível para ensaios no Laboratório de Ensaios de Estruturas e Materiais (LABEME) – UFPB e já utilizada em diversos estudos para este fim.

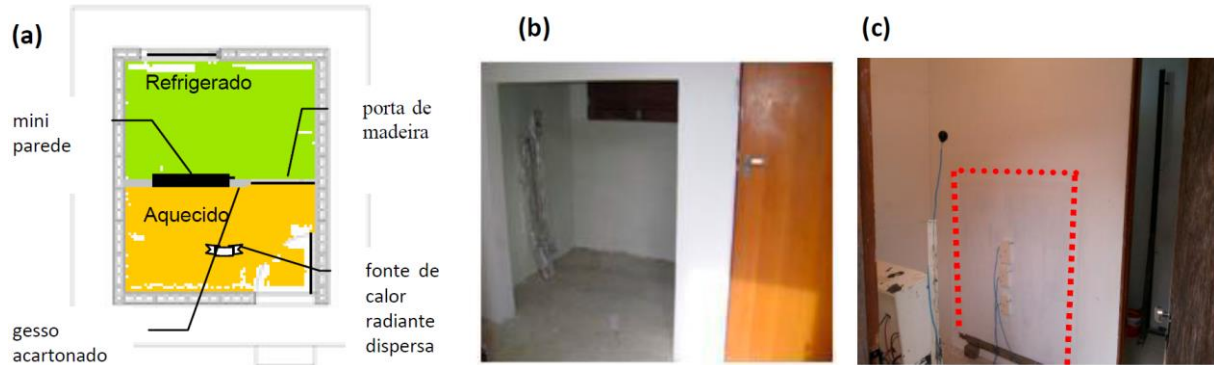
Figura 26: Proposta de ensaio de desempenho térmico em escala reduzida para SVVIE



Fonte: Lorenzi (2013)

Figura 27: Câmara térmica desenvolvida na UFPB

- (a) Esquema em planta baixa com corpo de prova no interior da câmara térmica (mini parede 1,20 m x 1,00 m) posicionado na divisória
 (b) Divisória em gesso acartonado com espaço para amostra
 (c) Complemento da vedação em isopor entre a amostra já pintada na cor branca e a divisória, incluindo termopares já posicionados.



Fonte: Gomes (2015)

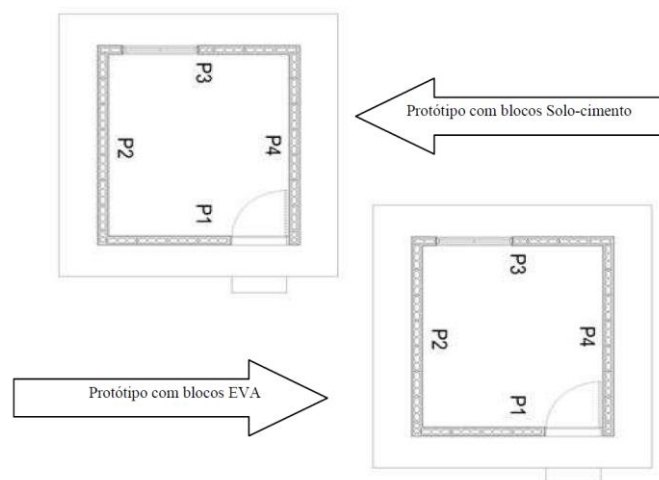
2.4 Estudos de desempenho estrutural em protótipos

Diversos estudos foram desenvolvidos que aplicam e criticam as técnicas descritas pela NBR 15.575:2013 e também estudos que foram precursores à norma, mas que já utilizavam ensaios semelhantes aos atuais.

2.4.1 Estudo com Blocos de EVA e Terra Crua

Nesse estudo, foram construídos dois protótipos, sendo um com blocos de solo-cimento e o outro com blocos de EVA, os mesmos com dimensões de 3,14 m x 2,65 m, logo uma área construída de 8,32 m². A Figura 28 mostra a planta baixa dos protótipos executados nesse estudo.

Figura 28: Planta baixa dos protótipos com indicação



Fonte: Lima Filho (2008)

O autor buscou realizar diversos ensaios baseados em normas vigentes da época em estudos de referência que haviam sido desenvolvidos. Foram feitos ensaios de impacto de

corpo mole, ensaio de impacto de corpo duro, ensaio de carga suspensa e ensaio de fechamento brusco de porta. A Figura 29 ilustra os ensaios realizados nesse estudo.

Figura 29: Ensaio de desempenho realizados no estudo da UFPB



Fonte: Adaptado de Lima Filho (2008)

2.4.2 Estudo desenvolvido por Nogueira *et al.* (2018)

Nesse estudo, os autores trabalharam com avaliação estrutural de painéis de vedação vertical em *Light Steel Framing* com madeira mineralizada para uso externo. Foram realizados ensaios de impacto de corpo mole, ensaio de impacto de corpo duro e ensaio de carga suspensa. A Figura 30 mostra como foram realizados os ensaios supracitados.

Figura 30: Ensaio realizados conforme a ABNT NBR 15575:2013



Fonte: Adaptado de Nogueira *et al.* (2018)

2.4.3 Estudo desenvolvido UFRS por Lorenzi (2013)

Um dos estudos mais completos encontrados na literatura sobre a parte de estruturas de vedação da norma de desempenho é o estudo apresentado por Lorenzi (2013), que tendo realizado testes e proposto na temática para discutir os procedimentos, critérios e ensaios adotados por essa norma, realizou testes e propôs melhorias para norma. Nesse estudo, o autor além de propor melhorias nas metodologias de ensaio foram comparados diversos sistemas construtivos, apresentados na Tabela 3 adaptada do seu trabalho de tese.

Tabela 3: Sistemas construtivos estudados por Lorenzi (2013)

Modelo	Tipo de Inovação	Imagem	Modelo	Tipo de Inovação	Imagem
A	Paredes de concreto moldado no local		E	Paredes constituídas de blocos de cinza de carvão mineral com junta seca	
B	Paredes de concreto pré-moldado		F	Parede sanduíche de placas de GRC, OSB e gesso acartonado, núcleo lã de vidro	
C	Paredes de concreto moldado no local com forma permanente de PVC		G	Parede sanduíche de lâminas de PRFV, gesso acartonado e núcleo de EPS	
D	Paredes sanduíche de chapa de aço galvalume com núcleo de poliuretano expandido (PU)				

Fonte: Adaptado de Lorenzi (2013)

CAPÍTULO 3

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Influência da presença de fissura na resistência característica à compressão do bambu

Um fenômeno ligado aos colmos de bambu é o aparecimento de fissuras paralelas às fibras. Elas são quase inevitáveis em certas condições de exposição de alguns elementos estruturais. Dessa forma, buscou-se medir a resistência à compressão paralela às fibras de duas espécies de bambu, *B. vulgaris*, espécie simpodial mais abundante no estado da Paraíba, e *P. pubescens*, conhecido como Mossô ou bambu chinês, espécie monopodial, de climas temperados e amplamente utilizados para fins estruturais no Brasil.

Os ensaios físico-mecânicos foram realizados de acordo com a ABNT NBR 16828-2 “Estruturas de Bambu - Parte 2: Determinação das propriedades físicas e mecânicas do bambu”. Dois tipos de amostras foram utilizados, quanto à relação diâmetro externo: altura, 1:1 (recomendando na norma) e 1:2. Foram testadas amostras com e sem nó.

Os corpos de prova para o ensaio de resistência à compressão paralela às fibras foram selecionados nas três regiões do colmo (base, meio e topo), tanto para os colmos sem e com fissura. O preparo dos corpos-de-prova seguiu o procedimento determinado na norma brasileira supracitada, como seleção de colmos, corte, tratamento, secagem, etc. Os colmos fissurados foram selecionados em colmos que apresentavam trincas originadas naturalmente durante o processo de secagem. Todos os colmos foram tratados com bórax e ácido bórico, tratamento amplamente utilizado em todo mundo, e não apresentaram ataques de insetos. Um total de 192 amostras foram preparadas e testadas. A Tabela 4 indica a distribuição das amostras usadas neste estudo. O ensaio foi realizado em uma máquina de testes universal CONTENCO I-3058 100 tf.

A área da seção transversal foi calculada medindo-se o diâmetro externo e interno da amostra com paquímetro digital com sensibilidade de 0,01 mm. Foi utilizada a média de três medições feitas em pontos equidistantes.

Tabela 4: Distribuição das amostras para o estudo de fissuração dos bambus

Espécie	Proporção	Fissuras	Nós	Amostras
B. vulgaris	1:1	Com fissura	Com nó	12
			Sem nó	12
	1:2	Sem fissura	Com nó	12
			Sem nó	12
		Com fissura	Com nó	12
			Sem nó	12
P. Pubescens	1:1	Com fissura	Com nó	12
			Sem nó	12
	1:2	Sem fissura	Com nó	12
			Sem nó	12
		Com fissura	Com nó	12
			Sem nó	12
			Total	192

Fonte: Elaborado pelo autor

O teor de umidade de cada amostra testada foi obtido seguindo as orientações da norma brasileira de bambu (ABNT NBR 16828-2). Os testes foram realizados na Universidade Federal da Paraíba entre os meses de setembro e dezembro de 2020, meses em que as chuvas são mais baixas para a região. Os dados históricos indicam umidade relativa do ar média em torno de 74% (INPE, 2021).

Os corpos-de-prova para obtenção do teor de umidade apresentam formato prismático com aproximadamente 25 mm x 25 mm e espessura igual a da parede do colmo. Essas amostras foram extraídas, com o auxílio de uma serra de bancada, das amostras de compressão logo após a execução do ensaio. Foram pesados em balança digital com precisão de 0,01g, a seguir, secos em estufa à temperatura de $(103 \pm 2)^\circ\text{C}$.

A Equação 1 mostra a expressão matemática usada para calcular o teor de umidade e a Equação 2 foi usada para calcular a resistência à compressão paralela às fibras.

$$U = \left[\frac{m - m_0}{m_0} \right] \times 100 \quad (1)$$

onde,

m é a massa do corpo de prova, antes da secagem em estufa, com precisão de 0,01g;

m_0 é a massa do corpo de prova após a secagem, com precisão de 0,01 g.

$$f_{c0} = F_{max}/A \quad (2)$$

onde,

f_{c0} é a resistência à compressão paralela às fibras, expressa em megapascals (MPa);

F_{max} é a carga de ruptura indicada na máquina de ensaio, expressa em newtons (N);

A é a área da seção transversal da amostra, expressa em milímetros quadrados (mm²).

Para fins de projeto estrutural, a resistência característica, que leva em consideração a variabilidade dos resultados, é mais importante do que a resistência média. Assim, foi considerada a resistência à compressão característica paralela às fibras aquela que tem 5% de probabilidade de não ser atingida em cada conjunto de amostras. Foi obtido pela Equação 3.

$$f_k = f_{0.05} = f_m - 1,645 \times s \quad (3)$$

onde,

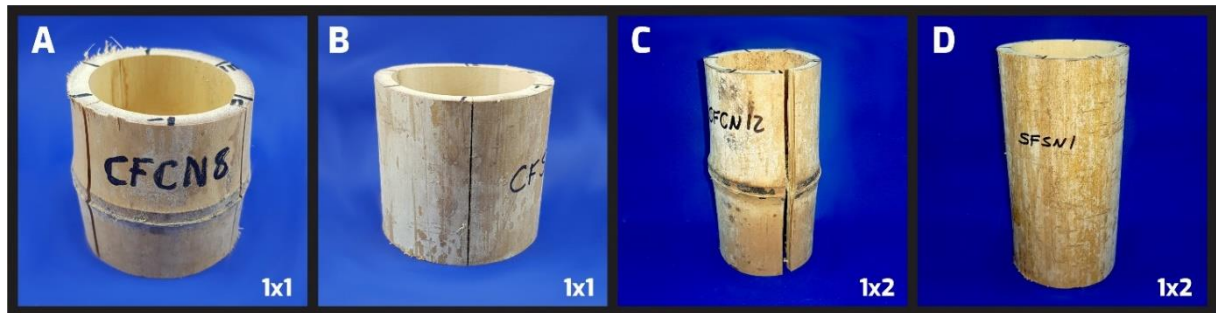
f_m é a resistência média à compressão;

s é o desvio padrão de cada conjunto de espécimes.

A Figura 31 mostra algumas amostras da espécie *P. pubescens*. Todas as imagens mostram as amostras antes do ensaio de compressão paralela às fibras. As fissuras podem ter até 3 mm de largura. A Figura 32 mostra as amostras da espécie *B. vulgaris*.

Figura 31: Amostras do *P. pubescens* antes do ensaio

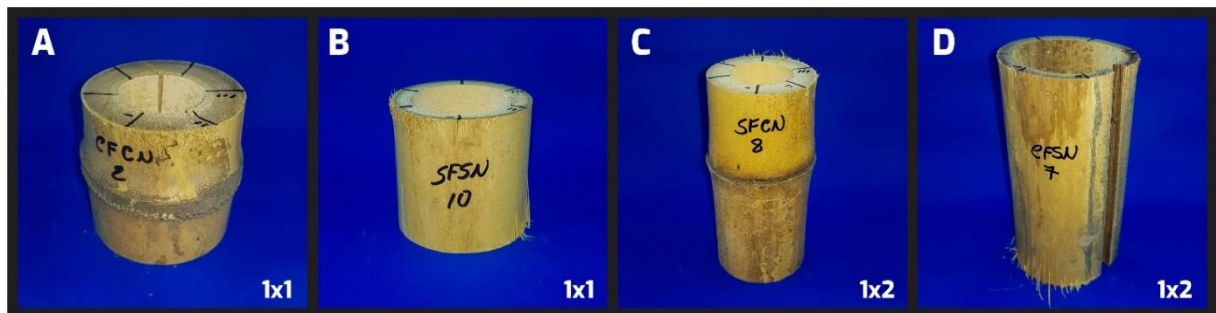
(A = com nó e fissura; B = sem nó e com fissura; C = com nó e fissura ; D = sem nó e sem fissura;)



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 32: Amostras do *B. vulgaris* antes do ensaio

(A = com nó e fissura; B = sem nó e sem fissura; C = com nó e sem fissura ; D = sem nó e com fissura;)



Fonte: Elaborado pelo autor

3.2 Resistências características do *Bambusa vulgaris*

Em sua dissertação Gomes Neto (2017) realizou diversos ensaios de caracterização da espécie *B. vulgaris*. Entretanto, nos ensaios de caracterização mecânica da espécie não foram calculadas as resistências características dos ensaios realizados.

Para o Brasil, a indicação ao cálculo da resistência característica surgiu com a publicação da ABNT NBR 16828-1 (2019) que é aquele que tem 5% de probabilidade de não ser atingido em um determinado lote, dada por:

$$f_k = f_{0,05} = f_m - 1,645 \cdot s$$

onde,

f_m é o valor de resistência médio;

s é o desvio padrão dos resultados da amostra, devendo-se ensaiar pelo menos 13 corpos de prova por lote.

Dessa forma, uma vez que no subtópico 3.1 desse estudo já foi apresentado a resistência característica para o ensaio de resistência à compressão paralela as fibras para a espécie *B. vulgaris*. Foram utilizados os dados da dissertação de Gomes Neto (2017) para o cálculo da resistência característica para o ensaio de resistência a tração e ao cisalhamento paralelo às fibras.

Destaca-se que tanto para o ensaio de tração quanto para o ensaio de cisalhamento foram utilizadas 108 amostras. A Figura 33 e Figura 34 mostram exemplos de corpos de prova utilizados nos ensaios. O corpo de prova do ensaio de cisalhamento não é o indicado na norma, mas o proposto por Ghavami nos anos 90.

Figura 33: Exemplo de corpo de prova para ensaio de tração paralela às fibras



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 34: Exemplo de corpo de prova para ensaio de cisalhamento paralela às fibras



Fonte: Elaborado pelo autor

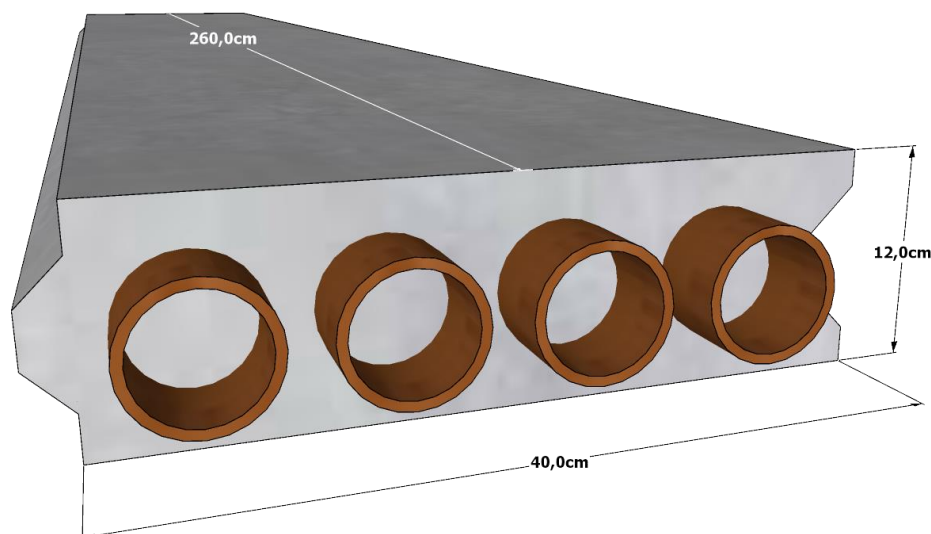
3.3 Painéis Modulares

O painel modular proposto consiste em uma estrutura pré-fabricada de bambu revestido por um concreto, produzido fora do canteiro de obras. Depois do devido processo de cura, pode ser transportado para o local da obra onde será posicionado e fixado por meio do encaixe macho-fêmea em outro painel semelhante e por uma cinta de amarração que une todos os painéis utilizados.

O estudo propôs um painel com as seguintes dimensões: 40 cm de largura, 12 cm de espessura e 260 cm de altura (Figura 35). Possui encaixe do tipo macho – fêmea nas laterais e o bambu sobressai no topo 5cm para engaste na cinta de amarração superior.

A espessura de 12 cm foi adotada porque o bambu utilizado é da espécie *Bambusa vulgaris* que tem certa tortuosidade. Com um bambu mais linear, como o Mossô (*Phyllostachys pubescens*) poder-se-ia chegar à espessura de 10 cm.

Figura 35: Painel Modular Proposto



Fonte: Elaborado pelo autor

Para o painel modular apresentado foram usados 4 colmos de bambu da espécie *B. vulgaris* com o diâmetro externo máximo de 7 cm. Essa medida justifica-se para que seja possível garantir o recobrimento mínimo de 2,5 cm para cada lado do painel uma vez que o mesmo possui 12 cm de espessura.

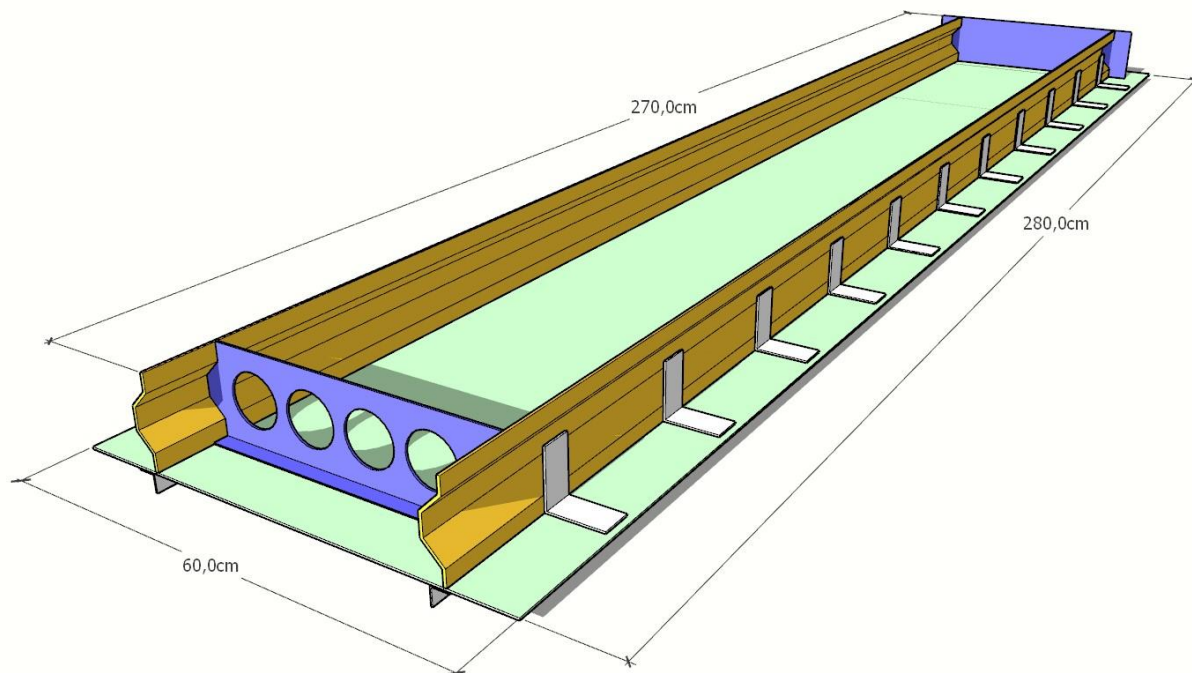
Naturalmente, por ser um material que não passou por nenhum processo industrial, os colmos de bambu apresentam uma grande variação geométrica (diâmetro, espessura da parede, e comprimento do internó), além da tortuosidade natural, que é uma característica dessa espécie.

