

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
ESTRUTURAS

**DESENVOLVIMENTO DE TRELIÇAS PLANAS DE
BAMBUS DE PEQUENO DIÂMETRO COM
BIOCONEXÕES COMPÓSITAS**

Autora: Cinthia Aparecida Carneiro Lana

Prof. Orientador: Dr. Luís Eustáquio Moreira

Belo Horizonte, Maio 2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**"DESENVOLVIMENTO DE TRELIÇAS PLANAS DE BAMBUS DE
PEQUENO DIÂMETRO COM BIOCONEXÕES COMPÓSITAS"**

Cinthia Aparecida Carneiro Lana

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia de Estruturas".

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Luís Eustáquio Moreira
DEES-UFMG (Orientador)

Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues
DEES - UFMG

Profa. Dra. Maria Carmem Couto Ribeiro
DEMEC - UFMG

Prof. Dr. Conrado de Souza Rodrigues
CEFET – MG

Prof. Dr. José Luiz Mendes Ripper
PUC - Rio

Belo Horizonte, 24 de maio de 2016

L243d

Lana, Cinthia Aparecida Carneiro.

Desenvolvimento de treliças planas de bambus de pequeno diâmetro com bioconexões compósitas [manuscrito] / Cinthia Aparecida Carneiro Lana. – 2016.

xviii, 130 f., enc.: il.

Orientador: Luís Eustáquio Moreira.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f. 122-130.

Bibliografia: f. 118-121.

1. Engenharia de estruturas - Teses. 2. Bambu - Teses.
3. Acoplamentos - Teses. 4. Gomas e resinas - Indústria - Teses.
5. Processos de fabricação - Teses. I. Moreira, Luis Eustáquio.
II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia.
III. Título.

CDU: 624(043)

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais,
Antônio Carlos e Romilda por todo o
carinho, compreensão e dedicação durante essa trajetória.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Luís Eustáquio Moreira por ter aceitado e encarado este desafio comigo mesmo diante das dificuldades, tornando-se além de professor, um grande amigo.

A minha família que sempre esteve do meu lado, me apoiando em grandes decisões e me incentivando a enfrentar os desafios. Especialmente aos meus pais Antônio Carlos e Romilda, por me incentivarem a superar meus medos e persistir em meus objetivos.

A minha querida prima Lorena, um exemplo de pessoa e profissional que sempre esteve presente em minha vida, me dando suporte, atenção, cuidado e carinho.

Ao meu namorado Alexandre, pelo apoio emocional nos momentos tristes e alegres, e também por todo o carinho, atenção, compreensão e companheirismo ao longo dos anos.

Ao meu grande amigo Ayrton Hugo Andrade, por acreditar no meu potencial e me incentivar a concluir mais esta etapa em minha carreira.

Um agradecimento especial ao professor Francisco Carlos Rodrigues pela colaboração no projeto dos experimentos e experimentos dos protótipos.

Aos meus velhos e novos amigos que me acompanharam por todo esse percurso até esta conquista e por dividirem comigo o sonho do sucesso. Especialmente a Karine, Luana e Marina, que me proporcionaram além do apoio, as suas sinceras amizades ao longo deste período.

Agradeço à Propees – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Estruturas – da EEUFMG, pelo financiamento da pesquisa.

“A persistência é o menor caminho do êxito”.
(Charles Chaplin)

RESUMO

LANA, Cinthia Aparecida Carneiro. Desenvolvimento de Treliças Planas de Bambus de Pequeno Diâmetro com Bioconexões Compósitas. Belo Horizonte, 2016, Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais.

Essa dissertação trata do desenvolvimento artesanal de treliças planas de bambus de pequeno diâmetro - espécie *Bambusa tuldoides* -, através da conjugação dos procedimentos do Desenho do Produto para criação da estrutura e das conexões; aos procedimentos de Análise Estrutural, Experimental e Numérica, para quantificação das resistências mecânicas obtidas e para a otimização do objeto de utilidade. A estrutura realiza-se com ligações compósitas de tecido de algodão embebidos em resina poliuretana – PU – à base de mamona, moldadas e coladas diretamente à superfície interna e externa dos bambus tubulares. Para tanto foram realizados experimentos físicos e mecânicos para caracterização do material compósito obtido e do bambu utilizado, experimentos mecânicos para avaliação da resistência ao cisalhamento da colagem e experimentos mecânicos de dois protótipos de treliças isostáticas com 3 e 4 metros de vão livre. A dissertação enfatiza também a importância do envolvimento direto do pesquisador experimental de engenharia, com os materiais utilizados e com a fabricação do objeto de utilidade. Este por sua vez atua como mola mestra para a inovação, pelo encorajamento que trazem, sem o qual fica-se preso às técnicas já consagradas pelo uso, por serem um caminho de menor risco. Os resultados mostram que a estrutura desenvolvida, além de ter apresentado um comportamento diferenciado das estruturas parafusadas, pode suportar cargas superiores a 100 vezes o seu peso próprio, caracterizando um alto desempenho estrutural.

Palavras-chave: bambus, *Bambusa tuldoides*, bioconexões compósitas, resina poliuretana; técnicas de fabricação

A B S T R A C T

LANA, Cinthia Aparecida Carneiro. Development of Bamboo Plane Trusses with Small Diameter and Composite Bioconnections. Belo Horizonte, 2016, Masters Dissertation. Structural Engineering Department Program, School of Engineering, Federal University of Minas Gerais.

This dissertation is about the development of artisanal bamboo plane trusses with small diameter -species *Bambusa tuldooides*-, through the combination of Product Design procedures to create the structure and connections. Structural analysis, Experimental and Numerical procedures were used to quantify the mechanical strength obtained, and to optimize the object of utility. The structure is made with composite connections of cotton cloth soaked in polyurethane resin - PU - based on castor bean, molded and bonded directly to the inner and outer surface of the tubular bamboos. Mechanical and physical experiments were conducted to characterize the composite material and the utilized bamboo. Further mechanical experiments were done to evaluate the bonding's shear resistance, and the two isostatic scissor type prototype trusses, 3 and 4 meters in size. The dissertation also emphasizes the importance of direct involvement of the experimental engineering researcher with the materials used and the manufacturing of the utility object. This in turn acts as a mainspring for innovation, for the encouragement it brings, without which, one is stuck to the techniques already established by usage, for they are of lower risk. The results show that the structure developed, besides having presented a differentiated behavior of bolted structures, can withstand loads of more than 100 times its own weight, characterizing a high structural performance.

Keywords: bamboo, *Bambusa tuldooides*, composite bioconnections, polyurethane resin, manufacturing techniques;

Lista de Figuras

Figura 1.1: a) Estrutura amarrada com juta e resina; b) Amarração em giro.	6
Figura 1.2: Modelo tensegrity da coluna vertebral humana.	7
Figura 2.1: Estrutura externa e interna do bambu.....	11
Figura 2.2: Tipos de rizomas: a) alastrantes; b) entouceirantes;	13
Figura 2.3: Rizoma tipo metamorfo.....	13
Figura 2.4: Corte longitudinal do bambu.....	14
Figura 2.5: a) Desenho microscópico dos tecidos; b) Vazios do parênquima e vasos	14
Figura 2.6: a) Estrutura de um nó com anastomose vascular.	14
Figura 2.7: Cúpula Taj Mahal.....	22
Figura 2.8: Tecelagem quadrada (Yotsume – Ami)	23
Figura 2.9: Tecelagem hexagonal (Mutsume – Ami).....	23
Figura 2.10: Tecelagem Ajiro: usada para fabricação de caixas manuais.....	23
Figura 2.11: Estruturas e paredes de bambu em casas Chinesas	14
Figura 2.12: Bicicleta com quadro de bambu - LILD	14
Figura 2.13: Bicicletas produzidas artesanalmente – Flávio Deslandes.....	25
Figura 2.14: Cadeira de Rodas com subestrutura tensegrity de bambu	25
Figura 2.15: Bicicleta com quadro de Bambu Laminado Colado	26
Figura 2.16: Residências de Bambu, Bali - Indonésia.....	27
Figura 2.17: Forro trançado com fibras de bambu	27
Figura 2.18: Móvel confeccionado com bambu	28
Figura 2.19: Amassamento das peças sem nó ou sem reforço interno	28
Figura 2.20: Corte boca de peixe com e sem falange	29
Figura 2.21: Corte com falanges e encaixes para parafusos	30
Figura 2.22: Corte parcial ou boca de flauta.....	30

Figura 2.23: Conexões amarradas com cordas	31
Figura 2.24: Anfiteatro com estrutura amarrada de Bambu Mossô.....	32
Figura 2.25: Conexão com cavilhas.....	33
Figura 2.26: Conexões sobrepostas com pino	33
Figura 2.27: Conexão de topo com chapa de aço/luva de aço.....	34
Figura 2.28: Ligação com chapa externa.....	34
Figura 2.29: Conexão com elemento interno.....	35
Figura 2.30: Ligação aço sob pressão.....	35
Figura 2.31: Ligação para treliça espacial	36
Figura 2.32: Teste do Protótipo da Treliça Espacial de Bambu	37
Figura 2.33: Estruturas parafusadas construídas pela Arte Desenho Oficina de Design.....	38
Figura 2.34: a) Teste cisalhamento por tração; b) Ruptura dentro da parede do bambu.....	38
Figura 2.35: Aplicação do Sistema de Reforço	39
Figura 3.1: Molhagem do tecido com a resina poliuretana - PU.....	41
Figura 3.2: Preparação dos corpos de prova – rolos de compósito.	41
Figura 3.3: Dimensões do Corpo de Prova.	42
Figura 3.4: Compressão do compósito.	42
Figura 3.5: Curvas tensão-deformação para o compósito sob compressão.	44
Figura 3.6: Corpos de prova para compressão dos compósitos.....	44
Figura 3.7: Curvas tensão-deformação para o compósito em compressão.....	45
Figura 3.8: Corpo de prova para teste de tração do compósito.	46
Figura 3.9: a) Corpos de prova para tração; b) Teste de tração do compósito; c) Malha ortogonal do tecido.....	47
Figura 3.10: Curvas Tensão-deformação para o compósito em tração	48
Figura 3.11: Dimensões do corpo de prova	50
Figura 3.12: Corpos de prova após ruptura	50

Figura 3.13: Curvas Força versus Deslocamento para cisalhamento paralelo em tração.....	51
Figura 3.14: a) Dimensões do corpo de prova; b) Teste de compressão do bambu	52
Figura 3.15: Curvas Tensão x Deformação – bambu comprimido.....	53
Figura 3.16: Dimensões do corpo de prova para tração	54
Figura 3.17: Aspecto da ruptura por tração do bambu – trecho médio	54
Figura 3.18: a) Teste de tração do bambu; b) Ruptura tipo do bambu em tração	55
Figura 3.19: Gráfico de tensão versus deformação na tração do bambu	56
Figura 3.20: Corpos de prova cisalhamento da colagem por compressão.....	57
Figura 3.21: Distância livre para deslocamento do compósito.....	48
Figura 3.22: Aspecto da parte superior do corpo de prova.....	48
Figura 3.23: Teste de cisalhamento da colagem por compressão.....	59
Figura 3.24: Ruptura do corpo de prova na linha adesiva	48
Figura 3.25: a) Dimensões do corpo de prova; b) Aspectos do corpo de prova;.....	61
Figura 3.26: Teste de cisalhamento da colagem por tração.....	61
Figura 3.27: Curva tensão – deslocamento do cisalhamento da colagem sob tração	63
Figura 3.28: a) Ruptura na linha adesiva; b) Ruptura por delaminação do compósito	48
Figura 3.29: Pesagem e secagem das amostras de bambu.....	65
Figura 4.1: Composição do Protótipo I.....	71
Figura 4.2: Lixamento longitudinal e circunferencial – superfície externa.....	72
Figura 4.3: Corte e entalhe dos banzos.....	72
Figura 4.4: Um estudo de cores com o bambu.	74
Figura 4.5: O desenho das bandagens.....	75
Figura 4.6: Protótipo I - antes e após a pintura.....	76
Figura 4.7: Composição do protótipo II	77
Figura 4.8: Retirada da película interna – técnica posteriormente descartada.....	79
Figura 4.9: Desenho guia para posicionamento das barras.....	80

Figura 4.10: Predisposição e dimensionamento dos rolos.....	81
Figura 4.11: Demão de reina na parede interna.....	82
Figura 4.12: Içamento do rolo compósito.....	76
Figura 4.13: Detalhes das ligações internas dos banzos.....	83
Figura 4.14: Bandagens de ligação externa dos banzos.....	83
Figura 4.15: Tracionamento das cordinhas de içamento opostas – compressão do pendural	76
Figura 4.16: Conexão das barras internas.....	85
Figura 4.17: Conexão das diagonais.....	85
Figura 4.18: Secagem das bandagens e ligações das diagonais.....	76
Figura 4.19: Composição final – Protótipo II.....	87
Figura 5.1: Protótipo I (Tesoura) no local do ensaio.....	89
Figura 5.2: Instrumentação do Protótipo I.....	90
Figura 5.3: Ruptura da bandagem compósita por consequência da ruptura do banzo inferior	91
Figura 5.4: Ciclos de Carga e Descarga do Protótipo I.....	92
Figura 5.5: Ciclo 1.....	93
Figura 5.6: Ciclo 2.....	93
Figura 5.7: Ciclo 3.....	94
Figura 5.8: Ultimo Carregamento – Reta Inicial.....	94
Figura 5.9: Elemento finito tipo para treliças de nós compósitos.....	95
Figura 5.10: Coordenadas Nodais.....	96
Figura 5.11: Comparação das retas Carga x Deslocamento Experimental e Numéricas.....	97
Figura 5.12: Diagrama de forças axiais.....	98
Figura 5.13: a) reforço externo; b) reforço interno.....	100
Figura 5.14: Detalhamento do nó A.....	101

Figura 5.15: Aparelho de apoio recomendado.....	101
Figura 5.16: Projeto do Experimento do Protótipo II.....	102
Figura 5.17: Posicionamento do relógio comparador (R.C).....	103
Figura 5.18: Flambagem lateral do banzo superior	104
Figura 5.19: Curva Carga x Deslocamento Vertical.....	105
Figura 5.20: Ciclo 1	106
Figura 5.21: Ciclo 2	106
Figura 5.22: Ciclo 3	107
Figura 5.23: Carregamento Final – Reta Inicial	107
Figura 5.24: Nós B e D deslocados 1 cm perpendicularmente ao plano da treliça	108
Figura 5.25: Elemento de barra tipo	109
Figura 5.26: Comparação das Curvas Experimental e Numérica.....	110
Figura 5.27: Comparação dos resultados (numérico e experimental)	111
Figura 5.28: Forças axiais nas barras da estrutura e nos cabos de contraventamento	111
Figura 5.29: Forças axiais de compressão para uma solicitação de 15,3 kN.....	113

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Dimensões das fibras de algumas espécies de bambu	15
Tabela 3.1: Relatório de compressão do compósito	43
Tabela 3.2: Relatório de Compressão do Compósito – demais corpos de prova	45
Tabela 3.3: Resultados dos testes de tração do compósito	48
Tabela 3.4: Resistência ao Cisalhamento Paralelo do bambu em tração	51
Tabela 3.5: Dados do ensaio compressão do bambu	52
Tabela 3.6: Resultados dos testes de tração do bambu	55
Tabela 3.7: Resultados dos testes de cisalhamento da colagem por compressão	58
Tabela 3.8: Resultados dos testes de cisalhamento da colagem por tração	62
Tabela 3.9: Resultado de densidade e conteúdo de umidade do bambu.....	66
Tabela 5.1: Resultados de Carga Aplicada versus Deslocamento para o Protótipo I.....	91
Tabela 5.2: Resultados de Carga Aplicada versus Deslocamento – Protótipo II	103
Tabela 5.3: Comparação dos resultados experimentais e numéricos	109

Lista de Símbolos

Letras Romanas Minúsculas

<i>cm</i>	Centímetro
<i>e_a</i>	Imperfeição Acidental
<i>e_c</i>	Imperfeição devido a Fluência
<i>e_m</i>	Dente Máximo
<i>et al</i>	e outros (bibliografia)
<i>g</i>	Gramma
<i>gf</i>	Gramma força
<i>h</i>	Hora
<i>ha</i>	Hectare
<i>kgf</i>	Quilograma força
<i>km</i>	Quilômetro
<i>kN</i>	Quilo Newton
<i>l₀</i>	Medida, largura inicial
<i>m</i>	Metro
<i>m²</i>	Metro quadrado
<i>m³</i>	Metro cúbico
<i>mm</i>	Milímetro
<i>n^o</i>	Número
<i>t</i>	Espessura
<i>ton</i>	Tonelada

Letras Romanas Maiúsculas

<i>A</i>	Área
<i>D</i>	Diâmetro
\bar{D}	Diâmetro Médio
<i>E</i>	Módulo de Elasticidade
<i>E_c</i>	Módulo de Elasticidade a Compressão
<i>E_{cc}</i>	Módulo de Elasticidade do Compósito a Compressão

E_{ct}	Módulo de Elasticidade do Compósito a Tração
E_t	Módulo de Elasticidade a Tração
FA	Fator Anisotrópico
Fe	Carga de Euler
GPa	Giga Pascal
I	Momento de Inércia
$I\%$	Inchamento
kN	Unidade em Kilo Newton
L, l	Vão, distância, comprimento do elemento
M	Momento Fletor
MPa	Mega Pascal
N	Unidade em Newton
P	Carga aplicada
Pa	Unidade em Pascal
Ps	Peso Seco
P_u	Peso Úmido
$P_{u\%}$	Peso específico a umidade
R	Reação de Apoio
$R\%$	Retração
T	Tensão
$U\%$	Conteúdo de Umidade
$V_{u\%}$	Volume específico a umidade
VE	Valor Estrutural

Letras Gregas

λ	Estiramento de uma fibra genérica; índice de esbeltez (adimensional)
ρ_{ap}	Densidade Aparente
σ_c	Tensão Máxima a Compressão
ϕ	Coefficiente de fluência
τ	Tensão de Cisalhamento
Δt	Comprimento Adicional

Lista de Abreviaturas e Siglas

3D	Tridimensional
CEPAM3	Centro de Pesquisa Avançada em Móveis, Madeira e Novos Materiais
CEFLUMAC	Centro Eclético da Fluente Luiz Manoel Corrente
CIMGC	Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CP	Corpos de Prova
DT	Transdutores de deslocamento
EE	Escola de Engenharia
INBAR	International Network Bamboo and Rattan
LAEES	Laboratório de Análises Experimentais de Estruturas
LASE	Laboratório de Sistemas Estruturais
LILD	Laboratório de Investigação em Livre Desenho
NBR	Denominação de norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas
PVC	Policloreto de Polivinila
PU	Poliuretano
RC	Relógio Comparador
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais

SUMÁRIO

Capítulo 1	1
1.1. Objetivo	2
1.2. Justificativa.....	2
1.3. Metodologia.....	4
1.4. Conteúdo Geral.....	9
Capítulo 2	10
2.1. Introdução.....	10
2.2. Morfologia do Bambu	11
2.3. Característica Físicas e Mecânica do Bambu	16
2.3.1. Características Físicas	16
2.3.2. Características Mecânicas.....	20
2.4. Algumas aplicações estruturais do Bambu.....	21
2.5. Conexões das estruturas de bambu.....	28
Capítulo 3	40
3.1. Caracterização do Compósito.....	40
3.2. Caracterização do Bambu.....	49
3.3. Caracterização da colagem	57
3.4. Experimentos Físicos.....	64
3.5. Dimensionamento da Bioconexão.....	66
Capítulo 4	69
4.1. Introdução.....	69
4.2. Fabricação do Protótipo I	70
4.3. Fabricação do Protótipo II	76
Capítulo 5	88

4.1. Teste e Análise do Protótipo I	88
4.2. Teste e Análise do Protótipo II	102
Capítulo 6	115
CONCLUSÃO	115
Referências Bibliográficas	118
Anexo I	122

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

A indústria da construção é fundamental para o desenvolvimento sócio econômico de todos os países, porém causam um grande impacto ambiental ao longo de toda a cadeia produtiva, seja na extração de matéria prima, na produção dos materiais e na geração e deposição inadequada de resíduos sólidos. Estes resíduos quando descartados em um ambiente impróprio, podem acarretar por exemplo, o entupimento de bueiros e degradação do solo.

Atualmente é possível observar o avanço na qualidade da construção civil, adquiridos através de programas de redução de perdas e implementação de sistema de gestão de qualidade. Entretanto, para preservar o meio ambiente e garantir a qualidade de vida da população não é necessário apenas essa “reeducação”, mas também o investimento em materiais e projetos sustentáveis.

Entre as matérias primas que atendem a essa necessidade, podemos citar o bambu devido a sua resistência, flexibilidade e pelo baixo impacto gerado em seu cultivo. Em alguns países como China, Equador e Colômbia, o bambu já é um material de construção consagrado, na construção de edifícios e pontes de pequeno e médio portes.

No Brasil, a aplicação do bambu ainda é tímida e o atendimento a grandes demandas ainda não é possível porque as primeiras pesquisas voltadas à propagação de espécies começaram a ser financiadas há pouco tempo pelo CNPq, com verba do Agronegócio, em chamada pública do edital 25/2008. Os bambuzais existentes na zona rural e periferia das cidades são propriedades particulares não sistematizadas e ainda sem vínculo com o mercado.

Por outro lado, pode-se dizer que a pesquisa dessa planta é relativamente recente. O primeiro Congresso Internacional do Bambu ocorreu em Singapura no ano de 1980, sendo o marco inicial para a pesquisa do bambu no Ocidente. As florestas de bambu capturam o carbono, produzem oxigênio e protegem o solo de erosões e assoreamento de rios. Dentre as espécies mais estudadas podemos citar o *Phyllostachys pubescens*, conhecido como Mossô, devido às

suas características geométricas que favorecem a produção de laminados para pisos e painéis, assim como os da espécie *Dendrocalamus giganteus*. Os bambus do gênero *Guadua* possuem paredes espessas com grande resistência mecânica, sendo utilizados na Colômbia desde períodos pré-Colombianos, para a construção de casas. Uma das maiores reservas do mundo dos bambus *Guadua* encontra-se na Floresta Amazônica, no Acre, onde já estão sendo exploradas pelos chineses.

Em termos de estrutura, pouca atenção tem sido dada aos bambus de diâmetros menores, senão para a fabricação de móveis. Por outro lado, as estruturas têm utilizado pinos nas conexões. As bioconexões por sua vez, distribuem as tensões em uma ampla superfície, contornando o problema de tensões concentradas nos furos. Contrapondo-se a essa tendência, esta Dissertação consiste no desenvolvimento artesanal de treliças de bambus da espécie *Bambusa tuldoides*, bambus muito resistentes, que têm diâmetro médio de 5 cm. Embora abundantes nas zonas rurais brasileiras, têm muito pouco uso na produção de objetos de utilidade, senão em balaios e peneiras.

1.1. Objetivo

Esta dissertação tem como objetivo relatar todos os procedimentos que conduziram à criação do objeto de utilidade denominado Treliça Plana de Bambu com Bioconexões Compósitas; uma solução para bambus de pequeno diâmetro desenvolvida através de experimentos mecânicos e físicos dos bambus da espécie *Bambusa tuldoides*, experimentos mecânicos e físicos das conexões compósitas de resina poliuretana à base de mamona e tecido de algodão alvejado e experimentos mecânicos de 2 protótipos fabricados artesanalmente e análises correlatas.

1.2. Justificativa

“Chegamos a um ponto na História em que devemos moldar nossas ações em todo o mundo, com maior atenção para as consequências ambientais. Através da ignorância ou da indiferença podemos causar danos maciços e irreversíveis ao meio ambiente, do qual nossa vida e bem-estar dependem. Por outro lado, através do maior conhecimento e de ações mais

sábias, podemos conquistar uma vida melhor para nós e para a posteridade, com um meio ambiente em sintonia com as necessidades e esperanças humanas...”

Trecho da Declaração da Conferência da ONU sobre o Meio Ambiente (Estocolmo, 1972), parágrafo 6.

A grande questão mecânica a ser respondida para utilização dos bambus em estruturas seria: - como manter a integridade estrutural do tubo, tanto ao longo do elemento, para prevenir ou reduzir efeitos de naturais rachaduras por secagens diferenciais e como trabalhar a extremidade dos tubos de forma que possa transmitir com resistência controlada, os esforços que caminham pelos elementos do sistema estrutural. É um conceito estrutural fundamental que uma conexão eficiente seja capaz de suportar cargas superiores ao limite de capacidade de carga do próprio elemento, ou seja, o elemento deve romper antes das conexões e não o contrário. O que se tem visto é que os bambus não têm sido devidamente trabalhados para que possam ficar confiáveis como os demais elementos estruturais de aço, concreto ou madeira.

Há uma confiança excessiva nas conexões parafusadas sem o devido entendimento da distribuição de tensões locais, dos riscos de propagação de trincas imprevisíveis, e em muitos casos, as construções modelo já realizadas não passariam numa análise de engenharia ou têm um número excessivo de barras para contornar acidentes, na lógica de que falhando uma barra, outras se encarregariam da sobrecarga, sem o risco de colapso global, até que o dano fosse reparado. Sabe-se que o grande desenvolvimento da engenharia de estruturas ocorreu quando as barras e conexões puderam absorver com segurança, também às forças de tração. Ou seja, até então, não se submetiam os elementos estruturais à tração, apenas à compressão e flexão.

Com o bambu, de certa forma, este problema continua, uma vez que não se tem ainda uma solução eficiente, segura e de execução prática das ligações para que resistam tanto à compressão quanto à tração. Nessa Dissertação busca-se contornar esses problemas, através das bioconexões compósitas, que têm como vantagem mecânica o fato de distribuírem os esforços axiais sobre uma ampla superfície, diferentemente dos parafusos que concentram todas as tensões na região dos furos.

O bambu, por sua alta resistência (40 a 80 *MPa* na compressão; 170 a 300 *MPa* na tração); baixo peso específico, 5 a 9 kN/m^3 ; alta produtividade de biomassa, 5 a 10 $\frac{ton}{ha \times ano}$ e facilidade de desdobramento em ripas e fitas, é capaz de realizar uma série de sistemas reticulados que mesmo que concretizados com outros materiais, não seriam construídos com a mesma elegância e facilidade. Não existe um tubo industrial no mercado que trabalhe em flexo-compressão e seja tão resistente quanto o bambu com a mesma leveza deste. A anatomia do bambu e a presença dos diafragmas - discos rígidos de cerca de 5 mm de espessura que preenchem a seção transversal na região dos nós - proporcionam ao tubo um funcionamento mecânico ímpar, razão porque somente após o surgimento de polímeros high tech, as varas de pesca foram substituídas por varas sintéticas.

Toda a rica literatura hoje existente sobre a utilização do bambu na construção civil bem como os experimentos mecânicos que temos realizado, mostram que os bambus em estado natural e/ou desdobrados em ripas e fitas, são elementos estruturais adequados a abrigos de pequenos e médios portes, e baixos a médios carregamentos, limites estes condicionados não somente pela resistência do material como também pela geometria natural do bambu.

No Brasil pode-se ainda encontrar casas do período colonial com paredes armadas com bambu, nas construções de pau a pique. Essas técnicas foram praticamente abandonadas com o advento da sociedade industrial. Contudo, o baixo peso específico do bambu, aliados à alta resistência mecânica e produção fotossintética, diante de um quadro preocupante de aumento populacional e finitude dos recursos não renováveis, justificam que se dê ao bambu o status de material de construção, também no Brasil, o que somente é possível se se caracterizam as espécies disponíveis e se desenvolvam estruturas para que se tire o bambu do anonimato.

1.3. Metodologia

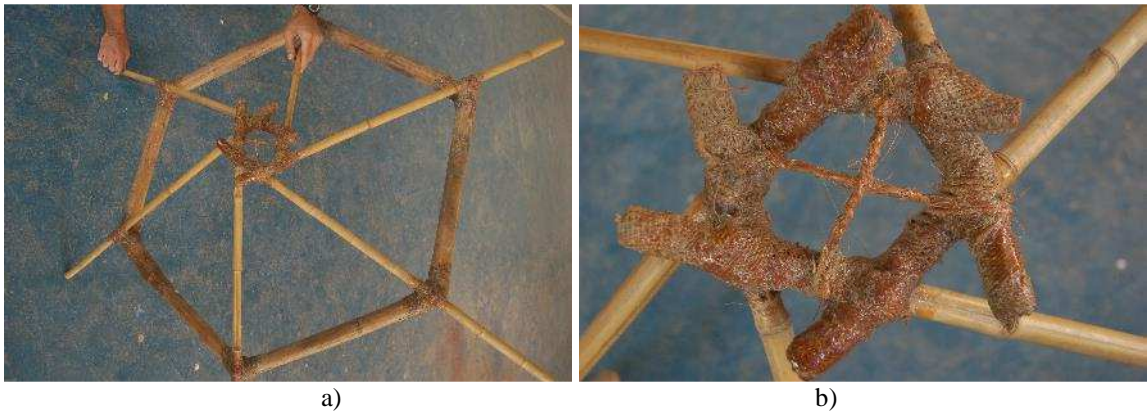
As estruturas de bambu com forma natural ou desdobrado em ripas e fitas, com um perfil de desenvolvimento mais artesanal que industrial, porém utilizando-se de todos os recursos industriais disponíveis para o desenvolvimento, tratados como elementos de jogo, tem sido um trabalho de investigação cooperada entre o Laboratório de Sistemas Estruturais – LASE, do Departamento de Engenharia de Estruturas da UFMG – DEES/EEUFMG – e o

Laboratório de Investigação em Livre Desenho – LILD, do Departamento de Artes e Design da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – DAD/PUC-Rio, que culminou com a publicação do livro *Jogo das Formas – Lógica do Objeto Natural*, que expõe alguns dos principais trabalhos desenvolvidos até o ano de 2012, pelos dois laboratórios, com uma linguagem suficientemente descritiva dos procedimentos de criação dos objetos de utilidade.

Tem-se portanto uma história de desenvolvimento de objetos, que vão além da simples ideia e chega-se à sua implementação, à sua concretização. O objetivo desses laboratórios é colocar os estudantes em contato com todo o tipo de material e técnicas de manipulação, um local livre, para que todos possam expressar seus pensamentos, trocarem suas ideias sem receio de se expressarem por serem de diferentes áreas do conhecimento. Um espaço onde se deve conversar muito, democraticamente, sem medo de se expor. O LILD é um espaço para o desenvolvimento de técnicas e o LASE pretende ser o mesmo, embora a engenharia esteja fortemente presente na mente dos alunos do LASE e do seu coordenador, por uma questão de formação profissional e contexto.

Mas a ideia de um laboratório como este é que os recursos computacionais e analíticos sejam instrumentos para o desenvolvimento dos objetos de utilidade que se propõem, onde o carro guia é o objeto estudado diretamente na materialidade, em modelos reduzidos, quando for o caso, e em protótipos em escala real, para que se vivencie todas as condições impostas pelo mundo físico, que não estão presentes nos recursos virtuais.

As primeiras ideias de se colarem os bambus, para este grupo de colaboradores, estão mostradas na Figura 1.1, onde se tem a descrição das barras do topo da cúpula de uma estrutura geodésica, com um design inovador que evita que se trabalhe com a precisão exigida quando as barras convergem para o mesmo ponto. Aqui elas são desviadas do ponto e se conectam em giro, coladas entre si por fibras de juta embebidas em resina. Ainda que o modelo não tenha sido ensaiado mecanicamente, ele representa muito mais do que uma ideia esboçada num esquema. Da ideia não se sabe da viabilidade da proposta, mas de um bom modelo físico tem-se como decidir da viabilidade da proposta, além de se vivenciar uma série de fenômenos durante a fabricação do modelo.



a) Estrutura amarrada com juta e resina; b) Amarração em giro.
(Moreira & Ripper, 2014)

Deste e outros modelos físicos reduzidos produzidos no LILD, Moreira & Ripper (2014), em que já se utilizava o conceito dos tecidos resinados para amarrar entre si os bambus, veio a confiança de se investir na proposta dessa dissertação. Por outro lado, há algum tempo trocávamos ideias sobre as estruturas tensegrity e sobre o tensegrity humano, juntamente à artista e designer Víctor (2007), que desenvolveu modelos didáticos para o funcionamento tensegrity da coluna vertebral, Figura 1.2. A fixação dos músculos aos ossos sempre foi um motivo de devaneio do professor Luís Eustáquio, na tentativa de reproduzir essa solução natural.



Figura 1.2: Modelo tensegrity da coluna vertebral humana.
(Vítor, 2007)

Pensou-se primeiramente nos fios de sisal, alinhados e colados tanto por dentro como por fora do bambu. Como essa solução se mostrou de difícil trabalhabilidade, retornou-se ao tecido. Os tecidos fariam o mesmo papel, pois teriam fibras alinhadas na direção das fibras do bambu e teriam também fibras na outra direção, ortogonalmente.

O tecido de algodão alvejado é celulose pura, material resistente, maleável, moldável e molhável pela resina PU, sendo por essa razão escolhido para solucionar as ligações. Ser alvejado é uma premissa pois o algodão cru é encerado, o que prejudicaria a molhagem das fibras pela resina. A resina sendo também de mamona, deveria ter compatibilidade com o algodão, não cristalizando as suas fibras. Para se certificar um pouco mais da possibilidade de colagem do compósito sobre o bambu, e já pensando numa possibilidade futura de se caminhar nessa direção, na monografia de Lukuza (2014) foram antecipadamente produzidos 2 corpos de prova para teste de resistência das ligações coladas. Estes corpos de prova foram os primeiros ensaios dessa dissertação, e estão no Anexo I, por serem considerados antecedentes. Até então não se tinha vislumbrado a solução das conexões, conforme propostas

nessa dissertação, nem a maneira como as barras seriam conectadas. Do sucesso destes 2 testes vieram as ideias que conduziram ao Protótipo I, o segundo experimento dessa dissertação, embora possa ser considerado a primeira solução estrutural típica desta investigação específica. E assim, sucessivamente, vieram então os demais experimentos.

Seguiram-se os experimentos para se computarem as propriedades mecânicas e físicas dos materiais empregados, ou seja, do compósito sob tração e compressão, dos bambus sob tração, compressão e cisalhamento paralelo, bem como a resistência das colagens tanto na parte interna quanto externa dos bambus, tanto por testes de tração como de compressão. As propriedades físicas determinadas para os materiais utilizados foram a densidade e o conteúdo de umidade no caso dos bambus. Os corpos de prova tiveram uma liberdade de execução, baseados na experiência do orientador e em algumas propostas normativas em vigor, conforme mencionadas nos próximos capítulos. O número de corpos de prova é relativamente pequeno, variando de 6 a 12 conforme o experimento, seguindo recomendações da norma ABNT NBR: 7190 - Projeto de Estruturas de Madeira. Para um material natural com variáveis relevantes não devidamente controladas, como é o caso da idade do colmo, é desperdício de tempo e dinheiro caracterizar um lote com um número excessivo de corpos de prova.

O texto da dissertação está disposto de uma maneira didática, tendo-se primeiramente uma revisão bibliográfica pertinente, os experimentos mecânicos e físicos dos materiais e em seguida os experimentos e análises dos Protótipos I e II, embora essa não tenha sido exatamente a sequência das investigações, conforme explicado acima. A técnica de fabricação da estrutura vem descrita ao final dos experimentos, embora obviamente tenha acontecido antes. Aqui enfatiza-se que a vivência da fabricação é fundamental para o desenvolvimento de novas técnicas construtivas.

As análises dos resultados de cada experimento, também para facilitar a leitura, vêm junto de cada experimento.

Quanto ao título da dissertação julgamos apropriado chamar a essas conexões bioconexões por duas razões: - primeiramente porque são conexões que se inspiram nas conexões dos músculos aos ossos. Nos capítulos dos experimentos, ver-se-á que são conexões também flexíveis, pela flexibilidade do compósito. Outra razão seria porque os desenvolvimentos de

tecnologia baseados nas soluções estruturais naturais, dos seres vivos em geral, ou qualquer solução desenvolvida pela natureza como resultado de processos adaptativos de milhares e milhões de anos; na tentativa de copiá-los e adaptá-los aos nossos objetos de utilidade é uma ciência recente que recebeu o nome de Biônica. Por outro lado a conexão desenvolvida é quase 100% de origem puramente vegetal, a não ser pela resina que é apenas 50% de mamona.

1.4. Conteúdo Geral

A dissertação compõe-se de capítulos.

No Capítulo 1 temos uma breve introdução que ressalta a importância dos materiais sustentáveis como o bambu, bem como o objetivo e justificativa do uso deste material na presente dissertação seguida de uma explicação parcial da metodologia aplicada para o desenvolvimento dos experimentos.

O Capítulo 2 traz uma revisão bibliográfica retratando a anatomia geral do bambu e alguns tipos de conexões existentes para estruturas de bambu encontradas na literatura.

No Capítulo 3 são relatados os procedimentos adotados na confecção dos corpos de prova, para a caracterização dos compósitos e dos bambus, assim como o ensaio dos mesmos.

No Capítulo 4 são relatadas as técnicas de fabricação dos protótipos e no Capítulo 5 são apresentados os testes e as análises dos Protótipos I e II.

O Capítulo 6 apresenta uma conclusão geral, seguida do Anexo 1, onde são mostrados os experimentos que antecederam e influenciaram a produção desta dissertação.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Introdução

Como toda planta, o bambu segue uma hierarquia botânica que é classificada em família, subfamília, gênero, espécies e variedades. Tal como o trigo, o milho e a cevada, o bambu pertence à família das gramíneas (em latim “Graminae”). Em termos de subfamília, pertence a “Bambusoideae” existindo mais de 90 gêneros e mais de 1300 espécies em todo o globo, localizados em maior abundância nos países tropicais e subtropicais. O bambu é nativo em todos os continentes com exceção da Europa (Moreira, 1991).

O maior número de espécies de bambu se concentra na Ásia (com cerca de 65%) sendo nativo na China, Coreia, Birmânia, Tailândia, Laos, Camboja, Vietnã, Malásia, Índia, Paquistão, Japão, Formosa, Filipinas, Indonésia e Ceilão.

No Brasil as espécies mais encontradas e seus respectivos nomes populares segundo Oliveira, (2013) são:

- *Bambusa vulgaris Schard*, popularmente conhecidos como bambu gigante;
- *Bambusa arundinacea Wild*, conhecidos como bambu comum;
- *Bambusa tuldoidea*;
- *Dendrocalamus giganteus*, conhecidos como bambu balde;
- *Dendrocalamus strictus* Nees, conhecidos como bambu cheio Chinês;
- *Phyllostachys aurea*, conhecidos como vara de pesca;
- *Phyllostachys pubescens*, conhecidos como bambu Mossô;
- *Guadua angustifolia*

2.2. Morfologia do Bambu

O bambu é uma gramínea tubular, onde a espessura da parede e o comprimento internodal têm diminuição gradual da base para o topo. A estrutura do bambu é constituída, de um modo geral, por um sistema subterrâneo de rizomas e um aéreo onde aparecem os colmos, galhos e folhas.