3.4 Confecção da fôrma metálica

Para produção dos painéis foi necessário o desenvolvimento e confecção de uma fôrma que pudesse suportar o peso do painel sem sofrer deformações, e também que facilitasse a desfôrma da peça. A fôrma projetada deveria atender ainda o requisito de durabilidade uma vez que com a mesma fôrma seriam moldados vários painéis, logo deveria possuir dispositivos que permitissem a montagem e desmontagem sem perder suas dimensões.

A Figura 36 mostra o projeto 3D da fôrma. O material escolhido para sua confecção foi a chapa de aço de 2mm, a escolha desse material deu-se pela sua resistência e durabilidade.

Figura 36: Forma metálica desenvolvida para os painéis modulares



Fonte: Elaborado pelo autor

A chapa de aço de 2mm foi utilizada para todas as partes da fôrma (base/fundo e laterais). A fôrma possui laterais com encaixes macho-fêmea que foram confeccionadas com a chapa de aço dobrada em uma dobradeira industrial para garantir os ângulos corretos desenvolvidos no projeto. O serviço de corte e dobra das chapas de aço foi terceirizado e o serviço de solda foi feito no próprio laboratório. A fôrma possui em todo o entorno dispositivos que garantem o esquadro das faces laterais. São 11 suportes em cada lateral e 3 na parte de baixo. Todos os equipamentos são soldados nas laterais de chapa dobrada e parafusados na chapa da base com parafuso, arruelas lisas, arruelas de pressão e porcas (Figura 37), o que garante uma segurança para não afrouxar durante a vibração da forma no processo de moldagem.

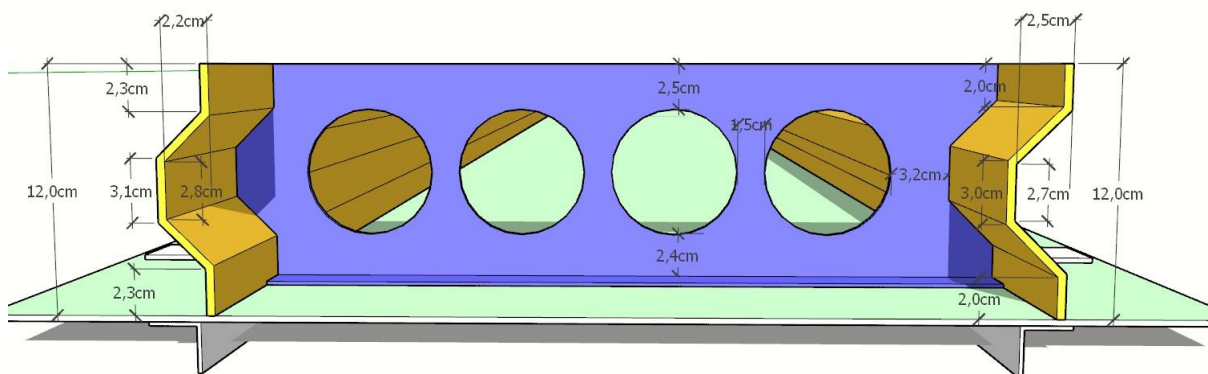
Figura 37: Detalhe da forma, mãos francesas



Fonte: Elaborado pelo autor

Na parte de baixo da base foi adicionado uma trama de cantoneiras de 1 polegada e soldadas na chapa de aço de base para garantir que a fôrma não entorte ou saia do nível durante o processo de moldagem. A Figura 38 mostra o detalhe do encaixe macho-fêmea da forma.

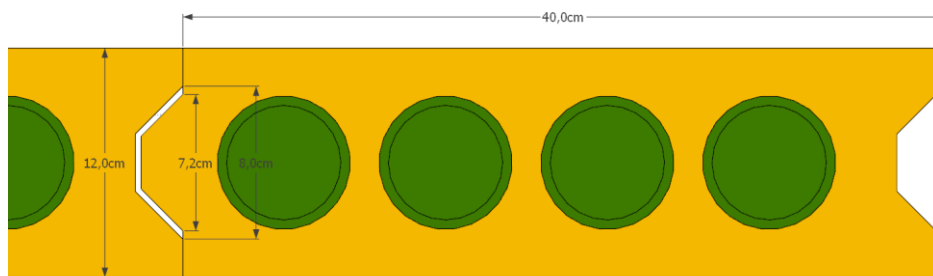
Figura 38: Detalhe do encaixe macho-fêmea da forma



Fonte: Elaborado pelo autor

Para garantir um bom encaixe entre os painéis no projeto de forma deixou-se uma pequena diferença nos encaixes deixando um espaçamento mínimo de 3 mm na região de engaste do painel, que deverá ser preenchida com uma pasta cimentícia permitindo uma perfeita vedação entre painéis como mostra a Figura 39.

Figura 39: Detalhe no encaixe entre painéis



Fonte: Elaborado pelo autor

3.5 Produção das partículas de bambu

Para produção dos traços descritos no item anterior, foi necessária a produção de partículas de bambu em quantidade. Foram buscadas diversas alternativas para produção dessas partículas desde a compra de *bags*, até a parceria com a Prefeitura Municipal de João Pessoa para o uso de um equipamento de trituração de podas de árvores. Entretanto, a melhor forma adotada para produção das partículas foi utilizar adaptações em equipamentos do próprio laboratório para sua produção.

O processo de produção das partículas seguiu os seguintes processos:

- 1) Corte dos colmos de bambu com serra meia esquadria;
- 2) Trituração dos pedaços de colmo em moinho de martelo;
- 3) Trituração das partículas de grande escala em moinho de facas;
- 4) Tratamento com cal por 24 horas em imersão, solução com 10% de concentração;
- 5) Lavagem das partículas com auxílio de peneira para remoção do excesso de material pulverulento;
- 6) Secagem ao sol.

As seguir descreve-se quantidades e volume de material de cada etapa no processo de produção de um lote de partículas (aproximadamente o volume utilizado para produção de um painel).

São utilizados aproximadamente 46,5m de colmos de 5,5cm de diâmetro médio cortados no comprimento de 20cm, o que preenchem o volume de um tambor de 200 litros. Esses pedaços de colmos passam por moinho de martelos e resultam em partículas com uma massa de 36,7kg. As partículas de grandes dimensões são processadas em um moinho de facas para redução do seu tamanho, nesse processo há uma perda de massa o que resulta num valor final de 35,1kg.

Após a trituração as partículas necessitam passar por um tratamento no banho de cal para reduzir a quantidade de amido que impossibilita a pega do cimento na matriz. As partículas são imersas por 24 horas em um tambor com água e cal hidratada na concentração de 10%. Após esse período as partículas são lavadas em água corrente com o auxílio de uma peneira de malha fina para remover o excesso de cal hidratada e a fração pulverulenta oriunda dos processos de trituração.

Por fim, as partículas de bambu são colocadas para secar ao sol em plataformas de secagem e reviradas pelo menos três vezes ao dia para garantir uma secagem uniforme. A massa final de partículas depois de todo esse processo é 30,4kg. A Figura 40 apresenta o fluxograma desse processo de produção das partículas de bambu.

Figura 40: Fluxograma de processos para produção das partículas de bambu



Fonte: Elaborado pelo autor

3.6 Traços

Para os estudos iniciais de determinação de um traço ideal de argamassa, buscou-se a referência do estudo de mestrado de Gomes Neto (2017). No início do trabalho de tese pretendia-se trabalhar com a utilização do EVA com o objetivo de reduzir a massa do painel e aumentar a elasticidade do concreto desenvolvido. O subtópico a seguir apresenta as primeiras tentativas de determinação de um traço ideal, sendo esse, um traço que apresentasse as seguintes características: baixa densidade, alta trabalhabilidade e elasticidade para acompanhar as deformações do bambu sem apresentar muitas fissuras.

3.6.1 Desenvolvimento inicial dos traços

Como supracitado o estudo inicial dos traços partiu do traço utilizado por Gomes Neto (2017) para confeccionar estruturas de painéis semelhantes, o traço foi denominado REF na Tabela 2, o traço em questão já funcionava para os painéis desenvolvidos na dissertação, porém apresentava problemas como dificuldade de moldagem devido a sua baixa trabalhabilidade e excesso de fissuração. Dessa forma, de posse do traço base utilizado para produção dos painéis no estudo prévio de Gomes Neto (2017), foi possível aprimorá-lo para que se obtivesse uma consistência mais fluida além de uma maior resistência. A Tabela 5 mostra os dados dos primeiros traços confeccionados.

Tabela 5: Estudo para aprimoramento do traço utilizado

Traços	Traço em Massa							Consumo de Cimento (kg/m ³)
	Cimento	Cal	Areia	EVA	Relação a/c	Fibra de Coco (%)	Aditivos	
REF	1	0,2	5,5	0,3	0,5	0,5	1% RP	252,7
T1	1	0,5	3,0	3,5	0,7	---	2% SP	63,2
T2	1	0,5	3,0	2,0	1,0	---	4% SP	96,5
T3	1	0,5	4,5	2,0	1,2	---	3% SP	89,8
T4	1	0,5	2	0,3	0,7	---	2% SP	318,1
T5	1	0,5	2	0,3	0,5	---	2% SP	339,7
T6	1	0,5	2	0,3	0,55	---	2% SP	334,0
T7	1	0,5	3,5	0,3	0,6	---	2% SP	276,5

Fonte: Elaborado pelo autor

Legenda: RP = Aditivo retardador de pega; SP = Aditivo super plastificante

Com a determinação dos traços ideais T6 e T7 apresentam uma consistência adequada para moldagem, foram confeccionados painéis em escala reduzida nas dimensões 40 cm de largura x 12 cm de espessura x 100 cm de altura. Procurou-se observar o comportamento dos traços quando aplicados com os bambus, ao mesmo tempo que se verificava a resistência à compressão desses traços aos 7 e 28 dias. Um detalhe importante a ser destacado refere-se ao Traço 7, no qual foi alterado o tipo de areia utilizada passando de uma areia fina para o uso de uma areia grossa, com o objetivo de reduzir a retração durante o processo de cura.

Os materiais utilizados para confecção dos traços adotados foram caracterizados conforme as normas apresentadas na Tabela 6

Tabela 6: Ensaios de caracterização dos agregados

Ensaio	Norma	
	Areia	EVA
Massa Unitária	NBR NM 45:2006	
Massa Específica	NBR NM 52:2009	----
Granulometria	NBR NM 248:2003	
Consistência	NBR 13276:2002	

Fonte: Elaborado pelo autor

Com os traços apresentados na Tabela 5 foram confeccionados painéis em escala reduzida os quais apresentaram problemas de fissuração ainda no período de cura. Os resultados e análise dessa confecção de painéis está apresentado no Capítulo 4 desse trabalho de tese.

3.6.2 Desenvolvimento dos traços com partículas de bambu

Visto que os traços até então utilizados não foram satisfatórios, voltou-se a fase de confecção de outras misturas, porém dessa vez trabalhando com a adição de partículas de bambu triturado, como se vem sendo desenvolvido trabalhos na Universidade Federal do Rio de Janeiro dessa forma como o trabalho de tese de Gloria (2021). Outro objetivo buscado com esse novo estudo dos traços era a redução do peso do painel, logo foi utilizado o recurso de remover também o agregado miúdo e aumentar o máximo da quantidade de partículas de bambu que além de reduzir a massa do painel poderia aumentar a resistência a tração do compósito.

O filler calcário entrou na primeira variação do traço com um agregado fino para reduzir o consumo de cimento e manter uma boa trabalhabilidade que era outro critério almejado. A relação água/cimento foi fixada em 0,4 para todos os traços.

Ao ensaiar a resistência do primeiro traço observou-se que a resistência obtida foi muito baixa, dessa forma a partir do TBAM2 foi adicionado o Metacaulim com o objetivo de aumentar a resistência. O TBAM 3 e TBAM4 foi apenas ajustes finos de dosagem, uma vez que o objetivo de resistência, trabalhabilidade e baixo peso específico foram atingidos. A Tabela 7 e a Tabela 8 apresentam as porcentagens e consumos dos traços descritos.

Tabela 7: Traços em volume

Traço	Bambu 45%	Concreto 55%					Tipo
	Bambu Triturado	Cimento	Filler Calcário	Metacaulim	a/c	Aditivo	
TBAM1	45%	50%	50%	---	0,4	0,4	Super
TBAM2	45%	50%	20%	30%	0,4	0,4	Plastificante
TBAM3	45%	50%	35%	15%	0,4	0,3	Hiper
TBAM4	45%	50%	35%	15%	0,4	0,4	Plastificante

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 8: Consumo de materiais dos traços em kg/m³

Traço	Bambu 45%	Concreto 55%					Tipo
	Bambu Triturado (kg)	Cimento (kg)	Filler Calcário (kg)	Metacaulim (kg)	a/c (kg)	Aditivo (kg)	
TBAM1	247,50	372,90	372,90	---	545,90	2,90	Super
TBAM2	247,50	366,80	146,70	220,10	452,90	2,00	Plastificante
TBAM3	247,50	369,90	258,90	110,90	499,00	1,80	Hiper
TBAM4	247,50	369,90	258,90	110,90	499,00	2,50	Plastificante

Fonte: Elaborado pelo autor

3.7 Preparação dos colmos de bambu

Os colmos utilizados foram da espécie *Bambusa vulgaris* e coletados dentro da própria UFPB, em um bambusal nativo. Por falta de manejo os colmos dessas touceiras possuem uma grande variação dimensional e tortuosidade. Foram coletados cerca de 50 colmos de 5 metros. Desses colmos foram selecionados os mais adequados para o trabalho. A Figura 41 mostra o dia em que a carga de bambu chegou ao laboratório. Os colmos foram cortados nas touceiras com auxílio de uma motosserra, logo o acabamento do corte na pontas não estava adequado para o uso nos painéis.

Figura 41: Bambu coletados nas touceiras da UFPB



Fonte: Elaborado pelo autor

A primeira etapa do processo foi a seleção dos colmos. O primeiro critério foi o nível de maturidade, foram utilizados os colmos mais maduros do lote. O segundo critério de seleção foi a tortuosidade, buscou-se separar os colmos mais retos para o uso. O terceiro critério foi o diâmetro externo, foram separados os colmos que possuíam até 7cm de diâmetro externo ao longo de todo comprimento utilizável.

A segunda etapa do processo foi o corte do bambu, que foi feito com o auxílio de uma serra sabre a bateria da marca Makita, utilizando uma lâmina específica para bambu desenvolvida pela própria marca, o que evitou o desfiamento das fibras externas garantindo um corte limpo.

A terceira etapa foi o rompimento dos diafragmas, para que na etapa seguinte, tratamento, a imersão dos colmos fosse facilitada e garantir o correto tratamento das peças. A Figura 42 mostra o método utilizado para romper os diafragmas que consiste em utilizar um vergalhão de cerca de 1,5m com uma das extremidades apontada e uma furadeira com função martelete.

A quarta etapa da preparação foi tratamento que consistiu na imersão dos colmos em solução de Bórax Decahidratado (3%) e Ácido Bórico (3%), por 6 dias.

Figura 42: Método utilizado para o rompimento dos diafragmas



Fonte: Elaborado pelo autor

A quinta etapa foi o processo de secagem que foi feito a sombra, para evitar a rápida perda de umidade e possíveis aparecimentos de fissuras, e com os colmos armazenados na vertical, como mostra a Figura 43, para permitir que toda solução escorra através dos furos no diafragma. A secagem foi feita em cerca de 15 dias.

Figura 43: Secagem dos colmos pós-tratamento



Fonte: Elaborado pelo autor

Por fim, após a secagem foi utilizado uma esmerilhadeira com disco de lixa flap de grão 80 para lixar alguns troncos de galhos laterais dos colmos, o que ajudou a garantir um perfil mais retilíneo as peças.

3.8 Moldagem dos painéis

O projeto inicial desse trabalho era que os painéis fossem moldados com 260cm de altura, entretanto pensando nos ensaios de desempenho estrutural o painel teve que se adaptado em sua altura. A máquina de ensaios na qual o painel seria ensaiado só tem altura útil de no máximo 240cm, logo seria necessária uma reforma em toda estrutura desse pórtico o que não era viável em tempo e recursos financeiros. Dessa forma foi adaptado à altura do painel para 240cm.

A moldagem dos painéis seguiu os seguintes processos:

- 1) Limpeza dos colmos;
- 2) Corte no tamanho do painel;
- 3) Alinhamento e conferência dos espaçamentos;
- 4) Perfuração para os pinos de travamento;

- 5) Limpeza da forma;
- 6) Aplicação do desmoldante;
- 7) Posicionamento e checagem dentro da forma;
- 8) Fixação dos espaçadores;
- 9) Fixação dos limitadores de movimento dos bambus;
- 10) Moldagem;
- 11) Cura inicial por 7 dias;
- 12) Desmolde;
- 13) Cura final até os 28 dias.

A Figura 44 mostra a forma do painel modular com os colmos de bambu posicionados, travados, espaçadores fixados na parte inferior e limitadores de movimento do bambu fixados.

Foi utilizado como espaçadores pequenos pedaços de concreto oriundos de sobras de outros ensaios na espessura de 2,5cm. Os limitadores de movimento foram utilizados para reduzir a movimentação do bambu durante a moldagem uma vez que os colmos tendem a subir, devido ao seu baixo peso específico. Esses limitadores foram feitos de ripas de bambu e posicionados por cima os colmos e sobre pressão das laterais da forma de aço.

A Figura 45 mostra o processo durante a moldagem. Todos os painéis foram moldados com a forma de aço sobre uma mesa vibratória, que ajudou nesse processo.

Figura 44: Forma do painel modular pronto para concretagem



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 45: Painel modular durante o processo de moldagem sobre a mesa vibratória

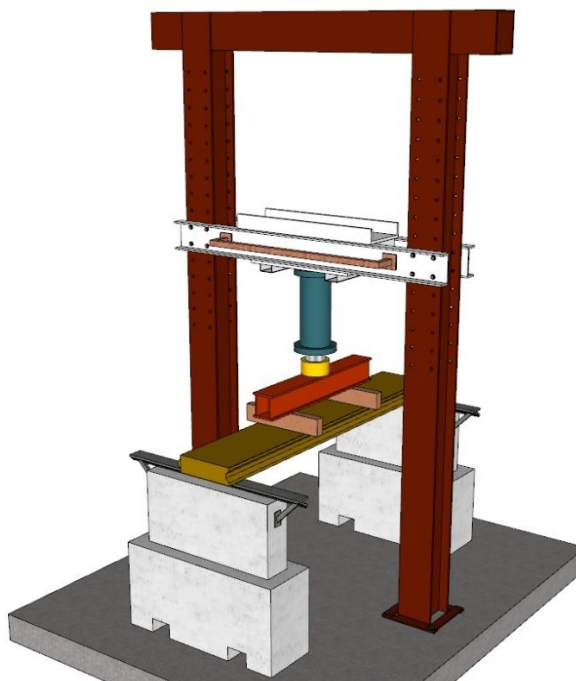


Fonte: Elaborado pelo autor

3.9 Ensaio de resistência à flexão do painel

Para constatar o comportamento dos painéis à flexão foi realizado um ensaio com um dos painéis na mesma dimensão. A Figura 46 apresenta a adaptação utilizada no pórtico.

Figura 46: Ensaio de flexão nos painéis

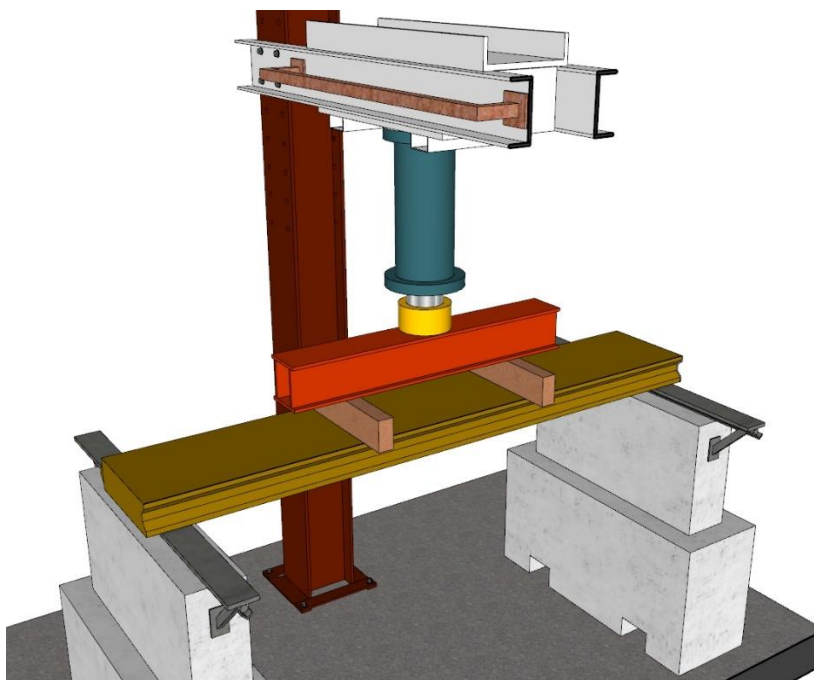


Fonte: Elaborado pelo autor

Para realização do ensaio o painel foi posicionado sobre duas peças de concreto e estruturas rotuladas no topo que podem acompanhar a deformação do painel. Sobre o painel foi utilizado duas peças de madeira de lei com altura de 12cm posicionadas com vãos equidistantes.

Sobre as peças de madeira foi utilizado um perfil de aço H para distribuição das cargas. Foram registrados tanto a carga aplicada quanto o deslocamento do painel em dois locais $l/2$ e $l/4$. A Figura 47 mostra os detalhes acima descritos.