Os colmos são constituídos por uma série alternada de nós e entrenós formados por fibras e vasos condutores de seiva, sendo envolvidos por um tecido poroso denominado parênquima. Os entrenós são isolados uns dos outros por diafragmas que aparecem externamente como nós que dão origem aos ramos e folhas, Figura 2.1.

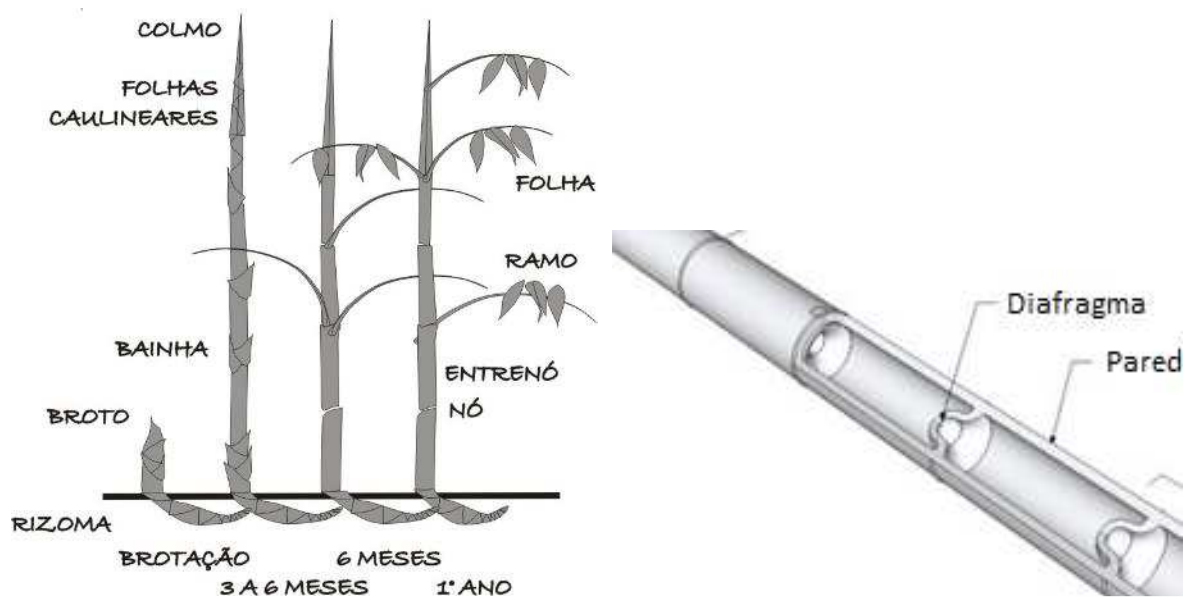


Figura 2.1: Estrutura externa e interna do bambu.
(DS-011, Vivianda, 2012)

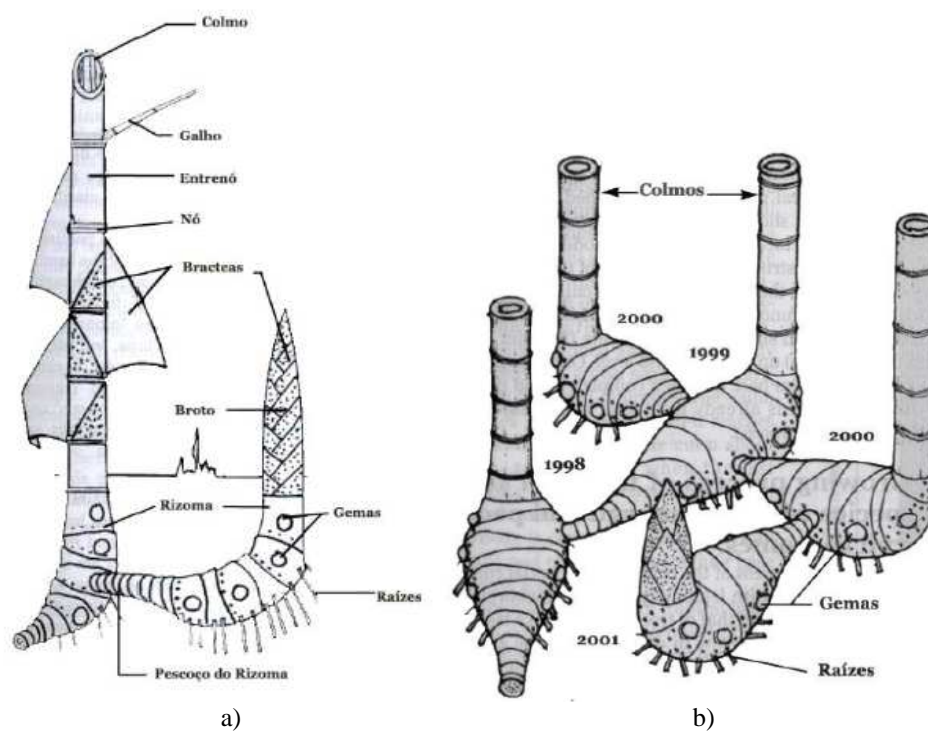
A altura média dos colmos varia de acordo com cada espécie, assim como os diâmetros e as espessuras de parede.

Os colmos têm seu crescimento completo pouco tempo após o aparecimento dos brotos e alcançam sua altura máxima em 30 dias no mínimo para espécies menores, e 180 dias no máximo para espécies maiores (Moreira, 1991). Os brotos aparecem anualmente, geralmente em estações chuvosas, podendo crescer continuamente de 20 cm até 1m ao dia, dependendo da espécie. Após esse período, começa o processo de amadurecimento dos colmos que leva

em torno de 3 a 4 anos e a partir desta idade o bambu tido como maduro pode ser cortado e utilizado em estruturas.

O rizoma trabalha no armazenamento de nutrientes e na propagação do bambu através do crescimento de novos colmos. Da mesma forma as células dos bambus continuam ativas por muitos anos e os bambus maduros também alimentam o rizoma e os bambus em crescimento, Liese (1998). Os bambus se diferem quanto à forma de crescimento, dividindo-se em dois tipos principais, os entouceirantes – paquimorfos – e os alastrantes – leptomorfos –, Figura 2.2. Os bambus do tipo alastrante, leptomorfos ou monopodiais, possuem rizomas longos, delgados e de formato cilíndrico. São bem resistentes ao frio visto que se encontram em zonas temperadas, tendo como representante o gênero *Phyllostachys*. De um modo geral, esse tipo de rizoma apresenta diâmetros bem menores que os colmos que vão originar. Em cada nó do rizoma existe uma gema lateral que permanece por um tempo ou permanentemente adormecida, podendo se ativar e produzir um novo colmo, ou um novo rizoma, que se desenvolve lateralmente. As folhas e ramos aparecem nas partes mais altas do colmo, mesmo antes de atingir a sua altura final.

Já os bambus de rizoma paquimorfo ou eutoceirantes são encontrados em regiões quentes e tropicais. Sendo assim, não se desenvolvem bem em regiões mais frias. Os rizomas deste tipo são curtos, grossos e sólidos, com raízes na parte inferior e gemas laterais que são ativadas desenvolvendo novos rizomas, no entanto, a maioria permanece adormecida por um tempo, ou inativa. Logo, apenas a gema apical do rizoma pode originar um novo rizoma e conseqüentemente cada rizoma poderá produzir apenas um colmo. Todo esse processo continua ao longo dos anos desenvolvendo novos rizomas, formando uma touceira densa ou moita. Esse tipo de rizoma é representado pelos bambus do gênero *Bambusa* e *Dendrocalamus*.



a) b)
 Figura 2.2: Tipos de rizomas: a) alastrantes; b) entouceirantes;
 (López, 2003)

Existe também outro tipo de rizoma denominado metamorfo, que também pode ser classificado como semi eutoceirante, pois seus rizomas produzem dois tipos de rizoma em uma mesma planta, paquimorfo e leptomorfo, característico dos bambus *Guadua*, Figura 2.3.

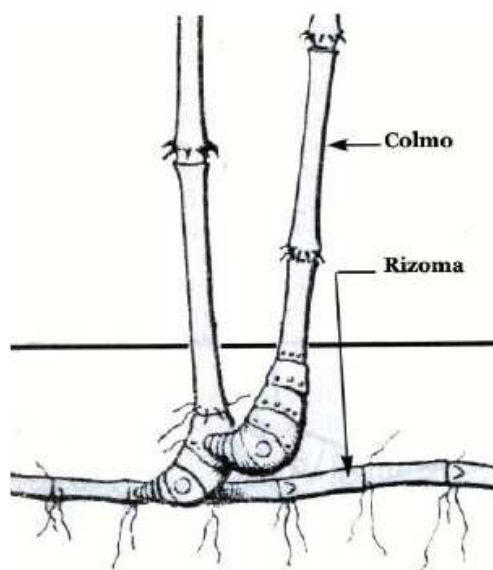


Figura 2.3: Rizoma tipo metamorfo.
 (López, 2003)

Em relação a anatomia do colmo, a parte externa é constituída por duas camadas de células epidérmicas cobertas por cera e a parte interna é constituída por fibras alongadas e alinhadas.

A Figura 2.4 mostra a parte interna do colmo junto aos nós, o diafragma e o aumento da espessura de parede. Já a Figura 2.5, mostra imagens microscópicas da parede do bambu onde podemos observar a distribuição das fibras, o sistema de vasos condutores e o parênquima.

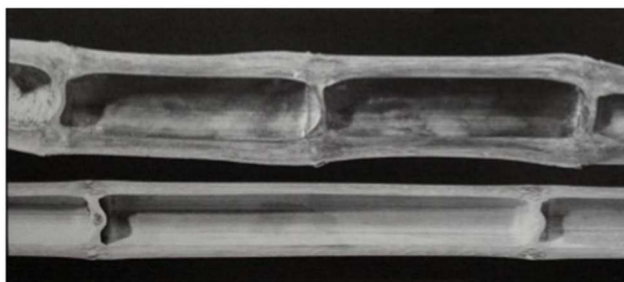


Figura 2.4: Corte longitudinal do bambu.
(Liese, 1998)

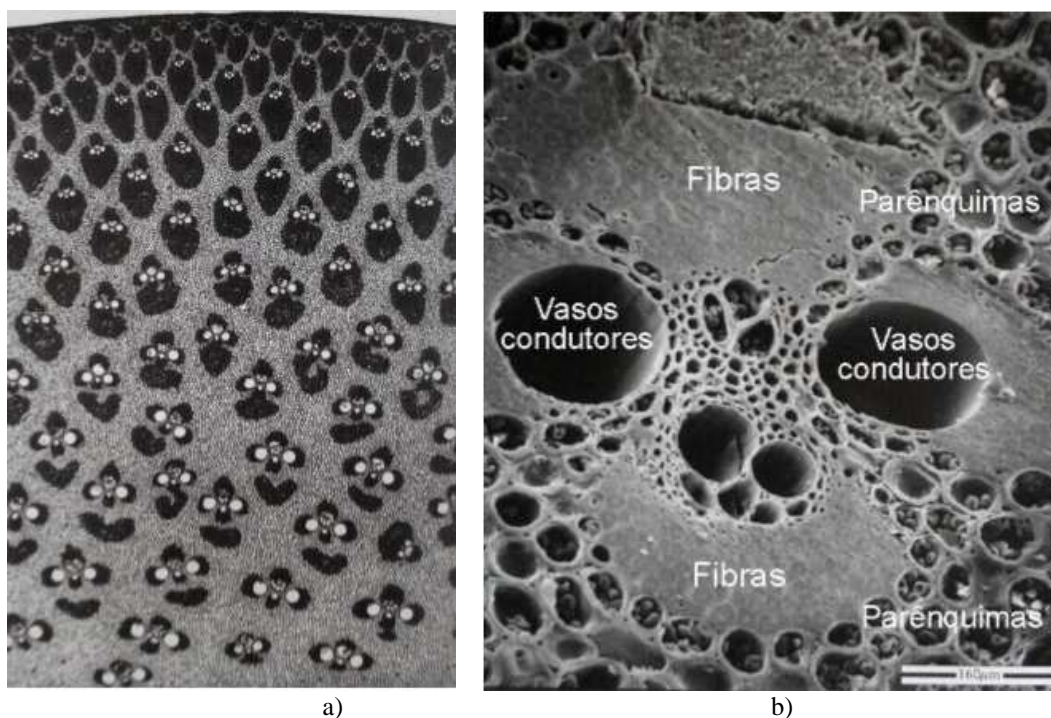


Figura 2.5: a) Desenho microscópico dos tecidos; b) Vazios do parênquima e vasos.
(Silva, 2014)

Na Figura 2.5.a), pode-se observar que as fibras vão se concentrando a medida em que se aproximam da superfície externa conferindo ao material a resistência necessária às cargas de vento que são frequentes durante a vida do bambu. O comprimento das fibras pode variar entre as espécies conforme mostra a Tabela 2.1. (Pereira e Beraldo, 2007).

Tabela 2.1: Dimensões das fibras de algumas espécies de bambu. - Pereira e Beraldo (2007, p. 66)

Espécies	Comprimento (mm)	Dimensões das fibras	
		Largura/lúmen (micron*)	Espessura (micron*)
<i>Bambusa vulgaris</i>	3,43	15,41	3,73
<i>B. vulgaris v. vitatta</i>	2,98	16,21	3,43
<i>B. oldhami</i>	1,92	16,97	3,17
<i>B. nutans</i>	2,29	16,97	2,77
<i>B. tulda</i>	2,15	17,33	2,34
<i>B. beecheyana</i>	1,93	17,2	3,58
<i>B. stenostachya</i>	2,23	15,49	2,9
<i>B. tuldoides</i>	1,89	18,21	3,83
<i>B. textilis</i>	2,04	16,78	3,02
<i>B. ventricosa</i>	1,90	14,38	3,31
<i>B. maligensis</i>	2,07	14,79	3,45
<i>B. dissimulator</i>	2,32	15,89	3,38
<i>Dendrocalamus asper</i>	2,32	17,89	3,97
<i>D. strictus</i>	2,44	17,06	3,44
<i>D. latiflorus</i>	2,22	18,17	4,33
<i>D. giganteus</i>	3,08	19,10	5,66
<i>Guadua amplexifolia</i>	1,69	14,47	3,28
<i>G. superba</i>	1,94	14,22	2,14
<i>G. spinosa</i>	1,65	14,57	3,10
<i>G. andustifolia</i>	1,93	16,04	2,12

Assim como a madeira os bambus também são suscetíveis ao ataque de insetos. Logo, para prolongar a vida útil é necessário que o bambu passe por algum dos tratamentos listados abaixo:

a) Métodos Tradicionais:

- Cura por moita;
- Cura pela imersão em água;
- Cura pela ação do fogo;
- Cura pela ação de fumaça;

b) Métodos Químicos:

- Imersão em solução de sais hidrossolúveis;
- Substituição da seiva por sais hidrossolúveis através da transpiração;

c) Tratamento sob pressão:

- Autoclave;
- Método Boucherie modificado;

Depois de tratados os bambus devem ser mantidos em lugar coberto, protegidos contra o sol e a chuva, para secagem natural. As varas devem ser dispostas em camadas espaçadas de forma que possa ocorrer circulação de ar entre elas e devem estar no mínimo a 15 cm do chão para não entrarem em contato com a umidade.

2.3. Característica Físicas e Mecânica do Bambu

As propriedades físicas e mecânicas do bambu estão fortemente relacionadas com sua estrutura anatômica, e são modificadas com a maturidade dos mesmos. As propriedades mecânicas do colmo são influenciadas pela densidade aparente, a qual varia de 0,50 a 0,90 gf/cm^3 . A densidade aparente depende principalmente da espessura da parede celular, volume de vazios, conteúdo de umidade e diâmetro das fibras. É por isso que tal propriedade varia consideravelmente dentro do mesmo colmo e entre as espécies de bambus (Liese, 1998; Berndsen et al., 2010).

As propriedades variam de espécie para espécie em vários aspectos tais como, idade, espessura de parede, diâmetro do colmo, conteúdo de umidade e densidade aparente. Ou seja, os colmos colhidos de um mesmo bambuzal podem apresentar características geométricas diferentes, principalmente por ausência de manejo adequado.

2.3.1. Características Físicas

Segundo Silva (2014), a anastomose das fibras do bambu nos nós, Figura 2.6, faz com que o material nodal tenha menor resistência e rigidez nesses pontos, mas é compensado pelo aumento da espessura da parede.

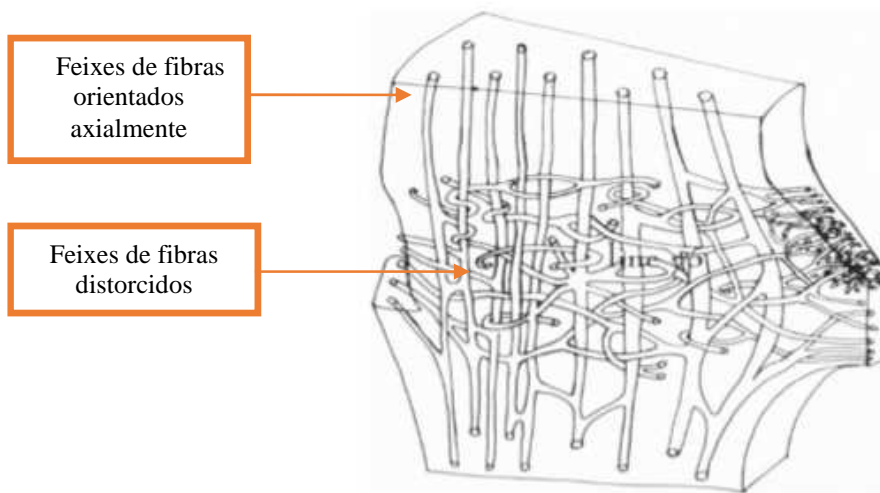


Figura 2.6: Estrutura de um nó com anastomose vascular.
(Liese e Tang, 2015)

A utilização do bambu como elemento estrutural na construção civil até a década de 1970 era intuitiva. Porém, a partir da década de 1980 foram realizados vários estudos referentes ao comportamento mecânico do bambu e obtidos resultados que favoreceram a criação das primeiras normas de projeto de estruturas de bambu. O International Network for Bamboo and Rattan – INBAR (1999) utilizou os resultados globais obtidos nessas pesquisas e propôs normas para ensaios de caracterização das propriedades físicas e mecânicas do bambu.

Atualmente para ensaios com o bambu na sua forma natural, ou seja, cilíndrica, são recomendadas a utilização das seguintes normas:

- ISO 22156:2004 (Bamboo Structural Design);
- ISO 22157-1:2004 (Physical and Mechanical Properties_Part 1: Requirements);
- ISO 22157-2:2004 (Physical and Mechanical Properties_Part 2: Laboratory Manual);
- ISO 22156: 2016 (Projeto de Estruturas de Bambu – Procedimentos) - (em análise)

Idade do Colmo

A idade do colmo é um fator importante para avaliar a resistência, pois bambus com 2 anos de idade podem ter 60% da resistência de bambus com 4 anos, que é o tempo de corte utilizado na China. O monitoramento da idade do colmo é feito etiquetando-se o elemento tão logo brote do solo. Caso não haja monitoramento, a idade pode ser estimada através da observação da presença de fungos na superfície do colmo, da coloração da superfície, do tilintar de uma barra metálica batida levemente sobre a superfície, entre outras observações relativas ao

aspecto da superfície. Bambus jovens têm uma coloração forte, viçosa, que os bambus maduros perdem.

Conteúdo de Umidade

O Conteúdo de Umidade percentual é definido como a razão do peso de água do corpo de prova pelo peso seco do corpo do mesmo, medidos em balança milesimal. A secagem do corpo de prova é feita em estufa sob temperatura de $102^0 \pm 3^0$ C. Pesa-se o corpo de prova de 2 em 2 horas até que a diferença entre as duas últimas pesagens seja inferior a 0,5%, definindo-se assim o peso seco P_S .

$$U\% = \frac{P_{U\%} - P_S}{P_S} \times 100 \quad (2.1)$$

Onde:

$U\%$: conteúdo de umidade (%);

$P_{U\%}$: peso úmido à umidade $U\%$ (gf);

P_S : peso seco (gf);

Tal como a madeira, o bambu perde resistência e rigidez com o aumento do conteúdo de umidade. Ambos são materiais higroscópicos que absorvem umidade do meio em que estão até atingirem a umidade de equilíbrio que varia de acordo com a umidade ambiente local. O conteúdo de umidade do bambu é regulado pela umidade relativa do ar. Se esta última se alterar, o conteúdo de umidade do bambu também irá se alterar naquela direção porém mais lentamente, até que ocorra o equilíbrio.

A água encontra-se no bambu de duas formas: livre nos vasos e interior das células ou combinada com a celulose na parede das células. Acontece que cada monômero de celulose de equação $(C_6H_{10}O_5)_n$ contém 3 oxidrilas OH (Walter Pfiel e Michèle Pfiel, 2003). Cada oxidrila pode capturar uma molécula de água. Dessa forma pode-se definir o ponto de saturação das fibras PS , como a razão percentual do peso molecular de 3 moléculas de água para o peso molecular de uma molécula de celulose. Este valor teórico é 33%, porém, devido à microestrutura do bambu, com grande concentração de fibras junto às paredes externas, juntamente com a presença de sílica SiO_2 – proteção de abrasão do colmo – e cera – proteção

de perda de umidade do colmo –, fazem com que nem todas as moléculas de celulose absorvam água, de forma que o ponto de saturação registrado na literatura é em média 27%.

Densidade Aparente

Os bambus são materiais muito resistentes e leves, devido à baixa densidade, $\rho_{ap} = 5$ a 9 kN/m^3 . Como o material contém muitos vazios e também água de constituição, define-se uma densidade aparente como o peso específico convencional:

$$\rho_{ap}(U\%) = \frac{P_{U\%}}{V_{U\%}} \quad (2.2)$$

Onde:

$\rho_{ap}(U\%)$ = densidade aparente (gf/cm^3);

$P_{U\%}$ = peso específico à umidade U% (gf);

$V_{U\%}$ = volume do corpo de prova (cm^3);

Estabilidade Dimensional

Como o bambu é um material higroscópico, a perda ou ganho de água de constituição, que está combinada na parede das células, faz com que as dimensões variem no sentido radial, no sentido tangencial e no sentido longitudinal. Se há perda de água de constituição, então a dimensão observada diminui, fenômeno denominado retração. Se há aumento de água de constituição a dimensão aumenta, fenômeno denominado inchamento.

O inchamento e retração percentuais são deformações definidas respectivamente como:

$$R_{\%} = \frac{\Delta L}{L_{U\%}} \quad (2.3)$$

$$I_{\%} = \frac{\Delta L}{L_{seco}} \quad (2.4)$$

Define-se o fator anisotrópico FA do material como a razão entre a retração máxima na direção tangencial pela retração máxima na direção radial. Não há dados na literatura sobre as diferentes curvas de retração do bambu.

Quando se trabalha o bambu como armadura no concreto é preciso impermeabilizá-lo pois, quando o bambu entra em contato com o concreto fresco, ele absorve parte da água de amassamento e aumenta suas dimensões. Após a cura do concreto, o bambu libera aos poucos a água absorvida e volta às suas dimensões iniciais comprometendo assim a interação.

2.3.2. Características Mecânicas

O bambu é um material ortotrópico, isto é possui propriedades mecânicas diferentes nas três direções ortogonais: longitudinal, tangencial e radial. A resistência mecânica é muito influenciada pelo conteúdo de umidade da amostra e também pela idade do lote, o que pode dificultar bastante a comparação dos resultados, caso não haja este controle. A idade de corte das espécies varia com o tipo de aplicação. Para a produção de papel é de 1 ano a um ano e meio, onde já se tem todo o volume de biomassa e baixa lignificação dos tecidos. Para aplicação estrutural a idade mínima de corte seria 3 anos, pois com essa idade o colmo já atingiu cerca de 80% da resistência máxima. Na China, os bambus Mossô são cortados com 4 anos para aplicação estrutural em laminados colados.

Compressão Paralela a Fibra

Beraldo (1987), estudou amostras de *Bambusa tuldoides* e encontrou valores de tensão variáveis entre 31,2 e 61,6 MPa. Através de seus ensaios demonstrou-se a compatibilidade do bambu e do concreto quando submetidos à compressão paralela às fibras. Nos ensaios de compressão paralela às fibras, a resistência varia entre 10,8 e 59,2 MPa, dependendo do posicionamento do nó, demonstrando a influência deste na resistência do elemento. Ghavami (1990), estudou as propriedades mecânicas de algumas espécies de bambu do Rio de Janeiro, entre elas o *Bambusa tuldoides*, obtendo para a resistência à compressão, valores de 30,10 MPa e 38,05 MPa, para amostras com nó e sem nó, respectivamente.

Geralmente os testes de compressão em colmos de bambu de seção circular, seguem as normas de estudos de argamassas e concreto onde a altura dos corpos de prova (CP's) são confeccionados com duas vezes o diâmetro do colmo. Mas quando se trabalha com espécies de diâmetros pequenos fica difícil aplicar essas recomendações, e o corpo de prova acaba ficando com comprimento da ordem de $3\bar{D}$.

Tração Paralela as Fibras

Em virtude da orientação das fibras ser paralela ao eixo do colmo, o bambu resiste mais à tração do que à compressão, podendo atingir resistência maior ou igual à resistência do aço. Contudo, ainda que o módulo de elasticidade seja um pouco maior na tração do que na compressão, o bambu tem módulo de elasticidade à tração bem inferior ao módulo do aço. Portanto o bambu é um material muito resistente e flexível (Moreira e Ghavami, 1997).

Cisalhamento Paralelo

A microestrutura do bambu mostra feixes de fibras do esclerênquima envolvidos por um tecido poroso denominado parênquima. A ruptura por cisalhamento ocorre no parênquima.

Grosser e Liese (1974) afirmam que a resistência ao cisalhamento aumenta com a diminuição da espessura da parede, ou seja, da base para o topo da peça do bambu. Argumentam que a porcentagem de esclerênquima – tecido das fibras –, elemento que proporciona resistência ao material, aumenta com a diminuição da espessura da parede, o que significa diminuição da quantidade de parênquima. Em geral, quanto menor a espessura da parede do bambu, em um mesmo colmo, maior é a resistência ao cisalhamento (Moreira e Ghavami, 1997).

2.4. Algumas Aplicações Estruturais do Bambu

O bambu é uma matéria prima admirável. Além de ser um recurso renovável de alta produção de biomassa, ter flexibilidade e resistência, ele também permite a interação com outros materiais como, vidro, cimento, aço, terra, fibras vegetais. Sua utilização como material estrutural pode ser observada pelo mundo, como por exemplo, a cúpula do Taj Mahal na Índia, Figura 2.8, que originalmente foi construída com estrutura de bambu.

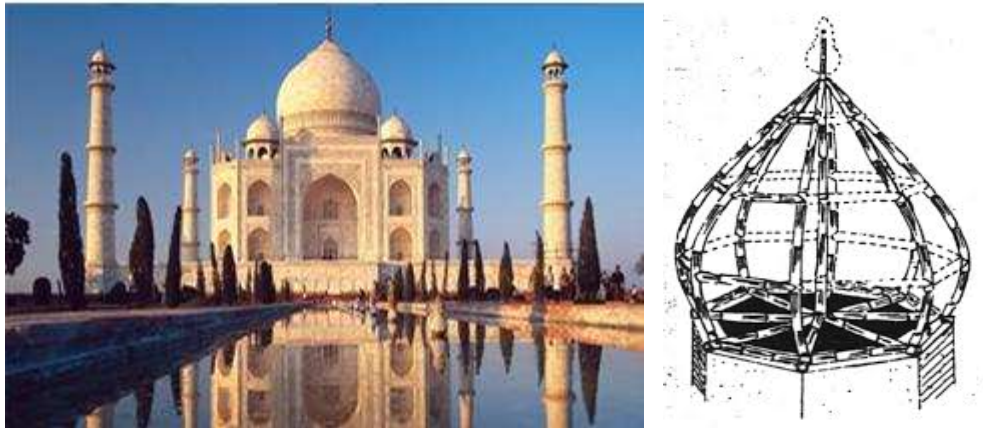


Figura 2.7: Cúpula Taj Mahal.
(López, 2003)

A aplicação do bambu vai além do uso estrutural, atingindo grandes áreas de consumo como a alimentação, o vestuário, os mobiliários, pequenos objetos caseiros – como parte de decoração ou utensílios domésticos – entre outros. Essa versatilidade e facilidade de se trabalhar com o bambu é apresentada por López (2003) através de diferentes técnicas de aplicação do bambu.

No geral, as mercadorias de bambu podem ser dispostas em três grupos principais: - a tecelagem de bambu, desenhos entalhados no bambu e os artigos de bambu de uso diário. Estes trabalhos podem ser realizados com o auxílio de máquinas ou manualmente.

Tecelagem de Bambu

Trata-se de um trabalho artesanal em que as tiras ou fitas de bambu são trançadas em diferentes direções. A tecelagem com fitas de bambu geralmente é usada na criação de alguns artigos como cestas, caixas, garrafas, potes e bonecas. Todos estes produtos são tecidos a partir de sua parte inferior; após o fundo ser concluído, a tecelagem segue em espiral. Há três métodos fundamentais de tecelagem de bambu, Figuras 2.8 a 2.10:

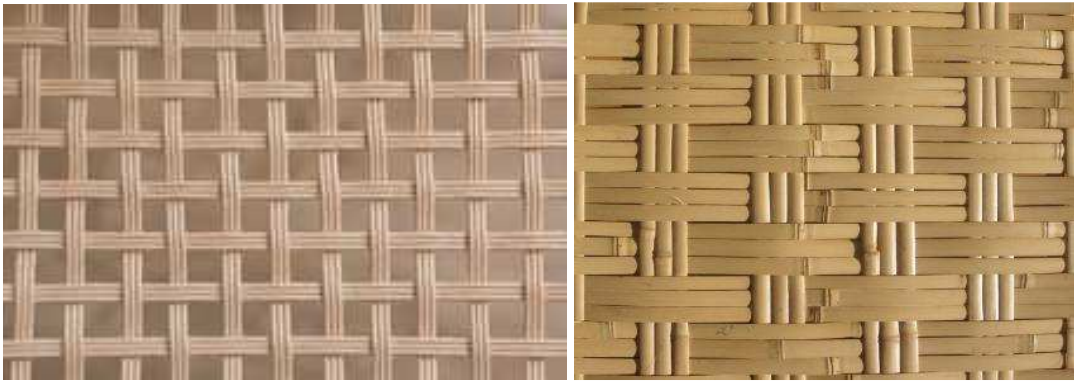


Figura 2.8: Tecelagem quadrada (Yotsume –Ami).

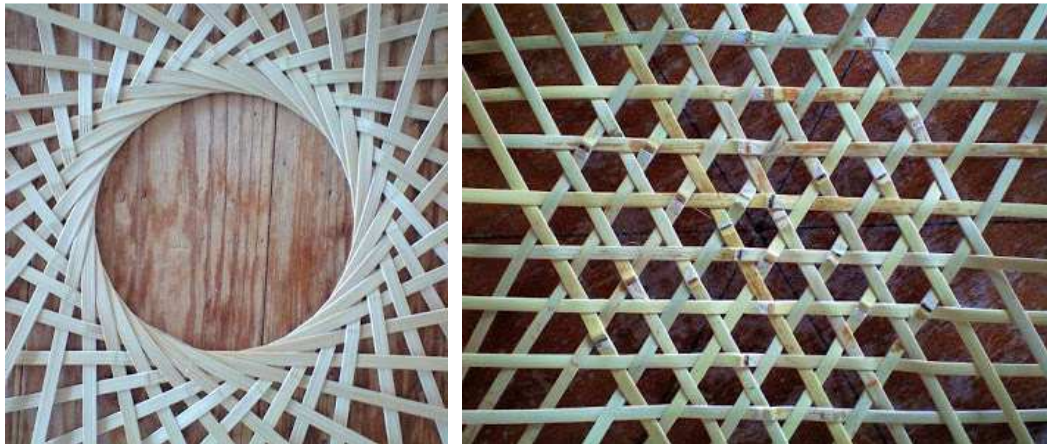


Figura 2.9: Tecelagem hexagonal (Mutsume- Ami).



Figura 2.10: Tecelagem Ajiro: usada para a fabricação de caixas manuais desde os tempos antigos;

Na China as construções tradicionais de bambu trazem toda esta estética dos trançados utilizados na construção. A complexidade artesanal dos trançados das paredes ficam expostas, como pode ser observado na Figura 2.11.



Figura 2.11: Estruturas e paredes de bambu em casas Chinesas.

Veículos de Bambu

A primeira bicicleta de bambu produzida com os conceitos de engenharia, teve o design e técnica construtiva desenvolvidas no LILD – Laboratório de Investigação em Livre Desenho, do Departamento de Artes e Design da PUC-Rio, trabalho desenvolvido com o então aluno Flávio Deslandes, que deu continuidade ao trabalho em experimentos mecânicos realizados na Dinamarca, até a comercialização final do veículo, Figuras 2.12 e 2.13.



Figura 2.12: Bicicleta com quadro de Bambu – LILD – 1990.
(Arquivo pessoal Prof. Luís Eustáquio)



Figura 2.13: Bicicletas produzidas artesanalmente – Flávio Deslandes – (exp. Reitoria da UFMG – 2011)

O LILD continua inovando nas suas propostas desafiadoras, produzindo recentemente a primeira cadeira de rodas com subestrutura de amortecedores tensegrity, com cabos de aço e barras de bambu, Ramos (2016).



Figura 2.14: Cadeira de Rodas com subestrutura tensegrity de bambu. (Arquivo pessoal Prof. Luís Eustáquio)

O bambu também pode ser utilizado como laminado colado. A tecnologia do laminado colado na realidade consome muito bambu, mas permite que se façam peças serradas como as peças de madeira. Na China são fabricados inúmeros tipos de bambus laminados, com diferentes tipos de laminação, colagem, posicionamento, resistências, flexibilidade, formas e tonalidades. Essa tecnologia já permite produzir veículos como a bicicleta abaixo, Figura 2.16, exposta durante o III Seminário Nacional do Bambu – 2015, realizado em Goiânia.



Figura 2.15: Bicicleta com quadro de Bambu Laminado Colado.
(Arquivo pessoal Prof. Luís Eustáquio)

Construções Artísticas

Nos países Asiáticos, o bambu é considerado sagrado. Simboliza a graça, a força, a flexibilidade, a resistência e a longevidade, um símbolo de harmonia entre a natureza e os seres humanos. Em Bali, Indonésia, um grupo de projetistas e construtores denominados Ibuku, fazem construções que são verdadeiras obras de arte, Figura 2.16. Trabalhando técnicas tradicionais e contemporâneas, Bali é atualmente um dos principais exemplos de design sustentável.



Figura 2.16: Residências de bambu, Bali - Indonésia.
(<http://ibuku.com/portfolio/architecture/>)

Outras aplicações do bambu são na construção de paredes reforçadas ou fachadas inteiras de bambu preenchidas com cimento, estruturas para telhado, forros (Figura 2.17), decoração, pisos, móveis (Figura 2.18), utilizando-se tanto o bambu cilíndrico quanto ripas e fitas.



Figura 2.17:Forro trançado com fibras de bambu.



Figura 2.18: Móvel confeccionado com bambu.

2.5. Conexões das Estruturas de Bambu

O objetivo das conexões é dar continuidade adequada entre os componentes das estruturas, tais que os esforços possam ser transmitidos de forma segura e eficaz, com controle adequado das deformações.

O bambu é um material ortotrópico que tem baixa resistência ao cisalhamento paralelo as fibras. Porém a presença do nó na conexão aumenta essa resistência e ajuda a evitar que as cargas transmitidas pelo apoio causem o esmagamento da peça neste local, caso sejam utilizadas como vigas. Caso isso não seja possível, a alternativa sugerida é a inserção de um reforço na parte interna (como uma peça de madeira com o mesmo diâmetro interno do bambu), reforçando a estrutura do colmo e aumentando a resistência, conforme Figura 2.19. Estudos de amassamento do bambu podem ser encontrados em Moreira & Ribeiro (2013).

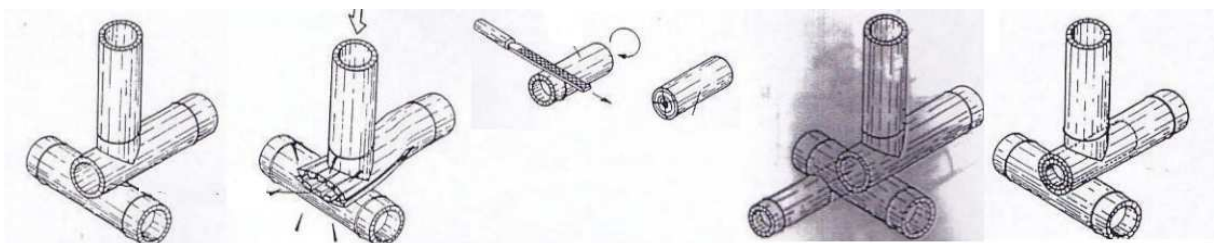


Figura 2.19: Amassamento das peças sem nó ou sem reforço interno.
(López, 1981)

As conexões tradicionais baseiam-se em encaixes e requerem uma habilidade artesanal muito sofisticada para se realizar estruturas esteticamente agradáveis. Em muitos casos eles

fragilizam a extremidade do elemento e são difíceis de serem realizados, pois o bambu não é tão facilmente entalhado quanto as madeiras. Devido à pequena espessura de parede e ao alinhamento das fibras, é muito fácil romper a parede dos bambus quando se quer fazer neles algum entalhe. Por outro lado, a forma aleatória do bambu faz com que facilmente se perca o alinhamento das barras, o que exigiria gabaritos estabelecidos para cada caso que se quisesse precisão no comprimento e posição das barras.

Por essa razão, uma maior liberdade no traçado da estrutura, sem necessidade de alta precisão, conduz certamente a estruturas de menor custo de produção, com ligações mais resistentes que as entalhadas e sem falhas estéticas que prejudicam o objeto final. Precisão é uma tentativa de se aplicar ao bambu o mesmo conceito dos elementos industrializados, que têm uma geometria reta e padronizada, o que é incoerente com a forma livre do bambu.

Corte Boca de Peixe e Variações

Esse tipo de conexão é feito utilizando-se uma serra-copo do mesmo diâmetro da barra que receberá a conexão. O nome boca de peixe é proveniente do corte produzido pela serra formando um encaixe que parece uma boca de peixe, Figura 2.20. É importante que o corte seja feito com precisão para garantir que uma barra se encaixe perfeitamente na outra, caso contrário pode ocorrer cisalhamento local.



Figura 2.20: Corte boca de peixe com e sem falange
(Vivianda, 2012)

Observe que além da dificuldade de se produzir a boca de peixe com falange – um artesanato sofisticado – o objetivo dessa ligação é fazer a concordância deste elemento com furos em outro elemento que tem uma forma livre. Tem que haver folgas na ligação para que se consigam ângulos perfeitamente retos entre as barras. As falanges são pontos de enfraquecimento.