Figura 47: Corte em perspectiva com detalhes do ensaio à flexão



Fonte: Elaborado pelo autor

3.10 Ensaio de desempenho estrutural

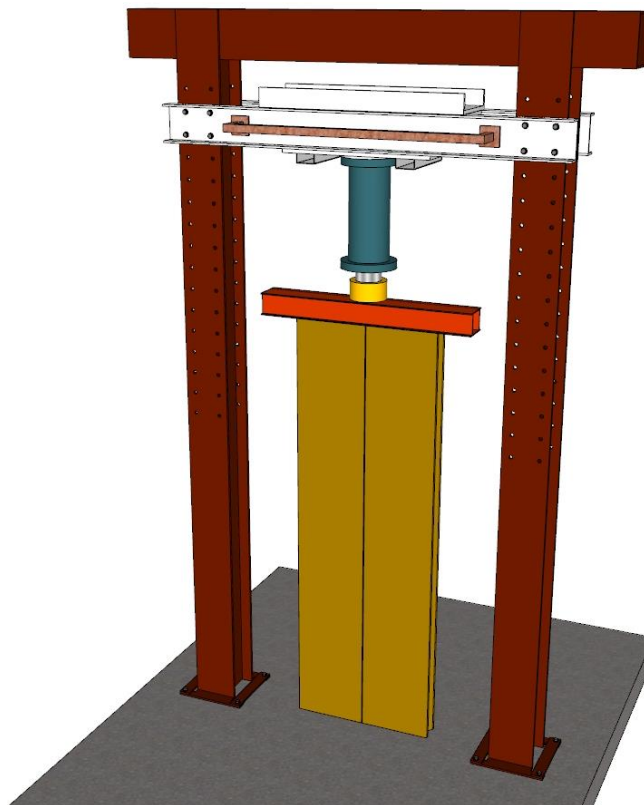
Um dos objetivos iniciais desse trabalho de tese era a construção de um protótipo para realização dos ensaios de desempenho estrutural, entretanto por falta de estrutura, recursos financeiros e tudo isso agravado por conta do fechamento do laboratório ocasionado pela pandemia do Covid-19, não foi possível a confecção do protótipo. Dessa forma, todos os projetos relacionados ao protótipo ficarão como proposta para trabalhos futuros e disponível nesse trabalho de tese no Apêndice B.

Todavia, para realização dos ensaios de desempenho estrutural utilizou-se um recurso de adaptação da norma, uma vez que, como já citado os recursos físicos e financeiros eram escassos. Dessa forma, a máquina de ensaios universais (pórtico) do LABEME, foi empregado simulando uma carga fixa de 12kN sobre um módulo de dois painéis.

A Figura 48 mostra como o módulo foi posicionado no equipamento e sobre ele foi utilizado um perfil H de aço de 12cm de altura para distribuição da carga.

Foram ensaiados dois módulos, o módulo 1 foram realizados os ensaios de corpo duro, corpo mole e compressão e o modulo 2 foi realizado os mesmos do modulo 1 e mais o ensaio de carga suspensa.

Figura 48: Esquema de fixação dos painéis para de ensaio de desempenho estrutural



Fonte: Elaborado pelo autor

Nas Figura 49, Figura 50 e Figura 51 são apresentados os esquemas de execução dos ensaios realizados no módulo de painéis.

3.10.1 Ensaio de carga suspensa

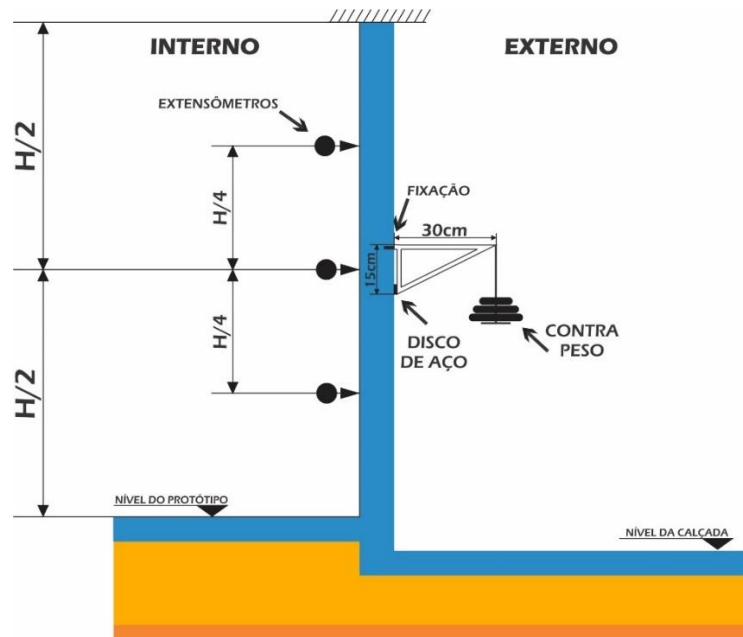
A Tabela 9 mostra os critérios e níveis para o ensaio de carga suspensa, foi seguido os procedimentos da ABNT NBR 11678:2016 que detalha a execução desse ensaio.

Tabela 9: Critérios e níveis para ensaio – Carga suspensa

Carga de ensaio aplicada em cada ponto	Massa de ensaio aplicada na peça	Critério de desempenho da NBR 15.575:2013	Limite de Deformação para o Módulo
0,4kN	80kg	Não ocorrência de falhas que comprometam o estado de limite de serviço Limitação do deslocamento horizontal: $d_h \leq h/500$ e $d_{hr} \leq h/2500$	$d_h \leq 4,80\text{mm}$ $d_{hr} \leq 0,96\text{mm}$

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 49: Esquema para ensaio de carga suspensa



Fonte: Elaborado pelo autor

3.10.2 Ensaio de impacto de corpo duro

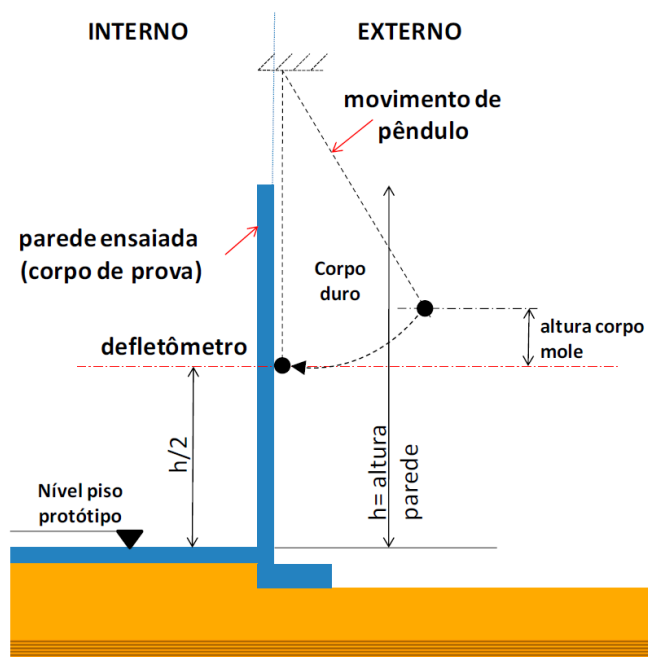
A execução do ensaio de impacto de corpo duro tomou como base os procedimentos descritos na NBR 11.675:2016 que descreve no subitem 6.2 o procedimento para o ensaio. A Tabela 10 descreve os níveis e quantidade de impacto que foram realizados no módulo.

Tabela 10: Níveis e quantidades de impacto para o ensaio de corpo duro

Massa de corpo duro	Altura	Energia de Impacto	Quantidade de Impactos
500g	50cm	2,5J	10
	100cm	5J	10
1000g	50cm	5J	10
	100cm	100J	10

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 50: Esquema para ensaio de impacto de corpo duro



Fonte: Adaptado de Lorenzi (2013)

3.10.3 Ensaio de impacto de corpo mole

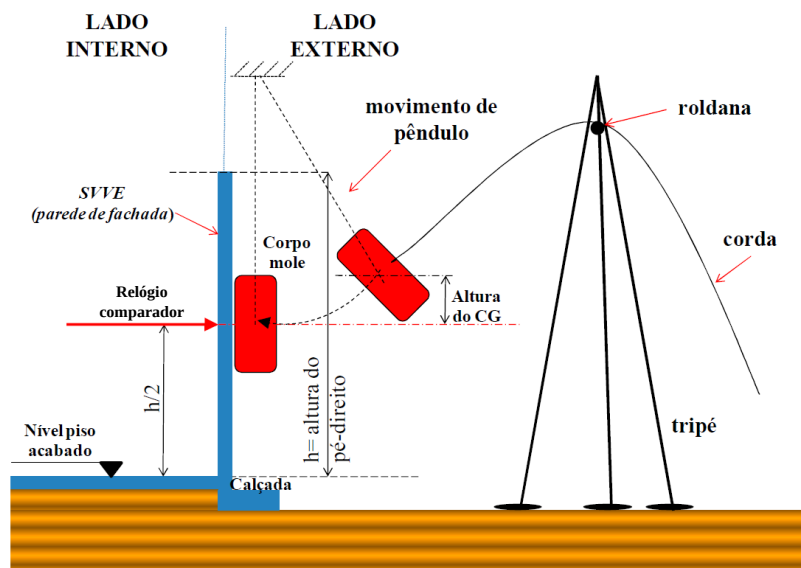
A Tabela 11 apresenta os critérios e níveis utilizados no ensaio de impacto de corpo mole realizados nos módulos descritos.

Tabela 11: Critérios e níveis para elementos estruturais – Impacto de corpo mole

Massa de corpo mole	Altura	Energia de Impacto	Critério da NBR 15.575:2013	Limite de Deformação para o Módulo
40kg	30cm	120J	Impactos de Utilização	Não ocorrência de falhas
	45cm	180J		
	60cm	240J	Impactos de Utilização	Não ocorrência de falhas Limitação do deslocamento horizontal: $d_h \leq h/250$ e $d_{hr} \leq h/1250$
	60cm	240J		
	60cm	240J		
	90cm	360J	Impactos de Segurança	Não ocorrência de ruína; são admitidas falhas localizadas (fissuras, destacamentos e outras)
	120cm	480J		
	180cm	720J		

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 51: Esquema para ensaio de impacto de corpo mole



Fonte: Adaptado de Lorenzi (2013)

3.10.4 Ensaio de compressão

O ensaio de compressão foi o último teste executado. Foram usados os mesmos módulos de painéis, logo, os mesmos já haviam sido submetidos aos ensaios de carga suspensa, ensaio de impacto de corpo duro e ensaio de impacto de corpo mole. Dessa forma, os módulos já haviam apresentado fissurações oriundas do teste anteriores.

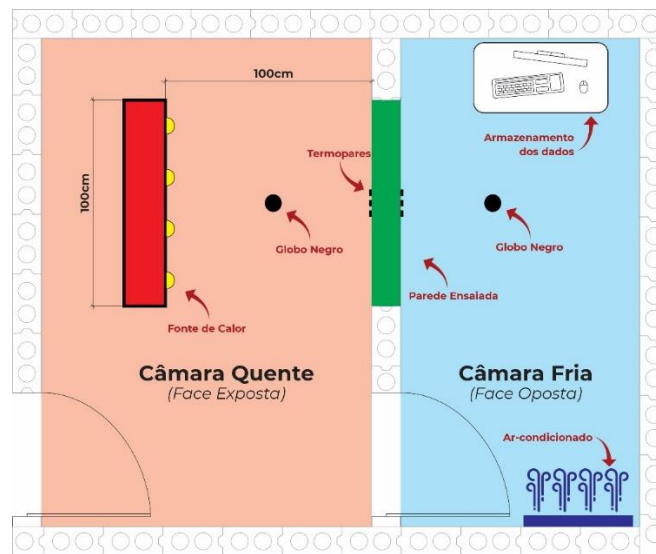
Para aferir a deformação do painel nesse ensaio foi utilizado um relógio comparador digital de precisão adequada posicionado a meia altura do painel. O esquema de fixação dos painéis foi o mesmo apresentado na Figura 48.

3.11 Ensaios de desempenho térmico

Foram utilizadas as normas ABNT NBR 15.575-1:2013 sobre requisitos gerais e onde estão definidos os procedimentos de ensaios de desempenho térmico, assim como, a ABNT NBR 15.575-4:2013 que define os requisitos e critérios de avaliação para sistemas vedações verticais internas e externas – SVVIE.

O ensaio de desempenho térmico foi realizado de acordo com a ABNT NBR 15575:2013 que faz referência a ABNT NBR 15220-2 que orienta sobre os métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. O ensaio foi realizado na câmara térmica do LABEME – UFPB. A Figura 52 apresenta um croqui do esquema de utilização da câmara térmica.

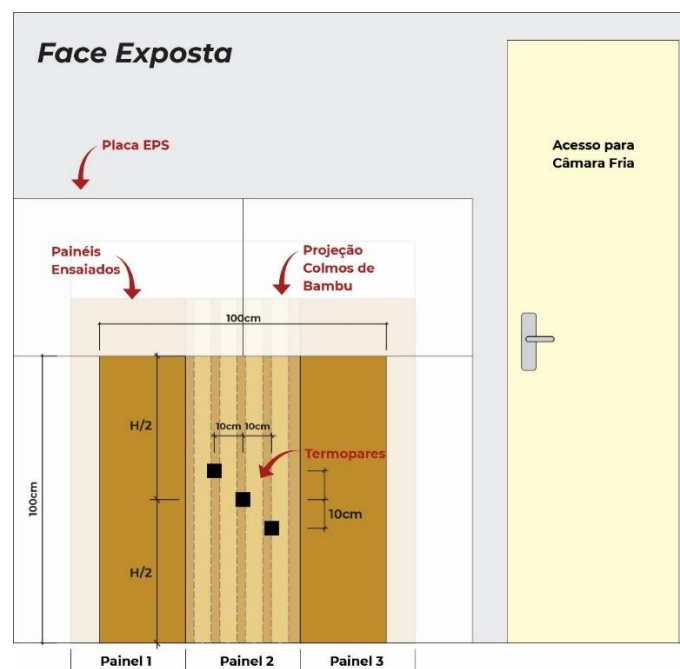
Figura 52: Representação do ensaio de desempenho térmico em câmara térmica



Fonte: Elaborado pelo autor

A Foram confeccionados painéis de 120cm de altura e 40cm de largura. Utilizando três painéis de 40cm totaliza-se uma área 120cm². Dessa área foi isolado com chapas de EPS e gesso de forma a se ter uma área útil de 1m², como mostra a Figura 53.

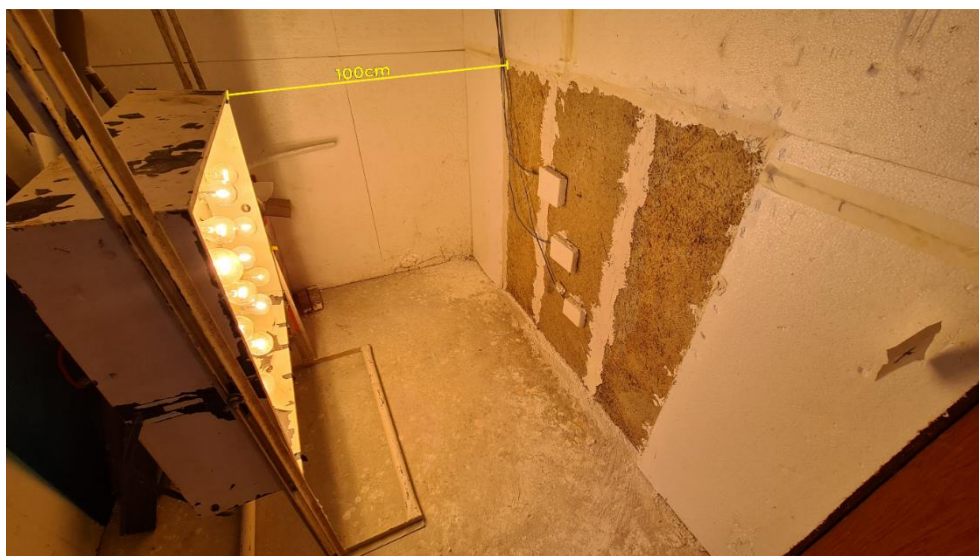
Figura 53: Corte mostrando o detalhe do posicionamento dos painéis



Fonte: Elaborado pelo autor

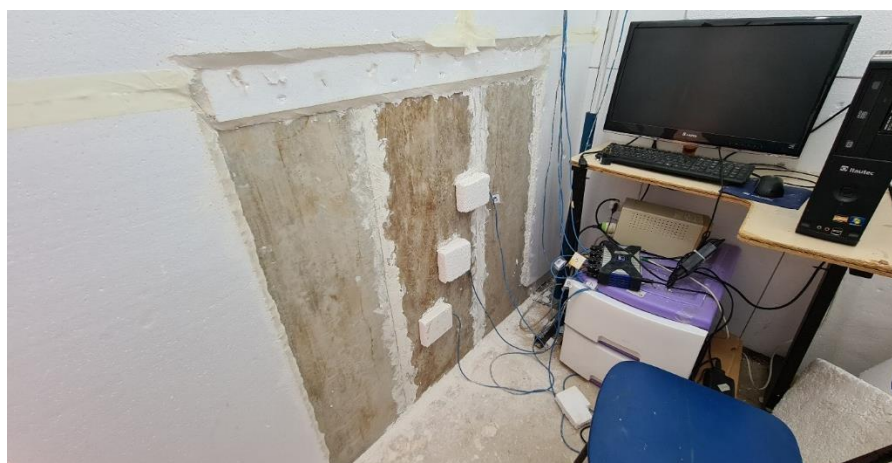
Como fonte de calor foi utilizado 12 lâmpadas incandescentes de 100W a uma distância de 100cm da parede em estudo. Foram utilizados 8 termopares sendo 3 localizados na face exposta ao calor 3 na face oposta de 2 aferindo a temperatura de cada ambiente. Como mostram a Figura 54 e Figura 55.

Figura 54: Ensaio de desempenho térmico em câmara térmica – Face exposta



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 55: Ensaio de desempenho térmico em câmara térmica – Face oposta



Fonte: Elaborado pelo autor

O ensaio foi realizado em cinco dias. No primeiro dia apenas a câmara quente foi ligada, o segundo dia tudo desligado, o terceiro dia apenas a câmara fria, no quarto dia tudo desligado e no quinto dia as duas câmaras ligadas. Dessa forma foi possível aferir a temperatura quem que cada lado da câmara térmica se estabiliza e atestar que tudo estava funcionando.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resistência à compressão do bambu fissurado

O comportamento dos corpos-de-prova durante os testes foi semelhante, sejam eles fissurados ou não. A diferença existiu entre as amostras sem e com nó, como conhecido e esperado.

O teor de umidade média de todas as amostras testadas foi de 13%, valor compatível com a umidade relativa do ar na época do ano e local onde foram realizados os testes.

As Tabela 12 e Tabela 13 apresentam os resultados de resistência à compressão paralela as fibras obtidos. Além dos valores médios de resistência à compressão paralela às fibras, foram obtidos o desvio padrão, coeficiente de variação e resistência característica (f_k) para cada grupo de amostras.

Em geral, as amostras fissuradas apresentam o maior coeficiente de variação, mas nem sempre. Isso significa que o valor característico é mais afetado quando há uma fissura na amostra. Portanto, é mais representativo comparar valores característicos do que valores médios.

A Figura 56 e a Figura 57 apresentam a resistência à compressão característica de uma maneira fácil de entender. Deles é possível dizer que:

Em relação à espécie, *B. vulgaris* apresenta resistência à compressão característica inferior a *P. pubescens*.

Em relação à relação diâmetro / altura não foi encontrada diferença significativa.

Em relação ao bambu fissurado e não fissurado, as amostras fissuradas apresentaram menor resistência, variando de 0,9% a 17,4%, e valor médio de 8,7%.