Corte tipo falange

Esse tipo de entalhe cria abas laterais que impedem o deslocamento dos elementos por rolamento quando submetidos a esforços laterais, funcionando como um anteparo, Figura 2.21. As abas também podem ser usadas como anteparo para receber pinos, amarrações, entre outros.

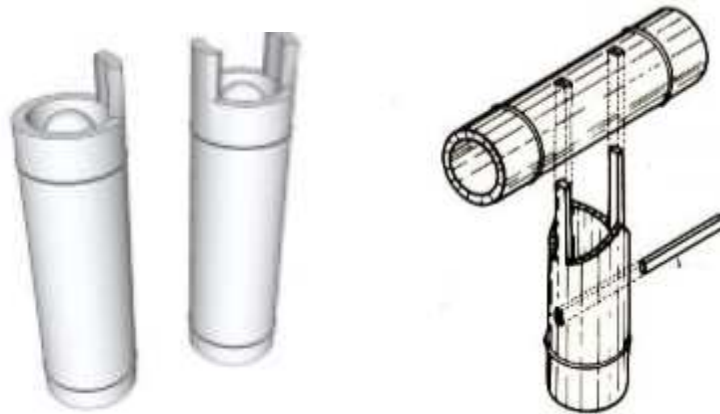


Figura 2.21: Corte com falanges e encaixes para perfuração.
(Vivianda, 2012) e (López, 1981)

Além das falanges serem pontos de enfraquecimento, que podem propagar trincas no bambu que as tem, os furos no outro bambu também enfraquecem a região.

Corte Parcial ou Bico de Flauta

São muito utilizados em estruturas de cobertura onde conexões diagonais são muito comuns. O ângulo de corte varia de acordo a inclinação das peças que serão usadas e podem ser fixados com o auxílio de pinos, cordas ou fibras vegetais.



Figura 2.22: Corte parcial ou boca de flauta.
(Vivianda, 2012)

O uso de pregos em conexões de bambu não é muito recomendável uma vez que podem provocar rachaduras. Assim, opta-se normalmente pela utilização de parafusos passantes com o auxílio de braçadeiras metálicas. Essas braçadeiras vão impedir que as fissuras se transformem em grandes rachaduras, mas não impedem a formação de fissuras, pois essas fissuras se formam internamente por tensões de tração perpendiculares às fibras que surgem por secagem diferencial, na perda desigual de água de constituição.

As conexões podem também utilizar um terceiro elemento para acontecerem, conforme descrições que se seguem.

Conexões amarradas com cordas

Conexões amarradas são as mais utilizadas e são geralmente feitas de materiais orgânicos, Figura 2.23. As fibras vegetais são classificadas geralmente, de acordo com sua origem e podem ser agrupadas em fibras de semente (algodão), fibras de caule (bananeira), fibras de folha (sisal), fibras de fruto (coco) e fibras de raiz. Além do baixo custo, baixa densidade e alta resistência são também biodegradáveis. Atualmente também são usados como amarrações, fitas de plástico e materiais sintéticos, assim como arame galvanizado.

As fibras também podem ser utilizadas para cobrir a ligação, melhorando a estética e reforçando a estrutura, fazendo o papel de uma bandagem. Os pinos funcionam como uma espécie de ancoragem para as amarrações, transferindo os esforços para a parede do colmo. No caso dos pinos feitos de bambu – cavilhas de bambu –, devem ser secos, pois a retração do bambu verde pode causar o afrouxamento.

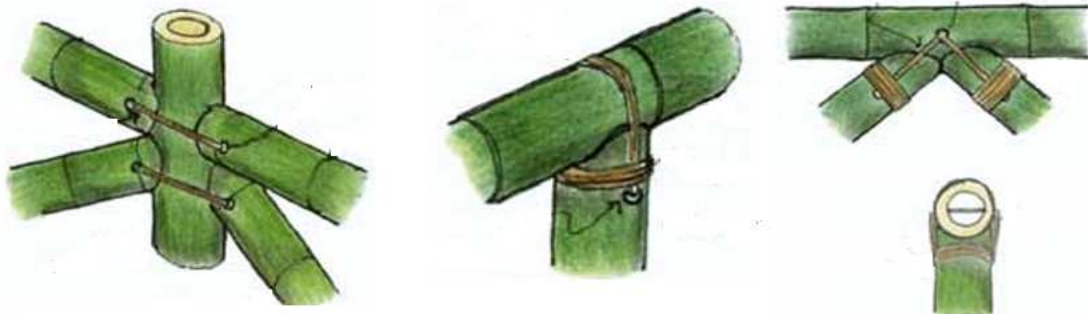


Figura 2.23: Conexões amarradas com cordas.
(Candelaria et al, 2013)

As amarrações são um tipo de conexão que ainda merecem mais estudos, pois são flexíveis, fáceis de realizar e podem viabilizar estruturas de porte médio. Na Figura 2.23 acima tem-se as amarrações substituindo chapas e parafusos numa estrutura de encaixes, novamente um artesanato sofisticado e difícil de se realizar em estruturas maiores. Para estruturas maiores, tem-se a proposta da BAMBUTEC, empresa do Rio de Janeiro que produz estruturas de bambu para cenários e exposições, Figura 2.24.



Figura 2.24: Anfiteatro com estrutura amarrada de bambu Mossô - *Phyllostachys pubescens*.
(Arquivo pessoal Prof. Dr. Luís Eustáquio)

Conexões com cavilhas

Para este tipo de conexão podem ser usadas cavilhas de bambu, de madeira ou pinos de aço. Os furos devem ser feitos com o auxílio de uma broca e não prego e martelo, que podem provocar rachaduras no bambu. Geralmente os pinos são fixados paralelos ao eixo do colmo, conforme Figura 2.25.

A localização do furo também é importante porque se feito muito perto da extremidade do colmo pode provocar uma fissura e até rachar o bambu. Neste caso o mais indicado é que os furos sejam feitos a uma pequena distância do nó, o que requer uma seleção prévia dos bambus para que as conexões coincidam com esta posição, um fator seletivo, não inclusivo.

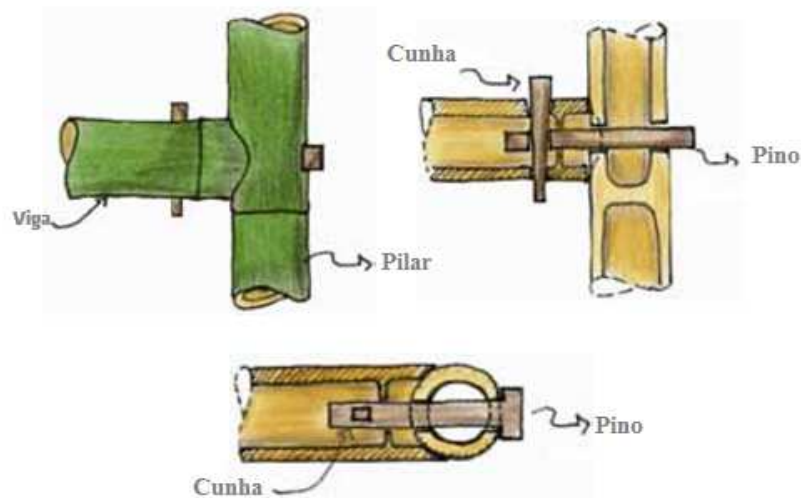


Figura 2.25: Conexão com cavilhas.
(Candelaria et al, 2013)

Outras formas de conexão utilizando-se pinos são mostradas na Figura 2.26. Os colmos de bambu são sobrepostos e conectados perpendicularmente à direção do colmo com o pino, que também pode ser tanto de madeira, quanto de bambu ou aço. Note no exemplo (b), que a sobreposição é feita com dois colmos cortados ao meio e retirados uma “tala”, do mesmo tamanho em cada uma, proporcionando um encaixe entre os dois (união de meio bambu).

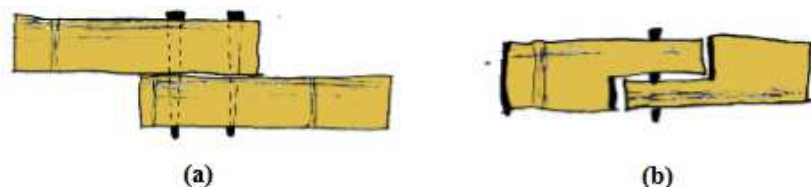


Figura 2.26: Conexões sobrepostas com pino.
(Mendes, p. 34)

Novamente as conexões com encaixes, que trazem o grande inconveniente de se ter que encaixar elementos com geometrias livres.

Conexão com ligação externa

Os colmos são conectados utilizando-se elementos de ligação externos, como por exemplo, chapas semicirculares que são sobrepostas à conexão e pregadas com parafusos ou pinos. Outro exemplo é a utilização de um cilindro com o diâmetro um pouco maior que o dos bambus que serão conectados. O cilindro irá envolver as duas partes e também pode ser fixada com pinos.

Muita pouca atenção tem sido dada nessas conexões, à distribuição de tensões em torno dos furos. Os parafusos normalmente têm diâmetros pequenos que não passariam numa análise de engenharia.

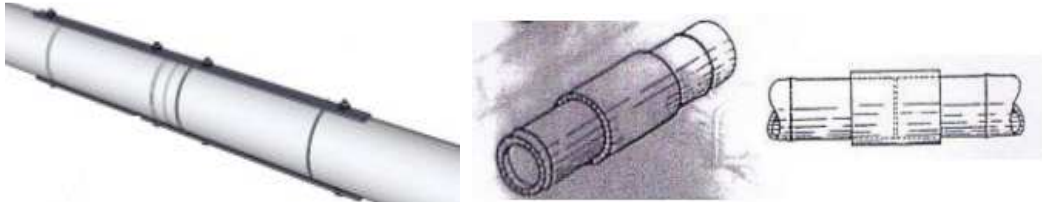


Figura 2.27: Conexão de topo com chapa de aço/luva de aço.
(Vivianda, 2012) e (López, 1981)

Na cúpula geodésica montada no pátio da UFMG, Figura 2.28, pode-se constatar as atividades de Desenho do Produto sem a presença da engenharia. A estrutura denota habilidade construtiva e criatividade dos construtores, porém carece de avaliação tecnológica das conexões. Esta tem sido uma forte característica das estruturas de bambu. Pelo fato do bambu ser muito leve e trabalhável, ele convida à fabricação de objetos de utilidade, o que é aplicável, pois recupera a habilidade artesanal de tantos artesãos de nosso meio. Contudo, conforme o porte e peso do objeto, por exemplo, para objetos da construção civil que ocuparão espaços públicos, a engenharia se faz necessária, independentemente do material do qual é feito o objeto, por uma questão de segurança dos usuários e transeuntes. Neste caso específico do exemplo, não há nenhum risco aparente nessa utilização temporária, pois a estrutura está bem aberta reduzindo significativamente os efeitos de vento e a estrutura está também ancorada em todo o seu contorno, por blocos de concreto.



Figura 2.28: Ligação com chapa externa.
(Arquivo pessoal Prof. Luís Eustáquio)

Conexão com elemento interno de ligação

Neste caso são selecionados colmos com diâmetros similares e introduz-se um elemento interno como um toco de madeira, um cilindro de aço ou até mesmo bambu, para unir as duas partes, Figura 2.29. Para reforçar o travamento dessa ligação, podem também ser usados pinos. A utilização de pinos para implementação dessa ideia é o que se tem feito. De qualquer forma, o alinhamento dos dois bambus dessa forma exige que os bambus sejam muito retilíneos. É um tipo de ligação que pode funcionar bem para bambus do gênero *Dendrocalamus*, por ser o gênero que produz os bambus de eixo retilíneo. Mais uma vez a análise de engenharia se faz fundamental para estruturas da construção civil ou estruturas de veículos, devido à alta concentração de tensões na parede dos bambus transferidas pelos pinos.



Figura 2.29: Conexão com elemento interno.
(Vivianda, 2012) e (MENDES, p. 34)

A ideia dessa conexão é interessante mas pode ser muito melhorada pela engenharia, em relação ao que se tem utilizado.

Conexão com âncora

È uma técnica feita sob encomenda, utilizando-se o aço, Figura 2.30. Novamente tem-se aqui uma solução sofisticada, que pode onerar muito o custo final da estrutura, exigindo precisão e encaixes, algo nada bem vindo a elementos de seção circular e livre.

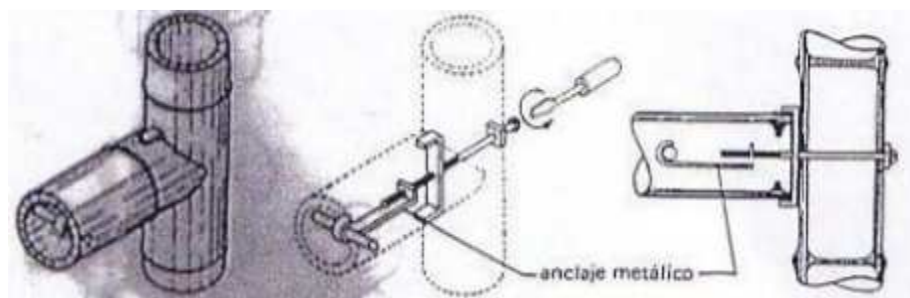


Figura 2.30: Ligação aço sob pressão.
(López, 1981)

Um das versatilidades de se trabalhar com o bambu é a sua fácil associação com outros materiais. Vários tipos de conexões vêm sendo estudadas, fazendo-se uso de madeira, parafusos, braçadeiras, chapas metálicas e aglomerados.

Os aglomerados são utilizados como preenchimento da extremidade, principalmente em estruturas de móveis, para a fixação de parafusos, conferindo uma maior resistência mecânica na extremidade do bambu.

Conexões com pinos metálicos

A Figura 2.31 mostra um desenho onde se propõe a associação entre o bambu, a madeira e o aço através de uma conexão de vários elementos em diferentes planos. A ligação foi idealizada utilizando-se uma pequena caixa de chapas de aço, no formato de uma pirâmide, onde as faces estão dispostas perpendicularmente aos elementos que serão soldados a ela.

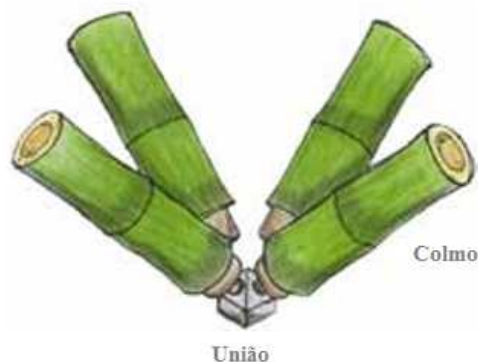


Figura 2.31: Ligação para treliça espacial.
(Candelaria et al, 2013)

A primeira treliça espacial de bambu na forma de grelha em dupla camada foi implementada e testada por Moreira (1990), com o conceito da ligação com pinos. Nessas ligações uma chapa de aço penetra o oco do bambu e é cruzada por 2 pinos de 19 mm perpendiculares ao eixo do bambu. A estrutura exige precisão, de tal forma que todos os elementos foram gabaritados para o posicionamento das chapas nas extremidades. As barras se unem a um nó de chapas de aço conforme Figura 2.32.

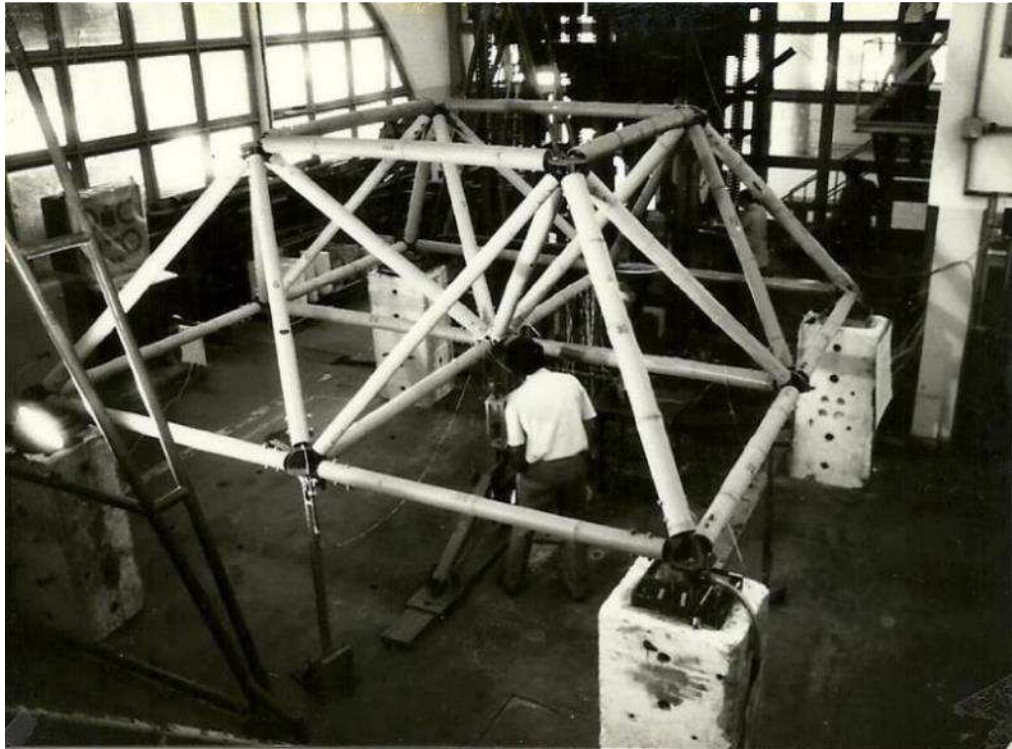


Figura 2.32: Teste do Protótipo da Trelça Espacial de Bambu – 1990.
(Arquivo pessoal Prof. Luís Eustáquio)

As ligações com pinos metálicos continuam sendo tema de investigação pois são utilizadas em todo o globo, por ser um conceito que agiliza a fabricação das estruturas em geral (Moreira e Ghavami, 2015). Contudo, pode-se dizer que ainda são conexões ineficientes se a descarga se faz totalmente nas paredes dos bambus, como tem acontecido na maior parte dos casos. Sem o devido reforço local essas ligações podem ter ruptura imprevisível por cisalhamento paralelo às fibras, podendo ser classificadas como perigosas.

Como exemplo de aplicação dessas ligações, tem-se abaixo estruturas parafusadas realizadas pela Arte Desenho Oficina de Design, empresa com sede na cidade do Rio de Janeiro, parceira do LASE no desenvolvimento de estruturas. A análise estrutural foi tema de TIM3 de Érica Benevides Dutra Murta, ex-aluna do DEES – UFMG.



Figura 2.33: Estruturas parafusadas construídas pela Arte Desenho Oficina de Design.
(Arquivo pessoal Prof. Luís Eustáquio)

Tem-se abaixo o Sistema de Reforço para tubos de bambu, Figura 2.34, nome com o qual a conexão foi patenteada, onde um cilindro de madeira é colado interiormente ao bambu, com adesivo resorcinol-formaldeído, Moreira & Ghavami (2012).

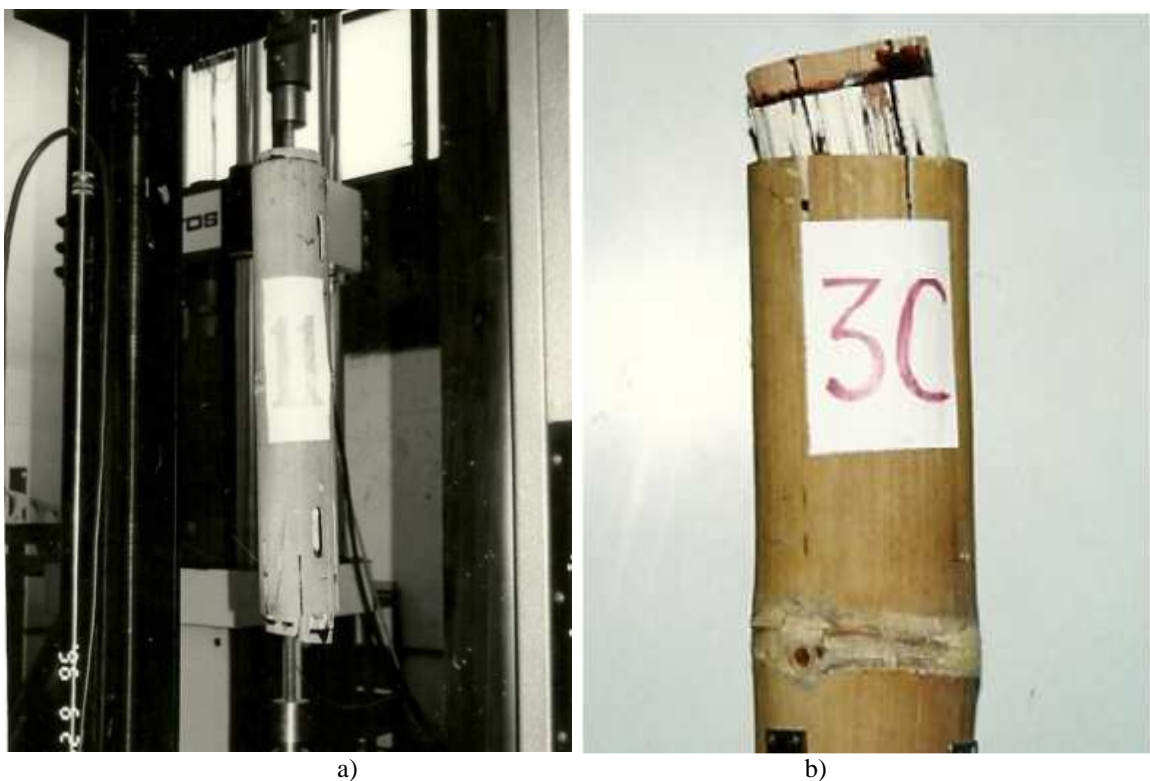


Figura 2.34: a) Teste de cisalhamento por tração; b) Ruptura dentro da parede do bambu;
(Arquivo Pessoal Prof. Luís Eustáquio)

Esse reforço dado à extremidade, que permite realizar as ligações mais resistentes e confiáveis entre todas as disponíveis até o momento, para solicitações axiais, ainda tem o inconveniente de se ter que deformar o bambu sobre o cilindro de madeira, para uma colagem adequada.

Este, por sua vez, deve ser aplainado no contorno, de forma a reproduzir a seção transversal do bambu que não é uma seção circular perfeita. Ou seja, é uma ligação que acaba onerando o custo final da estrutura. Tem-se na Figura 2.35 uma aplicação dessa ligação para a fabricação de um domo geodésico.

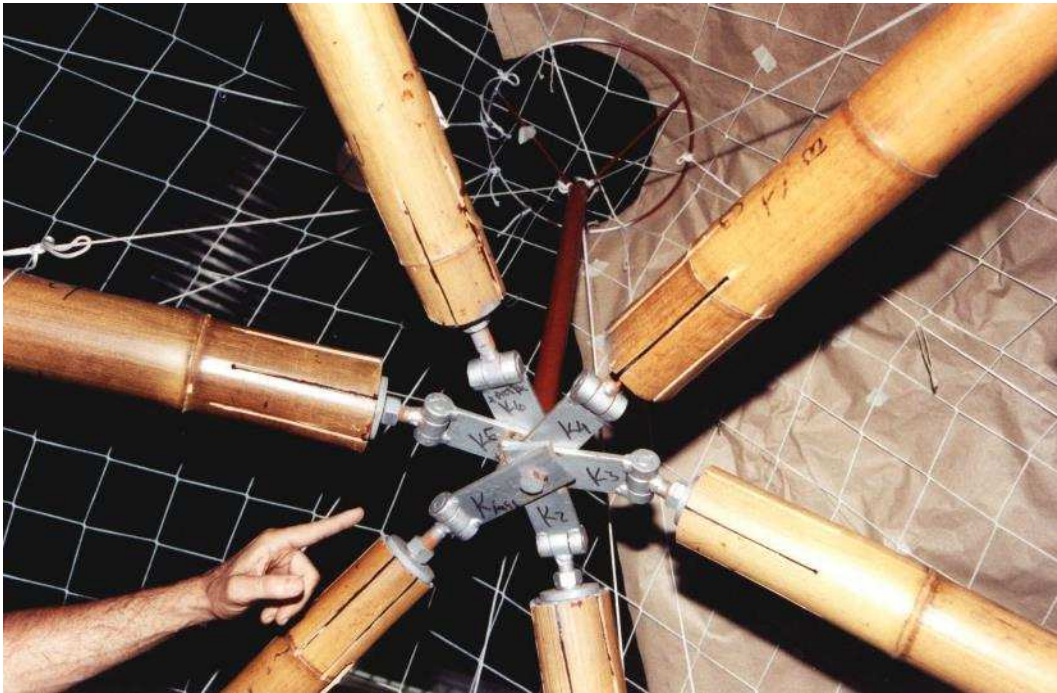


Figura 2.35: Aplicação do Sistema de Reforço.
(Arquivo pessoal Luís Eustáquio)

Capítulo 3

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DOS MATERIAIS

Neste capítulo são apresentados os corpos de prova e experimentos utilizados para caracterização física e mecânica do compósito obtido da saturação do tecido de algodão alvejado com resina poliuretana PU à base de mamona; o mesmo para a caracterização do bambu, bem como os experimentos mecânicos para determinação da resistência da colagem do compósito ao bambu. Todos os experimentos foram realizados no Centro de Estudos Avançados em Móveis, Madeira e Novos Materiais – CEPAM3, do Departamento de Engenharia de Estruturas. Os testes mecânicos foram realizados em uma máquina universal EMIC DL 3000, com capacidade de carga de 3 toneladas. Os testes de conteúdo de umidade e densidade utilizaram estufas com controle de temperatura e umidade interna e balanças de precisão milesimal.

3.1. Caracterização do Compósito

Para o compósito foram realizados testes de compressão e tração, bem como determinação da densidade.

Teste de Compressão do Compósito

Para a preparação desse corpo de prova foram utilizados 6 tubos de PVC com 15 cm de altura e 45 mm de diâmetro interno, tecido de algodão e resina poliuretana. Os tecidos foram cortados de acordo com a altura do tubo. O tecido foi mergulhado na resina e retirou-se o excesso. A parede interna do tubo de PVC foi pintada com a resina, para facilitar o deslizamento dos rolos de compósito para dentro do tubo, Figura 3.2. O tubo de PVC mostrou-se adequado para a fabricação destes corpos de prova pois segundo informações do fabricante, a resina não adere aos plásticos em geral, sendo fácil a desmontagem, bastando para isso que se corte o PVC com um formão e marteladas leves.



Figura 3.1: Molhagem do tecido com a resina poliuretana PU.
(Arquivo pessoal da Autora)



Figura 3.2: Preparação dos corpos de prova – rolos de compósito.
(Arquivo pessoal da Autora)

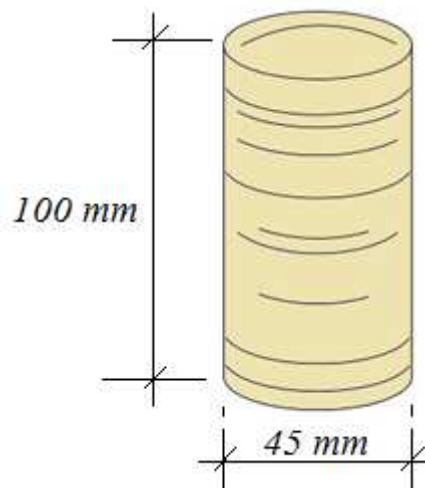


Figura 3.3: Dimensões do Corpo de Prova.
(Arquivo pessoal da Autora)



Figura 3.4: Compressão do compósito.
(Arquivo pessoal da Autora)

Foi ensaiado um primeiro corpo de prova, para entendimento do funcionamento desse novo material, para então se confeccionarem os demais corpos de prova. As máquinas são previamente programadas com um script de ensaio, onde são feitas uma série de previsões: - limite de carga da máquina, limite de deformações dos extensômetros, velocidade de carregamento, retirada dos extensômetros para não danificá-los, etc. Deste modo, até que se consiga calibrar o sistema para um novo material, acaba-se abortando o experimento algumas vezes e repetindo-se o ensaio. É o que se apresenta na Tabela 3.1, onde todos os resultados são relativos ao mesmo corpo de prova.

Tabela 3.1: Relatório de Compressão do Compósito.

Numeração da máquina	Corpo de prova físico	Força máxima (N)	Tensão na Retirada do Extensômetro (MPa)	Deformação na Retirada do Extensômetro (%)	Módulo de Elasticidade da reta inicial (MPa)
CP1	1	13342,71	8,39	4,01	355,77
CP2	1	13899,66	8,74	4,00	339,33
CP3	1	13714,58	8,63	4,00	329,52
CP4	1	14096,73	8,87	4,02	339,48
CP5	1	27307,49	17,33	4,02	371,38
Módulo médio ± desvio padrão					347,10 ±16,52

Exatamente por isso foi possível verificar que o material apresentou um comportamento não linear elástico – funcionamento das borrachas em geral –, ou seja, obteve-se uma borracha fretada por tecido de algodão, Figura 3.5. Se comparado com a compressão da resina pura, o que se deve obter é um maior módulo de elasticidade para o compósito, devido ao fretamento, uma vez que ele certamente diminui o coeficiente de Poisson do compósito em relação à resina pura.

Um clip gauge com 50 mm de abertura faz a leitura das deformações específicas percentuais. A velocidade de aplicação programada foi de 10 MPa/minuto. Obteve-se então um módulo de elasticidade médio de $347,10 \pm 16,52$ MPa, com um coeficiente de variação de 4,8% para o mesmo corpo de prova, o que caracteriza uma relativa uniformidade de carregamento, já que as tensões atingiram níveis de 8,66 MPa para os primeiros 4 carregamentos, que podem ter provocado pequenas mudanças estruturais internas, sem contudo descaracterizar o material. A tensão limite, que provoca deformações permanentes no material sem no entanto rompê-lo, atingiu 17,33 MPa. A queda das tensões quando da retirada do extensômetro pode significar relaxação do compósito, pois para a retirada do extensômetro a máquina interrompe temporariamente a aplicação de carga, até que se dê o comando de prosseguimento do ensaio. A relaxação pode ter sido constatada mas não foi tema desta investigação, sendo recomendada para futuros trabalhos.

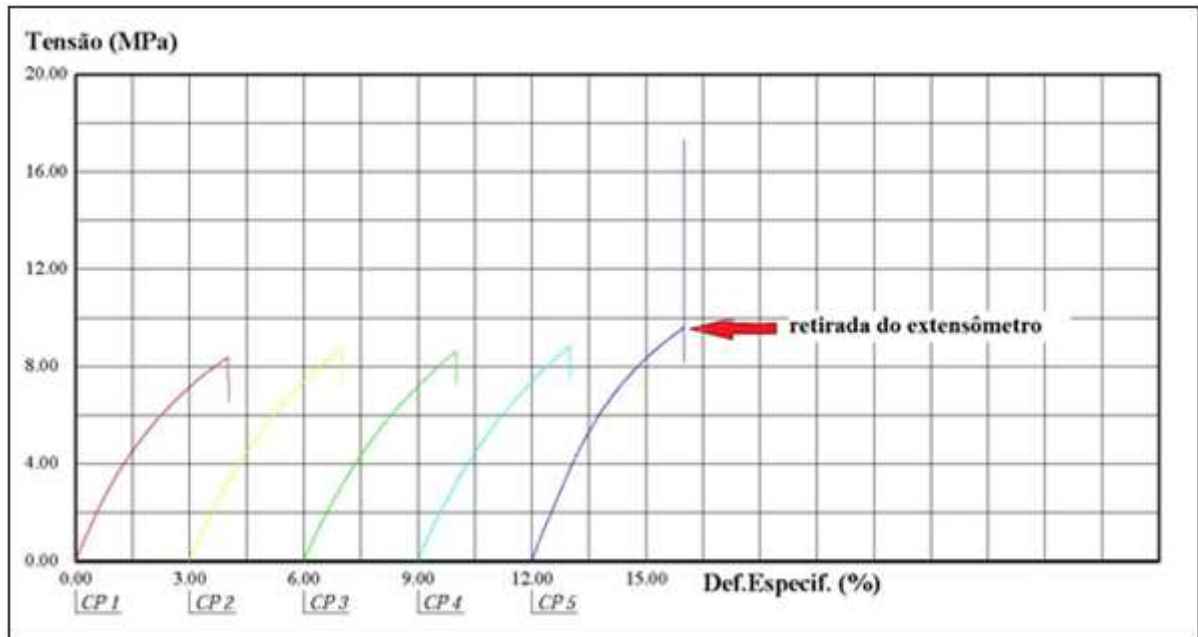


Figura 3.5: Curvas tensão-deformação para o compósito sob compressão.
(Saída da máquina EMIC – DL3000)

Foram então ensaiados mais 7 corpos de prova, Figura 3.6, obtendo-se os resultados da Tabela 3.2. Da Figura 3.7 constata-se novamente o mesmo comportamento não linear elástico nas curvas tensão-deformação específica, com módulo de elasticidade médio igual a 99% do corpo de prova anterior, com média e desvio padrão iguais a $342,95 \pm 28,01 \text{ MPa}$ e coeficiente de variação de 8,2%. Este coeficiente de variação é relativamente pequeno para um material composto com tecido natural de algodão, podendo-se dizer que este material tem um comportamento bastante uniforme.



Figura 3.6: Corpos de prova para compressão dos compósitos.
(Arquivo pessoal da Autora)

Tabela 3.2: Relatório de Compressão do Compósito – Demais corpos de prova.

Numeração da máquina	Corpo de prova físico	Força máxima (N)	Limite de resistência (MPa)	Deformação na retirada do extensômetro (%)	Módulo de Elasticidade da reta inicial (MPa)
CP1	CP1	18350,08	11,29	-	-
CP2	CP2	11051,52	6,68	4,01	324,15
CP3	CP2	10103,86	6,11	-	-
CP4	CP2	21881,98	13,23	-	-
CP5	CP3	20958,3	12,89	4,05	387,45
CP6	CP4	18937,88	11,65	4,03	348,60
CP7	CP5	22193,87	13,41	4,03	315,85
CP8	CP6	25972,53	16,33	4,03	361,00
CP9	CP7	27334,90	17,19	4,02	320,63
Resistência média ± desvio padrão 13,7 ± 2,23 MPa				Mód. médio ± desvio padrão 342,95 ± 28,01	
CP10	CP7	27540,25	17,32	4,03	217,09

Na Tabela 3.2, os valores nos quadros hachurados não foram computados por problema de leitura do extensômetro. Na Figura 3.7 tem-se as curvas tensão-deformação obtidas.

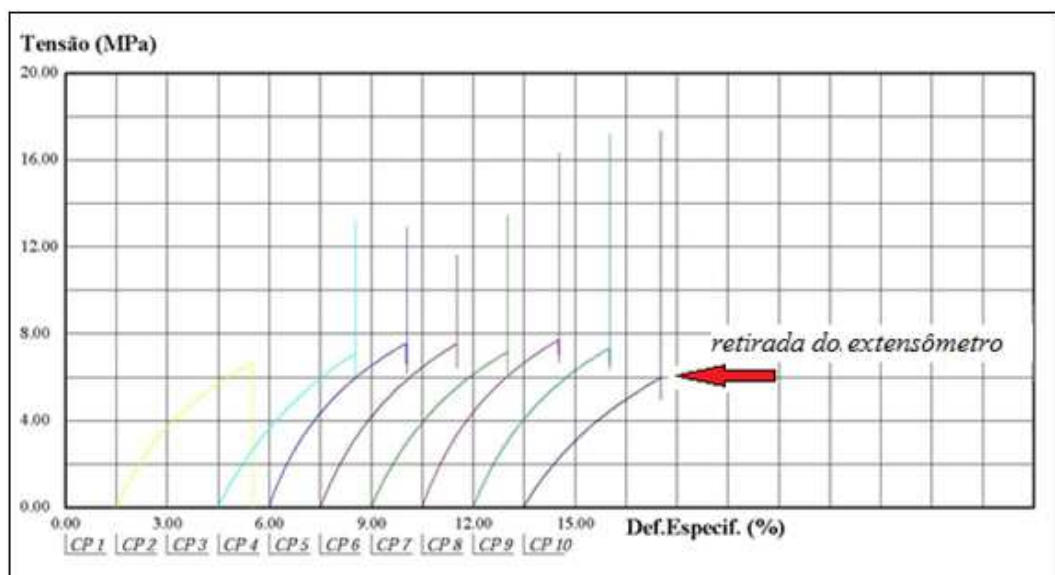


Figura 3.7: Curvas Tensão-deformação para o compósito em compressão.
(Saída da máquina EMIC DL 3000)

Todos os corpos de prova apresentaram queda na tensão ao se retirar o extensômetro, mostrando uma possível relaxação do compósito.

O limite de resistência do material foi de $13,71 \pm 2,24 \text{ MPa}$, com coeficiente de variação de 16,3%, relativamente baixo em se tratando de materiais compósitos naturais. Um lote homogêneo de madeira serrada, por exemplo, dá coeficientes de variação maiores do que este, sob o mesmo tipo de solicitação. Os valores faltantes da Tabela 3.2 perderam-se durante o ensaio. Observe que o corpo de prova número 7, ao atingir primeiramente tensões limites de resistência de $17,2 \text{ MPa}$, alterou o material, diminuindo o módulo de elasticidade para $217,1 \text{ MPa}$, embora tenha aumentado a sua resistência final para $17,3 \text{ MPa}$.

Teste de Tração do Compósito

Para tração do compósito foram preparados corpos de prova conforme as Figuras 3.8 e 3.9 a). Produziu-se uma forma de madeira com ressaltos, revestida internamente com plástico. O tecido embebido na resina PU, após retirada do excesso, foi esticado sobre a forma de base. A malha ortogonal do tecido pode ser vista na Figura 3.9.c).

Em seguida, uma forma de cobertura dá o acabamento oposto do corpo de prova. Com uma pequena pressão sobre o conjunto, com um peso de 2 kgf , o compósito ficou em secagem natural. Após a secagem, marcou-se a largura do corpo de prova, de 40 mm , e os cortes para produção dos mesmos foi realizada com serra tico-tico, resultando na geometria da Figura 3.8.a). Observa-se que no local das garras tem-se uma maior espessura. O corpo da amostra tem 3 camadas de tecidos superpostas, sendo acrescentadas 2 camadas de cada lado, onde se tem os ressaltos. Um clip gauge faz a medição das deformações específicas percentuais e uma célula de carga de 5 toneladas registra o carregamento aplicado.