Tabela 12: Tabela resumo do ensaio de compressão paralelas às fibras para o *P. pubescens*

Compressão paralela às fibras (1:1) – <i>P. Pubescens</i>						
Variação		f _m (MPa)	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação	f _k (MPa)	Teor de Umidade
SEM	COM NÓ	63,08	5,65	8,95%	53,79	12,56%
FISSURA	SEM NÓ	67,64	5,33	7,88%	58,88	12,51%
Média		65,36			56,34	12,5%
COM	COM NÓ	57,99	7,39	12,74%	45,84	13,03%
FISSURA	SEM NÓ	62,82	4,37	6,96%	55,63	12,90%
Média		60,40			50,73	13,0%
Compressão paralela às fibras (1:2) – <i>P. Pubescens</i>						
Variação		f _m (MPa)	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação	f _k (MPa)	Teor de Umidade
SEM	COM NÓ	60,53	2,05	3,39%	57,15	12,67%
FISSURA	SEM NÓ	60,79	1,69	2,78%	58,01	13,38%
Média		60,66			57,58	13,0%
COM	COM NÓ	61,14	5,85	9,57%	51,51	13,36%
FISSURA	SEM NÓ	56,91	4,49	7,88%	49,53	13,09%
Média		59,02			50,52	13,2%

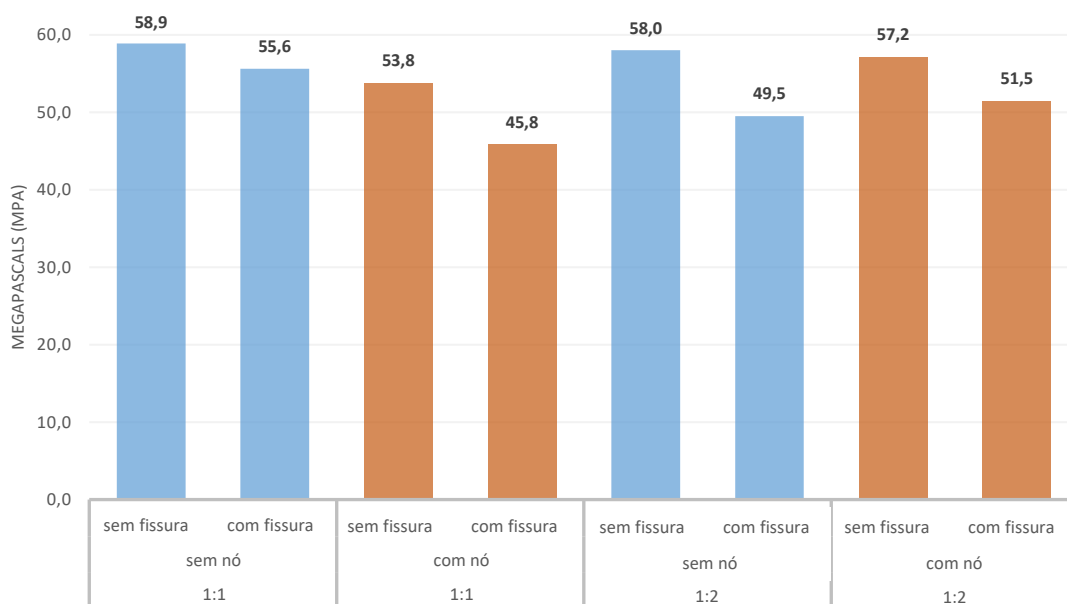
Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 13: Tabela resumo do ensaio de compressão paralelas às fibras para o *B. vulgaris*

Compressão paralela às fibras (1:1) – <i>B. vulgaris</i>						
Variação		f _m (MPa)	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação	f _k (MPa)	Teor de Umidade
SEM	COM NÓ	57,24	4,70	8,21%	49,51	14,28%
FISSURA	SEM NÓ	58,49	6,78	11,59%	47,34	13,63%
Média		57,86			48,42	14,00%
COM	COM NÓ	59,72	7,00	11,72%	48,21	13,00%
FISSURA	SEM NÓ	58,94	10,44	17,71%	41,77	13,50%
Média		59,33			44,99	13,30%
Compressão paralela às fibras (1:2) – <i>B. vulgaris</i>						
Variação		f _m (MPa)	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação	f _k (MPa)	Teor de Umidade
SEM	COM NÓ	59,25	4,36	7,37%	52,07	13,62%
FISSURA	SEM NÓ	55,20	7,17	13,00%	43,40	12,98%
Média		57,22			47,73	13,30%
COM	COM NÓ	60,95	10,92	17,92%	42,98	12,37%
FISSURA	SEM NÓ	63,74	7,40	11,61%	51,57	12,11%
Média		62,34			47,27	12,20%

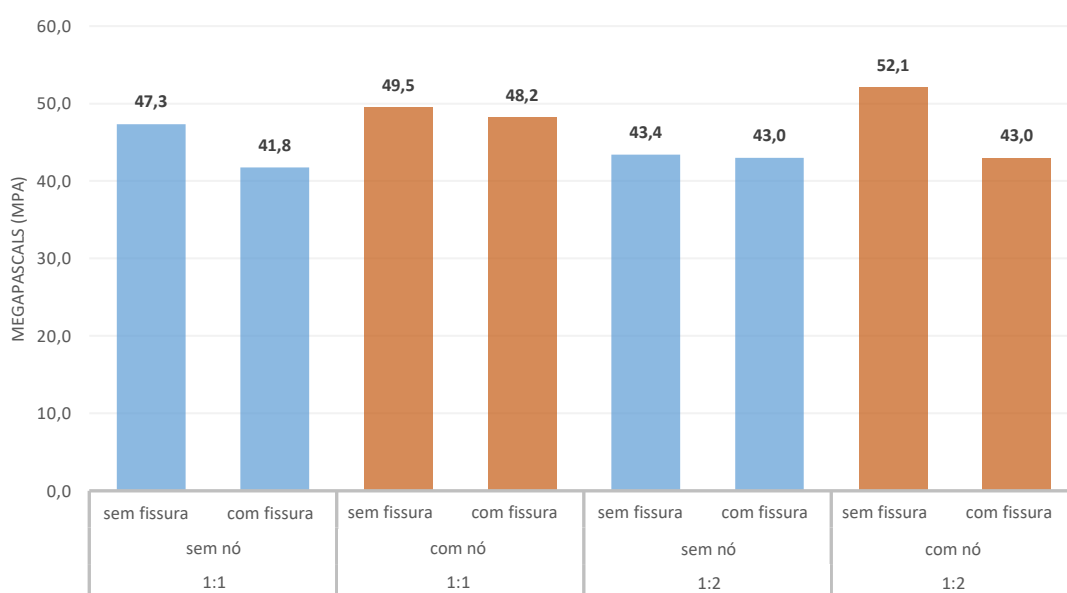
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 56: Resistencia característica do *P. pubescens*



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 57: Resistencia característica do *B. vulgaris*



Fonte: Elaborado pelo autor

Após a análise dos gráficos, foi possível observar para a espécie *P. pubescens* que há uma queda na resistência à compressão paralela às fibras da ordem de 6% a 15%. Para a espécie *B. vulgaris*, a variação na queda da resistência pode chegar a 18%.

A presença de um nó no centro do corpo de prova não parece interferir significativamente na resistência à compressão característica do bambu.

Como ordem de grandeza, pode-se ver que a resistência característica à compressão paralela às fibras do *Bambusa vulgaris* é ligeiramente superior a 40 MPa.

4.2 Resistências Características do *Bambusa vulgaris*

Os resultados de resistência característica para os ensaios de resistência a tração e cisalhamento paralela às fibras, como dados oriundos de Gomes Neto (2017) consta na Tabela 14 e Tabela 15.

Tabela 14: Resistências médias e característica à tração paralela às fibras

	Com Nó (MPa)	Sem Nó (MPa)	Teor de Umidade (%)
Base	94,2	112,0	11,0%
Meio	87,9	111,9	11,1%
Topo	91,9	106,5	10,3%
Média	91,3	110,1	10,8%
Desvio Padrão	28,76	40,78	0,98%
Coefficiente de Variação	31,49%	37,02%	9,06%
Resistência Característica	44,0	43,0	

Fonte: Adaptado de Gomes Neto (2017)

Tabela 15: Resistência média e característica ao cisalhamento paralelo às fibras

	Com Nó (MPa)	Sem Nó (MPa)	Teor de Umidade (%)
Base	5,6	4,9	11,0%
Meio	6,7	4,4	11,1%
Topo	7,0	4,1	10,3%
Média	6,4	4,4	10,8%
Desvio Padrão	1,99	1,17	0,98%
Coefficiente de Variação	31,10%	26,43%	9,06%
Resistência Característica	3,12	2,47	

Fonte: Adaptado de Gomes Neto (2017)

Os resultados mostram que o coeficiente de variação é muito maior nos ensaios de tração e de cisalhamento que no de compressão. Assim, apesar da resistência média à tração ser muito maior que a de compressão, a resistência característica é ligeiramente superior.

As resistências médias são coerentes com resultados da literatura, mesmo para outras espécies de bambu. Como mostra a Tabela 16 e Tabela 17.

Tabela 16: Comparativo de resultados do ensaio de tração paralela às fibras para diferentes espécies de bambu

Comparativo de Resistências à Tração Paralela às Fibras (MPa)										
	Bv	Bv (2)	Bv (3)	Gspp	Gw	Ga	Gs	Dg (1)	Dg (2)	Dg (3)
Base com nó	94,2	94,3	161,7	86,5	72,2	69,9	109	103	109	107
Meio com nó	87,9		155,3	73,5	-	82,6	-	118	170	144
Topo com nó	91,9		145,3	91,2	-	64,3	116	114	119	114
Média	91,3	94,3	154,10	83,7	72,2	72,3	112,5	111,7	132,7	121,7
Base sem nó	112,0	117,9	-	239	256	93,4	143	240	159	147
Meio sem nó	111,9		-	228	-	95,8	-	250	224	188
Topo sem nó	106,5		-	210	-	116	151	247	147	158
Média	110,1	117,9	-	225,7	256,0	101,7	147,0	245,7	176,7	164,3

Fonte: Adaptado de Murad (2011)

Sendo:

- Bv – *Bambusa vulgaris* (GOMES NETO, 2017);
- Bv (2) – *Bambusa vulgaris* (MBUGE, 2000);
- Bv (3) – *Bambusa vulgaris* (SILVA, 2007)
- Gspp – *Guadua spp* (MURAD, 2011);
- Gw – *Guadua weberbaueri* (MURAD, 2007)
- Gs – *Guadua superba* (GHAVAMI e TOLEDO FILHO, 1992);
- Ga – *Guadua angustifolia* (GHAVAMI e MARINHO, 2005)
- Dg (1) – *Dendrocalamus giganteus* (PEREIRA, 2006b)
- Dg (2) – *Dendrocalamus giganteus* (GHAVAMI e MARINHO, 2001);
- Dg (3) – *Dendrocalamus giganteus* (GHAVAMI e TOLEDO FILHO, 1992).

Pode-se observar que o *B. vulgaris* encontra-se na média das resistências à tração paralela às fibras apresentadas para os corpos de prova com nó. Entretanto para os corpos de prova sem nó, o *B. vulgaris* apresenta-se como uma das espécies de bambu com as menores resistências à tração paralela às fibras.

Tabela 17: Comparativo de Resistências ao Cisalhamento Paralelo às Fibras

Comparativo de Resistências ao Cisalhamento (MPa)					
	Bv	Gspp	Gw	Ga	Dg
Base com nó	5,6	2,5	3,6	1,7	3,2
Meio com nó	6,7	2,7	-	1,4	3,2
Topo com nó	7,0	2,3	-	2,1	4,2
Média	6,4	2,5	3,6	1,7	3,6
Base sem nó	4,9	3,7	4,5	2,2	2,3
Meio sem nó	4,4	4,4	-	2,3	4,2
Topo sem nó	4,1	3,8	-	2,4	3,6
Média	4,4	4,0	4,5	2,3	3,4

Fonte: Adaptado de Murad (2011)

Sendo:

- Bv – *Bambusa vulgaris* (GOMES NETO, 2017);
- Gspp – *Guadua spp* (MURAD, 2011);
- Gw – *Guadua weberbaueri* (MURAD, 2007)
- Ga – *Guadua angustifolia* (GHAVAMI e MARINHO, 2005)
- Dg – *Dendrocalamus giganteus* (GHAVAMI e MARINHO, 2001).

4.3 Agregados

A Tabela 18, apresenta-se o resultado dos ensaios de caracterização dos agregados utilizados para produção do concreto utilizado na confecção dos traços iniciais.

Tabela 18: Ensaios de caracterização dos agregados

Ensaio	Unidade	Areia Grossa	Areia Fina	EVA
Massa Unitária	kg/dm ³	1,40	1,55	0,25
Massa Específica	g/cm ³	2,60	2,63	-----
Módulo de finura	---	3,17	2,27	5,44
Dimensão característica máxima	mm	4,75	2,36	9,5

Fonte: Elaborado pelo autor

4.4 Traços

4.4.1 Resultados dos traços iniciais

Dentre os traços estudados como já retrocitado, foram adotados os traços denominados Traço 6 e Traço 7. A partir da determinação por meio de observação empírica da consistência, aderência e do consumo de cimento, foram moldados corpos de prova para verificar a resistência à compressão ao 7 e 28 dias, assim como a consistência, por meio de ensaio em mesa de espalhamento e a densidade da mistura em seu estado fresco. Os resultados desses ensaios podem ser observados na Tabela 19.

Tabela 19: Resultados dos traços adotados

IDADE	PARÂMETROS	TRAÇO 6	TRAÇO 7
7 dias	Resistência à Compressão (MPa)	14,4	6,4
	Desvio Padrão	0,8	0,1
	Coeficiente de Variação	5,30%	2,24%
28 dias	Resistência à Compressão (MPa)	17,5	7,9
	Desvio Padrão	3,4	0,9
	Coeficiente de Variação	19,19%	10,72%
Fresco	Consistência (Mesa de Espalhamento)	380 mm	175 mm

Fonte: Elaborado pelo autor

4.4.2 Resultados dos traços com partículas de bambu

A Tabela 20 apresenta dos resultados de densidade aparente e resistência a compressão dos corpos de prova para cada traço desenvolvido com a utilização de partículas de bambu.

Tabela 20: Densidade Aparente e Resistência à compressão dos traços testados

Traço	Densidade Aparente (g/cm ³)		Resistência à compressão (MPa)	
	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias
TBAM1	---	---	1,1	1,3
TBAM2	1,34	1,29	9,4	10,3
TBAM3	1,38	1,12	5,6	7,1
TBAM4	1,37	1,17	5,9	7,2

Fonte: Elaborado pelo autor

Pode-se observar que o TBAM2 foi o traço mais resistente, chegando a 10MPa aos 28 dias. Entretanto, foi identificado um alto consumo de Metacaulim o que inviabilizaria seu uso em grandes volumes, uma vez que o Metacaulim é o fino de maior preço. Outro ponto observado foi que o painel por ser estrutural e a maior parte da resistência ser direcionada para os colmos de bambu, não é necessário uma alta resistência para o concreto. Dessa forma, os traços TBAM3 e TBAM4 foram confeccionados com o objetivo de reduzir o consumo de Metacaulim, mantendo pelo menos 50% da resistência do TBAM2.

4.5 Painéis modulares em escala reduzida

Para verificar o comportamento dos painéis com os traços adotados foram moldados alguns painéis em escala reduzida e de forma empírica foram realizados teste preliminares para observar o comportamento para as hipóteses levantadas. O painel em escala reduzida citado possui as seguintes dimensões: 40 cm de largura x 12 cm de espessura x 100 cm de comprimento. Possui encaixes macho-fêmea nas laterais e na parte superior os colmos de bambu ultrapassam a forma em 5 cm para simular o comportamento dos painéis em escala real. A forma foi feita em madeira, e o dimensionamento e angulação dos encaixes macho-fêmea permaneceram os mesmo que utilizados por esse autor na sua pesquisa de mestrado. Foram utilizados espaçadores de concreto de 2,5 cm de espessura para as duas faces, garantido que os colmos permanecem centralizados e com o recobrimento correto. Os colmos de bambu foram travados entre si por meio de uma cavilha de bambu transpassada após pré-furo dos colmos. Para facilitar a desmoldagem foi utilizado desmoldante na fôrma. Foi utilizado para confecção dos painéis em escala reduzida o traço T7 desenvolvido com uma mistura de cimento, cal, areia, EVA e aditivo superplastificante. A Figura 58 mostra a montagem do painel reduzido 1, antes da concretagem. Observa-se que nesse painel não foi utilizado nenhum produto sobre o bambu.

Figura 58: Montagem do Painel Reduzido 1



Fonte: Elaborado pelo autor

Após a concretagem o painel moldado foi coberto com uma lona plástica. Além disso, duas vezes ao dia, durante 7 dias, o painel foi molhado e recoberto com a lona plástica para evitar a perda brusca de água. A desforma deu-se após 3 dias do painel concretado. Mesmo com todos os cuidados tomados surgiram algumas fissuras, como mostra a Figura 59.

Figura 59: Pannel 1 concretado, destaque para as fissuras que surgiram



Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando-se o painel podem ser aventadas algumas hipóteses que podem ter levado a gerar essas fissuras. O que se pode notar é que as fissuras geralmente estendem-se por todo comprimento da peça e que ao passar do tempo as mesmas tendem a aumentar chegando a cerca de 1mm de abertura. A Figura 60 mostra em detalhe a fissura localizada abaixo do encaixe.

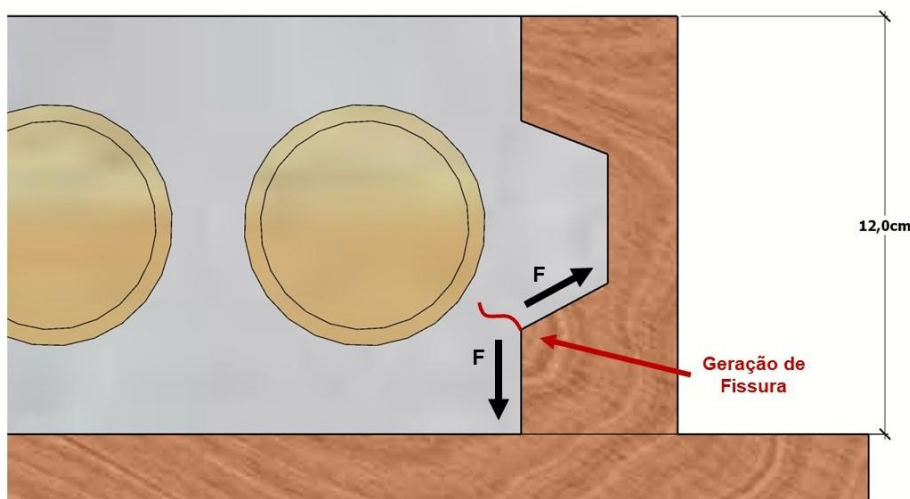
Figura 60: Fissura longitudinal em detalhe



Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se, na Figura 60, que como foi retrocitado a fissura estende-se por todo comprimento da peça. Com o intuito de entender o motivo dessa fissuração foram adotadas algumas hipóteses. Uma delas, em concordância com Ghavami (2005), propôs que houve uma expansão do colmo de bambu por absorção da água de amassamento do concreto quando utilizado nessas condições. Isto provoca tensões de dentro para fora causando microfissuras até evoluir para uma situação como a observada na figura anterior. Outra hipótese que pode ser aventada é que o desenho da forma na região do encaixe possui ângulos quase retos causando uma tensão no concreto em uma região mais enfraquecida. O esquema apresentado na Figura 61 mostra os principais esforços atuantes para nesta situação.

Figura 61: Esquema gráfico de esforços para aparecimento de fissura



Fonte: Elaborado pelo autor

Com é possível observar na nesse esquema a resultante das forças gera uma tensão que agravada com a expansão dos colmos de bambu e tende a gerar uma fissura longitudinalmente a eles.

Outra fissura semelhante pode ser observada na face superior do painel com relação à posição de concretagem, como pode ser observada na Figura 62.

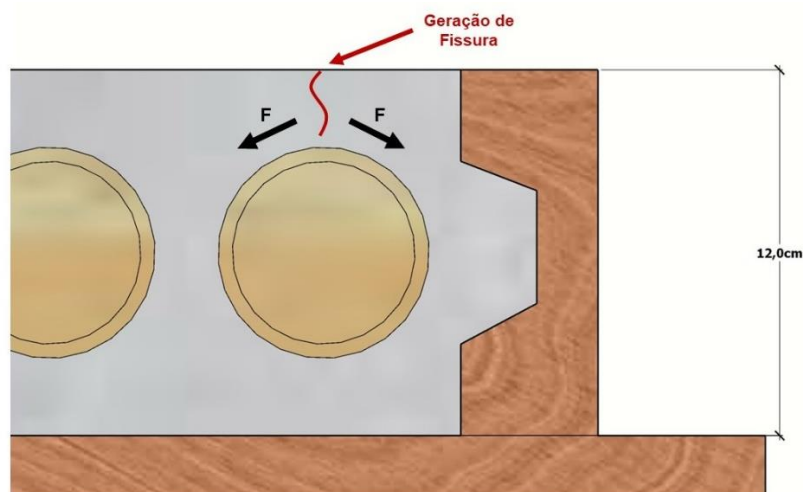
Figura 62: Fissura longitudinal em detalhe



Fonte: Elaborado pelo autor

Semelhantemente à fissura comentada anteriormente, aquela apontada na Figura 60 é uma fissura longitudinal que acompanha o posicionamento do colmo de bambu dentro do painel. Isso indica que a primeira hipótese já citada sobre a expansão do bambu também é válida para essa situação, assim como a hipótese apontada e esquematizada por meio da Figura 63.

Figura 63: Esquema gráfico de esforços para aparecimento de fissura



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 63, mostra o esquema gráfico para demonstração das forças atuantes quando o painel é concretado. Observa-se que por conta da forma cilíndrica dos colmos de bambu, na face superior a concretagem do painel gera forças opostas acompanhando o colmo. Unindo-se esse problema aquele da expansão dos colmos há uma tendência a uma fissuração longitudinal.

Esse problema surge apenas na face do painel que não estava em contato com a forma e a evaporação da água é intensa, ainda que tomadas as precauções de cura. Na face inferior o concreto permanece em perfeito estado como pode ser visto na Figura 64.

Figura 64: Comparação de faces do painel modular em escala reduzida 1



Fonte: Elaborado pelo autor

Com o objetivo de reduzir o inchamento dos colmos de bambu por meio da absorção da água de amassamento, procurou-se uma solução viável no mercado, chegando a um impermeabilizante de base asfáltica, indicado para impermeabilização de madeiras. O mesmo foi aplicado em duas demãos cruzadas, respeitando-se o tempo de secagem. A Figura 65 mostra os bambus com o impermeabilizante aplicado.

Figura 65: Bambus com impermeabilizante aplicado



Fonte: Elaborado pelo autor

Após a finalização da segunda demão do produto impermeabilizante foi feita uma inspeção por pontos de possíveis falhas. Entretanto mesmo com o uso desse produto surgiram fissuras ao longo do comprimento do painel, como mostram as Figura 66 e Figura 67.