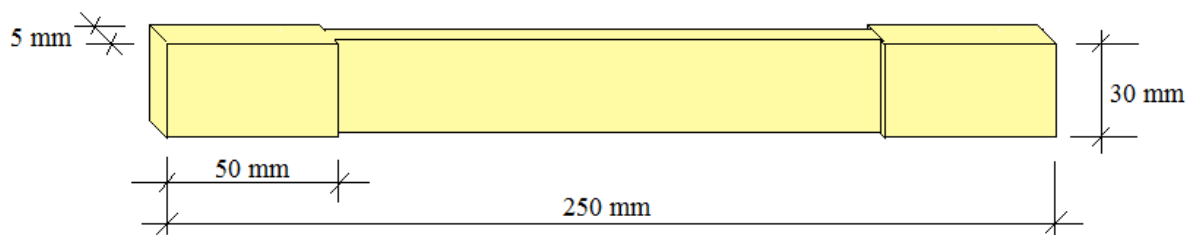
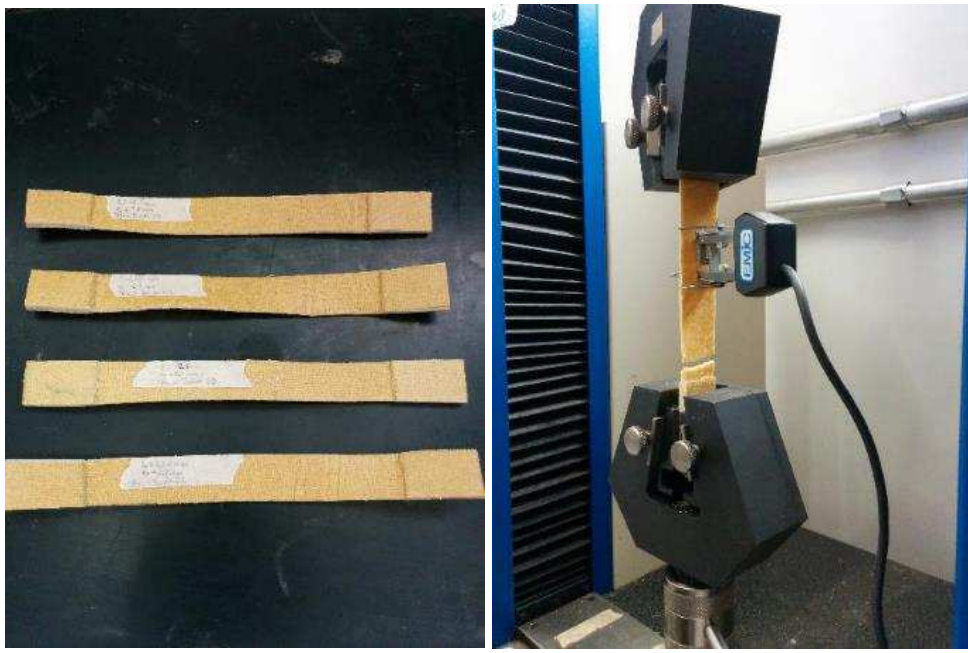
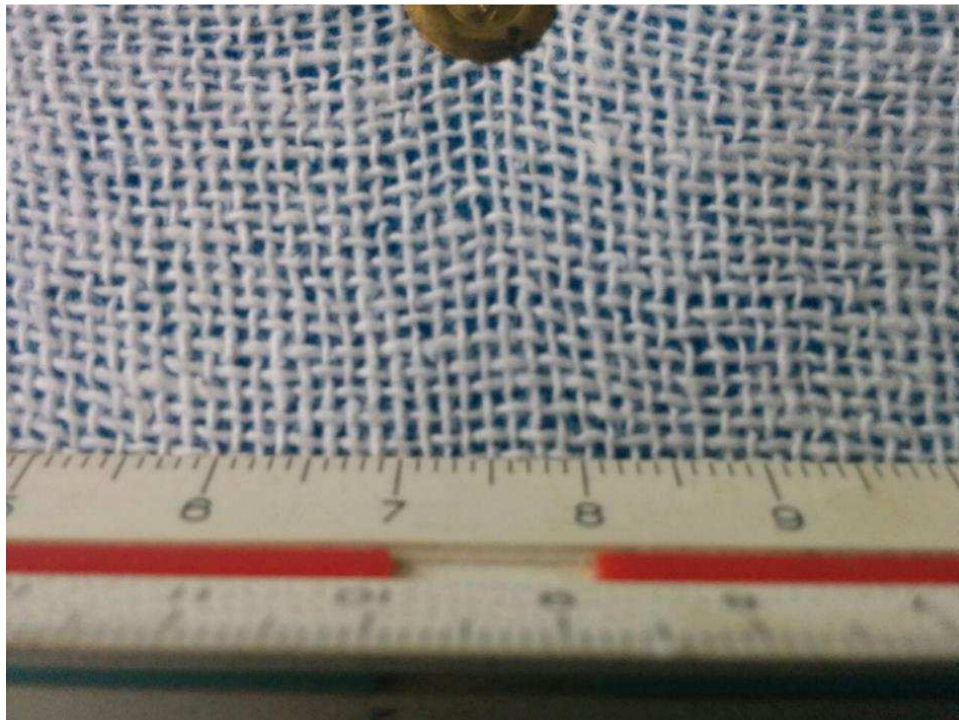


Figura 3.8: Corpo de prova para teste de tração do compósito.
(Arquivo pessoal da Autora)



a)

b)



c)

Figura 3.9: a) Corpos de prova para tração; b) Teste de tração do compósito; c) Malha ortogonal do tecido.
(Arquivo pessoal da Autora)

Os resultados estão apresentados na Tabela 3.3 e na Figura 3.10.

Tabela 3.3: Resultados dos Testes de Tração do Compósito.

Numeração da máquina	Corpo de prova físico	Força máxima (N)	Limite de Resistência (MPa)	Deformação na retirada do extensômetro (%)	Módulo de Elasticidade da reta inicial (MPa)
CP3	1	1140,63	12,6	3,5	1065,0
CP4	2	1145,77	15,1	6,64	946,0
CP5	3	1171,46	13,9	2,0	964,0
CP6	4	1108,09	13,9	1,6	712,0
CP7	5	1126,93	12,0	1,21	729,0
CP8	6	1116,65	12,4	1,61	760
CP9	7	940,25	10,1	1,61	713
Resistência média \pm desvio padrão: 12,9\pm1,62 MPa			Módulo médio \pm desvio padrão		841 \pm146

Na Figura 3.10 tem-se as curvas tensão – deformação em tração.

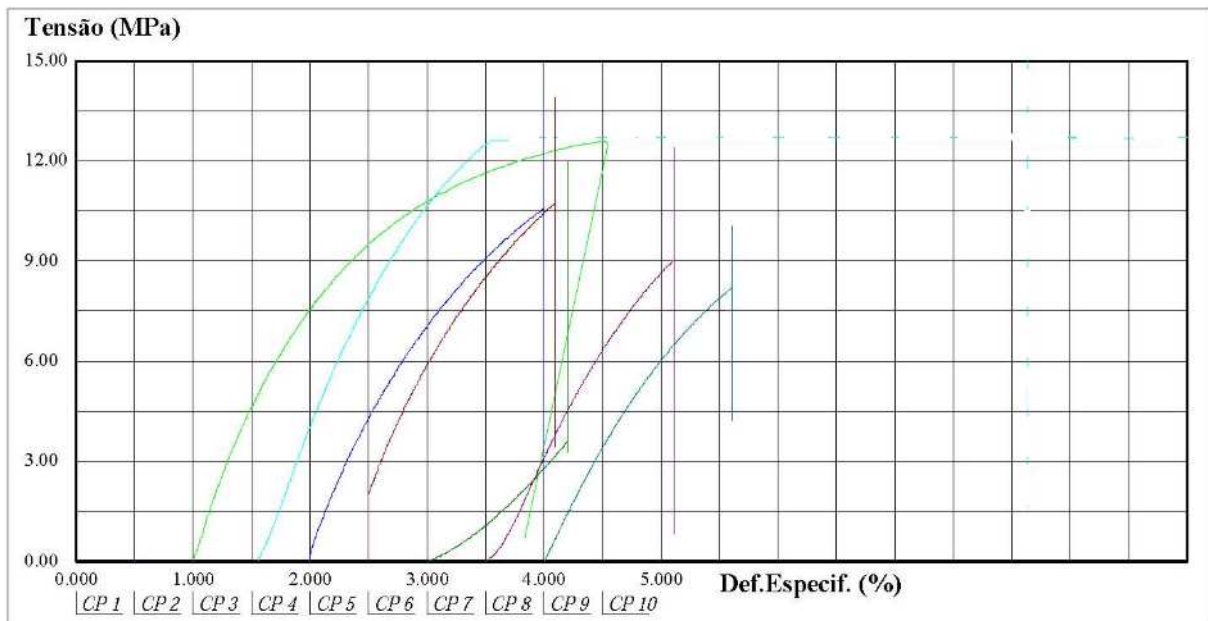


Figura 3.10: Curvas tensão-deformação do compósito em tração.
(Saída da máquina EMIC DL 3000)

No caso do compósito em tração quem define a ruptura é a fibra do algodão. Da Tabela 3.3 tem-se para a resistência um coeficiente de variação de 12,6% e para o módulo da reta inicial um coeficiente de variação de 17,6%, valores perfeitamente aceitáveis para fibras naturais. A grande diferença entre as deformações máximas está no fato de que os extensômetros foram retirados para diferentes níveis de tensão. A velocidade de carregamento adotada foi de 5 *MPa*/minuto. A queda de tensão registada na Figura 3.10, enquanto se retira o extensômetro – reta vertical –, o que corresponde a uma interrupção da aplicação de carga.

Comparando-se as Tabelas 3.2 e 3.3 vê-se que a resistência à compressão é praticamente igual à resistência à tração, apenas 6% maior, ou seja, estão dentro da mesma faixa de tolerância. Já o módulo de elasticidade da reta inicial à tração resultou em 2,45 vezes o módulo de elasticidade em compressão. Em tração, por não se ter interrompido nenhum experimento, não foi possível constatar o comportamento elástico. Pode-se dizer apenas que é um comportamento não linear.

3.2. Caracterização do Bambu

Em termos de projeto, para o tipo de solicitação a que fica submetida a treliça com as ligações propostas, as principais resistências a serem determinadas para o material seriam: - compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras e cisalhamento paralelo às fibras, função do conteúdo de umidade das amostras e também da densidade aparente do material, que serão também determinadas. Os corpos de prova foram preparados conforme Figura 3.11.

Teste ao Cisalhamento Paralelo

Os corpos de prova foram confeccionados com 250 mm de comprimento e foram inseridos dois entalhes perpendiculares às fibras, em sentidos opostos, distantes entre si de 20 mm, como mostrado na Figura 3.11. A superfície de ruptura coincide com a espessura de parede do bambu, de forma que corta o material com diferentes concentrações de fibra. Ou seja, o corpo de prova tem 10 mm de largura e a profundidade igual à espessura de parede do bambu, no local em que ocorre a ruptura. Com um canivete dá-se o acabamento no corpo de prova,

eliminando a curvatura natural do tubo, de forma que o corpo de prova fique chato, plano, para que as garras não o fraturem ao meio, no sentido longitudinal.

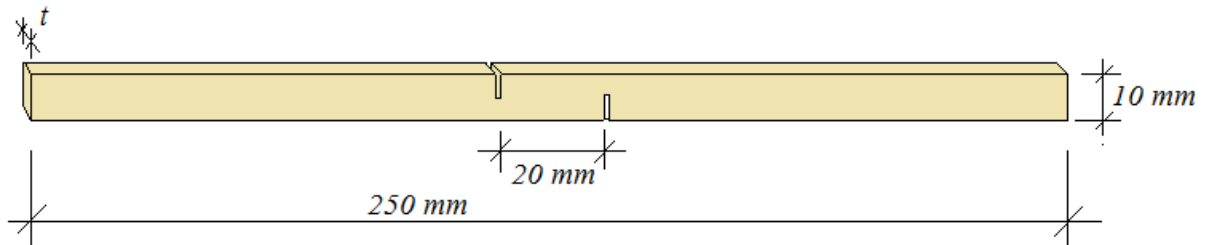


Figura 3.11: Dimensões do corpo de prova.
(Arquivo pessoal da Autora)

Foram ensaiados nove corpos de prova, Figura 3.12.



Figura 3.12: Corpos de prova após a ruptura.
(Arquivo pessoal da Autora)

A velocidade de carregamento foi de 500 N/minuto. No início das curvas, Figura 3.13, pode-se observar uma acomodação do corpo de prova ao apresentar um pequeno giro, já que os entalhes opostos geram um pequeno momento naquele local. Após essa rotação o material volta a se comportar linearmente.

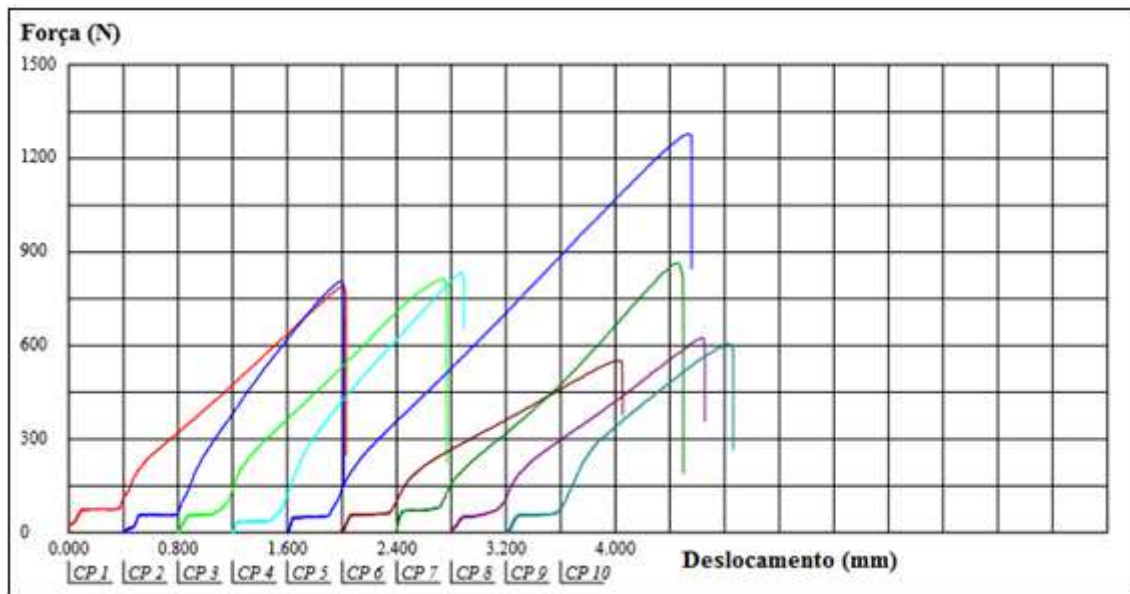


Figura 3.13: Curvas Força versus Deslocamento para o cisalhamento paralelo em tração.
(Saída da máquina EMIC DL 3000)

Os resultados estão apresentados na Tabela 3.4:

Tabela 3.4: Resistência ao Cisalhamento Paralelo do Bambu em Tração.

Corpo de Prova	Espessura (mm)	Limite de resistência (MPa)	Impressão Visual
CP1	4,5	8,29	Sem defeitos visuais
CP2	4,7	8,45	Sem defeitos visuais
CP3	4,6	8,09	Sem defeitos visuais
CP4	4,4	9,20	Sem defeitos visuais
CP5	6,4	9,30	Sem defeitos visuais
CP6	3,7	7,40	Sem defeitos visuais
CP7	4,0	10,25	Sem defeitos visuais
Médias ± desvio padrão	4,6 ±0,3	8,7±0,32	
CP8	4,4	6,53	Presença de Fungos
CP9	4,8	6,23	Presença de Fungos

Teste de Compressão do bambu

Os corpos de prova foram preparados conforme Figura 3.14 a). Na Figura 3.14 b) tem-se o experimento e a instrumentação utilizada.

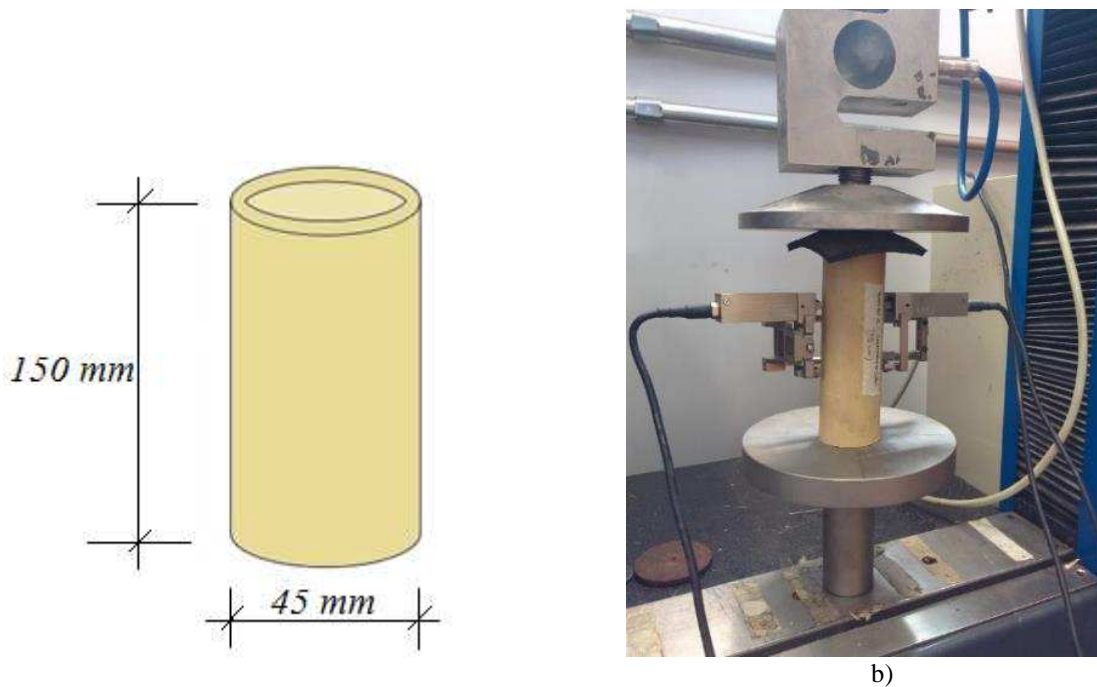


Figura 3.14: a) Dimensões do Corpo de prova; b) Teste de compressão do bambu; (Arquivo pessoal da Autora)

Os resultados estão apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Dados do Ensaio Compressão do Bambu Cilindro.

Numeração da máquina	Corpo de prova físico	Diâmetro externo (mm)	Diâmetro interno (mm)	Força máxima (N)	Tensão máxima (lim. Da máquina) (MPa)	Def. (%) na retirada do extensômetro	Mód. de Elasticid. (MPa)
CP1	1	50,11	35,81	28031	29,05	0,20	16584
CP2	1	50,11	35,81	28014	29,03	0,20	16485
CP3	1	50,11	35,81	27967	28,98	0,21	14579
CP4	2	45,33	30,25	29978	31,25	0,21	16692
CP5	3	49,2	35,48	27984	30,67	0,12	14460
CP6	4	48,42	36,43	27943	34,97	0,12	13755
CP7	5	45,42	35,65	27978	44,98	0,12	18573
CP8	5	45,42	35,65	27967	44,96	0,12	18509
CP9	6	52,36	40,65	27971	32,70	0,12	17274
CP10	7	47,44	35,65	27952	36,33	0,12	15932
Módulo médio ± desvio padrão				34,30±5,83 MPa		16284 ±1640	

Na Figura 3.15 têm-se as curvas tensão – deformação do bambu comprimido.

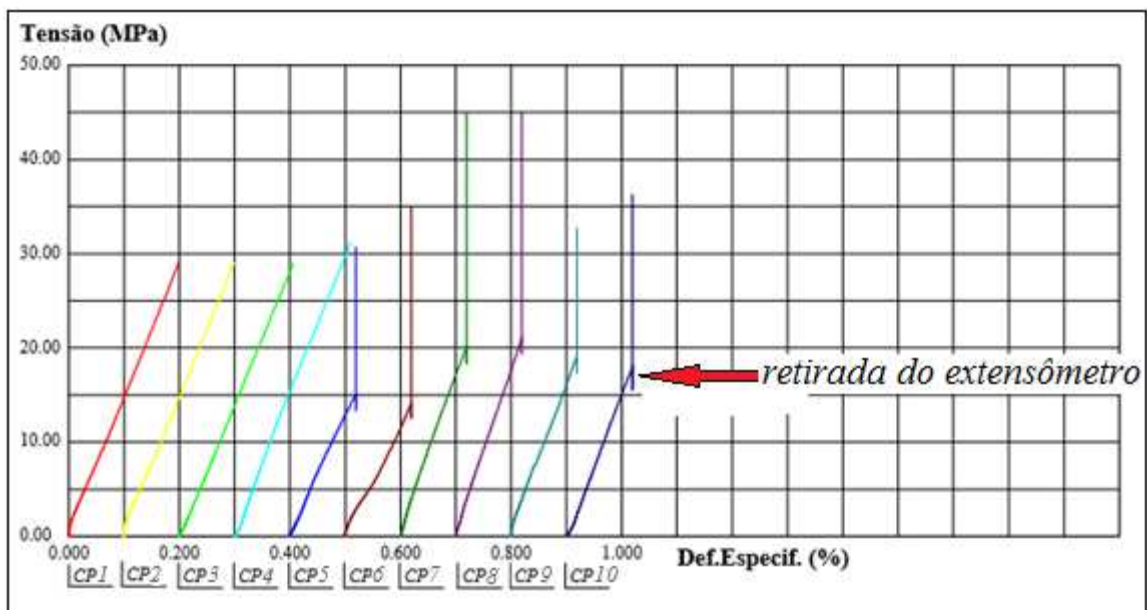


Figura 3.15: Curvas Tensão x Deformação – bambu comprimido.
(Saída da máquina EMIC DL 3000)

Constata-se a perfeita linearidade do material sob compressão, ou seja, o bambu da espécie *Bambusa tuldoides* é um material polimérico Hookeano, com módulo de elasticidade médio de 16,3 GPa, valor relativamente alto em relação a bambus de espécies de maior diâmetro. O coeficiente de variação de 10%, é relativamente pequeno para materiais naturais. As tensões máximas registradas não são o limite de resistência do material, mas o limite de resistência da própria máquina, que é de 3 toneladas. As diferentes deformações registradas referem-se à retirada do extensômetro, que aconteceu para tensões diferentes em alguns casos.

Tração Paralela do Bambu

Os corpos de prova foram confeccionados conforme a Figura 3.16. Neste modelo de corpo de prova, cola-se segmentos da parede do próprio bambu, nas extremidades que receberão o aperto dos mordentes. Este tem sido o melhor modelo de corpo de prova para tracionamento do bambu, que evita que haja ruptura na região da garra. Os corpos de prova têm 10 mm de largura e espessura pouco menor do que a espessura de parede do bambu. Na realidade pode-se retirar corpos de prova com diferentes espessuras, de forma a registrar a resistência em 3 ou mais níveis de concentração de fibras. Quanto mais próximo à superfície externa mais quantidade de fibras por mm².

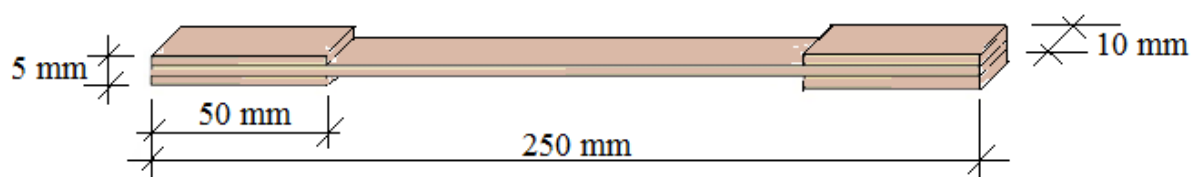


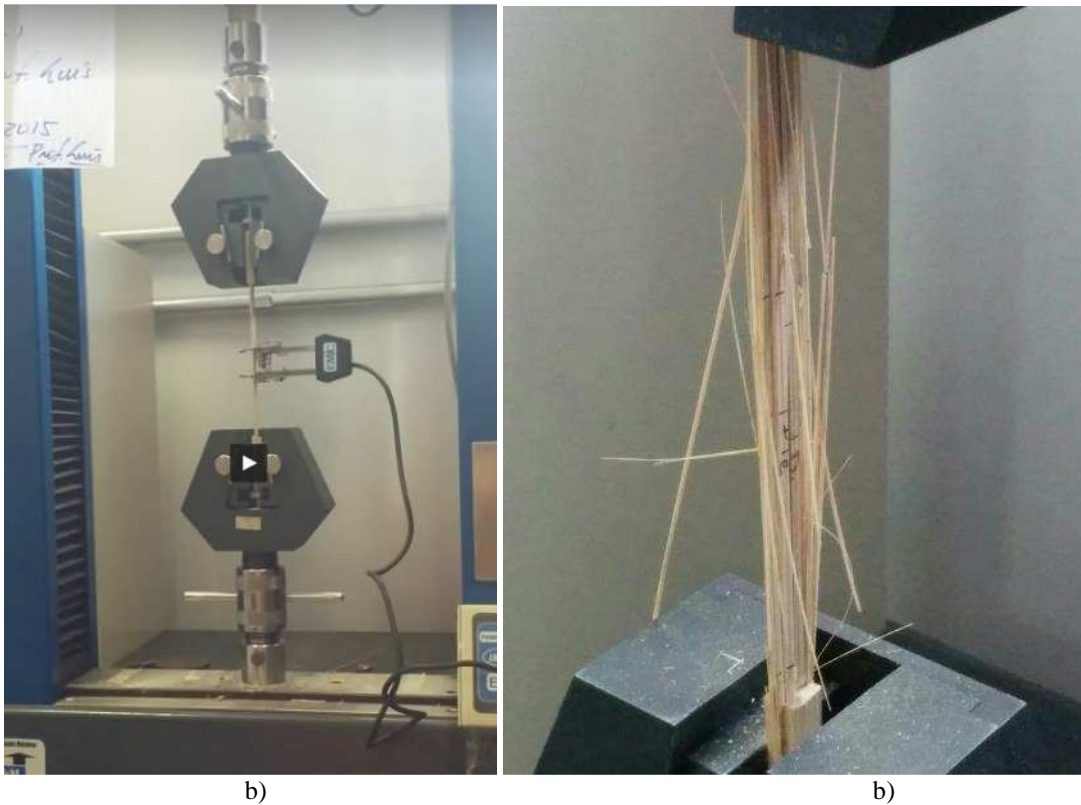
Figura 3.16: Dimensões do corpo de prova para tração.
(Arquivo pessoal da Autora)

Na Figura 3.17 tem-se o aspecto dos corpos de prova rompidos.



Figura 3.17: Aspectos da ruptura por tração do bambu – trecho médio.
(Arquivo pessoal da Autora)

Na Figura 3.18 tem-se o detalhe do experimento:



b) b)
 Figura 3.18: a) Teste de tração do bambu; b) Ruptura tipo do bambu em tração.
 (Arquivo pessoal da Autora)

Na Tabela 3.6 tem-se os resultados dos testes de tração.

Tabela 3.6: Resultados dos Testes de Tração do Bambu.

Numeração da máquina	Corpo de prova físico	Largura (mm)	Espessura (mm)	Força Máxima (N)	Limite de resistência (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)
<i>CP1</i>	1	8,53	2,7	5184	225	18379
<i>CP2</i>	4	12,0	4,17	11989	240	-
<i>CP3</i>	1 - médio	10	2,97	7239	244	-
<i>CP5</i>	2 - interno	12,1	2,8	6503	192	23348
<i>CP7</i>	3	11,54	3,8	8955	204	21450
					Média ± desvio: 221±22,6	Média ± desvio: 21059 ± 2507
<i>CP9</i>	2- externo	9,15	3,0	9493	345,8	29723

As curvas tensão-deformação de 4 dos corpos de prova estão apresentadas na Figura 3.19. Nos demais houve problema com a fixação do clip gauge, por isso foram eliminados na Figura 3.19, embora se tenha medido a tensão de ruptura.

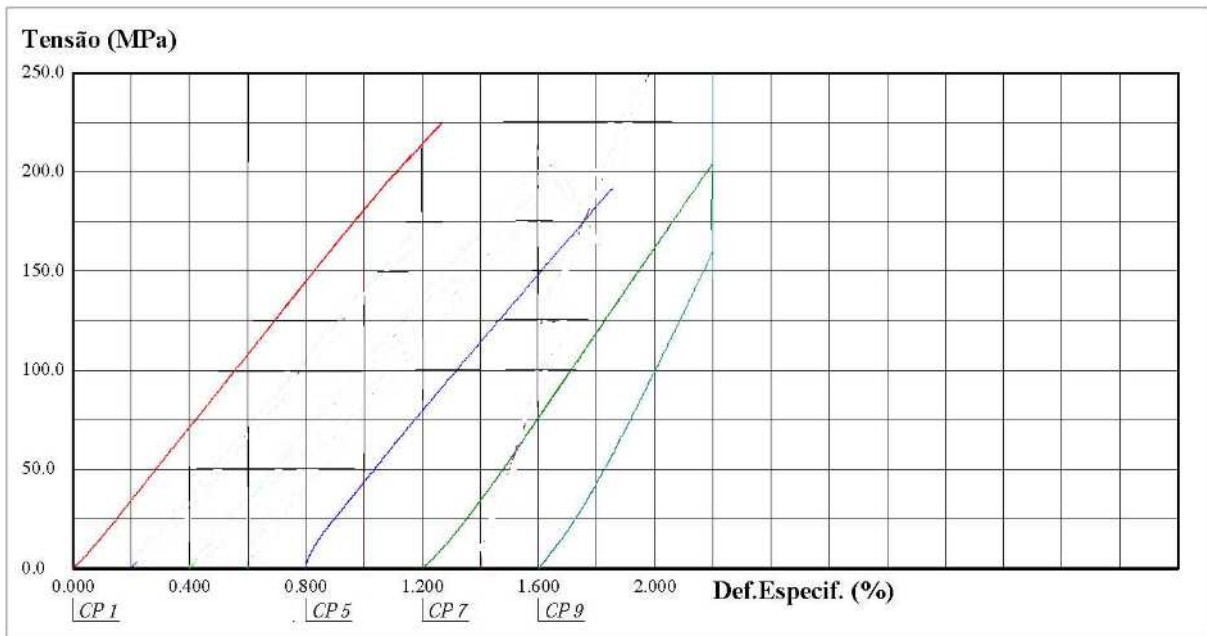


Figura 3.19: Gráfico de tensão versus deformação na tração do bambu. (Saída da máquina EMIC DL 3000)

Na Tabela 3.6, os termos médio, interno e externo referem-se aos trechos de onde o corpo de prova foi extraído da seção transversal do bambu. Surpreende a resistência do material, até maior do que a resistência do aço. Contudo, o módulo de elasticidade de 21,1 *GPa* é exatamente 10% do módulo de elasticidade do aço. Constata-se assim experimentalmente o que se sabe na prática, ou seja, que o bambu é um material muito resistente e flexível. Basta lembrarmos das varas de pesca que têm uma grande capacidade de se envergarem sem se romperem. Na Figura 3.17.b) tem-se a ruptura tipo dos corpos de prova em tração, com o elemento se desfibrando em vários fios. No caso, este corpo de prova é o CP9 da Tabela 3.6.

3.3. Caracterização da Colagem

Cisalhamento da colagem por compressão

Como a segurança da treliça depende totalmente da colagem do compósito ao bambu, foram produzidos também corpos de prova conforme a Figura 3.22, para testes de cisalhamento da colagem sob compressão.



Figura 3.20: Corpos de prova cisalhamento da colagem por compressão.
(Arquivo pessoal da Autora)

O bambu é lixado internamente, sem a retirada da película interna. Para uma boa colagem deve-se utilizar lixa grossa de aço número 35, para se fazerem ranhuras longitudinais e circunferenciais. Após retirada dos resíduos, pinta-se a superfície interna com pincel e aguarda-se de 10 a 15 minutos para penetração do adesivo no bambu. Então, com os rolos de compósito já cortados com 8 cm de largura, introduz-se o rolo no tubo de bambu com comprimento inicial de 12 cm. Deste modo, tem-se uma distância livre para deslocamento do compósito, visível na outra extremidade, conforme Figura 3.21.



Figura 3.21: Distância livre para deslocamento do compósito.
(Arquivo pessoal da Autora)

Após a secagem, apara-se a superfície e então corta-se um anel de bambu deixando-se 1 a 2 cm do compósito sobrando na parte superior, conforme Figura 3.22.



Figura 3.22: Aspecto da parte superior do corpo de prova.
(Arquivo pessoal da Autora)

Na Figura 3.23 tem-se o experimento dos corpos de prova, comprimidos com uma velocidade de 3 MPa/minuto.



Figura 3.23: Teste de cisalhamento da colagem por compressão.
(Arquivo pessoal da Autora)

Na Tabela 3.7 tem-se os resultados para os 12 corpos de prova ensaiados. O comprimento de colagem médio foi de 25 mm.

Tabela 3.7: Resultados dos Testes de Cisalhamento da Colagem por Compressão.

Numeração da máquina	Corpo de prova físico	Força máxima (N)	Tensão de ruptura (MPa)
<i>CP1</i>	1	14664	5,08
<i>CP5</i>	2	8270	2,79
<i>CP7</i>	3	9965	3,68
<i>CP8</i>	4	15396	5,52
<i>CP9</i>	5	15038	4,88
<i>CP10</i>	6	10390	4,70
<i>CP11</i>	7	15065	6,62
<i>CP12</i>	8	11718	5,05
<i>CP13</i>	9	13322	5,07
<i>CP14</i>	10	14715	5,13
<i>CP15</i>	11	13518	4,31
<i>CP16</i>	12	16845	5,53
			Média ± desvio 4,86±0,96

Comparando-se a média de 4,86 *MPa* com a média da Tabela 3.4, de 8,7 *MPa*, vê-se que a resistência da colagem nessa região interna, sem retirada da película envolvente, é 56% da resistência ao cisalhamento paralelo do próprio bambu. Mesmo assim este valor é relativamente alto. Em Moreira & Ghavami (2012) a resistência da colagem de um cilindro de madeira no oco de bambus da espécie *Dendrocalamus giganteus*, com adesivo marítimo resorcinol- formaldeído, deu valores médios de $3,6 \pm 0,89$ *MPa*, com a ruptura ocorrendo dentro da parede interna do bambu. Ou seja, essa seria a resistência média ao cisalhamento paralelo destes bambus na parede interna.

Contudo, observando-se a superfície de ruptura dos corpos de prova atuais, constatou-se que a rugosidade da superfície poderia ter sido maior, para uma colagem de melhor qualidade. A ruptura aconteceu na linha adesiva e não dentro da parede interna do bambu, como no caso da ruptura dos bambus *Dendrocalamus giganteus*. Pela coloração da superfície, um pouco esbranquiçada, a ruptura parece ter acontecido para dentro do compósito, ou seja, para dentro do algodão, Figura 3.24. A deformação transversal, devido ao efeito do coeficiente de Poisson, vai comprimir o compósito radialmente contra a parede do bambu.

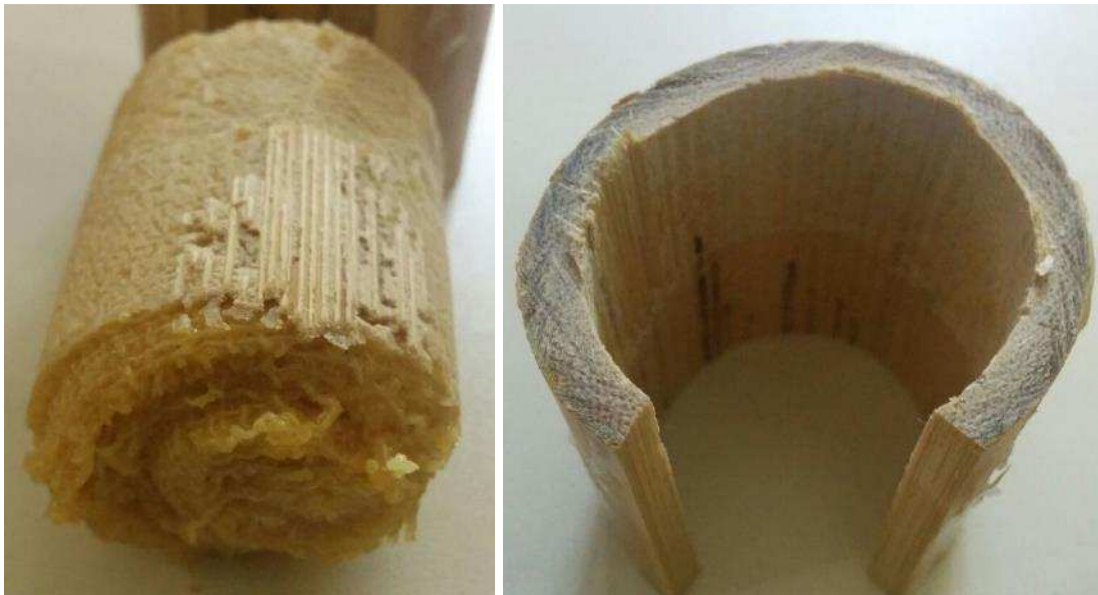


Figura 3.24: Ruptura do corpo de prova na linha adesiva.
(Arquivo pessoal da Autora)

Cisalhamento da colagem por tração

Da mesma forma, 6 corpos de prova foram ensaiados em tração para determinação da resistência da ligação ao cisalhamento na região da colagem, com dimensões dadas na Figura 3.25.a) e aspecto final conforme Figura 3.25.b). A largura do corpo de prova depende da

espessura de parede e do diâmetro do bambu. Quanto maior o diâmetro, mais fácil tirar larguras maiores e chatas. Para espessuras maiores pode-se tirar lâminas de bambu para diferentes concentrações de fibras. Nestes primeiros experimentos não se preocupou em verificar em que posição da seção transversal estavam as superfícies a serem coladas. Preferiu-se ter uma posição aleatória, para representar uma situação mais prática do que teórica. As lâminas de bambu devem ser chatas ou planas, para que o mordente não abra a lâmina pelo meio, no sentido longitudinal.

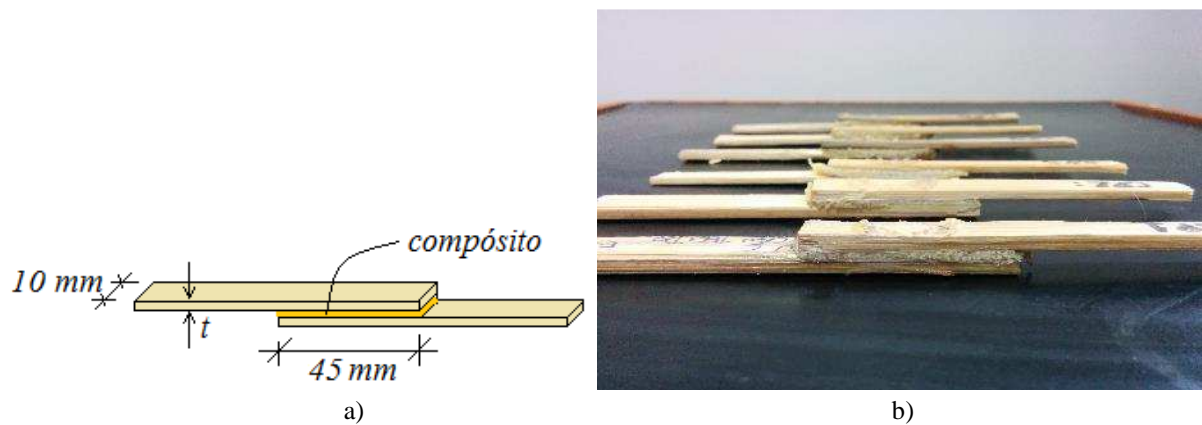


Figura 3.25: a) Dimensões do corpo de prova; b) Aspecto dos corpos de prova;
(Arquivo pessoal da Autora)



Figura 3.26: Teste de cisalhamento da colagem por tração.
(Arquivo pessoal da Autora)

Os resultados estão apresentados na Tabela 3.8 e na Figura 3.26.

Tabela 3.8: Resultados dos Testes de Cisalhamento da Colagem por Tração.

Corpos de prova	Comprimento de colagem (mm)	Largura do corpo de prova (mm)	Resistência ao cisalhamento da colagem (MPa)
1	46,5	11,6	4,81
2	45,8	16,3	5,60
3	43,7	14,0	5,87
4	44,2	14,3	5,14
5	45,5	11,3	4,26
6	43,9	10,9	6,44
Resistência média ± desvio padrão			5,35 ± 0,78

As curvas carga versus deslocamento, Figura 3.26, mostram um primeiro trecho com comportamento diferente entre os corpos de prova.

Acima de 2100 N da carga aplicada todos os corpos de prova apresentaram um comportamento linear. Até este nível há não linearidades provocadas por flexão do corpo de prova devido à excentricidade das cargas e também por deslizamento por cisalhamento entre o compósito, que nos dois primeiros corpos de prova parecem ter sido predominantes, o que pode denotar que o tecido não foi devidamente embebido na resina.

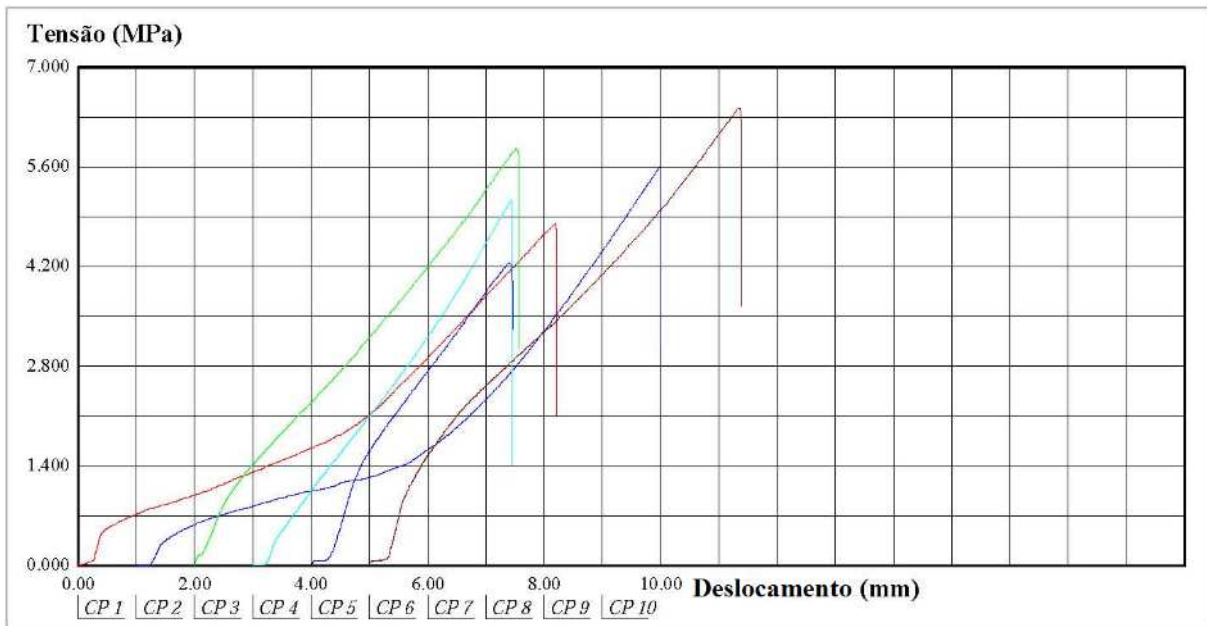


Figura 3.27: Curvas tensão – deslocamento do cisalhamento da colagem sob tração.
(Saída da máquina EMIC DL 3000)



Figura 3.28: a) Ruptura na linha adesiva; b) Ruptura por delaminação do compósito;
(Arquivo pessoal da Autora)

Comparando-se a resistência média ao cisalhamento na cola, tração e compressão, $5,35 \text{ MPa}$ - Tabela 3.8, e $4,86 \text{ MPa}$ - Tabela 3.7, respectivamente; tem-se uma diferença de apenas 10% a favor da colagem em regiões mais ricas de fibras do bambu. Como visto, a colagem interna foi feita sobre a película que reveste o bambu internamente e que está naturalmente colada à parede do bambu, num local de muito baixa concentração de fibras. Este resultado mostra que a ruptura ao cisalhamento ocorreu na linha adesiva ou numa distância infinitesimal da linha adesiva, para dentro do compósito, delaminando-o. Os experimentos mostram que a colagem

pode ser melhorada permitindo-se mais tempo de embebecimento do tecido e fazendo-se rugosidades mais profundas na parede interna do bambu.

3.4. Experimentos Físicos

Os experimentos físicos realizados foram a determinação do conteúdo de umidade e densidade aparente dos bambus ensaiados bem como a densidade do material compósito.

Os bambus foram cortados em segmentos conforme Figura 3.29. O volume do segmento foi calculado tomando-se a média dos diâmetros das duas extremidades, a média das espessuras das duas extremidades e a média dos comprimentos em 2 pontos. O diâmetro médio de uma extremidade é tomado como a média entre o maior e o menor diâmetro identificados visualmente. A espessura média de parede é tomada como a média entre a maior e a menor espessura identificada visualmente na seção transversal. O comprimento médio é também tomado visualmente, como a média de 2 comprimentos. Duas pessoas testaram o critério para os mesmos corpos de prova e a diferença do volume calculado por elas foi inferior a 2%, demonstrando a validade e praticidade do critério.

Os corpos de prova, após pesados em balança milesimal, foram colocados em estufa à temperatura de 102 ± 3 °C, com exaustores de umidade interna. A pesagem dos corpos de prova foi realizada a cada 2 horas. O corpo de prova foi considerado seco quando a diferença percentual entre as duas últimas pesagens ficou inferior a 0,5 %. Com excessão do tempo de pesagem, este procedimento segue as indicações da norma ABNT NBR:7190, para secagem da madeira.



Figura 3.29: Pesagem e secagem das amostras de bambus.
(Arquivo pessoal da Autora)

Na Tabela 3.9 tem-se os resultados do experimento. Ou seja, os resultados mecânicos referem-se a este, conteúdo de umidade de 8,9% com coeficiente de variação de apenas 1,1%. Sabe-se que abaixo de 27% o bambu perde água de constituição, ou seja, a água combinada com as oxidrilas da celulose em cada monômero. Na realidade cada monômero de celulose tem 3 oxidrilas e cada oxidrila pode capturar uma molécula de água. A razão do peso molecular das 3 moléculas de água para uma molécula de celulose é de 33%, sendo este o ponto teórico de saturação das fibras. O conteúdo de umidade $U\%$ é definido como:

$$U\% = \frac{P_{U\%} - P_{seco}}{P_{seco}} \times 100 \quad (3.1)$$

A densidade aparente é um peso específico convencional definido como:

$$\rho_{ap}(U\%) = \frac{P_{U\%}}{V_{U\%}} \quad (3.2)$$

Tabela 3.9: Resultados de Densidade e Conteúdo de Umidade do Bamboo.

Corpos de Prova	V (cm ³) 8,9%	ρ_{ap} (gf/cm ³) 8,9 %	P _{8,9%} (g) 9h	P(g) 11h	P (g) 13h	P (g) 15h	P(g) 17h	U%
1	44,94	0,89	40,06	37,84	37,19	36,91	36,77	8,94
2	47,55	0,89	42,48	40,16	39,44	39,17	39,01	8,89
3	28,93	0,79	22,96	21,39	21,14	21,06	21,06	9,02
4	34,96	0,95	33,43	31,49	31	30,81	30,7	8,89
5	46,62	0,70	32,58	30,51	30,11	29,95	29,95	8,78
6	49,74	0,72	36,04	33,79	33,31	33,14	33,14	8,75
Dens. média ±desvio		0,82 ±0,10						8,9 ±0,1

Contudo, a alta densidade da parte externa do bambu, bem como a presença local de cera e sílica, pode ser a explicação para o ponto de saturação das fibras ser da ordem de 27 %. É interessante observar que bambus com diferentes densidades aparentes tiveram praticamente o mesmo conteúdo de umidade. Já as diferenças de densidade remetem diretamente à idade do bambu. Bambus maduros têm maior densidade do que os bambus mais novos. Principalmente por essa razão, mais do que o corpo de prova ser da base, meio ou topo do colmo, o que não foi registrado, obteve-se um coeficiente de variação de 12,1 %. De qualquer forma, densidade aparente média de $0,82 \text{ gf/cm}^3$ com um conteúdo de umidade médio de 8,9 % é um bambu de alta densidade. As resistências mecânicas foram também elevadas, de forma que não há dúvida de que bambus mais densos são mecanicamente mais resistentes.

Para o compósito calculou-se a densidade média de cada um dos 6 corpos de prova cilíndricos antes de serem ensaiados em compressão, obtendo-se $0,98 \pm 0,015 \frac{\text{gf}}{\text{cm}^3}$.

3.5. Dimensionamento da Bioconexão.

Partindo-se do experimento de tração, Figura 3.8, tem-se que a resistência média do compósito é igual a $12,9 \text{ MPa}$. A malha ortogonal do tecido encontra-se na Figura 3.9.c). Os quadrados da malha têm em média 1 mm de largura, ou seja, essa seria a distância eixo a eixo dos fios. Os fios parecem ter, visualmente, 0,4 mm de diâmetro. Os corpos de prova ficaram

em média com 3 mm de espessura, com 3 camadas de tecido. Ou seja, para corpos de prova de 25 mm de largura deve-se ter 26 fios na seção transversal, um dado importante para comparação entre tecidos de algodão alvejado. Os cilindros compósitos ensaiados em compressão apresentaram densidade média de $0,98 \frac{gf}{cm^3}$. As fitas compósitas ensaiadas em tração, $0,84 \frac{gf}{cm^3}$. A diferença de densidade se justifica principalmente pelo fato dos tecidos serem introduzidos sob pressão dentro do tubo de PVC por ocasião da fabricação. Atribuímos este aumento de densidade à maior quantidade de tecido, ou seja, os cilindros compósitos, que nos protótipos fazem a conexão interna dos bambus, teriam 16,7% a mais de tecido que os corpos de prova ensaiados, podendo este valor ser considerado uma reserva de carga adicional, a favor da segurança. Então, se o bambu tem por exemplo 4 cm de diâmetro interno, terá uma área de 1257 mm^2 . Tem-se então que o compósito interno unindo dois elementos com o mesmo diâmetro teria condições de suportar um máximo de $1257 \times 12,9 \frac{N}{mm^2} = 16215 \text{ N} = 16,2 \text{ kN}$.

Para a bandagem externa pode-se considerar que cada 3 voltas do compósito tecido tenha uma espessura de 3 mm. A espessura pode até ser menor pelo fato do tecido estar sendo tracionado, contudo, em contrapartida, o número de fios estaria aumentando por mm^2 , compensando a diminuição de área. A bandagem externa foi feita com camadas duplas de tecido com 10 cm de largura. Então, por exemplo, se o diâmetro externo do bambu é de 50 mm, uma bandagem de 3 voltas seria capaz de suportar uma tração de $\pi \times 50 \times 6 \times 12,9 = 12158 \text{ N} = 12,2 \text{ kN}$, e assim sucessivamente, quanto mais voltas mais resistência se teria. A resistência à tração da ligação seria a soma das resistências internas e externas. Assim se explica como as ligações resistiram facilmente aos esforços de tração que aconteceram no protótipo 2, mesmo após terem se deformado tanto devido à flambagem lateral do banzo superior.

A resistência à compressão do compósito foi um pouco maior com valor de $13,7 \text{ MPa}$, demonstrando exatamente que o fato do material estar confinado a resistência aumenta, pelo aumento da densidade de fios, ainda que no caso da compressão, a instabilidade das fibras seja um problema não existente na tração. Na realidade a resistência à compressão do compósito é um pouco maior do que a resistência da resina pelo fato do compósito freter a resina e diminuir a expansão lateral pelo efeito do coeficiente de Poisson. Como a resistência

do compósito à compressão é maior do que à tração, o dimensionamento se faz de maneira análoga ao dimensionamento à tração. Como visto, o compósito fica comprimido num trecho relativamente curto da extremidade das barras.

Para se calcular o comprimento de colagem, tem-se os resultados das Tabelas 3.7 e 3.8, tanto para a resistência ao cisalhamento por compressão, 4,86 *MPa* quanto por tração, 5,35 *MPa*, respectivamente. Trabalhando-se portanto com o menor valor de resistência, a favor da segurança, tanto para tração quanto para compressão, tem-se: - o comprimento de colagem do cilindro interno, para resistir à uma força de tração de 16,2 *kN*, seria $l_c = \frac{P_r}{\pi D_i \bar{\tau}} = \frac{16200}{40\pi 4,86} = 26,52 \text{ mm}$. Nos protótipos adotou-se um comprimento de colagem médio de 12 cm. De forma análoga pode-se determinar o comprimento de colagem externo, que ficaria menor para absorção da mesma força, já que o diâmetro externo é maior. Contudo, recomenda-se um comprimento de colagem mínimo de 3 vezes o diâmetro externo, tanto internamente quanto externamente, já que a ligação pode ficar também sujeita a pequenos momentos fletores, uma vez que o bambu não tem uma forma retilínea perfeita.

Os protótipos registraram também um consumo médio de resina de 780 gramas por litro de compósito. O protótipo 2 pesou 14,1 *kgf*, sendo 8,9 *kgf* de bambu e 5,2 *kgf* de compósito. Registrou-se também que 76% do peso do compósito corresponde à resina e 24% ao tecido de algodão alvejado com as características descritas no item 4.2.

Capítulo 4

TÉCNICAS DE FABRICAÇÃO

4.1. Introdução

Nesse capítulo são apresentadas as técnicas desenvolvidas nesta investigação para a fabricação dos protótipos, que foram realizados com relativa facilidade por 2 pessoas. O carro chefe do LILD e do LASE é também proporcionar aos investigadores a oportunidade de fazerem seus próprios objetos de investigação, contrapondo-se ao mito de que o fazer com as próprias mãos requer habilidades muito especiais e é um dom que não pode ser aprendido. Por outro lado, busca-se uma coerência nesse fazer, coerência dada pelo próprio material utilizado, ou seja, as técnicas do fazer vão surgindo com o próprio fazer e vão se aprimorando, caminhando com uma certa autonomia, à medida que são aplicadas em diferentes oportunidades.

Quando se trabalha um novo elemento estrutural como é o caso do bambu, um elemento que tem uma forma livre, ainda que se façam seleções de acordo com as necessidades da estrutura, é natural que se busquem os conceitos de outras estruturas para se aplicarem às estruturas de bambu, ligados à precisão, deslocabilidades e flechas admissíveis, tipos de conexões, entre outros, pois são as referências disponíveis. Contudo, ao se envolver na fabricação com este novo elemento estrutural e com suas novas propriedades, permitindo-se transgredir os cânones do fazer pré-estabelecidos na busca de novas possibilidades, começa-se a caminhar na direção das necessidades do elemento, desprendendo-se das referências trazidas anteriormente. Aqui inicia-se todo o desenvolvimento de uma nova técnica. Daí para a frente o objeto em desenvolvimento e seu funcionamento é que balizarão o trabalho executado, tornando-se o “juiz do jogo” do Design de Objetos de Utilidade, Moreira & Ripper (2014).

4.2. Fabricação do Protótipo I

Para a fabricação deste protótipo foram utilizados 6 colmos de bambu da espécie *Bambusa tuldoides*, que foram escolhidos sem controle de idade, mas devido à coloração já envelhecida, a presença de fungos na superfície e o tilintar do bambu através de uma barrinha de aço batida contra a superfície, foram considerados maduros. Esta espécie apresenta um diâmetro médio de 5 cm e paredes da ordem de 5 a 7 mm.

A inovação dessa investigação consiste no sistema de conexão, com material compósito de tecido de algodão embebido em resina poliuretana, em rolos que são introduzidos no oco do bambu lixado internamente e bandagens executadas externamente. Os tecidos vegetais são constituídos por fibras de algodão alvejado, celulose pura, tramadas ortogonalmente, o que lhes confere alta resistência mecânica em 2 direções e fácil distorção. É um elemento de baixo custo que pode ser facilmente encontrado no mercado. Com o mesmo objetivo de resolver a estrutura com os materiais mais próximos da natureza quanto possível, utilizou-se resina poliuretana PU monocomponente, 50 % à base de mamona, material de baixa viscosidade que pode ser aplicado e curado a frio. O tempo de cura dessa resina varia de 6 a 8 horas que quando seca e combinada ao tecido, forma um compósito com resistência mecânica e comportamento satisfatório ao uso que se propõe, como visto nos ensaios mecânicos.

Um desenho guia conforme com a técnica mostrada na Figura 4.1 reproduziu o eixo teórico das barras da estrutura. As barras foram então colocadas sobre o desenho guia e aparadas para atender a este desenho. Não tem como se ocupar de extrema precisão, o que não somente mudaria totalmente o conceito da fabricação como a dificultaria muito, exigindo gabaritos e fixações difíceis de executar. A ideia é que as diferentes tesouras executadas com a mesma guia tenham dimensões finais bem próximas de tal forma que num galpão, os apoios das terças recebam calços, se necessário, para planificação do plano da cobertura, a depender do tipo de vedação. Na Figura 4.1 são mostrados os locais de entalhes, realizados com arco de serra e formão, os entalhes devem ter a profundidade pouco maior que a espessura de parede do bambu, de forma a permitir a passagem do rolinho compósito. Os entalhes são zonas de enfraquecimento da barra e devem ser evitados sempre que possível. No caso da tesoura, eles são inevitáveis no encontro dos banzos superior e inferior, pois eles contribuem bastante com

a absorção das forças nas barras. O pendural tem um diâmetro interno maior, para absorver os rolos dos dois bambus dos banzos superiores e das diagonais.

Após cortadas, as barras passaram pelo beneficiamento: - o lixamento das extremidades de todas as barras, ao longo de 20 ± 2 cm, utilizando-se lixa grossa de madeira nº 35, no sentido longitudinal e no sentido circunferencial, tanto da superfície externa quanto da superfície interna, para aumento das ranhuras e melhor penetração e fixação do adesivo. Figura 4.2.

O lixamento permite que se retire a superfície lisa e encerada da parte externa do bambu e as rugosidades, proporcionando uma melhor aderência entre a resina e o bambu. Caso o lixamento não seja feito, a cera encontrada na parte externa impede a colagem. Isso foi observado durante a produção de alguns corpos de prova. Nos trechos onde não houve lixamento a resina é facilmente retirada, demonstrando que não há colagem com a superfície do bambu. Os rolos de compósito fazem a junção interna dos bambus. As fibras do bambu têm um aspecto vítreo, brilhoso, que provavelmente remete à presença de sílica, SiO_2 .

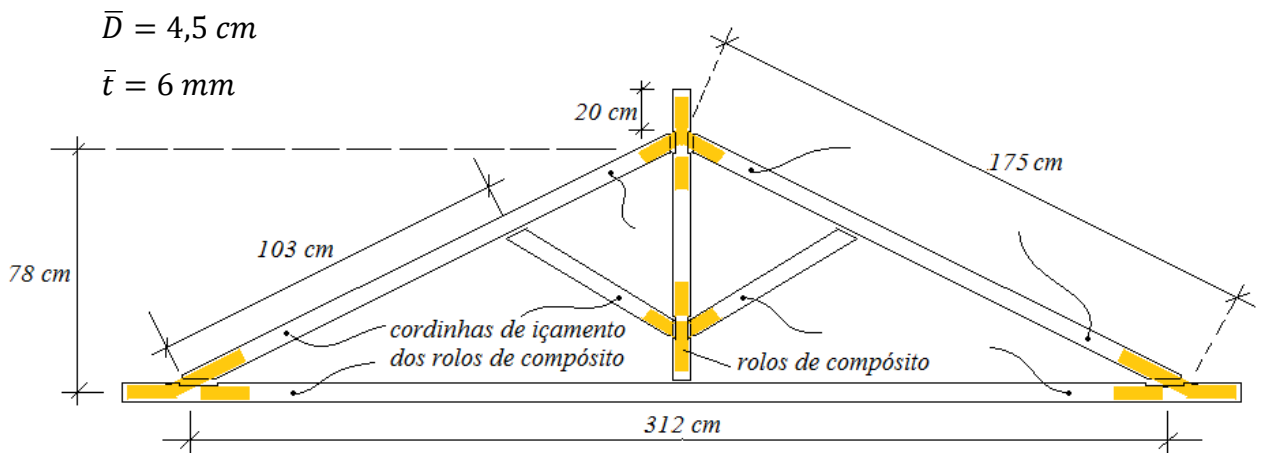


Figura 4.1: Composição do protótipo 1.
(Arquivo pessoal da Autora)

Na Figura 4.2 tem-se o aspecto das ranhuras externas ao bambu.



Figura 4.2: Lixamento longitudinal e circunferencial – superfície externa.
(Arquivo pessoal da Autora)

As extremidades dos banzos superior e inferior foram trabalhadas conforme Figura 4.3, o banzo inferior recebendo um entalhe vertical com profundidade pouco maior que a espessura de parede do bambu.

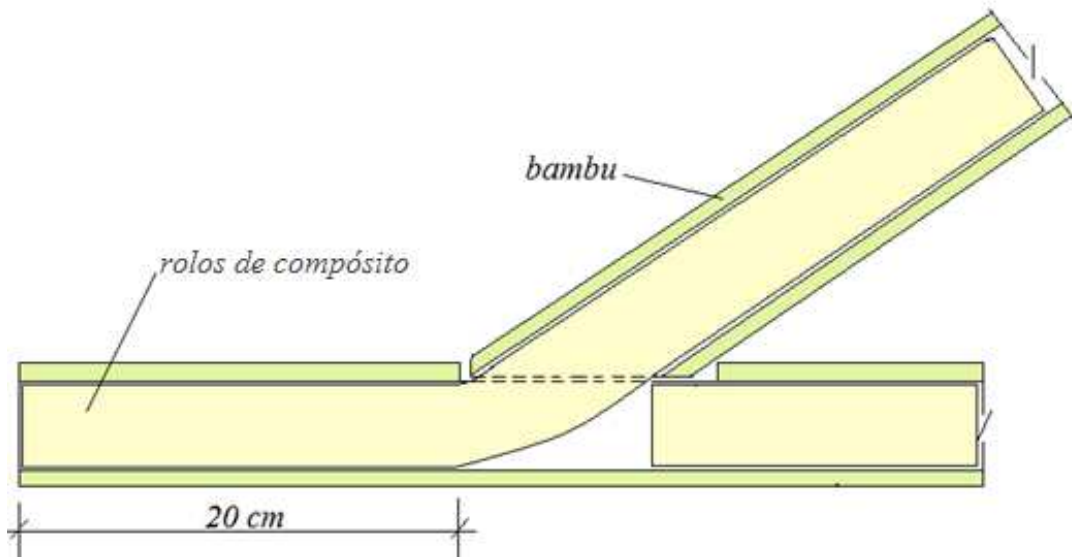


Figura 4.3: Corte e entalhe dos banzos.
(Arquivo pessoal da Autora)

A pintura sempre foi utilizada para a proteção das madeiras – proteção contra a umidade, responsável pela formação de fungos quando superior a 20% e proteção contra o envelhecimento superficial pelos raios ultravioletas. A utilização de cores tem também finalidades estéticas. A cor natural do bambu perde-se com facilidade, ou seja, o bambu perde o viço e portanto Rabin (2010) propõe que deve-se perder o tabu de não pintar os bambus

estruturais. A irregularidade da superfície do bambu faz com que as cores tenham nuances de tonalidade, salientando a beleza de sua rica forma funcional, diferentemente da monotonia luminosa de um tubo prismático pintado, seja metálico ou plástico.

Por outro lado, as cores nos afetam e têm grande influência em nossas vidas, transmitindo sensações e nos alimentando de emoções. No design as cores desempenham um forte papel, influenciando na forma como percebemos uma mensagem e como iremos lembrá-la, ou seja, têm um apelo sensorial muito significativo.

As cores utilizadas para a pintura dos protótipos foram uma coincidência. Foram cores que haviam sobrado de um estudo de cores efetuados pelo Prof. Luís Eustáquio, orientador dessa dissertação, em outra ocasião. Foram utilizadas não porque se tivesse feito um estudo prévio de cores, mas mais para provocar a possibilidade de se pintar os bambus estruturais.

Aspectos estéticos fogem do domínio da mecânica estrutural e entram no domínio de mercado. Por isso são também temas de investigação do design de produtos. A pintura do bambu pode ter também finalidades semióticas, como nos propõe novamente Rabin (2010), que lança a hipótese da pintura poder camuflar o material aos insetos que também por hipótese possam se orientar por vibração das cores.

Inspirado nos trabalhos do professor Arísio Rabin, tem-se na Figura 4.4 um estudo de cores com spray realizado pelo professor Luís Eustáquio Moreira. A tinta é o melhor revestimento protetor dos tecidos celulósicos. Tintas, resinas, selantes com corantes podem ser aplicados à superfície do bambu com finalidade de proteção e também estéticas. Não pintar o bambu por ser um material natural torna-se um tabu que não se justifica, pois o que é bonito no bambu é a forma, a geometria ímpar do tubo, cuja pintura colabora para salientar. A cor natural perde naturalmente o viço.



Figura 4.4: Um estudo de cores com o bambu.
(Arquivo Prof. Luís Eustáquio)

Na Figura 4.5 salientam-se os detalhes dos diversos nós artesanais do lado externo. A ideia então é que a ligação dos elementos se faça tanto internamente quanto externamente.

- **Análise sensorial da fabricação artesanal**

Um trabalho dessa natureza é uma expectativa constante, do início ao fim, dado a natureza artesanal da atividade. Cada ligação realizada é uma nova emoção, na busca da técnica mais apropriada naquele momento; internamente, pelo içamento dos rolos, que devem entrar com uma certa pressão, o que foi facilitado pela pintura prévia do oco do bambu, diminuindo o atrito do rolo com a parede do bambu. Externamente, pela busca do desenho mais apropriado para a bandagem, visando o melhor desenho da bandagem para que abrace as barras de acordo com a solicitação axial que recebem, de forma a garantir que o compósito fique também resistente internamente, sem dizer que somente depois deste acabamento externo a conexão ganha um aspecto estético agradável.

A conclusão do trabalho é uma outra vitória que nos faz apegar ao objeto conseguido. Levá-lo ao CTI – Centro de Tratamento Intensivo, como aos laboratórios mecânicos se refere em tom de brincadeira e por analogia ao excesso de instrumentos de medição, o coordenador do LILD, professor Ripper, é outra expectativa. Já consciente do destino que deve ter aquele objeto e da sua finalidade, o experimento mecânico se envolve novamente de toda uma aura de expectativas, em que não se esconde a vontade de que o objeto responda às previsões de força resistente que se fez, ainda que o que mais ensine seja o momento da falha, independentemente de se atender ou não às previsões.



Figura 4.5: O desenho das bandagens.
(Arquivo pessoal da Autora)

A estrutura finalizada tem-se na Figura 4.6.



Figura 4.6: Protótipo I - antes e após a pintura.
(Arquivo pessoal da Autora)

4.3. Fabricação do Protótipo II

Depois de analisar os resultados do experimento do primeiro protótipo, considerado bem sucedido, o que fortaleceu a ideia inicial, constatou-se a necessidade de se fabricar um novo protótipo, com um vão maior, de tal forma que as ligações ficassem também submetidas à tração. Assim, conforme Figura 4.7, o banzo inferior foi realizado com 2 segmentos de barras emendados. Do mesmo modo, as diagonais tornam-se tracionadas quando submetidos à solicitação indicada, pela quebra dada ao banzo superior. A treliça é composta por 9 barras de bambu com diâmetro médio $\bar{D} = 45$ mm.

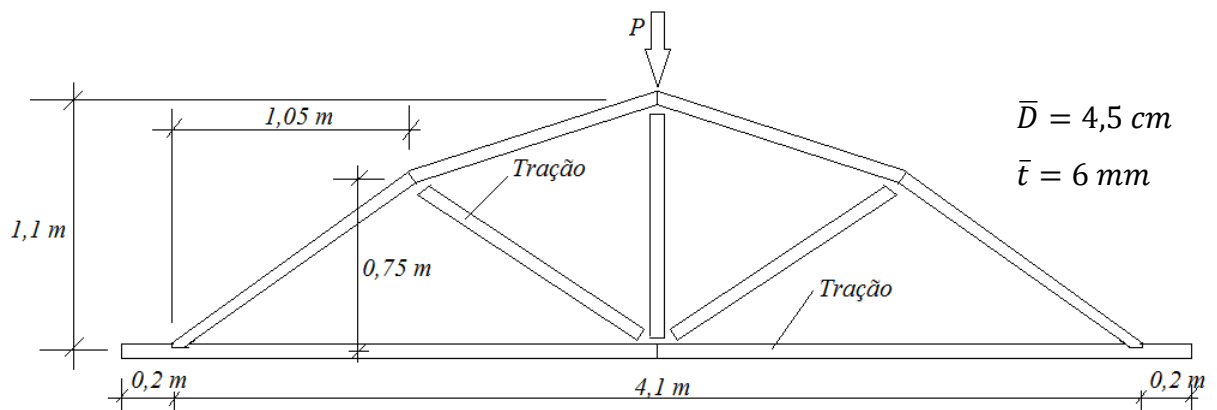


Figura 4.7: Composição do Protótipo 2.
(Arquivo pessoal da Autora)

A fabricação do Protótipo II parte do mesmo princípio do Protótipo I, mas o desenho difere bastante, pois não há mais entalhes no pendural como no primeiro caso. Essa medida teve de se tomada pois previu-se que a colagem deveria ser feita em duas etapas, primeiramente realizando-se a moldura dos banzos para depois de seca, realizar o treliçamento interno. Aqui novamente se esbarra com o exercício do desapego, agora em relação à técnica anterior, pois o fato do pendural entalhado ter dado bons resultados, induz a suspeitar da nova proposta. Vale então um comentário, uma fala inferida das atividades do LILD e do LASE: - quem trabalha com desenvolvimento deve aprender a se desapegar das técnicas já consolidadas, não no sentido de evitá-las, mas vivenciá-las e ir em frente.

Os itens abaixo, mostram de maneira geral, a linha de produção:

1. Corte das barras de acordo com as dimensões especificadas – observe que somente as barras dos banzos se tocam. O pendural e as diagonais – escoras – são mais curtas pois de dentro delas sairá o tecido embebido que irá envolver as barras do banzo.
2. Retirada da película interior de cada extremidade das barras (cerca de 20 cm) e o lixamento da extremidade externa das mesmas. Constatou-se posteriormente nos experimentos de cisalhamento da colagem por compressão, que essa técnica relativamente trabalhosa, podia ser abandonada e a colagem poderia ser feita diretamente sobre a película interna, desde que adequadamente lixada. Um lixamento adequado deve utilizar lixa grossa com produção de ranhuras longitudinais e circunferenciais.
3. Perfuração do orifício de passagem da corda de içamento do rolo compósito para dentro do oco da extremidade dos bambus – corda sintética com 3 mm de diâmetro.

4. Inserção da corda pelo orifício até a extremidade da barra.
5. Medição e corte da quantidade de tecido, de acordo com o diâmetro interno de cada barra.
6. Demão de resina na parte interna das barras a serem conectadas.
7. Embebecimento dos tecidos na resina, retirada do excesso e produção dos rolos compósitos.
8. Conexão das barras dos banzos pelos rolos compósitos, no alinhamento da guia.
9. Após a secagem dos banzos conectados internamente, conexão do pendural e escoras. A bandagem abraça as barras dos banzos no nó, as duas pontas são aproximadas, amarradas à cordinha de içamento que então é puxada de forma que o compósito penetre no oco da extremidade do bambu.
10. Após todas as barras do treliçamento interno estarem conectadas, procede-se à bandagem externa sobre os nós, que tem a finalidade de dar acabamento e também de promover uma conexão externa às barras. O desenho resultante da direção de envolvimento das barras pela bandagem segue o entendimento da distribuição das forças axiais de forma a se tirar o maior proveito da resistência do compósito.

A película da parede interna do bambu também foi retirada utilizando-se um formão e um martelo de borracha Figura 4.8. Este procedimento tem a finalidade de colocar o adesivo em contato direto com fibras do esclerênquima. Mas constatou-se nos experimentos isolados de cisalhamento da cola em compressão, que a técnica de se retirar a película interna com formão estava deformando muito a parede interna, de forma a impedir o bom contato do compósito ao bambu. Os corpos de prova que utilizaram essa técnica deram um péssimo resultado e foram por isso descartados, sendo substituídos por corpos de prova em que se lixou a superfície interna, obtendo-se resultados muito satisfatórios.



Figura 4.8: Retirada da película interna – técnica posteriormente descartada.
(Arquivo pessoal da Autora)

A estrutura é totalmente desenvolvida no plano, através de um esquema em linhas no chão, utilizando-se giz (para quadro negro) e em seguida, fita crepe colada por cima para reforçar o desenho. O Desenho foi realizado respeitando-se as dimensões da Figura 4.9.

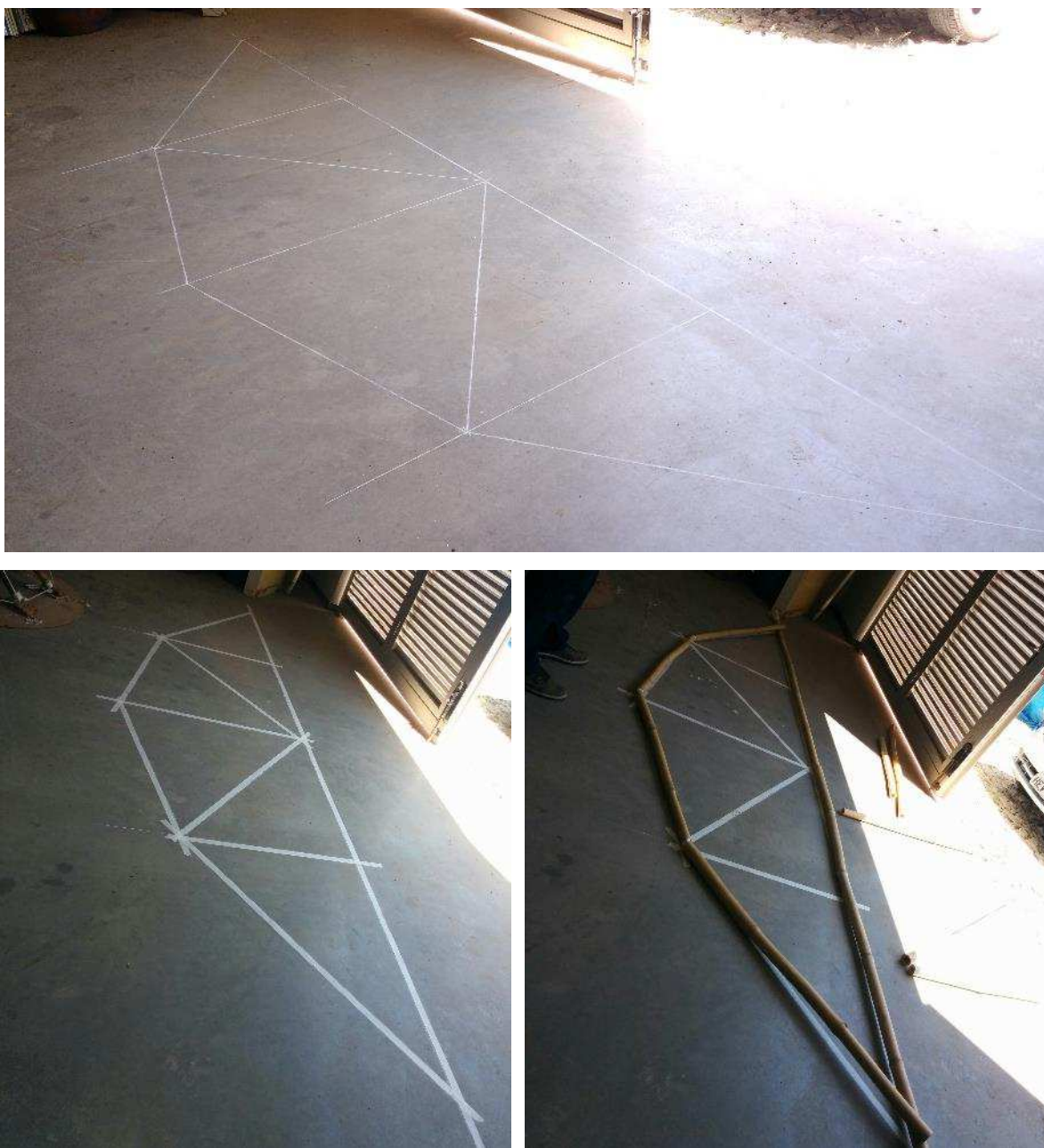


Figura 4.9: Desenho guia para posicionamento das barras.
(Arquivo pessoal da Autora)

Embora o desenho base tenha dimensões fixas as treliças executadas com o mesmo gabarito têm uma liberdade dimensional. Isso facilita bastante a fabricação das treliças e é coerente com a forma relativamente livre das barras de bambu. Por mais que se selecionem as barras, para que tenham o mesmo diâmetro e sejam o quanto possível retilíneas, elas são singulares. Ou seja, o nivelamento de uma cobertura - caso haja algum prejuízo estético que nem sempre poderá acontecer dependendo do tipo de vedação, deve ser feito por meio de espaçadores.

Os tecidos de algodão foram cortados e enrolados até poderem ser colocados ainda secos por dentro dos bambus. Girando-se os rolos, consegue-se penetrá-los com relativa facilidade. A ideia é que se tenha uma pressão do tecido contra a parede interna do bambu. Ao se embeber o tecido e retirar o excesso de resina, o pequeno aumento de volume é compensado pelo deslizamento facilitado pela própria resina, tanto do compósito, quanto da pintura interna da parede do bambu.

Para se trabalhar a resina utilizou-se um tabuleiro onde o tecido era embebido para pintura do bambu. A parede interna de cada extremidade do bambu recebeu uma demão pincelada de resina poliuretana, ao que seguiu de 10 a 15 minutos para molhagem da superfície e penetração do adesivo, o que melhora a reação de colagem, conforme recomendação do fabricante, Figura 4.11.