Figura 66: Detalhe da fissuração no Painel 2



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 67: Detalhe na fissuração do Painel 2

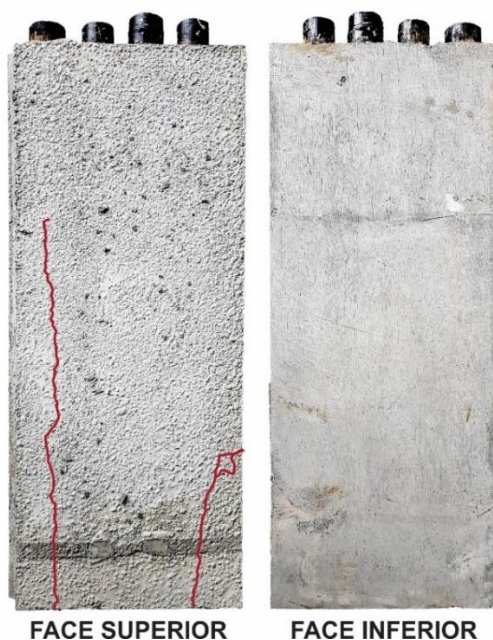


Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se que por algum motivo a fissuração foi ainda maior nesse painel onde os colmos foram impermeabilizados que do painel onde não houve essa impermeabilização. Esse resultado de fissurações não era esperado pelo fato de o Painel 2 foi moldado com o Traço 7 que possui menos cimento e areia grossa, com o objetivo de reduzir a retração do mesmo. Diferente do Painel 1 que foi moldado com o Traço 6, o qual tem um maior consumo de cimento por metro cúbico de concreto e foi utilizado uma areia fina, dessa forma, na teoria esse traço deveria apresentar uma retração mais elevada.

Um ponto em comum entre o Painel 1 e o Painel 2 é o não surgimento de fissuras na sua face inferior em relação à posição dos colmos de bambu na moldagem, como mostra a Figura 68.

Figura 68: Faces superior e inferior do Painel 2



Fonte: Elaborado pelo autor

Como forma de resolver o problema da fissuração dos colmos foi desenvolvido o traço com o uso de partículas de bambu, as quais aumentam a resistência à tração da argamassa reduzindo a possibilidade do surgimento de fissuras. Para dar sequência ao trabalho foram moldados os painéis com 2,40m de altura, empregando-se o traço TBAM4. Foram moldados 5 painéis sendo 4 deles utilizados para os ensaios de desempenho estrutural e 1 painel para a realização do ensaio de flexão de 4 pontos. Para o ensaio de desempenho térmico foram moldados 3 painéis de 1,20m.

4.6 Ensaio de resistência à flexão do painel

Nessa seção apresentados os resultados para o ensaio de flexão de 4 pontos do painel modular. A Figura 69 ilustra o início da aplicação de carga no painel enquanto a Figura 70 mostra o momento de máxima tensão aplicada.

Figura 69: Ensaio de flexão no painel modular



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 70: Ensaio de flexão no painel modular

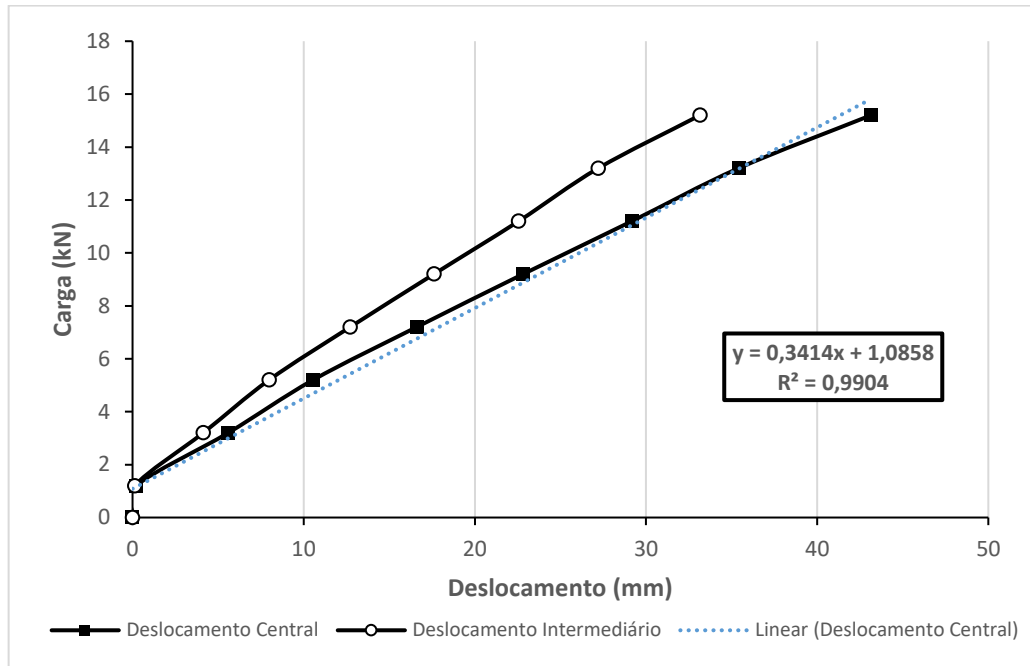


Fonte: Elaborado pelo autor

O painel pesou 106 kgf, o que representa uma carga distribuída aproximada de 10 kN/m^2 , bem inferior ao das lajes pré-moldadas muito usadas na região, cujo peso é cerca de o dobro desse valor.

A Figura 71 apresenta os gráficos carga deslocamento obtidas no ensaio. Uma das curvas se refere ao extensômetro no meio do vão e a outra aquela posicionada sob uma das cargas concentradas. A carga de ruptura do painel foi de 18,7kN. O comportamento do painel é praticamente linear.

Figura 71: Gráfico carga x deslocamento do ensaio de flexão do painel modular



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 72 apresenta o padrão de fissuras geradas pelo ensaio de flexão.

Figura 72: Painel fissurado após o ensaio de flexão



Fonte: Elaborado pelo autor

A equação da resistência dos materiais que relaciona a flecha no meio do vão ao carregamento da Figura 73, é:

$$\delta = \frac{23PL^3}{1296EI}$$

A rigidez à flexão, EI pode ser obtida por:

$$EI = \frac{23PL^3}{1296.\delta}$$

Escolhendo um par de pontos (P, δ) na curva força deslocamento no meio do vão, por exemplo P = 4,7 kN e δ = 10 mm, para um painel individual tira-se:

$$EI_p = 888.155 \text{ kN.cm}^2 = 88,8 \text{ kN.m}^2$$

Por metro de largura, pode-se dividir aquele valor pela largura do painel, 0,40 m, obtendo-se:

$$EI = 2.220.400 \text{ kN.cm}^2/\text{m} = 222 \text{ kNm}^2/\text{m}$$

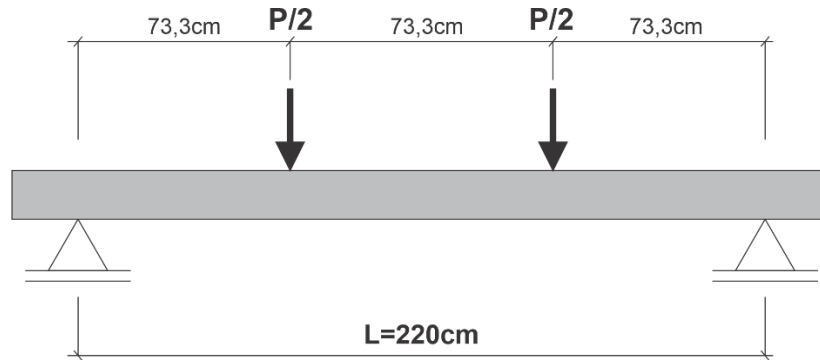
Ainda que esse valor seja variável de um painel para outro, em virtude de os colmos do bambu não serem iguais uns aos outros, tem-se pelo menos uma ordem de grandeza da rigidez a flexão desse elemento estrutural.

4.6.1 Avaliação da carga de serviço

Pode-se considerar que a carga de serviço, também chamada carga de utilização, é aquela que conduz a uma flecha de $L/300$. No caso, considerando a Figura 73, vê-se que a flecha limite é:

$$\delta_{\text{lim}} = 220/300 = 0,73 \text{ cm} = 7,3 \text{ mm}$$

Figura 73: Painel com duas cargas concentradas



Fonte: Elaborado pelo autor

No gráfico da Figura 71 tira-se a carga correspondente àquela deformação:

$$P = 0,3414 \delta_{\text{max}} + 1,0858$$

$$P = 3,0 \text{ kN}$$

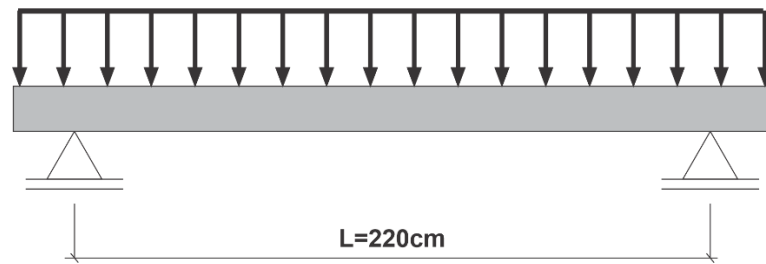
A equação que relaciona a flecha no meio do vão ao carregamento da Figura 73, é a já indicada no item anterior:

$$\delta = \frac{23PL^3}{1296EI}$$

Considerando agora a flecha produzida por uma carga uniformemente distribuída sobre o painel, o que é mais lógico em lajes, tem-se (Figura 74):

$$\delta = \frac{5qL^4}{384EI}$$

Figura 74: Painel com carga distribuída



Fonte: Elaborado pelo autor

Igualhando-se as duas flechas acham-se:

$$q_1 = \frac{184}{135} \cdot \frac{P}{L} \text{ (kN/m)}$$

Para $P = 3 \text{ kN}$ e $L = 220 \text{ cm}$, tem-se:

$$q_1 = 1,86 \text{ kN/m}$$

Como a largura do painel é de $0,4 \text{ m}$, então a carga equivalente por metro quadrado seria:

$$q = \frac{q_1}{0,4} = 1,86/0,4$$

$$\mathbf{q = 4,6 \text{ kN/m}^2}$$

Então, mesmo considerando que a carga acidental de $2,0 \text{ kN/m}^2$, mais 1 kN/m^2 de revestimento, a peça com esse vão poderia servir de laje de piso e se comportar adequadamente.

Pode-se investigar até que vão poderia ser usado o painel como laje, limitada a flecha a $L/300$, e um carregamento de 3 kN/m^2 .

De

$$\delta = \frac{5qL^4}{384EI}$$

Com $\delta = L/300$

$$L = [(384/1500) \cdot EI/q]^{1/3}$$

Então, para $EI = 222 \text{ kN.m}^2/\text{m}$ e $q = 3 \text{ kN/m}^2$

Acha-se

$$L = 2,66 \text{ m}$$

Portanto, os painéis com vãos superiores a $2,66 \text{ m}$ já conduziram a flecha superior a $L/300$ para um carregamento de 3 kN/m^2 . Isso indica que o painel é bastante flexível.

Para uso como forro, o vão que produziria aquela flecha com carregamento de $1,5 \text{ kN/m}^2$ seria 3,35 m, que já é um valor razoável para habitações populares.

4.7 Ensaio de desempenho estrutural

Nessa sessão serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de desempenho estrutural realizados nos painéis propostos.

4.7.1 Ensaio de carga suspensa

O ensaio de carga suspensa foi realizado no conjunto de painéis número 2. O dispositivo utilizado foi fixado ao painel e preparado para o carregamento. Pode-se observar na Figura 75 o dispositivo fixado no centro do painel.

Figura 75: Dispositivo de ensaio fixado aos painéis



Fonte: Elaborado pelo autor

Foram utilizadas duas buchas número 10 para fixação do dispositivo de ensaio no painel proposto a Figura 76 ilustra o modelo de bucha aplicada.

Figura 76: Tipo de bucha utilizada para fixação do dispositivo no painel



Fonte: Elaborado pelo autor

Foram utilizadas anilhas de aço como carga para aplicar o peso referenciado em norma. Para esse ensaio foram utilizadas 7 anilhas de 8kg e 2 anilhas de 4kg, totalizando 80kg como previsto em norma. O carregamento foi feito gradualmente de 8 em 8 quilos alternando-se o lado de carregamento a cada acréscimo. O intervalo entre acréscimo de anilhas foi de 2 minutos. A Figura 77 mostra o dispositivo após o carregamento total.

Figura 77: Dispositivo de carga suspensa carregado



Fonte: Elaborado pelo autor

Sob carregamento a estrutura permaneceu por 24 horas. Mesmo após esse período não houve qualquer sinal de arrancamento das buchas do painel. A Figura 78 mostra em detalhe a fixação do dispositivo.

Figura 78: Detalhe da fixação do dispositivo após 24h sob carregamento total



Fonte: Elaborado pelo autor

Foram utilizados três relógios comparadores para medir os deslocamentos oriundos do carregamento do dispositivo de ensaio. A Figura 79 mostra a disposição dos mesmos.

Figura 79: Dispositivos utilizados para medir o deslocamento do painel



Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 21 apresenta os dados obtidos por meio dos relógios comparadores para o ensaio de carga suspensa. O dispositivo do meio foi posicionado na posição $h/2$ enquanto os demais foram posicionados na altura $h/4$.

Tabela 21: Leitura do relógio comparadores no ensaio de carga suspensa

Relógios comparadores (mm)			Massa
Superior	Meio	Inferior	
0,02	-0,03	0	8kg
0,01	-0,04	0,02	16kg
-0,01	-0,06	0,03	24kg
-0,02	-0,07	0,03	32kg
-0,06	-0,10	0,03	40kg
-0,08	-0,11	0,04	48kg
-0,08	-0,11	0,05	56kg
-0,11	-0,12	0,06	64kg
-0,16	-0,14	0,06	72kg
-0,17	-0,15	0,07	80kg

Fonte: Elaborado pelo autor

O resultado desse ensaio foi satisfatório uma vez que dentro dos limites de deslocamento horizontal instantâneo (d_h) e deslocamento horizontal residual (d_{hr}) foram inferiores aos determinados em norma. Os limites para esse ensaio são $d_h \leq 4,80\text{mm}$ e $d_{hr} \leq 0,96\text{mm}$, respectivamente.

Outros estudos como o de Lima Filho (2008) também realizado no LABEME chegaram a resultados satisfatórios. Esse estudo foi conduzido em um protótipo feito com blocos cimentícios com adição de EVA (Figura 80). Registrou-se que os valores das deformações registradas na parede ensaiada foram muito pequenos, ficando inferiores às deformações limite e residuais, atendendo aos critérios da norma.

Figura 80: Suporte de aplicação da carga suspensa no de protótipo EVA



Fonte: Lima Filho (2008)

Ainda nesse estudo foi realizado o mesmo ensaio em um protótipo com blocos de solo-cimento, que apresentou também resultado positivo quanto ao ensaio de peça suspensa, sem nenhuma ocorrência.

Figura 81: Execução do ensaio de peça suspensa do protótipo com blocos solo-cimento



Fonte: Lima Filho (2008)

4.7.2 Ensaio de impacto de corpo duro

O ensaio de corpo duro seguiu os procedimentos descritos na ABNT NBR 11.675:2016. Foram realizados 40 impactos, sem repiques, sendo 20 com esfera de 500g e 20 com esfera de 1000g. Aplicados aleatoriamente em uma das faces do corpo de prova.

A Tabela 22 e a Tabela 23 apresentam os valores obtidos no ensaio de corpo duro para os dois módulos ensaiados.

Tabela 22: Resultados dos impactos de corpo duro para o Módulo 1

Número do Impacto	Deformação (mm)				Dados
	Esfera de 500g		Esfera de 1000g		Massa da esfera
	50cm	100cm	50cm	100cm	Altura do impacto
1	0	1,2	0	0	Profundidades das mossas em milímetros
2	0	1,4	0	0	
3	0	1,1	0	0	
4	0	1,3	0	0	
5	0	1,4	0	0	
6	1,1	0	0	0	
7	0,5	0	0	0	
8	1,2	0	0	0,5	
9	0	0	0	1,5	
10	1,0	0	0	1,3	

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 23: Resultados dos impactos de corpo duro para o Módulo 2

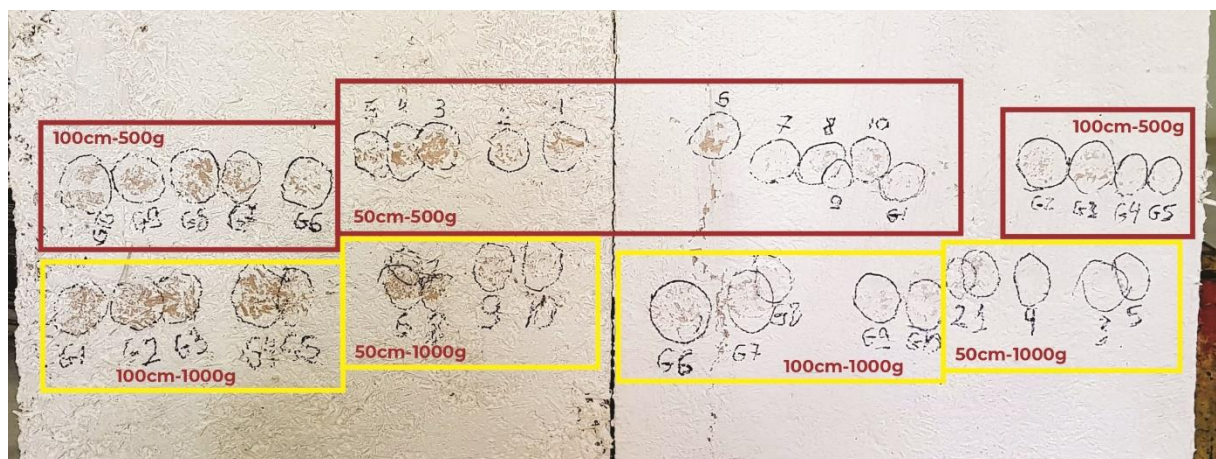
Número do Impacto	Deformação (mm)				Dados
	Esfera de 500g		Esfera de 1000g		Massa da esfera
	50cm	100cm	50cm	100cm	Altura do impacto
1	0	0	0,5	0	Profundidades das mossas em milímetros
2	1,0	1,0	0	0	
3	1,0	1,0	0,5	0	
4	1,0	0	0	1,5	
5	1,0	1,0	0,5	1,6	
6	0	1,2	0	0	
7	0	1,1	0,5	1,4	
8	0	1,3	0	1,7	
9	0	1,1	0,5	1,5	
10	0	1,4	0	0	

Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando os resultados dos impactos pode-se constatar que não houve nenhum impacto que causou fissuração ou deslocamentos. Todos os impactos foram superficiais e, quando muito, destacaram a pintura de cal aplicada.

A Figura 82 e a Figura 83 mostram em detalhe as marcações dos impactos aplicados nos Módulos 1 e 2.

Figura 82: Marcação dos impactos de corpo duro no Módulo 1



Fonte: Elaborado pelo autor

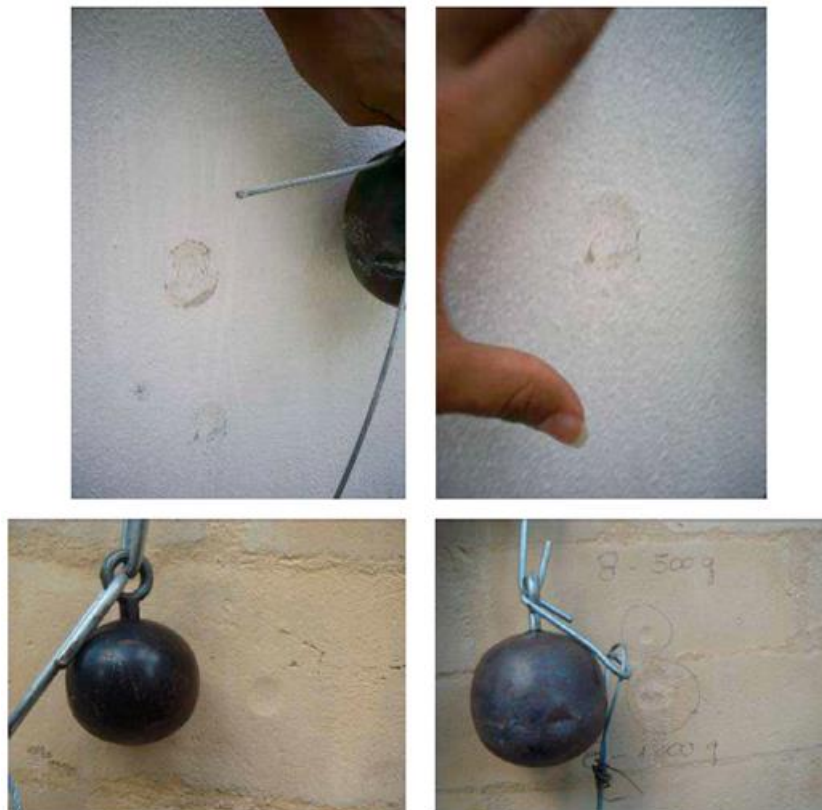
Figura 83: Marcação dos impactos de corpo duro no Módulo 2



Fonte: Elaborado pelo autor

Em comparação com o estudo de Lima Filho (2008) que para o ensaio de impacto de corpo duro em parede de bloco de solo-cimento e blocos cimentícios com adição de EVA os resultados também foram muito semelhantes. Em seu estudo Lima Filho (2008) registrou ocorrências máximas de afundamento na ordem de 1,5mm nos blocos em ambos protótipos (Figura 84).

Figura 84: Detalhe dos danos causados à parede após ensaio de impacto de corpo duro



Fonte: Lima Filho (2008)

4.7.3 Ensaio de impacto de corpo mole

Como já descrito no Capítulo 3 desse trabalho, o ensaio de corpo mole foi realizado em dois módulos, compostos por dois painéis cada. Foram realizados 8 impactos em cada módulo com diferentes energias e aferidas as deformações instantâneas e residuais em cada impacto.

Os impactos dividem-se em impactos de utilização (até a energia de 240J) e impactos de segurança (de 360J até 720J). Esse ensaio atende a um dos critérios de desempenho estrutural determinados pela ABNT NBR 15.575:2013 – Desempenho das edificações.

A Figura 51 apresentou o esquema de realização desse ensaio, a Tabela 24 e a Tabela 25 apresentam os resultados de deformação instantânea e residual para o Módulo 1, assim como seus respectivos limites para o painel ensaiado.