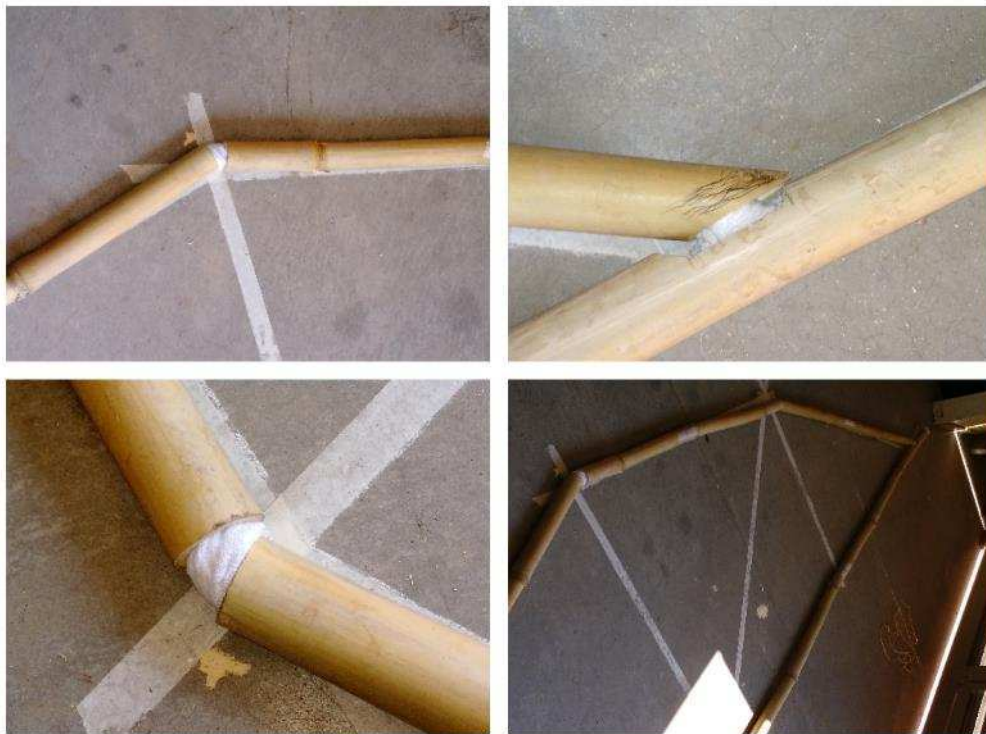


Figura 4.10: Predisposição e dimensionamento dos rolos de tecido.
(Arquivo pessoal da Autora)

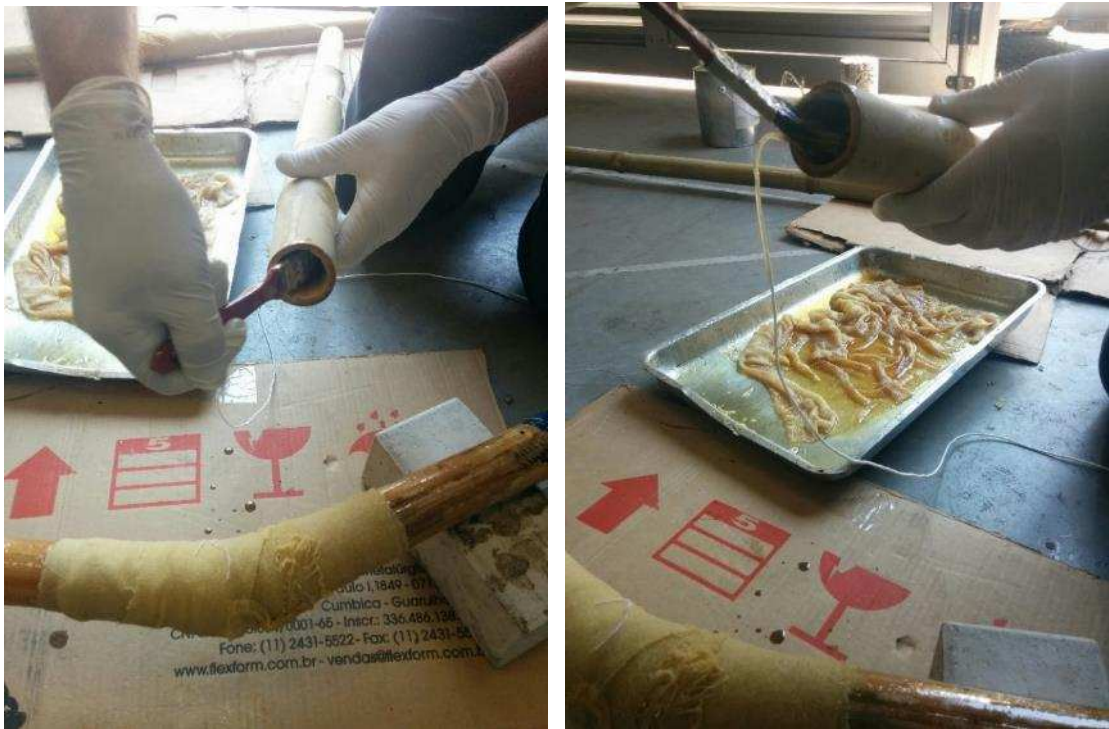


Figura 4.11: Demão de resina na parede interna.
(Arquivo pessoal da Autora)

Na Figura 4.12 pode-se observar a cordinha de içamento para embutimento do compósito no oco da extremidade. Essa cordinha foi inserida em um pequeno orifício realizado com furadeira, inclinado de 45 graus na parede do bambu e na direção da extremidade, para reduzir o atrito da cordinha com a parede e para que se pudesse puxar com facilidade o rolo de compósito para dentro do bambu.

Conforme a Figura 4.12, uma das extremidades da cordinha é passada pelo orifício até o encontro do compósito a quem se amarra. Depois de amarrado, o compósito é puxado para dentro do bambu até a metade quando se tratar de uma emenda, já que a outra metade deverá ser puxada para dentro da outra barra, Figura 4.13.

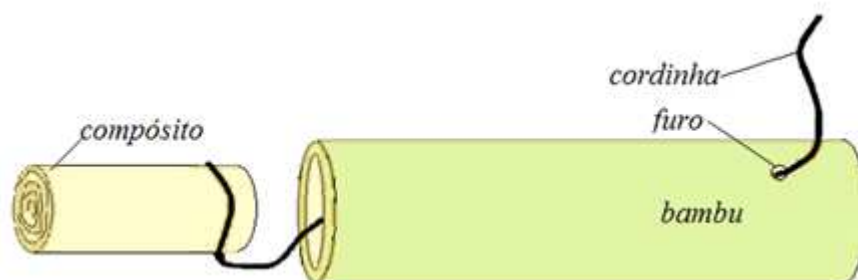


Figura 4.12: Içamento do rolo compósito.
(Arquivo pessoal da Autora)

Conforme dito anteriormente, primeiramente realizou-se a colagem dos banzos, Figura 4.14. Blocos de concreto mantiveram o contorno em posição sobre a guia, até a secagem do compósito.

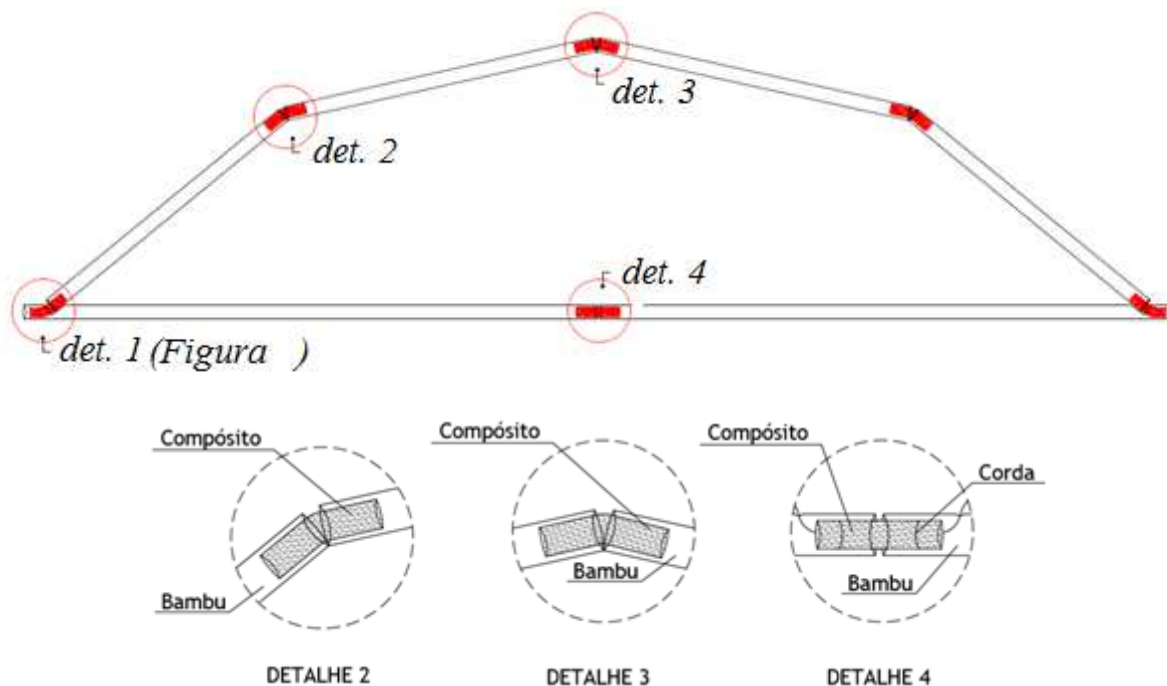


Figura 4.13: Detalhes das ligações internas dos banzos.
(Arquivo pessoal da Autora)

Na Figura 5.14 tem-se a estrutura alinhada com a guia e em processo de secagem dos banzos, com a bioconexão já terminada para os banzos.



Figura 4.14: Bandagens de ligação externa dos banzos.
(Arquivo pessoal da Autora)

A última etapa do processo de fabricação da estrutura foi a conexão das barras internas da treliça. Essas conexões seguem os mesmos conceitos, utilizando o compósito embutido para dentro do bambu através da corda e do orifício.

Fixou-se primeiramente o pendural. As cordinhas de içamento, nas duas extremidades, foram tracionadas entre si, de forma que o pendural ficou comprimido com uma força estruturalmente desprezável, mas necessária para manter o pendural perfeitamente ajustado.

Depois de embeber o tecido na resina, retirou-se o excesso e ao invés de fazer um “rolinho” do compósito, este foi “abraçado” na ligação do detalhe 3 e 4 na Figura 4.13, e em seguida puxado para dentro do bambu, Figura 4.16. Sempre que se foi realizar uma nova bandagem sobre uma outra pré existente, procedeu-se a um lixamento da bandagem de base e uma pintura prévia com a resina. As resinas não são dadas a colagens sobre elas mesmas depois do substrato estar seco.



Figura 4.15: Tracionamento das cordinhas de içamento opostas – compressão do pendural.
(Arquivo pessoal da Autora)

Analogamente foram fixadas as diagonais, conforme sequência da Figura 4.17. Finalmente, todas as ligações receberam uma bandagem externa de acabamento e reforço.



Figura 4.16: Conexão das barras internas.
(Arquivo pessoal da Autora)

A conexão das diagonais com o banzo inferior também partiu do mesmo princípio, conforme mostra a Figura 4.17.



Figura 4.17: Conexão das diagonais.
(Arquivo pessoal da Autora)

Da fixação das diagonais com o banzo inferior, percebe-se ter um aspecto estético desagradável durante a execução. Somente depois de receber uma bandagem externa apertada a conexão ganha uma nova aparência, além de se completar em termos mecânicos.

Tem-se finalmente a estrutura completa em secagem, com as bandagens externas completando as ligações e dando acabamento, Figura 4.18.



Figura 4.18: Secagem das bandagens e ligações das diagonais.
(Arquivo pessoal da Autora)

A composição final da treliça, desta vez pintada em azul, Figura 4.19. São 11,76 m de barras com um peso total de 8,9 *kgf* em bambu e 6 *kgf* de compósitos, resultando em 14,9 *kgf*, com um consumo de 4 *kgf* de resina PU.



Figura 4.19: Composição final - Protótipo 2.
(Arquivo pessoal da Autora)

Já mais confiante na técnica, devido ao ensaio do primeiro protótipo, diminuem-se as expectativas, que se concentram agora principalmente no funcionamento das ligações agora tracionadas, tanto do banzo inferior, interrompido e interligado no centro, quanto das diagonais.

Capítulo 5

EXPERIMENTOS E ANÁLISE DOS PROTÓTIPOS I e II

Os experimentos mecânicos dos protótipos foram realizados no Laboratório de Análise Experimental de Estruturas (LAEES) da Escola de Engenharia de Estruturas da UFMG, utilizando um pórtico de reação, com um sistema de aplicação de carga manual.

O sistema de aplicação de carga é composto por: unidade de atuação hidráulica, mangueiras de transmissão e cilindro hidráulico. A unidade de atuação, também conhecida como bomba, fornece óleo sob pressão para o cilindro hidráulico por meio das mangueiras. Neste instrumento, uma pessoa assume o posto de controlador e bombeia o óleo sob pressão para o cilindro hidráulico manipulando uma barra. Esta aplicação da força no cilindro faz com que o êmbolo se desloque para assim transmitir a força ao elemento receptor.

4.1. Teste e Análise do Protótipo I

Por uma questão didática a análise dos resultados será feita logo em seguida aos experimentos. O primeiro protótipo é uma treliça, que tem o uso mais comum em telhados, Figura 5.1. O protótipo tem 3,12 m de vão livre e 0,78 m de altura.

Teste Mecânico

Foram utilizados dois blocos de concreto, servindo de base para os apoios da Tesoura – rotulado fixo de um lado e rotulado móvel de outro – e cordas para contraventamento da estrutura, Figuras 5.1 e 5.2.



Figura 5.1: Protótipo 1 (Tesoura) no local de ensaio.
(Arquivo pessoal da Autora)

Além dos bambus trabalharem em flexo-compressão ou flexo-tração devido ao desvio do eixo retilíneo e possíveis excentricidades de aplicação das forças nas excentricidades das barras, o diâmetro não é um círculo perfeito, variando em valor e geometria ao longo do comprimento da barra; e do mesmo modo, a espessura de parede, que diminui da base para o topo dos bambus, varia também ao longo da seção transversal em cada seção transversal. Isso faz com que a colocação de extensômetros elétricos seja de pouca utilidade nos experimentos de estruturas deste tipo, pois dificilmente teríamos condições de checar os valores encontrados.

Deste modo, a instrumentação consiste apenas em um anel dinamométrico para medição da carga aplicada no topo do pendural e um transdutor de deslocamentos (DT) para medição dos deslocamentos verticais máximos da estrutura, medidos através do deslocamento vertical de uma chapa de aço fixada no terço superior do pendural. O sistema de travamento com cabos simula bem a condição real de trabalho, onde os contraventamentos podem ser feitos de cabos sintéticos, barras ou cabos de aço, desde que se previna a relaxação, Figura 5.2.



Figura 5.2: Instrumentação do Protótipo I.
(Arquivo pessoal da Autora)

Um experimento deste tipo é sempre um evento, um fato que requer testemunhas. Os fatos somente são fatos se partilhados e haja um consenso entre a plateia sobre a leitura do fato observado. Diferentes leituras de um mesmo fato seria um contrassenso. Neste experimento estavam presentes o Prof. Francisco Carlos Rodrigues que colaborou na montagem e instrumentação do experimento, além de ter gentilmente operado a aplicação de carga; o Prof. Luís Eustáquio Moreira que fez a leitura das cargas aplicadas e a autora do trabalho para observação dos deslocamentos do DT, obtidos online para cada passo de carga, bem como do funcionamento geral da estrutura enquanto recebia carregamento. A documentação em fotografia requeria mais um participante, porém foi feita pelos próprios operadores. O ensaio foi dividido em passos de carga e descarga onde um passo é igual a 89 kgf, conforme calibração do relógio comparador que registra a carga a partir das deformações do anel dinamométrico. A Tabela 5.1 mostra os resultados de carga aplicada versus deslocamentos verticais.

Tabela 5.1: Resultados de Cargas versus Deslocamentos para o Protótipo I

Carga (kN)	0	0,89	2,05	2,67	3,65	2,67	1,69
Desloc. (mm)	0	0,86	2,01	2,73	3,72	3,04	2,21
Carga (kN)	0,89	0	1,82	3,56	4,45	5,38	6,23
Desloc. (mm)	1,52	0	2,3	3,88	4,76	5,93	7,24
Carga (kN)	4,31	2,67	0,89	0	1,78	3,65	5,34
Desloc. (mm)	5,87	4,67	2,81	1,75	3,37	5,08	6,58
Carga (kN)	7,12	8,9	5,25	2,85	1,78	0	1,78
Desloc. (mm)	8,19	10,58	8,68	6,71	5,4	3,2	4,65
Carga (kN)	3,78	5,43	7,12	8,9	11,21	10,68	
Desloc. (mm)	6,57	8,08	9,74	11,52	16,04	23,9	

A carga limite de 11,21 *kN* foi definida pela ruptura do banzo inferior. Na Figura 5.3 tem-se a ruptura simultânea da bandagem por consequência da ruptura do banzo inferior. O banzo superior começou a flambar lateralmente, perpendicularmente ao plano da tesoura, para uma carga de 9,5 *kN*.



Figura 5.3: Ruptura da bandagem compósita por consequência da ruptura do banzo inferior.
(Arquivo pessoal da Autora)

Análise dos Resultados

Na Figura 5.4 tem-se os resultados experimentais dos ciclos de carga e descarga do Protótipo1, e nas Figuras 5.5 a 5.7, os ciclos dados isoladamente. Observa-se que a relação carga-deslocamento é aproximadamente linear em todos carregamentos dos ciclos, com um pequeno deslocamento permanente nas ligações, no final do segundo ciclo, que faz cair o coeficiente de rigidez da estrutura, de $0,98 \frac{kN}{mm}$ para $0,89 \frac{kN}{mm}$.

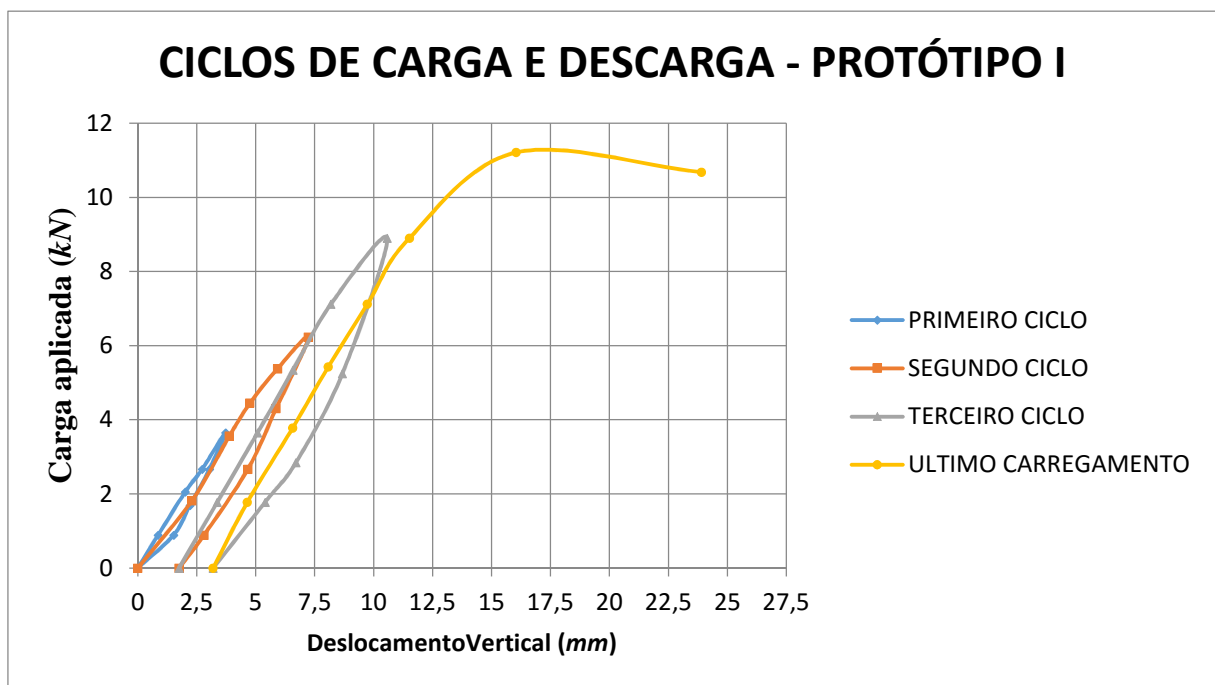


Figura 5.4: Ciclos de Carga e Descarga do Protótipo 1.

A perda de energia registrada no primeiro ciclo, Figura 5.5 deve-se muito provavelmente à relaxação por cisalhamento dos bambus flexo-comprimidos. Conforme constatado também em Silva (2014), os bambus comprimidos relaxam por cisalhamento. As tensões de cisalhamento deformariam as células relativamente grandes e ocas do parênquima, tecido poroso que envolve as fibras mais resistentes, num tempo relativamente curto.

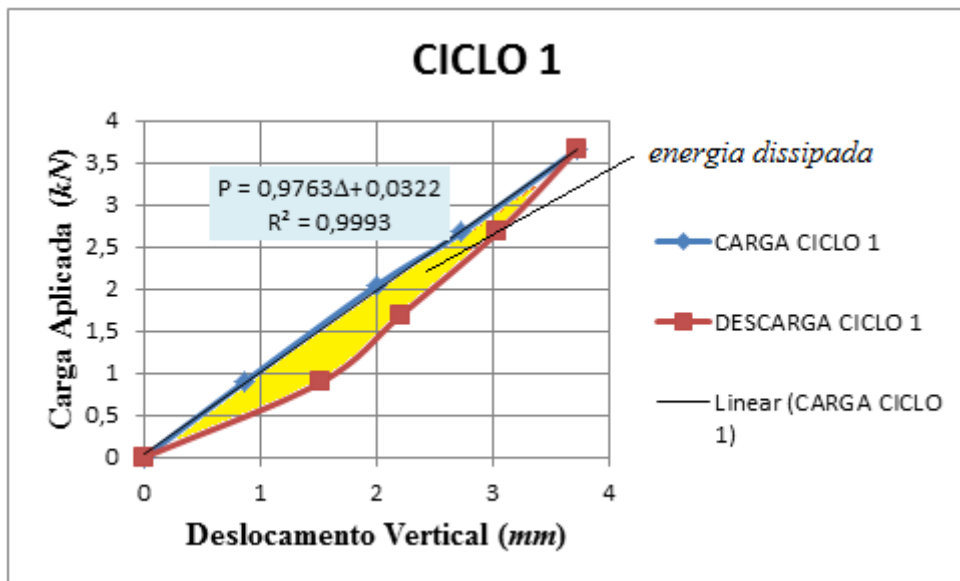


Figura 5.5: Ciclo 1.

O segundo ciclo registra um deslocamento residual de 1,75 mm. Parte da energia dissipada deve-se ao deslocamento permanente da estrutura e parte à relaxação dos bambus e das conexões.

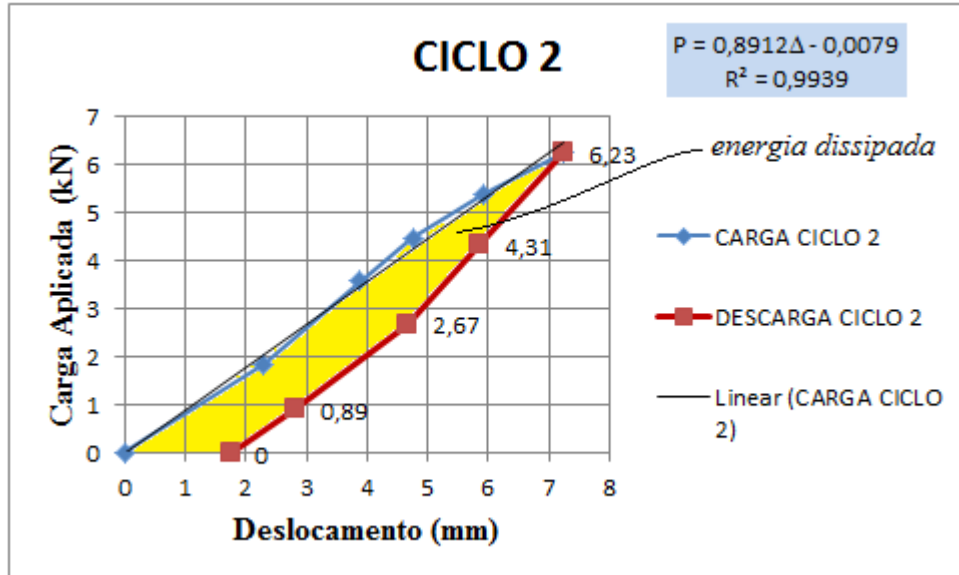


Figura 5.6: Ciclo 2.

Percebe-se no ciclo 3, Figura 5.7, que após as acomodações dos nós da estrutura, ela adquire um pouco mais de rigidez, agora com a constante de mola $1 \frac{kN}{mm}$. Registra-se novamente um aumento do deslocamento residual, ou seja, a estrutura acomoda-se um pouco mais nas ligações, passando para um deslocamento residual de 3,2 mm. Novamente, a energia

consumida no processo deve-se principalmente ao aumento do deslocamento permanente de 1,75 mm para 3,2 mm e parte à relaxação da estrutura. Consta-se com isso um aumento de rigidez da estrutura em 4%, com a passagem da constante de mola, de 1 para $1,04 \frac{kN}{mm}$, Figura 5.8.

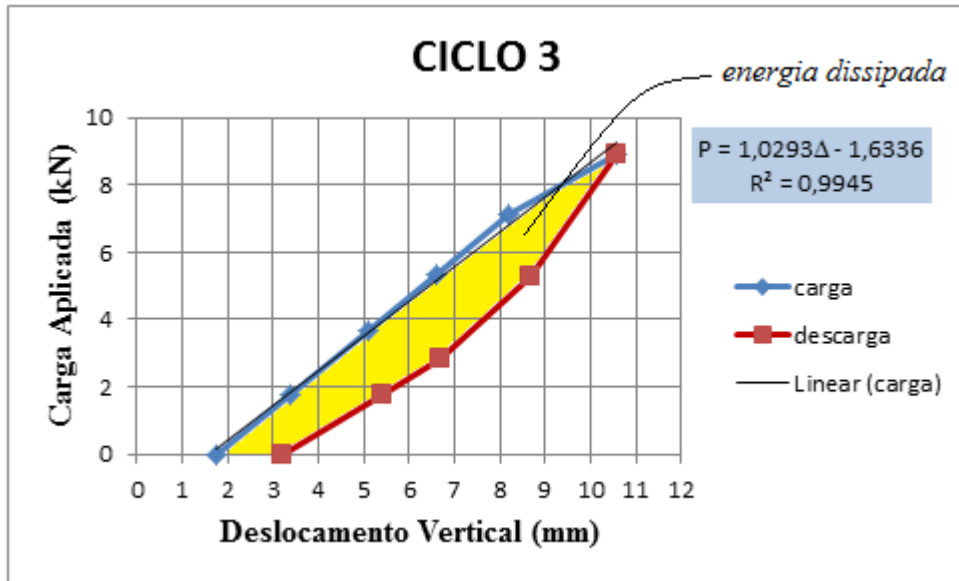


Figura 5.7: Ciclo 3.

A reta inicial do último carregamento está apresentada na Figura 5.8.

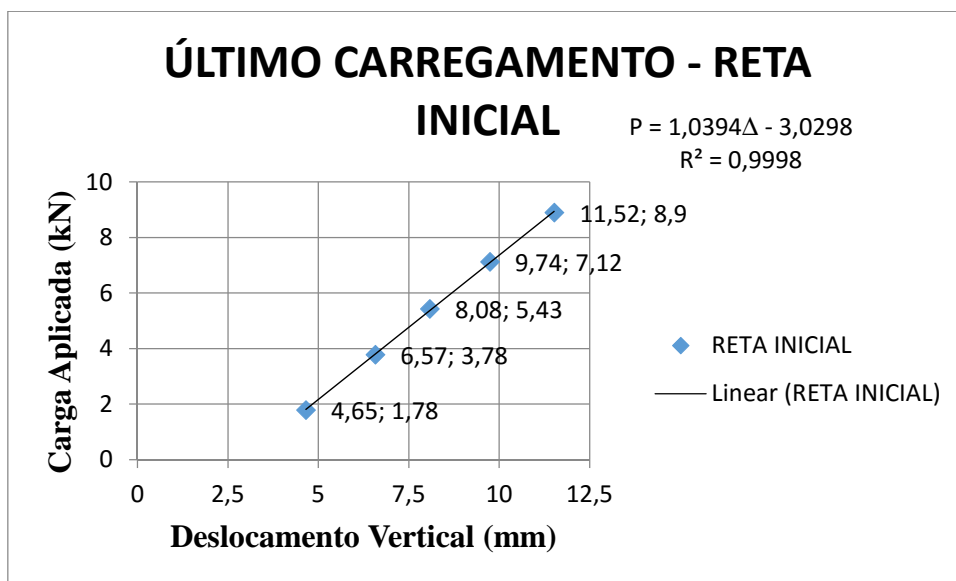


Figura 5.8: Último Carregamento – Reta Inicial.

Constata-se então dos experimentos que a estrutura comportou-se linearmente em todos os carregamentos, com uma constante de mola médio $k = 0,98 \frac{kN}{mm}$. Ou seja, embora o compósito das ligações seja elástico não linear, como uma borracha, essa não linearidade não se fez sentir na curva carga \times deslocamento, embora tenha tornado a estrutura mais flexível, como se constatou da modelagem numérica que se segue.

- **Modelagem Numérica**

Através do SAP 2000 v14, a estrutura foi modelada com elementos de barra reta - pipe, com diâmetro médio $\bar{D} = 4,5 \text{ cm}$ e espessura média de parede $\bar{t} = 6 \text{ mm}$. Os efeitos dos enchimentos compósitos nos nós da estrutura foram considerados na extremidade de cada elemento, com um comprimento Δl onde se tem o módulo de elasticidade do compósito, seja em tração, seja em compressão, conforme a barra esteja tracionada ou comprimida, respectivamente, Figura 5.9. Para os bambus comprimidos considerou-se $E_c = 15885 \text{ MPa}$ e para os bambus tracionados $E_t = 20658 \text{ MPa}$, contra $E_c = 16854 \text{ MPa}$ e $E_t = 21.059 \text{ MPa}$, respectivamente, valores médios obtidos experimentalmente. Para o material compósito tem-se $E_{cc} = 343 \text{ MPa}$ e $E_{tc} = 841 \text{ MPa}$.

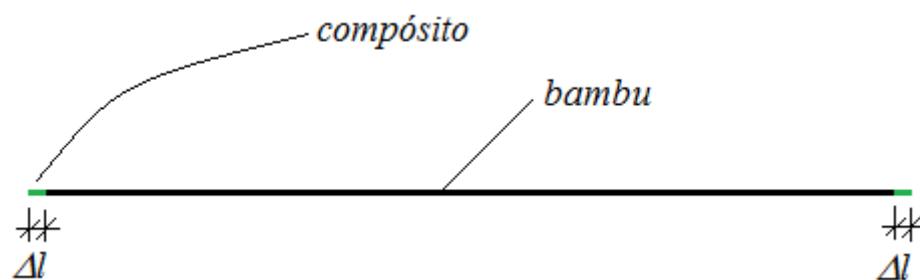


Figura 5.9: Elemento finito tipo para treliças de nós compósitos.
(Arquivo pessoal da Autora)

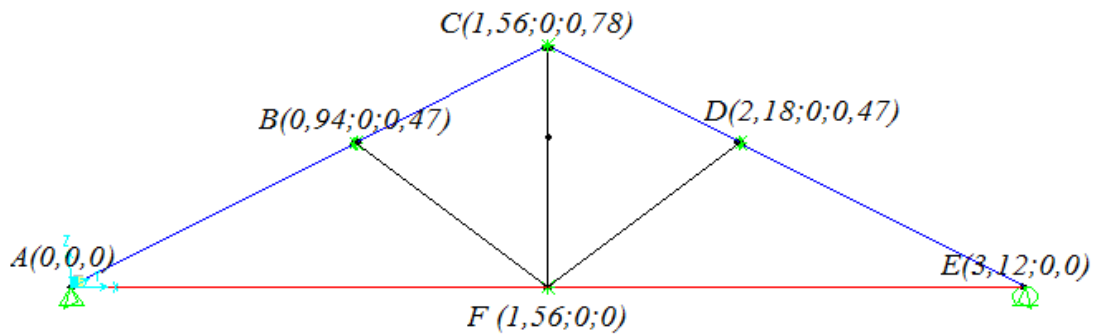


Figura 5.10: Coordenadas Nodais.
(SAP 2000)

Os nós B, C e D foram travados perpendicularmente à estrutura, para diminuir os comprimentos livres de flambagem. Em C, embora haja atrito com a rótula do atuador, faz-se importante o travamento, para não forçar horizontalmente a cabeça do atuador, pela flambagem do banzo superior, perpendicularmente ao plano da tesoura. Em F, embora o pendural não esteja comprimido, o travamento auxilia na estabilidade do sistema.

Na Figura 5.11 compara-se as curvas carga versus deslocamento experimentais com 2 diferentes modelagens: - uma que considera toda a estrutura com nós rígidos, onde se teriam apenas bambus e outra, mais fiel ao protótipo, com o elemento de barra proposto, que tem nas extremidades a influência do nó composto, conforme Figura 5.9, onde considerou-se módulo de elasticidade do compósito à compressão $E_{cc} = 343 \text{ MPa}$ e $\Delta l = 8,6 \text{ mm}$ por tentativa para que houvesse coincidência das constantes de mola do modelo numérico com os resultados experimentais do protótipo. O protótipo apresentou um deslocamento residual de $2,9 \text{ mm}$, correspondente a acomodações da estrutura nos nós, o que obviamente não foi considerado nas modelagens numéricas, o que faz com que as retas fiquem paralelas mas não coincidentes.

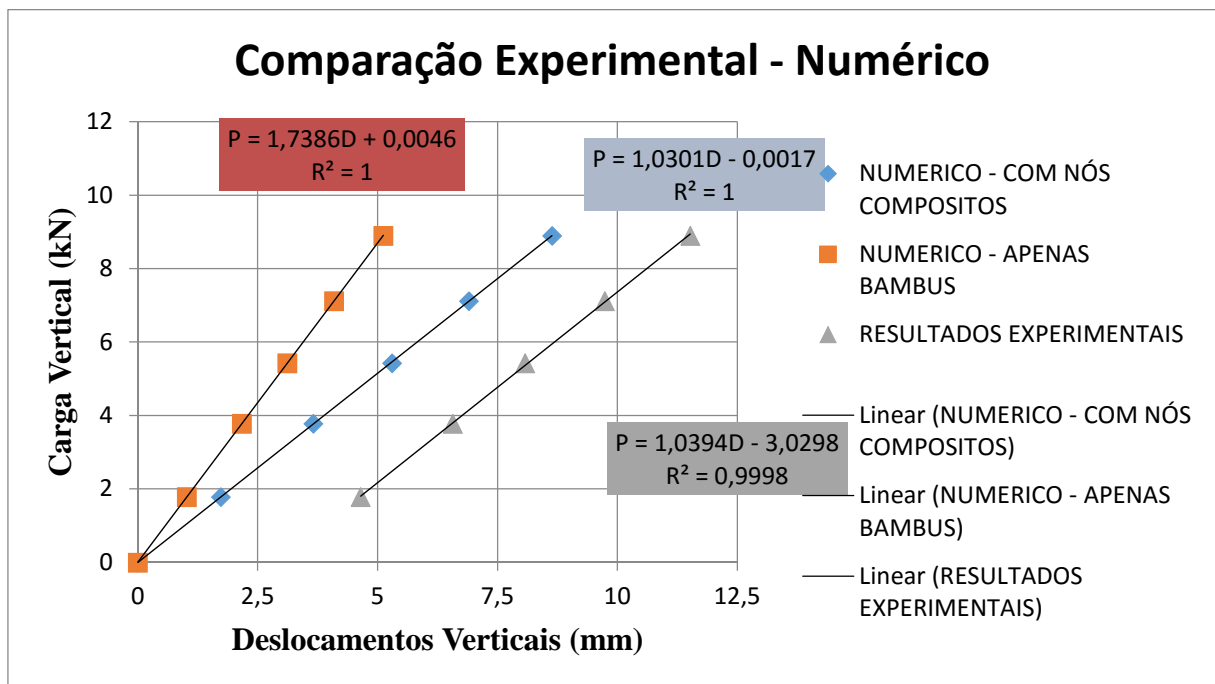


Figura 5.11: Comparação das Retas Carga × Deslocamento Experimental e Numéricas.

Na prática, o controle desse acréscimo Δl é relativamente difícil, já que a fabricação do nó é artesanal. Estabelecemos então que o compósito deverá preencher no máximo uma distância livre de 1,5 cm, entre dois bambus que estejam sendo unidos. De preferência deve-se trabalhar a estrutura de forma que todos os elementos se toquem antes da realização da bandagem compósita. Como já dito o que torna essa solução interessante é o fato de não se trabalhar com encaixes precisos. Uma das características de nossa técnica de fabricação é que se dê aos encontros das barras a mesma liberdade formal (geométrica) que tem o próprio bambu e estabelecer o funcionamento da estrutura com essa premissa. Desse modo, ainda que a estrutura seja artesanal, pode prescindir de mão de obra artesã, podendo ser realizada com facilidade por quem simplesmente goste de fazer coisas. De qualquer modo, um encaixe preciso nas estruturas de bambu é uma ilusão em termos de engenharia, pois folgas relativamente elevadas nesses encaixes são inevitáveis, assim como não se tem como prever qual a área de contato entre as barras, como se prevê em perfis metálicos e mesmo em peças de madeira serrada ou laminada colada. Estabelecemos então que o compósito dê um acréscimo de comprimento ao final da barra igual a $0,5\text{ cm} \leq \Delta l \leq 1,5\text{ cm}$. Quanto maior a precisão da fabricação, menor o Δl .

Chama-se a atenção para a constatação de que se obteve por simulação a mesma reta de carga versus deslocamento que o experimento, ao se levar em conta a presença do compósito na

extremidade da barra, ou seja, o fato do compósito ter uma curva tensão deformação elástica não linear, não afetou o resultado linear para os níveis de carga e tensão atingidos, apenas tornou a estrutura mais flexível. A constante de rigidez caiu de 1,74 para $1,03 \frac{kN}{mm}$.

O protótipo apresentou um deslocamento residual de 2,9 mm, correspondente a acomodações da estrutura nos nós, razão porque as retas da simulação e do experimento não coincidiram, embora tenham ficado paralelas.