Tabela 24: Resultados de deformação do Módulo 1

Energia	Altura	Deformação Instantânea	Deformação Residual	Limite Instantâneo	Limite Residual
120J	30cm	0,75mm	0,00mm	Sem falhas	Sem falhas
180J	45cm	3,54mm	0,40mm	Sem falhas	Sem falhas
240J	60cm	6,04mm	2,01mm	9,60mm	1,92mm
240J	60cm	8,62mm	1,22mm	9,60mm	1,92mm
240J	60cm	2,84mm	0,38mm	9,60mm	1,92mm
360J	90cm	4,16mm	2,90mm	Não ruína	Não ruína
480J	120cm	3,55mm	1,33mm	Não ruína	Não ruína
720J	180cm	12,46mm	5,10mm	Não ruína	Não ruína

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 25: Resultados de deformação do Módulo 2

Energia	Altura	Deformação Instantânea	Deformação Residual	Limite Instantâneo	Limite Residual
120J	30cm	1,70mm	1,26mm	Sem falhas	Sem falhas
180J	45cm	2,33mm	1,50mm	Sem falhas	Sem falhas
240J	60cm	10,33mm	3,13mm	9,60mm	1,92mm
240J	60cm	14,50mm	0,44mm	9,60mm	1,92mm
240J	60cm	7,80mm	0,52mm	9,60mm	1,92mm
360J	90cm	14,07mm	1,34mm	Não ruína	Não ruína
480J	120cm	10,40mm	1,35mm	Não ruína	Não ruína
720J	180cm	12,43mm	3,91mm	Não ruína	Não ruína

Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se nos resultados apresentados para o Módulo 1 e 2 que nos dois casos houve uma deformação superior ao limite de deformação (destacados na cor vermelha nas respectivas tabelas) estabelecido em norma no primeiro impacto de 240J. Acredita-se que essa deformação deve ter sido ocasionada por uma acomodação dos painéis na estrutura de fixação, uma vez que os mesmos não puderam ser ensaiados na forma em que foram projetados, com uma cinta de amarração travando os painéis na parte superior.

A limitação de altura do pórtico fez com que o ensaio fosse adaptado e utilizado como travamento superior dos painéis uma carga de 12kN, simulando a carga distribuída de uma laje sobre os painéis. Dessa forma, acredita-se que a repetição desse ensaio em um protótipo em escala real com todos os mecanismos de travamento (superior e inferior) dos painéis esse problema não irá se repetir.

A Figura 85 e Figura 86 mostra a fissuração apresentada na face oposta aos impactos de corpo mole para os Módulos 1 e 2.

Figura 85: Fissuras apresentadas no Módulo 1



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 86: Fissuras apresentadas no Módulo 2



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 85 e Figura 86 apresentam tipos de fissurações distintas. O tipo de fissuração apresentado no Módulo 1 além de fissuras horizontais, que já eram esperadas como as do Módulo 2, surgiram fissuras verticais, que seguem o direcionamento longitudinal dos colmos de bambu. Nesse caso, o bambu pode ter atenuado as vibrações oriundas do impacto causando esse tipo de fissuração.

Destaca-se que nenhuma fissura foi superior a 0,5mm e que a linha de cor vermelha foi utilizada para destacar as fissuras na imagem.

Houve ainda fissuras entre os painéis o que também já eram esperadas pela falta da correta amarração, o que já foi citado, entre os mesmos e também pelo fato dos impactos serem justamente no encaixe macha-fêmea dos dois painéis.

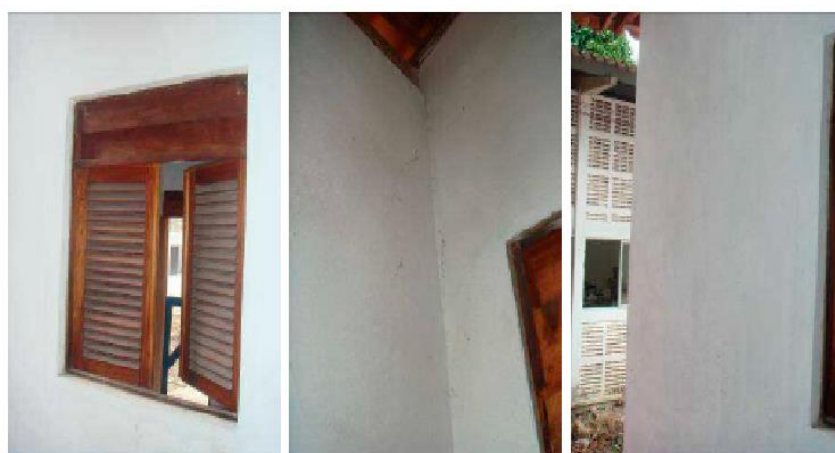
No ensaio conduzido por Lima Filho (2008) após a realização do ensaio não foi encontrado danos significativos a estrutura, apenas pequenas fissurações na amarração dos blocos de solo-cimento para o ensaio realizado nesse protótipo (Figura 87). Já para o ensaio no protótipo de blocos cimentícios com adição de EVA, nenhum dano foi identificado (Figura 88).

Figura 87: Fissuração da amarração dos blocos após ensaio de impacto de corpo mole



Fonte: Lima Filho (2008)

Figura 88: Fissuração da amarração dos blocos de EVA após ensaio de corpo mole



Fonte: Lima Filho (2008)

4.7.4 Ensaio de resistência à compressão

O ensaio de resistência a compressão foi realizado após a execução dos ensaios de carga suspensa, impacto de corpo duro e impacto de corpo mole. Foram utilizados os mesmos dois módulos. Para realização da medição de resistência foi utilizada uma célula de carga de 500kN.

Foi aplicada carga de compressão crescente nos módulos até a sua ruptura. Para registrar o deslocamento foi utilizado um relógio comparador de precisão 0,01mm. A carga ruptura dos Módulo 1 e 2 foi de 296kN e 285kN, respectivamente, o que corresponderia a uma tensão média de aproximadamente 3MPa no módulo. Porém a tensão no bambu é muito superior porque o módulo de elasticidade dele é superior ao do concreto com partículas de bambu, por metro linear a carga de ruptura seria 370kN/m. A Figura 89 e Figura 90 mostram o estado final de ruptura dos Módulos 1 e 2.

Figura 89: Imagem da ruptura final do Módulo 1



Fonte: Elaborado pelo autor

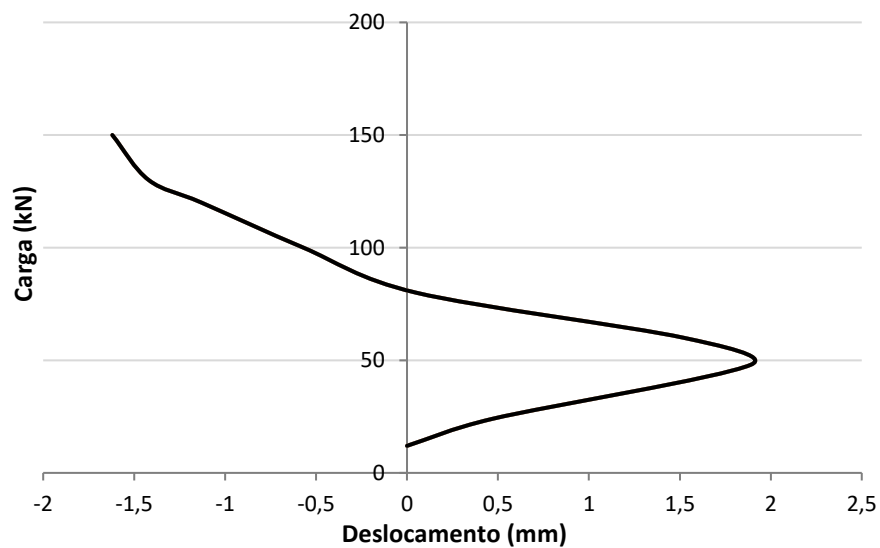
Figura 90: Imagem da ruptura final do Módulo 2



Fonte: Elaborado pelo autor

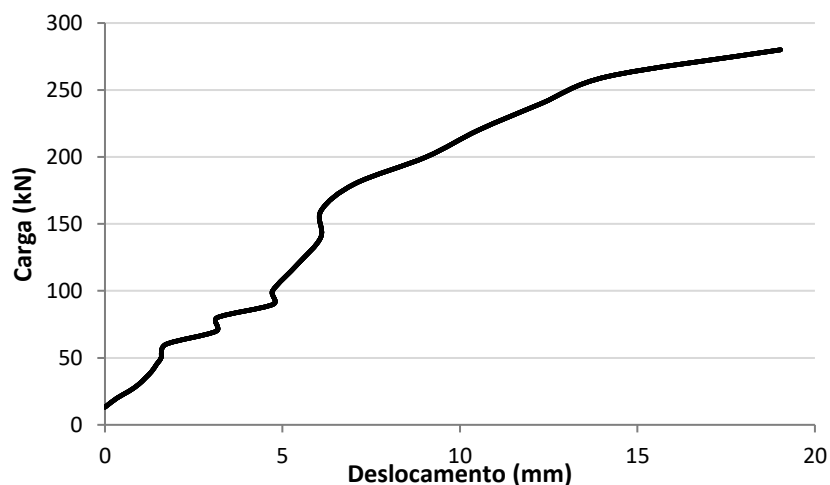
Pode-se observar que os módulos obtiveram formas de ruptura distintas. O Módulo 1 rompeu na região central do painel, um tipo de deformação já esperada devido a esbeltez dos painéis. Já o Módulo 2 teve sua ruptura na parte superior, provavelmente por imperfeição na transmissão de carga do perfil metálico para o de bambu. Houve uma desagregação do concreto que contribuiu para rompimento da peça. A Figura 91 e Figura 92 apresenta os gráficos carga x deslocamento para os dois módulos. O equipamento de aferição utilizado para medir os deslocamentos foi posicionado na posição horizontal a meia altura do módulo.

Figura 91: Gráfico Carga x Deslocamento do Módulo 1



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 92: Gráfico Carga x Deslocamento do Módulo 2



Fonte: Elaborado pelo autor

Os gráficos de deslocamento mostram comportamentos muito diferentes entre os módulos. O Módulo 1 apresentou um comportamento atípico, onde ao início do ensaio o deslocamento apresentou-se para um sentido e a partir dos 50kN de carga aplicada, o sentido

do deslocamento foi invertido. Esse comportamento pode ter ocorrido devido a tortuosidade dos colmos de bambu e sua acomodação após a carga aplicada. O Módulo 2 apresentou uma deformação típica para esse tipo de estrutura. O equipamento de aferição do deslocamento foi mantido até o momento em que se jugou seguro, e removido para evitar possíveis danos ao equipamento.

Acrescenta-se que os painéis, mesmo após esse ensaio, mantiveram sua integridade após remoção da carga, o que mostra que a adição de partículas de bambu ao concreto garantiu boas propriedades de resistência à tração.

Buscando-se na literatura por outros estudos foi possível identificar estudos que realizaram teste e compressão semelhantes ao realizado nesse estudo e criar uma tabela (Tabela 26) comparativa de resistências a compressão para diversos tipos de sistemas construtivos.

Tabela 26: Resistências a compressão de paredes de diferentes sistemas construtivos

Tipo de Sistema	Autor	Ano	Tensão (MPa)	Carga (kN/m)
Painéis cimentícios com reforço de bambu (e = 12cm)	Gomes Neto	2021	3,0	370,0
Painéis cimentícios com reforço de bambu (e = 10cm)	Gomes Neto	2017	3,0	300,0
Parede de Blocos de GessoPET – RF	Medeiros	2016	2,2	300,0
Parede de Blocos de GessoPET – EVA	Medeiros	2016	1,75	250,0
Parede de Blocos de GessoPET – EPS	Medeiros	2016	1,3	160,0
Parede de Adobe	Silveira et al.	2015	---	275,0
Parede de Adobe	Wu et al.	2012	0,93	---
Parede de Bloco de Terra Comprimida	Queiroga	2016	1,30	208,0
Parede de Blocos Cerâmicos de Alvenaria Estrutural (29 cm)	Nessralla	2013	2,28	320,0
Parede de Blocos Cerâmicos de Alvenaria Estrutural (44 cm)	Nessralla	2013	1,91	270,0

Fonte: Elaborado pelo autor

Pode-se notar que os painéis propostos têm capacidade de carga significativa, podendo esta ser comparada com outros sistemas construtivos, inclusive de blocos de alvenaria estrutural.

Carga de flambagem

Considerando a rigidez a flexão do painel, equivalente aquela achada no ensaio de flexão, pode-se estimar a carga crítica de flambagem do módulo.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$$

Como o módulo é composto por dois painéis:

$$EI = 2 \times 88,8 = 178 \text{ kNm}^2$$

Para $L = 2,40 \text{ m}$

$$P_{cr} = 304 \text{ kN}$$

A carga máxima experimental suportada pelo painel 1, que apresenta uma configuração deformada parecida com a teórica na flambagem (Figura 89) foi de 296 kN. Ou seja, as cargas experimentais e teóricas coincidiram. Como o concreto do módulo já se achava fissurado por conta dos impactos de corpo mole, tem-se a indicação que quem trabalha são os colmos de bambu e eles praticamente não foram afetados quando daquele ensaio.

4.8 Ensaio de desempenho térmico

O ensaio de desempenho térmico seguiu os procedimentos descritos na ABNT NBR 15220-2 e foi realizado em câmara de desempenho térmico do próprio LABEME – UFPB. A memória de cálculo das propriedades térmicas do painel está apresentada no APÊNDICE A desse trabalho.

Para o cálculo das propriedades térmicas o painel foi dividido em duas seções (Seção A e B). Na primeira seção o bambu é desconsiderado, na segunda seção o bambu entra no cálculo.

A Tabela 27 apresenta os resultados das propriedades térmicas calculadas.

Tabela 27: Resultado das propriedades térmicas do painel

PROPRIEDADES	VALOR
Resistência térmica total	$R_T = 0,394 (m^2 \cdot K)/W$
Transmitância térmica	$U = 2,53 W/(m^2 \cdot K)$
Capacidade térmica da parede	$C_T = 115,37 kJ/(m^2 \cdot K)$
Atraso térmico	$\varphi = 3,17 \cong 3,2 \text{ horas}$
Fator solar	$FS_0 = 6,57\%$
Densidade do fluxo de calor	$q = 725,63 W/m^2$
Fluxo de calor	$Q = 725,63 W$

Fonte: Elaborado pelo autor

Segundo a Tabela C.2 da ABNT NBR 15220-3 são admissíveis valores de transmitância térmica, atraso térmico e fator de calor solar para vedações externa de paredes leves os seguintes valores:

- $U \leq 3,00 W/m^2.K$;
- $\varphi \leq 4,3 \text{ horas}$;
- $FS_0 \leq 5,0$;

Dessa forma, é possível afirmar que o painel proposto está dentro dos valores admissíveis em norma para paredes de vedação externa leves nos valores de transmitância térmica e atraso térmico.

O fator solar está diretamente ligado com a cor da superfície da parede. O valor encontrado ficou acima da referência, porém isso pode ser adequado com uma pintura de cor clara na face exposta da peça, uma vez que o ensaio em câmara térmica foi realizado sem qualquer revestimento ou pintura.

A Tabela 28 apresenta um comparativo de diferentes tipos de sistemas construtivos normalmente utilizados na construção civil com seus respectivos dados de parâmetros térmicos. São comparados transmitância térmica, capacidade térmica e atraso térmico.

Tabela 28: Comparativo de parâmetros térmicos para diferentes tipos de paredes

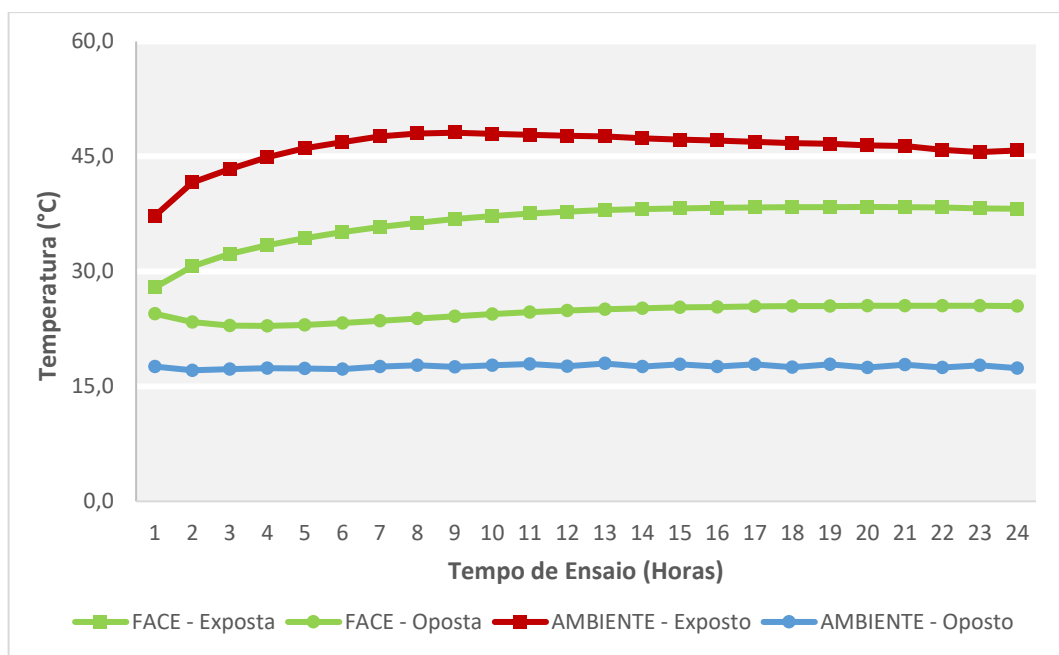
Tipo de Parede	U [W/(m².K)]	C _T [kJ/(m².K)]	φ [horas]
Parede de concreto maciço, espessura total: 10,0 cm	4,40	240	2,7
Painel de Bambu, com argamassa de mista de cimento e metacaulim e adição de partículas de bambu, sem revestimento, esp.: 12cm	2,53	115	3,2
Parede de tijolos cerâmicos de 8 furos quadrados, ½ vez, rebocada, espessura total: 14cm	2,49	158	3,3
Parede de tijolos maciços, ½ vez, rebocada, espessura total: 15cm	3,13	255	3,8
Parede de tijolos cerâmicos de 8 furos quadrados, 1 vez, rebocada, espessura total: 24cm	1,80	231	5,5

U = Transmitância térmica;
C_T = Capacidade térmica;
φ = Atraso térmico;

Fonte: ABNT NBR 15220-3 (2005)

O ensaio de desempenho térmico gerou uma grande quantidade de dados que foi compilada na Tabela 29. Nela são apresentadas as temperaturas médias obtidas para cada canal seja a temperatura de face ou de ambiente. É possível observar que a câmara só ficou estável após 9 horas de ensaio e que a diferença média da temperatura global entre a face exposta e oposta é de 12,9°C. A Figura 93 apresenta um gráfico que é um compilado da evolução da temperatura durante o ensaio, mostrando tanto a curva dos dados de face quanto dos dados de ambiente.

Figura 93: Gráfico de evolução das temperaturas no ensaio de desempenho térmico



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 29: Resumo dos dados coletados no ensaio de desempenho térmico

Início	Tempo	Face Exposta a Fonte de Calor				Face Oposta a Fonte de Calor				Médias entre os canais instalados na superfície		Diferença em graus celsius	Estável?
		Canal 1 (Globo Negro)	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5 (Globo Negro)	Canal 6	Canal 7	Canal 8	Face Exposta	Face Oposta		
Hora relógio	Horas	Temperatura Média				Temperatura Média							
10:00	0	26,0	25,6	25,7	25,9	26,0	25,1	25,4	25,3	25,7	25,8	-0,1	
11:00	1	37,2	27,9	27,8	28,0	17,6	24,6	24,6	24,2	27,9	24,5	3,4	3,5
12:00	2	41,6	30,4	30,6	30,9	17,1	23,8	23,6	22,8	30,6	23,4	7,2	3,8
13:00	3	43,4	31,9	32,2	32,7	17,2	23,3	23,2	22,3	32,3	22,9	9,3	2,1
14:00	4	44,9	33,0	33,4	33,9	17,4	23,2	23,1	22,3	33,4	22,9	10,5	1,2
15:00	5	46,1	33,8	34,3	34,9	17,4	23,3	23,3	22,5	34,3	23,0	11,3	0,8
16:00	6	46,9	34,5	35,0	35,7	17,2	23,5	23,5	22,7	35,1	23,3	11,8	0,5
17:00	7	47,6	35,2	35,7	36,4	17,6	23,8	23,8	23,0	35,8	23,6	12,2	0,4
18:00	8	48,0	35,7	36,3	37,1	17,7	24,1	24,2	23,4	36,3	23,9	12,5	0,3
19:00	9	48,1	36,2	36,8	37,6	17,5	24,3	24,5	23,7	36,8	24,2	12,7	0,2
20:00	10	47,9	36,5	37,2	37,9	17,8	24,6	24,7	24,0	37,2	24,4	12,8	0,1
21:00	11	47,8	36,8	37,5	38,3	17,9	24,8	25,0	24,2	37,5	24,7	12,9	0,1
22:00	12	47,7	37,1	37,8	38,5	17,6	25,0	25,2	24,4	37,8	24,9	12,9	0,0
23:00	13	47,6	37,3	38,0	38,7	18,0	25,2	25,4	24,6	38,0	25,1	12,9	0,0
00:00	14	47,4	37,4	38,1	38,8	17,6	25,4	25,5	24,7	38,1	25,2	12,9	0,0
01:00	15	47,2	37,6	38,2	38,9	17,9	25,5	25,6	24,8	38,2	25,3	12,9	0,0
02:00	16	47,0	37,6	38,3	38,9	17,6	25,6	25,7	24,8	38,3	25,4	12,9	0,0
03:00	17	46,9	37,7	38,3	39,0	17,9	25,6	25,8	24,9	38,3	25,4	12,9	0,0
04:00	18	46,7	37,7	38,4	39,0	17,5	25,7	25,8	24,9	38,4	25,5	12,9	0,0
05:00	19	46,6	37,8	38,4	39,0	17,9	25,7	25,8	24,9	38,4	25,5	12,9	0,0
06:00	20	46,4	37,8	38,4	39,0	17,5	25,7	25,8	24,9	38,4	25,5	12,9	0,0
07:00	21	46,3	37,8	38,4	39,0	17,8	25,8	25,8	24,9	38,4	25,5	12,9	0,0
08:00	22	45,9	37,8	38,3	38,9	17,4	25,8	25,8	24,9	38,3	25,5	12,8	-0,1
09:00	23	45,6	37,7	38,2	38,8	17,8	25,8	25,8	24,9	38,2	25,5	12,7	-0,1
10:00	24	45,8	37,6	38,2	38,7	17,4	25,8	25,8	24,9	38,2	25,5	12,7	0,0
Média										38,1	25,3		
Diferença Temperatura Global												12,9	

Fonte: Elaborado pelo autor

Após análise de desempenho térmico do painel de com reforço estrutural de bambu e adição de partículas de bambu na matriz cimentícia foi realizado um levantamento na literatura recente sobre estudos que realizaram testes semelhantes para outros tipos de sistemas construtivos.