A força máxima aplicada em C, desce pelo banzo superior e traciona o banzo inferior – estrutura isostática –, conforme Figura 5.12.

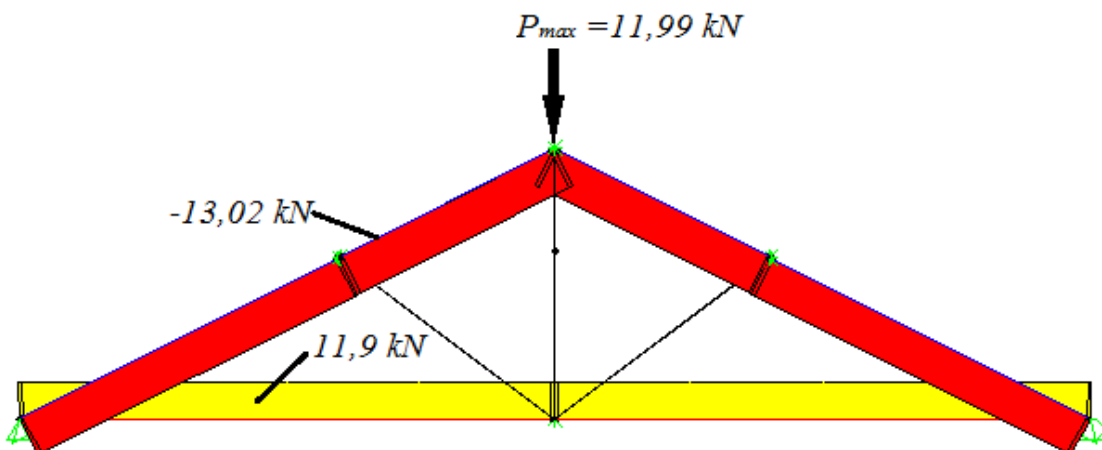


Figura 5.12: Diagrama de forças axiais.
(SAP 2000)

- **Estimando-se as tensões máximas no banzo superior AB (Fig. 5.10)**

Para todas as barras, tem-se momento de inércia $I = 14,31 \text{ cm}^4$ e área $A = 7,35 \text{ cm}^2$. A barra AB tem comprimento destravado $l_0 = 103 \text{ cm}$. Tem-se então,

Raio de giração:

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} = 1,39 \text{ cm} \quad (5.1)$$

Esbeltez (Moreira, 1998):

$$\lambda = \frac{l_0}{i} = 74 \rightarrow \text{peça esbelta} \quad (5.2)$$

Para $E_c = 16283 \text{ MPa}$ tem-se uma carga de Euler:

$$F_E = \frac{\pi^2 E_c I}{l_0^2} = 22,5 \text{ kN} \quad (5.3)$$

Coefficiente de fluência - conforme Silva (2014):

$$\phi = 2,5455 \frac{P_{max}}{F_E} = 1,47 \quad (5.4)$$

Imperfeição accidental:

$$e_a = \frac{l_0}{200} = 0,52 \text{ cm} \quad (5.5)$$

Imperfeição devida à fluência:

$$e_c = \phi e_a = 0,76 \text{ cm} \quad (5.6)$$

Tensão máxima de compressão:

$$\sigma_c = \frac{P_{max}}{A} + \frac{P_{max}(e_a + e_c)\bar{D}}{2I\left(1 - \frac{P_{max}}{F_E}\right)} = 1,77 + 6,22 = 8,0 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = 80 \text{ MPa}. \quad (5.7)$$

Esse nível de tensões de compressão bastante elevado acena para o esmagamento das fibras sob compressão. Infelizmente não se teve como constatar o limite de resistência em compressão para esta espécie de bambus, por limitações da máquina EMIC DL 3000 que somente pode aplicar cargas até 30 kN. Como na tração esses bambus apresentaram tensões de ruptura de 221 MPa, Tabela 3.6, provavelmente podem suportar até 100 MPa em compressão.

- ***O que teria causado a ruptura da ligação***

As tensões de cisalhamento paralelo na parede do bambu, no local da ligação, caso os bambus não estivessem reforçados pelo compósito, para uma folga $f = 20 \text{ cm}$ e para uma espessura de parede $\bar{t} = 6 \text{ mm}$ seriam:

$$\bar{\tau} = \frac{T}{2\bar{t}f} = \frac{11,9}{2 \times 0,6 \times 20} = 0,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = 5 \text{ MPa} < 8,7 \text{ MPa} \text{ (Tabela 3.4)} \quad (5.8)$$

De Moreira & Ghavami (2012) sabe-se que as tensões elásticas máximas de cisalhamento ocorrem na ponta do entalhe, não se distribuindo uniformemente como considerado e pode atingir valores 2 a 3 vezes maiores que o valor médio, antes que a trinca se propague, devido à tenacidade do bambu. Além disso, o entalhe do banzo inferior estava também reforçado pelo

compósito, tanto externamente quanto internamente, o que garante que a ruptura não ocorreu por cisalhamento da extremidade, Figura 5.13.



a) reforço externo; b) reforço interno.
(Arquivo pessoal da Autora)

Acontece que o sistema de apoio do nó A estava posicionado conforme mostrado na Figura 5.14. Deste modo, o braço de alavanca b introduziu um momento fletor $M = F_c b$ cujas tensões de flexão romperam o bambu do banzo inferior, que já estava enfraquecido pelo entalhe. Além disso constatou-se após a ruptura, que este bambu estava atacado por fungos - coloração acinzentada por dentro do tecido do bambu-, o que significa que as micelas dos fungos penetraram pelo tecido, reduzindo a resistência local do material.

As imperfeições geométricas dos bambus e também o fato dos segmentos terem diâmetro e espessura de parede diferentes entre si, faz com que não se consiga um perfeito acoplamento dos elementos no entalhe, conforme indicado teoricamente na Figura 5.14. Essas diferenças entre a teoria e os fatos somente se constatam na tentativa de fabricar a estrutura. Por isso pode-se dizer que parte da força de compressão do banzo superior comprime também o compósito na região nodal.

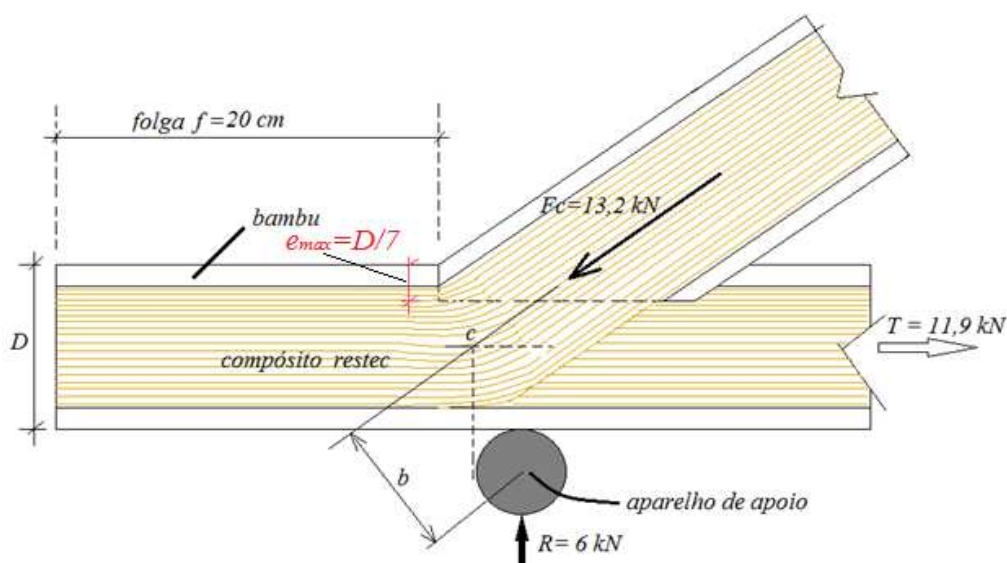


Figura 5.14: Detalhamento do nó A.
(Arquivo pessoal da Autora)

O posicionamento do apoio cilíndrico conforme realizado no ensaio, Figura 5.14, foi de grande importância pois demonstrou o enfraquecimento provocado pelo entalhe, aos momentos fletores localizados oriundos da excentricidade das forças, razão pela qual seguem-se as recomendações:

✓ Para evitar enfraquecimento do banzo inferior sob momentos localizados, recomenda-se que o dente máximo seja pouco maior que a espessura de parede do bambu t , valor que fica da ordem de $\frac{D}{7}$ onde D é o diâmetro externo da extremidade investigada. Em estruturas de madeira a profundidade máxima do dente é igual à $\frac{1}{4}$ da altura da peça.

✓ O centro do aparelho de apoio deve coincidir verticalmente com o ponto C, na linha de ação das forças.

✓ O aparelho de apoio deve conter um sulco circular onde o banzo inferior se encaixe, envolvido por uma borracha resistente, para melhor distribuição das tensões de compressão devidas à reação de apoio R , que amassa os bambus, Figura 5.15. Sobre tensões de amassamento, ver Moreira & Ribeiro (2013).

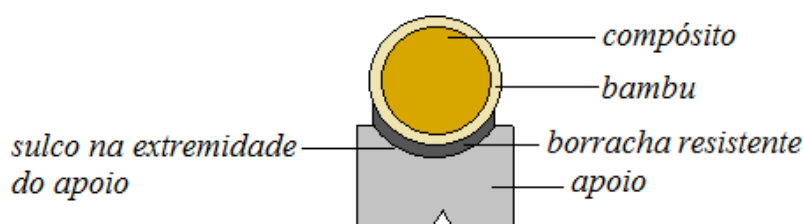


Figura 5.15: Aparelho de apoio recomendado.
(Arquivo pessoal da Autora)

4.2. Teste e Análise do Protótipo II

O segundo protótipo também foi ensaiado no LAEES, seguindo o mesmo projeto do experimento do Protótipo 1, com a diferença de que neste caso os deslocamentos verticais foram registrados através de um relógio comparador (RC), Figura 5.16. Da mesma forma, os deslocamentos foram tomados a partir de uma chapa de aço fixa no terço superior do pendural da estrutura.



Figura 5.16: Projeto do Experimento do Protótipo II.
(Arquivo pessoal da Autora)

Estavam presentes ao ensaio, o técnico do laboratório Afonso, que fez a aplicação das cargas, o Prof. Luís Eustáquio que fez a leitura do anel dinamométrico, a autora da dissertação que fez a leitura e registro das cargas e deslocamentos; bem como o Prof. Khosrow Ghavami, que coincidentemente visitava o laboratório naquele dia.

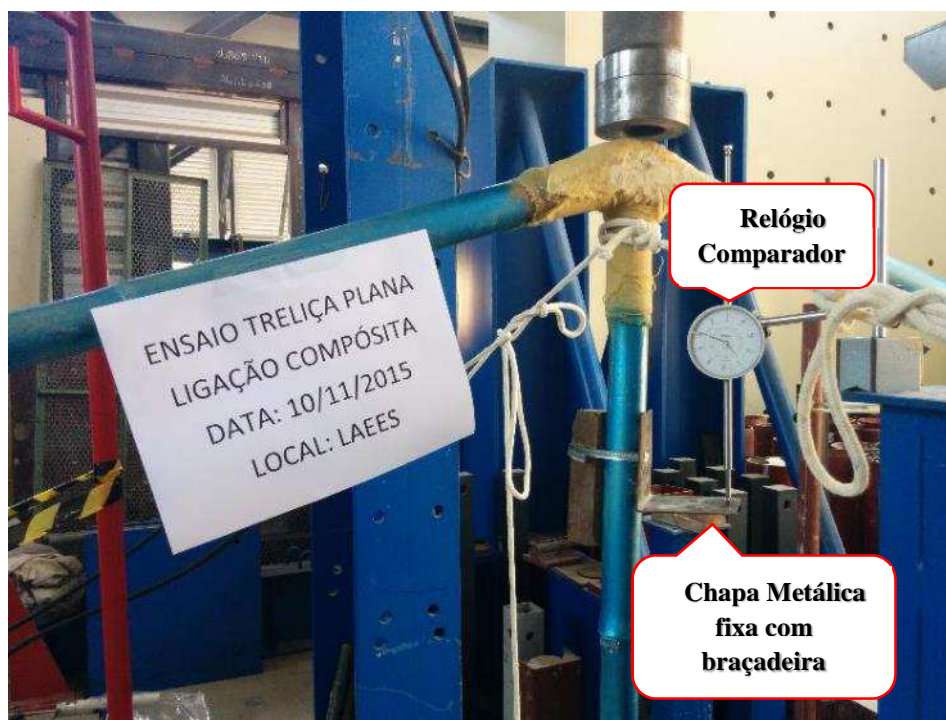


Figura 5.17: Posicionamento do relógio comparador (R.C).
(Arquivo pessoal da Autora)

Os passos de carga e descarga da estrutura, bem como os deslocamentos correspondentes estão registrados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Resultados de Carga Aplicada versus Deslocamento – Protótipo II.

Carga Aplic. (kN)	0	0,89	1,78	2,67	3,56	5,34	2,58	0,18	1,78
Desloc. (mm)	0	0,74	1,37	2,1	2,8	4,5	2,2	0,42	1,72
Carga Aplic. (kN)	2,67	3,56	4,45	5,43	6,23	7,12	5,34	3,56	1,78
Desloc. (mm)	2,34	2,96	3,52	4,2	4,81	5,47	4,44	3,26	1,9
Carga Aplic. (kN)	1,02	2,67	3,56	5,34	7,12	5,79	2,67	0,89	2,67
Desloc. (mm)	1,17	2,58	3,31	5,31	7,58	4,9	2,66	1,08	2,71
Carga Aplic. (kN)	4,45	6,23	7,21	8,01	8,9	9,79	10,98	11,57	8,9
Desloc. (mm)	3,85	5,03	5,79	6,28	7	7,79	8,57	8,45	7,7
Carga Aplic. (kN)	6,32	3,56	0,98	2,67	4,45	6,23	9,79	11,57	12,46
Desloc. (mm)	6,1	4,3	2,14	3,36	4,53	5,7	8,34	9,7	10,46
Carga Aplic. (kN)	13,35	14,24	15,13	16,02	16,91	-	-	-	-
Desloc. (mm)	11,27	12,11	13,03	14,41	15,50	-	-	-	-

Análise dos Resultados

Neste experimento não houve ruptura de nenhum elemento da treliça. A carga limite de $16,91kN$, com $15,5$ mm de deslocamento vertical, foi definida pela flambagem lateral do banzo superior. O banzo superior comprimido foi aumentando a força de tração nos cabos do travamento à medida que se aumentava a carga aplicada. Como os cabos estavam presos no topo de tubos de aço engastados no pórtico de reação, os tubos ficaram submetidos à flexão, em balanço, e admitiram deslocamentos no topo, permitindo que o banzo superior flambasse lateralmente, perpendicularmente ao plano da estrutura. A estrutura girou em torno de um eixo vertical que passa pelo pendural. Após a retirada da carga a estrutura curiosamente voltou à configuração inicial. Sendo ensaiada novamente, apresentou o mesmo comportamento. Ou seja, as bioconexões apresentaram comportamento flexível e elástico, sem nenhum dano aparente. Do mesmo modo, as barras não sofreram nenhum dano na carga limite, Figura 5.18.



Figura 5.18: Flambagem lateral do banzo superior.
(Arquivo pessoal da Autora)

Dividindo-se a carga limite da estrutura pelo peso próprio tem-se o que se pode denominar valor estrutural $VE = 16,91/0,149 = 113,5$. Um valor estrutural bastante elevado se comparado à mesma estrutura feita de aço ou madeira, devido à alta resistência do bambu, ao baixo peso específico, devido à seção transversal tubular e devido à anatomia aerada vista microscopicamente, onde se tem 50 % da seção transversal formada de células porosas do parênquima e por vasos condutores de seiva. Pode-se dizer que 50 % da seção transversal anelar do bambu são vazios.

Na Figura 5.19 tem-se as curvas de Carga versus Deslocamentos verticais para o Protótipo II.

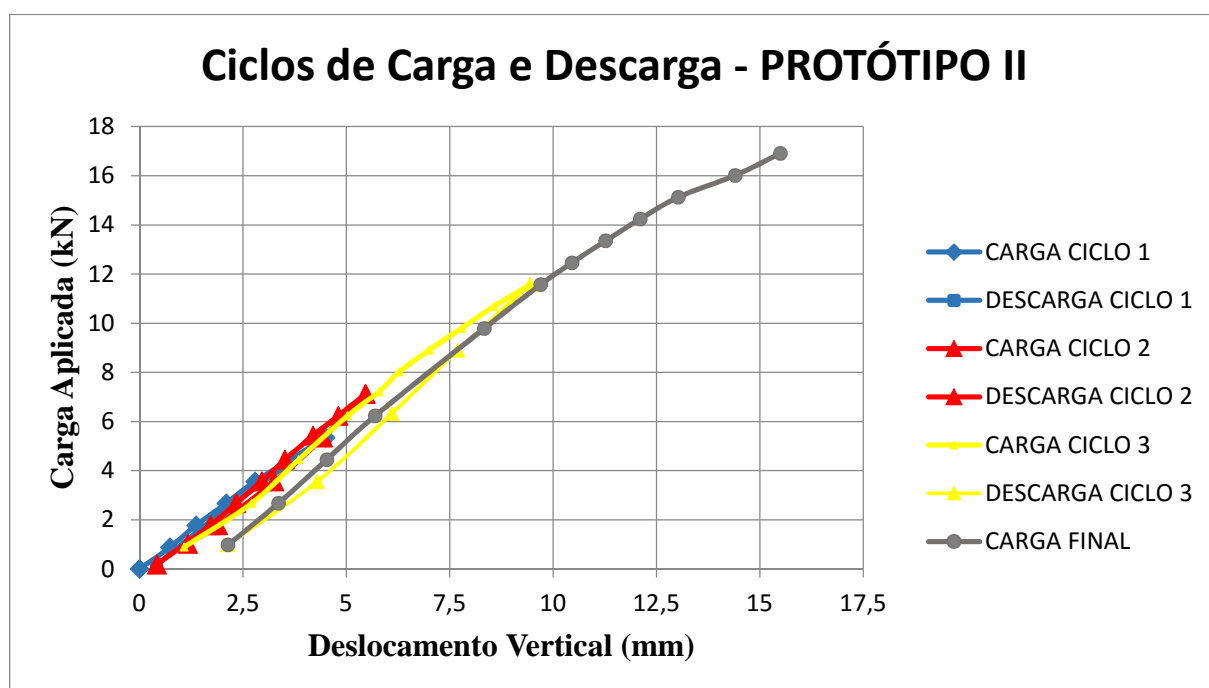


Figura 5.19: Curvas Carga \times Deslocamento Vertical.

No Ciclo 01, Figura 5.20, a perda de energia indicada parece estar relacionada principalmente ao deslocamento residual de 0,3 mm e em menor parte à relaxação do bambu e ligações. Constata-se que esta acomodação do primeiro ciclo faz com que a estrutura enrijeça, passando de um coeficiente de rigidez $1,2$ para $1,4 \frac{kN}{mm}$.

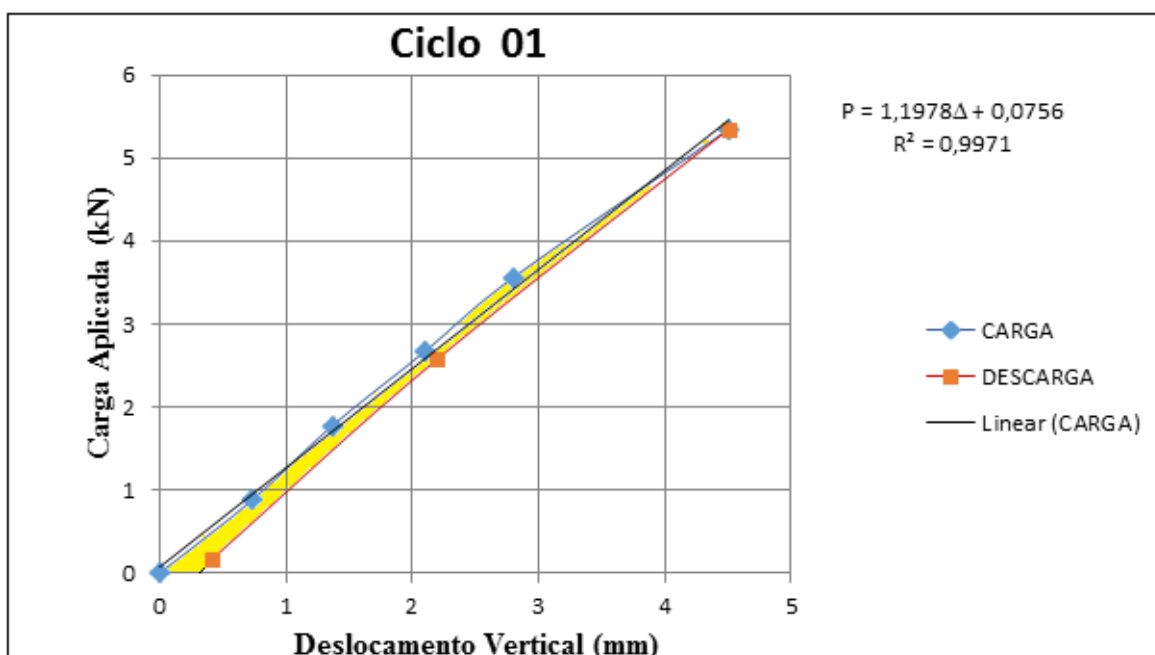


Figura 5.20: Ciclo 1.

A perda de energia do segundo ciclo parece estar realmente associada somente à relaxação elástica dos materiais, uma vez que não se registra nenhum deslocamento residual, nenhuma acomodação, embora o nível de carga tenha subido.

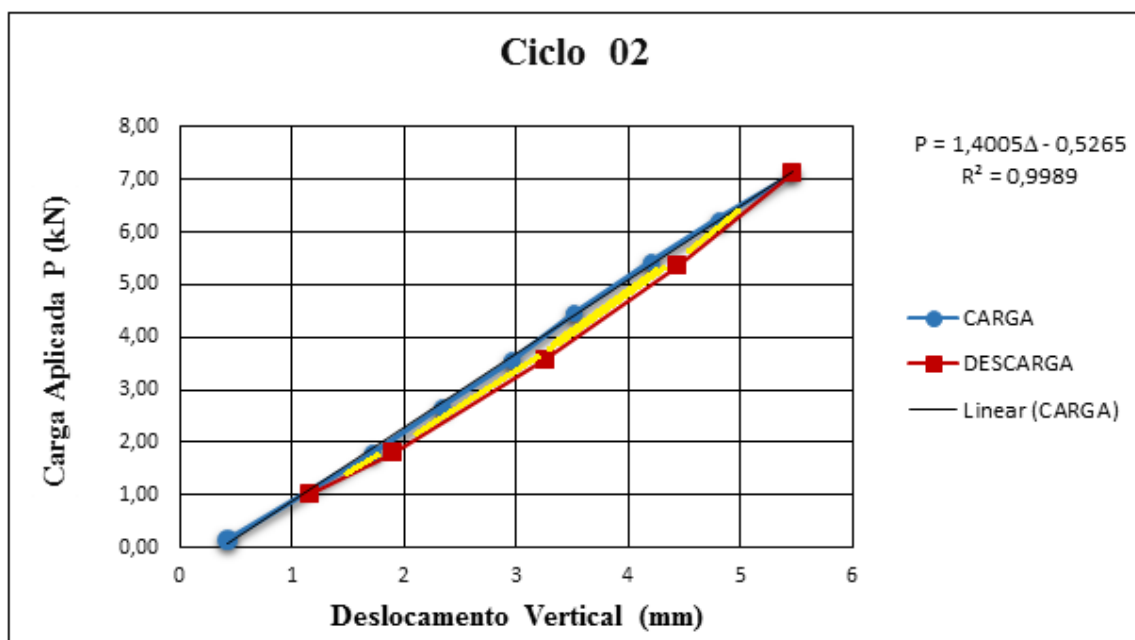


Figura 5.21: Ciclo 2.

Contudo, no terceiro ciclo, Figura 5.22, as cargas são elevadas a 12 kN e a estrutura se acomoda novamente, registrando na descarga um deslocamento residual de 2 mm. O fato de

ter havido um deslizamento interno permanente, faz com que o coeficiente de rigidez caia de 1,4 para $1,32 \frac{kN}{mm}$.

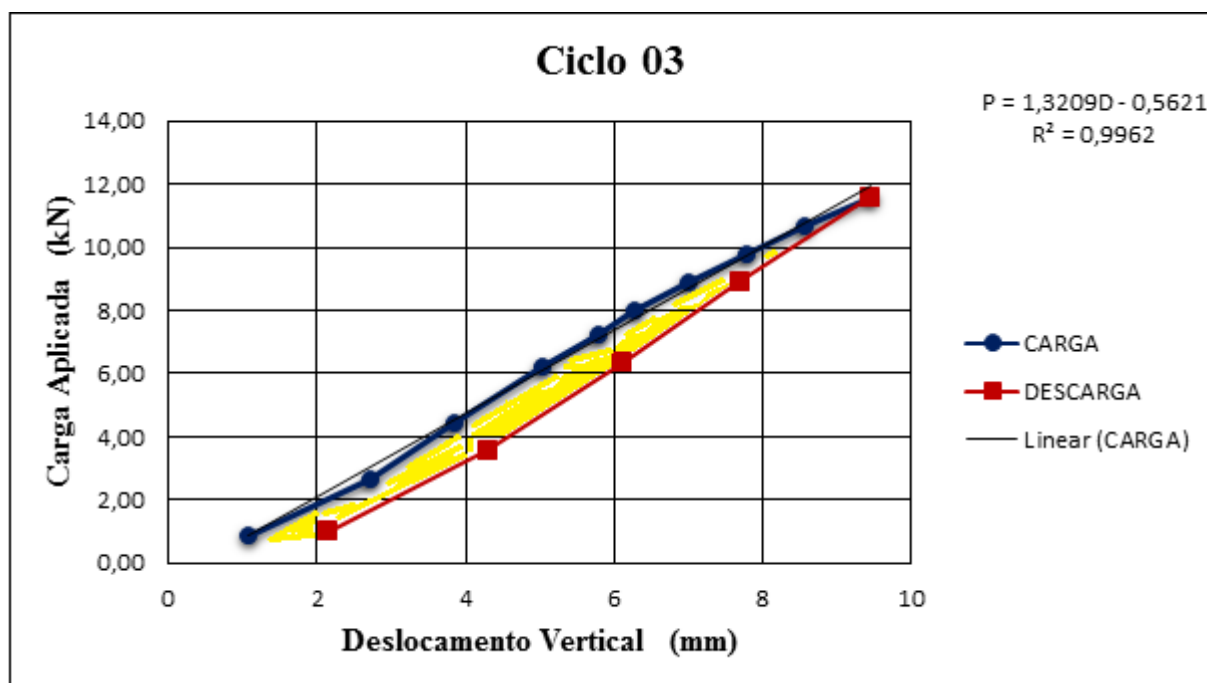


Figura 5.22: Ciclo 3.

Novamente, o fato da estrutura ter-se acomodado, faz com que ganhe novamente rigidez, de 1,32, Figura 5.22; para 1,35, Figura 5.23.

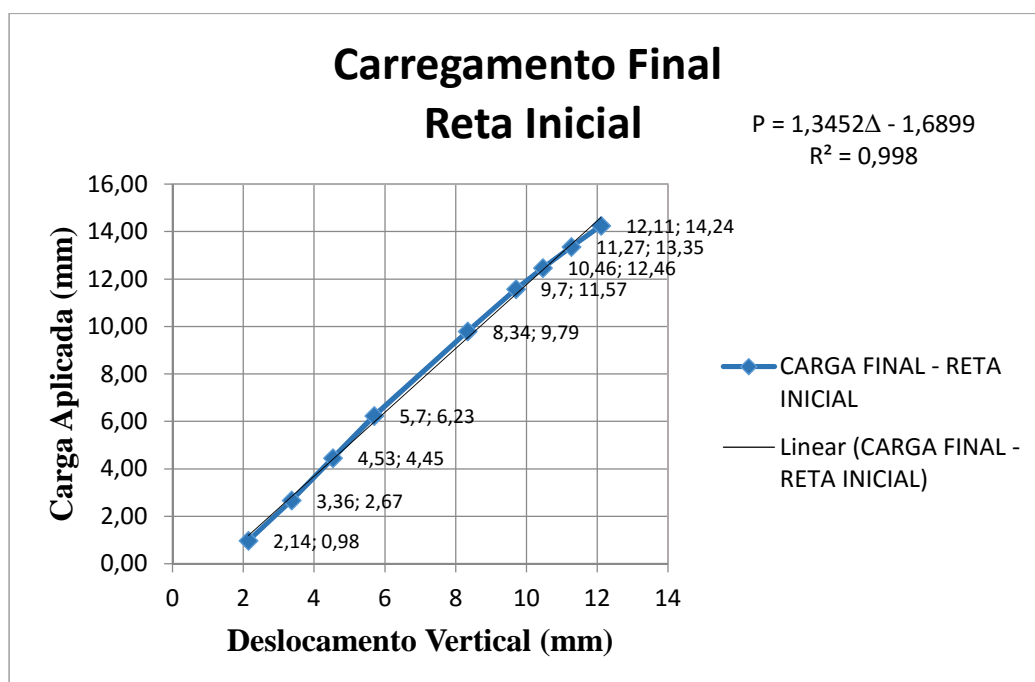


Figura 5.23: Carregamento Final – Reta Inicial.

Novamente o comportamento não linear do compósito das conexões não foi registrado nas curvas carga versus deslocamento, que permaneceram retilíneas. A estrutura teve um comportamento uniforme nos ciclos de carga e descarga, com coeficiente de rigidez médio de $1,32 \pm 0,09 \text{ MPa}$, com coeficiente de variação de 6,8% que denota o comportamento uniforme da estrutura sob ciclos de carga e descarga, ou seja, manteve a mesma configuração em todos os ciclos.

• *Modelagem Numérica*

De Silva (2014) constatou-se que os bambus podem ser analisados como barras prismáticas até comprimentos de cerca de $65\bar{D}$. O diâmetro externo médio de uma barra \bar{D} é obtido como a média dos diâmetros médios das extremidades, estes tomados como a média entre o maior e o menor diâmetro da extremidade, distintos visualmente e medidos com paquímetro. Do mesmo modo, a espessura média de parede \bar{t} é a média das espessuras médias das extremidades, essas tomadas como a média entre a maior e a menor espessura da extremidade, distintas visualmente e medidas com paquímetro.

Considerou-se a mesma simplificação para as treliças em estudo. Neste caso, todos os bambus foram simulados como elementos de barra retos, seção circular – pipe - com diâmetro médio $\bar{D} = 5 \text{ cm}$ e espessura média de parede $\bar{t} = 6 \text{ mm}$. Para os bambus tracionados considerou-se o módulo de elasticidade médio obtido nos ensaios, $E_T = 20658 \text{ MPa}$ e o módulo à compressão, $E_C = 15885 \text{ MPa}$. Os nós B e D foram deslocados de 1 cm do plano definido pelos nós A, C e E; Figura 5.24; pois os nós compósitos têm uma fabricação artesanal e essas possíveis imperfeições fazem com que o banzo superior possa flambar lateralmente logo que se comece a aplicar carga vertical à estrutura.

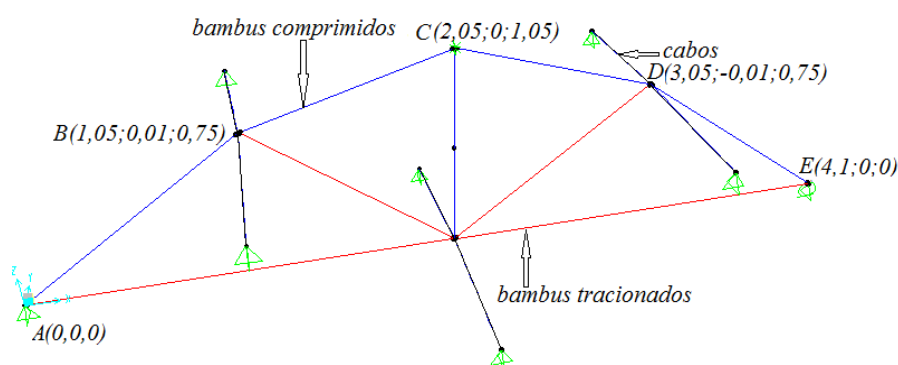


Figura 5.24: Nós B e D deslocados 1cm perpendicularmente ao plano da treliça. (SAP 2000)

Conforme Tabelas 3.2 e 3.3, o material compósito tem módulo de elasticidade em compressão $E_{cc} = 343 \text{ MPa}$ e em tração $E_{ct} = 841 \text{ MPa}$. Ou seja, a estrutura tem nós flexíveis, com comportamento não linear elástico em compressão e não linear em tração, conforme Figuras 3.7 e 3.10 respectivamente e provavelmente não linear elástico também em tração, embora não se possa afirmar com os testes realizados. A simulação do compósito foi feita considerando-se 1 cm da extremidade de cada barra com as propriedades do compósito, mantendo-se a mesma seção transversal da barra, Figura 5.25.

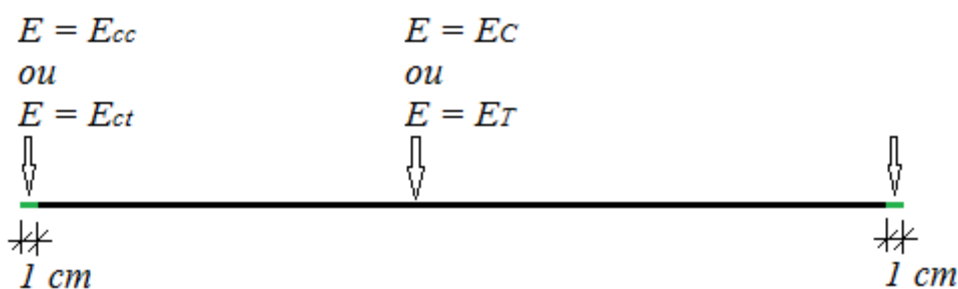


Figura 5.25: Elemento de barra tipo.
(Arquivo pessoal da Autora)

O elemento de barra tipo foi obtido comparando-se as curvas Carga x Deslocamento Vertical do experimento com a mesma curva para a simulação numérica. Para que houvesse coincidência dos dois resultados foi necessário que se considerasse uma influência do material compósito de 1 cm na extremidade de cada barra. A Tabela 5.3 compara os resultados experimentais e os numéricos, para cada passo de carga.

Tabela 5.3: Comparação dos Resultados Experimentais e Numéricos.

Carga (kN)	0,98	2,67	4,45	6,23	9,79	11,57	12,46	13,35	14,24	15,13	16,02	16,91
Desl.Exp (mm)	2,14	3,36	4,53	5,7	8,34	9,7	10,46	11,27	12,11	13,03	14,41	15,5
Desl.Num (mm)	0,8	2,2	3,7	5,2	8,2	9,8	10,5	11,3	12,0	12,8	13,5	14,3

Salienta-se a coincidência dos pontos hachurados na Tabela 5.3, que se situam praticamente sobre uma linha reta. A curva experimental apresenta uma perda de rigidez a partir da carga de 15,13 kN, muito provavelmente pelo fato da estrutura ter iniciado a flambagem lateral do banzo superior para esse nível de carga, Figura 5.26 ou mesmo pela não linearidade física do compósito, não considerada nessa simulação.

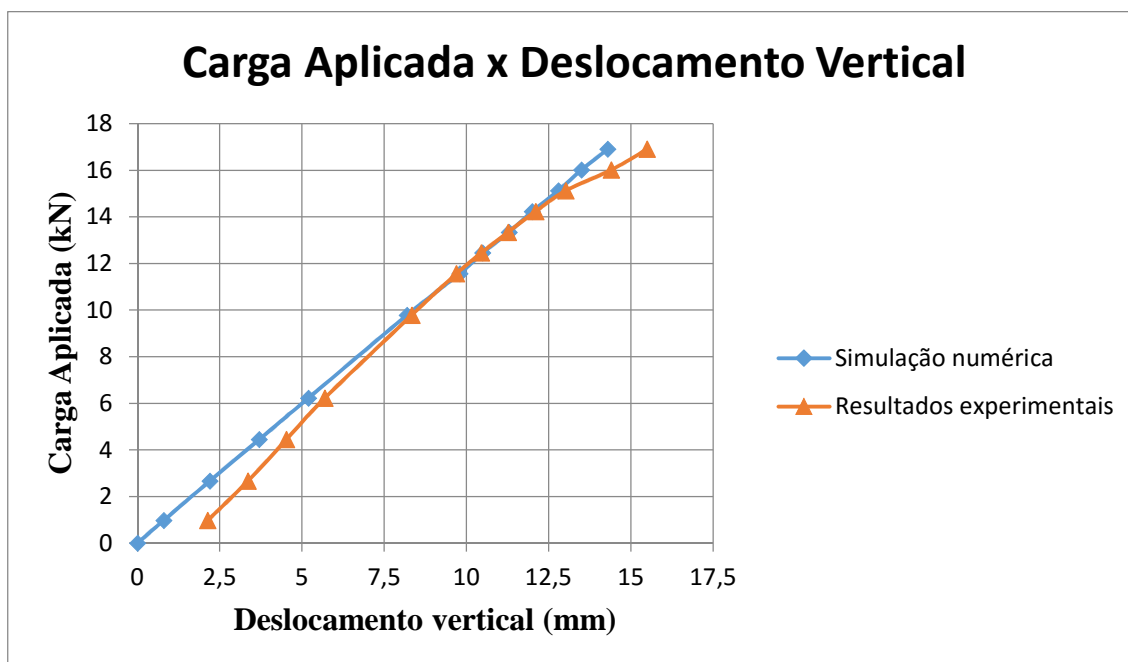


Figura 5.26: Comparação das Curvas Experimental e Numérica.

O carregamento experimental da Figura 5.26 refere-se ao último carregamento da série de carregamentos registrados na Figura 5.19. Portanto, já havia um deslocamento residual de 1,5 mm, de acomodação da própria estrutura, ao se iniciar este carregamento, que levou a estrutura à instabilidade para a carga de 16,91 kN. Neste momento, os nós B e D deslocaram-se cerca de 40 cm perpendicularmente ao plano da treliça em sentidos opostos. Os cabos de contravento foram puxados nessa direção, em sentidos opostos nos nós B e D.

Procurando-se ajustar ainda mais os resultados experimentais e numéricos, constatou-se que reduzindo-se o comprimento de influência do compósito, de 10 mm para 8,2 mm, obteve-se os resultados da Figura 5.27, para níveis de carga até 14 kN. É sempre surpreendente a coincidência dos resultados experimentais e numéricos, tendo-se em vista a série de simplificações assumidas quanto à geometria dos bambus, mas por ser recorrente a precisão que se consegue, pode-se dizer que o bambu tem um comportamento mecânico muito previsível, apesar de ser um tubo natural, o que é um fator favorável para se construir com o bambu. Na Figura 5.27 compara-se também o experimento com uma simulação em que não se considerasse a influência do compósito, ou seja, uma estrutura com barras de bambu se tocando, obtendo-se uma estrutura 64% mais rígida.