A Tabela 30 mostra o comparativo do desempenho térmico para alguns sistemas construtivos encontrados. Observa-se que o módulo testado por esse estudo obteve a terceira maior variação de temperatura entre os sistemas construtivos levantados.

Tabela 30: Comparativo de desempenho térmico para diferentes sistemas construtivos

Tipo de Sistema Construtivo	Autor	Ano	ΔT (°C)
Cimento, areia e EVA	Gomes	2015	15,7
Blocos de GessoPET – EPS	Medeiros	2016	13,3
Módulo com painéis de bambu	Gomes Neto	2021	12,9
Gesso, EPS triturado, pneu triturado, cimento, barro e areia	Leite	2011	12,6
Gesso, EPS e pneu triturado e cimento	Lima	2012	12,4
Blocos de GessoPET – EVA	Medeiros	2016	12,2
Blocos de GessoPET – RF	Medeiros	2016	11,8
Gesso, EPS, borracha triturada, cimento e areia	Silva	2010	11,7
Gesso, EPS, borracha triturada e areia	Gomes	2010	11,4
Gesso, cimento, placas de granito e mármore, areia, EPS triturado	Santos	2015	8,0
Bloco de Adobe	Pinto	2021	7,4
Gesso, PET, areia, cimento e EPS triturado	Santos	2008	7,0
Bloco de Adobe com fibras de sisal	Pinto	2021	7,0

Fonte: Adaptado de Medeiros (2016)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse trabalho foi utilizada a espécie de bambu *Bambusa vulgaris* como reforço estrutural de painéis modulares pré-moldados de matriz cimentícia com adição de partículas de bambu. Com os painéis foram realizados testes de desempenho estrutural e térmico seguindo a ABNT NBR 15575:2013.

Ensaio em corpos de prova de bambu com presença prévia de fissura paralela as fibras mostraram que ela afeta um pouco a resistência à compressão, porém ainda permitem que se adote para o *Bambusa vulgaris* uma resistência característica próxima de 40 MPa.

Foram buscados na literatura os tipos painéis já desenvolvidos em outros trabalhos e qual o processo construtivo de cada um deles. Além dos tipos de painéis foi feita uma busca pelos protótipos de habitações construídas com painéis modulares.

Por meio do levantamento bibliográfico foi encontrado outros trabalhos que realizaram teste de desempenho em outros sistemas construtivos semelhantes. Alguns deles já realizados no mesmo laboratório, LABEME – UFPB.

O estudo dos traços passou por dois momentos distintos. No primeiro momento os traços desenvolvidos foram utilizados agregados reciclados de baixa massa específica, como o EVA, porém os resultados da aplicação dos mesmos não foram satisfatórios. No segundo momento os traços foram desenvolvidos com adição de partículas de bambu garantindo uma maior resistência a tração do traço com o objetivo de reduzir a fissuração, o que foi satisfatório. O traço final com adição de partículas de bambu utilizado na moldagem dos painéis apresentou uma resistência de 7,2MPa aos 28 dias.

Para obtenção das partículas de bambu foi desenvolvido um processo que envolveu uma série de etapas e equipamentos testados empiricamente pelo autor. Dessa forma, foi apresentado um fluxograma que detalha cada etapa do processo de produção e quantidades de material processado em cada etapa.

No processo de moldagem dos painéis foram utilizadas técnicas desenvolvidas para garantir um adequado travamento das peças dentro da forma. Foi desenvolvido ainda o projeto e confecção de uma forma metálica desmontável para moldagem dos painéis, que se mostrou adequada.

Nesse estudo foi elaborado um projeto prevendo-se a construção de um protótipo com os painéis propostos, como se vê no Apêndice B. Entretanto com o fechamento do laboratório,

decorrente da pandemia do Covid-19, com consequente atraso de cronograma, tudo isso agravado pela falta de recursos financeiros a construção não pode ser executada. No protótipo é que seriam realizados os ensaios de desempenho. Nele, com as paredes travadas, o impacto de corpo mole certamente teria dado melhores resultados.

Os painéis ficaram com uma massa de aproximadamente 106kg após 28 dias de cura.

Os ensaios de desempenho estrutural realizados foram de carga suspensa, de impacto de corpo duro, de impacto de corpo mole e resistência a compressão. O ensaio de desempenho térmico foi realizado um estudo em câmara térmica.

No ensaio de carga suspensa, os dois módulos compostos por dois painéis cada, ensaiados individualmente, resistiram à carga aplicada com deslocamentos mínimos e sem nenhum sinal de descolamento da estrutura de suporte do painel.

No ensaio de impacto de corpo duro o desempenho foi satisfatório, pois não houve nenhum impacto que causou fissuração ou deslocamentos. Todos os impactos foram superficiais e, quando muito, destacaram a pintura de cal aplicada.

No ensaio de impacto de corpo mole teve-se desempenho satisfatório. Porém houve problemas no travamento dos painéis o que ocasionou no primeiro impacto com energia de 240J deformações instantâneas e residuais acima do limite desejável. O sistema de travamento superior dos módulos não conseguiu travar o topo deles de forma a impedir ali deslocamentos horizontais.

No ensaio de flexão a 4 pontos feito com o painel posicionado horizontalmente como laje, percebeu-se que ele é bastante flexível, mas pode servir de laje de piso para carga de 3 kN/m² com vão de até 2,65m. Em forros, ele pode ser aplicado em comprimento livres de até 3,35m.

O ensaio de compressão do painel mostrou que os módulos (dois painéis conectados) apresentaram resistência próxima de 300 kN, que representa por metro linear uma capacidade de carga de cerca de 370 kN/m. Mesmo considerando-se um fator de segurança de 3, a carga de serviço seria adequada para edificações de mais de dois pisos.

O ensaio de desempenho térmico mostrou que o painel proposto está dentro dos valores admissíveis em norma para paredes de vedação externa leves nos valores de transmitância térmica e atraso térmico. Mostrou que a diferença média da temperatura global entre a face exposta e oposta é de 12,9°C e que nos parâmetros comparados de transmitância térmica,

capacidade térmica e atraso térmico o sistema proposto assemelha-se muito com uma parede de tijolos de 8 furos de $\frac{1}{2}$ vez rebocado por ambos os lados.

Os resultados indicam que o painel proposto apresentou comportamento adequado os testes realizados, e mostram que é possível desenvolver projetos arquitetônicos com seu emprego, atendendo aos requisitos mínimos de desempenho nas edificações. Também indicam que o *Bambusa vulgaris* tem propriedades que lhe permitem ser utilizado estruturalmente.

5.1 Sugestão para trabalhos futuros

- Testar a confecção dos painéis com outros tipos de matrizes como o gesso;
- Construir uma habitação completa com os painéis e refazer o ensaio de corpo mole com o correto travamento das peças;
- Testar o desempenho acústico do painel em um protótipo;
- Desenvolver um método automatizado de produção das partículas de bambu;
- Aprimorar a precisão da fôrma metálica para melhorar o encaixe dos painéis;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 9p., 2018.
- _____. NBR 7175: Cal hidratada para argamassas – Requisitos. Rio de Janeiro, 4p., 2003.
- _____. NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 107p., 1997.
- _____. NBR 7222: Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 5p., 2011.
- _____. NBR 11675: Divisórias leves internas moduladas — Verificação da resistência aos impactos. Rio de Janeiro, 7p., 2016.
- _____. NBR 11678: Divisórias leves internas moduladas — Verificação do comportamento sob ação de cargas provenientes de peças suspensas. Rio de Janeiro, 12p., 2016.
- _____. NBR 15220-2: Desempenho térmico de edificações — Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 21p., 2005.
- _____. NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações — Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 26p., 2005.
- _____. NBR 15575-1: Edificações habitacionais – Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 71p., 2013.
- _____. NBR 15575-2: Edificações habitacionais – Desempenho Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais. Rio de Janeiro, 31p., 2013.
- _____. NBR 15575-4: Edificações habitacionais – Desempenho Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas. Rio de Janeiro, 63p., 2013.
- _____. NBR 15930-2: Portas de madeira para edificações – Requisitos. Rio de Janeiro, 96p., 2018.
- _____. NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 12p., 2018
- _____. NBR 16828-1: Estruturas de bambu – Parte 1: Projeto. Rio de Janeiro, 2020.

- _____. NBR 16828-2: Estruturas de bambu – Parte 2: Determinação das propriedades físicas e mecânicas do bambu. Rio de Janeiro, 2020.
- _____. NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 8p., 2006.
- _____. NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 6p., 2009.
- _____. NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 6p., 2003.
- ALVES, J. D. Influência das fibras nas propriedades do concreto. In: IBRACON – INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO, XVIII JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 1975, Salvador. Anais... Salvador, 1976.
- ARCOWEB. Disponível em: www.arcoweb.com.br Acesso em: 21 de fevereiro de 2017.
- BARBOSA, N. P.; GHAVAMI, K. Bambu como material de construção. (Artigo técnico) Departamento de Tecnologia da Construção Civil, Centro de Tecnologia. Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana, UFPB, João Pessoa, 2005.
- BARBOSA, Normando Perazzo. Considerações sobre Materiais de Construção Convencionais e Não-Convencionais. (Artigo Técnico) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2005.
- CARDOSO JUNIOR, R. Arquitetura com Bambu. 109p. Dissertação. Universidade para o Desenvolvimento do Estado e da Região do Pantanal e Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000.
- CARDOSO JUNIOR, R.; SARTORI, E DE M.; SILVA, A. L. P. DA. Sistema construtivo pré-moldado, utilizando bambu, em habitações de interesse social. In: INTER AMERICAN CONFERENCE ON NON-CONVENTIONAL MATERIALS AND TECHNOLOGIES IN THE ECO-CONSTRUCTION AND INFRASTRUCTURE, 2., 2004, Pirassununga. Anais... Pirassununga: IAC-NOCMAT, 2004.1 CD-ROM. p. 61-66.
- CULZONI, R. A M. Características dos bambus e sua utilização como material alternativo no concreto. 134p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil. PUC-Rio. Rio de Janeiro, 1986.

- EBIOBAMBU. Associação Escola de Bioarquitetura. Centro de Pesquisa e Tecnologia Experimental em Bambu. Projeto do Centro de apoio da Ebiobambu. 2009.
- ESCAMILLA EZ, HABERT G, DAZA JFC, ARCHILA HF, FERNÁNDEZ JSE, TRUJILLO D (2018) Industrial or traditional bamboo construction? Comparative life cycle assessment (LCA) of bamboo-based buildings. *Sustainability* 10(9): 3096. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/su10093096>.
- ESCAMILLA EZ, HABERT G, WOHLMUTH E (2016) When CO2 counts: Sustainability assessment of industrialized bamboo as an alternative for social housing programs in the Philippines. *Building and Environment* 103: 44-53.
- FUNBAMBU – Fundación del Bambú. BAMBUSETUM. Boletim Informativo. Costa Rica, 1992.
- GANAPATHY, P. M.; HUAN-MING, Z.; ZOOLAGUD, S. S. Bamboo panel boards: a state of the art review. Beijing, 2002.
- GHAVAMI K, GARCÍA J J (2017) Four decades of research means building with bamboo comes of age. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Civil Engineering*. 170(3): 101-101. DOI: <http://dx.doi.org/10.1680/jcien.2017.170.3.101>.
- GHAVAMI K. Bamboo as reinforcement in structural concrete elements. **Cement & Concrete Composites**, vol. 27, pags. 637-649, 2005.
- GHAVAMI, K. Bambu: um material alternativo na engenharia. *Construção Civil, Pesquisa, ENGENHARIA*, Nº 492, p. 23-27, 1992.
- GHAVAMI, K.; MARINHO, A. B. Determinação das propriedades dos bambus das espécies: Mosó, Matake, Guadua angustifolia, Guadua tagoara e Dendrocalamus giganteus para utilização na engenharia. PUC-Rio. 53p. Rio de Janeiro, 2001.
- GHAVAMI, K.; MARINHO, A. B. Propriedades físicas e mecânicas do colmo inteiro do bambu da espécie Guadua angustifolia. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.9, n.1, p.107–114, 2005.
- GHAVAMI, K.; TOLEDO FILHO, R. D. Desenvolvimento de materiais de construção de baixo consumo de energia usando fibras naturais, terra e bambu. *Revista Engenharia Agrícola. Publicação Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola*, v.2, p.1–19, 1992.

- GLORIA, M. Y. R. Comportamento experimental e numérico de bioconcretos de madeira e de painéis sanduíches com faces em laminados reforçados com fibras longas de sisal. 160p. Tese de Doutorado. Programa de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2021.
- GOMES NETO, J. A. Painel modular intertravado de matriz cimentícia com reforço estrutural de Bambusa vulgaris. 131p. Dissertação Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2017.
- GOMES, E. G. S. Desempenho térmico de alvenarias: uma alternativa com uso de blocos de EVA. 127p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba. Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo. João Pessoa, 2015.
- GOMES, E. G. S. Desempenho térmico de alvenarias: uma alternativa com o uso de blocos EVA. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015.
- GOMES, I. R. B. Viabilidade de utilização de um compósito a partir de resíduos para a construção de casas populares. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.
- GUTIERREZ, J. A. G.; CAMBONERO, R. C.; GONZÁLEZ, G.T. Preservación de culmos de Guadua. In: I Congresso Mundial de Bambú Guadua (Anais) Pereira, Cômbia, p.77-82, 1991.
- HIDALGO-LÓPEZ, O. Bambu – Su cultivo y aplicaciones en: fabricación, arquitectura, ingeniería, artesanía. Estudios Técnicos Colombianos LTDA. Cali, 1974.
- ICONTEC - NSR 10 - Estructuras de madera y estructuras de guadua. Bogotá, 2010.
- INBAR, International Network for Bamboo and Rattan. Una casa realmente asequible para los pobres. INBAR, 2001.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo demográfico 2010. Rio de Janeiro: IBGE, 2015.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO/DIS 22157-1: Bamboo - Determination of physical and mechanical properties - Part 1: Requirements. Genebra, 2004.

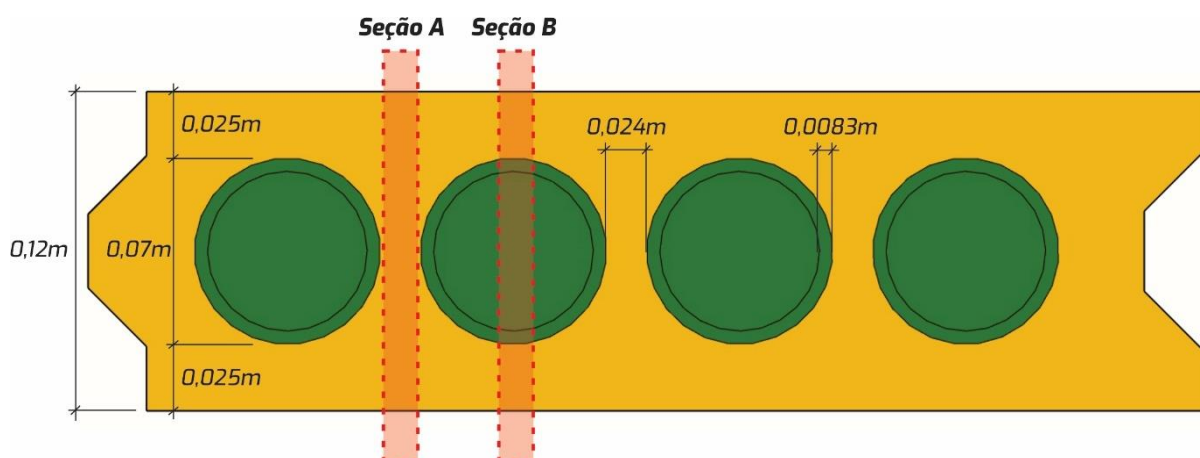
- LEITE, J. M. C. C. Compósito para fabricação de blocos para construção de casas: estudos térmico e de materiais. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.
- LIESE W, KOHL M (2015) Bamboo - the plant and its uses. Springer International Publishing, v1, 356p. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-14133-6>.
- LIESE, W. Anatomy of bamboo. In: Lessard, G.; Chouinard, A. ed. Bamboo research in Asia. Proceedings of a workshop held in Singapore, 28-30 May 1980. International Development Research Centre, Ottawa, Canada, pp. 161-164, 1980.
- LIMA FILHO, M. R. F. Avaliação do desempenho mecânico de protótipo executado com blocos EVA: estudo de impactos horizontais em alvenarias e suas interações com outros elementos da construção. 146p. Dissertação de mestrado. Universidade Federal da Paraíba. Programa de pós-graduação em engenharia urbana. João Pessoa, 2008.
- LIMA, F. A. S. Estudo de um compósito de matriz cerâmica com cargas de eps eraspa de pneu para construção de casas populares. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio grande do Norte. Natal, 2012.
- LOPES, W.G.R.; VALENCIANO, M.C.M.; MARTINS, S.C.F.; BERALDO, A.L. Variação volumétrica em três espécies de bamboo gigante. In: Anais do XXIX CONBEA – Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Fortaleza, CE, CD-ROM, 2000.
- LORENZI, L. S. Análise crítica e proposições de avanço nas metodologias de ensaio experimentais de desempenho à luz da ABNT NBR 15575 (2013) para edificações habitacionais de interesse social térreas. 245p. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 2013.
- MBUGE, D. O. Mechanical Properties of Bamboo (*Bambusa vulgaris*) Grown in Muguga, Kenya. Tese. University of Nairobi, 2000.
- MEDEIROS, M. P. Desempenho térmico de blocos de vedação com o uso de gesso e de resíduos poliméricos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.
- MEHRA SR, UPPAL HL, CHADDA LR. Some preliminary investigations in the use of bamboo for reinforcing concrete. Indian Concr. 25:20–1. 1951.

- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. P. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: IBRACON, p.684, 2008.
- MINKE, Gernot. Building with Bamboo: Design and Technology of a Sustainable Architecture. Basel: Editora Birkhäuser, 2012.
- MOROZ J.G.; LISSEL S.L.; HAGEL M.D.. Performance of bamboo reinforced concrete masonry shear walls. Construction and Building Materials v. 61. pp. 125–137. 2014.
- MURAD, J. R. L. As propriedades físicas, mecânicas e meso-estrutural do bambu Guadua weberbaueri do Acre. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, 2007.
- MURAD, J. R. L. Estudo experimental das propriedades físicas, mecânicas e aplicações estruturais do bambu Guadua spp de Assis Brasil – AC. 203p. Tese. Universidade Federal Fluminense. Rio de Janeiro: Niterói, 2011.
- NAVARRO, E. H. A. Bamboo: High Tech Material for Concrete Reinforcement. Tese. Doctor in Science. PUC – Rio de Janeiro, 2011.
- NESSRALLA, M. A. Resistência a compressão de paredes de alvenaria estrutural: bloco cerâmico de 44cm. Dissertação. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Belo Horizonte, 2013.
- NIKAN, S. G.; ATTAR, A. C. Alternative walling system for low cost housing by using bamboo. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering, v.2, Issue-6, May 2013.
- PAULA, L. S. Utilização de resíduos de EVA como agregado graúdo em concretos. 51p. Monografia. Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil, Universidade Federal do Ceará, 2011.
- PEÑA, J. E. L. Validación de la Guadua angustifolia como material estructural para diseño, por el método de esfuerzos admisibles. Universidad Nacional de Colombia, jul 2010.
- PEREIRA, M. A. R. Projeto bambu: manejo e produção do bambu gigante (Dendrocalamus giganteus) cultivado na Unesp / Campus de Bauru e determinação de suas características físicas e de resistência mecânica. Relatório FAPESP (2003/04323–7), 2006a.
- PEREIRA, M. A. R. Projeto bambu: manejo e produção do bambu gigante (Dendrocalamus giganteus) cultivado na Unesp de Bauru / SP e determinação de características

- mecânicas de ripas laminadas. In: Seminário Nacional de Bambu: estruturação da rede de pesquisa e desenvolvimento. 13 a 15 de setembro, Brasília, D.F., p.91–103, 2006b.
- PEREIRA, M. A. R.; BERALDO, A. L. Bambu de corpo e alma. Bauru, SP: Canal6, 1ª Edição, 222p., 2016.
- PINTO, B. R. Desempenho térmico e mecânico de alvenaria de adobe ativado alcalinamente e reforçado com fibras vegetais. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021.
- QUEIROGA, M. S. Resistencia a compressão de painéis reduzidos de alvenaria de BTC. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.
- REYES ORTIZ, S. P. Efeito da impregnação com polímeros sobre as propriedades mecânicas do bambu *Bambusa vulgaris*. 154p. Tese. Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2017.
- ROBLEDO, J. F. M. Tipificación de los sistemas constructivos patrimoniales de “bahareque” em la ruta cultural del café – Colombia. (Artigo técnico). Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica y Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, 2002.
- ROSA, C. C. Análise experimental das propriedades dinâmicas dos bambus das espécies Guadua, Dendrocalamus e Áurea. 103p. Tese, PUC-Rio, 2005.
- SANTOS, N. R. G. Caracterização mecânica, térmica e acústica de um compósito que utiliza rejeitos de mármore, granito e eps para a fabricação de blocos para a construção civil. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.
- SANTOS, R. D. Estudo térmico e de materiais de um compósito à base de gesso e EPS para construção de casas populares. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.
- SILVA, A. R. Estudo térmico e de materiais de um bloco para construção de casas populares, confeccionado a partir de um compósito a base de gesso, EPS e raspa de pneu. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

- SILVA, O. F. Estudo sobre a substituição do aço liso pelo *Bambusa vulgaris*, como reforço em vigas de concreto, para o uso em construções rurais. 166p. Dissertação. Universidade Federal de Alagoas, 2007.
- SILVEIRA, D., VARUM, H., COSTA, A., CARVALHO, J. Mechanical properties and behavior of traditional adobe wall panels of the Aveiro District. *J. Mater. Civ. Eng.*, 2015, 27(9): 04014253
- SOBRINHO JUNIOR, A. S. Comportamento estrutural de painéis contendo bambu e resíduos industriais para habitações de interesse social. 139p. Dissertação. Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2006.
- SUBRAHMANYAM BV. Bamboo reinforcement for cement matrices in new reinforced concrete. Guildford, England: Surrey University Press. pp. 141–194. 1984.
- TEIXEIRA, A. A. Desempenho de Painéis de Bambu para habitações econômicas: Aplicação na Arquitetura e Ensaios de Durabilidade. 274p. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – UNB, Brasília, 2013.
- TEIXEIRA, A. A. Painéis de Bambu para habitações econômicas: Avaliação do desempenho dos painéis revestidos com argamassa. 201p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – UNB, Brasília, 2006.
- VÉLEZ, S. *Grow Your Own House: Simón Vélez and Bamboo Architecture*. Vitra Design Museum. Rhein, Alemanha, 2000.
- WILLIAMS J.T. and RAMANATHA RAO V. Priority Species of Bamboo and Rattan. INBAR & IBPGR, New Delhi, India, 1994.
- WU, F., LI, G., LI, H., JIA, J. Strength and stress–strain characteristics of traditional adobe block and masonry. *Materials and Structures* (2013) 46:1449–1457. DOI 10.1617/s11527-012-9987-y
- YOUSSEF MAR. Bamboo as a substitute for steel reinforcing in structural concrete. *New Horizons Constr Mater* 1:525–54. 1976.

APÊNDICE A - Memória de cálculo do ensaio de desempenho térmico



Dados:

Propriedade	Unidade	Bambu	Concreto
Densidade Aparente (ρ)	kg/m ³	850	1200
Condutividade Térmica (λ)	w/(m.k)	0,29	0,44
Calor Específico (c)	kJ/(kg.K)	134	1
Obs.:			
Condutividade Térmica do Bambu		Condutividade Térmica do Bio-concreto	
Ref. a NBR 15220:2003 – Parte 2		Ref. a NBR 15220:2003 – Parte 2	
Tabela B3 – Madeira com densidade aparente elevada		Tabela B3 – Concreto com Pozolana	

Altura do painel = 1m

Seção A = Concreto

Cálculo da área:

$$A_a = 0,12 \times 1 = 0,12 \text{ m}^2$$

Resistência térmica da Seção A:

$$R_a = \frac{e_{argamassa}}{\lambda_{argamassa}} \Rightarrow R_a = \frac{0,12}{0,44} \Rightarrow R_a = 0,272 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$$

Seção B = Concreto + Bambu + Concreto

Cálculo da área:

$$A_b = (0,025 \times 1) + 2(0,0083 \times 1) + (0,025 \times 1) = 0,0646 \text{ m}^2$$

Resistência térmica da Seção B:

$$R_b = \frac{e_{argamassa}}{\lambda_{argamassa}} + \frac{e_{bambu}}{\lambda_{bambu}} + \frac{e_{argamassa}}{\lambda_{argamassa}}$$

$$R_b = \frac{0,025}{0,44} + 2 \left(\frac{0,0083}{0,29} \right) + \frac{0,025}{0,44} \Rightarrow R_b = 0,17 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$$

Resistência térmica da parede:

$$R_t = \frac{A_a + A_b}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{A_b}{R_b}} \Rightarrow R_t = \frac{0,12 + 0,0646}{\frac{0,12}{0,272} + \frac{0,0646}{0,17}} \Rightarrow R_t = \frac{0,1846}{0,821} \Rightarrow R_t = 0,224 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$$

Resistência térmica total:

$$R_T = R_{si} + R_t + R_{se} \Rightarrow R_T = 0,13 + 0,224 + 0,04 \Rightarrow R_T = 0,394 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$$

Obs.: Rsi e Rse vem da Tabela A1 da NBR 15220:2003

Transmitância térmica:

$$U = \frac{1}{R_T} \Rightarrow U = \frac{1}{0,394} \Rightarrow U = 2,53 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

Capacidade térmica da seção:

Seção A = Concreto

$$C_{Ta} = \sum_{i=1}^3 e_i \cdot c_i \cdot \rho_i \Rightarrow C_{Ta} = (0,12 \times 1 \times 1200) \Rightarrow C_{Ta} = 144 \text{ kJ/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

Seção B = Concreto + Bambu + Concreto

$$C_{Tb} = \sum_{i=1}^3 e_i \cdot c_i \cdot \rho_i \Rightarrow C_{Ta} = (0,05 \times 1 \times 1200) + (0,0166 \times 1,34 \times 850)$$

$$C_{Tb} = 78,90 \text{ kJ/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

Capacidade térmica da parede:

$$C_T = \frac{A_a + A_b}{\frac{A_a}{C_{Ta}} + \frac{A_b}{C_{Tb}}} \Rightarrow C_T = \frac{0,12 + 0,0646}{\frac{0,12}{144} + \frac{0,0646}{78,90}} \Rightarrow C_T = \frac{0,1846}{0,0008 + 0,0008}$$

$$C_T = 115,37 \text{ kJ/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

Atraso térmico:

$$R_t = 0,224 (m^2 \cdot K)/W$$

$$B_0 = C_T - C_{T_{ext}} \Rightarrow B_0 = 115,37 - (0,025 \times 1 \times 1200) \Rightarrow \mathbf{B_0 = 85,37}$$

$$B_1 = 0,226 \frac{B_0}{R_t} \Rightarrow B_1 = 0,226 \left(\frac{85,37}{0,224} \right) \Rightarrow \mathbf{B_1 = 86,132}$$

$$B_2 = 0,205 \left(\frac{(\lambda \cdot \rho \cdot c)_{ext}}{R_t} \right) \left(R_{ext} - \frac{R_t - R_{ext}}{10} \right)$$

$$B_2 = 0,205 \left(\frac{(0,44 \times 1200 \times 1)}{0,224} \right) \left(\left(\frac{0,025}{0,44} \right) - \frac{0,224 - \left(\frac{0,025}{0,44} \right)}{10} \right)$$

$$B_2 = 0,205 \left(\frac{528}{0,224} \right) (0,0568 - 0,01672) \Rightarrow \mathbf{B_2 = 19,367}$$

$$\varphi = 1,382 \cdot R_t \cdot \sqrt{B_1 + B_2} \Rightarrow \varphi = 1,382 \cdot (0,224) \sqrt{86,132 + 19,367}$$

$$\varphi = 0,309568 \sqrt{105,499} \Rightarrow \mathbf{\varphi = 3,17 \cong 3,2 \text{ horas}}$$

Fator solar: ($\alpha = 0,65$) Tabela B2 – Concreto Aparente

$$FS_0 = 100 \cdot U \cdot \alpha \cdot R_{se} \Rightarrow FS_0 = 100 \times 2,53 \times 0,65 \times 0,04$$

$$\mathbf{FS_0 = 6,57\%}$$

Densidade do fluxo de calor:

Dados:

$$R_T = 0,394 (m^2 \cdot K)/W$$

$$\Delta T = 285,9K$$

$$q = \frac{\Delta T}{R} \Rightarrow q = \frac{285,9}{0,394} \Rightarrow \mathbf{q = 725,63 W/m^2}$$

Fluxo de calor:

$$Q = q \cdot A \Rightarrow Q = 725,63 \times 1$$

$$\mathbf{Q = 725,63 W}$$

APÊNDICE B – Projeto de protótipo

Projeto de Protótipo

Para realização dos ensaios de desempenho estrutural e térmico será confeccionado um protótipo de 16 m² nas proximidades do LABEME – CT – UFPB, como mostra a Figura 94. O protótipo será essencial para o desenvolvimento da pesquisa. Para sua construção serão utilizados quatro tipos de painéis para confecção, sendo três tipos de painéis para vedação estrutural vertical e um tipo para cobertura tipo laje alveolar. Todo o detalhamento do projeto e sistemas construtivos utilizados será detalhado na seção resultados.

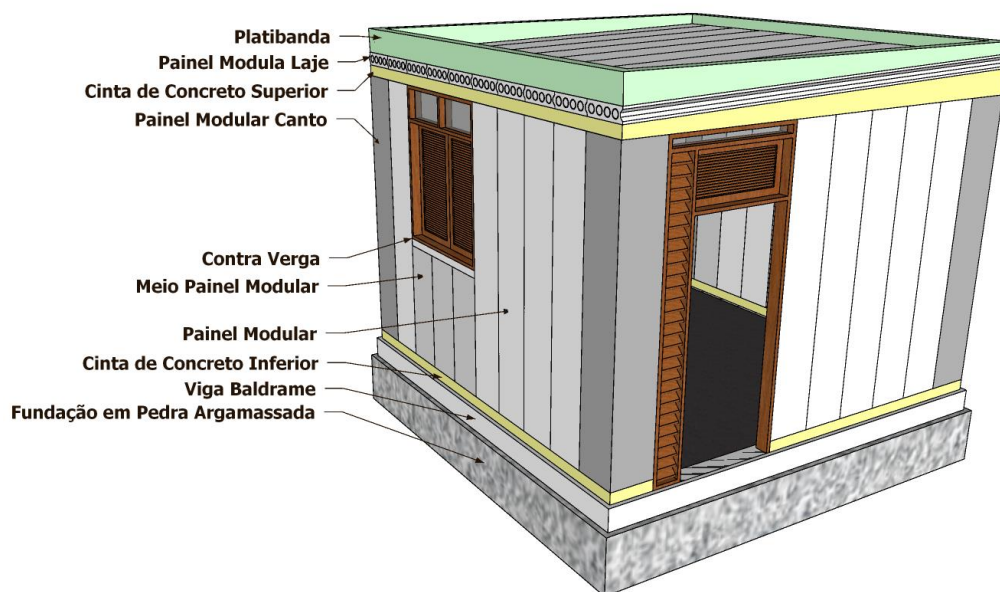
Figura 94: Localização da área de construção do protótipo



Fonte: Elaborado pelo autor

Um dos resultados iniciais alcançados neste trabalho foi a elaboração de um projeto em 3D do protótipo a ser construído com a utilização dos painéis modulares propostos. Esse projeto já prevê todos os encaixes, tipos de painéis, quantidades, esquadrias, fundação e toda estrutura de montagem. A Figura 95 mostra em detalhe esse projeto.

Figura 95: Projeto do protótipo para ensaios de desempenho em perspectiva



Fonte: Modelo gráfico digital elaborado por Germana Rocha, Wenia Santos e Bianca Pacheco.

Esse protótipo tem uma área construída de 16 m² e pé direito de 2,8 m. O protótipo foi desenvolvido para ser um padrão modular que vem sendo muito utilizado para o desenvolvimento de casas de baixo custo onde o proprietário pode ir ampliando o mesmo conforme necessidade e disponibilidade. Esse novo conceito “*modular housing*” é uma evolução dentro da arquitetura das casas ditas pré-moldadas que existiam no século passado. A Tabela 31 apresenta as principais características do protótipo proposto.

Tabela 31: Características do protótipo com painéis modulares

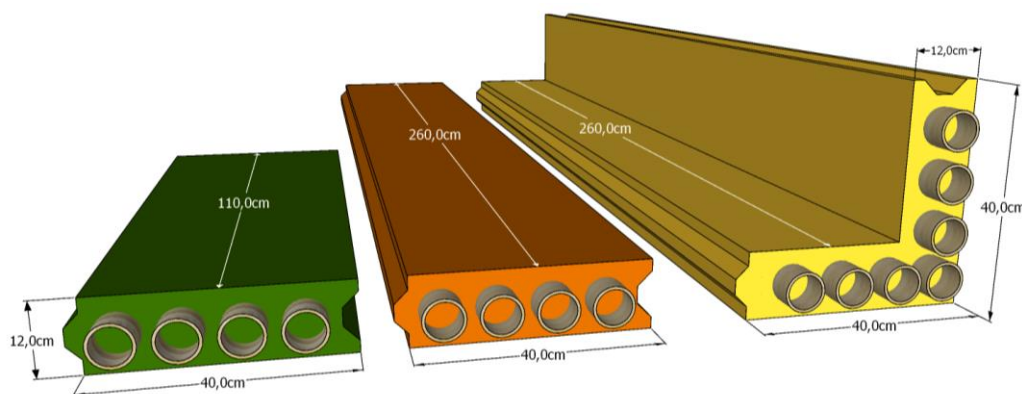
Item	Descrição / Especificação
Fundação	Pedra argamassada (0,30 m de largura x 0,50 m de profundidade) + Viga Baldrame armada com fck 25 MPa (0,20 m x 0,20 m)
Cinta de concreto inferior	Cinta de concreto armado inferior (fck 25 MPa) com altura de 10 cm e 12 cm de largura para evitar o contato dos painéis com umidade do solo proveniente de chuva e da limpeza do ambiente.
Alvenaria	Painéis modulares intertravados com reforço estrutural de bambu, possuem 0,40 m de largura e 0,12 m de espessura. Para toda alvenaria serão utilizados três tipos de painéis (painel inteiro, meio painel e painel de canto). Os painéis possuem um espaçamento de 3 mm na região do encaixe para preenchimento com argamassa mista com traço em volume 1:2:10 para garantir uma perfeita união entre painéis.
Revestimento	Massa única 1,5 cm no traço em volume 1:2:10 (cimento, cal e areia fina) apenas para tirar imperfeições e deixar uma superfície lisa. Finalização com uma camada de tinta para parede.
Esquadrias	- Porta (Folha prensada 0,90 m x 2,10 m); Forra com bandeiras (1,20 m x 2,70 m); - Janela (2 folhas com 0,57 m x 1,07 m); Forra com bandeira (1,20 m x 1,43 m); - Ferragens: Fechadura, ferrolhos e dobradiças - Acabamento: Verniz fosco
Contra verga	Concreto armado (Fck 25 MPa)
Contrapiso	Concreto magro.

Piso	Piso de cimento queimado.
Cinta de concreto superior	Cinta de concreto armado superior (fck 25 MPa) com altura de 10 cm e 12 cm de largura para fazer o travamento entre painéis. Essa cinta será confeccionada para que um lado seja mais elevado com 22 cm para garantir uma inclinação de 3% nos painéis laje que serão apoiados.
Cobertura	A cobertura será feita com painéis modulares intertravados com 0,40 m de largura x 0,12 m de espessura x 4,00 m de comprimento. Para o acabamento desses painéis será utilizado uma argamassa impermeabilizante para garantir a estanqueidade da laje modular.
Instalações elétricas	Instalação elétrica com tubulação aparente.

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 96 mostra os tipos de painéis que serão fabricados para construção das paredes do protótipo de habitação proposto.

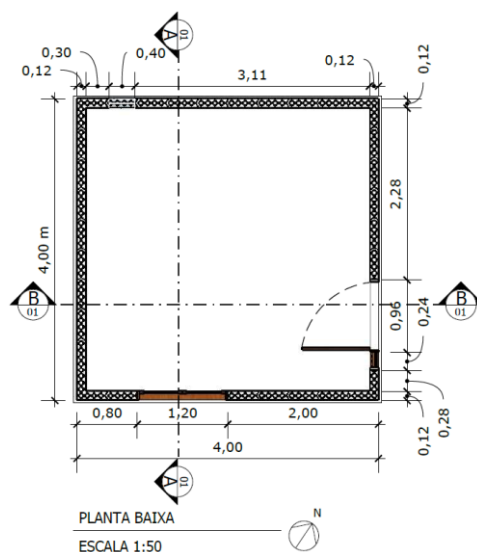
Figura 96: Tipos de painéis para construção das paredes do protótipo

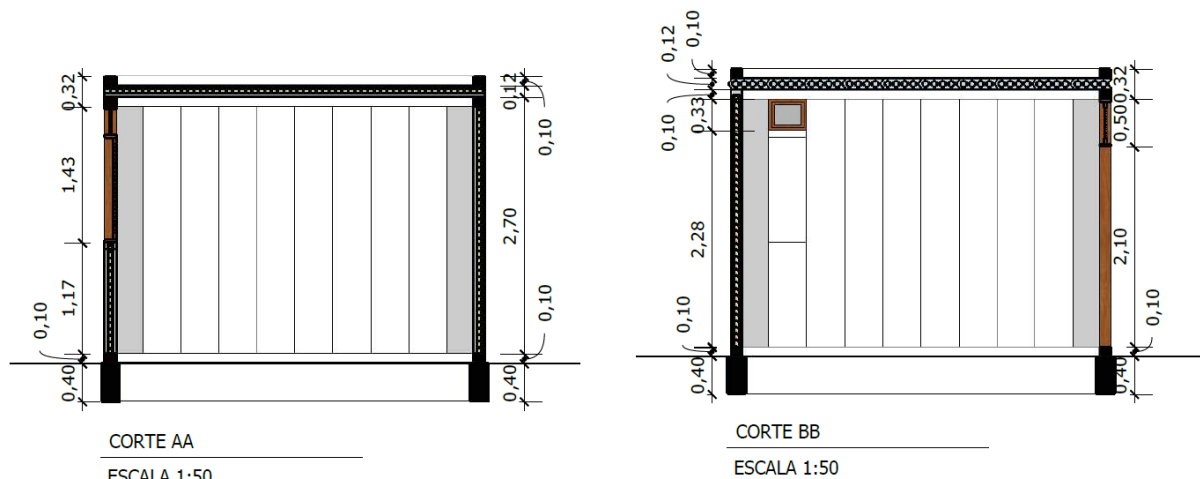


Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 97 mostra mais detalhamento do projeto com planta baixa e cortes.

Figura 97: Planta baixa e cortes do protótipo proposto para ensaios de desempenho



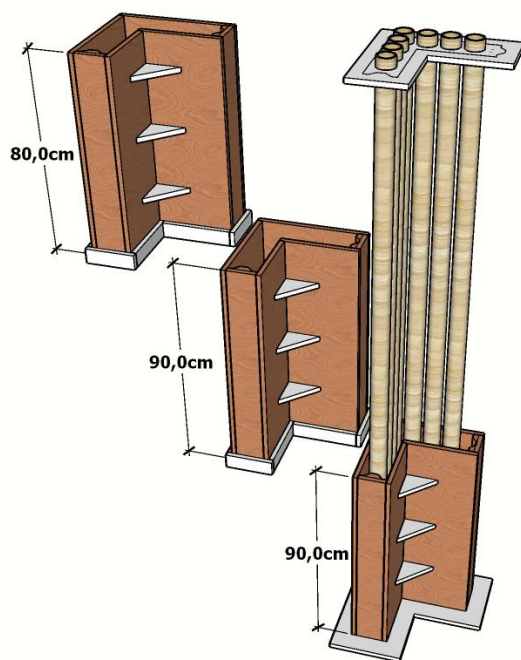


Fonte: Modelo gráfico digital elaborado por Germana Rocha, Wenia Santos e Bianca Pacheco.

Para confeccionar os painéis necessários para construção desse protótipo foi necessário desenvolver formas sob medida que atendessem ao padrão necessário, assim como fossem resistentes o suficiente para que no processo repetitivo de moldagem e desmoldagem a mesma não se deforme ou perca a precisão das medidas do painel.

O outro tipo de painel modular é o painel de canto ou painel “L”. Serão confeccionadas apenas quatro unidades dele. Entretanto, diferentemente dos demais painéis que podem ser moldados na horizontal, o painel de canto necessita ser moldado na vertical, e pensou-se em um sistema de forma diferente. Escalonado, os colmos de bambu são posicionados dentro do primeiro módulo da fôrma e fixados na parte superior por um gabarito que garante o espaçamento entre os mesmos. Após a concretagem do primeiro estágio o segundo estágio é parafusado de forma a dar continuidade a fôrma e assim por diante até chegar ao terceiro e último estágio. Essa forma foi projetada para ser confeccionada em madeira por quatro motivos: primeiro por não haver uma necessidade de grande repetição do processo com os demais painéis, visto que só serão necessárias quatro unidades; segundo pela facilidade em se trabalhar com a madeira de forma que com equipamento simples pode-se fazer pequenos ajustes na hora da concretagem, assim como a facilidade de união de peças com uso de parafusos; terceiro pelo reduzido preço da madeira visto que uma forma metálica tem um maior custo; quarto pelo peso das peças uma vez que as mesmas estarão sendo moldadas na vertical. A Figura 98 mostra o projeto da forma do painel de canto.

Figura 98: Forma para painel de canto



Fonte: Elaborado pelo autor