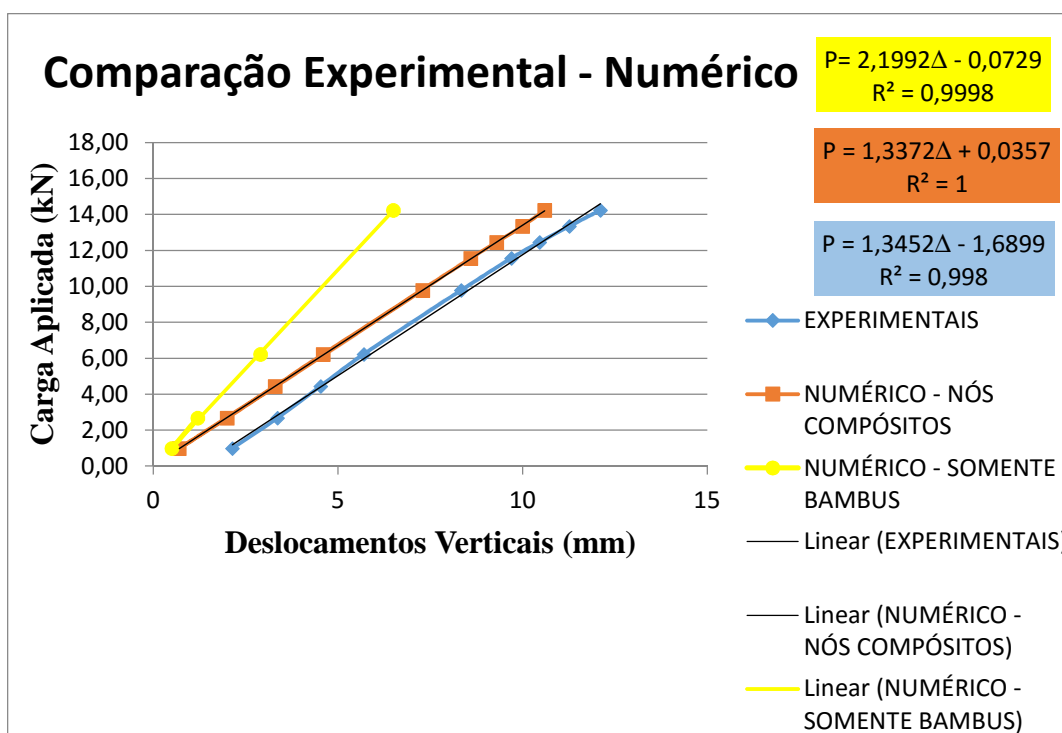


Figura 5.27: Comparação dos resultados (numérico e experimental).

Quanto às forças atuantes nas barras, tem-se, para a carga máxima aplicada, os valores apresentados na Figura 5.28, estimadas pela simulação numérica.

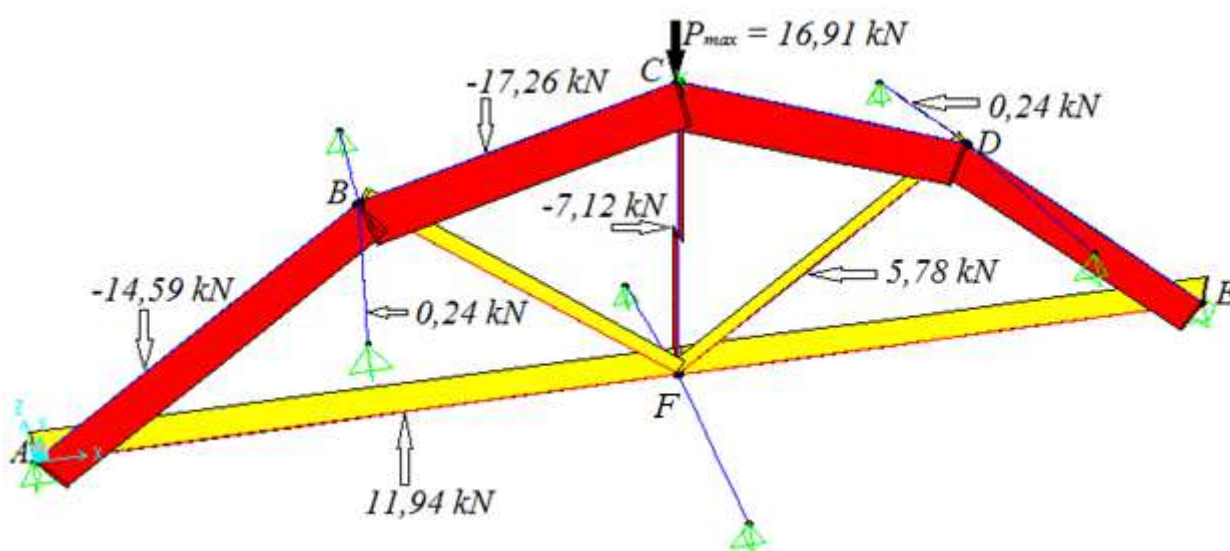


Figura 5.28: Forças axiais nas barras da estrutura e nos cabos de contraventamento. (SAP 2000)

A barra do banzo inferior foi construtivamente interrompida no centro e unida pelo material compósito proposto, exatamente por ser a barra mais solicitada em tração, com o objetivo de se avaliar o desempenho da ligação no protótipo.

Na busca de uma explicação para a instabilidade registrada, investigamos as prováveis tensões máximas nos bambus do banzo superior, para a carga de $P = 15,13 \text{ kN}$, onde já se inicia uma perda de rigidez da estrutura, Figura 5.26. Para $P = 15,13 \text{ kN}$ tem-se as forças axiais nas barras dadas na Figura 5.29.

Suponha-se que a barra AB tenha na realidade espessura média de parede de 7 mm e diâmetro externo médio $D = 5 \text{ cm}$. Então tem-se $A = 9,5 \text{ cm}^2$ e $I = 22,4 \text{ cm}^4$. Seja também uma imperfeição acidental $e_a = \frac{l_0}{200} = \frac{127}{200} = 0,64 \text{ cm}$. Seja também o módulo de elasticidade dessa barra igual a 18 GPa . Tem-se então uma carga de Euler $F_E = 24,65 \text{ kN}$. Segundo Silva (2014) deve-se considerar um coeficiente de fluência $\phi = 2,5455 \frac{P_{max}}{F_E} = 2,5455 \frac{13,1}{24,65} = 1,35$. Ou seja, tem-se também uma imperfeição inicial antecipada, devida à fluência, igual a $e_c = \phi e_a = 0,86 \text{ cm}$.

Então, aplicando-se a Eq. 5.9, que refere-se à compressão máxima no lado côncavo da barra comprimida, tem-se:

$$\sigma_c = \frac{13,1}{9,5} + \frac{13,1(0,64 + 0,86)2,5}{22,4 \left(1 - \frac{13,1}{24,65}\right)} = 1,37 + 4,68 = 6,05 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = 60,5 \text{ MPa} \quad (5.9)$$

Este nível de tensões está elevado porém menos crítico do que no Protótipo 1, onde se atingiu 80 MPa . Como explicado anteriormente, os ensaios dos corpos de prova de bambu sob compressão tiveram que ser interrompidos no limite da máquina, relativamente baixo e igual a 30 kN . De qualquer forma, este bambu resistiu em tração tensões superiores a 300 MPa , o que sugere que em compressão possa ter resistência da ordem de 100 MPa , não representando nenhum problema para o material, o nível de tensões estimado.

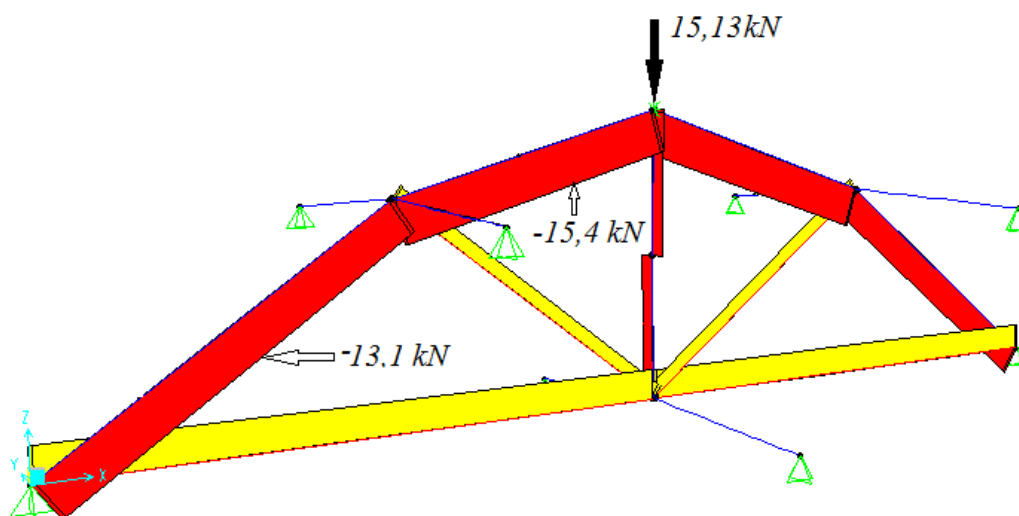


Figura 5.29: Forças axiais de compressão para uma solitação de 15,13 kN. (SAP 2000)

Analogamente, para a barra BC, supondo-a com as mesmas dimensões da seção transversal da barra AB, teríamos:

Imperfeição acidental $e_a = \frac{l_0}{200} = \frac{102}{200} = 0,51 \text{ cm}$. Seja também o módulo de elasticidade dessa barra igual a 18 GPa . Tem-se então uma carga de Euler $F_E = 38,21 \text{ kN}$. Segundo Silva (2014) deve-se considerar um coeficiente de fluência $\phi = 2,5455 \frac{P_{max}}{F_E} = 2,5455 \frac{15,4}{38,21} = 1,03$. Ou seja, tem-se também uma imperfeição inicial antecipada, devida à fluência, igual a $e_c = \phi e_a = 0,53 \text{ cm}$.

Então, aplicando-se a Eq. 5.10, tem-se:

$$\sigma_c = \frac{15,4}{9,5} + \frac{15,4(0,51 + 0,53)2,5}{22,4 \left(1 - \frac{15,4}{38,21}\right)} = 1,62 + 2,99 = 4,61 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = 46,1 \text{ MPa} \quad (5.10)$$

Essas avaliações mostram que o material não teve nenhum dano. Tudo converge realmente para explicar a carga limite pela perda de rigidez da estrutura pela instabilidade. Muito provavelmente se atingiu o carregamento crítico para a estrutura e este seja um ponto de bifurcação, independentemente dos cabos de contravento terem sido ou não puxados enquanto se aumentava a carga. Outra explicação poderia ser que as barras verticais onde se fixavam os cabos, e que estavam em balanço, já que engastadas na laje de reação, Figura 5.18, teriam fletido sob ação da força máxima estimada, igual a $0,24 \text{ kN}$, Figura 5.28. Ou seja, o contravento deixou de funcionar corretamente, fato curioso, já que demonstraria a importância da rigidez dos contraventos para que funcionem eficazmente. Quanto ao bom funcionamento

do sistema, observou-se também a importância de se travar o nó F . Sem o contravento do nó F , ele se desloca perpendicularmente ao plano da treliça, para cargas relativamente baixas, já que o pendural neste caso está comprimido e o nó C está travado pelo atuador.

Registra-se aqui um curioso fenômeno: - ao se retirar o carregamento, a tesoura praticamente voltou à configuração inicial, sem dano aparente das conexões, demonstrando mais uma vez a flexibilidade das bioconexões compósitas e o comportamento elástico constatado nos experimentos do material, Figuras 3.7 e 3.10.

Capítulo 6

CONCLUSÃO

Em princípio, o tipo de conexão desenvolvido, com os materiais e técnicas utilizadas, parece ser mais adequado para bambus de pequeno diâmetro, pela trabalhabilidade e menor consumo de materiais.

O compósito desenvolvido apresentou comportamento elástico não linear em compressão e comportamento não linear em tração, provavelmente também elástico, porém não investigado.

O relativamente baixo módulo de elasticidade do compósito, faz com que se tenha uma ligação flexível, de comportamento muito interessante e condizente com a microestrutura do bambu, pois não o força em nenhuma posição específica quando das deformações excessivas, como aconteceu com o Protótipo II, cujo banzo superior flambou lateralmente. Após a retirada do carregamento a estrutura voltou à forma inicial plana, sem nenhum dano visível. As ligações parecem ter permanecido intactas. Após o primeiro experimento do Protótipo II, que não foi destruído, tentou-se destruí-lo em um segundo experimento, tracionando melhor os cabos de contraventamento, julgando-se que a sua relaxação fosse responsável pela flambagem. Disto constatou-se que não foi a relaxação dos cabos e sim as barras verticais onde eles se amarraram que fletiram sob a força de tração dos mesmos, permitindo a flambagem. Constatou-se também que a estrutura ainda tinha capacidade de carga, ou seja, a flambagem lateral não a havia danificado. Este resultado é muito surpreendente, pois ainda que o bambu seja muito flexível, uma ligação parafusada provavelmente iria danificar os bambus, visto que a estrutura saiu do plano em cerca de 40 cm para cada lado, Figura 5.18.

A técnica de fabricação permitiu produzir treliças planas, que permaneceram realmente planas após a secagem, com relativa facilidade. Basta imaginar como seria mais difícil produzi-las com chapas e parafusos, não só as exigências de gabaritação para furação das barras como para se conseguir uma estrutura plana, devido às dimensões livres do bambu.

O comportamento mecânico dos protótipos foi totalmente satisfatório nestes experimentos estáticos, no tempo em que foram ensaiados.

As estruturas apresentaram comportamento bastante uniforme durante os ciclos de carga e descarga, apresentando muito pouca acomodação entre os elementos, relação linear carga versus deslocamento em todos os ciclos e coeficiente de rigidez praticamente constante em todos os ciclos.

Os testes de cisalhamento da colagem por compressão e por tração também apresentaram resistência uniforme, com baixo coeficiente de variação e valor de resistência também bastante satisfatório. A observação da superfície de ruptura permite inferir que pode-se melhorar essa aderência fazendo-se um lixamento mais profundo e mais intenso das superfícies aderentes do bambu, com lixa grossa de aço número 35.

A pintura com resina das superfícies do bambu, previamente à execução das colagens, com um período de 10 a 15 minutos de espera, aumenta a eficiência da colagem.

Não ficou claro, na observação visual da superfície de ruptura, se ela ocorreu dentro do compósito ou na linha adesiva.

O bambu *Bambusa tuldoides*, segundo o orientador dessa dissertação, apresentou valores de resistência bem superiores aos bambus *Dendrocalamus giganteus* e *Phyllostachys pubescens*, estudados em investigações anteriores. Pode-se dizer que este bambu em tração é um aço verde, com a diferença de que tem baixo módulo de elasticidade. A resistência à tração equivaleu à resistência do aço enquanto o módulo de elasticidade é cerca de 10% do módulo do aço. Esta é a principal característica dos bambus em geral, serem muito resistentes e flexíveis. Dos corpos de prova ensaiados em tração apenas um apresentou ruptura total da seção transversal, e foi exatamente o corpo de prova que apresentou a maior resistência. Os demais romperam-se internamente e a máquina os abortou conforme estava programado. Já em compressão atingiu-se o limite da máquina e foi impossível romper os corpos de prova. Foram determinados apenas os módulos de elasticidade.

Constata-se assim que os corpos de prova precisam ser melhorados, produzidos com maior esmero, para que possam realmente ser rompidos. Os corpos de prova em compressão também apresentam problemas para determinação da tensão de ruptura pois rompem sem

exceção no contato com a prensa. Recomenda-se por isso que se façam testes de compressão para determinação da resistência em pequenos segmentos da parede do bambu, por exemplo, segmentos de 1,5 a 2 cm de altura.

Lembramos que treliças planas podem ter outras utilizações além das edificações da construção civil, podendo ser também utilizadas em veículos.

Como recomendações para futuros trabalhos sugere-se aumentar a bateria de ensaios e promover algum tipo de envelhecimento das ligações, procurando reproduzir as condições ambientais de envelhecimento normais e alguns casos especiais, onde as ligações pudessem ser saturadas em água, para simularem a exposição da estrutura às chuvas. Variações de temperatura e exposição aos raios ultravioleta seriam outras formas de envelhecimento pertinentes às condições das estruturas da construção civil. Testar resinas epoxílicas para comparações seria também recomendável. As resinas poliuretanas à base de mamona, no Brasil, custam 30% das resinas epoxílicas.

A técnica de fabricação pode também ser melhorada, no sentido de ficar numa posição mais confortável para os fabricantes, bem como no sentido de economizar resina e facilitar o manuseio, para “lambrecar menos”. Contudo, de um modo geral, os resultados foram bastante satisfatórios e encorajadores.

Referências Bibliográficas

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: NBR 7190

Beraldo, A. L. [1987]. Bambucreto: O Uso do Bambu como Reforço do Concreto. In: XVI CONBEA, Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Anais. Jundiaí, SP, v. II, Jul, 1987.

Berndsen, R. S.; Klitzke, R. J.; Batista, D. C.; Nascimento, E. M.; Ostapiv, F. [2010] Propriedades Físicas do Bambu-Mossô (*Phyllostachys pubescens*) em Diferentes Idades e Posições do Tronco. Floresta, Curitiba, v. 40, n. 1, p. 183 – 192.

Candelaria, V. R. O.; Saulés, M. T. M.; Pazo, G. M. B. [2013]. Manual para la Construcción Sustentable com Bambú. Comisión Nacional Forestal – CONAFOR.

Ghavami, K. [1990]. Estruturas de Concreto Armadas com bambu. In: Colóquio sobre Estruturas de Concreto Armado e Protendido. vl. Rio de Janeiro: Puc-Rio, 1990.

Grosser, D.; Liese, W. [1974]. On the Anatomy of Asian Bamboo's, with Special Reference to their Vascular Bundles. Wood Science and Technology, N. 5, p. 290–312, 1974.v.

ISO 22156:2004 (Bamboo Structural Design); pode ser encontrada em:

<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:22156:ed-1:v1:en>

ISO 22157-1:2004 (Physical and Mechanical Properties_Part 1: Requirements); pode ser encontrada em: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:22157:-1:ed-1:v1:en>

ISO 22157-2:2004 (Physical and Mechanical Properties_Part 2: Laboratory Manual); pode ser encontrada em: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:22157:-2:ed-1:v1:en>

Liese, W. [1998]. The Anatomy of Bamboo Culms. International Network for Bamboo and Rattan. China.

Lopez, O. H. [1981]. Manual de Construcción con Bambu: Construcción Rural. Bogotá, Universidad Nacional de Colombia.

López, O. H. [2003]. Bamboo-The Gift of the gods. Bogotá.

Lukusa, B. B. [2014]. Análise de Galpão Modelo com Estrutura Treliçada de Bambu e Ligações Amarradas com Corda Sintética. Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG.

Mendes, G. D. Bambu: Manual De Utilização Em Construções. Pode ser encontrado em: www.avaad.ufsc.br/moodle/file.php/32/hiperlivro_materiais/bambu/Manual_de_utilizacao_do_bambu_em_construcoes_Gabriela_M1.pdf

Moreira, L. E.; Ghavami, K. [2015]. Limit State Design of Steel Pin Connections for bamboo Truss Structures. In: nocmat - Construction for Sustainability, Green Materials & Technologies. Key Engineering Materials.

Moreira, L. E.; Ripper, J. L. M. [2014]. Jogo das Formas: lógica do objeto natural. Rio de Janeiro: NAU.

Moreira, L. E.; Ribeiro, B. E. [2013] Bambu Tubes – Resistance to Transversal Kneading – Proceedings of the XIV Non Conventional Materials and Technologies – NOCMAT 2013, João Pessoa, Paraíba, PB.

Moreira, L. E.; Ghavami, K. [2012]. Limits States Analysis for Bamboo Pin Connections. Key Engineering Materials, Vol. 517, pp. 3-12.

Moreira, L. E. [1998]. Aspectos Singulares das Treliças de Bambu: Flambagem e Conexões. Tese de Doutorado. Rio de Janeiro: PUC-RJ, Departamento de Engenharia Civil.

Moreira, L. E.; Ghavami, K. [1997]. Dimensionamento de Estruturas de Bambu. In: Romildo Dias Toledo Filho. (Org). Materiais não Convencionais para Construção Rural. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, v.1, p. 237-291.

Moreira, L. E. [1991]. Desenvolvimento de Estruturas Treliçadas Espaciais de Bambu. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro: PUC-RJ, Departamento de Engenharia Civil.

Nascimento, A. P. N. [2013]. Princípios de Funcionamento e Condições Limites de Ligações Aparafusadas em Estruturas de Bambu. Belo Horizonte.

Hsiung, W. [1988]. Prospects for Bamboo Development in the World. In: IBC 88, Prafrance.

Oliveira, L. F. A.; Gumieri, A. G. [2013]. Conhecendo Bambus e suas Potencialidades para Uso na Construção Civil. UFMG – Escola de Engenharia; especialização em Construção Civil.

Pereira, M. A. R.; Beraldo, A. L. [2007]. Bambu de Corpo e Alma. Bauru, SP: Canal 6.

Podovan, R. B.; Pereira, M. A. R.; Landim, P. C. [2010]. O Bambu na Arquitetura: Design de Conexões Estruturais. Universidade Estadual de São Paulo; Bauru.

Rabin, A. [2010]. Imagens Coloridas de Superfícies de Terra Crua. Dissertação (Mestrado em Design) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Ramos, C. M. C. [2016]. Cadeira de Rodas com Design Estrutural em Tensegrity de Bambu. Tese de Doutorado (Pós-graduação em Design) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Silva, F. J.; Moreira, L. E.; Rodrigues, F. C. [2014]. Design e Análises de Mastros de Bambu para Aplicações Estruturais. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG.

Santos, G. C. [2014]. Desenvolvimento e Análise de Abrigos Leves Suportados por Mastros de Bambu em Feixe. Belo Horizonte.

Victor, G. R. [2007]. Design para Saúde: Uma Proposta. Projeto de Qualificação - (Doutorando em Departamento de Artes) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Walter, P.; Michèle, P. [2003]. Estruturas de Madeira. Editora LTC, v.6, Rio de Janeiro.

Anexo I

A1. Solicitação múltipla da amarração rígida compósita

Lukuza (2014) havia estudado em sua monografia de TIM III, sob orientação do Prof. Luís Eustáquio, orientador dessa dissertação, o comportamento de um galpão totalmente amarrado com cordas, produzido pela empresa BAMBUTEC, com sede na cidade do Rio de Janeiro, Figura A1.



Figura A1: Galpão Bambutec – Colégio São Marcelo – Gávea - Rio de Janeiro.
(Arquivo Prof. Luís Eustáquio)

Como as ligações amarradas são muito deslocáveis, já há algum tempo o Prof. Luís Eustáquio vinha pensando em amarrar as barras com uma ligação mais rígida e que colasse na superfície. Foi assim que surgiu este primeiro corpo de prova, realizado pelo Prof. Luís e seu então orientando Billy Lukuza, para que em algum momento pudesse ser ensaiado e sua ideia recuperada e avançada. A amarração tem um desenho previamente estudado de forma a dar o melhor travamento entre as barras, Figura A2, impedindo o deslocamento relativo, como acontece numa ligação com cordas.



Figura A2: Desenho da amarração rígida.
(Arquivo Prof. Luís Eustáquio)

A oportunidade de ensaiar aconteceu então nessa dissertação, tendo sido portanto o primeiro corpo de prova ensaiado.



Figura A3: Corpo de prova para solicitação múltipla da amarração rígida.
(Arquivo pessoal da Autora)

Este corpo de prova compõe-se de 3 segmentos de bambu da espécie *Phyllostachys pubescens*, amarrados entre si pela bandagem compósita de tecido de algodão embebida em resina poliuretana. Os diâmetros dos caules e suas respectivas espessuras foram medidos com o auxílio de um paquímetro e calculadas as médias.

Tabela A1: Dimensões dos bambus

Bambu	Diâmetro (mm)	Espessura (mm)
B1	73,02	7,29
B1'	79,24	12,13
B2	69,50	9,3

Os experimentos foram realizados na máquina universal de ensaios mecânicos de 300kN – Modelo EMIC 23-300 - no Centro de Estudos Avançados em Móveis, Madeira e Novos Materiais - CEPAM3. O ensaio foi instrumentado de acordo com a Figura A4, utilizando-se dois relógios comparadores. O relógio da esquerda – R1 – mede os deslocamentos no sentido da barra B2, e o relógio da direita – R2 – mede os deslocamentos verticais.

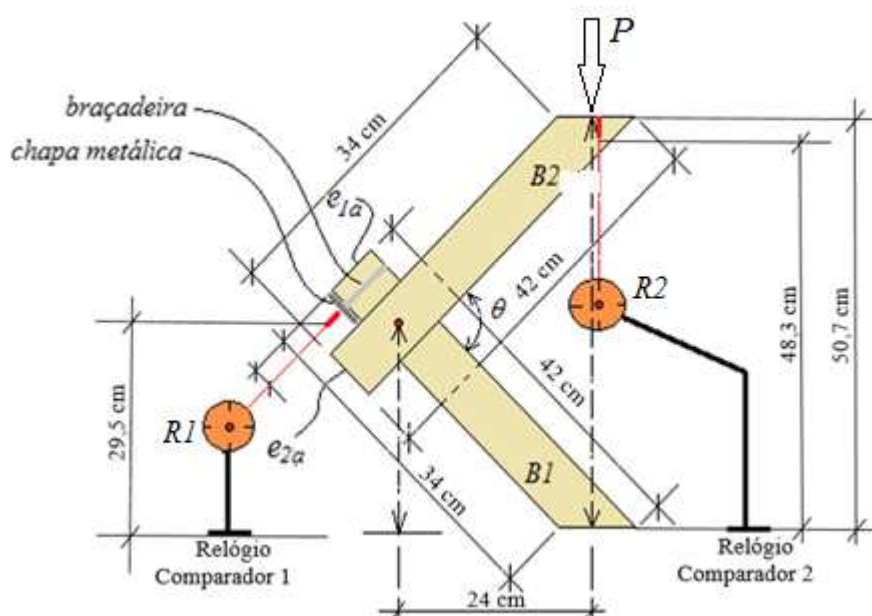


Figura A4: Esquema de ensaio e medidas externas.
(Arquivo pessoal da Autora)

Os bambus foram cortados nas extremidades em ângulo de 45° para que tanto o apoio como o ponto de aplicação das cargas se situasse sobre o mesmo alinhamento.

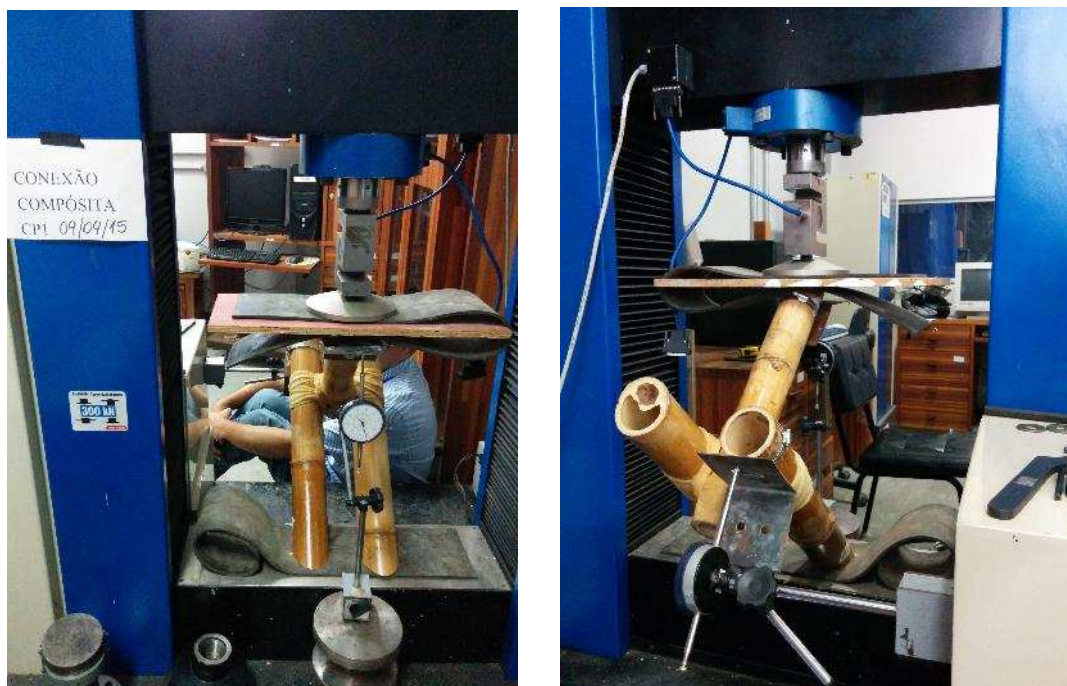


Figura A5: Teste de compressão do sistema.
(Arquivo pessoal da Autora)

Na montagem foi usado neoprene para nivelar a base e o apoio superior - célula de carga – e também uma tábua. Durante o ensaio foram feitos períodos de carga e descarga da estrutura. O primeiro ruído proveniente da ligação se apresentou para uma carga de 12 *kN*. Quando aumentada até 15,5 *kN*, houve um aumento do ruído e optou-se pela retirada de R1. R2 também foi retirado ao se atingir a carga de 16,8 *kN* e a partir deste ponto a leitura dos deslocamentos foi obtido pela máquina até a ruptura. Na Figura A6 tem-se a ruptura e colamento da bandagem compósita.



Figura A6: Ruptura e descolamento local da bandagem.
(Arquivo pessoal da Autora)

A ruptura do compósito iniciou-se com uma pequena trinca que se propagava à medida em que se aplicava mais carga.

A Figura A7 mostra os resultados de carga versus deslocamento do ensaio, com todos os períodos de carga e descarga da estrutura. A curva em azul mostra os deslocamentos de R1 e em vermelho os de R2.

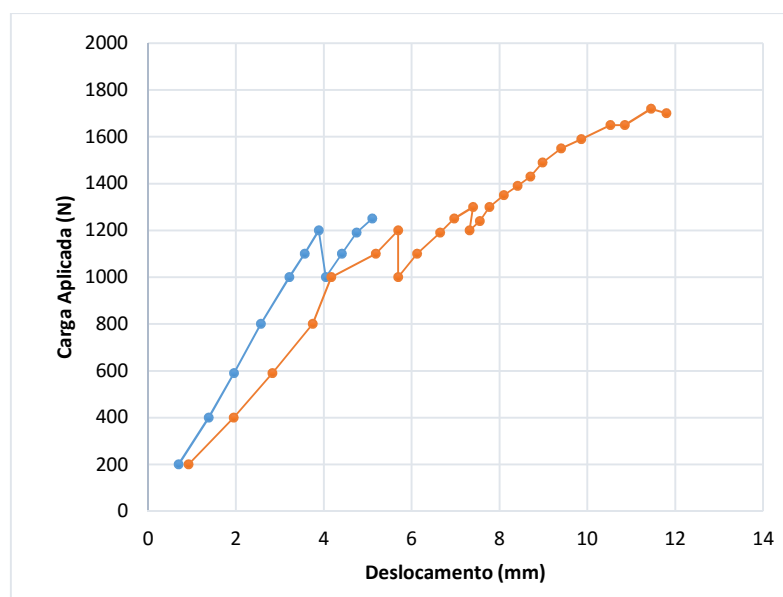


Figura A7: Curva Carga – deslocamento.

Eliminando-se os pontos de acomodação tem-se as curvas da Figura A8. Estas curvas mostram que até cargas de 1,2 kN, que correspondem a um momento na bandagem igual a 0,28 kN×m, a estrutura teve uma relação linear carga deslocamento.

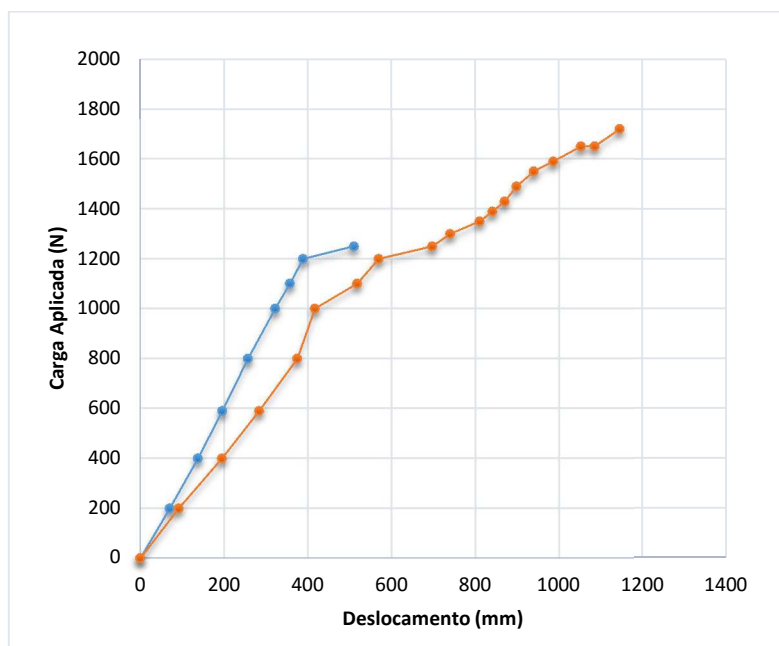


Figura A8: Curvas Carga deslocamento filtradas das acomodações.

Antes que se aprofundasse a análise deste experimento, realizou-se um segundo experimento, no corpo de prova da Figura A10, que também já estava previamente preparado nas investigações de Lukuza. A ideia seria criar um confinamento para evitar o deslizamento das cordas de amarração dos bambus, Figura A9.



Figura A9: Bandagens compósitas confinantes da corda de amarração.
(Arquivo Prof. Luís Eustáquio)

- **Cisalhamento do anel de bandagem por compressão**

A bandagem compósita consistiu de repetidas voltas em torno de um segmento de bambu, após a preparação da superfície por meio de lixamento livre, sem muita preocupação com a profundidade e direção das ranhuras nem com o grão da lixa. Para a realização do teste foi usado um bambu de diâmetro maior que funcionou como um êmbolo deslizando por fora, transferindo a carga sobre o anel da bandagem, até que se rompesse a colagem por cisalhamento. A Figura A10 mostra como foi montado o ensaio e as respectivas medidas.

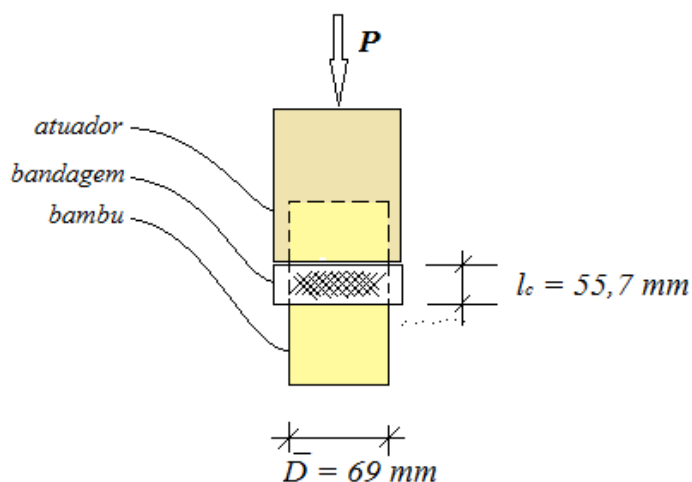


Figura A10: Projeto do experimento.
(Arquivo pessoal da Autora)

A ruptura da estrutura se deu pelo descolamento da bandagem em uma parte da superfície adesiva e também dentro da bandagem delaminando-a, Figura A11.

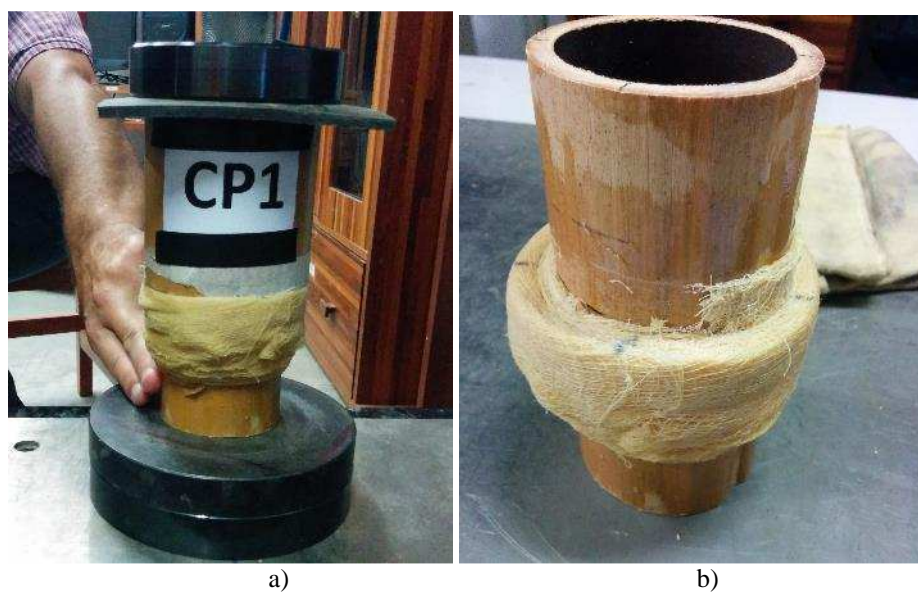


Figura A11: a) Condição de ensaio b) Ruptura por cisalhamento
(Arquivo pessoal da Autora)

A ruptura aconteceu para uma carga de 27 kN . Dividindo-se a carga de ruptura pela superfície colada, sendo o diâmetro externo do corpo de prova $D = 69 \text{ mm}$ e o comprimento de colagem $L = 55,7 \text{ mm}$, obteve-se a tensão de ruptura de $2,24 \text{ MPa}$. Este resultado foi assumido como bom pois a resina já se encontrava aberta por um período superior a 6 meses, o que não é recomendável. Pensou-se também que a colagem poderia ser melhor realizada e realmente

poderia. Nessa época não sabíamos que uma pintura inicial do substrato e um tempo de espera melhoraria significativamente a colagem, informação obtida posteriormente do fabricante.

Neste instante delineou-se por onde seguiria a dissertação. Abandonou-se a ideia de se amarrarem os bambus em planos diferentes e assumiu-se para todas as barras um único plano, para produzir a estrutura mais simples possível e determinar seus estados limites. Por uma questão de economia de materiais e curiosidade quanto ao funcionamento e aplicabilidade estrutural dos bambus da espécie *Bambusa tuldoides*, que tem uma forma mais irregular do que os bambus *Phyllostachys*, optou-se por trabalhar com aqueles. Daí surgiu o objeto de utilidade dessa investigação, que após todo o desenvolvimento permitiu-nos denominá-lo Treliça Plana de Bambu com Bioconexões Compósitas.